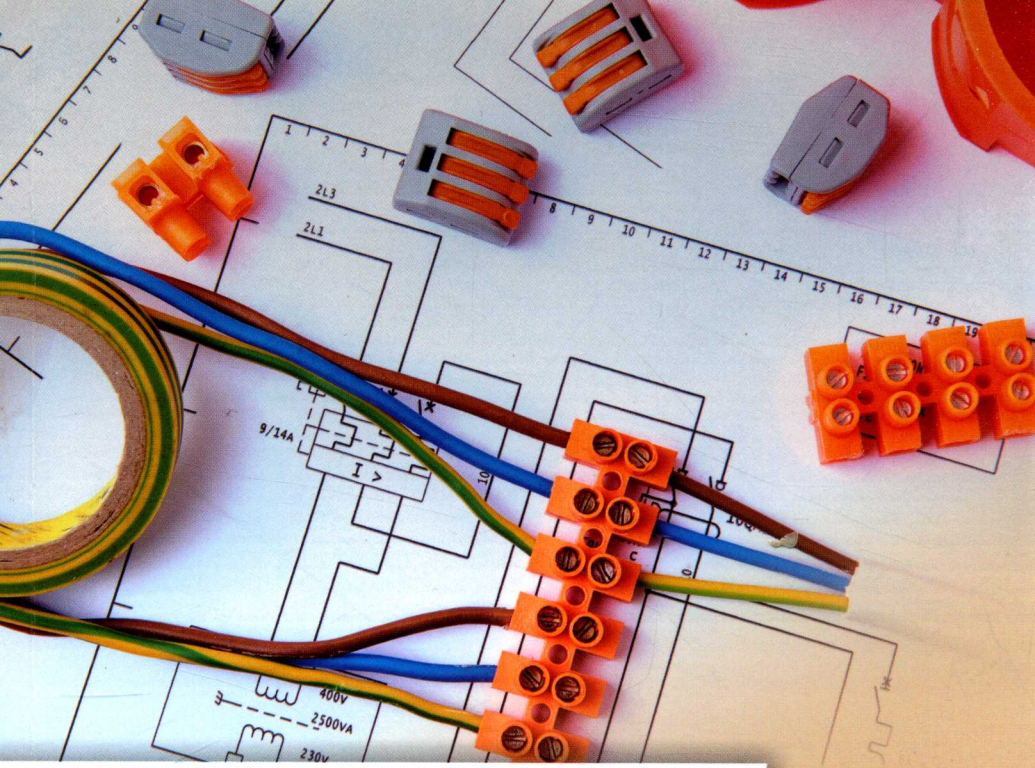
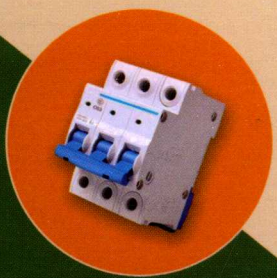


电工材料

实用手册

主编 张 军

DIANGONG
CAILIAO
SHIYONG
SHOUCE



时代出版传媒股份有限公司
安徽科学技术出版社

电工材料实用手册

主编　张　军

时代出版传媒股份有限公司
安徽科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

电工材料实用手册/张军主编.—合肥:安徽科学技术出版社,2018.5
ISBN 978-7-5337-7487-5

Ⅰ.①电… Ⅱ.①张… Ⅲ.①电工材料-技术手册 Ⅳ.①TM2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 015927 号

电工材料实用手册 主编 张军

出 版 人:丁凌云 选题策划:叶兆恺 责任编辑:叶兆恺
责任校对:盛 东 责任印制:廖小青 封面设计:王 艳
出版发行:时代出版传媒股份有限公司 http://www.press-mart.com
安徽科学技术出版社 http://www.ahstp.net
(合肥市政务文化新区翡翠路 1118 号出版传媒广场,邮编:230071)
电话:(0551)63533330
印 制:安徽新华印刷股份有限公司 电话:(0551)65859178
(如发现印装质量问题,影响阅读,请与印刷厂商联系调换)

开本:880×1230 1/32 印张:19.75 字数:735 千
版次:2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5337-7487-5 定价:59.00 元

版权所有,侵权必究

编写委员会

主　　编　张　军

副 主 编　高建党　罗　琼

编写人员　徐　峰　杨小波　夏红民　卢小虎　姚东伟
杨光明　满维龙　程宇航　汪倩倩　汪立亮
连　昺　黄　芸　张能武　潘旺林　陈忠民
徐伟平　冯宪民　魏金营　周　钊　程宇航
邱立功　潘珊珊　杨小军　刘兴武　唐亚鸣
韩满林　桂黎红　王治平　江建刚　夏红民
方立友　杨　文　孙　波　王吉华　李树军
姚韵红

内 容 简 介

本手册是一部综合性电工材料工具书，系统性较强，叙述简要，反映了现代许多新的电工材料，内容实用，便于查阅。是电气工作者的实用手册。全书共分二十五章，主要内容包括：常用电工基础知识、导电材料、电线电缆、电阻合金、电热材料、热电偶材料、热双金属材料、弹性合金材料、膨胀合金材料、电触头材料、熔体材料、电碳材料及其制品、磁性材料的基础知识、软磁材料、永磁材料、绝缘材料基础知识、气体电介质、液体电介质、绝缘纸品、绝缘纤维制品、绝缘浸渍材料、浸渍纤维制品、云母制品、电工用膜带及复合制品、电工用层压制品。

本手册可供从事设计、施工、运行、维护的电气技术人员和电气技术工人阅读，也可供电气管理人员及有关大专院校师生参考。

前　言

随着国民经济和现代科学技术的迅猛发展，我国电工的设计、制造、运行和控制技术发生了深刻的变革，一大批新原理、新材料、新结构、新工艺、新技术、新性能的产品得到广泛开发和应用，新的应用和新的需求同时也推动着电工技术本身的迅速发展。面对新的形势，广大从事电气工程技术工作的人员迫切需要知识更新，特别是学习和掌握与新的电工材料的性能及其选用知识。

在当前紧迫的形势下，我们在广泛市场调研和读者调查的基础上，组织编写这本《电工材料实用手册》。

本手册以翔实的资料，大量的插图、表格、数据，对常用的电工材料从分类、规格、性能和技术参数等方面知识作了较详尽的介绍，有较强的实用性。与同类书相比，具有内容紧凑、资料新颖、叙述详尽、通俗易懂、实用性强等特点。全书共分二十五章，主要内容包括：常用电工基础知识、导电材料、电线电缆、电阻合金、电热材料、热电偶材料、热双金属材料、弹性合金材料、膨胀合金材料、电触头材料、熔体材料、电碳材料及其制品、磁性材料的基础知识、软磁材料、永磁材料、绝缘材料基础知识、气体电介质、液体电介质、绝缘纸品、绝缘纤维织品、绝缘浸渍材料、浸渍纤维制品、云母制品、电工用膜带及复合制品、电工用层压制品。

本手册可供从事设计、施工、运行、维护的电气技术人员和电气技术工人阅读，也可供电气管理人员及有关大专院校师生参考。

编委会

目　录

第一章　常用电工基础知识 …… 1
第一节　常用名词 …… 1
第二节　常用电工计算公式 …… 3
一、电路的基本定律 …… 3
二、电路元件的计算公式 …… 4
三、交流电路 …… 10
四、磁路 …… 16
五、铁芯线圈电路 …… 18
六、电机 …… 20
第三节　常用计量单位及换算 …… 23
一、国际单位制的单位 …… 23
二、可与国际单位制并用的我国法定计量单位 …… 24
三、常用电磁量及其单位 …… 25
四、常用单位的换算 …… 27
第四节　常用物理量数据 …… 31
一、常用物理量常数 …… 31
二、电阻温度系数 …… 31
三、导体的电阻率 …… 32
四、常用物质的介电常数 …… 32
第五节　常用电工图形符号及文字符号 …… 33
一、常用电工图形符号 …… 33
二、电工文字符号 …… 62

第二章　导电材料 …… 74
第一节　导电材料的概述 …… 74
一、导电材料的电性能及机械性能 …… 74
二、导电材料的分类及用途 …… 78
三、导电材料的一般选用 …… 79
四、导电合金的强化及影响导电金属电阻的因素 …… 80
第二节　铜及铜合金 …… 81
一、铜的特性、品种及用途 …… 81

二、铜合金的品种、性能及用途 …… 82
三、电工产品对导电铜合金的性能要求、选用及注意事项 …… 89
第三节　铝及铝合金 …… 90
一、铝的特性、品种及用途 …… 90
二、铝合金的品种、特性及用途 …… 92
三、铝及铝合金的焊接与机械连接 …… 95
第四节　复合金属导体 …… 96
一、复合金属导体的分类、产品名称、特性和用途 …… 96
二、复合金属导体的加工 …… 98

第三章　电线电缆 …… 99
第一节　裸电线 …… 99
一、圆单线 …… 99
二、裸绞线 …… 107
三、软接线 …… 114
四、型线 …… 121
第二节　电磁线 …… 137
一、漆包线 …… 138
二、绕包线 …… 148
三、无机绝缘线 …… 168
四、特种电磁线 …… 169
五、电磁线的选用 …… 172
第三节　电气装备用电线电缆 …… 175
一、通用橡套软电缆 …… 175
二、电机、电器引出线 …… 180
三、电器、仪表安装线 …… 183
四、测量仪表、计算机用电缆 …… 185
五、电焊机用软电缆 …… 188
六、无线电装置用电缆 …… 189
七、摄影光源用软电缆 …… 189
八、电梯电缆 …… 190
九、机车车辆用电缆 …… 191
十、防水橡套电缆 …… 192
十一、家用电器用接插线 …… 193
十二、公路车辆用电缆电线 …… 197
十三、电气设备用电线电缆的选用 …… 199

第四节　电力电缆 …… 200
一、油浸纸绝缘电力电缆 …… 202
二、橡皮绝缘电力电缆 …… 206
三、聚氯乙烯绝缘电力电缆 …… 208
四、交联聚乙烯绝缘电力电缆 …… 210
五、电力电缆附件 …… 213
六、电力电缆选择 …… 221
七、电力电缆试验 …… 227
第五节　控制电缆 …… 229
一、聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制电缆 …… 230
二、交联聚乙烯绝缘控制电缆 …… 239
三、乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆 …… 244
四、船用控制电缆 …… 244
五、电子计算机用屏蔽控制电缆 …… 248
第六节　信号电缆 …… 250
一、信号电缆的型号、名称、用途及使用条件 …… 251
二、聚氯乙烯绝缘信号电缆 …… 252
三、聚乙烯绝缘信号电缆 …… 254
四、同轴多芯高频信号电缆 …… 254
第七节　通信电缆 …… 255
一、船用通信电缆 …… 256
二、通信光缆 …… 257
第八节　其他类型电缆 …… 260
一、直流高压软电缆 …… 260
二、加热电缆 …… 261
三、特种电缆 …… 262
第九节　母线 …… 264
一、母线的分类和作用 …… 264
二、裸母线选择和安装 …… 265
三、封闭插接母线选择和安装 …… 270
四、母线的颜色标志和相序的排列 …… 273

第四章　电阻合金 …… 274
第一节　调节元件用电阻合金 …… 274
一、康铜 …… 275
二、新康铜 …… 279

三、镍铬、镍铬铁、电阻合金 …… 281
四、铁铬铝合金 …… 281
第二节　精密元件用电阻合金 …… 283
一、电工仪器用锰铜合金 …… 283
二、分流器用锰铜电阻合金 …… 288
三、高电阻率电阻合金 …… 289
第三节　电位器用电阻合金 …… 291
一、电位器用电阻合金的规格、性能和特点 …… 291
二、电位器用贵金属电阻合金的性能和特点 …… 291
第四节　传感元件用电阻合金 …… 293
一、应变元件用电阻合金 …… 293
二、温度补偿用电阻合金 …… 295
三、测温用电阻材料 …… 295

第五章　电热材料 …… 296
第一节　电热材料的品种及性能 …… 296
第二节　金属线带电热元件 …… 298
一、铁铬铝系材料 …… 298
二、电热合件的选用及计算 …… 301
第三节　硅碳电热元件 …… 305
一、硅碳电热元件的特性 …… 305
二、硅碳电热元件的选用 …… 309
三、硅碳电热元件使用注意事项 …… 310
第四节　硅钼棒电热元件 …… 311
一、硅钼棒电热元件的特性 …… 311
二、硅钼棒电热元件的规格及电气参数 …… 311
三、硅钼棒选用的估算 …… 314
四、硅钼棒使用注意事项 …… 314
第五节　管状加热元件 …… 315
一、管状加热元件的特性、结构及种类 …… 315
二、管状加热元件的应用 …… 315
三、JGW 型远红外电热管 …… 320
四、板状电热器 …… 321
第六节　电热圈 …… 322
第七节　远红外电热元件 …… 325
一、金属管状远红外元件 …… 325

二、陶瓷类远红外元件 …… 325
三、直热式远红外元件 …… 326
四、远红外辐射材料及涂覆工艺 …… 326

第六章　热电偶材料 …… 329
第一节　常用热电偶及电偶丝 …… 329
一、热电偶性能及技术参数 …… 329
二、热电偶丝相关参数 …… 336
第二节　补偿导线 …… 337
一、补偿导线的型号、绝缘层标识及性能参数 …… 337
二、补偿导线合金丝的品种、成分及技术参数 …… 338
三、补偿导线合金丝的直径及允许误差 …… 339
四、补偿导线的使用注意事项 …… 339
第三节　特种热电偶 …… 339
一、铠装热电偶 …… 339
二、薄膜热电偶 …… 340
三、非金属热电偶 …… 340
第四节　热电偶材料的选用 …… 340
第五节　热电偶材料的焊接 …… 342

第七章　热双金属材料 …… 343
第一节　热双金属材料的概述 …… 343
第二节　热金属材料的类型与构成方法 …… 344
一、热双金属片的类型、特点和应用 …… 344
二、热双金属片的构成方法 …… 344
第三节　热双金属片组合材料 …… 345
第四节　常用热双金属片 …… 349
第五节　特殊型热双金属片 …… 351
第六节　热双金属的牌号含义、尺寸规格及质量要求 …… 352
一、热双金属片牌号、代号含义 …… 352
二、热双金属片产品的标记 …… 352
三、热双金属尺寸规格及允许偏差 …… 352
四、热双金属的外形质量和性能质量要求 …… 353
第七节　热双金属片的热处理及选用 …… 353
一、热双金属元件的稳定化热处理 …… 353
二、热双金属元件的选用和热双金属成形零件的采用 …… 354

第八章　弹性合金材料 …… 355
第一节　弹性合金的基本知识 …… 355
第二节　高弹性合金材料 …… 356
第三节　高温高弹性合金材料 …… 363
第四节　恒弹性合金 …… 365
第五节　耐腐蚀弹性合金材料 …… 368
第六节　铜基弹性合金材料 …… 372
第七节　常用弹性合金的品种、规格 …… 376
第八节　弹性合金的选用 …… 377
第九节　弹性合金材料的表面清洗 …… 378

第九章　膨胀合金材料 …… 380
第一节　膨胀合金的分类、名称、牌号、特点 …… 380
第二节　膨胀合金的技术性能 …… 381
第三节　膨胀合金的品种、规格及尺寸公差 …… 386

第十章　电触头材料 …… 389
第一节　电触头材料的分类、特性及用途 …… 389
一、轻负载触头材料 …… 389
二、中负载触头材料 …… 389
三、重负载触头材料 …… 389
四、真空触头材料 …… 390
第二节　电触头材料的选用 …… 395
一、电气条件 …… 395
二、机械条件 …… 396
三、环境条件 …… 397
第三节　电触头的尺寸 …… 397
第四节　电触头接触形式 …… 398
第五节　电触头的焊接 …… 399
第六节　银基电触头 …… 401
一、触头符号及其标注方法 …… 401
二、银基电触头基本形状、符号及尺寸 …… 402

第十一章　熔体材料 …… 404
第一节　熔体材料的种类与选用 …… 404
一、一般熔体 …… 404

二、快速熔体 …… 404
三、特殊熔体 …… 404
第二节　纯金属熔体材料 …… 405
第三节　低熔点合金熔体材料 …… 407
第四节　熔体的结构及选用 …… 409
一、熔体的形状及尺寸 …… 409
二、熔体电流密度的选择 …… 410
三、熔体的计算 …… 411
四、熔体长度 …… 412

第十二章　电碳材料及其制品 …… 413
第一节　电碳材料性质及主要用途 …… 413
一、石墨的性质 …… 413
二、电碳制品的特性及主要用途 …… 414
第二节　电机用电刷 …… 414
一、常用电刷的分类、特性及主要用途 …… 414
二、电刷的理化特性 …… 417
三、电刷的接触特性 …… 417
四、电刷的结构 …… 418
五、电刷的选用 …… 421
六、电刷的装配方式 …… 422
七、电刷的使用维护、常见故障及故障处理 …… 423
第三节　银石墨电刷 …… 424
第四节　航空电机用电刷 …… 425
一、适用范围 …… 425
二、型号与使用条件 …… 425
三、技术要求 …… 426
第五节　其他电碳制品 …… 431
一、碳和石墨触头 …… 431
二、碳棒 …… 431
三、高纯石墨件 …… 434
四、碳电阻片柱 …… 435
五、碳滑块和碳滑板 …… 438
六、机械用碳制品 …… 439
七、送话器用碳砂 …… 445
八、特种石墨 …… 446

九、石墨制品 …… 447
十、青铜石墨含油轴承 …… 448

第十三章 磁性材料的基础知识 …… 452
第一节 磁性材料的分类 …… 452
第二节 磁性材料的主要性能、参数及其定义 …… 452
一、磁感应强度、磁极化强度和磁场强度 …… 452
二、磁化曲线 …… 453
三、磁滞回线 …… 453
四、磁导率 …… 454
五、居里温度和温度系数及铁损 …… 454
六、其他磁性能 …… 455
第三节 磁性材料的品种 …… 455
一、软磁材料与永磁材料 …… 455
二、镍铁磁粉芯 …… 457

第十四章 软磁材料 …… 461
第一节 电工用纯铁及低碳钢 …… 461
一、电工用纯铁 …… 461
二、低碳钢 …… 463
第二节 电工用硅钢片 …… 463
一、热轧硅钢片 …… 463
二、冷轧无取向电工硅钢片(带) …… 466
三、冷轧单取向电工硅钢片(带) …… 467
四、电信用冷轧单取向硅钢片 …… 467
第三节 铁镍合金 …… 470
第四节 铁铝合金 …… 475
第五节 软磁铁氧体 …… 477
一、铁氧体软磁材料 …… 478
二、铁氧体矩磁材料 …… 479
三、铁氧体压磁材料 …… 479
第六节 高饱和磁感应强度合金 …… 480
第七节 高硬度高电阻高磁导合金 …… 481
第八节 磁温度补偿合金 …… 482
第九节 恒导磁合金 …… 483
第十节 非晶态软磁合金 …… 484

一、钴基非晶合金 …… 484
二、铁基非晶合金 …… 484
三、铁镍基非晶态软磁合金 …… 485
第十一节　纳米结晶软磁材料 …… 486
第十二节　其他磁性材料 …… 487
一、低膨胀合金材料 …… 487
二、磁滞伸缩合金材料 …… 488
三、磁屏蔽合金材料 …… 488
四、矩磁合金材料 …… 489
第十三节　软磁材料的选用 …… 489
一、高磁场下使用的软磁材料 …… 489
二、低磁场下使用的软磁材料 …… 490
三、高频下使用的软磁材料 …… 490
四、特殊场合下使用的软磁材料 …… 490
第十四节　常用软磁材料的热处理及表面处理 …… 491
一、硅钢片退火工艺 …… 491
二、电工用纯铁及合金的热处理 …… 491

第十五章　永磁材料 …… 494
第一节　铝镍钴合金 …… 494
一、铸造铝镍钴系永磁材料 …… 495
二、粉末烧结铝镍钴系永磁材料 …… 496
三、铁氧体永磁材料 …… 496
四、稀土钴永磁材料 …… 497
五、塑性变形永磁材料 …… 497
第二节　铁氧体永磁材料 …… 497
第三节　稀土钴永磁材料 …… 500
第四节　磁滞合金材料 …… 502
一、磁滞合金材料的性能、特点、技术参数以及热处理制度 …… 502
二、磁滞电机转子对磁滞材料性能的要求 …… 505
三、磁滞材料的最终热处理 …… 505
第五节　钕铁硼合金 …… 506
第六节　稀土系黏结永磁材料 …… 508
第七节　铁钴钒永磁合金 …… 509
第八节　永磁材料的选用 …… 510
一、在静态条件下工作的永磁体对材料的性能要求 …… 510

二、在动态条件下工作的永磁体对材料的性能要求 …… 510
第九节　永磁体的充磁、退磁及老化处理 …… 511
一、充磁 …… 511
二、退磁 …… 512
三、永磁体的稳定性(老化)处理 …… 512
第十节　永磁体的加工性能与简易测量方法 …… 512
一、永磁体的加工性能 …… 512
二、永磁体的简易测量方法 …… 514

第十六章　绝缘材料基础知识 …… 515
第一节　绝缘材料的基本概念 …… 515
第二节　绝缘材料的分类号及型号编制方法 …… 515
一、绝缘材料的分类 …… 515
二、型号编制方法 …… 516
第三节　绝缘材料特性 …… 517
一、电导率与电阻率 …… 517
二、相对介电系数 …… 517
三、介质损耗 …… 517
四、击穿强度 …… 518
五、绝缘材料的老化 …… 518

第十七章　气体电介质 …… 520
第一节　气体电介质的种类和特性 …… 520
一、空气 …… 520
二、氮气 …… 521
三、氢气 …… 521
四、六氟化硫 …… 521
五、氟化烃气体 …… 523
第二节　气体使用时应注意的问题 …… 523

第十八章　液体电介质 …… 524
第一节　液体电介质的基本知识 …… 524
第二节　常用矿物绝缘油 …… 526
第三节　常用合成绝缘油 …… 528
第四节　植物绝缘油 …… 529
第五节　油的维护与净化 …… 530

一、油的维护 …… 530
二、油的净化 …… 531

第十九章　绝缘纸品 …… 532
第一节　绝缘纸 …… 533
一、电缆纸 …… 533
二、电话纸 …… 534
三、电容器纸 …… 534
四、卷绕纸 …… 536
五、聚酯纤维纸 …… 536
六、耐高温合成纤维纸 …… 537
七、金属化纸和半导体纸 …… 537
八、复合纸 …… 538
第二节　绝缘纸板 …… 539
一、50/50 型纸板 …… 539
二、100/00 型纸板 …… 539
第三节　钢纸品 …… 540
一、硬钢纸板 …… 540
二、钢纸管 …… 541
三、玻璃钢复合钢纸管 …… 542

第二十章　绝缘纤维制品 …… 543
一、棉织品 …… 543
二、玻璃纤维制品 …… 544
三、合成纤维制品 …… 546

第二十一章　绝缘浸渍材料 …… 548
第一节　绝缘漆 …… 548
一、浸渍漆 …… 548
二、漆包线漆 …… 556
三、覆盖漆 …… 558
四、硅钢片漆 …… 560
五、防电晕漆 …… 562
第二节　绝缘胶 …… 563
一、电器浇注胶 …… 563
二、电缆浇注胶 …… 566

第三节　熔敷绝缘粉 …… 567

第二十二章　浸渍纤维制品 …… 570
第一节　漆布 …… 570
第二节　漆管 …… 575
第三节　绑扎带 …… 576

第二十三章　云母制品 …… 578
第一节　天然云母 …… 578
第二节　合成云母 …… 579
第三节　粉云母 …… 580
第四节　云母带 …… 581
第五节　云母板 …… 584
第六节　云母箔 …… 589
第七节　云母玻璃 …… 590

第二十四章　电工用膜带及复合制品 …… 591
第一节　电工薄膜 …… 591
第二节　薄膜复合箔 …… 595
第三节　粘带 …… 596

第二十五章　电工用层压制品 …… 599
第一节　层压板 …… 599
第二节　层压管 …… 607
第三节　电容套管芯 …… 610
第四节　覆铜箔板 …… 610
第五节　层压棒 …… 612

参考文献 …… 613

第一章　常用电工基础知识

第一节　常用名词

导体　具有良好的传导电流能力的物体称为导体。通常导体分为两类：像金属以及大地、人体等，称为第一类导体；像酸、碱、盐的水溶液以及熔融的电解质等，称为第二类导体。

绝缘体　不善于传导电流的物体称为绝缘体。

半导体　导电性能介于金属和绝缘体之间的物体。随着杂质含量及外界条件（光照、温度或压强等）的改变，半导体的导电性能会发生显著变化。

电流　电荷的定向流动，它可以是正电荷、负电荷或正、负电荷同时作有规则的移动而形成的。

电流密度　通过垂直于电荷流动方向的单位面积上的电流大小。

电路　用导体把电源、用电元器件或设备连接起来，构成的电流通路称为电路。

电压　在静电场中，将单位正电荷从 a 点移到 b 点过程中电场力所做的功，在数值上等于这两点间的电压。又称这两点间的电势差或电位差。

电压降　又称电位降。是指沿有电流通过的导体或在有电流通过的电路中电位的减小。

电动势　将单位正电荷从负极通过电源内部移动到正极时非静电力所做的功。或者说，电源的电动势等于在外电路断开时电源两极间的电势差。

感应电动势　分为动生电动势和感生电动势。动生电动势是指组成回路的导体（整体或局部）在恒定磁场中运动时使回路中磁通量发生变化而产生的电动势；感生电动势是指固定回路中磁场发生变化使回路磁通量改变而产生的电动势。

电阻　通常解释为物质阻碍电流通过的能力。根据欧姆定律，导体两端的电压和通过导体的电流成正比，比值称为电阻。

电阻率　表征物质导电的特性参数。电阻率越小，导电本领越强。导体的电阻率会受一些物理因素（如热、光、压力等）影响。

电导　表征物质导电特性的物理量。它是电阻的倒数。

电导率　电阻率的倒数。

电容　表征导体或导体系容纳电荷的性能的物理量。

电感 是自感与互感的统称。自感是指通过闭合回路的电流变化引起穿过它的磁通量发生变化而产生感应电动势的现象；互感是指一个闭合回路中电流变化使穿过邻近另一个回路中磁通量发生变化而在该回路中产生感应电动势的现象。

直流电 电荷流动方向不随时间改变的电流。

交流电 大小和方向随时间作周期性变动且在一个周期内平均值为零的电流称为交变电流，简称交流电。

频率 周期的倒数。

瞬时值 交流电在任一时刻的量值称为瞬时值。

有效值 交流电在一个周期内的方均根值。也就是将交流电通过一电阻在一个周期内消耗的能量，若与一直流电通过同一电阻在相同时间内消耗的能量相等，则此直流电的量值被定义为该交流电的有效值。

感抗 交流电通过具有电感的电路时，电感阻碍电流流过的作用。

容抗 交流电通过具有电容的电路时，电容阻碍电流流过的作用。

阻抗 交流电通过具有电感、电容和电阻的电路时，电感、电容和电阻共同阻碍电流流过的作用。

相位 交流电是随时间按正弦规律变动的物理量，用公式可表示为

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi)$$

式中 $\omega t + \phi$ 称该交流电在某一瞬时 t 的相位，而 $\phi(t=0)$ 称为初相。因相位常以角度表示，故又可称相角。ω 称为角频率。

相位差 两个频率相同的正弦交流电的初相位之差称为相位差或相角差。

瞬时功率 指交流电路中任一瞬间的功率。

视在功率 在具有电阻和电抗的电路中，电压与电流有效值的乘积称为视在功率。

有功功率 交流电路功率在一个周期内的平均值称为平均功率，也称为有功功率。它实质上反映了电路从电源取得的净功率。

无功功率 在具有电感或电容的电路中，反映电路与外电源之间能量反复授受的程度的量值称为无功功率。实质上是指只与电源交换而不消耗的那部分能量。

功率因数 是指有功功率与视在功率的比值。

相电压 在三相交流系统中，任一根火线与中性线之间的电压叫作相电压。

线电压 在三相交流系统中，任两根火线之间的电压叫作线电压。

相电流 在三相负载中，每相负载中流过的电流叫作相电流。

线电流 三相电源线各线中流过的电流叫作线电流。

磁感应强度 在磁场中的某一点，单位正电荷以单位速度向着与磁场方向相垂直的方向运动时所受到的磁场力，称为这一点的磁感应强度。

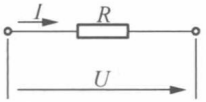
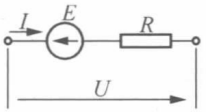
第二节　常用电工计算公式

一、电路的基本定律

1. 欧姆定律

欧姆定律的公式及说明见表 1－1。

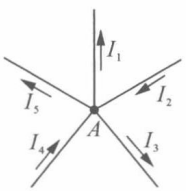
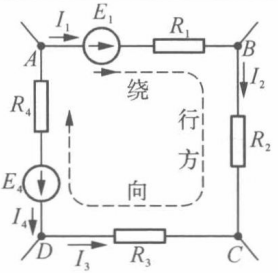
表 1－1　欧姆定律的公式及说明

电路		公式	说明
部分电路		$I=\dfrac{U}{R}$	在一段无源电路中，通过的电流 I 与两端的电压 U 成正比，与电路电阻 R 成反比
全电路		$I=\dfrac{-E+U}{R}$	在一段有源电路中，电流 I、外加电压 U 与电动势 E 三者之间的关系 与电流 I 方向相同的 E、U 为正，反之为负

2. 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律的内容及举例见表 1－2。

表 1－2　基尔霍夫定律

	基尔霍夫电流定律	基尔霍夫电压定律
内容	任意节点处，流入与流出该节点的电流的代数和等于零，即 $\Sigma I=0$	沿某绕行方向的任一回路中，电动势的代数和等于电压的代数和，即 $\Sigma E=\Sigma U$ 与绕行方向一致的 E、U 为正，反之为负
举例	 对节点 A 有 $\Sigma I=I_1-I_2+I_3-I_4+I_5=0$	 沿绕行方向 $ABCD$ 有 $E_1-E_4=I_1R_1+I_2R_2-I_3R_3-I_4R_4$

3. 焦耳—楞次定律

电流通过导体时所产生的热量与电流的平方、这一电路的电阻以及通过电流的时间成正比，即

$$Q = I^2Rt = IUt = \frac{U^2}{R}t$$

式中 Q——热量(J)；

I——电流(A)；

R——电阻(Ω)；

U——电压(V)；

t——时间(s)。

二、电路元件的计算公式

1. 电阻和电导

电阻和电导的计算公式及说明见表 1-3。

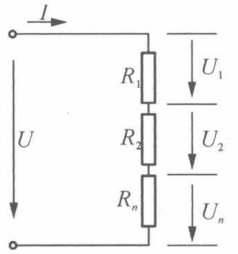
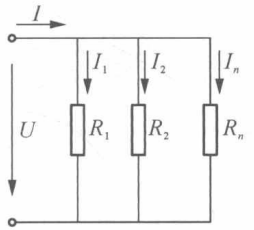
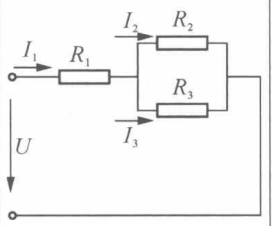
表 1-3 电阻与电导的计算公式及说明

项　目	计算公式	说　明
导体电阻	$R = \rho\frac{l}{A}$	R—导体的电阻(Ω) ρ—导体的电阻率(Ω·m) l—导体的长度(m) A—导体的横截面积(m^2)
电阻与温度的关系	$R_2 = R_1[1+\alpha(t_2-t_1)]$	R_1—温度为 t_1 时导体的电阻(Ω) R_2—温度为 t_2 时导体的电阻(Ω) α—温度为 t_1 时的导体电阻温度系数(1/℃) t—温度(℃)
电导与电导率	$G = \frac{1}{R}$ $\sigma = \frac{1}{\rho}$	G—导体的电导(S) σ—导体的电导率(S/m)

2. 电阻的连接

电阻连接的方式见表 1-4。

表 1-4　电阻连接的方式

方式	电路图	计算公式	说　明
串联		$R=R_1+R_2+\cdots+R_n$ $U=U_1+U_2+\cdots+U_n$ $U_i=IR_i=\frac{R_i}{R}U$ $(i=1,2,\cdots n)$ $I=I_1=I_2=\cdots=I_n$	总电阻等于各电阻之和 总电压等于各段电压之和 各支路电流等于总电流
并联		$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n}$ $U=U_1=U_2=\cdots=U_n$ $I=I_1+I_2+\cdots+I_n$ $I_i=\frac{U}{R_i}=\frac{IR}{R_i}$ $(i=1,2,\cdots n)$	总电阻的倒数等于各电阻倒数之和 各电阻两端的电压等于外加电压 总电流等于各支路电流之和 并联电阻上的电流分配与电阻成反比
复联（混联）		$R=R_1+\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}$ $I_2=\frac{R_3}{R_2+R_3}I_1$ $I_3=\frac{R_3}{R_2+R_3}I_1$ $I_1=I_2+I_3$	

3. 电容的计算公式及电容连接

电容的计算公式及电容的连接见表 1-5、表 1-6。

表 1-5　电容的计算公式

项目	图　形	计算公式	说　明
电容器	—	$C=\frac{Q}{U}$	Q—电荷量(C) U—电压(V) C—电容(F)

续表

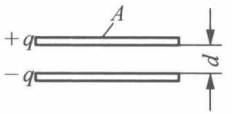
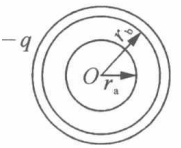
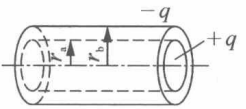
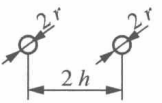
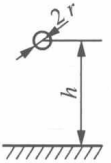
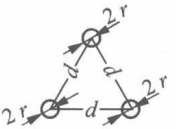
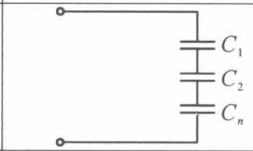
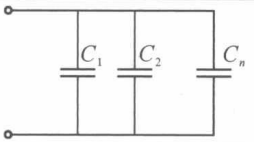
项目	图　形	计算公式	说　明
平板电容		$C=\frac{\varepsilon A}{d}$	A—极板面积(m^2) d—极板间的距离(m) $\varepsilon=\varepsilon_0\varepsilon_r$ $\varepsilon_0=8.85\times10^{-12}$ (F/m) ε_r—介电常数 (F/m)
球形电容		$C=\frac{4\pi\varepsilon r_a r_b}{r_b-r_a}$ $r_b\to\infty$时 $C=4\pi\varepsilon r_a$	r_a、r_b—分别为内球外表面与外球内表面的半径(m)
圆柱形电　容		$C=\frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{r_b}{r_a}}$	l—电容器长度(m) r_a、r_b—分别为内柱外表面与外柱内表面的半径(m)
两导线间电容		$C=\frac{\pi\varepsilon l}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$	l—导线长度(m) $2h$—导线轴线间的距离(m) r—导线的半径(m)
导线对地电容		$C=\frac{2\varepsilon l}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$	l—导线长度(m) h—导线与地面距离(m) r—导线的半径(m)
三相导线间的电容		$C=\frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)}$	d—导线间的距离(m) r—导线的半径(m)
可变电容器		$C=(n-1)\varepsilon\frac{A}{d}$	n—极板片数 A—极板面积(m^2) d—极板间的距离(m)

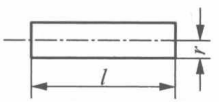
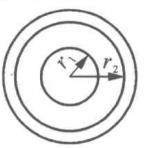
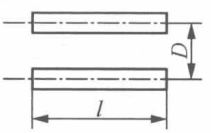
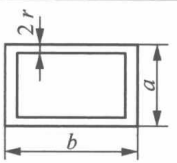
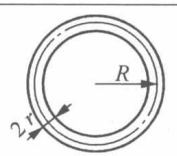
表 1-6　电容的连接

方式	电路图	计算公式	说　明
串联		$C=\dfrac{1}{\dfrac{1}{C_1}+\dfrac{1}{C_2}+\cdots+\dfrac{1}{C_n}}$	C—总电容器 C_i—各个电容器的电容量
并联		$C=C_1+C_2+\cdots+C_n$	

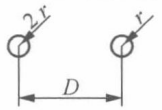
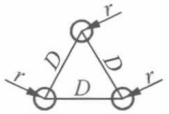
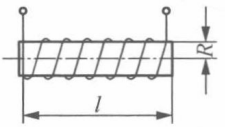
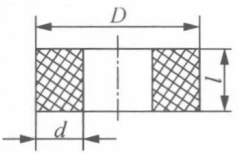
4. 电感的计算公式及连接方式

几种典型结构的电感计算公式及电感的连接见表 1-7 至表 1-9。

表 1-7　几种典型结构的电感计算公式

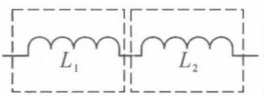
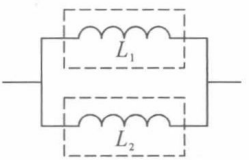
项目	图　形	计算公式	说　明
圆截面直导线		$L=\dfrac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\dfrac{2l}{r}-0.75\right)$	$r\ll l$ l—直导线段的长度(m) r—导线半径(m)
同轴电缆		$L=\dfrac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\dfrac{r_2}{r_1}+\dfrac{1}{4}\right)$	l—电缆长度(m)
两平行直导线互感		$M=\dfrac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\dfrac{2l}{D}-1\right)$	导线半径$\ll D$ $D\ll l$ M—互感
矩形线圈		$L=\dfrac{\mu_0}{\pi}\left[a\ln\dfrac{2ab}{r(a+b)}+b\ln\dfrac{2ab}{r(b+d)}+2d-1.75(a+b)\right]$	r—导线半径(m) $d=\sqrt{a^2+b^2}$ $r\ll a$，$r\ll b$
圆　环		$L=\mu_0 R(\ln\dfrac{8R}{r}-1.75)$	r—圆环截面的半径 R—圆环的半径 $r\ll R$

续表

项目	图　形	计算公式	说　明
两平行导线		$L=\frac{\mu_0 l}{\pi}\left(\ln\frac{D}{r}+\frac{1}{4}\right)$	l—导线长度(m) $r\ll D$，$D\ll l$
三相导线		$L=\frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{D}{r}+\frac{1}{4}\right)$	l—导线长度(m) D—导线间距离(m) $r\ll D$
长螺管线圈		$L=\frac{\mu_0 N^2 A}{l}$	N—匝数，$l/R>40$ A—螺管横截面积(mm^2)
短螺管线圈		$L=\frac{6.4\mu_0 N^2 D^2}{3.5D+8l}\times\frac{D-2.25d}{D}$	N—匝数

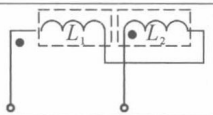
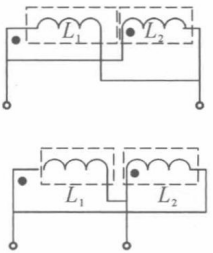
注：μ_0—磁导率。

表 1-8　无互感线圈的连接

方式	电路图	计算公式	说　明
串联		$L=L_1+L_2+\cdots$	L_1、L_2、…—为无互感效应的各线圈电感 L—等效总电感
并联		$\frac{1}{L}=\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}+\cdots$	

注：所谓无互感线圈，即线圈本身有屏蔽，两线圈之间没有互感。

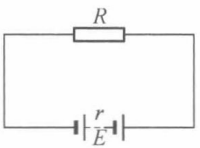
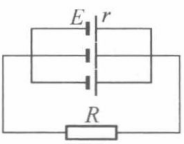
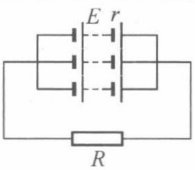
表 1-9　有互感线圈的连接

方式		电路图	计算公式	说　明
串联	顺串		$L=L_1+L_2+2M$	M— 线圈的互感量，均为正值
	反串		$L=L_1+L_2-2M$	
并联			$L=\dfrac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2-2M}$	

5. 电池的串联与并联

电池的串联与并联见表 1-10。

表 1-10　电池的串联和并联

方式	电路图	计算公式	说　明
串联		$I=\dfrac{nE}{R+nr}$ 当 $R\gg r$ 时 $I\approx\dfrac{nE}{R}$ 当 $R\ll r$ 时 $I\approx\dfrac{E}{r}$	R—外加电阻(Ω) r—电源的内电阻(Ω) E—电源电压(V) I—电路中的电流(A) n—每串电池数 n 个电池串联后又与 m 串电池并联
并联		$I=\dfrac{E}{R+\dfrac{r}{n}}$ 当 $R\gg r$ 时 $I\approx\dfrac{E}{R}$ 当 $R\ll r$ 时 $I\approx\dfrac{nE}{r}$	
复联（混联）		$I=\dfrac{nE}{R+\dfrac{nr}{m}}$	

6. 直流电路的功和功率

直流电路的功和功率见表 1－11。

表 1－11　直流电路的功和功率

项目	计算公式	说　明
功	$W=UIt=I^2Rt=\dfrac{U^2}{R}t$(J)	U—电压(V) I—电流(A) R—电阻(Ω) t—时间(s)
功率	$P=UI=I^2R=\dfrac{U^2}{R}$(W)	

三、交流电路

1. 正弦交流电

(1) 正弦交流电的有效值和平均值见表 1－12。

表 1－12　正弦交流电的有效值、平均值

项目	表 达 式	说　明
电流的有效值 电压的有效值 电动势的有效值	$I=\sqrt{\dfrac{1}{T}\int_0^T i^2\mathrm{d}t}=I_\mathrm{m}/\sqrt{2}$ $U=\sqrt{\dfrac{1}{T}\int_0^T u^2\mathrm{d}t}=U_\mathrm{m}/\sqrt{2}$ $E=\sqrt{\dfrac{1}{T}\int_0^T e^2\mathrm{d}t}=E_\mathrm{m}/\sqrt{2}$	I_m—电流的最大值 U_m—电压的最大值 E_m—电动势的最大值
电流的平均值 电压的平均值 电动势的平均值	$I_\mathrm{a}=\dfrac{2}{\pi}I_\mathrm{m}$ $U_\mathrm{a}=\dfrac{2}{\pi}U_\mathrm{m}$ $E_\mathrm{a}=\dfrac{2}{\pi}E_\mathrm{m}$	

(2)正弦交流电的波形。

正弦交流电的波形如图 1－1 所示,图中

T——周期(s), $T=\dfrac{1}{f}=\dfrac{2\pi}{\omega}$;

f——频率(Hz), $f=\dfrac{1}{T}=\dfrac{\omega}{2\pi}$;

ω——角频率(rad/s), $\omega=\dfrac{2\pi}{T}=2\pi f$;

I_m——正弦交流电波形中的最大值。

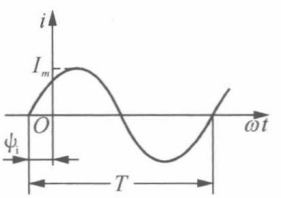


图 1－1　正弦交流电的波形

正弦交流电的电流、电压、电动势的瞬时值分别表示为

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$
$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$$
$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$$

式中　I_m、U_m、E_m——电流、电压、电动势的最大值；

ψ_i、ψ_u、ψ_e——i、u、e 的初相角；

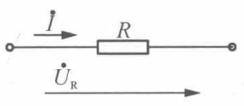
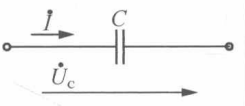
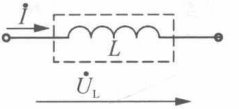
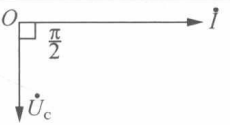
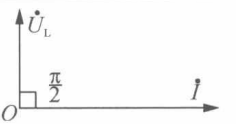
ω——角频率；

t——时间。

2. 纯电阻、纯电容、纯电感电路

纯电阻、纯电容、纯电感电路的电量关系见表 1-13。

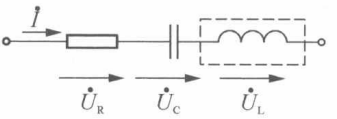
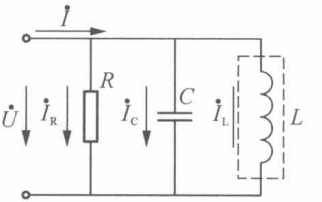
表 1-13　纯电阻、纯电容、纯电感电路的电量关系

项目	纯电阻电路	纯电容电路	纯电感电路
电路图			
电阻与电抗	电阻 R	容抗 $X_C = \dfrac{1}{\omega C} = \dfrac{1}{2\pi f C}$	感抗 $X_L = \omega L = 2\pi f L$
电流、电压的瞬时值关系	$u_R = iR$	$u_C = \dfrac{1}{C}\int i\mathrm{d}t$	$u_L = L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$
电流、电压的有效值关系	$U_R = IR$	$U_C = IX_C$	$U_L = IX_L$
电流、电压相量图	端电压与电流同相	 端电压滞后电流 90°	 端电压超前电流 90°
电流、电压的复数关系	$\dot{U} = \dot{I}R$	$\dot{U}_C = -\mathrm{j}\dfrac{1}{\omega C}\dot{I} = -\mathrm{j}X_C\dot{I}$	$\dot{U}_L = \mathrm{j}\omega L\dot{I} = \mathrm{j}X_L\dot{I}$
平均功率 P	$P_R = U_R I = I^2 R$	$P_C = 0$	$P_L = 0$
无功功率 Q	$Q_R = 0$	$Q_C = U_C I = I^2 X_C$	$Q_L = U_L I = I^2 X_L$
功率因数	$\cos\varphi_R = 1$	$\cos\varphi_C = 0$	$\cos\varphi_L = 0$

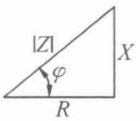
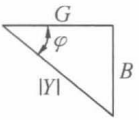
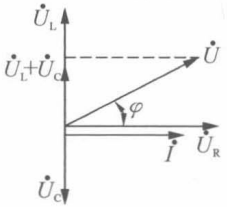
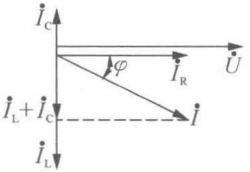
3. *RCL* 串、并联电路

RCL 串联电路和并联电路的电量关系见表 1-14。

表 1-14 *RCL* 串联电路和并联电路的电量关系

项　目	*RCL* 串联电路	*RCL* 并联电路
电路图		
电流、电压的复数关系	$\dot{U}=\dot{U}_R+\dot{U}_C+\dot{U}_L=\dot{I}R-\mathrm{j}\frac{1}{\omega C}\dot{I}+\mathrm{j}\omega L\dot{I}$ $=\left(R-\mathrm{j}\frac{1}{\omega C}+\mathrm{j}\omega L\right)\dot{I}=\dot{I}Z$	$\dot{I}=\dot{I}_R+\dot{I}_C+\dot{I}_L$ $=\frac{\dot{U}}{R}-\frac{\dot{U}}{\mathrm{j}\frac{1}{\omega}C}+\frac{\dot{U}}{\mathrm{j}\omega L}$ $=\left(\frac{1}{R}+\mathrm{j}\omega C-\mathrm{j}\frac{1}{\omega L}\right)\dot{U}$ $=Y\dot{U}$
复数阻抗或复数导纳	复数阻抗 $Z=R-\mathrm{j}\frac{1}{\omega C}+\mathrm{j}\omega L=R+\mathrm{j}(X_L-X_C)=$ $\lvert Z\rvert\angle\varphi$ 阻抗 $\lvert Z\rvert=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=\sqrt{R^2+X^2}$ 电流 $X=X_L-X_C$　阻抗角 $\varphi=\arctan\frac{X}{R}$	复数导纳 $Y=\frac{1}{R}+\mathrm{j}\left(\omega C-\frac{1}{\omega L}\right)$ $=G-\mathrm{j}(B_L-B_C)$ $=\lvert Y\rvert\angle-\varphi$ 导纳 $\lvert Y\rvert=\sqrt{G^2+B^2}$ 导纳角 $-\varphi=\arctan\frac{B}{G}$ 电导 $G=\frac{1}{R}$，电纳 $B=B_L-B_C$， 感纳 $B_L=\frac{1}{\omega L}$，容纳 $B_C=\omega C$
电流、电压的有效值关系	$U=I\lvert Z\rvert=I\sqrt{R^2+X^2}$	$I=U\lvert Y\rvert=U\sqrt{G^2+B^2}$
复数阻抗与复数导纳的互换	$Z=\frac{1}{Y}=\frac{G}{G^2+B^2}+\mathrm{j}\frac{B}{G^2+B^2}$	$Y=\frac{1}{Z}=\frac{R}{R^2+X^2}-\mathrm{j}\frac{X}{R^2-X^2}$

续表

项　目		RCL 串联电路	RCL 并联电路
阻抗三角形或导纳三角形		阻抗三角形  	导纳三角形 
相量图	电感性电路	 $X_L>X_C$ $\dot{U}$比$\dot{I}$超前φ角	 $B_L>B_C$ $\dot{I}$比$\dot{U}$滞后φ角

4. 正弦电路的功率及功率因数

正弦电路的功率及功率因数见表 1－15。

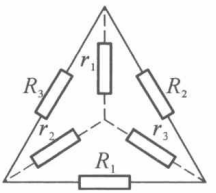
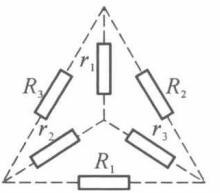
表 1－15　正弦电路的功率和功率因数

项　目	计算公式	说　明
瞬时功率	设　$p=ui$　(W) $i=I_m\sin\omega t$ $u=U_m\sin(\omega t+\varphi)$ $p=U_m\sin(\omega t+\varphi)\cdot I_m\sin\omega t=UI\cos\varphi-UI\cos(2\omega t+\varphi)$	i、u—电流、电压的瞬时值 I、U—电流、电压的有效值
有功功率	$P=UI\cos\varphi$　(W) $P=\Sigma P_i=\Sigma R_iI_i^2$	
无功功率	$Q=UI\sin\varphi$　(VA) $Q=\Sigma Q_i=\Sigma X_iI_i^2$	当 $\varphi>0$(感性)时，$Q>0$ 当 $\varphi<0$(容性)时，$Q<0$
视在功率	$S=UI$　(VA)	
功率因数	$\cos\varphi=\dfrac{P}{S}=\dfrac{P}{UI}$	

5. 星形联结与三角形联结

星形联结与三角形联结变换见表 1－16。

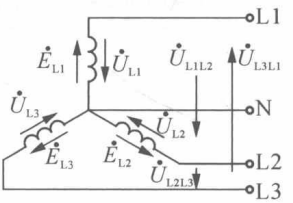
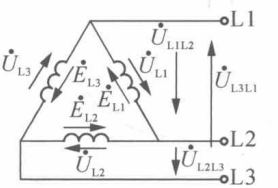
表 1-16　星形联结与三角形联结的变换

变换型式	Y→△	△→Y
变换图		
变换公式	$R_1=\dfrac{r_1r_2+r_2r_3+r_3r_1}{r_1}$ $R_2=\dfrac{r_1r_2+r_2r_3+r_3r_1}{r_2}$ $R_3=\dfrac{r_1r_2+r_2r_3+r_3r_1}{r_3}$	$r_1=\dfrac{R_2R_3}{R_1+R_2+R_3}$ $r_2=\dfrac{R_3R_1}{R_1+R_2+R_3}$ $r_3=\dfrac{R_1R_2}{R_1+R_2+R_3}$

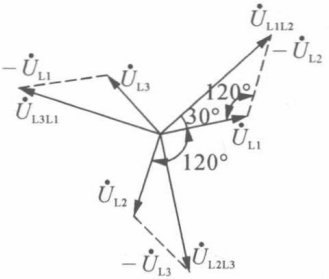
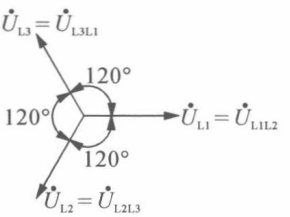
6. 对称三相电源的电压关系

对称三相电源的电压关系见表 1-17。

表 1-17　对称三相电源的电压关系

项　　目	星形联结	三角形联结
电路图		
相电压	$\dot{U}_{L1}$、$\dot{U}_{L2}$、$\dot{U}_{L3}$	$\dot{U}_{L1}$、$\dot{U}_{L2}$、$\dot{U}_{L3}$
线电压	$\dot{U}_{L1L2}$、$\dot{U}_{L2L3}$、$\dot{U}_{L3L1}$	$\dot{U}_{L1L2}$、$\dot{U}_{L2L3}$、$\dot{U}_{L3L1}$
相电压(U_p)和线电压(U_l)的数值关系	$U_l=\sqrt{3}U_p$	$U_l=U_p$
相电压和线电压的复数关系	$\dot{U}_{L1L2}=\dot{U}_{L1}-\dot{U}_{L2}$ $\dot{U}_{L2L3}=\dot{U}_{L2}-\dot{U}_{L3}$ $\dot{U}_{L3L1}=\dot{U}_{L3}-\dot{U}_{L1}$	$\dot{U}_{L1L2}=\dot{U}_{L1}$ $\dot{U}_{L2L3}=\dot{U}_{L2}$ $\dot{U}_{L3L1}=\dot{U}_{L3}$

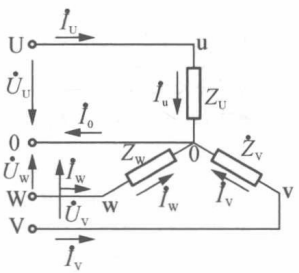
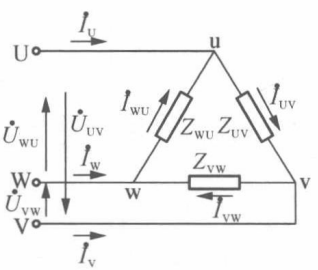
续表

项　　目	星形联结	三角形联结
相电压和线电压的相量图		

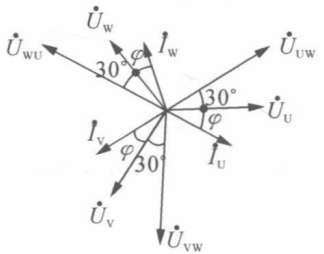
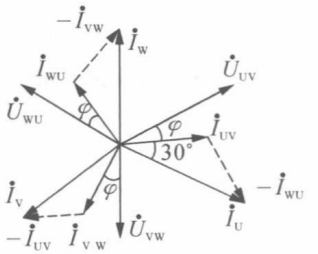
7. 三相负载电路中电流、电压、功率关系

三相负载电路中电流、电压、功率关系见表 1－18。

表 1－18　三相负载电路中的电流、电压、功率关系

联结方式	星　形　联　结	三　角　形　联　结
电路图		
相电流	$\dot{I}_u$、$\dot{I}_v$、$\dot{I}_w$	$\dot{I}_{UV}$、$\dot{I}_{VW}$、$\dot{I}_{WU}$
线电流	$\dot{I}_U$、$\dot{I}_V$、$\dot{I}_W$	$\dot{I}_U$、$\dot{I}_V$、$\dot{I}_W$
线电流与相电流的关系	$\dot{I}_U=\dot{I}_u$，$\dot{I}_V=\dot{I}_v$，$\dot{I}_W=\dot{I}_w$	$\dot{I}_U=\dot{I}_{UV}-\dot{I}_{WU}$，$\dot{I}_V=\dot{I}_{VW}-\dot{I}_{UV}$ $\dot{I}_W=\dot{I}_{WU}-\dot{I}_{VW}$
对称负载线电流 I_l 与相电流 I_p 的关系	$I_l=I_p$	$I_l=\sqrt{3}I_p$
对称负载线电压 U_l 与相电压 U_p 的关系	$U_l=\sqrt{3}U_p$	$U_l=U_p$

续表

联结方式		星形联结	三角形联结
中线电流	对称负载	$\dot{I}_0+\dot{I}_U+\dot{I}_V+\dot{I}_W=0$	
	不对称负载	$\dot{I}_0=\dot{I}_U+\dot{I}_V+\dot{I}_W=\frac{\dot{E}}{Z_U}+\frac{\dot{E}}{Z_V}+\frac{\dot{E}}{Z_W}$ 式中$\dot{E}_U$、$\dot{E}_V$、$\dot{E}_W$为对称三相电源的电动势	
对称负载相量图			
平均功率P	对称负载	$P=3U_pI_p\cos\varphi=\sqrt{3}U_1I_1\cos\varphi$	
	不对称负载	$P=P_U+P_V+P_W=U_p(I_u\cos\varphi_u+I_v\cos\varphi_v+I_w\cos\varphi_w)$ 式中φ_u、φ_v、φ_w分别是U相、V相、W相的相电压和相电流之间的相位差	
无功功率Q	对称负载	$Q=3U_pI_p\sin\varphi=\sqrt{3}U_1I_1\sin\varphi$	
	不对称负载	$Q=Q_U+Q_V+Q_W=U_p(I_u\sin\varphi_u+I_v\sin\varphi_v+I_w\sin\varphi_w)$	
视在功率S	对称负载	$S=3U_pI_p=\sqrt{3}U_1I_1$	
	不对称负载	$S=S_U+S_V+S_W=U_p(I_u+I_v+I_w)$	

四、磁路

1. 磁路物理量

磁路的物理量见表1-19。

表1-19 磁路的物理量

名称	表达式	说明
磁通密度/T	$B=\mu H$	H—磁场强度(A/m) μ—物质的磁导率(H/m)

续表

名称	表达式	说　明
磁通/Wb	$\Phi = BS$	B—磁通密度(T) S—磁场面积(m^2)
磁通势/A	$F_m = Hl = NI$	H—磁场强度(A/m) l—长度(m) N—线圈的匝数 I—电流(A)
磁阻/H^{-1}	$R_m = \dfrac{l}{\mu S}$	l—磁路的平均长度(m) S—磁路截面积(m^2) μ—磁路材料的磁导率(H/m)
磁导/H	$\Lambda = \dfrac{1}{R_m} = \dfrac{\mu S}{l}$	

2. 磁路基本定律

磁路的基本定律见表 1-20。

表 1-20　磁路的基本定律

名　称	表 达 式	说　明
磁路欧姆定律	$\Phi = \dfrac{F_m}{R_m} = \dfrac{NI}{R_m}$	Φ—磁通(Wb)，F_m—磁通势(A) R_m—磁阻(H^{-1})
磁路基尔霍夫第一定律	$\Sigma\Phi = 0$	磁路中穿过任一闭合面的磁通量总和等于零
磁路基尔霍夫第二定律	$\Sigma Hl = \Sigma NI$	磁路中任一闭合回路内各段磁压降的代数和等于沿该回路磁通势的代数和
安培定律及左手定则	均匀磁场，导线电流和磁力线方向垂直，电磁力 $F = BIl$ 导线电流方向与磁力线方向不垂直，有夹角 θ，电磁力 $F = BIl\sin\theta$	F—电磁力(N)，B—磁通密度(T)，I—电流(A)，l—导线有效长度(m) 电磁力方向按左手定则确定：伸出左手，让磁力线穿入掌心，伸出的四指代表导线中电流方向，与四指垂直的大拇指方向表示导线的受力方向

续表

名　称	表 达 式	说　明
电磁感应定律	直导线中的感应电动势 $e = Blv$ 回路中的感应电动势 $e = -N\frac{d\Phi}{dt}$ 电流变化时线圈中产生的自感电动势 $e_L = -L\frac{di}{dt}$ 端电压 $u_L = -e_L = L\frac{di}{dt}$	电动势 e 的方向用右手定则确定：伸出右手，掌心对着磁力线方向，大拇指与四指垂直，拇指指向代表导线运动方向，则伸着的四指表示感应电动势方向 e—感应电动势(V)，B—磁通密度(T)，v—导线运动速度(m/s)，l—导线有效长度(m)，L—线圈的自感(H)

五、铁芯线圈电路

1. 电磁铁吸力

电磁铁吸力见表 1-21。

表 1-21　电磁铁吸力

项　目	吸力计算公式	说　明
直流电磁铁	$F = \frac{10^7}{8\pi}B_0^2S$	F—电磁铁吸力(N) B_0—气隙磁通密度(T) S—气隙截面积(m^2)
交流电磁铁	最大吸力 $F_M = \frac{10^7}{8\pi}B_M^2S$ 平均吸力 $F = \frac{1}{2}F_M = \frac{10^7}{16\pi}B_M^2S$ 线圈端电压 $U \approx 4.44fN\Phi_M$	F_M—最大吸力(N) B_M—交流磁通密度的最大值(T) S—气隙总截面积(m^2) f—电源频率(Hz) N—线圈匝数 Φ_M—铁心磁通最大值(Wb)

2. 变压器的计算公式

变压器的计算公式见表 1-22。

表 1-22　变压器的计算公式

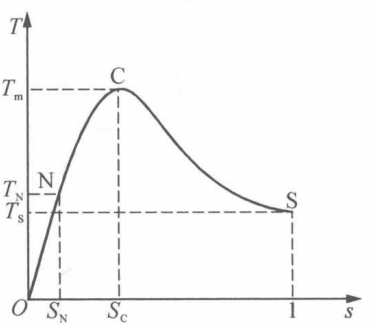
项　目	计 算 公 式	说　明
变压比	$K=\dfrac{U_1}{U_2}=\dfrac{E_1}{E_2}=\dfrac{N_1}{N_2}$	U_1、U_2—一、二次绕组电压(V) E_1、E_2—一、二次绕组感应电动势(V) N_1、N_2—一、二次绕组的匝数
电流变换	$U_1I_1=U_2I_2$ $\dfrac{I_1}{I_2}\approx\dfrac{N_2}{N_1}=\dfrac{1}{K}$	I_1、I_2—一、二次电流(A)
阻抗变换	$\lvert Z'\rvert=\left(\dfrac{N_1}{N_2}\right)^2\lvert Z\rvert=K^2\lvert Z\rvert$	$\lvert Z'\rvert$—直接接在电源上的阻抗(Ω) $\lvert Z\rvert$—接在变压器二次侧的负载阻抗(Ω)
一、二次绕组的感应电动势	$U_1\approx E_1=4.44fN_1\Phi_m$ $U_2\approx E_2=4.44fN_2\Phi_m$	f—电源频率(Hz) N_1、N_2—一、二次绕组的匝数 Φ_m—铁心中磁通最大值(Wb)
电压变化率	$\Delta U=\dfrac{U_{2n}-U_2}{U_{2n}}\times100\%$ $=\dfrac{U_{20}-U_2}{U_{20}}\times100\%$ 额定负载下　$\Delta U=3\%\sim8\%$	U_{2n}—变压器二次额定电压(V) U_{20}—变压器二次空载电压(V) $U_{20}=U_{2n}$ U_2—变压器二次电压(V)
有功损耗	$\Delta P_T=\Delta P_0+\Delta P_d\left(\dfrac{S_{js}}{S_n}\right)^2$　(kW)	ΔP_0—变压器空载损耗,即铁损(kW) ΔP_d—变压器额定状态时的短路损耗,即铜损(kW) S_{js}—变压器的计算负荷(kV·A) S_n—变压器额定容量(kV·A)
无功损耗	$\Delta Q_T=\Delta Q_0+\Delta Q_n\left(\dfrac{S_{js}}{S_n}\right)$　(kW)	ΔQ_0—主磁通部分的无功损耗(kV·A) ΔQ_n—消耗在漏电抗上的无功损耗(kV·A)
视在功率	$S_N=U_{2N}I_{2N}\approx U_{1N}I_{1N}$　(单相)	I_{1N}、I_{2N}—变压器一、二次额定电流(A) U_{1N}、U_{2N}—变压器一、二次额定电压(V)
效　率	$\eta=\dfrac{P_2}{P_1}\times100\%=\dfrac{P_2}{P_2+\Delta P_T}\times100\%$ 单相变压器 $\eta=\dfrac{U_2I_2\cos\varphi}{U_2I_2\cos\varphi+\Delta P_T}\times100\%$ 三相变压器 $\eta=\dfrac{\sqrt{3}U_2I_2\cos\varphi}{\sqrt{3}U_2I_2\cos\varphi+\Delta P_T}\times100\%$	P_1—输入有功功率(kW) P_2—输出有功功率(kW) ΔP_T—变压器的有功损耗(kW)
短路电压	$u_K=\dfrac{U_K}{U}\times100\%$	u_K—相对短路电压 U_K—短路电压(V) U—标称电压(V)

六、电机

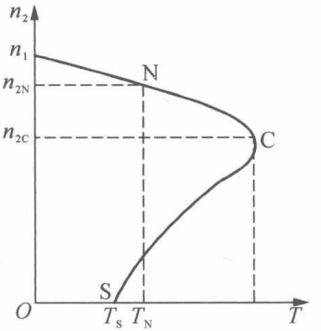
1. 异步电机

异步电机的计算公式及特性曲线见表 1-23。

表 1-23　异步电动机的计算公式及特性曲线

项　目	基本公式和特性曲线	说　明
定子电路 磁场转速	$n_1 = \dfrac{60 f_1}{p}$	f_1—定子电流频率 p—旋转磁场的极对数
感应电动势有效值	$E_1 = 4.44 f_1 k_{w1} N_1 \Phi$	k_{w1}—定子的绕组系数
定子每相绕组电压	$U_1 \approx E_1$	N_1—定子绕组匝数
每极磁通	$\Phi \approx \dfrac{U_1}{4.44 f_1 k_{w1} N_1}$	
转子电路		
转差率	$s = \dfrac{n_1 - n_2}{n_2}$	n_2—转子的转速
转子电流的频率	$f_2 = s f_1$	f_2—转子绕组感应电动势的频率
转子每相绕组感抗	$X_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s X_{20}$	L_2—转子每相绕组自感
静止时转子感抗	$X_{20} = 2\pi f_1 L_2$	k_{w2}—转子的绕组系数
感应电动势有效值	$E_2 = \dfrac{k_{w2} N_2}{k_{w1} N_1} s U_1$	N_2—转子绕组匝数
转子电流	$I_2 = \dfrac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \dfrac{k_{w2} N_2}{k_{w1} N_1} \dfrac{U_1}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}}$	R_2—转子每相绕组的电阻
功率因数	$\cos \varphi_2 = \dfrac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \dfrac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}}$	$K_T = C_T \dfrac{k_{w2} N_2}{4.44 f_1 k_{w1}^2 N_1^2}$
转矩	$T = K_T U_1^2 \dfrac{s R_2}{R_2^2 + (s X_{20})^2}$	C_T—由电机结构决定的常数
转矩特性曲线		S 点为起动点，T_S—起动转矩 一般　$\lambda_S = \dfrac{T_S}{T_N} = 0.8 \sim 1.8$ N 为额定点，T_N—额定转矩 $T_N = \dfrac{P_{2N}}{\omega_{2N}} = \dfrac{60}{2\pi} \dfrac{P_{2N}}{n_{2N}}$

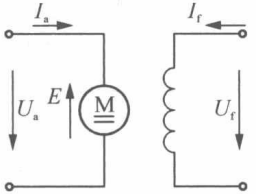
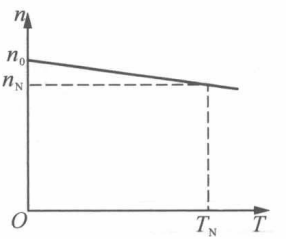
续表

项　目	基本公式和特性曲线	说　明
机械特性曲线		C点为临界点，T_m—临界点上转矩为最大转矩 $T_m = K_T \dfrac{U_1^2}{2X_{20}}$ 过载能力　$\lambda_T = \dfrac{T_m}{T_N} =$ 1.8～2.2

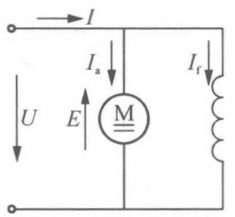
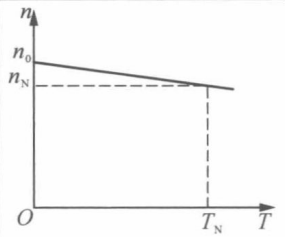
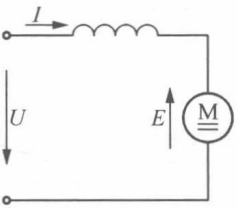
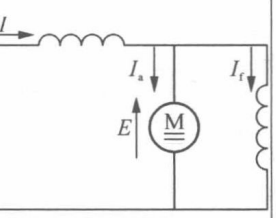
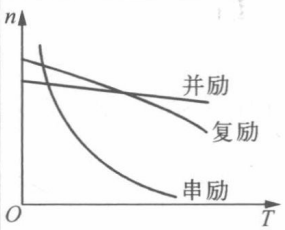
3. 直流电动机

直流电动机的计算公式及特性曲线见表 1－24。

表 1－24　直流电动机的计算公式及特性曲线

名称	电　路　图	基本公式	机械特性
他励电动机		励磁电流　$I_f = \dfrac{U_f}{R_f}$ 式中　U_f—励磁电压 R_f—励磁绕组的电阻 电枢电流　$I_a = \dfrac{U_a - E}{R_a}$ 式中　U_a—电枢电路的外加电压 E—电动机的反电动势 R_a—电枢绕组的电阻 电动机输入电功率 $P_1 = U_a I_a + U_f I_f$ 输出的机械功率 $P_2 = T\omega = \dfrac{2\pi n}{60} T$	 $\lambda = \dfrac{I_{am}}{I_{SN}} = 1.5 \sim 2.5$ 转速　$n = \dfrac{U_a}{C_E\Phi} - \dfrac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T$ 式中　C_E—电动势常数 C_T—转矩常数

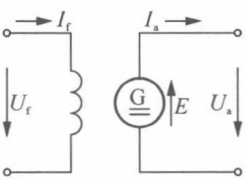
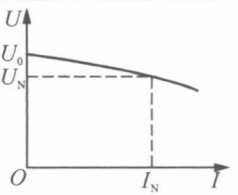
续表

名称	电　路　图	基本公式	机械特性
并励电动机		$I = I_a + I_f$ $E = U - I_a R_a$ $I_f = \frac{U}{R_f}$ $P_1 = UI = U(I_a + I_f)$ $P_2 = \frac{2\pi n}{60} T$	 $n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T$
串励电动机		$I = I_f + I_a$ $I = \frac{U - E}{R_a + R_f}$ $P_1 = UI$ $P_2 = \frac{2\pi n}{60} T$	 $n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_f}{C_E C_T \Phi^2} T$
复励电动机		$I = I_a + I_f \approx I_a$ $I_a \approx \frac{U - E}{R_{f1} + R_a}$ $P_1 = UI$ $P_2 = \frac{2\pi n}{60} T$	

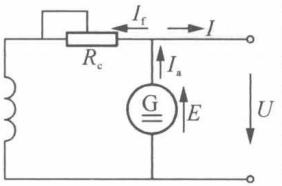
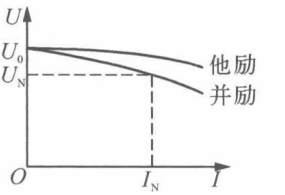
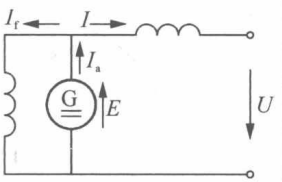
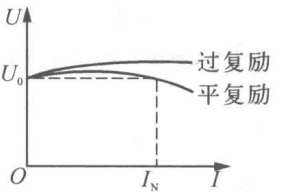
3. 直流发电机

直流发电机的计算公式及外特性曲线见表 1－25。

表 1－25　直流发电机的基本公式及外特性曲线

名称	电　路　图	基本公式	外特性曲线
他励发电机		$U_a = E - R_a I_a$ 电压调整率 $\Delta U\% = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$	

续表

名称	电　路　图	基本公式	外特性曲线
并励发电机		$I_f = \dfrac{E}{R_a + R_f + R_c}$ R_c—串联在励磁电路中的调磁变阻器 输出电流　$I = I_a - I_f$ 输出电压　$U = U_a = E - R_a I_a$ $P_1 = T_1\omega = \dfrac{2\pi n}{60} T_1$ 输入转矩 $T_1 = T + T_0$ 式中　T_0—空载转矩 T—电磁转矩	
复励发电机		如果串励绕组的作用使额定电压与空载电压相等，则称为平复励发电机；如果额定电压比空载电压还高，则称为过复励发电机	

第三节　常用计量单位及换算

一、国际单位制的单位

国际单位制的单位分为基本单位、导出单位(SI 辅助单位在内的单位)两大部分，分别见表 1-26 至表 1-28。

表 1-26　国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

注：1.（　）中的名称是它前面的名称的同义词，下同。

2.［　］内的字在不致引起混淆的情况下，可以省略，下同。

表 1-27　国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示形式
平面角	弧度	rad	1 rad=1 m/m=1
立体角	球面度	Sr	1 Sr=1 m^2/m^2=1

表 1-28　具有专门名称的国际单位制导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示形式
频率	赫[兹]	Hz	1 Hz=1 s^{-1}
力	牛[顿]	N	1 N=1 kg·m/s^2
压力、压强、应力	帕[斯卡]	Pa	1 Pa=1 N/m^2
能量、功、热量	焦[耳]	J	1 J=1 N·m
功率、辐射通量	瓦[特]	W	1 W=1 J/s
电荷量	库[仑]	C	1 C=1 A·s
电位(电势)、电压、电动势	伏[特]	V	1 V=1 W/A
电容	法[拉]	F	1 F=1 C/V
电阻	欧[姆]	Ω	1 Ω=1 V/A
电导	西[门子]	S	1 S=1 Ω^{-1}
磁通量	韦[伯]	Wb	1 Wb=1 V·s
磁通量密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	1 T=1 Wb/m^2
电感	亨[利]	H	1 H=1 Wb/A
摄氏温度	摄氏度	℃	
光通量	流[明]	lm	1 lm=1 cd·sr
光照度	勒[克斯]	lx	1 lx=1 lm/m^2
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	1 Gy=1 J/kg

二、可与国际单位制并用的我国法定计量单位

可与国际单位制并用的我国法定计量单位见表 1-29。

表 1-29　可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位

量的名称	单位名称	单位符号	与国际单位制单位的关系
时间	分	min	1 min=60 s
	[小]时	h	1 h=60 min=3600 s
	日(天)	d	1 d=24 h=86400 s

续表

量的名称	单位名称	单位符号	与国际单位制单位的关系
平面角	度	(°)	$1°=(\pi/180)$rad
	[角]分	(′)	$1′=(1/60)°$ $=(\pi/10800)$rad
	角[秒]	(″)	$1″=(1/60)′$ $=(\pi/648000)$rad
面积	公顷	hm^2	$1\ hm^2=10^4\ m^2$
体积	升	1,L	$1\ L=1\ dm^3=10^{-3}m^3$
质量	吨	t	$1\ t=10^3\ kg$
	原子质量单位	u	$1\ u\approx1.660\ 540\times10^{-27}kg$
能	电子伏	eV	$1\ eV\approx1.602177\times10^{-19}J$
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	$1\ tex=10^{-6}kg/m$

三、常用电磁量及其单位

常用电磁量及其单位(GB 3102.5—1993)见表 1-30。

表 1-30　常用电磁量及其单位

量的名称	量符号	单位名称	单位符号
电流	I	安[培]	A
电荷[量]	Q	库[仑]	C
体积电荷,电荷[体]密度	$\rho(\eta)$	库[仑]每立方米	C/m^3
面积电荷,电荷面密度	σ	库[仑]每平方米	C/m^2
电场强度	E	伏[特]每米	V/m
电位(电势)	V,φ	伏[特]	V
电位差(电势差),电压	$U(V)$	伏[特]	V
电动势	E	伏[特]	V
电通[量]密度	D	库[仑]每平方米	C/m^2
电通[量]	Φ	库[仑]	C
电容	C	法[拉]	F
介电常数(电容率)	ε	法[拉]每米	F/m
真空介电常数(真空电容率)	ε_0	法[拉]每米	F/m
相对介电常数(相对电容率)	ε_r	—	1

续表

量的名称	量符号	单位名称	单位符号
电极化强度	P	库[仑]每平方米	C/m^2
电偶极矩	$p(p_e)$	库[仑]米	C·m
面积电流,电流密度	J(S)	安[培]每平方米	A/m^2
线电流,电流线密度	$A(\alpha)$	安[培]每米	A/m
磁场强度	H	安[培]每米	A/m
磁位差(磁势差)	U_m	安[培]	A
磁通势,磁动势	F,F_m	安[培]	A
磁通[量]密度,磁感应强度	B	特[斯拉]	T
磁通[量]	Φ	韦[伯]	Wb
磁矢位(磁矢势)	A	韦[伯]每米	Wb/m
自感	L	亨[利]	H
互感	M,L_{12}	亨[利]	H
磁导率	μ	亨[利]每米	H/m
真空磁导率	μ_0	亨[利]每米	H/m
相对磁导率	μ_r	—	1
[面]磁矩	m	安[培]平方米	$A·m^2$
磁化强度	$M(H_i)$	安[培]每米	A·m
磁极化强度	$J(B_i)$	特[斯拉]	T
[直流]电阻	R	欧[姆]	Ω
[直流]电导	G	西[门子]	S
电阻率	ρ	欧[姆]米	Ω·m
电导率	γ,σ	西[门子]每米	S/m
磁阻	R_m	每亨[利]	H^{-1}
磁导	$\Lambda(P)$	亨[利]	H
绕组的匝数	N	—	1
相数	m	—	1
相[位]差,相[位]移	φ	弧度	rad
阻抗(复[数]阻抗)	Z	欧[姆]	Ω
阻抗模,(阻抗)	$\|Z\|$	欧[姆]	Ω
[交流]电阻	R	欧[姆]	Ω
电抗	X	欧[姆]	Ω
导纳,(复[数]导纳)	Y	西[门子]	S

续表

量的名称	量符号	单位名称	单位符号
导纳模(导纳)	$\|Y\|$	西[门子]	S
[交流]电导	G	西[门子]	S
电纳	B	西[门子]	S
品质因数	Q	—	1
损耗因数	d	—	1
[有功]功率	P	瓦[特]	W
视在功率(表观功率)	S, P_S	伏安	V·A
无功功率	Q, P_Q	伏安	V·A
功率因数	λ	—	1
[有功]电能[量]	W	焦[耳]或千瓦[特][小]时	J 或 kW·h

四、常用单位的换算

1. 长度单位

长度单位的换算见表 1-31。

表 1-31　长度单位的换算

米 m	厘米 cm	毫米 mm	市尺	英尺 ft	英寸 in	码 yd
1	100	1 000	3	3.280 8	39.37	1.093 6
0.01	1	10	0.03	0.032 8	0.393 7	0.010 94
0.001	0.1	1	0.003	0.003 28	0.039 37	0.001 09
0.333 3	33.33	333.3	1	1.093 6	0.091 13	0.364 5
0.304 8	30.48	304.8	0.914 4	1	12	0.333 3
0.025 4	2.54	25.4	0.076 2	0.083 3	1	0.027 8
0.914 4	91.44	914.4	2.743 2	3	36	1

2. 面积单位

面积单位的换算见表 1-32。

表 1-32　面积单位的换算

平方米 m^2	平方厘米 cm^2	平方毫米 mm^2	平方英尺 ft^2	平方英寸 in^2
1	10^4	10^6	10.764	1 550
10^{-4}	1	100	$1.076\,3\times10^{-3}$	0.155
10^{-6}	0.01	1	$1.076\,3\times10^{-5}$	1.55×10^{-3}
0.092 9	929.03	$9.290\,3\times10^4$	1	144
6.451×10^{-4}	6.451 6	645.16	6.944×10^{-3}	1

3. 体积容积

体积容积单位的换算见表 1-33。

表 1-33　体积、容积单位的换算

立方米 m^3	升 L 或 l	毫升 mL	立方英尺 ft^3	立方英寸 in^3	英加仑 UKgal	美加仑 USgal
1	1 000	10^6	35.315	61 027	219.98	264.18
10^{-3}	1	1 000		61.027	0.22	0.264
10^{-6}	10^{-3}	1				
0.283	28.317		1	1 728	6.228 8	7.480 5
$1.638\,7\times10^{-5}$	0.016 4	16.387		1		
	4.546		0.160 5	277.42	1	1.201
	3.785 4		0.133 7	231	0.832 7	1

4. 压力

压力单位的换算见表 1-34。

表 1-34　压力单位的换算

帕[斯卡] Pa(或 N/m^2)	达因每平方厘米 dyn/cm^2	巴 bar	工程大气压(千克力每平方厘米) at(kgf/cm^2)	标准大气压 atm	毫米水柱 mmH_2O	毫米汞柱 mmHg	磅力每平方英尺 lbf/ft^2	磅力每平方英寸 lbf/in^2
1	10	10^{-5}	1.02×10^{-5}	0.99×10^{-5}	0.102	0.007 5	0.020 89	14.5×10^{-5}
0.1	1				0.010 2			
10^5	10^6	1	1.02	0.986 9	10 197	750.1	2 089	14.5
98 067		0.980 7	1	0.967 8	10^4	735.6	2 048	14.22

续表

帕[斯卡] Pa(或 N/m^2)	达因每平 方厘米 dyn/cm^2	巴 bar	工程大气压 (千克力 每平方厘米) $at(kgf/cm^2)$	标准大气压 atm	毫米 水柱 mmH_2O	毫米 汞柱 mmHg	磅力每平 方英尺 lbf/ft^2	磅力每平 方英寸 lbf/in^2
101 325		1.013 3	1.033 2	1	10 332	760	2 116	14.7
9.807	98.07		0.000 1	$0.967\,8\times10^{-4}$	1	0.073 6	0.204 8	
133.32	1 333.2		0.001 36	0.001 32	13.6	1	2.785	0.0193 4
47.88	478.8				4.882	0.359 1	1	0.006 94
6 894.8	68 948	0.068 95	0.070 3	0.068	703	51.71	144	1

5. 弧度与角度

弧度与角度单位的换算见表 1－35。

表 1－35　弧度与角度单位的换算

秒 (″)	度 (°)	弧度 rad	分 (′)	度 (°)	弧度 rad	度 (°)	弧度 rad	度 (°)	弧度 rad	度 (°)	弧度 rad
1	0.000 3	0.000 005	1	0.016 7	0.000 291	1	0.017 453	90	1.570 796	286.478 9	5
2	0.000 6	0.000 010	2	0.033 3	0.000 582	2	0.034 907	120	2.094 395	229.183 1	4
3	0.000 8	0.000 015	3	0.050 0	0.000 873	3	0.052 360	150	2.617 994	171.887 3	3
4	0.001 1	0.000 019	4	0.066 7	0.001 164	4	0.069 813	180	3.141 593	114.591 6	2
5	0.001 4	0.000 024	5	0.083 3	0.001 454	5	0.087 266	210	3.665 191	57.295 8	1
6	0.001 7	0.000 029	6	0.100 0	0.001 745	6	0.104 720	240	4.188 790	51.566 2	0.9
7	0.001 9	0.000 034	7	0.116 7	0.002 036	7	0.122 173	270	4.712 389	45.836 6	0.8
8	0.002 2	0.000 039	8	0.133 3	0.002 327	8	0.139 626	300	5.235 988	40.107 1	0.7
9	0.002 5	0.000 044	9	0.150 0	0.002 618	9	0.157 080	360	6.283 185	34.377 5	0.6
10	0.002 8	0.000 048	10	0.166 7	0.002 909	10	0.174 533	572.957 8	10	28.647 9	0.5
20	0.005 6	0.000 097	20	0.333 3	0.005 818	20	0.349 066	515.662 0	9	22.918 3	0.4
30	0.008 3	0.000 145	30	0.500 0	0.008 727	30	0.523 599	458.366 2	8	17.188 7	0.3
40	0.011 1	0.000 194	40	0.667	0.011 636	45	0.785 398	401.070 5	7	11.459 2	0.2
50	0.013 9	0.000 242	50	0.833 3	0.014 544	60	1.047 198	343.774 7	6	5.729 6	0.1

注：$1°=(\pi/180)\,rad$；$1'=(1/60)°=(\pi/108\,00)\,rad$；$1''=(1/60)'=(\pi/648\,000)\,rad$。

6. 功能

功能单位的换算见表 1－36。

表 1-36　功能单位的换算

焦[耳] J	尔格 erg	千克力·米 kgf·m	卡 cal	马力[小]时 Ps·h	英马力[小]时 hp·h	电工马力[小]时	英热单位 Btu	英尺磅力 ft·lbf
1	10^7	0.102	239×10^{-9}	377.7×10^{-9}	372.5×10^{-9}		947.8×10^{-6}	0.737 6
10^{-7}	1	0.102×10^{-7}	23.9×10^{-15}	37.77×10^{-15}	37.25×10^{-15}		94.78×10^{-12}	$0.737\,6\times10^{-7}$
9.807	9.807×10^7	1	2.342×10^{-6}	3.704×10^{-6}	3.653×10^{-6}		9.295×10^{-3}	7.233
4.186 8	41.87×10^6	0.426 9	1	1.581×10^{-6}	1.559×10^{-6}		3.968×10^{-3}	3.087
2.648×10^6	26.48×10^{12}	270×10^3	0.632 5	1	0.986 3		2 510	1.953×10^6
2.685×10^6	26.85×10^{12}	273.8×10^3	0.641 2	1.014	1		2 544.4	1.98×10^6
2.686×10^6						1		
1 055.06	10.55×10^9	107.6	0.252×10^{-3}	398.5×10^{-6}	393×10^{-6}		1	778.2
1.356	1.356×10^7	0.138 3	0.324×10^{-6}	$0.512\,1\times10^{-6}$	0.505×10^{-6}		1.285×10^{-3}	1

7. 功率

功率单位的换算见表 1-37。

表 1-37　功率单位的换算

瓦[特] W	千克力米每秒 kgf·m/s	[米制]马力 法 ch,cv; 德 Ps	英马力 hp	电工马力	卡每秒 cal/s	千卡每[小]时 kcal/h	英尺磅力每秒 ft·lbf/s	尔格每秒 erg/s
1	0.102	1.36×10^{-3}	1.34×10^{-3}		239×10^{-3}	0.859 8	0.737 6	10^7
9.807	1	13.33×10^{-3}	13.15×10^{-3}		2.342	8.4325	7.233	9.807×10^7
735.5	75	1	0.986 3		175.7	632.52	542.5	7.355×10^9
745.7	76.04	1.014	1		178.1	641.16	550	7.457×10^9
746				1				
4.186 8	0.426 9	5.69×10^{-3}	5.614×10^{-3}		1		3.087	41.87×10^6
1.163						1		
1.355 8	0.138 3	1.843×10^{-3}	1.82×10^{-3}		0.324×10^{-6}	1.166 4	1	1.356×10^7
10^{-7}	0.102×10^{-7}	0.136×10^{-9}	$0.134\,1\times10^{-9}$		23.9×10^{-15}	8.604×10^{-8}	$0.737\,6\times10^{-7}$	1

8. 电磁量

电磁量的厘米克秒电磁制单位换算见表 1-38。

表 1-38　电磁量的厘米克秒电磁制单位换算表

单位名称	单位符号	与法定计量单位的关系	备　注	单位名称	单位符号	与法定计量单位的关系	备　注
绝对安培	aA	10 A	电流	绝对亨利	aH	10^{-9} H	电感
毕奥	Bi	10 A	电流	绝对西门子	aS	10^9 S	电导

续表

单位名称	单位符号	与法定计量单位的关系	备　注	单位名称	单位符号	与法定计量单位的关系	备　注
绝对库仑	aC	10 C	电荷[量]	麦克斯韦	Mx	10^{-8}Wb	磁通量
绝对伏特	aV	10^{-8}V	电压	高斯	G,Gs	10^{-4}T	磁通密度
绝对欧姆	aΩ	10^{-9}Ω	电阻	奥斯特	Oe	79.577 5 A/m	磁场强度
绝对法拉	aF	10^{9} F	电容	吉伯	Gb	0.795 775 A	磁通势

第四节　常用物理量数据

一、常用物理量常数

常用物理量常数见表 1-39。

表 1-39　常用物理量常数

名　称	符号	常数值	单位	名　称	符号	常数值	单位
重力加速度	g	9.806 65	m/s^2	中子[静止]质量	m_n	$1.674\,8\times10^{-24}$	g
元电荷	e	$1.602\,2\times10^{-19}$	C	真空介电常数	ε_0	8.854×10^{-12}	F/m
电子半径	r_0	2.82×10^{-15}	m	真空磁导率	μ_0	$4\pi\times10^{-7}$	H/m
电子伏特	eV	1.602×10^{-19}	J	电磁波在真空中的传播速度	c	2.998×10^{8}	m/s
电子[静止]质量	m_e	9.109×10^{-28}	g	玻耳兹曼常数	k	1.380×10^{-23}	J/K
质子[静止]质量	m_p	$1.672\,5\times10^{-24}$	g	斯忒藩-玻耳兹曼常数	σ	5.670×10^{-8}	$W/(m^2\cdot K^4)$

二、电阻温度系数

电阻温度系数见表 1-40。

表 1-40　电阻温度系数

材　料	电阻温度系数	材　料	电阻温度系数	材　料	电阻温度系数
汞	0.000 9	铝	0.039	铬	0.004 8
铂	0.003 0	铅	0.003 9	铁	0.005 0
钼	0.003 0	铱	0.003 9	锰	$(3\sim10)\times10^{-6}$

续表

材　料	电阻温度系数	材　料	电阻温度系数	材　料	电阻温度系数
锌	0.003 7	镁	0.004 0	康铜	15×10^{-6}
银	0.003 8	锇	0.004 2	阿范斯电阻合金	≈0
铜	0.003 9	钨	0.004 5		

三、导体的电阻率

导体的电阻率见表 1-41。

表 1-41　导体的电阻率

材　料	电阻率/Ω·m	材　料	电阻率/Ω·m	材　料	电阻率/Ω·m
银	1.62×10^{-8}	镍	7.24×10^{-8}	黄铜	8×10^{-8}
铜	1.69×10^{-8}	镉	7.4×10^{-8}	青铜	18×10^{-8}
金	2.40×10^{-8}	钴	9.70×10^{-8}	钢	$(10\sim20)\times10^{-8}$
铝	2.83×10^{-8}	铁	10.00×10^{-8}	铜镍合金	33×10^{-8}
镁	4.50×10^{-8}	锡	11.40×10^{-8}	白铜	42×10^{-8}
铍	4.60×10^{-8}	铈	21.00×10^{-8}	锰镍铜合金	43×10^{-8}
锰	5.0×10^{-8}	铅	21.90×10^{-8}	高镍钢	45×10^{-8}
铱	5.3×10^{-8}	锑	40.90×10^{-8}	康铜	49×10^{-8}
钨	5.5×10^{-8}	汞	95.80×10^{-8}	硅钢(含硅 45%)	62.5×10^{-8}
钼	5.7×10^{-8}	硬铝	3.55×10^{-8}	锰钢	$(34\sim100)\times10^{-8}$
锌	6.10×10^{-8}	磷青铜	$(2\sim5)\times10^{-8}$	镍铬铁合金	$(100\sim110)\times10^{-8}$

四、常用物质的介电常数

常用物质的介电常数见表 1-42。

表 1-42　常用物质的介电常数

物　质	介电常数(F/m)	物　质	介电常数(F/m)	物　质	介电常数(F/m)
氢	1.000 264	石蜡	2～2.5	陶瓷	5～6.5
氧	1.000 524	橡胶	2～3.5	大理石	8.3
空气	1.000 586	白云母	5～7	聚乙烯	2.3
一氧化碳	1.000 695	琥珀	2.8	聚苯乙烯	2.4～2.7

续表

物　质	介电常数(F/m)	物　质	介电常数(F/m)	物　质	介电常数(F/m)
二氧化碳	1.000 946	石英玻璃	3.5～4.5	聚氯乙烯	3.4～3.6
纸	2～2.6	钠玻璃	5.4～8	氧化钛	30～80
变压器油	2.2～2.4	橄榄油	3.1～3.2	酒石酸钾钠	200
松节油	2.2～2.3	硫黄	3.6～4.2	钛酸钡	2 500～4 500
汽油	2.3				

第五节　常用电工图形符号及文字符号

一、常用电工图形符号

1. 限定符号和其他常用符号

(1) 限定符号。

① 电流和电压符号见表 1-43。

表 1-43　电流和电压符号

⎓	直流 电压可标注在符号右边，系统类型可标注在左边 示例：2/M ⎓ 220/110 V
～	交流 频率值或频率范围可标注在符号的右边 示例：
～50 Hz	交流 50 Hz
～100...600 kHz	交流，频率范围 100 kHz 到 600 kHz 电压值也可标注在符号右边 相数和中性线存在时可标注在符号左边
3/N～400/230 V 50 Hz	交流，三相带中性线，400 V*（相线和中性线间的电压为 230 V*），50 Hz(也可见 IEC1293)
3/N～50 Hz/TN-S	如需要按 IEC364-3 的规定标志系统，则要在符号上加上相应标志 交流、三相、50 Hz，具有一个直接接地点且中性线与保护导体全部分开的系统

续表

	不同的频率范围的交流 当需要用一个给定的画法来区分不同的频率范围时，可使用下述符号： 相对低频（工频或亚音频） 中频（音频） 相对高频（超音频、载频或射频）
	具有交流分量的整流电流（当需要与整流并滤波的电流相区别时使用）
+	正极性
−	负极性
N	中性（中性线） 此中性符号在 GB/T 4026 中给出
M	中间线 此中间线符号在 GB/T 4026 中给出

注：* 按国家标准 GB 156—1993《标准电压》，相应等级为 380 V 和 220 V。

② 效应或相关性见表 1－44。

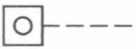
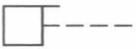
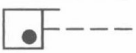
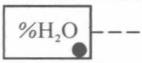
表 1－44　效应或相关性

图形符号	说　明
	热效应
	电磁效应
	磁致伸缩效应
×	磁场效应或磁场相关性
	延时（延迟）
	半导体效应
//	具有电隔离的耦合效应

(2) 其他常用符号。

① 附加操作件见表 1－45。

表 1-45　附加操作件

图形符号	说　明
	液位控制
	计数器控制
	流体控制
	示例： 气流控制
	相对湿度控制

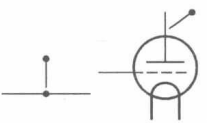
② 接地和接机壳、等电位见表 1-46。

表 1-46　接地和接机壳、等电位

图形符号	说　明
	接地，一般符号 地，一般符号 如果接地的状况或接地目的表达得不够明显，可加补充信息
	抗干扰接地 无噪声接地
	保护接地 此符号可代替符号 02-15-01 以表示接地连接具有专门的保护功能，例如在故障情况下防止电击的接地
	接机壳 接底板 图中的影线如果不存在不明确的情况则可完全或部分省略。如果图中的影线被省略则表示机壳或底板的线条应加粗，如下图表示：
	等电位

③ 其他符号见表 1-47。

表 1-47　其他符号

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	故障 (指明假定故障的位置)		变换器一般符号,例如: 能量转换器 信号转换器 测量用传感器 如果变换方向不明确可以在符号的轮廓线上用箭头标明。表示输入、输出和波形等的符号或代号,可以写进一般符号的每半部分内,以表示变换的性质 示例见 GB 4728.6 和 GB 4728.10
	闪络 击穿		
	永久磁铁		
	动(如滑动)触点		转(变)换
	测试点指示符 示例: 		模拟 此符号仅在需要将模拟信号与其他型式的信号和连接相区别时才使用
			数字 此符号仅在需要将数字信号与其他型式的信号和连接相区别时才使用

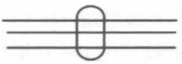
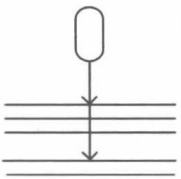
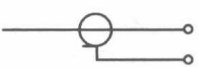
2. 导体和连接件

(1) 连接线见表 1-48。

表 1-48　连接线

符　号	说　明	符　号	说　明
	连线、连接 连线组 示例： ——导线 ——电缆 ——电线 ——传输通路 如用单线表示一组导线时，导线的数可标以相应数量的短斜线或一个短斜线后加导线的数字 连线符号的长度取决于简图的布局	⎓110V $2\times120mm^2Al$	示例： 直流电路，110 V，两根120 mm^2的铝导线
		3/N~400/230V 50Hz $3\times120mm^2+1\times50mm^2$	三相电路，400/230 V[①]，50 Hz，三根 120 mm^2 的导线，一根 50 mm^2 的中性线
			柔性连接
			屏蔽导体 如果几根导体包含在同一屏蔽内或同一电缆内，或者绞合在一起，但这些导体符号和其他导体符号互相混杂，则可用 03-01-10 的画法 电缆、屏蔽或绞合线的符号可画在导线混合组符号的上边、下边或旁边。应用连在一起的指引线指到各个导线上来表示这些在同一屏蔽内或电缆内或绞合线组内的导线
型式 1 ///	示例： 三根导线 可标注附加信息，如： ——电流种类 ——配电系统 ——频率		
型式 2 3	——电压 ——导线数 ——每根导线的截面积 ——导线材料的化学符号 导线数后面标其截面积，并用“×”号隔开 若截面积不同时，应用“+”号分别将其隔开		

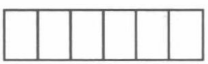
续表

符　号	说　明	符　号	说　明
	电缆中的导线 示出三根		绞合导线 示出两根 用 03 - 01 - 07 的规则
	用 03 - 01 - 07 的规则 示例： 五根导线，其中箭头所指的两根在同一电缆内		示例： 同轴对连到端子上
	同轴对 若同轴结构不再保持，则切线只画在同轴的一边		屏蔽同轴对
			导线或电缆的终端未连接
			导线或电缆终端未连接，并有专门的绝缘

① 国家标准 GB 156—1993《标准电压》中相应等级为 380/220 V。

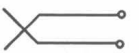
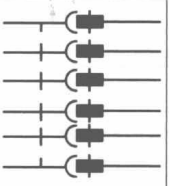
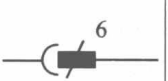
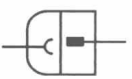
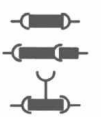
(2) 连接、端子和支路见表 1 - 49。

表 1 - 49　连接、端子和支路

符　号	说　明	符　号	说　明
●	连接 连接点	型式 1 型式 2 	T 型连接 在符号 03 - 02 - 04 中增加连接符号
○	端子	型式 1 	导线的双重连接
	端子板 可加端子标志	型式 2 	型式 2 仅在设计认为必要时使用

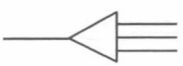
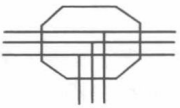
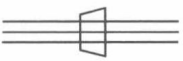
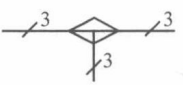
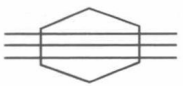
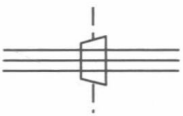
(3) 连接件见表 1 - 50。

表 1-50　连接件

符　号	说　明	符　号	说　明
	阴接触件(连接器的) 插座 用单线表示法表示多接触件连接器的阴端		触头断开的电话型插塞和塞孔 本符号示出了三个极 使用要求同 03-03-12
	阳接触件(连接器的) 插头 用单线表示法表示多接触件连接器的阳端		电话型断开的塞孔 电话型隔离的塞孔
	插头和插座 应用符号 03-03-01 和03-03-03的规则		同轴的插头和插座 若同轴的插头或插座连接于同轴对时，切线应朝相应的方向延长
	插头和插座，多极 用多线表示六个阴接触件和六个阳接触件的符号		对接连接器
	插头和插座，多极 用单线表示六个阴接触件和六个阳接触件的符号	形式 1 形式 2	接通的连接片
	配套连接器 本符号表示插头端固定和插座端可动 使用要求同 03-03-09		断开的连接片
	电话型插塞和塞孔 本符号示出了二个极 插塞符号的长极表示插塞尖，短极为插塞		插头和插座式连接器如 U 型连接 阳—阳 阳—阴 有插座的阳—阳

(4) 电缆装配附件见表 1-51。

表 1-51 电缆装配附件

符　号	说　明	符　号	说　明
	电缆密封终端，表示带有一根三芯电缆		电缆接线盒，表示带 T 型连接的三根导线： 多线表示 单线表示
	电缆密封终端，表示带有三根单芯电缆		
	直通接线盒，表示带有三根导线： 多线表示		电缆气闭套管，表示带有三根电缆 高气压侧是梯形的长边，因此保持套管气闭
	单线表示		

3. **基本无源元件**

(1) 电阻器见表 1-52。

表 1-52 电阻器

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	电阻器，一般符号		压敏电阻器 变阻器
删除	转到附录 A：04-A1-01		带滑动触点的电阻器
	可调电阻器		

(2) 电容器见表 1-53。

表 1-53 电容器

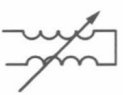
图形符号	说　明	图形符号	说　明
	电容器，一般符号		差动可调电容器

续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
删除	转到附录 A:04－A2－01		可调电容器
	穿芯电容器 旁路电容器		定片分离可调电容器
删除	转到附录 A:04－A2－02		预调电容器
	极性电容器，例如电解电容		热敏极性电容器 利用其热敏特性，例如陶瓷电容器
删除	转到附录 A:04－A2－03		压敏极性电容器 利用其压敏特性，例如半导体电容器

(3) 电感器见表 1－54。

表 1－54　电感器

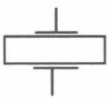
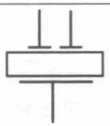
图形符号	说　明	图形符号	说　明
	电感器 线圈 绕组 扼流圈 若表示带磁芯的电感器，可以在该符号上加一条平行线；若磁芯为非磁性材料可加注释；若磁芯有间隙，这条线可断开画 注：变压器绕组见 GB/T 4728.6		带固定抽头的电感器，示出两个抽头
删除	转到附录 A:04－A3－01		步进移动触点可变电感器
	示例： 带磁芯的电感器		可变电感器

续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	磁芯有间隙的电感器		带磁芯的同轴扼流圈
	带磁芯连续可变电感器		穿在导线上的铁氧体磁珠

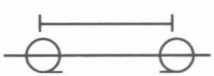
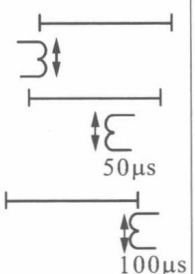
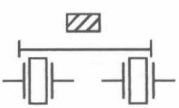
(4) 压电晶体见表 1-55。

表 1-55　压电晶体

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	具有两个电极的压电晶体		具有两对电极的压电晶体
	具有三个电极的压电晶体		具有电极和连接的驻极体较长的线表示正极

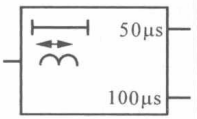
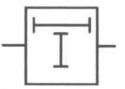
(5) 驻极体见表 1-56。

表 1-56　驻极体

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	具有绕组的磁致伸缩延迟线，以集中表示法示出三个绕组		同轴延迟线
	具有绕组的磁致伸缩延迟线，以分开表示法示出一种输入，两种输出 输入 具有 50 μs 延迟的中间输出 具有 100 μs 延迟的最终输出		压电传感的固体材料延迟线

(6) 延迟线和延迟元件的方框符号见表 1-57。

表 1-57　延迟线和延迟元件的方框符号

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	延迟线，一般符号 延迟元件，一般符号		压电传感式水银延迟线
	具有两个输出端的磁致伸缩延迟线，输出信号分别延迟了 50 μs 和 100 μs		仿真延迟线
	同轴延迟线		

4. 半导体管

(1) 半导体二极管见表 1-58。

表 1-58　半导体二极管

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	半导体二极管，一般符号		单向击穿二极管 电压调整二极管 齐纳二极管
	发光二极管(LED)，一般符号		双向击穿二极管
	热敏二极管		反向二极管(单隧道二极管)
	变容二极管		双向二极管
	隧道二极管 江崎二极管		

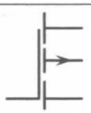
(2) 晶体闸流管见表 1-59。

表 1-59　晶体闸流管

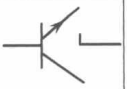
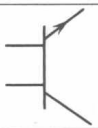
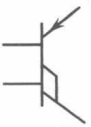
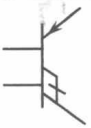
图形符号	说　明	图形符号	说　明
	反向阻断二极晶体闸流管		可关断三极晶体闸流管，N 型控制极（阳极侧受控）
	反向导通二极晶体闸流管		可关断三极晶体闸流管，P 型控制极（阴极侧受控）
	双向二极晶体闸流管 双向开关二极管		反向阻断四极晶体闸流管
	无指定型式的三极晶体闸流管 若没有必要指定控制极的类型时，本符号用于表示反向阻断三极晶体闸流管		双向三极晶体闸流管 三端双向晶体闸流管
	反向阻断三极晶体闸流管，N 型控制极（阳极侧受控）		反向导通三极晶体闸流管，未指定控制极
	反向阻断三极晶体闸流管，P 型控制极（阴极侧受控）		反向导通三极晶体闸流管，N 型控制极（阳极侧受控）
	可关断晶体闸流管，未指定控制极		反向导通三极晶体闸流管，P 型控制极（阴极侧受控）

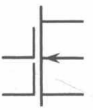
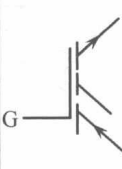
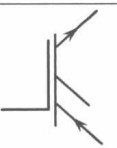
（3）半导体管见表 1-60。

表 1-60　半导体管

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	PNP 半导体管		绝缘栅场效应半导体管（IGFET） 增强型、单栅、N 型沟道、衬底无引出线
	集电极接管壳的 NPN 半导体管		绝缘栅场效应半导体管（IGFET） 增强型、单栅、P 型沟道、衬底有引出线

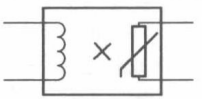
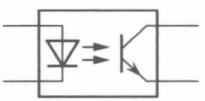
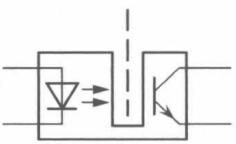
续表

图形符号	说　明
	NPN 雪崩半导体管
	具有 P 型双基极的单结半导体管
	具有 N 型双基极的单结半导体管
	具有横向偏压基极的 NPN 半导体管
	与本征区有欧姆接触的 PNIP 半导体管
	与本征区有欧姆接触的 PNIN 半导体管
	N 型沟道结型场效应半导体管 栅极与源极的引线应绘在一直线上 栅极 漏极 源极
	P 型沟道结型场效应半导体管
	绝缘栅场效应半导体管(IGFET) 增强型、单栅、P 型沟道、衬底无引出线 具有多栅的示例见符号05－05－17

图形符号	说　明
	绝缘栅场效应半导体管(IGFET) 增强型、单栅、N 型沟道、衬底与源极内部连接
	绝缘栅场效应半导体管(IGFET) 耗尽型、单栅、N 型沟道、衬底无引出线
	绝缘栅场效应半导体管(IGFET) 耗尽型、单栅、P 型沟道、衬底无引出线
	绝缘栅场效应半导体管(IGFET) 耗尽型、双栅、N 型沟道、衬底有引出线 在多栅的情况下，主栅和源极的引出线应绘在一直线上
	绝缘栅双极半导体管(IGBT)增强型、P 沟道 字母 E、G 和 C 分别表示发射极、栅极和集电极的端子名，若不会引起混淆，字母可以省略
	绝缘栅双极半导体管(IGBT) 增强型、N 沟道
	绝缘栅双极半导体管(IGBT) 耗尽型、P 沟道
	绝缘栅双极半导体管(IGBT) 耗尽型、N 沟道

(4) 光敏和磁敏器件示例见表 1-61。

表 1-61 光敏和磁敏器件示例

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	光敏电阻 光电导管 具有对称导电性的光电导器件		磁敏电阻，示出线性型
	光电二极管 具有非对称导电性的光电器件		磁耦合器件 磁隔离器
	光电池		光耦合器件 光隔离器 示出发光二极管和光电半导体管
	光电半导体管，示出 PNP 型		具有光阻挡槽光耦合器件，示出机械阻挡
	具有四根引出线霍尔发生器		

5. 电机

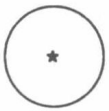
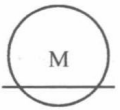
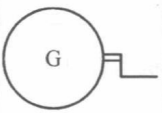
(1) 电机零部件见表 1-62。

表 1-62 电机的零部件

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	区分绕组的不同功能 换向绕组或补偿绕组 串励绕组 并励绕组或他励绕组		电刷(集电环或换向器上的) 仅在必要时标示出电刷。应用示例，见符号 06-05-03

(2) 电机的类型见表 1-63。

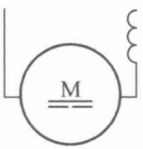
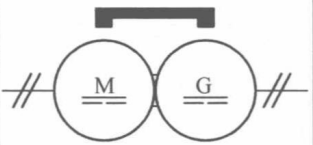
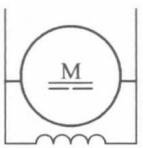
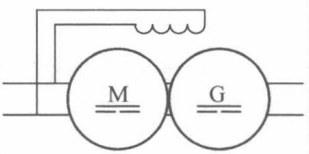
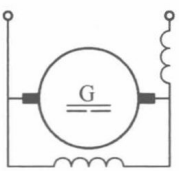
表 1-63　电机的类型

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	电机的一般符号 符号内的星号用下述字母之一代替： C　旋转变流机 G　发电机 GS　同步发电机 M　电动机 MG　能作为发电机或电动机使用的电机 MS　同步电动机 可加上符号 02-02-03 和 02-02-04，如在第 5 章至第 8 章中所示① 非旋转的电能发生器见第 16 章		直线电动机，一般符号
			步进电动机，一般符号
			手摇发电机（磁石电话）

① 指 GB/T 4728.6—2000 标准中的编号，下同。

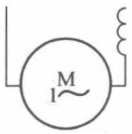
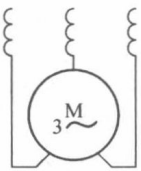
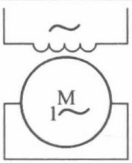
(3) 直流电机示例见表 1-64。

表 1-64　直流电机示例

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	直流串励电动机		具有公共永久磁场的直流/直流旋转变流机
	直流并励电动机		具有公共磁场绕组的直流/直流旋转变流机
	短分路复励直流发电机，示出接线端子和电刷		

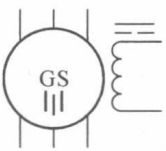
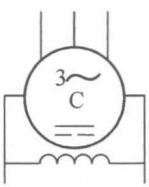
(4) 交流换向器电机示例见表 1-65。

表 1-65　交流换向器电机示例

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	单相串励电动机		三相串励电动机
	单相推斥电动机		

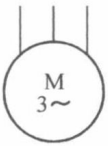
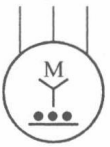
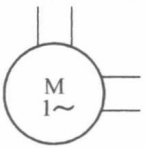
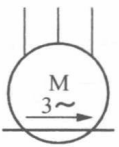
(5) 同步电机示例见表 1-66。

表 1-66　同步电机示例

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	三相永磁同步发电机		每相绕组两端都引出的三相同步发电机
	单相同步电动机		
	中性点引出的星形连接的三相同步发电机		三相并励同步旋转变流机

(6) 感应型(异步)电机示例见表 1-67。

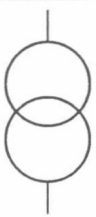
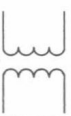
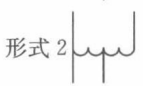
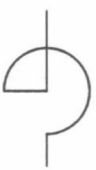
表 1-67　感应型(异步)电机示例

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	三相笼型感应电动机		有自动起动器的三相星形连接的感应电动机
	单相笼型有分相绕组引出端的感应电动机		
	三相绕线式转子感应电动机		限于一个方向运动的三相直线感应电动机

6. 变压器

(1) 变压器和电抗器的一般符号见表 1-68。

表 1-68　变压器和电抗器的一般符号

图形符号	说　明	图形符号	说　明
形式 1  形式 2 	双绕组变压器 瞬时电压的极性可以在型式 2 中表示	形式 1 形式 2 	自耦变压器
形式 3 	示例： 示出瞬时电压极性的双绕组变压器 流入绕组标记端的瞬时电流产生助磁通	形式 1  形式 2 (见序号 04-03-01)	扼流圈 电抗器

续表

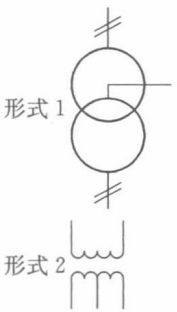
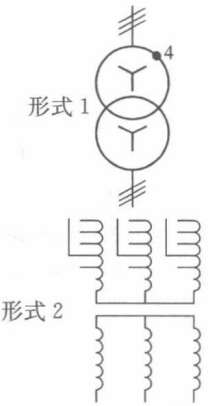
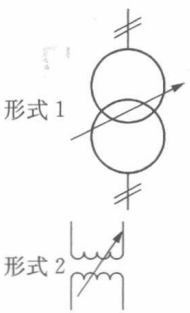
图形符号	说　明	图形符号	说　明
形式1 形式2	三绕组变压器	形式1 形式2	电流互感器 脉冲变压器

(2) 具有独立绕组的变压器见表1-69。

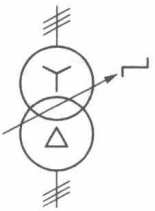
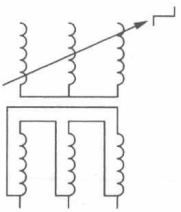
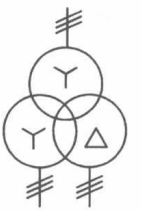
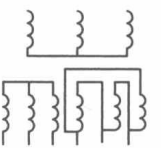
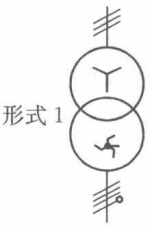
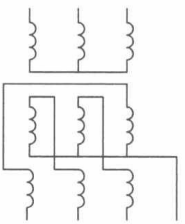
表1-69　具有独立绕组的变压器

图形符号	说　明	图形符号	说　明
形式1 形式2	绕组间有屏蔽的双绕组单相变压器	形式1 形式2	星形-三角形连接的三相变压器

续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	在一个绕组上有中心点抽头的变压器		具有 4 个抽头的星形-星形连接的三相变压器 每个一次绕组除其端头外还示出 4 个可用的连接点
	耦合可变的变压器		单相变压器组成的三相变压器 星形-三角形连接

续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
形式1  形式2 	具有有载分接开关的三相变压器 星形-三角形连接	形式1  形式2 	三相变压器 星形-星形-三角形连接
形式1  形式2 	三相变压器 星形-曲折形中性点引出的连接		

(3) 自耦变压器示例见表1-70。

表 1-70　自耦变压器示例

图形符号	说　明	图形符号	说　明	图形符号	说　明
形式 1 形式 2	单相自耦变压器	形式 1 形式 2	三相自耦变压器　星形连接	形式 1 形式 2	可调压的单相自耦变压器

(4) 感应调压器示例见表 1-71。

表 1-71　感应调压器示例

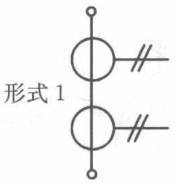
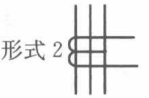
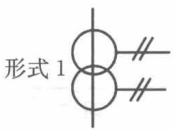
图形符号	说　明
形式 1　形式 2	三相感应调压器

(5) 互感器和脉冲变压器示例见表 1-72。

表 1-72　互感器和脉冲变压器示例

图形符号	说　明	图形符号	说　明
形式 1 形式 2	电压互感器	形式 1　$N=5$ 形式 2　$N=5$	一次绕组为 5 匝导体贯穿的电流互感器 这种型式的电流互感器不带内装式一次绕组

续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
形式 1  形式 2 	具有两个铁芯，每个铁芯有一个二次绕组的电流互感器 在一次电路每端示出端子符号表明只是一个器件。如果使用了端子代号，则端子符号可以省略 形式 2 中铁芯符号可以略去	形式 1 形式 2 	具有三条穿线一次导体的脉冲变压器或电流互感器
形式 1  形式 2 	在一个铁芯上具有两个二次绕组的电流互感器 形式 2 的铁芯符号必须画出	形式 1 形式 2 	在同一个铁芯具有两个二次绕组和九条穿线一次导体的脉冲变压器或电流互感器
形式 1 形式 2 	一个二次绕组带一个抽头的电流互感器		

7. 电能变换器

电能变换器的图形符号见表 1－73。

表 1－73　电能变换器的图形符号

序号	图形符号	说　明	序号	图形符号	说　明
06－14－01		变换，一般符号	06－14－04		桥式全波整流器

续表

序号	图形符号	说　明	序号	图形符号	说　明
06-14-02		直流/直流变换器	06-14-05		逆变器
06-14-03		整流器	06-14-06		整流器/逆变器

8. 原电池、蓄电池

原电池、蓄电池的图形符号见表1-74。

表1-74　原电池、蓄电池

序号	图形符号	说　明
06-15-01		原电池 蓄电池 原电池或蓄电池组 长线代表阳极，短线代表阴极

9. 开关、控制和保护器件

(1) 触点。

① 两个或三个位置的触点见表1-75。

表1-75　两个或三个位置的触点

图形符号	说　明	图形符号	说　明
形式1 形式2 	动合(常开)触点 本符号也可用作开关的一般符号	形式1 形式2 	先合后断的转换触点

续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	动断(常闭)触点		双动合触点
	先断后合的转换触点		双动断触点
	中间断开的双向转换触点		

② 具有两个触点位置的过渡触点见表 1-76。

表 1-76　具有两个位置的过渡触点

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	当操作器件被吸合时,暂时闭合的过渡动合触点		当操作器件被吸合或释放时,暂时闭合的过渡动合触点
	当操作器件被释放时,暂时闭合的过渡动合触点		

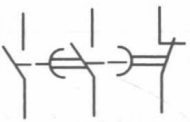
③ 提前和滞后动作的触点见表 1-77。

表 1-77　提前和滞后动作的触点

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	(多触点组中)比其他触点提前吸合的动合触点		(多触点组中)比其他触点滞后释放的动断触点
	(多触点组中)比其他触点滞后吸合的动合触点		(多触点组中)比其他触点提前释放的动断触点

④ 延时动作的触点见表 1－78。

表 1－78　延时动作的触点

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	当操作器件被吸合时延时闭合的动合触点		当操作器件被释放时延时闭合的动断触点
	当操作器件被释放时延时断开的动合触点		当操作器件吸合时延时闭合，释放时延时断开的动合触点
	当操作器件被吸合时延时断开的动断触点		示例： 由一个不延时的动合触点，一个吸合时延时闭合的动合触点和一个释放时延时闭合的动断触点组成的触点组

⑤ 有自动返回和无自动返回的触点见表 1－79。

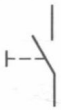
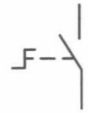
表 1－79　有自动返回和无自动返回的触点

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	有自动返回的动合触点		有自动返回的动断触点
	无自动返回的动合触点		一边有自动返回(见左边)，另一边无自动返回的中间断开的双向触点

(2) 开关、开关器件和启动器。

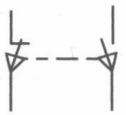
① 单极开关图形符号见表 1－80。

表 1-80　单极开关图形符号

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	手动操作开关，一般符号		具有动合触点但无自动复位的旋转开关
	具有动合触点且自动复位的按钮开关		具有正向操作的动合触点的按钮开关（例如：报警开关）
	具有动合触点且自动复位的拉拔开关		具有正向操作的动断触点且有保持功能的紧急停车开关（操作“蘑菇头”）

② 位置开关图形符号见表 1-81。

表 1-81　位置开关图形符号

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	位置开关，动合触点		位置开关，对两个独立电路作双向机械操作
	位置开关，动断触点		动断触点能正向断开操作的位置开关

③ 热敏开关图形符号见表 1-82。

表 1-82　热敏开关图形符号

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	热敏开关，动合触点 注：θ 可用动作温度代替		热敏自动开关（例如双金属片）的动断触点 注意区别此触点和下图所示热继电器的触点

续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	热敏开关，动断触点 符号 07－09－01 的注适用本符号		具有热元件的气体放电管荧光灯起动器

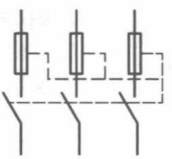
(3) 接近和接触敏感器件图形符号见表 1－83。

表 1－83　接近和接触敏感开关图形符号

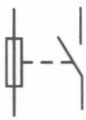
图形符号	说　明	图形符号	说　明
	接触敏感开关动合触点		磁铁接近动作的接近开关，动合触点
	接近开关动合触点		磁铁接近时动作的接近开关，动断触点

(4) 保护器件——熔断器和熔断器式开关图形符号见表 1－84。

表 1－84　熔断器和熔断器式开关

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	熔断器一般符号		任何一个撞击式熔断器熔断而自动释放的三极开关
	熔断器烧断后仍可使用，一端用粗线表示的熔断器		
	带机械连杆的熔断器(撞击式熔断器)		熔断器式开关

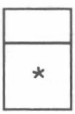
续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	具有报警触点的三端熔断器		熔断器式隔离开关
	具有独立报警电路的熔断器		熔断器式负荷开关

10. 测量仪表、灯和信号器件

(1) 指示仪表、记录仪和积算仪表通用符号见表 1-85。

表 1-85　指示仪表、记录仪表和积算仪表通用符号

序号	图形符号	说　明	序号	图形符号	说　明
08-01-01		指示仪表 星号应按照相关的规定予以代替	08-01-03		积算仪表，如电能表 星号应按照相关规定予以代替 从积算仪表传输重复读数的遥测仪表也可使用本符号 本符号可以和记录仪表组合来表示组合仪表 符号顶部的矩形数表示复费率表所测的不同量的数
08-01-02		记录仪表 星号应按照相关规定予以代替			

(2) 指示仪表图形符号见表 1-86。

表 1-86　指示仪表图形符号

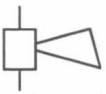
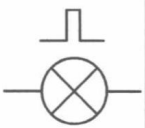
图形符号	说　明	图形符号	说　明
	电压表		波长表

续表

图形符号	说　明	图形符号	说　明
A $I\sin\varphi$	无功电流表		示波器
W P_{max}	积算仪表激励的最大需量指示器	V U_d	差动式电压表
var	无功功率表		检流计
$\cos\varphi$	功率因数表	NaCl	盐度计
φ	相位表	Θ	温度计 高温计
Hz	频率计	n	转速表
	同步指示器		

(3) 灯和信号装置图形符号见表 1-87。

表 1-87　灯和信号装置图形符号

图形符号	说　明	图形符号	说　明
	灯，一般符号 信号灯，一般符号 如果要求指示颜色，则在靠近符号处标出下列代码： RD——红　YE——黄 GN——绿　BU——蓝 WH——白 如果要求指示灯类型，则在靠近符号处标出下列代码： Ne——氖　Xe——氙 Na——钠气　Hg——汞 I——碘　IN——白炽 EL——电发光 ARC——弧光 FL——荧光 IR——红外线 UV——紫外线 LED——发光二极管		带有一个断开位置和两个工作位置的机电型位置指示器
			电喇叭
			电铃
		删除	转到附录 A:08-A3-01
			单击电铃
			报警器
			蜂鸣器
		删除	转到附录 A:08-A3-01
	闪光型信号灯		电动汽笛
	机电型指示器 信号元件		由内置变压器供电的指示灯

二、电工文字符号

1. 电气设备、装置和元器件种类单字母符号

表示电气设备、装置和元器件种类单字母符号见表 1-88。

表 1-88　表示电气设备、装置和元器件种类的单字母符号

种　　类	符号	种　　类	符号
组件、部分	A	测量设备、试验设备	P
非电量到电量变换器或电量到非电量变换器	B	电力电路的开关器件	Q
电容器	C	电阻器	R
二进制元件、延迟器件、存储器件	D	控制、记忆、信号电路的开关器件、选择器	S
其他元器件	E	变压器	T
保护器件	F	调制器、变换器	U
发生器、发电机、电源	G	电子管、晶体管	V
信号器件	H	传输通道、波导、天线	W
继电器、接触器	K	端子、插头、插座	X
电感器、电抗器	L	电气操作的机械器件	Y
电动机	M	终端设备、混合变压器、滤波器、均衡器、限幅器	Z
模拟元件	N		

2. 电气设备的文字符号

电气设备常用基本文字符号见表 1-89。

表 1-89　电气设备常用基本文字符号

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
(1) 电机类			
发电机	G		F
直流发电机	G	GD(C)	ZLF,ZF
交流发电机	G	GA(C)	JLF,JF
异步发电机	G	GA*	YF
同步发电机	G	GS**	TF
变频机	G	GF*	BP
测速发电机		TG**	CF,CSF
发电机—电动机组		G-M	F-D
永磁发电机	G	GP	YCF
汽轮发电机	G	GT	QLF
水轮发电机	G	GH	SLF
励磁机	G	GE	L
电动机	M		D
直流电动机	M	MD(C)	ZD,ZLD

续表

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
交流电动机	M	MA(C)	JD,JLD
异步电动机	M	MA	YD
同步电动机	M	MS**	TD
调速电动机	M	MA(S)	TSD
伺服电动机		SM**	SD
笼型电动机	M	MC	LD
绕线转子电动机	M	MW(R)	
电机扩大机	A	AR	JDF
力矩电动机		TM**	
感应同步机		IS**	
绕组(线圈)	W		Q
电枢绕组	W	WA	SQ
定子绕组	W	WS	DQ
转子绕组	W	WR	ZQ
励磁绕组	W	WE	LQ
并励绕组	W	WS(H)	BQ
串励绕组	W	WS(E)	CQ
他励绕组	W	WS(P)	TQ
稳定绕组	W	WS(T)	WQ
换向绕组	W	WC(M)	HXQ
补偿绕组	W	WC(P)	BCQ
控制绕组		WC	KQ
起动绕组	W	WS(T)	QQ
反馈绕组	W	WF	FQ
给定绕组	W	WG	GDQ
(2) 变压器、互感器和电抗器类			
变压器	T		B
电力变压器	T	TM*	LB
升压变压器	T	T(S)U	SYB,SB
降压变压器	T	T(S)D	JYB,JB
自耦变压器	T	TA(U)	ZOB,OB

续表

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
隔离变压器	T	TI(N)	GB
照明变压器	T	TL	ZB
整流变压器	T	TR	ZLB,ZB
电炉变压器	T	TF	DLB,LB
饱和变压器	T	TS(A)	BHB,BB
起动变压器	T	TS(T)	QB
控制变压器	T	TC*	KB
脉冲变压器	T	TI	MB,MCB
调压变压器	T	TT(C)	TB
同步变压器	T	TS(Y)	
调压器	T	TV(R)	
互感器	T		H
电压互感器	T	TV*(或 PT)	YH
电流互感器	T	TA*(或 CT)	LH
电抗器	L		K
饱和电抗器	L	LT	BHK
限流电抗器	L	LC(L)	XLK
平衡电抗器	L	LB	PHK
起动电抗器	L	LS	QK
滤波电抗器	L	LF	LBK
(3) 开关、控制器类			
开关	Q,S		K
刀开关	Q	QK	DK
组合开关	S	SCB	
转换开关	S	SC(O)	HK
负荷开关	Q	QS(F)	
熔断器式刀开关	Q	QF(S)	DK-RD
断路器	Q	QF*	ZK,DL,GD
隔离开关	Q	QS*	GK
控制开关	S	SA*	KK
接地开关	Q	QG	JDK,DK

续表

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
限位开关、终端开关	S	SQ*	ZDK,ZK XWK,XK
微动开关	S	SM(G)	WK
接近开关	S	SP	JK
行程开关	S	ST	XK,CK
灭磁开关	Q	QF(D)	MK
水银开关	S	SM	SYK,YK
脚踏开关	S	SF	JTK,TK
按钮	S	SB*	AN
起动按钮	S	SB(T)	QA
停止按钮	S	SB(P)	TA
控制按钮	S	SB(C)	KA
操作按钮	S	SB(O)	CA
信号按钮	S	SB(S)	XA
事故按钮	S	SB(F)	SA
复位按钮	S	SB(R)	FA
合闸按钮	S	SB(L)	HA
跳闸按钮	S	SB(I)	TA
试验按钮	S	SB(E)	YA
检查按钮	S	SB(D)	JCA,JA
控制器	Q		
凸轮控制器	Q	QCC	TK
平面控制器	Q	QFA	
鼓形控制器	Q	QD	GK
主令控制器	Q	QM	LK
程序控制器	Q	QP	CK
(4) 接触器、继电器和保护器件类			
接触器	K	KM*	C
交流接触器	K	KM(A)	JLC,JC
直流接触器	K	KM(D)	ZLC,ZC
正转(向)接触器	K	KMF	ZC
反转(向)接触器	K	KMR	FC
起动接触器	K	KM(S)	QC
制动接触器	K	KM(B)	ZDC,ZC
励磁接触器	K	KM(E)	LC
辅助接触器	K	KM(U)	FZC,FC

续表

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
线路接触器	K	KM(L)	XLC,XC
加速接触器	K	KM(A)	JSC,JC
给磁接触器	K	KM(G)	ZC
合闸接触器	K	KM(C)	HC
连锁接触器	K	KM(I)	LSC,LC
起动器	K		Q
电磁起动器	K	KEM	CQ
星-三角起动器	K	KS(D)	XJQ,XQ
自耦减压起动器	K	KA(T)	OBQ,BQ
综合起动器	K	KS(Y)	ZQ
继电器	K		J
电压继电器	K	KV	YJ
过电压继电器	K	KOV	GYJ,GJ
欠电压继电器	K	KUV	QYJ,QJ
零电压继电器	K	KHV	LYJ,LJ
电流继电器	K	KA(或 KI)	LJ
过电流继电器	K	KOC	GLJ,GJ
欠电流继电器	K	KUC	QLJ,QJ
零电流继电器	K	KHC	LLJ
功率继电器	K	KP	GJ
频率继电器	K	KF	
控制继电器	K	KC	KJ
增量继电器	K	KI(N)	
变化率继电器	K	KR(C)	
制动继电器	K	KB	
阻抗继电器	K	KI(M)	
电抗继电器	K	KRE	
导纳继电器	K	K(A)D	
方向继电器	K	KD(I)	
相位比较继电器	K	KP(C)	
差动继电器	K	KD	CJ

续表

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
接地继电器	K	KE(F)	
过载继电器	K	KOL	
时间继电器	K	KT*	SJ
温度继电器	K	KT(E)	WJ
热继电器	K(或 F)	KR(或 FR)	RJ
速度继电器	K	KS(P)	SDJ,SJ
加速度继电器	K	KA(C)	JSJ,JJ
压力继电器	K	KP(R)	YLJ,YJ
同步继电器	K	KS	TJ
极化继电器	K	KP*	JJ
连锁继电器	K	KI(N)	LSJ,LJ
中间继电器	K	KA	ZJ
气体继电器	K	KG	WSJ
信号监察继电器	K	K(S)M	XJJ
合闸继电器	K	KC(L)	HJ
跳闸继电器	K	KT(R)	TJ
信号继电器	K	KS(I)	XJ
闭锁继电器	K	KB(L)	BST
保护继电器	K	KP(T)	BHJ,BJ
计数继电器	K	KC(O)	JSJ
动力制动继电器	K	K(D)B	DZJ,DJ
无触点继电器	K	KN(C)	
避雷器	F	FA*	BL
熔断器	F	FU*	RD
(5) 电子元件类			
二极管	V	VD	D,Z,ZP
三极管,晶体管	V	VT	BG,Tr
晶闸管	V	VT(H)	SCR,KP,KE,Th
稳压管	V	VS	WY,WG,DW
单结晶体管	V	VU	UJD,DJG,BT
场效应晶体管	V	VF(E)	FET

续表

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
发光二极管	V	VL(E)	
整流器	U	UR	ZL
逆变器	U	UI	
电阻器	R		R
变阻器	R	RH	
电位器	R	RP*	W
频敏变阻器	R	RF	BP,PR
励磁变阻器	R	RE	
热敏电阻器	R	RT*	
压敏电阻器	R	RV*	
放电电阻器	R	RD	FDR
起动电阻器	R	RS(T)	QR
制动电阻器	R	RB	ZDR
调速电阻器	R	RA	TSR
附加电阻器	R	RA(D)	FJR
调速电位器	R	R(P)A	TSW
分流器	R	RS*	FL
分压器	R	RV(D)	FY
电容器	C		C
(6) 测量元件和仪表类			
电流表	A**		A
电压表	V**		V
功率表	W**		W
无功功率表		var**	
功率因数表		$\cos\varphi$**	$\cos\varphi$
相位表	φ**		
频率表		Hz**	
温度计	θ**		
转速表	n**		
检流计	P		G

续表

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
(7) 电气操作的机械器件类			
电磁铁	Y	YA*	DT
起重电磁铁	Y	YA(L)	QT
制动电磁铁	Y	YA(B)	ZT
电磁离合器	Y	YC*	CLH
电磁吸盘	Y	YH*	DX
电磁阀	Y	YV*	DCF
电动阀	Y	YM*	
牵引电磁铁	Y	YA(T)	
电磁制动器	Y	YB*	
(8) 组件、门电路类			
电流调节器	A	ACR	LT,IR
电压调节器	A	AUR	YT,UR
速度调节器	A	ASR	ST,SR
磁通调节器	A	AMR	
功率调节器	A	APR	GT
电压变换器	B	BU	YB
电流变换器	B	BC	LB
速度变换器	B	BV*	SB,SDB
位置变换器	B	BQ*	WZB
触发器	A	AT	CF
放大器	A		FD
运算放大器	N		
晶体管放大器	A	AD*	BF
集成电路放大器	A	AJ*	
计数器	P	PC*	JS
信号发生器	P	PS	
与门	D	DA	YM
或门	D	DO	HM
与非门	D	D(A)N	YF
非门,反相器	D	DN	F

续表

名　　称	新　符　号		旧符号
	单字母	多字母	
给定积分器	A	AG	AR,GI
函数发生器	A	AF	FG
(9) 其他			
插头	X	XP*	CT
插座	X	XS*	CZ
信号灯,指示灯	H	HL*	ZSD,XD
照明灯	E	EL*	ZD
电铃	H	HA*	DL
电喇叭、蜂鸣器	H	HA*	FM,LB,JD
端子板,接线座	X	XT*	JX,JZ
测试插孔	X	XJ*	CK
红色信号灯	H	HLR	HD
绿色信号灯	H	HLG	LD
黄色信号灯	H	HLY	UD
白色信号灯	H	HLW	BD
蓝色信号灯	H	HLB	AD

注:带*的文字符号为GB 7159—1987中规定采用的符号,带**的文字符号为GB 4728—1984、1985中规定必须采用的符号。

① 根据自整角机的功能使用下列字母,第一位字母:C—控制式,T—力矩式,R—旋转变压器(解算器);第二位字母:D—差动,R—接收机,T—变压器,X—发送机。在有第二位字母D的情况下,其余第二字母均放在D之后成为第三字母,如CDX、TDR在符号内,内圆表示定子或在一定情况下,表示一个可转的外绕组。

3. 常用辅助文字符号

常用辅助文字符号见表1-90。

表1-90　常用辅助文字符号

名　　称	新符号	旧符号	名　　称	新符号	旧符号
高	H	G	主	M	Z
中	M	Z	副,辅助	AUX	F
低	L	D	增	INC	
升		S	减	DEC	
降	D	J	自动	A	Z

续表

名　称	新符号	旧符号	名　称	新符号	旧符号
正,向前	FW	Z		AUT	
反	R	F	手动	M	S
向后	BW			MAN	
起动	ST	Q		BRK	
停止	STP	T	限制	L	
断开	OFF	D(K)	闭锁	LA	
闭合	ON	B(H)	延时(延迟)	D	
红	RD	H	差动	D	
绿	GN	L	紧急	EM	
黄	YE	U	感应	IND	
白	WH	B	压力	P	
蓝	BL	A	电流	A	L
黑	BK		电压	V	Y
左	L		同步	SYN	T
右	R		异步	ASY	Y
输入	IN	sr	交流系统设备端第一相	U1 - U2	A - X
输出	OUT	sc	交流系统设备端第二相	V1 - V2	B - Y
顺时针	CW		交流系统设备端第三相	W1 - W2	C - Z
逆时针	CCW		交流系统电源第一相	L1	A
交流	AC	J(L)	交流系统电源第二相	L2	B
直流	DC	Z(L)	交流系统电源第三相	L3	C
保护	P		接地	E	
保护接地	PE		运转	RUN	
保护接地与中性线共用	PEN		信号	S	X
中性线	N		置位,定位	S	
无声噪(防干扰)接地	TE			SET	
中间线	M		饱和	SAT	
不接地保护	PU		步进	STE	

续表

名　称	新符号	旧符号	名　称	新符号	旧符号
模拟	A		记录	R	
数字	D		复位	R	
速度	V			RST	
加速	ACC		备用	RES	B
快速	F		温度	T	
控制	C	K	时间	T	S
可调	ADJ		真空	V	
反馈	FB		附加	ADD	F
制动	B				

第二章　导电材料

第一节　导电材料的概述

一、导电材料的电性能及机械性能

1. 导电材料的电性能

导电材料具有良好的导电性，其电阻率在 $10^{-8}\sim10^{-6}\ \Omega\cdot m$ 之间。

(1) 电阻率。

电阻率又称电阻系数，用 ρ 表示，其单位是 $\Omega\cdot m$。通常将长度为 1 m，截面为 1 mm^2 的导电材料，在温度为 20 ℃时的电阻值，定为导体材料的电阻率 ρ。

电阻率是衡量导电材料电性能的重要标志。不同的金属具有不同的电阻率，电阻率大，则导电能力差；反之，则导电能力强，均匀截面的导电材料其电阻 R 的大小，可用下式计算：

$$R=\rho\frac{L}{S} \tag{2.1}$$

式中　ρ——导体的电阻率，$\Omega\cdot m$；

L——导体的长度，m；

S——导体的截面，m^2。

从上式中可以看出，导电材料的电阻与其电阻率及导体的长度成正比，与导体横截面积成反比。电阻率的倒数为电导率，用 γ 表示，即

$$\gamma=\frac{1}{\rho} \tag{2.2}$$

(2) 电阻温度系数。

导电材料的电阻随温度而变化，其变化的比例常数叫作电阻温度系数，用 α 表示。大多数金属的电阻值随温度的升高而增大，则 α 为正值，称为正温度系数；有些材料(如碳)温度升高而电阻值降低，则 α 为负值，称为负温度系数。

不同材料的电阻温度系数不同，如锰铜的电阻值几乎不受温度变化的影响，其电阻温度系数 α 很小。

设导电材料在温度为 t_0 时的电阻为 R，则

$$R=R_0[1+\alpha(t-t_0)] \tag{2.3}$$

因此，电阻温度系数 α 为

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0(t - t_0)} \tag{2.4}$$

式中　R——温度为 t 时的电阻，Ω；

R_0——温度为 t_0 时的电阻，Ω。

电阻温度系数 α 单位为 1/℃，表示当温度升高 1 ℃时的电阻增加量与 t 时的电阻值 R_0 时的比值。

(3) 热阻系数。

导电金属都具有导热性能，不同的金属材料热阻系数不同。热阻系数大，则导热能力差；反之，则导热能力良好。金属材料热阻的大小，可用热阻系数 ρ_t 表示。

$$R_t = \rho_t \frac{L}{S} \tag{2.5}$$

式中　R_t——热阻，Ω；

ρ_t——热阻系数，Ω·m。

热阻的倒数为热导，用 G_t 表示，单位是 Ω^{-1}，即

$$G_t = \frac{1}{R_t} \tag{2.6}$$

2. 导电材料的机械性能

(1) 抗拉强度 υ_b。

金属材料单位截面积所能承受的外界最大拉力，称为抗拉强度，用 υ_b 表示，其单位是 Pa。即

$$\upsilon_b = \frac{P_b}{S} \tag{2.7}$$

式中　P_b——最大拉力，N；

S——材料横截面积，m^2。

(2) 抗弯强度 υ。

金属材料在外力为弯曲力的作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力，用 υ 表示，其单位是 Pa。即

$$\upsilon = \frac{M}{W} \tag{2.8}$$

式中　M——所受外力矩，即弯曲力矩，N·m；

W——材料截面系数，m^2。

(3) 抗压强度 υ_y。

金属材料在压力作用下，抵抗塑性变形的能力，即材料单位面积上能够承受的最大压力，用 v_y 表示，其单位是 Pa。即

$$v_y = \frac{P_y}{S} \tag{2.9}$$

式中 P_y——最大压力，N；

S——材料横截面积，m^2。

3. 延伸率 δ

金属材料受外力作用被拉断以后，总伸长长度同原长度相比的百分数，称为延伸率或伸长率，用 δ 表示，即

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \tag{2.10}$$

式中 L_1——材料拉断后的长度，mm；

L_0——材料原来的长度，mm。

4. 屈服强度 v_s

金属材料受外力是载荷时，当载荷不再增加，而金属材料本身的变形却继续增加，这种现象叫屈服，产生屈服时的应力，用 v_s 表示，其单位是 Pa。即

$$v_s = \frac{P_s}{S} \tag{2.11}$$

式中 P_s——屈服载荷，N；

S——材料横截面积，m^2。

5. 硬度

金属材料抵抗刚硬的物体压陷表面的能力，称为硬度。它不是一个单纯的物理量，而是代表着弹性、塑性、塑性变形、强度韧性等一系列不同的物理量组合的一种综合性能指标。材料的硬度通常用布氏硬度 HB、洛氏硬度 HR、维氏硬度 HV 及肖氏硬度 HS 等表示。金属材料除要求上述性能外，还应具有耐腐蚀、抗氧化、塑性好、易加工、易钎焊等性能。

常用导电用纯金属的性能见表 2-1。

表 2-1 常用导电纯金属的性能

特性 / 名称	电阻率(20 ℃)/(Ω·mm²/m)	电导率(20 ℃)/% IACS①	电阻温度系数(20 ℃)/10^{-3}·℃$^{-1}$	密度(20 ℃)/(10^3 kg/m³)	比热容/[J/(kg·K)]	熔点/℃	线胀系数(20 ℃)/10^{-6}·℃$^{-1}$	热导率/[W/(m·K)]	熔化潜热/(10^4 J/kg)	弹性模数/10^4 MPa	抗拉强度/MPa	硬度 HB	热电动势/mV
银(Ag)	0.016 2	106	3.80	10.5	234.5	960.5	18.9	418.7	10.47	7.85	147	30	+0.75
铜(Cu)	0.017 2	100	3.93	8.9	385.2	1 083	16.6	386.4	21.19	11.77	196	30	+0.75
金(Au)	0.024 0	71.6	3.40	19.3	134	1 063	14.2	296.4	6.74	7.85	98	25	+0.70
铝(Al)	0.028 2	61.0	3.90	2.7	921	660	23.0	222	39.36	7.16	78	15～26	+0.38
钠(Na)	0.046 0	37.4	5.40	0.97	121	97.8	71	134	11.51	—	—	—	—
钨(W)	0.054 8	31.4	4.50	19.3	134	3 370	4.0	159.9	18.42	32.5	1 079	255	+0.79
钼(Mo)	0.055 8	30.8	4.70	10.2	255.4	2 600	5.1	144.9	29.31	31.4	882	147	+0.31
锌(Zn)	0.061 0	28.2	3.70	7.14	397.7	419.4	33	112.6	10.09	7.85	147	20～60	+0.77
镍(Ni)	0.069 0	24.9	6.00	8.9	456.4	1 452	12.8	87.92	30.98	19.61	392	80	−1.43
镉(Cd)	0.075 0	22.9	3.80	8.65	217.7	321	29.8	92.11	5.53	5.5	59	—	+0.92
铁(Fe)	0.100	17.2	5.00	7.86	477.3	1 535	11.7	61.55	27.21	19.61	245	60	+1.91
铂(Pt)	0.105	16.4	3.00	21.45	134	1 755	8.9	71.18	11.30	14.71	147	50	0
锡(Sn)	0.114	15.1	4.20	7.35	234.5	232	20	64.48	6.07	5.39	24.5	12	+0.45
铅(Pb)	0.219	7.9	3.90	11.37	129.8	327.5	29.1	35.09	2.64	1.8	15.7	3.5	+0.44
汞(Hg)	0.958	1.8	4.89	13.55	837.4	−38.9	181.9(体)	8.37	1.13	—	—	—	—
铋(Bi)	1.20	1.4	4.00	9.8	123.5	271	13.3	7.95	5.23	31.8	—	7.0	—

① IACS (International Anneal Copper Standard)电导率百分值为国际退火铜规定的电阻率对试样电阻率之比乘以 100%。20℃退火铜的电阻率是 $0.017\,241\times10^{-6}\,\Omega\cdot m$,把此时的电导率定为 100%。

二、导电材料的分类及用途

1. 导电材料的分类

导电材料按材质分为纯金属导电材料、合金导电材料、双金属导电材料及非金属导电材料等。铜、铝、银、锡、铅、锌是最常用的导电纯金属，铜合金、铝合金、电阻合金、电热合金则是最常用的合金导电材料，双金属材料是利用两种线胀系数不同的金属或合金彼此牢固结合而成的复合材料，常用非金属导电材料为石墨、电化石墨制品及金属石墨制品。

2. 导电材料的用途

导电纯金属在电力传输及电磁线方面有着广泛的用途，石墨及石墨制品主要用于电机的电刷，电阻合金用于制作可变和固定电阻元件，而电热合金则主要用于电发热及电炉方面，高纯度及贵重金属常用于制作各类开关的触头材料，纯金属及低熔点金属，如铜、锡、铅、锌等还常用于制作电路中保险芯或丝的材料，热双金属材料通常用于制作热保护继电器及温度控制器，利用不同金属的热电势的温度变化率不同可将两种金属做成热电偶来测量温度。

总之，导电材料的用途十分广泛，新的导电材料也在不停地研究当中，相信像超导体及其他的新型材料在未来会越来越多地用于现实生活中。

导电金属的主要特性和用途见表 2-2。

表 2-2　导电金属的主要特性和用途

名称	主　要　特　性	主　要　用　途
银	有最好的导电性和导热性，抗氧化性好，易压力加工，焊接性好	航空导线、耐高温导线、射频电缆等导体和镀层，瓷电容器极板等
铜	有好的导电性和导热性，良好的耐蚀性和焊接性，易压力加工	各种电线、电缆用导体，母线和载流零件等
金	导电性仅次于银和铜，抗氧化性特好，易压力加工	电子材料等特殊用途
铝	有良好的导电性、导热性、抗氧化性和耐蚀性，密度小，易压力加工	各种电线、电缆用导体，母线，载流零件和电缆护层等
钠	密度特小，延展性好，熔点低，活性大，易与水作用	有可能作实用的导体
钼	有高的硬度和抗拉强度，耐磨，熔点高，性脆，高温易氧化，需特殊加工	超高温导体、电焊机电极、电子管栅极丝及支架等
钨	抗拉强度和硬度很高，耐磨，熔点高，性脆，高温易氧化，需特殊加工	电光源灯丝、电子管灯丝及电极、超高温导体和电焊机电极等

续表

名称	主　要　特　性	主　要　用　途
锌	耐蚀性良好	导体保护层和干电池阴极等
镍	抗氧化性好，高温强度高，耐辐照性好	高温导体保护层、高温特殊导体、电子管阳极和阴极等零件
铁	机械强度高，易压力加工，电阻率比铜大6～7倍，交流损耗大，耐蚀性差	在输送功率不大的线路上作广播线、电话线和爆破线等
铂	抗氧化性和抗化学剂性特好，易压力加工	精密电表及电子仪器的零件等
锡	塑性高，耐蚀性好，强度和熔点低	导体保护层、焊料和熔丝等
铅	塑性高，耐蚀性好，密度大，熔点低	熔丝、蓄电池极板和电缆护层等
汞	液体，沸点为357 ℃，加热易氧化，蒸汽对人体有害	汞弧整流器，汞灯和汞开关等

三、导电材料的一般选用

导电材料的选用一般从材料的电导率、材料的载流量、材料的机械强度以及导电材料随温度变化而改变的参数对使用的影响这些方面去考虑。

在没有特殊要求的情况下，应尽可能选用价格低廉且电导率较高的材料，同时材料应有足够高的机械强度。如受摆放空间的限制，则必须选用高电导率的材料，这样可以节省空间；如不受摆放空间的限制，则材料的电导率可选得低一些。而一些特殊用途的导电材料则必须选用低电导率的材料，如用作电炉丝的材料，用作绕线电阻的材料。

材料的载流量即其单位横截面积上通过的电流，也称电流密度，计算公式如下。

$$J = \frac{I}{S} \tag{2.12}$$

式中　J——电流密度，A/m^2；

I——电流，A；

S——导电材料的横截面积，m^2。

但在实际应用中，常采用安培每平方毫米这个单位。电流密度的大小直接关系到导电材料的利用率，传输同样大小的电流时，如导电材料的电流密度选用较小值时，则需要增加导电材料的用量，但可减少电能在导电材料上的损耗，如导电材料的电流密度选用较大值时，则可减少导电材料的用量，但电能在导电材料上的损耗将增加。实际应用中导电材料的载流量的取值范围还是比较宽的，一般为

2～20 A/mm^2，具体的取值要根据导电材料使用时的散热条件、线路损耗、线路压降以及导电材料本身的费用等方面去综合考虑。

导电材料的机械强度主要指它们的抗拉强度、硬度和弹性。用作架空线的导电材料就必须考虑抗拉强度，当抗拉强度达不到要求时可将这些材料制作成合金，或在多股绞线中加部分钢丝以提高抗拉强度。集电环（滑环）、开关触头的基架材料等必须选用硬度比较高的材料以抗磨损及变形。导电弹簧、继电器、电位器、开关等的导电接触簧片就必须选用弹性比较高的导电材料制作。

导电材料在使用过程中，由于受环境温度的变化及本身电阻的热损耗而引起的温升将对导电材料的性能产生影响。首先是对导电材料的电导率的影响，对于金属材料，随着温度的升高电导率会下降，金属的电阻会增加，因此，在对重要电气设备进行计算时必须将导电金属的电阻用式(2.3)换算到工作温度时的电阻再进行计算，这样才能减小误差；而对于电碳导电材料，随着温度的升高电导率会上升，其电阻会下降。其次，导电材料随着温度的变化体积会发生改变，也就是通常所说的“热胀冷缩”，这也是导电材料在使用当中必须考虑的问题，因此导电材料在使用中需要留出胀缩量。另外，导电材料的纯度、制作工艺等的不同也将对导电材料的特性产生很大的影响。

四、导电合金的强化及影响导电金属电阻的因素

1. 导电合金的强化

导电合金的强化以尽可能保持高的电导率为前提，提高其强度和耐热性。

(1) 固溶强化。

当合金元素（溶质）均匀地溶解在基体金属（溶剂）中形成置换固溶体时，合金保持溶剂金属的晶格。由于溶质和溶剂金属的原子半径不同，造成晶格畸变，使金属的硬度、强度和电阻升高，此为固溶强化，其强化程度随溶质原子的溶解量、溶质与溶剂原子的半径差，以及原子价之差等的增大而增加，但电导率随之降低。为保持高的电导率，应选择合适的合金元素及其含量；为进一步提高强度，必须配合冷作硬化。

(2) 时效硬化。

利用淬火及时效操作以提高合金的强度，称为时效硬化，其效果与时效过程中析出的强化相性质、数量及分布状态有关。时效过程中析出的强化相，能导致金属的硬度、强度显著升高，电阻降低。在强化相数量一定的条件下，强化相质点的弥散度愈大，合金的强化程度也愈大。细化强化相质点是进一步强化合金的有效方法。当强化相为不含基体金属的化合物，合金的耐热性很高。采用时效硬化的方法可获得高强度、高导电、耐热等良好综合性能的导电合金。

(3) 弥散硬化。

弥散硬化及时效硬化都是借助弥散分布的质点以阻碍位错线的移动，提高对

塑性变形的抗力，使合金强化，但时效硬化的质点是从过饱和固溶体中析出，且随温度升高又溶解于基体金属，而弥散硬化的质点是在制作过程中加入的金属氧化物微粒或极细的丝和纤维。氧化物在高温下不溶解于基体金属中，所以这类合金有更好的耐热性，甚至在接近金属熔点时仍保持相当高的强度。弥散硬化合金的组织属于机械混合物，氧化物含量不高，且对晶格畸变影响不大，所以具有高的导电性。

2. 影响导电金属电阻的因素

导电金属的电阻随温度升高而增大，当温度不是极高（接近于熔点）或极低（接近于绝对零度）时，则电阻与温度的关系为线性关系，并可用式(2.3)来进行换算，电阻温度系数可由表 2-1 查得。

冷变形使导电金属的电阻增高，但只有冷变形度超过 10%时，导电金属的电阻才会明显增加，通常不超过 20 ℃时的 4%，合金一般略高些。退火可使冷变形金属的电阻降低到原有水平，因此，在对导电金属进行冷作加工后应该进行退火处理。

杂质导致金属的晶格发生畸变，从而使导电金属的电阻增加，杂质与基体金属的价电子差、原子半径差愈大，电阻的增加愈大。同时杂质在基体金属中处于固溶状态时，电阻显著增加，形成混合物时电阻呈线性变化。因此，在导电要求较高的时候应选用纯度高的金属。

第二节　铜及铜合金

一、铜的特性、品种及用途

纯铜外观呈紫红色，一般称紫铜，密度为 8.90 g/cm³。它具有良好的导电性能，仅次于银，且铜质愈纯，导电性能愈好；有良好的导热性，仅次于银和金；并具有一定的机械抗拉强度和良好的耐腐蚀性，无低温脆性，易于焊接，塑性较高，易于进行各种冷、热加工等优点。广泛应用在仪表和电机、电器等电工产品上，用作导线和导电零部件及特殊用途。

导电铜主要性能见表 2-3。

表 2-3　导电用铜主要性能

名　　称	参　数	名　　称	参　数
熔点　(℃)	1 084.5	屈服强度　(MPa)硬态	294～374
密度(20 ℃)　(g/cm³)	8.9	抗拉强度　(MPa)软态	196～235
比热容(20 ℃)　[J/(kg·K)]	385	硬态	343～441

续表

名　　称	参　数	名　　称	参　数
比能　(J/kg)	211 500	疲劳极限　(MPa)软态	58.8～68.6
热导率(20 ℃)[W/(m·K)]	386.44	硬态	108.8～117.6
线膨胀系数(20～100 ℃)($\times10^{-6}K^{-1}$)	16.6	蠕变极限　(MPa)(20 ℃)	68.6
		(200 ℃)	49.0
		(400 ℃)	13.7
电阻率(20 ℃)($\times10^{-2}\Omega\cdot mm^2/m$)软态	1.724	伸长率　(%)软态	30～50
硬态	1.777	硬态	>0.5
电阻温度系数(20 ℃)($\times10^{-3}℃^{-1}$)软态	3.93	硬度 HV　软态	<48
硬态	3.81	硬态	90～136
弹性模量(20 ℃)　(MPa)	112 700		
屈服强度　(MPa)软态	58.8～78.4		

导电用铜通常选用含铜量为99.90%的普通纯铜，在特殊要求下，可用无氧铜和无磁性高纯铜。导电用铜的品种及其主要用途见表2-4。

表2-4　导电用铜的品种及其主要用途

类别	品种	代号	含铜量(%)(不小于)	主　要　用　途
普通纯铜	一号铜	T_1	99.95	各种电线电缆用导体
	二号铜	T_2	99.90	仪器、仪表开关和一般导电零件
无氧铜	一号无氧铜	Tu_1	99.97	电真空器件、电子管和电子仪器用零件，耐高温导体微细丝等，真空开关触头
	二号无氧铜	Tu_2	99.95	
无磁性高纯铜		TWC	99.95	作无磁性漆包线的导体，制造高精密仪器、仪表的动圈

二、铜合金的品种、性能及用途

在电器仪表中，有些特殊零件除要求具有良好的导电性能外，还要求提高机械强度、弹性和韧性，有的还要求在温度变化的情况下具有一定的稳定性等。这些要求纯铜满足不了，常需用铜合金来代替，但其电导率比纯铜稍有降低。

1. 银铜

在铜合金中，银铜的导电性能最好；它的接触电阻小，是良好的电接触材料；并具有良好的导热性；有一定的硬度和耐磨性；耐腐蚀、抗氧化性能也较好。银铜

是铜中加入了少量的银(含银量一般为0.1%～0.2%),可显著地改善其软化温度和抗蠕变性能,而对导电率影响极小。银铜中若加入少量的铬、锆、镁和镉,可进一步提高强度和耐热性。银铜主要用作继电器、电位器、衰减器的触点材料,电子管引线、整流子片等。

含有铈、镧或混合稀土的稀土铜,其性能不亚于银铜,可代替银铜作整流子片。

2. 铬铜

铬铜的突出特点是在较高的温度(<400 ℃)下,具有较高的强度和硬度;经时效硬化处理后,其导电性、导热性、强度、硬度均显著提高;易于焊接,能钎焊;抗腐蚀性能良好,高温抗氧化性也好;易于进行冷、热加工。缺点是在缺口和尖角处容易造成应力集中,引起机械损伤。常用铬铜一般含铬0.5%～0.8%;若再加入少量硅(0.1%),则具有高电导率、高抗拉强度和耐高温性能;若加入少量镁和铝,可进一步提高耐热性,并大大改善缺口敏感性的不足。铬铜主要用作电器、仪表的开关零件、电子管零件等。

3. 镉铜

镉铜含镉量为1%左右,其突出的性能是耐磨,减摩性能好,抗拉强度高,灭弧性能和抗电弧灼蚀性能良好,压力加工性能也较好。在镉铜中加入铬可增加其时效硬化效果,显著地提高其耐热性;如加入少量锆、银、镁、锌等可进一步提高强度。镉铜主要用作电器开关的接点及其他导电耐磨零件电极等。

4. 锆铜

锆铜须在淬火后进行冷变形,再时效处理,才能获得较高的强度和电导率。它的突出特点是在很高温度(400 ℃)下,还能保持冷作硬化的强化效果,即保持高强度,并在淬火状态下具有纯铜的塑性。锆铜主要用于较高温度(>350 ℃)下工作的电器或仪表的开关零件、导线、电焊电极、整流子片等。

5. 铍铜

铍铜一般含铍量大于1%,与其他铜合金相比,具有高强度、高硬度和高弹性,且弹性后效小,弹性稳定性好;并具有良好的耐腐蚀、耐磨和耐疲劳性能;无磁性,冲击无火花;易于焊接,能钎焊;性能对时效温度变化的敏感性小;在淬火状态下有极高的塑性,易于压力加工;价格较低廉。铍铜主要用作电器、仪表的弹簧等弹性元件,各种耐磨零件和敏感元件,如波纹管、膜片、膜盒、弹片、弹簧管等。

6. 镧铜

铜中镧的质量分数为0.10%～0.35%,经过压缩率达30%的冷加工变形,电导率高,硬度也高,软化温度达280 ℃。其加工和使用特性类似银铜,经多次直流电机换向器的运行对比试验,证实镧铜的耐磨性比银铜高1倍,运行时镧于换向器表面形成一层耐磨层,可提高换向器的耐磨性及减小电火花等级。镧铜用来替代银铜,以节约贵重金属银的消耗。但焊接导线对温度不能太高,时间不能太长。

7. 铬锆铜

铬锆铜合金在高强度、高导电的热处理强化型合金中，是一种性能最优良的材料，它兼有铬铜的高时效强化及锆铜高软化温度，因此室温及高温都有较高硬度，铜中铬的质量分数为 0.2%～1.0%、锆的质量分数为 0.08%～0.5%以及少量镁或硅等，经 950～1 000 ℃，1～2 h 固溶处理，40%～60%冷变形加工、450～480 ℃及 2～4 h 时效处理，其电导率≥43 MS/m 以上，硬度 HV≥135，软化温度达 550 ℃。铬锆铜是目前电阻焊最普遍采用最佳电极合金之一，特别适合焊接低碳钢，实际焊接表明，在点焊过程中，铬锆铜与铬铜相比，焊接低碳钢时使用寿命可提高 5～10 倍，焊接镀层钢时，使用寿命可提高约 10 倍。

8. 镍锡铜

镍能完全固溶于铜中，是优异的耐蚀材料，能满足电子仪器、器件的钎焊性。铜中仅有镍显示出提高弹性模量的效果，这对电子工业小型化及可靠性十分有用，特别是连接器用弹性材料。一般镍锡铜合金镍的质量分数为 9%、锡的质量分数为 2%，它属于低温退火型铜合金弹性材料，在 350～400 ℃间退火 1 h，便可提高弹性极限值。镍的质量分数为 9%、锡的质量分数为 6%的镍锡铜合金，其抗拉强度最接近铍铜合金。

9. 镍硅铜

铜中含有镍、硅、铬的镍硅铜合金，是一种热处理强化性合金，经冷加工及热处理等工序后，具有高强度、高硬度及良好耐磨性、耐蚀性。常用的镍硅铜合金，镍的质量分数为 2.4%～3.4%，硅的质量分数为 0.6%～1.1%，经 900 ℃固溶处理、50%冷变形加工、450 ℃时效处理，电导率、抗拉强度、硬度均较高，软化温度可达 510 ℃。镍硅铜可用作架空输电线中的耐蚀紧固件，电阻焊对焊电极等。

10. 镍钛铜

铜中镍的质量分数为 3%、钛的质量分数为 1%，与少量锆、稀土元素等的镍钛铜合金，经适当处理后，在铜基体中形成 Ni_3Ti 金属间化合物为主的耐高温弥散粒子，大大提高高温下力学性能，比其他铜合金具有更高的高温硬度。电导率、硬度较高、材料价格便宜，可用来替代铍铜作电阻焊电极，避免由于铍带来的环境污染。

11. 镍磷铜

铜中镍的质量分数为 1%～2%、磷的质量分数为 0.2%～0.3%，经冷加工变形及热处理来提高使用性能。一般用作导电弹簧、接线柱、接线夹、高强度导电零件。

12. 钛铜

钛的质量分数为 4%～5%的钛铜合金，具有很好的力学性能，经热处理及冷加工后，硬度超过 HV300，抗拉强度 980 MPa，伸长率 5%～6%。钛的质量分数超过 5%时，虽然有更好的力学性能，但是给冷压力加工带来困难。钛铜也可替

代铍铜作弹性材料；此外，钛含量更低的钛铜可作电阻焊电极、电极臂、电极杆等。

13. 铁铜

具有高强度、良好导电性的铁铜合金，是一种耐热性的微粒弥散性合金，作为电子技术上的应用材料，逐渐发挥其作用。材料中微粒相妨碍内部位错滑移，例如在铜基中分布着铁-钴-磷金属间化合物相微粒子，起钉扎效应，因而提高再结晶温度和高温强度。铜中铁呈弥散分布，加入少量磷生成磷化铁呈均匀分布状态。软化温度 350 ℃，电导率较高，抗拉强度为 400～450 MPa。铁铜中含有钴、磷、锡等元素可提高强度和耐热性。铁钴锡铜、铁锌磷铜、镍硅铜与锡镍铜等，是目前使用的铜系引线框架材料，具有高可靠性、低成本与良好的热特性。铁的质量分数为 1%～2%及少量磷、镁的铁铜合金，具有较好的机械物理性能与焊接性能，可用作接触器桥，能保持良好焊接，它要比镉铜制成的触桥的电寿命高。

14. 氧化铝铜

铜中 Al_2O_3 的质量分数为 3%～5%，其抗软化温度可接近铜的熔点，是目前最理想的高温导电材料之一。其所含金属氧化物粒子可提高其热稳定性。它可用作真空中高温耐热导线，也可用作电机、变压器高温耐热绕组，特别是用作焊接镀层钢板的电阻焊电极，有抗粘焊、长寿命的特点。

部分电工用铜的性能见表 2-5。

表 2-5　部分电工用铜的性能

名称	代　号	化学成分的质量分数(%)	加工特性	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	硬度HV	电导率(MS/m)	软化温度(℃)	主要用途
银铜	TAg0.1	Ag0.06～0.12	800 ℃退火，冷变形	370～380	2～4	100～115	56	280	换向片、点焊电极、电机绕组、通信线、引线、导线
	—	Ag6～7		420～490		120～140	≥40	400	高热应力下焊低碳钢用电极轮
镉铜	QCd1	Cd0.9～1.2	800 ℃退火，50%冷变形	400～500	2～6	118～140	48～52	280	电阻焊电极、零件、架空导线、高强度绝缘线、通信线、滑接导线
镧铜		La0.10～0.35	800 ℃退火，冷变形	390～400	2～4	100～116	56	280	电机换向器，导线
锆铜	QZr0.2	Zr0.15～0.25	950 ℃淬火，75%冷变形，450 ℃时效	400～450	5～10	120～130	52	500	高速电机换向器、深井油井电缆芯、二极管引线、导线、开关零件
	QZr0.4	Zr0.3～0.5		450～500		130～140	50		
铬铜	QCr0.5	Cr0.4～1.1	1 000 ℃淬火，60%冷变形，450 ℃时效	520	5～10	150	48	500	电阻焊电极、电极支承座、开关零件、凸焊的大型模具
	QCr0.5-0.1	Cr0.5-Ag0.1-Zn0.15		490		141	48		
	QCr0.5-0.2-0.1	Cr0.4～1.1，Al0.1～0.25，Mg0.1～0.25		410～490		118～141	41～44		

续表

名称	代号	化学成分的质量分数(%)	加工特性	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	硬度HV	电导率(MS/m)	软化温度(℃)	主要用途
铬锆铜	QCr0.6-0.4-0.05	Cr0.4～0.8，Zr0.08～0.6，Si0.005	970 ℃淬火，50%冷变形，470 ℃时效	500～600	5～10	150	>43	550	电阻焊电极，DH2-1适于焊低碳钢，DH2-2适于焊涂层钢板，DH2-3适于强规范钢板焊接
	DH2-1	Cr0.3～0.5，Zr0.1～0.15		500					
	DH2-2	Cr0.25～0.5，Zr0.08～0.15，Te0.1～0.2		500					
	DH2-3			520		>150			
		Cr0.2，Zr0.2		460	14	130	≥52	500	二极管引线
铍铜	QBe2	Be1.8～2.1，Ni0.2～0.5	780 ℃淬火，300～350 ℃时效	≥1 085	1.5	>320	10～15	400	焊接不锈钢、耐热钢用电极、镶嵌电极、凸焊模具、极大应力下的电极握杆和轴、导电嘴、无火花工具、弹簧
		Be0.4～0.7，Co2.4～2.7	950 ℃淬火，50%冷变形，450 ℃时效	650～800	8～9	180～240	23～26	500	
		Be0.2～0.6，Ni1.4～2.2							
镍硅铜	QSi1-3	Si0.6～1.1，Ni2.4～3.4	900 ℃淬火，450 ℃时效	600～800	3	180～235	23～26	500	闪光焊焊块、电极握杆、轴、臂、滑环、衬套、导电弹簧、输电线路耐蚀紧固件
镍锡铜		Ni9，Sn2	300～400 ℃时效，高度冷加工变形	600	2	172	6	450	继电器、电位器、微动开关、接插件、传感器敏感元件
		Ni9，Sn6		1 060～1 440		310～420			

续表

名称	代　号	化学成分的质量分数(%)	加工特性	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	硬度HV	电导率(MS/m)	软化温度(℃)	主要用途
镍钛铜	DH3-1	Ni3，Ti1	950～1 000 ℃淬火，520～550 ℃时效	600～830	2～3	180～240	23～32	600	闪光焊对焊块、点焊电极、CO_2 保护焊导电嘴
		Ni2，Ti0.8		560～660	10	160～190	29～35		
镍磷铜		Ni1～2，P0.2～0.3	780～800 ℃淬火，冷变形，450 ℃时效	600	13		35～40	500	导电弹簧、接线柱、接线夹、高强度导电零件
钛铜		Ti4～5	875 ℃淬火冷加工，450 ℃时效6～8 h	1 000～1 200	2～6	305～360	＞6	500	电焊机电极、高强度导电零件、弹簧、架空导线
		Ti1.3～1.5，Cr0.47～0.5，Sn2.5		650～800	7～12	225～254	23～26		
铁铜		Fe1～2，P0.02	800 ℃退火后冷加工	400～450	2～4	110～130	30～40	350	电真空器件结构材料、电器接触触桥
氧化铝铜	Al-15	$Al_2O_3$0.3	粉末内氧化，挤压75%冷变形	441～517	2～10	117	54	900	电阻焊电极，特别适于焊接涂层钢板、电机绕组、换向器、热电偶导线、耐高温导线、真空管耐温元件
	Al-25	$Al_2O_3$0.5		469～544	2～10	160	50		
	Al-60	$Al_2O_3$1.1		551～600	3	170	45		

三、电工产品对导电铜合金的性能要求、选用及注意事项

电工产品对导电铜合金的性能要求、选用及注意事项见表 2-6。

表 2-6　电工产品对导电铜合金的性能要求、选用及注意事项

产品名称	性能要求	选用铜合金	注意事项
电动机、发电机的换向器片和集电环等	电导率≥50 MS/m、抗拉强度≥300 MPa、伸长率≥2%、硬度 HV≥90、软化温度高于工作温度、接触性好、耐磨性高	银铜、镉铜、镧铜、锆铜和铬锆铜等	使用温度低于 250 ℃采用银铜、镉铜或镧铜(硬铜在 250 ℃以上要软化);温度低于350 ℃使用锆铜(0.2%～0.4% Zr),温度在 350～500 ℃的大功率电机换向片可采用铬锆铜,含少量碲的合金有耐盐雾腐蚀作用
电焊机的电极、配件和 CO_2 保护焊导电嘴等	电极能传导必要的焊接电流,传递必要的焊接压力。能焊接多种多样的被焊接材料。主要特性: (1) 比被焊材料更高的导电性和导热性; (2) 强度高,特别是高温硬度高; (3) 不与被焊材料发生合金化和黏附; (4) 抗氧化性好,使用中不生成氧化皮。配件中的电极支承座与电极臂要求有较高电导率和强度。 集电环与 CO_2 保护焊导电嘴要求高的电导率和耐磨性	使用电极可分四类: (1) 铝、镁轻合金和铜合金的焊接,可用银铜、镉铜、锆铜和氧化铝铜; (2) 低碳钢、镍合金和低合金钢焊接,可用锆铜、铬铜或铬锆铜; (3) 不锈钢和耐热合金的焊接,可用高导电铍铜、镍钛铜、镍硅铜和钛铜; (4) 铂(箔、带)、金饰和灯丝等的特殊焊接以及工件表面不允许有铜迹时,可用铬铜镶钨或钼或钨铜的复合电极,氧化铝铜电极。 CO_2 保护焊导电嘴,可用铬锆铜、镍钛铜铍铜或钨铜制成	保证形成良好焊接为前提,应着重提高电极使用寿命: (1) 铝、镁轻合金的焊接,散热快,要求短时间通入大电流。铝、镁熔点低,容易产生黏附现象,要求电极材料电导率≥50 MS/m 和抗软化温度高; (2) 低碳钢等的焊接要求电极材料电导率≥43 MS/m; (3) 不锈钢、耐热合金等的焊接、温度高、时间长,所加压力大,要求电极材料具有高的强度、硬度和耐热性。电导率≥23 MS/m; (4) 涂层钢的焊接,应选用涂层焊专用铬锆铜或氧化铝铜。 CO_2 保护焊导电嘴起导电作用,耐磨性是主要特点,选用更好的耐温、耐磨材料,更为有利

续表

产品名称	性能要求	选用铜合金	注意事项
特殊电线、电缆等	导电合金的性能要求，随用途而异，如对电缆要求可挠性好和容易连接等，架空导线须考虑耐振动、耐疲劳和耐蚀性，接触线须考虑耐磨性等	银铜、镉铜、镧铜、锆铜、铬锆铜与复合金属导体等	导线在保证满足电导率外，应有足够的高温强度。大跨度架空线应采用锆铜或复合金属导线。耐温高强绝缘线、发电机绕组，应考虑含锆、铬之类的铜合金线。滑接导线采用镉铜、锆铜或复合线。这些材料使用时，最高允许温升不应超过材料的软化温度
各种电器、电子元件、开关、弹簧、连接器等	极高的强度、硬度和弹性极限，且耐磨、耐蚀和耐疲劳等	铍铜、钛铜、镍硅铜、镍磷铜、铁磷铜、锆铜与氧化铝铜	导电弹簧、接线夹、接线柱、电器触桥等结构件可采用镍磷铜、铁磷铜的廉价材料。要求使用温度、强度及弹性高的，可采用钛铜或铍铜类合金；要求导电性高的可采用锆铜；要求高温强度及导电性高的采用氧化铝铜。架空导线用的导电、耐蚀紧固件，可用镍硅铜类。耐煤烟的架空线可采用钛铜线

第三节　铝及铝合金

一、铝的特性、品种及用途

铝是银白色的轻金属，密度为 2.70 g/cm^3，约为铜的 30.3%；具有良好的导电性能，与铜比较，当截面相同时，单位长度铝的电导率为铜的 64%，若按质量计算，则相当于铜的 200%，大大超过了铜；导热性能良好，热导率是铜的 56%。铝耐酸，但不耐碱，更不耐盐雾腐蚀；塑性好，易于进行压力加工，可压成薄片或抽成细丝，对光和热的反射率大。缺点是机械强度比铜低，焊接性能较差，但铝资源较为丰富。

导电用铝的性能和主要工艺参数见表 2－7。

表 2-7　导电用铝的性能和主要工艺参数

名　　称			参数
熔点	(℃)		658
密度(20 ℃)	(g/cm^3)		2.703
比热容(20 ℃)	[J/(kg·K)]		921
比能	(J/kg)		389 000
热导率(20 ℃)	[W/(m·K)]		218
线胀系数(20～100 ℃)	($\times10^{-6}K^{-1}$)		23
电阻率(20 ℃)	($\times10^{-2}\Omega\cdot mm^2/m$)	软态	2.80
		硬态	2.826 4
电阻温度系数(20 ℃)	($\times10^{-3}℃^{-1}$)	软态	4.07
		硬态	4.03
弹性模量(20 ℃)	(MPa)	硬态	65 000
屈服强度	(MPa)	软态	29.4～39.4
抗拉强度	(MPa)	软态	68.6～83.1
		半硬态	83.1～122.5
		硬态	156.8～196
疲劳极限	(MPa)	硬态	58.8
蠕变极限	(MPa)	20C	49
		150C	23.5
		250C	9.8
伸长率	(%)	软态	20～40
浇铸温度	(℃)		670～730
热加工温度	(℃)	热轧	400～490
		热挤	400～480
		锻造	350～450
退火温度	(℃)	至软态	300～350
		至半硬态	240～260
再结晶温度	(℃)		150～250

导电用铝通常选用含铝量在 99.5%以上的工业纯铝，主要导电用铝的品种有：特一号(Al-00)，含铝 99.7%以上；特二号铝(Al-0)，含铝 99.6%以上；一号铝(Al-1)，含铝 99.5%以上。这几种工业纯铝，可压力加工成各种型材和线材，具有较高的可塑性、高导电性及高导热性，常用作电线电缆的线芯，变压器及电机的电磁线，仪器仪表的导电零件和表盘、指针、转轴、器壳及框架等。

重熔用电工铝锭、重熔用铝稀土合金锭及重熔用铝锭(普通铝锭)的化学成分分别见表 2-8、表 2-9、表 2-10。

表 2-8　重熔用电工铝锭化学成分

牌　号	化学成分的质量分数(%)				
	Al≥	杂　质　≤			
		Si	Fe	Cu	V+Cr+Mn+Ti
Al99.07E	99.70	0.08	0.20	0.005	0.01
Al99.65E	99.65	0.10	0.25	0.01	0.01

表 2-9　重熔用铝稀土合金锭化学成分

牌　号	化学成分的质量分数(%)					
	稀土总量 ΣRE	杂　质　≤				Al
		Si	Fe	Cu	总和	
Al99.7RE-1	0.14～0.22	0.13	0.16	0.010	0.30	余量
Al99.7RE-2	0.23～0.30					

表 2-10　普铝锭化学成分

级　别	牌　号	化学成分的质量分数(%)				
		Al≥	杂　质　≤			
			Fe	Si	Fe+Si	Cu
特一级	Al99.7	99.7	0.16	0.13	0.26	0.010
特二级	Al99.6	99.6	0.25	0.18	0.36	0.010
一　级	Al99.5	99.5	0.30	0.25	0.45	0.015

二、铝合金的品种、特性及用途

纯铝的强度较低，工业上应用受到限制。采用铝合金，可在尽量少地降低铝的电导率的情况下，提高其强度及耐热性，并改善耐腐蚀性和焊接性能。铝合金常用于架空导线、电车线以及要求重量轻、强度高的导电线芯，还可用作电器仪表的导电零部件及结构材料。

1. 铝镁硅合金

铝中加入镁和硅，经淬火时效处理，强度显著提高，普遍使用于高强度架空导线。其硅含量应高于形成 Mg_2Si 所需的量。铝镁硅合金按顺序进行淬火、强烈冷变形时效处理，抗拉强度在 300 MPa 以上，电导率高于 53%IACS(国际退火铜标准)，耐蚀性较好，但焊接工艺要求较高。改变成分、冷加工变形度和热处理工艺，可获高强度或高导电不同特性的产品。添加少量铁，能阻碍再结晶，细化晶粒，提高耐热性；添加少量稀土，可改善工艺加工性。

2. 铝镁合金

铝镁合金的成分和组织比较简单，加工工艺较为简便，焊接性能和耐蚀性较好，是普遍使用的中强度铝合金，硬态的作架空导线，软态的作电线电缆线芯等。

铝中加镁，强度增高，电导率降低。其含镁量通常小于1%。不同含镁量，合金的抗拉强度与电导率基本呈线性关系。铁对铝导电性的影响比镁小，铝镁铁合金具有铝镁铁合金的强度，而电导率仅提高3%～5% IACS，蠕变性能亦随之改善。

3. 铝锆合金

铝中添加少量锆（如质量系数为1%），其耐热性显著提高，再结晶温度可达320 ℃以上，但电导率下降3.5%～4% IACS。为尽量降低电导率，可减少含锆量，添加微量的钇。使用铝锆合金，导体的载流量大为提高。铝锆合金的长期工作温度150 ℃，短时可达180～220 ℃，比铝高50～70 ℃。

4. 铝铁合金

铝中添加铁，采用连铸连轧工艺铸锭冷却速度快的特点，可阻止粗大晶粒的形成，起到固溶强化与第二相强化的双重作用。如在铝中添加第三元素钴，可进一步提高合金的抗拉强度、屈服极限和耐热性。

5. 铝硅合金

硅在铝中溶解度很小，且主要以纯硅形态存在，固溶强化效果不大。熔炼过程用钠盐进行变质处理的铝硅合金，强度提高，加工特性好，易拉制成极细线，可代替微细金丝。

6. 铝稀土

用硅的质量分数高于0.08%（达0.13%甚至0.16%）的非电工级铝锭，经低稀土优化，硼化、加铁等综合处理，能生产符合国际通用标准的电工铝导体，改变非用低硅铝生产不可的局面。硅的质量分数为0.09%～0.13%，稀土优化成本最低。稀土与硅、铁等元素生成（Al·Fe·Si·Ce）和（Si·Ce）化合物，存在于晶界和枝晶间，这样，固溶体中硅含量降低，因而提高电导率。铝稀土具有比普通铝更好的耐蚀性。

7. 弥散强化铝或纤维强化铝

铝中加入氧化铝微粒或极细的钨丝、硅纤维等，其强度和耐热性显著提高。

电工用铝合金的品种成分、性能、主要特征及用途见表2-11。

表 2-11　电工用铝合金的品种成分、性能、主要特征用途

类别	合金名称	化学成分的质量分数(%)							状态	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	屈服强度(MPa)	电导率(%IACS)	主要特征及用途①
		Mg	Si	Fe	Cu	Zr	Re	Al						
热处理型	铝镁硅 Al-Mg-Si	0.5～0.65	0.5～0.65	少量				余	硬	304～407	4		52～60	高强度，用于架空导线
非热处理型	铝镁 Al-Mg	0.65～0.9						余	硬	225～255	2		53～56	中强度，用于架空导线和接触线。软线也用于电线电缆线芯
	铝镁铁 Al-Mg-Fe	0.26～0.36	≤0.14	0.75～0.95				余	软	113～117.6	15	51.0	58～60	电线电缆线芯，电磁线
	铝镁铁铜 Al-Mg-Fe-Cu	0.15～0.25	≤0.14	0.45～0.60	0.22～0.33			余	软	113～127	15	51.0	58～60	
	铝镁硅铁 Al-Mg-Si-Fe	0.85～1.0	0.35～0.45	0.35～0.45				余	软	113	17	49.0	53	
	铝锆 Al-Zr					0.1	少量	余	硬	176～186	2		58～60	耐热，用于架空导线和汇流排
	铝铁 Al-Fe			0.65				余	软	88	30		61	强度略高于铝，使用范围同铝，需连铸连轧工艺生产
	铝硅 Al-Si		0.5～1.0					余	硬	255～323②	0.5～1.5		50～53	加工特性好，可拉制成特细线，用于电子工业连接线
	铝稀土 Al-Re		0.13	0.13～0.20			～0.20	余	硬	157～196			61	适合普铝成分中加入少量 Re，达到电工级铝性能要求

① 主要用途，除了导线，部分铝合金亦可根据不同特点的需要，应用于开关、电机、变压器导电铸件和外壳、运输设备中的某些构件以及一、二次电池($AlCl_3$/LiAl)，电容器极板材料等。

② 直径为 25～50 μm 细线性能

三、铝及铝合金的焊接与机械连接

1. 铝及铝合金的焊接

铝表面易氧化，而铝氧化膜的熔点高（约 2 050 ℃），不易还原，密度比铝大，焊接时不易从熔融铝中浮起，易产生夹渣；同时，氧化膜吸附的水分，在气焊时会生成气孔，影响焊接质量。一般可在焊接前用机械或化学方法清除铝表面氧化膜，或在焊接时用机械力将其挤去；为防止铝在焊接时再氧化，可采用氩气保护，在气焊时则采用焊药等措施。

2. 铝铜焊接

铝铜接触面在 250 ℃以上会产生脆性的 $CuAl_2$，影响焊接质量，采用快速的闪光焊、储能焊和摩擦焊或低温的冷压焊和钎焊等方法，可减少 $CuAl_2$ 的生成。

3. 铝铁焊接

铝的导热系数和比热都比铁的大 1 倍多，因此，焊接时要求使用能量集中的焊接热源；另外，铝凝固时的收缩率比铁大两倍，焊接时要采取措施，防止变形大而产生裂纹。

4. 铝及铝合金的机械连接

铝表面氧化膜的导电性差，铝与铝或与其他金属连接时，接触电阻较大。铝与铜连接还会发生电化学腐蚀，使接触电阻进一步增大。用螺栓连接的接头，由于工作时电流变化引起热胀冷缩，易使铝发生永久变形，在使用一定时间后，导致连接处松弛，使接触电阻增大，造成接头过热，甚至引起电弧放电，烧灼接头，还会发生火灾。因此，根据连接件的具体情况，应采取连接面镀银或搪锡，使用铝合金接线端子、铜铝过渡接头，以及适当的压接工艺等措施。

导电用铝及铝合金的主要焊接与机械连接方法的简要说明和主要应用范围见表 2－12。

表 2－12　导电用铝及铝合金的主要焊接与机械连接方法

名　称	简　要　说　明	主 要 应 用 范 围
电阻焊	通电使接头加热，顶压挤出氧化膜，进行焊接。效率高，操作简便	铝杆、铝线的焊接
闪光对焊	在大电流下，焊件局部接触，使金属强烈熔化蒸发形成爆炸除去氧化物，电弧稳定后，立即顶压焊接。接头质量较好，耗电大	制造截面≥1 200 mm^2 的铜-铝过渡接头
储能焊	利用电容放电加热，顶压挤出氧化膜进行焊接。接头质量好，速度快	制造截面＜15 mm^2 的铜-铝过渡接头

续表

名　称	简　要　说　明	主 要 应 用 范 围
摩擦焊	利用旋转摩擦发热进行焊接。热能利用率高，接头质量好	制造截面为 700 mm^2 左右的铜-铝过渡接头，只适用于圆形工件
冷压焊	利用较大机械压力挤去氧化膜，靠金属原子间相互结合使其焊接。接头质量好，设备较简单，焊接速度较慢	焊接铝杆和铝线，及较小铜-铝过渡接头。小截面单线可用手持式冷压钳焊接
氩弧焊	在氩气保护下，用电弧进行焊接。接头质量优良，不用焊剂，需氩气及专用设备，应有劳动防护措施	大、中截面多根铝线、铝排等接头
气　焊	用氧气乙炔气焰，使铝熔化焊接，焊后必须除净焊剂以防腐蚀。设备较普通，工艺简便，接头强度较低	小截面铝-铝接头；亦可用于小直径的铜-铝接头，但性能较差
钎　焊	用低熔点焊料进行焊接。设备简单，操作方便，接头强度低	中、小截面铝-铝，铜-铝接头
渗铝焊	将表面清洗后的钢焊件，浸入铝液中渗铝，再在模具中浇铝。设备简单	制造钢-铝过渡接头
药包焊	铝粉和氧化铁粉在高温点燃时产生高热，使金属熔化焊接。操作简便，接头强度较低	适用于中、小截面架空铝导线的焊接
爆炸压接	在压接金属表面放置炸药，引燃后产生高压力，使金属压合。操作简便迅速，须采取安全措施	铝与铝或其他金属如铜、铁等的覆合，适用于单线、绞线及带箔
套管压接	铝或铝合金套管紧压在被连接的铝导线上	电缆铝线芯及架空铝导线等的连接

第四节　复合金属导体

一、复合金属导体的分类、产品名称、特性和用途

两种导电金属复合在一起使用，可发挥各自的优点。复合金属导体的种类繁多、形式多样，有线、棒、带、板、片和管材等。被覆金属有的包在基体金属的周围，如铜包钢线；有的包在基体金属的一侧，如钢铝电车线；有的被覆在基体金属的一面或两面，如铝覆铁、铝黄铜覆铜等。

复合金属导体的分类、产品名称、特征和用途见表 2-13。

表 2-13　复合金属导体的分类、产品名称、特性和用途

分类	产品名称	包覆金属	基体金属	特　　性	主 要 用 途
高强度	铝包钢线	铝	镀锌钢线	抗拉强度高，耐蚀性好。抗拉强度为 900～1 300 N/mm²；电导率为 29%～30% IACS；延伸率不小于 1.5%	输配电线，载波避雷线，通信线及制造大跨越架空导线
	钢铝电车线	钢	铝	钢耐磨，截面 85 mm²，拉断力为 30 150 N 以上，截面 100 mm² 拉断力为 40 000 N以上	电车线
	铜包钢线和排	铜	钢	抗拉强度高：650～1 500 N/mm²；电导率为 30%～40% IACS；延伸率不小于 1%，耐蚀性好	高频通信线、输电线、大跨越及盐雾等特殊地区的架空导线，排可作小型电机整流子片，直流电机用电刷弹簧，配电装置中的汇流排，刀闸的栏条等
高导电	铜包铝线和排	铜	铝	导电率比铝高，连接与铜一样方便；抗拉强度 210 N/mm²（硬态）；工作温度不能高于 250 ℃；废品处理困难	高频通信线，电视电缆，电磁线，高频屏蔽配电线。排可做电机整流子片导电排等
	银覆铝	银	铝	电导率高，接触性好	航空用导线，波导管
高弹性	铜覆铍铜	铜	铍铜	弹性好，导电性高	导电弹簧
	弹簧钢覆铜	弹簧钢	铜	高弹性，高导电，耐高温腐蚀	导电弹簧
耐高温	铝覆铁	铝（另一面镀镍）	铁	抗高温氧化性好	电子管阳极
	铝黄铜覆铜	两面分别覆铝、黄铜	铜	抗高温氧化性好，电导率可达 80%IACS	作高温大电流导体，如电炉配电用汇流排
	镍包铜	镍	铜	抗高温氧化性好，电导率高，可达 89%IACS（与镍层厚度有关）	在 400～650 ℃范围内作高温导线
	镍包银	镍	银	抗高温氧化性好，电导率高，可达 85%～91% IACS（与镍层厚度有关）	在 400～650 ℃范围内作高温导线（10%镍层可用于 400 ℃，20% 镍层可用于 650 ℃）
	耐热合金包银	耐热合金（镍铬合金）	银	抗高温氧化性好，电导率高	在 650～800 ℃范围内作高温导线

二、复合金属导体的加工

复合金属导电体通常采用热轧、爆炸、喷涂等工艺，将两种或两种以上的金属复合起来，可以提高金属的耐蚀、耐热和强度。常见的复合金属导电体有线、棒、带、板、片和管等各种型材。线、棒的被覆金属包在基体金属周围；带、板、片分单面和双面两种被覆。双面被覆的外层可用相同或不同金属。被覆金属与基体金属之间，因原子相互扩散，高温下易生成脆性化合物，可加入起隔离作用的第三种金属，或限制复合金属的热处理温度及工作温度。例如，铜、铝复合导体在 250 ℃以上长期加热，铜、铝界面形成脆性化合物，因此其长期工作温度应低于 250 ℃。为了改善铜、铝接合强度，在铝包钢线的钢芯上镀锌。

第三章　电 线 电 缆

第一节　裸 电 线

一、圆单线

圆单线包括圆铜单线(硬及软的);镀锡圆铜软单线;圆铝单线(硬、半硬及软的);铝合金单线(热处理及非热处理型的);铜包钢单线;铝包钢单线。

1. 圆铜单线

圆铜单线可作为架空绞线及绝缘电线、电缆的导电线芯材料,并可供电器产品作组成材料,部分大规格可单独作为电力及通信架空线路的输电线之用。

圆铜单线按其柔软性可分为硬圆铜线(TY)和软圆铜线(TR)两种。其规格范围、电气性能及机械性能分别见表 3-1 至表 3-3。

表 3-1　圆铜单线规格范围　　mm

单线直径	允许偏差	单线直径	允许偏差
0.020～0.025	±0.002	1.01～2.50	±0.02
0.030～0.100	±0.003	2.51～3.50	±0.03
0.110～0.250	±0.005	3.51～4.50	±0.04
0.260～0.700	±0.010	4.51～6.00	±0.05
0.710～1.000	±0.015		

表 3-2　圆铜单线电气性能

单线直径 (mm)	电阻系数　20 ℃时不大于 ($\Omega \cdot mm^2/m$)		电阻温度系数 α_{20}(1/℃)	
	TY	TR	TY	TR
1.00 及以下	0.018 1	0.017 48	0.003 85	0.003 95
1.01～6.00	0.017 9			

表 3-3　圆铜单线机械性能

单线直径 (mm)	TY		TR	
	抗拉强度不小于 (N/mm^2)	伸长率不小于 (%)	抗拉强度不小于 (N/mm^2)	伸长率不小于 (%)
0.020～0.050	412	0.5	—	12
0.060～0.100	412	0.5	—	15
0.110～0.200	412	0.5	200	18
0.210～0.700	412	0.5	200	20
0.710～1.000	412	0.6	200	25
1.01～2.00	402	0.8	200	25
2.01～3.00	400	1.0	206	30
3.01～4.00	382	1.2	206	30
4.01～5.00	373	1.5	206	30
5.01～6.00	363	1.5	206	30

2. 镀锡圆铜软单线

镀锡圆铜软单线主要用作电线、电缆的导电线芯，电机电器产品的电磁线，电刷线及导电引接线等。

镀锡圆铜软单线的规格范围、电气性能及机械性能分别见表 3-4 至表 3-6。

表 3-4　镀锡圆铜软单线规格范围　　mm

单线直径	允许偏差	单线直径	允许偏差
0.03～0.10	$^{+0.006}_{-0.003}$	1.01～2.00	$^{+0.04}_{-0.02}$
0.11～0.25	$^{+0.010}_{-0.005}$	2.01～3.00	$^{+0.05}_{-0.03}$
3.01～4.00	$^{+0.06}_{-0.04}$	0.26～0.70	$^{+0.02}_{-0.01}$
0.71～1.00	$^{+0.03}_{-0.015}$		

表 3-5　镀锡圆铜软单线电气性能

单线直径(mm)	电阻系数 20 ℃，不大于 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	电阻温度系数 α_{20}(1/℃)
0.50 及以下	0.017 9	0.003 85
0.50 以上	0.017 6	0.003 85

表 3-6　镀锡圆铜软单线机械性能

单线直径（mm）	抗拉强度不小于（N/mm²）	伸长率不小于（%）	单线直径（mm）	抗拉强度不小于（N/mm²）	伸长率不小于（%）
0.03～0.08	200	8	0.31～0.70	200	15
0.09～0.15	200	12	0.71～2.00	206	20
0.16～0.30	200	15	2.01～4.00	216	25

3. 圆铝单线

圆铝单线在很大程度上取代了圆铜单线作为各类电工产品的导电材料，如作为架空铝绞线、各种铝芯电线、电缆、铝电磁线及其他电器制品的原材料。

按各类电工产品对铝导体柔软性能的不同要求，圆铝单线按不同的韧炼工艺分为：硬圆铝线（LY）、半硬圆铝线（LBY）及软圆铝线（LR）三种。其规格范围、电气性能及机械性能分别见表 3-7 至表 3-9。

表 3-7　圆铝单线规格范围　　mm

单线直径	允许偏差	单线直径	允许偏差
0.06～0.100	±0.003	1.01～2.50	±0.02
0.110～0.250	±0.005	2.51～3.50	±0.03
0.260～0.700	±0.010	3.51～4.50	±0.04
0.710～1.000	±0.015	4.51～6.00	±0.05

表 3-8　圆铝单线电气性能

型　　号	电阻系数 20 ℃时不大于（Ω·mm²/m）	电阻温度系数 α_{20}（1/℃）
LY	0.029 0	0.004 03
LR、LYB	0.028 3	0.004 10

表 3-9　圆铝单线机械性能

单线直径（mm）	LY		LYB		LR	
	抗拉强度不小于（N/mm²）	伸长率不小于（%）	抗拉强度（N/mm²）	伸长率不小于（%）	抗拉强度（N/mm²）	伸长率不小于（%）
0.060～0.200	178	—	95～140	1.0	70～95	—
0.210～0.500	178	0.5	95～140	1.0	70～95	8
0.520～1.000	178	1.0	95～140	1.5	70～95	10
1.01～1.50	178	1.2	95～140	1.5	70～95	12
1.51～2.00	167	1.2	95～140	2.0	70～95	15
2.01～2.50	167	1.5	95～140	2.0	70～95	15
2.51～3.50	157	1.5	95～140	2.5	70～95	18
3.51～6.00	147	2.0	95～140	3.0	70～95	20

4. 铝合金单线

铝合金单线具有比纯铝单线高得多的抗拉强度，目前广泛使用的是热处理型铝镁硅合金单线(HL)和非热处理型的铝镁合金单线(HL_2)两种。前者(HL)的抗拉强度为硬铝单线的两倍以上，适用于制造电力和通信架空电线；后者(HL_2)可作为电线、电缆的导电线芯之用。铝合金单线的规格范围、电气性能及机械性能分别见表 3-10 至表 3-12。

表 3-10 铝合金单线规格范围 mm

单线直径	允许偏差
1.33～2.00	±0.03
2.01～3.00	±0.04
3.01～4.24	±0.05

表 3-11 铝合金单线电气性能

型　号	电阻系数 20 ℃，不大于 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	电阻温度系数 α_{20}(1/℃)
HL HL_2	0.032 8	0.003 6

表 3-12 铝合金单线机械性能

单线直径 (mm)	抗拉强度 不小于 (N/mm^2)		伸长率 不小于 (%)		弯曲半径 (mm)		弯曲次数 不少于	
	HL	HL_2	HL	HL_2	HL	HL_2	HL	HL_2
1.33～1.70	300	260	4	2	5	—	6	—
1.71～2.50	300	260	4	2	5	—	5	—
2.51～4.24	300	260	4	2	10	—	5	—

5. 铜包钢单线

铜包钢单线是以钢线为线芯，外包铜层的双金属复合导线，用于高频通信线路时，其电阻值与铜层相近，而抗拉强度很高，并有很好的抗腐蚀性能。作为架空通信线路使用时，技术经济指标极为合理；在大跨越、盐雾及其他有腐蚀性环境等特殊地区，可作为电力输送线路之用。目前生产的铜包钢单线有两种：一种是供架空线路用的 GTA 型，一种是供制造绞线用的 GTB 型。铜包钢单线的规格及性能分别见表 3-13 和表 3-14。

表 3-13　铜包钢单线规格

单线直径（mm）	允许偏差（mm）	铜层最小厚度不小于（mm）		每圈最小质量（kg）
		GTA	GTB	
1.2	±0.06	0.06	0.04	10
1.4	±0.06	0.07	0.05	10
1.5	±0.06	0.07	0.06	10
1.6	±0.06	0.08	0.06	10
1.8	±0.06	0.09	0.06	15
2.0	±0.06	0.10	0.07	15
2.2	±0.06	0.11	0.08	15
2.5	±0.06	0.12	0.09	15
2.8	±0.06	0.14	0.10	15
3.0	±0.06	0.15	0.11	30
4.0	±0.08	0.20	0.14	40
5.0	±0.08	0.20	—	40
6.0	±0.08	0.20	—	40

注：铜层截面与铜包钢线截面之比在30%～40%之间。

表 3-14　铜包钢单线性能

单线直径（mm）	抗拉强度不小于（N/mm²）	伸长率不小于（%）	耐弯曲		扭转次数不少于	20 ℃时的直流电阻不大于（Ω/km）	
			次数不少于	弯曲半径（mm）		GTA	GTB
1.2	750	1.0	17	5	7	47.3	58.0
1.4	750	1.0	14	5	7	34.0	41.0
1.5	750	1.0	12	5	7	29.7	35.5
1.6	750	1.0	12	5	7	26.0	32.0
1.8	750	1.0	11	5	7	19.3	25.0
2.0	750	1.0	10	5	7	16.4	20.0
2.2	750	1.0	9	5	7	13.5	17.0
2.5	750	1.0	8	10	7	10.4	13.0
2.8	750	1.0	8	10	7	8.2	10.0
3.0	750	1.0	8	10	7	7.1	9.0
4.0	750	1.5	8	10	7	4.0	5.0
5.0	650	1.5	6	10	7	2.5	3.5
6.0	650	1.5	6	10	7	2.0	—

注：直径3.0～6.0 mm的铜包钢线，须经受以其自身直径卷绕，正、反方向各一次，不应开裂或起皮。

6. 铝包钢单线

铝包钢单线是以钢线为线芯，外包铝层的双金属复合导线，抗拉强度较高。作为配电线、载波避雷线、通信线及制造大跨越架空绞线之用。铝包钢单线（GL）

产品制造规格范围为直径 3.7～4.0 mm。以直径为 3.8 mm 的铝包钢单线为例，其结构规格及性能分别见表 3－15 和表 3－16。

表 3－15　铝包钢单线结构规格举例　　mm

项　目	数　据	项　目	数　据
单线直径	3.8	最小铝层厚度	0.2
线径偏差	±0.04	平均铝层厚度	0.4

表 3－16　直径 3.8 mm 的铝包钢单线性能

项　目	数据	项　目	数据
相对密度	5.73	压缩剥离(N)	70 000
电阻系数 20 ℃时(Ω·mm²/m)	0.063	弯曲(次)	6
扭转(次)	8	断裂伸长率(%)	1.5
电阻温度系数 α_{20}(1/℃)	0.004 2		
弹性系数(N/mm²)	147 000		
拉断力(N)	9 600		

注：成品铝包钢单线不允许焊接。每圈质量不得小于 60 kg

7. 镀锌铁线

镀锌铁线电阻系数较大，导电性能比铜、铝差，但其抗拉强度较大，常用于农村作为通信广播线路的架空线，也用作钢芯铝绞线及军用被覆线的线芯材料。镀锌铁线的规格及性能见表 3－17。

表 3－17　镀锌铁线的规格及性能

直径 (mm)	直径公差 (mm)	截面 (mm²)	质量 (kg/km)	最大直流电阻 (Ω/kg)(20 ℃)	抗张力 (N)	伸长率 (%)
6.0	0.13	28.27	220.5	4.691	9 704	12
5.5	0.13	23.76	185.3	5.581	8 155	12
5.0	0.13	19.64	153.2	6.753	6 737	12
4.5	0.10	15.90	124.0	8.341	5 452	10
4.0	0.10	12.57	98.05	10.55	4 314	10
3.5	0.10	9.621	75.04	13.78	3 302	10
3.2	0.08	8.042	62.73	16.49	2 761	10
2.9	0.08	6.605	51.52	20.08	2 267	10
2.6	0.06	5.309	41.41	24.98	1 822	7
2.3	0.06	4.155	32.41	31.92	1 426	7
2.0	0.06	3.142	24.51	42.21	1 080	7
1.8	0.06	2.545	19.85	52.11	873	7
1.6	0.05	2.011	15.69	65.95	690	7

8. 常用圆铜单线及圆铝单线规格

常用的圆铜单线及圆铝单线的规格、单位净重及直流电阻见表 3－18。

表 3－18　常用圆铜单线及圆铝单线的规格、每千米净重及直流电阻

直径（mm）	截面积（mm^2）	圆铜线			圆铝线		
		每千米的净重（kg）	20 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	75 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	每千米的净重（kg）	20 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	75 ℃时每千米的直流电阻（Ω）
0.05	0.001 96	0.017 5	8 970	11 060			
0.06	0.002 83	0.025 2	6 210	7 660			
0.07	0.003 85	0.034 2	4 570	5 640			
0.08	0.005 03	0.044 7	3 500	4 320			
0.09	0.006 36	0.056 5	2 760	3 410			
0.10	0.007 85	0.069 8	2 240	2 770			
0.11	0.009 50	0.084 5	1 854	2 290			
0.12	0.011 31	0.100 5	1 556	1 918			
0.13	0.013 3	0.117 9	1 322	1 630			
0.14	0.015 4	0.136 8	1 142	1 410			
0.15	0.017 67	0.157	995	1 227			
0.16	0.020 1	0.179	875	1 080			
0.17	0.022 7	0.202	775	956			
0.18	0.025 5	0.226	690	852			
0.19	0.028 4	0.262	620	765			
0.20	0.031 4	0.279	560	692	0.085	901	1 100
0.21	0.034 6	0.308	506	628	0.097	820	1 000
0.23	0.041 5	0.369	424	524	0.112	682	835
0.25	0.049 1	0.436	359	443	0.133	577	705
0.27	0.057 3	0.509	307	379	0.155	494	604
0.29	0.066 1	0.587	266	329	0.178	428	524
0.31	0.075 5	0.671	233	285	0.204	375	458
0.33	0.085 5	0.760	206	254	0.231	331	405
0.35	0.096 2	0.855	183	226	0.260	294	360
0.38	0.113 4	1.008	156.0	191.3	0.306	250	305
0.41	0.132 0	1.170	133.0	164	0.357	214	262
0.44	0.152 1	1.352	116.0	142.5	0.411	186	227
0.47	0.173 5	1.54	101.0	125.0	0.469	163	199.5
0.49	0.188 6	1.68	93.3	115.0	0.509	150	183.5
0.51	0.204	1.81	86.0	106.2	0.550	138.6	169.5
0.53	0.221	1.98	79.4	98.2	0.600	128.0	156.5

续表

直径（mm）	截面积（mm^2）	圆铜线			圆铝线		
		每千米的净重（kg）	20 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	75 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	每千米的净重（kg）	20 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	75 ℃时每千米的直流电阻（Ω）
0.55	0.238	2.12	73.7	91.2	0.643	119.0	145.5
0.57	0.255	2.27	68.8	85.2	0.689	111.0	135.5
0.59	0.273	2.42	64.2	79.5	0.734	103.6	127
0.62	0.302	2.68	58.0	72.0	0.813	93.8	114.7
0.64	0.322	2.86	54.5	67.4	0.868	88.0	107.5
0.67	0.353	3.13	49.6	61.5	0.950	80.2	98.0
0.69	0.374	3.32	47.0	58.0	1.01	75.7	92.5
0.72	0.407	3.62	43.0	53.3	1.10	69.5	85.0
0.74	0.430	3.82	40.6	50.5	1.16	65.8	80.5
0.77	0.466	4.14	37.6	46.5	1.26	60.7	74.4
0.80	0.503	4.47	34.9	43.1	1.36	56.3	68.9
0.83	0.541	4.81	32.4	40.1	1.46	52.4	64.0
0.86	0.581	5.16	30.2	37.3	1.57	48.7	59.6
0.90	0.636	5.66	27.5	34.1	1.72	44.5	54.5
0.93	0.679	6.04	25.8	31.9	1.83	41.7	51.7
0.96	0.724	6.43	24.3	30.0	1.95	39.1	47.8
1.00	0.785	6.98	22.3	27.6	2.12	36.1	44.1
1.04	0.849	7.55	20.7	25.6	2.28	33.3	40.9
1.08	0.916	8.14	19.20	23.7	2.47	30.9	37.8
1.12	0.985	8.75	17.80	22.0	2.65	28.8	35.1
1.16	1.057	9.40	16.6	20.6	2.85	26.8	32.8
1.20	1.131	10.05	15.50	19.17	3.05	25.0	30.6
1.25	1.227	10.91	14.3	17.68	3.31	23.1	28.2
1.30	1.327	11.80	13.2	16.35	3.58	21.5	26.1
1.35	1.431	12.73	12.30	14.10	3.86	19.8	24.2
1.40	1.539	13.69	11.40	13.90	4.15	18.4	22.5
1.45	1.651	14.70	10.60	13.13	4.45	17.15	20.9
1.50	1.767	15.70	9.33	12.28	4.77	16.00	19.6
1.56	1.911	17.0	9.18	11.35	5.15	14.80	18.1
1.62	2.06	18.32	8.53	10.5	5.56	13.73	16.8
1.68	2.22	19.7	7.90	9.78	5.98	12.75	15.6
1.74	2.38	21.1	7.37	9.12	6.40	11.95	14.54
1.81	2.57	22.9	6.84	8.45	6.95	11.00	13.45
1.88	2.78	24.7	6.31	7.80	7.49	10.2	12.45

续表

直径（mm）	截面积（mm²）	圆铜线			圆铝线		
		每千米的净重（kg）	20 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	75 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	每千米的净重（kg）	20 ℃时每千米的直流电阻（Ω）	75 ℃时每千米的直流电阻（Ω）
1.95	2.99	26.5	5.88	7.26	8.06	9.46	11.60
2.02	3.20	28.5	5.50	6.78	8.65	8.85	10.8
2.10	3.46	30.8	5.11	6.27	9.34	8.18	10.0
2.26	4.01	35.7	4.39	5.41	10.83	7.05	8.63
2.44	4.68	41.6	3.76	4.63	12.64	6.05	7.40
2.63	5.43	48.3	3.24	4.00	14.65	5.22	6.37
2.83	6.29	55.9	2.80	3.45	16.98	4.50	5.50
3.05	7.31	65.0	2.41	2.97	19.75	3.88	4.74
3.28	8.45	75.1	2.08	2.57	22.8	3.35	4.10
3.53	9.79	87.0	1.80	2.22	26.4	2.89	3.54
3.80	11.34	100.8	1.55	1.915	30.6	2.49	3.05
4.10	13.20	117.3	1.332	1.642	35.6	2.14	2.62
4.50	15.90	141.4	1.108	1.362	43.0	1.78	2.18
4.80	18.1	160.9	0.973	1.198	48.9	1.56	1.91
5.20	21.2	188.8	0.827	1.020	57.4	1.33	1.627

注：表中计算公式如下：

每千米的净质量 $m=1\,000(\mathrm{m})\times$截面积$(\mathrm{mm^2})\times$密度$\times10^{-3}(\mathrm{kg})$

其中铜的密度为 8.9 $\mathrm{g/cm^3}$；铝密度为 2.7 $\mathrm{g/cm^3}$。

每千米的直流电阻：$R_t=\dfrac{\text{电阻系数}\times1\,000}{\text{截面积}(\mathrm{mm^2})}(\Omega/1\,000\ \mathrm{m})$

其中当温度 $t=20$ ℃时　铜的电阻系数为 0.017 5 $\Omega\cdot\mathrm{mm^2/m}$

铝的电阻系数为 0.028 3 $\Omega\cdot\mathrm{mm^2/m}$

温度 $t=75$ ℃时　铜的电阻系数为 0.021 7 $\Omega\cdot\mathrm{mm^2/m}$

铝的电阻系数为 0.034 6 $\Omega\cdot\mathrm{mm^2/m}$

二、裸绞线

常用的裸绞线有铝绞线、钢芯铝绞线、铜绞线和铝合金绞线。裸绞线的结构如图 3-1 所示。各种绞线的型号、名称见表 3-19。

图 3-1　裸绞线的结构

(a) 铝绞线　(b) 钢芯铝绞线

表 3-19　各种绞线的型号、名称

型　号	名　称
LJ	铝绞线
LGJ	钢芯铝绞线
LGJF	防腐钢芯铝绞线
LH_AJ	热处理铝镁硅合金绞线
LH_AGJ	钢芯热处理铝镁硅合金绞线
$LHJF_1$	轻防腐钢芯热处理铝镁硅合金绞线
$LHJF_2$	中防腐钢芯热处理铝镁硅合金绞线
LH_BG	热处理铝镁硅稀土合金绞线
LH_BGJ	钢芯热处理铝镁硅稀土合金绞线
LH_BGJF_1	轻防腐钢芯热处理铝镁硅稀土合金绞线
LH_BGJF_2	中防腐钢芯热处理铝镁硅稀土合金绞线
TJ	裸铜绞线

型号字母含义：

L——铝线；J——绞线；H——合金；F——防腐；G——钢芯。

举例：LH_BGJ—400/50　含义为铝合金标称截面为 400 mm^2、钢芯标称截面为 50 mm^2 的钢芯热处理铝镁硅稀土合金绞线。

1. 铝绞线

铝绞线因其抗拉强度较低，一般用于工矿企业和农村短距离低压电力线路上。铝绞线(LJ)的规格、结构与技术性能见表 3-20。

表 3-20　铝绞线的规格、结构与技术性能

标称截面 (mm^2)	实际截面 (mm^2)	结构尺寸根数/直径 (mm)	计算直径 (mm)	直流电阻 (20 ℃) (Ω/km)	拉断力 (N)	弹性系数 (N/mm^2)	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ (1/℃)	计算质量 (kg/km)
10	10.10	3/2.07	4.46	2.896	1 600	60 000	23.0	27.6
16	15.89	7/1.70	5.10	1.847	2 520	60 000	23.0	43.5
25	24.71	7/2.12	6.36	1.188	4 000	60 000	23.0	67.6
35	34.36	7/2.50	7.50	0.854	5 500	60 000	23.0	94.0
50	49.48	7/3.00	9.00	0.593	7 400	60 000	23.0	135
70	69.29	7/3.55	10.65	0.424	9 800	60 000	23.0	190
95	93.27	19/2.50	12.50	0.317	15 000	57 000	23.0	257
95(1)	94.23	7/4.14	12.42	0.311	13 140	60 000	23.0	258
120	116.99	19/2.80	14.00	0.253	17 500	57 000	23.0	323
150	148.07	19/3.15	15.75	0.200	22 060	57 000	23.0	409
185	182.80	19/3.50	17.50	0.162	27 300	57 000	23.0	504
240	236.38	19/3.98	19.90	0.125	33 100	57 000	23.0	652
300	297.57	37/3.20	22.40	0.099 6	45 000	57 000	23.0	822
400	397.83	37/3.70	25.90	0.074 5	56 000	57 000	23.0	1 099
500	498.07	37/4.14	28.98	0.059 5	70 000	57 000	23.0	1 376
600	603.78	61/3.55	31.95	0.049 1	80 000	55 000	23.0	1 669

2. 钢芯铝绞线

钢芯铝绞线广泛应用于各种电压等级的电力传输线路，抗拉强度较大。为适合不同用途的要求，除了钢芯铝绞线(LGJ)外，还有轻型钢芯铝绞线(LGJQ)及加强型钢芯铝绞线(LGJJ)等品种。

钢芯铝绞线、轻型钢芯铝绞线和加强型钢芯铝绞线的规格、结构与技术性能分别见表 3－21 至表 3－23。

表 3-21　钢芯铝绞线的规格、结构与技术性能

标称截面（mm^2）	实际截面（mm^2）		铝钢截面比	结构尺寸根数/直径（mm）		计算直径（mm）		直流电阻 20 ℃（Ω·km）	拉断力（N）	弹性系数（N/mm^2）	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$（1/℃）	计算质量（kg/km）
	铝	钢		铝	钢	电线	钢芯					
10	10.60	1.77	6.0	6/1.50	1/1.5	4.50	1.5	2.774	3 600	78 000	19.1	42.9
16	15.27	2.54	6.0	6/1.80	1/1.8	5.40	1.8	1.926	5 200	78 000	19.1	61.7
25	22.81	3.80	6.0	6/2.20	1/2.2	6.60	2.2	1.289	7 800	78 000	19.1	92.2
35	36.95	6.16	6.0	6/2.80	1/2.8	8.40	2.8	0.796	11 700	78 000	19.1	149
50	48.26	8.04	6.0	6/3.20	1/3.2	9.60	3.2	0.609	15 200	78 000	19.1	195
70	68.05	11.34	6.0	6/3.80	1/3.8	11.40	3.8	0.432	21 000	78 000	19.1	275
95	94.23	17.81	5.3	28/2.07	7/1.8	13.68	5.4	0.315	34 300	80 000	18.8	401
95(1)	94.23	17.81	5.3	7/4.14	7/1.8	13.68	5.4	0.312	32 500	80 000	18.8	398
120	116.34	21.99	5.3	28/2.30	7/2.0	15.20	6.0	0.255	42 300	80 000	18.8	495
120(1)	116.33	21.99	5.3	7/4.60	7/2.0	15.20	6.0	0.253	40 200	80 000	18.8	492
150	140.76	26.61	5.3	28/2.53	7/2.2	16.72	6.6	0.211	50 000	80 000	18.8	599
185	182.40	34.36	5.3	28/2.88	7/2.5	19.02	7.5	0.163	65 000	80 000	18.8	774
240	228.01	43.10	5.3	28/3.22	7/2.8	21.28	8.4	0.130	77 100	80 000	18.8	969
300	317.52	59.69	5.3	28/3.80	19/2.0	25.20	10.0	0.093 5	110 000	80 000	18.8	1 348
400	382.4	72.22	5.3	28/4.17	19/2.2	27.68	11.0	0.077 8	132 000	80 000	18.8	1 626

表 3-22 轻型钢芯铝绞线的规格、结构与技术性能

标称截面 (mm^2)	实际截面 (mm^2)		铝钢截面比	结构尺寸 根数/直径 (mm)		计算直径 (mm)		直流电阻 20 ℃ (Ω·km)	拉断力 (N)	弹性系数 (N/mm^2)	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ (1/℃)	计算质量 (kg/km)
	铝	钢		铝	钢	电线	钢芯					
150	143.58	17.81	8.0	24/2.76	7/1.8	16.44	5.4	0.207	41 000	74 000	19.8	537
185	176.50	21.99	8.0	24/3.06	7/2.0	18.24	6.0	0.168	51 000	74 000	19.8	661
240	253.88	31.67	8.0	24/3.67	7/2.4	21.88	7.2	0.117	70 000	74 000	19.8	951
300	297.84	37.16	8.0	54/2.65	7/2.6	23.70	7.8	0.099 7	85 000	74 000	19.8	1 116
300(1)	298.58	37.16	8.0	24/3.98	7/2.6	23.72	7.8	0.099 4	82 000	74 000	19.8	1 117
400	97.12	49.48	8.0	54/3.06	7/3.0	27.36	9.0	0.074 8	110 000	74 000	19.8	1 487
400(1)	398.86	49.48	8.0	24/4.60	7/3.0	27.40	9.0	0.074 4	106 000	74 000	19.8	1 491
500	478.81	59.69	8.0	54/3.36	19/2.0	30.16	10.0	0.062 0	136 000	74 000	19.8	1 795
600	580.61	72.22	8.0	54/3.70	19/2.2	33.20	11.0	0.051 1	160 000	74 000	19.8	2 175
700	692.23	85.95	8.0	54/4.04	19/2.4	36.24	12.0	0.042 9	190 000	74 000	19.8	2 592

表 3-23 加强型钢芯铝绞线的规格、结构与技术性能

标称截面 (mm^2)	实际截面 (mm^2)		铝钢截面比	结构尺寸 根数/直径 (mm)		计算直径 (mm)		直流电阻 20 ℃ (Ω·km)	拉断力 (N)	弹性系数 (N/mm^2)	热膨胀系数 $\times 10^{-6}$ (1/℃)	计算质量 (kg/km)
	铝	钢		铝	钢	电线	钢芯					
150	147.26	34.36	4.3	30/2.50	7/2.5	17.50	7.5	0.202	61 000	83 000	18.2	677
185	184.73	43.10	4.3	30/2.80	7/2.8	19.60	8.4	0.161	71 000	83 000	18.2	850
240	241.27	56.30	4.3	30/3.20	7/3.2	22.40	9.6	0.123	93 000	83 000	18.2	1 110
300	317.35	72.22	4.4	30/3.67	19/2.2	25.68	11.0	0.093 7	123 000	82 000	18.3	1 446
400	409.72	93.27	4.4	30/4.17	19/2.5	29.18	12.5	0.072 6	160 000	82 000	18.3	1 868

2. 铜绞线

架空输线电路大部分采用铝绞线，仅在一些特殊场合采用铜绞线。

TJ 型铜绞线的主要参数见表 3－24。

TRJ 型裸铜软绞线的主要参数见表 3－25。

表 3－24　TJ 型铜绞线的主要参数

标称截面/mm²	结构与标称直径/(根/mm)	质量/(kg/km)	外径/mm	20 ℃时电阻/(Ω/km)
10	7/1/33	88	3.99	—
16	7/1.68	140	5.0	≤1.20
25	7/2.11	221	6.3	≤0.74
35	7/2.49	323	7.5	≤0.54
50	7/2.97	439	8.9	≤0.39
70	19/2.14	618	10.6	≤0.28
95	19/2.49	837	12.4	≤0.20
120	19/2.80	1 058	14.0	≤0.158
150	19/3.15	1 338	15.8	≤0.123
185	37/2.49	1 627	17.5	≤0.103
240	37/2.84	2 120	19.7	≤0.078
300	37/3.15	2 608	22.1	≤0.062
400	37/3.66	3 521	25.6	≤0.047

表 3－25　TRJ 型裸铜软绞线的主要参数

标称截面/mm²	结构与标称直径/(股×根/mm)	质量/(kg/km)	外径/mm	20 ℃时电阻/(Ω/km)
10	7×7/0.52	98	4.7	≤1.830
16	7×7/0.64	144	5.8	≤1.26
25	7×12/0.62	239	7.7	≤0.695
35	7×19/0.58	322	8.9	≤0.512
50	7×19/0.68	444	10.2	≤0.375
70	7×27/0.68	631	12.6	≤0.262
95	7×37/0.68	865	14.3	≤0.195
120	7×37/0.76	1 080	16.0	≤0.153
150	7×48/0.74	1 328	18.1	≤0.134
185	7×61/0.74	1 688	20.0	≤0.098
240	7×61/0.85	2 227	23.0	≤0.081
300	27×19/0.85	2 680	26.1	≤0.062
400	37×19/0.85	3 670	29.8	≤0.042
500	37×19/0.95	4 580	33.3	≤0.036

3. 铝合金绞线

铝合金绞线主要用于架空电力线路，具有很好的抗拉强度，尤其是热处理型铝镁硅合金绞线的抗拉强度大于铝绞线近 1 倍，而电导率只比铝线低 10%左右，可用于大跨越输电线路上。常用的铝合金线有热处理型铝镁硅合金绞线(HI_AJ)、非热处理型铝镁合金绞线(HL_BJ)及钢芯铝合金绞线，其规格、结构及技术性能分别见表 3－26 和表 3－27。

表 3－26　铝合金绞线的主要参数(LH_AJ、LH_BJ)

标称截面/mm^2	结构与标称直径/(根/mm)	外径/mm	质量/(kg/km)	计算拉断力/N	20 ℃时电流电阻/(Ω/km)
10	7/1.35	4.05	27.4	2 800	≤3.315 96
16	7/1.71	5.13	44.0	4 490	≤2.066 73
25	7/2.13	6.39	68.2	6 970	≤1.332 04
35	7/2.52	7.56	95.5	9 750	≤0.951 65
50	7/3.02	9.06	137.1	14 000	≤0.662 62
70	7/3.57	10.71	191.6	19 570	≤0.474 18
95	7/4.16	12.48	260.2	26 570	≤0.349 21
120	19/2.84	14.20	330.9	33 620	≤0.277 45
150	19/3.17	15.85	412.2	41 880	≤0.222 69
185	19/3.52	17.60	508.3	51 640	≤0.180 61
210	19/3.75	18.75	576.8	58 610	≤0.159 13
240	19/4.01	20.05	659.6	67 020	≤0.139 17
300	37/3.21	22.47	825.2	83 630	≤0.111 81
400	37/3.71	25.97	1 102.3	111 710	≤0.083 70
500	37/4.15	29.05	1 379.2	139 780	≤0.066 89
630	61/3.63	32.67	1 742.2	176 320	≤0.053 10
800	61/4.09	36.81	2 211.7	223 840	≤0.041 83
1 000	61/4.57	41.13	2 761.3	279 460	≤0.033 51

表 3－27　钢芯铝合金绞线的主要参数

型号	标称截面(铝/钢)/mm^2	结构与标称直径/(根/mm)		计算截面/mm^2	外径/mm	计算拉断力/N	20 ℃电阻/(Ω/km)
		铝合金	钢				
LH_AGJ	10/2	6/1.50	1/1.50	12.37	4.50	5.180	≤3.140 26
	16/3	6/1.85	1/1.85	18.81	5.55	7 890	≤2.064 45
LH_BGJ	25/4	6/2.32	1/2.32	29.59	6.96	12.260	≤1.312 72
	35/6	6/2.72	1/2.72	40.67	8.16	16 860	≤0.955 01
LH_AGJF_1	50/8	6/3.20	1/3.20	56.29	9.60	23.050	≤0.689 99

续表

型号	标称截面（铝/钢）/mm²	结构与标称直径/（根/mm）		计算截面/mm²	外径/mm	计算拉断力/N	20 ℃电阻/(Ω/km)
		铝合金	钢				
LH_BGJF_1	50/30	12/2.32	7/2.32	80.31	11.60	48.580	≤0.660 59
	70/10	6/3.80	1/3.80	79.38	11.40	32.51	≤0.489 30
LH_AGJF_2	70/40	12/2.72	7/2.72	110.40	13.60	66 780	≤0.480 58
LH_BGJF_2	95/15	26/2.15	7/1.67	109.72	13.61	45 720	≤0.355 08
	95/55	12/3.20	7/3.20	152.80	16.00	90 460	≤0.347 22
	120/7	18/2.90	1/2.90	125.49	14.50	42 470	≤0.281 14
	120/20	26/2.38	7/1.85	134.48	15.07	56 050	≤0.289 77
	120/70	12/3.60	7/3.60	193.39	18.00	114 500	≤0.274 35
	150/8	18/3.20	1/3.20	152.80	16.00	51 430	≤0.230 90
	150/25	26/2.70	7/2.10	173.10	17.10	72 180	≤0.225 15
LH_BGJF_2	185/10	18/3.60	1/3.60	193.39	18.00	65 090	≤0.182 44
	210/10	18/3.80	1/3.80	215.48	19.00	72.52	≤0.163 74
	210/35	26/3.22	7/2.50	248.08	20.38	101 350	≤0.158 30
	240/30	24/3.60	7/2.40	275.95	21.60	107 850	≤0.137 12
	300/20	45/2.93	7/1.95	324.32	23.43	113 700	≤0.110 54
	300/50	26/3.83	7/2.98	348.36	24.26	143 620	≤0.111 89
	300/70	30/3.60	7/3.60	376.61	25.20	168 360	≤0.109 87
	400/25	45/3.33	7/2.22	419.00	26.64	146.97	≤0.085 58
	400/50	54/3.07	7/3.07	451.54	27.63	174 670	≤0.083 99
	400/95	30/4.16	19/2.50	501.01	29.14	226 010	≤0.082 28
LH_BGJF_2	500/35	45/3.75	7/2.50	531.37	30.00	185 220	≤0.067 48
	500/65	54/3.44	7/3.44	566.93	30.96	219.31	≤0.067 48
	630/45	45/4.20	7/2.80	666.55	33.60	232 340	≤0.053 79
	630/80	54/3.87	19/2.32	715.51	34.82	278 140	≤0.052 85
	800/55	45/4.80	7/3.20	870.59	38.40	301.500	≤0.041 18
LH_BGJF_2	800/100	54/4.33	19/2.60	896.04	39.98	348 570	0.042 22
LH_BGJF_2	1 000/45	72/4.21	7/2.80	1 045.37	42.08	343 710	≤0.033 48
	1 000/125	54/4.84	19/2.90	1 119.01	43.54	434 910	≤0.033 79

三、软接线

常用的软接线有铜电刷线、裸铜天线、裸铜软绞线和铜编织线，其品种、型号、截面范围及主要用途见表 3-28。

表 3-28　软接线的品种、型号、截面范围及主要用途表

产品名称	型号	截面范围（mm^2）	主要用途
裸铜电刷线	TS	0.3～16	供电机、电器线路连接用
软裸铜电刷线	TSR	0.16～2.5	
纤维编织铜电刷线	TSX	0.3～16	
纤维编织软铜电刷线	TSXR	1.0～2.5	
硬铜天线	TT	1.0～25	供通信架空天线用
软铜天线	TTR	1.0～25	
裸铜软绞线	TRJ	10～500	供移动电器设备连接线之用
	TRJ-1	25～500	供移动电器设备连接线之用
	TRJ-2	0.1～1.0	供无线电设备内部连接线用
	TRJ-3	6～50	供要求较柔软的电器设备连接线用
	TRJ-4	1.0～50	供要求特别柔软的电器设备连接线用
硬裸铜编织线	TYZ	4～185	供移动电器设备连接线用
软裸铜编织线	TRZ-1	5～50	
硬裸铜镀锡编织线	TRZ-2	4～35	
软裸铜镀锡编织线	TYZX	4～185	
	TRZX-1	5～50	
	TRZX-2	4～35	
软铜编织蓄电池线	QC	16～43	供汽车、拖拉机蓄电池接线用

1. 铜电刷线

铜电刷线由多股铜线或镀锡铜线绞制而成，结构稳定，有良好的柔软性，用作电机中电刷的引接线，能承受经常取放电刷时多次弯曲而不易断裂。铜电刷线按结构分为裸铜电刷线（TS）、纤维编织铜电刷线（TSX）、软裸铜电刷线（TSR）及纤维编织软铜电刷线（TSXR）四种，其规格、尺寸及技术性能分别见表 3-29 和表 3-30。

表 3-29　TS、TSX 型电刷线结构与技术性能

标称截面（mm^2）	计算截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）		直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	伸长率不小于（%）
			TS	TSX		
0.3	0.296	7×11×0.07	1.0	1.8	63.00	
0.5	0.511	7×19×0.07	1.4	2.2	36.40	
0.75	0.769	7×14×0.10	1.5	2.3	24.20	18
1.0	0.990	7×18×0.10	1.7	2.5	18.80	
1.5	1.48	7×27×0.10	2.1	2.9	12.60	

续表

标称截面（mm^2）	计算截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）		直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	伸长率不小于（%）
			TS	TSX		
2.0	1.93	7×36×0.10	2.4	3.2	9.40	
2.5	2.53	7×46×0.10	2.8	3.6	7.36	
3	2.97	7×54×0.10	3.0	3.8	6.27	
4	3.96	7×72×0.10	3.6	4.4	4.70	
5	4.94	7×90×0.10	3.8	4.6	3.74	18
6	5.93	7×75×0.12	4.3	5.1	3.14	
8	8.01	12×59×0.12	5.1	5.9	2.40	
10	10.04	12×75×0.12	6.0	6.8	1.90	
12	1.93	12×88×0.12	6.3	7.1	1.62	
16	16.12	19×75×0.12	7.1	7.9	1.20	

表 3-30　TSR、TSXR 型软电刷线结构与技术性能

标称截面（mm^2）	计算截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）		直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	伸长率不小于（%）
			TSR	TSXR		
0.16	0.165	7×12×0.05	0.65	—	113.00	
0.3	0.302	7×22×0.05	1.0	—	61.60	
0.5	0.518	12×22×0.05	1.4	—	37.20	
0.75	0.753	12×32×0.05	1.5	—	25.60	15
1.0	1.012	12×43×0.05	2.0	2.8	19.00	
1.5	1.53	19×41×0.05	2.4	3.2	12.60	
2.5	2.50	19×67×0.05	3.0	3.8	7.70	

2. 裸铜天线

裸铜天线由多根铜线束绞成股线（绞向为左向），再由股线复绞（绞向为右向）而成，分为硬铜天线（TT）、软铜天线（TTR）两种，作通信架空天线用，其规格、结构及技术性能见表 3-31。

表 3-31　裸铜天线规格、结构及技术性能

标称截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）	拉断力不小于（N）		直流电阻 20 ℃不小于（Ω/km）		计算质量（kg/km）
			TT	TTR	TT	TTR	
1.0	7×7×0.16	1.44	350	162	19.0	18.5	9.4

续表

标称截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）	拉断力不小于（N）		直流电阻 20 ℃不小于（Ω/km）		计算质量（kg/km）
			TT	TTR	TT	TTR	
1.5	7×7×0.20	1.80	540	255	12.2	12.0	14.6
2.5	7×7×0.25	2.25	840	392	7.8	7.6	22.8
4	7×7×0.32	2.88	1 400	657	4.8	4.6	37.3
6	7×7×0.39	3.51	2 100	981	3.2	3.1	55.5
10	7×7×0.51	4.59	3 500	1 670	1.9	1.8	94.8
16	7×7×0.64	5.76	5 600	2 600	1.2	1.15	150
25	7×7×0.80	7.20	8 600	4 100	0.8	0.75	233

3. 裸铜软绞线

裸铜软绞线按其结构，亦即绞制方式的不同，有 TRJ、TRJ－1、TRJ－2、TRJ－3 及 TRJ－4 五种。TRJ 及 TRJ－1 型股线采用正规绞合、再按正规绞合复绞；TRJ－2 型采用束绞，无复绞；TRJ－3 及 TRJ－4 型股线采用束绞，再按正规绞合复绞，都可作连接电机、电器设备部件之用。以其柔软程度的差异分别满足不同使用场合的要求，其规格、结构及技术性能分别见表 3－32 至表 3－36。

表 3－32　TRJ 型铜软绞线规格、结构及技术性能

标称截面（mm^2）	计算截面（mm^2）	根数×线径（mm）	计算外径（mm）	计算质量（kg/km）
10	10.41	49×0.52	4.7	98
16	15.76	49×0.64	5.8	147
25	25.89	98×0.58	7.7	242
35	35.14	133×0.58	8.7	328
50	48.30	133×0.68	10.2	451
70	63.63	189×0.68	12.6	640
95	94.06	259×0.68	14.3	878
120	117.50	259×0.76	16.0	1 097
150	144.51	336×0.74	18.1	1 350
185	183.64	427×0.74	20.0	1 715
240	242.30	427×0.85	23.0	2 260
300	291.10	513×0.85	26.1	2 715
400	398.90	703×0.85	29.8	3 724
500	498.30	703×0.95	33.3	4 651

表 3-33　TRJ-1 型铜软绞线规格、结构及技术性能

标称截面（mm^2）	计算截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）	直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
25	25.89	7×14×0.58	7.7	0.695	238
35	35.14	7×19×0.58	9.0	0.512	323
50	48.30	7×19×0.68	10.5	0.373	444
70	68.64	7×27×0.68	13.0	0.262	631
95	94.06	7×37×0.68	14.5	0.191	865
120	117.67	12×27×0.68	18.0	0.153	1 080
150	150.94	19×14×0.85	19.0	0.120	1 389
185	183.85	12×27×0.85	22.0	0.098	1 690
240	251.95	12×37×0.85	25.0	0.072	2 320
300	291.10	19×27×0.85	26.5	0.062	2 680
400	398.92	19×37×0.85	30.0	0.045	3 670
500	498.30	19×37×0.95	33.5	0.036	4 580

表 3-34　TRJ-2 型铜软绞线规格、结构及技术性能

标称截面（mm^2）	根数×线径（mm）	计算外径（mm）	直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
0.1	7×0.15	0.5	150	1.1
0.15	5×0.20	0.6	115	1.4
0.2	7×0.20	0.7	81.8	2.0
0.3	10×0.20	0.8	58.1	2.8
0.4	12×0.20	0.9	47.6	3.4
0.5	7×0.30	0.95	36.7	4.5
0.6	7×0.32	1.0	32.1	5.1
0.8	7×0.39	1.2	21.5	7.5
1.0	12×0.32	1.35	18.8	8.7

表 3-35　TRJ-3 型铜软绞线规格、结构及技术性能

标称截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）	直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
6	7×27×0.20	3.8	3.03	55
10	7×46×0.20	5.0	1.78	93
16	7×72×0.20	6.0	1.13	146
20	7×92×0.20	6.8	0.89	186

续表

标称截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）	直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
25	7×114×0.20	7.5	0.72	231
35	7×160×0.20	9.0	0.51	324
50	7×3×76×0.20	10.5	0.36	462

表 3-36　TRJ-4 型铜软绞线结构与技术指标

标称截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	计算外径（mm）	直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
1.0	7×37×0.07	1.6	18.5	9.2
1.5	7×56×0.07	1.9	12.3	13.9
2.5	7×90×0.07	2.4	7.6	22.4
3	7×3×37×0.07	3.2	6.2	28.4
4	7×3×50×0.07	4.0	4.57	38.4
5	7×3×60×0.07	4.3	3.82	46.1
6	7×3×74×0.07	4.6	3.09	56.8
10	7×3×60×0.10	6.0	1.87	94
16	7×3×95×0.10	7.5	1.18	148
25	7×3×150×0.10	9.5	0.75	235
35	7×3×210×0.10	11.0	0.54	330
50	7×3×300×0.10	13.5	0.38	470
50(1)	7×3×5×60×0.10	16.0	0.38	470

4. 铜编织线

铜编织线除有裸铜编织线和镀锡铜编织线供移动电器设备作连接线用之外，还有专供汽车、拖拉机中蓄电池作连接用的软铜编织蓄电池线。按其结构和柔软性分为 TYZ、TRZ-1、TRZ-2、TYZX、TRZX-1、TRZX-2 及 QC(蓄电池线)，产品除要求具有椭圆形的品种外，均滚轧成带状。其五种型号的规格、结构及技术性能分别见表 3-37 至表 3-40。

表 3-37　TYZ、TYZX 型铜编织线规格、结构与技术性能

标称截面（mm^2）	股数×根数×套数×线径（mm）	电线尺寸（mm）		直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
		宽度	公差		
4	24×10×1×0.15	8	±1	5.31	44

续表

标称截面（mm^2）	股数×根数×套数×线径（mm）	电线尺寸（mm）		直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
		宽度	公差		
6	24×15×1×0.15	10	±1	3.54	67
8	24×19×1×0.15	11	±1	2.80	84
10	24×25×1×0.15	13	±2	2.12	111
16	24×38×1×0.15	17	±2	1.40	169
35	24×20×2×0.15+24×40×1×0.15	椭圆形 16	±2.5	0.66	385
50	24×20×2×0.15+24×40×2×0.15	椭圆形 18	±2.5	0.44	580
95	24×20×3×0.15+24×40×4×0.15	椭圆形 20	±3	0.24	1 200
150	24×20×2×0.15+24×40×8×0.15	椭圆形 25	±3	0.15	1 850
185	24×20×2×0.15+24×40×10×0.15	椭圆形 28	±3	0.12	2 300

表 3-38　TRZ-1、TRZX-1 型铜编织线规格、结构与技术性能

标称截面（mm^2）	股数×根数×套数×线径（mm）	电线尺寸（mm）		直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
		宽度	厚度		
5	36×8×1×0.15 48×6×1×0.15	12±1	1.0±0.2	4.24	53
8	48×9×1×0.15	16±1	1.1±0.2	2.81	80
10	48×12×1×0.15	19±1	1.4±0.2	2.12	106
16	48×20×1×0.15	24±1	2.0±0.2	1.27	176
25	48×15×2×0.15	22±2	2.4±0.4	0.85	264
35	48×20×2×0.15	26±2	3.5±0.4	0.64	352
50	48×20×3×0.15	28±2	5.0±0.5	0.43	530

表 3-39　TRZ-2、TRZX-2 型铜编织线规格、结构及技术性能

标称截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	电线尺寸（mm）		直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
		宽度	厚度		
4	36×14×0.10	8±1	1.0±0.2	5.46	41
6	36×21×0.10	10±1	1.2±0.2	3.58	63
10	48×27×0.10	16±1	1.8±0.2	2.12	106
16	36×56×0.10	16±1	2.4±0.4	1.37	164
20	36×72×0.10	18±1	3.0±0.4	1.06	211
25	36×87×0.10	20±1	3.6±0.4	0.88	256

续表

标称截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	电线尺寸（mm）		直流电阻 20 ℃不大于（Ω/km）	计算质量（kg/km）
		宽度	厚度		
25	48×65×0.10	24±1	3.0±0.4	0.88	256
35	24×190×0.10	21±1.5	5.0±0.5	0.61	371

表 3-40　蓄电池线规格及结构

标称截面（mm^2）	股数×根数×线径（mm）	电线尺寸（mm）		计算质量（kg/km）
		宽度	厚度	
16	24×21×0.20	14±1	2.8±0.2	146
17	48×5×0.30	—	2.0±0.2	187
25	24×33×0.20	16±1	2.8±0.2	230
35	24×28×0.26	23±2	3.0±0.4	330
43	34×34×0.26	26±2	3.5±0.4	401

四、型线

常用的型线品种有扁铜线、铜母线及铜带、扁铝线、铝母线、梯形铜排、异形铜排及异形铜带、空心导线和电车线等。型线的品种、型号、生产范围及主要用途见表 3-41。

表 3-41　型线的品种、型号、生产范围及主要用途表

产品名称	型号	生产范围（mm）	主要用途
硬扁铜线 软扁铜线	TBY TBR	厚 0.80～7.1 宽 2.00～35.5	供电机、电器、安装配电设备及其他电工方面之用
硬铜带 软铜带	TDY TDR	厚 1.00～3.55 宽 9.00～100	
硬铜母线 软铜母线	TMY TMR	厚 4.0～31.5 宽 16.0～125	
硬扁铝线 半硬扁铝线 软扁铝线	LBY LBBY LBR	厚 0.80～7.1 宽 2.00～35.5	供电机、电器、安装配电设备及其他电工方面之用
硬铝母线 软铝母线	LMY LMR	厚 4.0～31.5 宽 16～125	

续表

产品名称	型号	生产范围（mm）	主要用途
梯形铜排	TPT	宽 3～18 高 10～150	供电机换向器整流片用
银铜梯排	TYPT	宽 18 及以下 高 148 及以下	供电机换向器整流片用
七边形铜排	TMR－2	355～690(mm^2) 厚 30	供大型水轮发电机绕组用
换向器用异形银铜排	TYPT－1	宽 5.64～9.26	供电机换向器整流片用
触头铜排 接触头 异形铜带	TPC TPC－1 TDR－1	宽 18～36，高 6 宽 22～30 高 7～9.5	供电气开关触头用
空心铝导线	LBRK	宽 8.5～22.5 高 1.5～14	供水内冷电机、变压器作绕组线圈用
空心铜导线	TBRK	宽 5～18 高 5～18	
圆形铜电车线	TCY	30～65(mm^2)	供电气运输系统架空接触线用
双沟形铜电车线	TCG	65～100(mm^2)	
双沟形钢铝电车线	GLCA GLCB	100/215(mm^2) 80/173(mm^2)	

1. 扁铜线、铜母线及铜带

扁铜线用作制造电机、变压器、电器及电气设备绕组的导体；铜母线及铜带用于电机、电器、配电设备及其他电工装备连接导体和汇流排之用。按产品的柔软度分，扁铜线、铜母线及铜带均有软、硬两种，其产品的截面如图 3－2 所示。

(1) 扁铜线　扁铜线分硬扁铜线(TBY)和软扁铜线(TBR)两种。扁铜线尺寸允许偏差见表 3－42；扁铜线的圆角半径见表 3－43；扁铜线(含铜母线、铜带)的机械性能及电气性能分别见表 3－44 及 3－45；常用扁铜线(含扁铝线)的标称尺寸及计算截面见表 3－46。

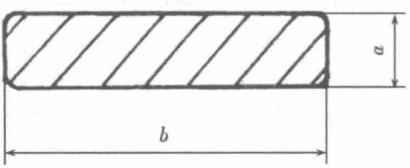


图 3－2　扁铜线、母铜线及铜带的截面

a-厚度；*b*-宽度

表 3－42　扁铜线尺寸允许偏差　　mm

尺寸 *a* 或 *b*	允许偏差	尺寸 *a* 或 *b*	允许偏差
0.80～1.20	±0.02	9.51～15.00	±0.09
1.21～2.85	±0.03	15.01～20.00	±0.12
20.01～25.00	±0.15	2.86～6.00	±0.05
6.01～9.50	±0.07	25.01～35.50	±0.20

表 3-43　扁铜线的圆角半径　　mm

厚度 a	标称圆角半径	允许圆角半径范围	厚度 a	标称圆角半径	允许圆角半径范围
1.00 及以下	$a/2$	0.3～0.5	2.25～3.55	0.80	0.6～1.0
1.01～1.60	0.50	0.4～0.6	3.56～6.00	1.00	0.8～1.3
1.61～2.24	0.65	0.5～0.8	6.01～7.10	1.20	0.9～1.5

表 3-44　扁铜线、铜母线、铜带的机械性能

厚度 a (mm)	TBR		TBY	厚度 a (mm)	TDY	TDR	软铜母线(TMR)的抗拉强度应不小于 206 N/mm²，伸长率应不小于 35%；硬铜母线的布氏硬度应不低于 HB65
	抗拉强度不小于 (N/mm²)	伸长率不小于 (%)	抗拉强度不小于 (N/mm²)		抗拉强度不小于 (N/mm²)	伸长率不小于 (%)	
0.80～1.32	206	30	294	1.00～1.32	294	30	
1.33～3.35	206	32	264	1.33～3.35	264	32	
3.36～7.00	206	34	255	3.36 及以上	255	34	
7.01 及以上	206	35	245				

表 3-45　扁铜线、铜母线、铜带的电气性能

型　号	电阻系数 20 ℃，不大于 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	电阻温度系数 a_{20} (1/℃)
TBY、TMY、TDY	0.017 90	0.003 85
TBR、TMR、TDR	0.017 48	0.003 95

(2) 铜母线　铜母线分有硬铜母线(TMY)及软铜母线(TMR)两种，其产品规格及截面积见表 3-47。

(3) 铜带　铜带分硬铜带(TDY)和软铜带(TDR)两种，其产品规格及截面积见表 3-48，尺寸允许偏差见表 3-49。

2. 扁铝线

扁铝线用作制造电机、变压器、电器及电气设备绕组的导体，在很多方面可取代扁铜线，变压器常用纸包扁铝线。扁铝线分硬扁铝线(LBY)、半硬扁铝线(LBBY)及软扁铝线(LBR)三种。扁铝线的标称尺寸及计算截面与扁铜线相同，见表 3-46。扁铝线尺寸允许偏差及其圆角半径分别见表 3-50 和表 3-51，其机械性能及电气性能分别见表 3-52 和表 3-53。

表 3-46　常用扁铜线、扁铝线的标称尺寸及计算截面

宽 b(mm) \ 厚 a(mm)	0.90	1.00	1.08	1.16	1.25	1.35	1.45	1.56	1.68	1.81	1.95	2.10	2.26	2.44	2.63	2.83	3.05	3.28	3.53	3.8	4.1	4.4	4.7	5.1	5.5
2.10	1.72	1.89	2.06	2.23	2.42	2.63	2.84	3.07	3.32	3.59	—	3.92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.26	1.86	2.05	2.23	2.41	2.62	2.84	3.07	3.32	3.59	3.83	—	—	4.63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.44	2.03	2.23	2.43	2.62	2.84	3.08	3.33	3.60	3.89	4.21	4.53	4.64	—	5.30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.63	2.20	2.42	2.63	2.84	3.03	3.34	3.60	3.80	4.21	4.55	4.92	5.04	5.46	5.94	6.44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.83	2.38	2.62	2.85	3.07	3.33	3.61	3.89	4.20	4.54	4.91	5.31	5.46	5.92	6.43	—	7.55	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.05	—	2.84	3.08	3.33	3.60	3.91	4.21	4.55	4.91	5.31	5.74	5.93	6.41	6.96	7.54	8.15	8.72	—	—	—	—	—	—	—	—
3.28	—	3.07	3.33	3.60	3.89	4.22	4.55	4.91	5.30	5.73	6.19	6.41	6.93	7.52	8.15	8.80	9.51	10.30	—	—	—	—	—	—	—
3.53	—	3.32	3.60	3.89	4.20	4.56	4.91	5.30	5.72	6.18	6.67	6.93	7.50	8.13	8.80	9.51	10.30	11.10	12.00	12.9	—	—	—	—	—
3.8	3.25	3.59	3.89	4.20	4.54	4.92	5.30	5.72	6.17	6.67	7.20	7.50	8.11	8.79	9.51	10.30	11.10	12.00	—	13.90	—	—	—	—	—
4.1	—	3.89	4.22	4.55	4.92	5.33	5.74	6.19	6.68	7.21	7.79	8.13	8.79	9.52	10.30	11.10	12.00	13.00	14.00	15.10	15.90	—	—	—	—
4.4	—	4.19	4.54	4.89	5.29	5.73	6.17	6.65	7.18	7.75	8.37	8.76	9.46	10.20	11.10	12.00	12.90	13.90	15.00	16.20	17.10	18.50	—	—	—
4.7	—	4.49	4.87	5.24	5.67	6.14	6.61	7.12	7.79	8.30	8.96	9.39	10.10	11.00	11.90	12.80	13.80	14.90	16.10	17.40	18.40	—	21.2	—	—
5.1	—	4.89	5.30	5.71	6.17	6.68	7.19	7.75	8.36	9.02	9.74	10.20	11.00	11.90	12.90	13.90	15.10	16.20	17.50	18.90	20.0	21.5	—	25.1	—
5.5	—	5.29	5.73	6.17	6.67	7.22	7.77	8.37	9.03	9.75	10.50	11.10	11.90	12.90	14.00	15.10	16.30	17.50	18.90	20.4	21.7	23.3	25.0	27.2	—
5.9	—	5.69	6.16	6.63	7.17	7.76	8.35	8.99	9.70	10.50	11.30	11.90	12.80	13.90	15.00	16.20	17.50	18.90	20.30	21.9	23.3	25.1	26.8	29.2	—
6.4	—	6.19	6.70	7.21	7.79	8.43	9.07	9.77	10.60	11.40	12.30	12.90	14.00	15.10	16.30	17.60	19.00	20.5	22.1	23.8	25.3	27.3	29.2	31.7	34.3
6.9	—	6.69	7.24	7.79	8.42	9.11	9.79	10.60	11.40	12.30	13.30	14.00	15.10	16.30	17.70	19.00	20.6	22.1	23.1	25.7	27.4	29.5	31.5	34.3	37.1
7.4	—	7.19	7.78	8.37	9.04	9.78	10.50	11.30	12.60	13.30	14.20	15.00	16.20	17.60	19.00	20.4	22.1	23.6	25.6	27.6	29.4	31.7	33.9	36.8	39.8
8.0	—	7.79	8.43	9.07	9.79	10.60	11.40	12.30	13.20	14.40	15.40	16.30	17.60	19.00	20.5	22.1	23.9	25.7	27.7	29.9	31.9	34.3	36.7	39.9	43.1
8.6	—	8.39	9.08	9.77	10.60	11.40	12.30	13.20	14.20	15.50	16.60	17.60	18.90	20.5	22.1	23.8	25.7	27.7	29.9	32.2	34.4	36.9	39.5	43.0	46.4
9.3	—	—	—	—	—	12.40	13.30	14.30	15.40	16.60	17.90	19.00	20.50	22.2	24.0	25.8	27.9	30.0	32.3	34.8	37.2	40.0	42.8	46.5	50.3
10.0	—	—	—	—	—	—	—	15.40	16.60	17.90	19.30	20.50	22.1	23.9	25.8	27.8	30.0	32.3	34.8	37.5	40.1	43.1	46.1	50.1	54.5
10.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19.30	20.90	22.20	23.9	25.9	27.9	30.1	32.4	34.9	37.6	40.5	43.4	46.6	49.9	54.2	58.5
11.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23.90	25.7	27.8	30.0	32.3	34.9	37.5	40.5	43.6	46.7	50.1	53.6	58.3	62.9
12.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25.80	27.8	30.0	32.4	34.9	37.6	40.5	43.6	47.0	50.4	54.1	57.9	62.9	67.9
13.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32.4	35.0	37.7	40.7	43.8	47.2	50.8	54.5	58.5	62.6	68.0	73.4
14.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34.9	37.6	40.5	43.7	47.1	50.6	54.6	58.6	62.9	67.3	74.1	78.9

注：1. 表中 a 代表厚度，b 代表宽度；

2. 表中数值计算截面值(mm^2)，所列数值已考虑了圆角；

3. 表中粗线以下亦为铝扁线规格，其最小截面为 $1.0\times2.44=2.23(mm^2)$。

表 3-47 铜母线的规格及截面积

尺寸(mm)	厚度(a)	4.0	4.5	5.0	5.6	6.3	7.1	8.1	9	10	11.2	12.5	14	16	18	20	22.4	25	28	31.5
宽度(b)	正负偏差(mm)	0.05			0.07					0.09				0.12			0.20			
		计算截面(F)(mm²)																		
16	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	179.2	200.0	224.0	256.0	—	—	—	—	—	—
18		—	—	—	—	—	—	—	—	—	201.6	225.0	252.0	288.0	—	—	—	—	—	—
20		—	—	—	—	—	—	—	—	200.0	224.0	250.0	280.0	320.00	360.0	400.0	—	—	—	—
22.4	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	224.0	250.9	280.0	313.6	358.4	403.2	448.0	—	—	—	—
25		—	—	—	—	—	—	200.0	225.0	250.0	280.0	312.5	350.0	400.0	450.0	500.0	560.0	625.0	—	—
28		—	—	—	—	—	—	224.0	252.0	280.0	313.6	350.0	392.0	448.0	504.0	560.0	627.2	700.0	—	—
31.5		—	—	—	—	198.5	223.7	252.0	283.5	315.0	352.8	393.8	441.0	504.0	567.0	630.0	705.6	787.5	882.0	992.3
35.5		—	—	177.5	198.8	223.7	252.1	284.0	319.5	355.0	397.6	443.8	497.0	568.0	639.0	710.0	795.2	887.5	994.0	1 118.3
40	0.25	160.0	180.0	200.0	224.0	252.0	284.0	320.0	360.0	400.0	448.0	500.0	560.0	640.0	720.0	800.0	896.0	1 000.0	1 120.0	1 260.0
45		180.0	202.5	225.0	252.0	283.5	319.5	360.0	405.0	450.0	504.0	562.5	630.0	720.0	810.0	900.0	—	—	—	—
50		200.0	225.0	250.0	280.0	315.0	355.0	400.0	450.0	500.0	560.0	625.0	700.0	800.0	900.0	1 000.0	—	—	—	—
56		224.0	252.0	280.0	313.6	352.8	397.6	448.0	504.0	560.0	627.2	700.0	784.0	896.0	1 008.0	1 120.0	—	—	—	—
63	0.30	252.0	283.5	315.0	352.8	396.9	447.3	504.0	567.0	630.0	705.6	787.5	882.0	1 008.0	1 134.0	1 260.0	—	—	—	—
71		284.0	319.5	355.0	397.6	447.3	504.1	568.0	639.0	710.0	795.2	887.5	994.0	1 136.0	—	—	—	—	—	—
80		320.0	360.0	400.0	448.0	504.0	568.0	640.0	720.0	800.0	896.0	1 000.0	—	—	—	—	—	—	—	—
90	0.35	360.0	405.0	450.0	504.0	567.0	639.0	720.0	810.0	900.0	1 008.0	1 125.0	—	—	—	—	—	—	—	—
100		400.0	450.0	500.0	560.0	630.0	710.0	800.0	900.0	1 000.0	1 120.0	1 250.0	—	—	—	—	—	—	—	—
112		—	—	—	—	—	795.2	896.0	1 008.0	1 120.0	1 254.4	1 400.0	—	—	—	—	—	—	—	—
125		—	—	—	—	—	887.5	1 000.0	1 125.0	1 250.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：表列计算截面 $F=a\times b$；

有圆角时 $F=(a\times b-0.858r^2)\text{mm}^2$，允许简化为：绕组用铜母线 $F=(a\times b-1.3)\text{mm}^2$；其他用有圆角铜母线 $F=(a\times b-0.5)\text{mm}^2$。

表 3-48　铜带的规格及截面积

宽度 b (mm) R_{20}	厚度 a(mm) R_{40}																						
	1.00	1.06	1.12	1.18	1.25	1.32	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.12	2.24	2.36	2.50	2.65	2.80	3.00	3.15	3.35	3.55
	计算截面(F)(mm^2)																						
9.00	8.785	9.299																					
10.00	9.785	—	10.93	11.50																			
11.20	10.99	11.63	12.28	—	13.67																		
12.50	12.29	—	13.73	14.45	15.29	16.13	17.08	18.27															
14.00	13.79	14.60	15.41	—	17.17	—	19.18	—	21.85														
16.00	15.79	—	17.65	18.58	19.67	20.75	21.98	23.52	25.05	26.58	28.11	29.63											
18.00	17.79	18.84	19.89	—	22.17	—	24.78	—	28.25	—	31.71	—	35.14	—	39.24	—							
20.00	19.79	—	22.13	23.30	24.67	26.03	27.58	29.52	31.45	33.38	35.31	37.23	39.14	41.44	43.72	46.01							
22.40	22.19	23.50	24.82	—	27.67	—	30.94	—	35.29	—	39.63	—	43.94	—	49.10	—							
25.00	24.79	—	27.73	29.20	30.92	32.63	34.58	37.02	39.45	41.88	44.31	46.73	49.14	52.04	54.92	57.81	61.16	64.74	68.32				
28.00	27.79	29.44	31.09	—	34.67	—	38.78	—	44.25	—	49.71	—	55.14	—	61.64	—	68.66	—	76.72				
31.50	31.29	—	35.01	36.87	39.04	41.21	43.68	46.77	49.85	52.93	56.01	59.08	62.14	65.82	69.48	73.15	77.41	81.97	82.52	92.57	97.10	103.1	109.1
35.50	35.29	37.39	39.49	—	44.04	—	49.28	—	56.25	—	63.21	—	70.14	—	78.44	—	87.41	—	97.72	—	109.7	—	123.3
40.00	39.79	—	44.53	46.90	49.67	52.43	55.58	59.52	63.45	67.38	71.31	75.23	79.14	83.84	88.52	93.21	98.66	104.5	110.3	118.1	123.8	131.6	139.3
45.00	44.79	47.46	50.13	—	55.92	—	62.58	—	71.45	—	80.31	—	89.14	—	99.72	—	111.2	—	124.3	—	139.6	—	157.0
50.00	49.79	—	55.73	58.70	62.17	65.63	69.58	74.52	79.45	84.38	89.31	94.23	99.14	105.0	110.9	116.8	123.7	131.0	138.3	148.1	155.4	165.1	174.8
56.00	55.79	59.12	62.45	—	69.67	—	77.98	—	89.05	—	100.1	—	111.1	—	124.4	—	138.7	—	155.1	—	174.3	—	196.1
63.00	62.79	—	70.29	74.04	78.42	82.79	87.78	94.02	100.3	106.5	112.7	118.9	125.1	132.6	140.0	147.5	156.2	165.4	174.7	187.1	196.3	208.6	220.9
71.00	70.79								113.1				141.1				176.2						
80.00	79.79								127.5				159.1				198.7						
90.00	89.79								143.5				179.1				223.7						
100.00	99.79								159.5				199.1				248.7						

表 3-49　铜带尺寸允许偏差　　mm

厚度 a	厚度 a 的允许偏差	宽度 b	宽度 b 的允许偏差
1.00～1.25	±0.04	15.0 及以下	±0.13
1.26～1.80	±0.05	15.1～50.0	±0.25
1.81～3.55	±0.06	50.1 及以上	±0.35

表 3-50　扁铝线尺寸允许偏差　　mm

尺寸 a 或 b	允许偏差	尺寸 a 或 b	允许偏差
0.80～1.20	±0.02	9.51～15.00	±0.09
1.21～2.85	±0.03	15.01～20.00	±0.12
2.86～6.00	±0.05	20.01～25.00	±0.15
6.01～9.50	±0.07	25.01～35.50	±0.20

表 3-51　扁铝线的圆角半径　　mm

厚度 a	标称圆角半径	允许圆角半径范围	厚度 a	标称圆角半径	允许圆角半径范围
1.00 及以下	$2/a$	0.3～0.5	2.25～3.55	0.80	0.6～1.0
1.01～1.60	0.50	0.4～0.6	3.56～6.00	1.00	0.8～1.3
1.61～2.24	0.65	0.5～0.8	6.01～7.10	1.20	0.9～1.5

表 3-52　扁铝线的机械性能

厚度 a (mm)	抗拉强度(N/mm^2) 不小于			伸长率(%) 不小于		
	LBY	LBBY	LBR	LBY	LBBY	LBR
0.80～3.35	127	98	73	1.5	3.0	20
3.36～7.00	127	98	73	2.0	4.0	20
7.01～7.10	118	98	73	2.0	4.0	20

表 3-53　铝扁线的电气性能

型　号	电阻系数 20 ℃，不大于 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	电阻温度系数 α_{20} (1/℃)
LBR	0.028 3	0.004 10
LBBY	0.028 3	0.004 10
LBY	0.029 0	0.004 03

3. 铝母线

铝母线供电机、电器、配电设备及其他电气装置作连接导体或作输配电的汇流排之用，在很多方面可取代铜母线。铝母线有硬铝母线(LMY)及软铝母线

(LMR)两种,其机械电气性能见表 3-54,其规格及截面积见后表3-56。

表 3-54 铝母线的机械电气性能

型　号	抗拉强度不小于 (N/mm^2)	伸长率不小于 (%)	电阻系数 20 ℃不大于 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	电阻温度系数 α_{20} (1/℃)
LMY	118	3	0.029 00	0.004 03
LMR	74	20	0.028 30	0.004 10

4. 梯形铜排

梯形铜排是作为制造电机中的换向器(亦称整流子)之用。梯形铜排有纯铜的梯排(TPT)和银铜梯排(TYPT)两种。银铜梯排是用含银 0.1%～0.2%的银铜合金制成的。梯形铜排的截面如图 3-3 所示;梯形铜排的规格、尺寸及允许偏差见表 3-55。纯铜梯排的硬度不低于布氏硬度 80 度,银铜梯排不低于布氏硬度 90 度。

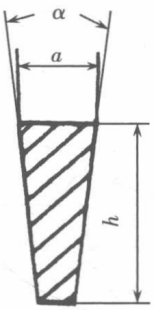


图 3-3 梯排截面图

表 3-55 梯形铜排的规格、尺寸及允许偏差 mm

a	按精度等级的允许偏差		h	允许偏差
	5 级	6 级		
3 及以下	−0.04	−0.06	10 及以下	−0.10
3.01～6.00	−0.05	−0.08	10.5～18	−0.20
6.01～10.00	−0.06	−0.10	18.5～30	−0.30
10.01～18.00	−0.07	−0.12	30.5～50	−0.60
			50.5～80	−0.80
			80.5～150	−1.00

5. 异形铜排

异形铜排有七边形铜排(TMR-2)、换向器异形银铜排(TYPT-1)、触头铜排(TPC)及接触头(TPC-1)等,此外,还有异形铜带(TDR-1),均为供制造电机

绕组及作为电器零件之用。

(1) 七边形铜排　七边形铜排外形如图 3-4 所示，七边形铜排的规格、尺寸及质量见表 3-57。

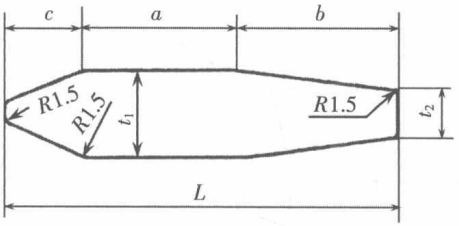


表 3-4　TMR-2 型七边形铜排

表 3-56　铝母线的规格及截面积

尺寸(mm)	厚度(a)	4	4.5	5	5.6	6.3	7.1	8	9	10	11.2	12.5	14	16	18	20	22.4	25	28	31.5
宽度(b)	正负偏差(mm)	0.2			0.3				0.4		0.4			0.5						
		截面积(mm^2)																		
16	0.5	64.0	72.0	80.0	89.6	100.8	113.6	128.0	144.0	160.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18		72.0	81.0	90.0	100.8	113.4	127.8	144.0	162.0	180.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20		80.0	90.0	100.0	112.0	126.0	142.0	160.0	180.0	200.0	224.0	250.0	—	—	—	—	—	—	—	—
22.4		89.6	100.8	112.0	125.4	141.1	159.0	179.2	201.6	224.0	250.9	280.0	—	—	—	—	—	—	—	—
25		100.6	112.5	125.0	140.0	157.5	177.5	200.0	225.0	250.0	280.0	312.5	350.0	400.0	—	—	—	—	—	—
28	0.7	112.0	126.0	140.0	156.8	176.4	198.8	224.0	252.0	280.0	313.6	350.0	392.0	448.0	—	—	—	—	—	—
31.5		126.0	141.8	157.5	176.4	198.5	223.7	252.0	283.5	315.0	352.8	393.8	441.0	504.0	567.0	630.0	705.6	787.5	882.0	992.3
35.5		142.0	159.8	177.5	198.8	223.7	252.1	284.0	319.5	355.0	397.6	443.8	497.0	568.0	639.0	710.0	795.2	887.5	994.0	1 118.3
40		160.0	180.0	200.0	224.0	252.0	284.0	320.0	360.0	400.0	448.0	500.0	560.0	640.0	720.0	800.0	896.0	1 000.0	1 120.0	1 260.0
45		180.0	202.5	225.0	252.0	283.5	319.5	360.0	405.0	450.0	504.0	562.5	630.0	720.0	810.0	900.0	—	—	—	—
50		200.0	225.0	250.0	280.0	315.0	355.0	400.0	450.0	500.0	560.0	625.0	700.0	800.0	900.0	1 000.0	—	—	—	—
56	0.9	224.0	252.0	280.0	313.6	352.8	397.6	448.0	504.0	560.0	627.2	700.0	784.0	896.0	1 008.0	1 120.0	—	—	—	—
63		252.0	283.5	315.0	352.8	396.9	447.3	504.0	567.0	630.0	705.6	787.5	882.0	1 008.0	1 134.0	1 260.0	—	—	—	—
71		—	—	355.0	397.6	447.3	504.1	568.0	639.0	710.0	795.2	887.5	994.0	1 136.0	—	—	—	—	—	—
80		—	—	400.0	448.0	504.0	568.0	640.0	720.0	800.0	869.0	1 000.0	1 120.0	1 280.0	—	—	—	—	—	—
90		—	—	450.0	504.0	567.0	639.0	720.0	810.0	900.0	1 008.0	1 125.0	1 260.0	1 440.0	—	—	—	—	—	—
100		—	—	500.0	560.0	630.0	710.0	800.0	900.0	1 000.0	1 120.0	1 250.0	1 400.0	1 600.0	—	—	—	—	—	—
112		—	—	—	—	705.6	795.2	896.0	1 008.0	1 120.0	1 254.4	1 400.0	—	—	—	—	—	—	—	—
125		—	—	—	—	787.5	887.5	1 000.0	1 125.0	1 250.0	1 400.0	1 562.5	—		—	—	—	—	—	—

注：1. 表列计算截面 $F=a\times b$。

2. 有圆角时 $F=(a\times b-0.858r^2)mm^2$，允许简化为：绕组用铝母线 $F=(a\times b-1.3)mm^2$；其他用有圆角铝母线 $F=(a\times b-0.5)mm^2$。

表 3-57　七边形铜排(TMR-2)规格、尺寸及质量

规格 $t_1\times L\times b$ (mm)	计算截面 (mm²)	t_1 (mm)		t_2 (mm)	L (mm)		a (mm)	b (mm)		c (mm)		计算质量 (kg/m)
		尺寸	偏差		尺寸	偏差		尺寸	偏差	尺寸	偏差	
8×50/20	355	8	±0.1	6.0	50	±0.3	22	20	±0.2	8	±0.2	3.16
8×55/22	402	8	±0.1	6.7	55	±0.3	25	22	±0.2	8	±0.2	3.58
8×58/23	415	8	±0.1	7.1	58	±0.3	27	23	±0.2	8	±0.2	3.70
8×58/23	420	8	±0.1	7.2	58	±0.3	27	23	±0.2	8	±0.2	3.74
6.7×60/24	465.5	6.7	±0.1	5.3	60	±0.3	28	24	±0.2	8	±0.2	3.25
6.7×60/24	466	6.7	±0.1	5.4	64	±0.3	28	24	±0.2	8	±0.2	3.26
8×64/25	473.8	8	±0.1	6.7	74	±0.3	31	25	±0.2	8	±0.2	4.21
9.4×74/30	640	9.4	±0.1	8.0	74	±0.3	36	30	±0.2	8	±0.2	5.70
8×76/30	563	8	±0.1	6.5	76	±0.3	38	30	±0.2	8	±0.2	5.00
10×76/30	700	10	±0.1	8.5	76	±0.3	38	30	±0.2	8	±0.2	6.23
9.5×80/32	690	9.5	±0.1	8.0	80	±0.3	40	32	±0.2	8	±0.2	6.22

(2) 换向器异形银铜排　换向器异形银铜排分有甲、乙两型，其外形如图 3-5 所示，结构尺寸见表 3-58。

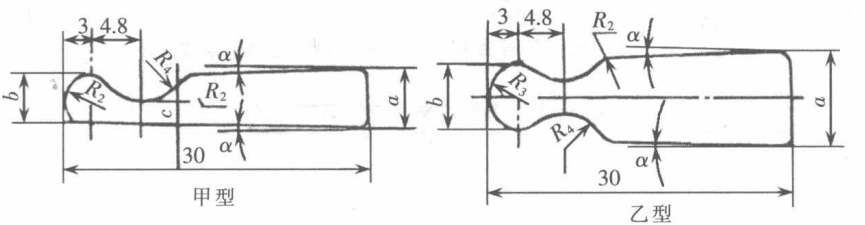


图 3-5　TYPT-1 型换向器异形银铜排

表 3-58　TYPT-1 换向器异形银铜排结构尺寸　　mm

甲　型				乙　型		
a	b	c	α	a	b	α
5.64 6.73	4.140 4.484	1.68 2.85	1°33′ 1°18′29″	8.66 9.26	5.418 5.400	1°17′55″ 1°57′24″

(3) 触头铜排　触头铜排共分 RTO-100、RTO-200、RTO-400 及 RTO-600 四个型号，RTO-100、200 及 400 三个型号的外形如图 3-6 所示，其结构尺寸见表 3-59；RTO-600 型号的外形及具体尺寸如图 3-7 所示。

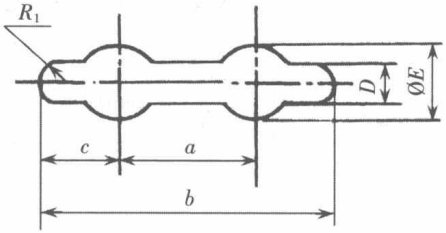


图 3-6　触头型号为 RTO-100、200 及 400 的 TPC 型触头铜排

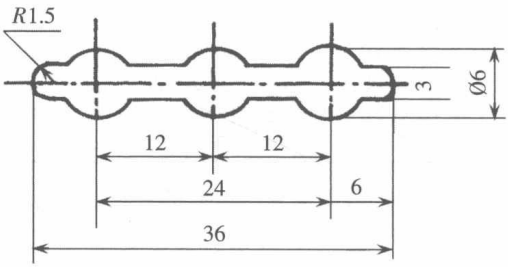


图 3-7　触头型号为 RTO-600 的 TPC 型触头铜排

表 3-59　TPC 型触头铜排结构尺寸　　mm

触头型号	a	b	c	D	$\varnothing E$
RTO-100	9±0.1	18±0.2	4.5	2+0.2	$6^{+0.03}_{-0.2}$
RTO-200	12±0.1	23±0.2	5.5	2+0.2	$6^{+0.03}_{-0.08}$
RTO-400	16±0.1	30±0.2	7.0	2±0.2	$6^{+0.03}_{-0.08}$

(4) 接触头　接触头外形如图 3-8 所示，具体尺寸见表 3-60。

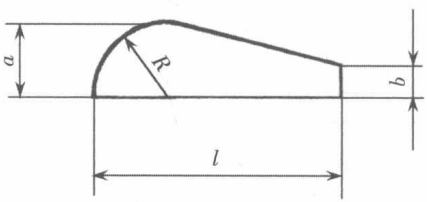


图 3-8　TPC-1 型接触头

(5) 异形铜带　异形铜带外形及结构尺寸如图 3-9 所示。

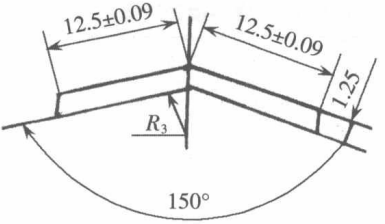


图 3-9　异形铜带

表 3-60　TPC-1 型接触头结构尺寸　　mm

l	a	b	R	尺寸公差
22	7.0	3	7	9 级精度
22	9.5	4	7	9 级精度

6. 空心导线

空心导线供水内冷电机、变压器及感应电炉作绕组线圈的导体用，有空心铜导线(TBRK)及空心铝导线(LBRK)两种，其截面一般为扁形，也有方形的，其截面形状如图 3-10 所示。

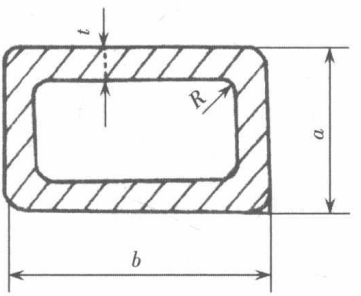


图 3-10　空心导线截面形状

a-厚度；*b*-宽度；*t*-壁厚；*R*-内圆角

(1) 空心铜导线　空心铜导线的结构尺寸见表 3-61，其壁厚尺寸允许偏差见表 3-62，制造长度不少于 100 m。

表 3-61　空心铜导线的结构尺寸　　mm

厚度 a		宽度 b		壁厚 t	圆角半径 R
尺寸	偏差	尺寸	偏差		
5～6	±0.07	5～6	±0.07	1.0～1.5	1.5
7～8	±0.07	7～8	±0.07	1.0～2.0	1.5
9～11	$^{+0.05}_{-0.10}$	9～11	$^{+0.05}_{-0.10}$	1.5～2.5	1.5
12～13	$^{+0.05}_{-0.10}$	12～13	$^{+0.05}_{-0.10}$	1.5～3.0	2.0
14	$^{+0.05}_{-0.10}$	14	$^{+0.05}_{-0.10}$	2.0～3.5	2.0
15～18	$^{+0.05}_{-0.10}$	15～18	$^{+0.05}_{-0.10}$	2.0～4.5	2.0
6～9	±0.07	5～7	±0.07	1.0～1.5	1.0
10～12	±0.07	5.5～7	±0.07	1.5～1.7	1.0
12～13	$^{+0.05}_{-0.10}$	8～11	$^{+0.05}_{-0.10}$	2.0～2.5	2.0
14～16	$^{+0.05}_{-0.10}$	12～13	$^{+0.05}_{-0.10}$	2.5～3.5	2.0
16～17	$^{+0.05}_{-0.10}$	14～15	$^{+0.05}_{-0.10}$	3.0～4.5	2.0

表 3-62　空心铜导线壁厚尺寸允许偏差　　mm

壁厚	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
允许偏差	±0.04	±0.04	±0.06	±0.06	±0.08	±0.08	±0.10	±0.10

空心铜导线的机械及电气性能见表 3-63。

表 3-63　空心铜导线的机械及电气性能

抗拉强度不小于 (N/mm^2)	伸长率不小于 (%)	电阻系数 20 ℃不大于 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	弯曲性能
216	30	0.017 48	弯曲 90°时，不得有开裂、起层等缺陷

空心铜导线的管壁应能承受规定压力的密封性试验，即按规定压力、经 15 min的水压试验，试验中不应有漏水、渗水现象，且不应有塑性变形，其规定压力见表 3-64。

表 3-64　空心铜导线密封性试验压力

a(mm)	b(mm)	t(mm)	压力不小于 (N/mm²)
12～15	8～11	2.0～3.0	78～118
14～16	12～15	3.0～4.5	118～177

(2) 空心铝导线　空心铝导线的结构尺寸见表 3-65。

表 3-65　空心铝导线的结构尺寸　　mm

规　格	尺　寸			壁厚 t	圆角半径 R	制造长度不小于(m)
	厚度 a	宽度 b	a 和 b 的偏　差			
8.5×6.5×1.5	6.5	8.5	±0.1	1.5	1.0	40
22.5×14.0×2.5	14.0	22.5	±0.2	2.5	1.5	20

7. 电车线

电车线在铁道电气机车、工矿电力牵引机车和城市电车等电力运输系统中作为架空的接触导线之用。电车线有圆形铜电车线(TCY)、双沟型铜电车线(TCG)及双沟型钢铝电车线(GLCA、GLCB)三种。

(1) 铜电车线　双沟型铜电车线的截面尺寸如图 3-11 所示，铜电车线的结构尺寸见表 3-66，其机械及电气性能见表 3-67。

表 3-66　铜电车线的结构尺寸

标称截面 (mm²)	尺寸及允许偏差(mm)									计算质量 (kg/km)	制造长度不小于 (m)
	TCY		TCG								
	直径	允许偏差	A	允许偏差	B	允许偏差	a	R	截面允许偏差(%)		
30	6.20	−0.12	—	—	—	—	—	—	—	270	1 850
40	7.10	−0.14	—	—	—	—	—	—	—	360	1 400
50	8.00	−0.16	—	—	—	—	—	—	—	445	1 100
65	9.10	−0.18	10.19	±0.20	9.30	±0.18	0.50	5.30	$^{+2}_{-4}$	580	850
85	—	—	11.76	±0.23	10.80	±0.22	1.30	6.00	$^{+2}_{-4}$	760	650
100	—	—	12.81	±0.26	10.80	±0.24	1.80	6.50	$^{+2}_{-4}$	890	550

表 3-67　铜电车线的机械及电气性能

标称截面（mm^2）	抗拉强度不小于（N/mm^2）	伸长率不小于（%）	弯曲性能		扭转转数不少于		电阻系数 20 ℃不大于（$\Omega \cdot mm^2/m$）
			弯曲半径（mm）	次数不少于	TCY	TCG	
30	392	1.5	10	3	9	—	0.017 9
40	382	2.0	10	2	9	—	
50	382	2.0	10	2	9	—	
65	373	2.7	13	2	9	3	
85	353	3.5	16	2	—	3	
100	343	4.0	16	2	—	3	

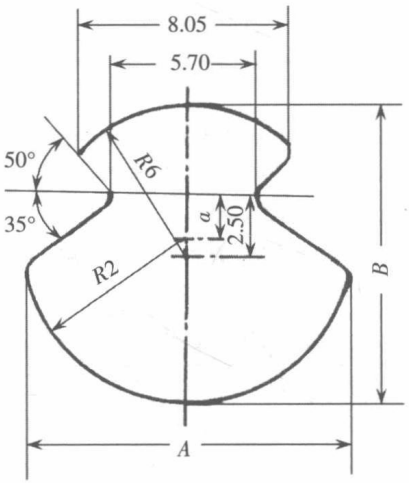


图 3-11　双沟型铜电车线截面尺寸

（2）钢铝电车线　钢铝电车线有 GLCA 型和 GLCB 型两种规格。

GLCA 型钢铝电车线截面尺寸如图 3-12 所示，其标称截面积为215 mm^2，铝线部分截面积为 148 mm^2，钢线部分截面积为 67 mm^2，其导电性能相当于 100 mm^2 的铜电车线。

GLCB 型钢铝电车线的截面尺寸如图 3-13 所示，其标称截面积为173 mm^2，铝线部分截面积为 119 mm^2，钢线部分截面积为 54 mm^2，其导电性能相当于 85 mm^2 的铜电车线。

钢铝电车线的结构尺寸见表 3-68，其机械及电气性能见表 3-69。

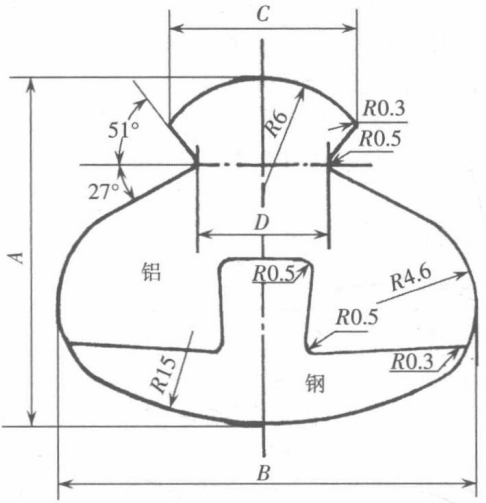


图 3-12　GLCA 型钢铝电车线截面尺寸

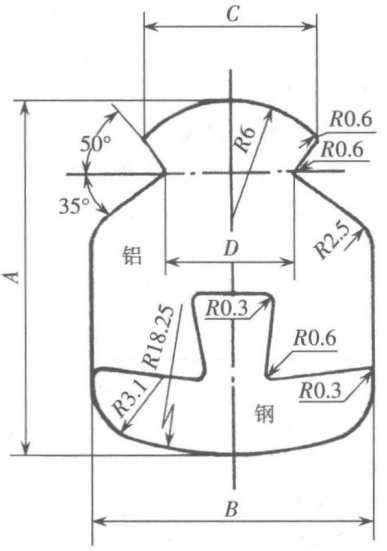


图 3-13　GLCB 型钢铝电车线截面尺寸

表 3-68　钢铝电车线的结构尺寸

产品型号	标称截面 (mm^2)	尺寸及允许偏差(mm)								计算质量 (kg/km)	制造长度 (m)
		A	允许偏差	B	允许偏差	C	允许偏差	D	允许偏差		
GLCA	215	16.5	+0.66 −0.33	19.6	+0.78 −0.39	8.4	+0.4 −0.2	5.6	±0.25	925	550～2 500
GLCB	173	16.7	+0.66 −0.33	13.2	+0.52 −0.26	8.05	+0.2 −0.4	5.7	+0.20 −0.40	744	550～3 000

表 3-69　钢铝电车线的机械及电气性能

产品型号	标称截面 (mm^2)	机械性能		直流电阻 20 ℃不大于 (Ω/km)
		导线综合拉断力 不小于(N)	钢铝间的接合强度 不小于(N)	
GLCA	215	39 230	2 450	0.184
GLCB	173	29 570	1 960	0.230

第二节　电　磁　线

电磁线是一种具有很薄绝缘层的导电金属线，用来绕制电工产品的各种线圈或绕组，故又称为绕组线。其作用有两个：一是电流通过导电金属产生磁场，另一个是导电金属切割磁力线或通过线圈(绕组)中的磁通量发生改变会在导电金属

中产生电流，这也是机电能量转换的一个基础。

根据绝缘层的耐温等级、结构和用途的不同，有耐温 155 ℃及以下的普通漆包线；长期使用在 180 ℃及以上的耐高温漆包线；自黏、自黏直焊、无磁性、耐制冷剂等的特种漆包线；陶瓷、氧化铝膜、玻璃膜作绝缘的无机绝缘电磁线；纸、玻璃丝、天然和合成丝作绝缘的绕包线；换位、薄膜绕包、中高频、耐辐射、耐水等用途的特种电磁线六个系列。电磁线按照绝缘层的特点和用途又可分为漆包线、绕包线、无机绝缘电磁线和特种电磁线四类。

电磁产品型号中各项字母或数字所代表的含义见表 3－70。

表 3－70　电磁线产品型号中各项字母或数字所代表的含义

绝　缘	绝缘特征	导　体	导体特征	派　生
Q－油性漆	N－自黏性	(T)－铜线	(Y)－圆	1－薄绝缘
QQ－缩醛漆	F－耐冷冻	TK－康铜	B－扁	2－厚绝缘
QA－聚氨酯漆	S－彩色	TM－锰铜	D－带(箔)	3－特厚绝缘
QZ－聚酯漆	B－编织	TWC－无磁性铜线	K－空心	12－绝缘厚度 0.12 mm
QZ(G)－改性聚酯漆	E－双层	TY－镀银铜线	J－绞制	20－绝缘厚度 0.20 mm
QH－环氧漆	J－加厚	TN－镀镍铜线	R－柔软	25－绝缘厚度 0.25 mm
QZY－聚酯亚胺漆		L－铝线		30－绝缘厚度 0.30 mm
QY－聚酰亚胺漆		TL－铜包铝线		35－绝缘厚度 0.35 mm
QXY－聚酰胺酰亚胺漆		NG－镍铬线		40－绝缘厚度 0.40 mm
M－棉纱				50－绝缘厚度 0.50 mm
SB－玻璃丝				60－绝缘厚度 0.60 mm
SR－人造丝				
ST－天然丝				
Z－绝缘纸				
BM－玻璃膜				
YM－氧化膜				

一、漆包线

电工产品所用漆包线的绝缘层是漆膜，在导电线芯上涂覆绝缘漆后经烘干形成。其特点是：漆膜均匀、光滑，便于线圈的绕制；漆膜较薄，有利于提高空间因数(线圈中导体总截面与该线圈的横截面之比)，漆包线广泛用于中小型和微型电工产品中。漆包线的品种、规格、特点和主要用途见表3－71。

漆包线的性能主要表现在：漆膜的耐刮与弹性的机械性能；击穿电压与介质损耗角正切的电性能；软化击穿、热老化和热击穿的热性能；耐有机溶剂性能；耐化学药品性能及耐制冷剂性能等，常用漆包线主要性能比较见表 3－72。

铜漆包线的规格及其安全载流量见表 3－73。

表 3-71　漆包线的品种、规格、特点和主要用途

类别	产品名称	型号	规格① mm	特点			主要用途
				耐温等级 ℃	优点	局限性	
油性漆包线	油性漆包圆铜线	Q	0.02～2.50	A(105)	(1) 漆膜均匀 (2) 介质损耗角正切小	(1) 耐刮性差 (2) 耐溶剂性差(对使用的浸渍漆应注意)	中、高频线圈及仪表、电器的线圈
缩醛漆包线	缩醛漆包圆铜线	QQ-1 QQ-2	0.02～2.50	E(120)	(1) 热冲击性优 (2) 耐刮性优 (3) 耐水解性能良	漆膜受卷绕应力易产生裂纹(浸渍前须在 120 ℃左右加热 1 小时以上，以消除应力)	普通中小电机、微电机绕组和油浸变压器的线圈，电器仪表用线圈
	缩醛漆包圆铝线	QQL-1 QQL-2	0.06～2.50				
	彩色缩醛漆包圆铜线	QQS-1 QQS-2	0.02～2.50				
	缩醛漆包扁铜线	QQB	*a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0				
	缩醛漆包扁铝线	QQLB	*a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0				
	缩醛漆包扁铝合金线	—	*a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0	E(120)	同上。抗拉强度比铝线大，可承受线圈在短路时较大的应力	同上。电阻率比铝线稍大	大型变压器线圈和换位导线

续表

类别	产品名称	型号	规格① mm	特点			主要用途
				耐温等级 ℃	优点	局限性	
聚氨酯漆包线	聚氨酯漆包圆铜线 彩色聚氨酯漆包圆铜线	QA-1 QA-2	0.015～1.00	E(120)	(1) 在高频条件下,介质损耗角正切小 (2) 可以直接焊接,不需刮去漆膜 (3) 着色性好,可制成不同颜色的漆包线,在接头时便于识别	(1) 过负载性能差 (2) 热冲击及耐刮性能尚可	要求Q值稳定的高频线圈,电视线圈和仪表用的微细线圈
环氧漆包线	环氧漆包圆铜线	QH-1 QH-2	0.06～2.50	E(120)	(1) 耐水解性能优 (2) 耐潮性优 (3) 耐酸碱腐蚀和耐油性优	(1) 弹性差,耐刮性较差,不适用于高速自动绕线工艺 (2) 对含氯绝缘油相容性差	油浸变压器的线圈和耐化学药品腐蚀、耐潮湿电机的绕组
聚酯漆包线	聚酯漆包圆铜线	QZ-1 QZ-2	0.02～2.50	B(130)	(1) 在干燥和潮湿条件下,耐电压击穿性能优 (2) 软化击穿性能优	(1) 耐水解性差(用于密闭的电机、电器时须注意) (2) 热冲击性尚可 (3) 与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯高分子化合物不相容	普通中小电机的绕组,干式变压器和电器仪表的线圈
	聚酯漆包圆铝线	QZL-1 QZL-2	0.06～2.50				
	彩色聚酯漆包圆铜线	QZS-1 QZS-2	0.06～2.50				
	聚酯漆包扁铜线	QZB	*a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0				
	聚酯漆包扁铝线	QZLB	*a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0				
	聚酯漆包扁铝合金线	—	*a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0	B(130)	同上。抗拉强度比铝线大,可承受线圈在短路时较大的应力	同上。电阻率比铝线稍大	干式变压器线圈

续表

类别	产品名称	型号	规格[①] mm	特点			主要用途
				耐温等级 ℃	优点	局限性	
聚酯亚胺漆包线	聚酯亚胺漆包圆铜线 聚酯亚胺漆包扁铜线	QZY-1 QZY-2 QZYB	0.06～2.50 *a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0	F(155)	(1) 在干燥和潮湿条件下，耐电压击穿性能优 (2) 热冲击性能良 (3) 软化击穿性能良	(1) 在含水密封系统中易水解(用于密封电机电器时须注意) (2) 与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯高分子化合物不相容	高温电机和制冷装置中电机的绕组、干式变压器和电器仪表的线圈
聚酰胺酰亚胺漆包线	聚酰胺酰亚胺漆包圆铜线 聚酰胺酰亚胺漆包扁铜线	QXY-1 QXY-2 QXYB	0.06～2.50 *a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0	200	(1) 耐热性优，热冲击及软化击穿性能优 (2) 耐刮性优 (3) 在干燥和潮湿条件下耐击穿电压优 (4) 耐化学药品腐蚀性能优 (5) 适用于密闭式的电机电器的绕组	与聚氯乙烯、氯丁橡胶等含氯的高分子化合物不相容	高温重负荷电机、牵引电机、制冷设备电机的绕组，干式变压器和电器仪表的线圈
聚酰亚胺漆包线	聚酰亚胺漆包圆铜线 聚酰亚胺漆包扁铜线	QY-1 QY-2 QYB	0.02～2.50 *a* 边 0.8～5.6 *b* 边 2.0～18.0	220	(1) 漆膜的耐热性是目前漆包线品种中最好的 (2) 软化击穿及热冲击性优，能承受短期过载负荷 (3) 耐低温性优 (4) 耐辐射性优 (5) 耐溶剂及化学药品腐蚀性优	(1) 耐刮性尚可 (2) 耐碱性差 (3) 在含水密封系统中，容易水解 (4) 漆膜受卷绕应力容易产生裂纹(浸渍前，须在150 ℃左右加热 1 h 以上，以消除应力)	耐高温电机、干式变压器、密封式继电器及电子元件

续表

类别	产品名称	型号	规格① mm	特点			主要用途
				耐温等级 ℃	优点	局限性	
特种漆包线	自粘直焊漆包圆铜线	QAN	0.10～0.44	E(120)	在一定的温度时间条件下，不需剥去漆膜，可以直接焊接，同时不需要浸渍处理，能自行粘合成型	不推荐在过负载条件下使用	微型电机仪表的线圈和电子元件、无骨架的线圈
	环氧自粘性漆包圆铜线	QHN	0.10～0.51	E(120)	(1) 不需要浸渍处理，在一定温度条件下，能自行粘合成型 (2) 耐油性良	(1) 漆膜弹性差，耐刮性较差，不适用于高速自动绕线 (2) 因系热塑性自粘层，容易在溶剂中溶解	仪表和电器的线圈、无骨架的线圈
	缩醛自粘性漆包圆铜线	QQN	0.10～1.00	E(120)	(1) 能自行粘合成型 (2) 热冲击性良	因系热塑性的自粘层，容易在溶剂中溶解	仪表和电器的线圈、无骨架的线圈
	聚酯自粘性漆包圆铜线	QZN	0.10～1.00	B(130)	(1) 能自行粘合成型 (2) 耐击穿电压性能优	因系热塑性的自粘层，容易在溶剂中溶解	仪表和电器的线圈、无骨架的线圈

续表

类别	产品名称	型号	规格① mm	特点			主要用途
				耐温等级 ℃	优点	局限性	
特种漆包线	无磁性聚氨酯漆包圆铜线	QATWC	0.02～0.20	E(120)	（1）漆包线中的铁含量极低，对感应磁场所起的干扰作用极微 （2）在高频条件下，介质损耗角正切小 （3）不需剥去漆膜即可直接焊接	不推荐在过负载条件下使用	精密仪表和电器的线圈，如直流镜式检流计、磁通表、测震仪等的线圈
	耐制冷剂漆包线②	QF	0.6～2.50	A(105)	在密闭装置中，能耐潮、耐制冷剂	漆膜受卷绕应力易产生裂纹（浸渍前须在120 ℃左右加热1 h以上，消除应力）	空调设备和制冷设备电机的绕组
	聚酯亚胺——聚酰胺酰亚胺漆包扁铜线	—	a 边 0.8～5.6 b 边 2.0～18.0	F(155)	同聚酯亚胺漆包线，又可改善其耐化学药品腐蚀性能	同聚酯亚胺漆包线	同聚酯亚胺漆包线，又可用于有化学药品腐蚀的环境

注：① 圆线规格以线芯直径表示，扁线以线芯窄边（a）及宽边（b）长度表示。　② 制冷剂系指 CCl_2F_2、$CClF_3$、$CHClF_2$ 等

表 3-72　常用漆包线主要性能比较表

漆包线种类	耐温等级℃	机械性能		电性能		热性能			耐有机溶剂性能				耐化学药品性能				耐制冷剂（氟里昂-22）性能
		耐刮性	弹性	击穿电压	介质损耗角正切	软化击穿温度	热老化	热冲击	溶剂油、二甲苯、正丁醇混合溶剂①	二甲苯、正丁醇混合溶剂②	二甲苯	苯乙烯	5%硫酸	5%盐酸	5%氢氧化钠	5%氯化钠	
油性漆包线	105	差	好	良	优	差	良	可	差	差	差	差	良	良	好	良	—
缩醛漆包线	120	优	优	良	好	可	良	优	良	差	良	可	良	差	差	良	差
聚氨酯漆包线	120	可	良	良	优	良	良	可	优	优	优	优	优	优	良	优	—
聚酯漆包线	130	良	良	优	好	优	优	可	良	好	良	差	良	良	差	良	差
聚酯亚胺漆包线	155	良	优	优	—	良	优	良	优	优	优	优	良	良	差	良	优
聚酰胺酰亚胺漆包线	200	优	优	优	—	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优	优
聚酰亚胺漆包线	220	可	优	优	良	优	优	优	优	优	优	优	优	优	差	优	可
耐制冷剂漆包线	105	优	优	优	—	好	优	良	良	可	良	可	—	—	—	—	良

注：① 溶剂油：二甲苯：正丁醇=6：3：1。

② 二甲苯：正丁醇=1：1

表 3-73　铜漆包线规格及安全载流量

标称直径(mm)	外皮直径(mm)	截面积(mm^2)	质量(kg/km)	$j=2.5\ A/mm^2$时,导线容许通过电流(A)	$j=3\ A/mm^2$时,导线容许通过电流(A)	每厘米可绕匝数(匝)	每立方厘米可绕匝数(匝)	20 ℃时电阻值(Ω/km)
0.06	0.085	0.002 8	0.025 2	0.007 0	0.008 4	117	13 689	6 440
0.07	0.095	0.003 8	0.034 2	0.009 5	0.011 4	105	11 025	4 730
0.08	0.105	0.005	0.044 8	0.012 5	0.015 0	95	9 025	3 630
0.09	0.115	0.006 4	0.056 7	0.016 0	0.019 2	86	7 395	2 860
0.10	0.125	0.007 9	0.070	0.019 7	0.023 7	80	6 400	2 240
0.11	0.135	0.009 5	0.085	0.023 7	0.028 5	74	5 476	1 850
0.12	0.145	0.011 3	0.101	0.028 2	0.033 9	68	4 624	1 550
0.13	0.155	0.013 3	0.118	0.033 2	0.039 9	64	4 096	1 320
0.14	0.165	0.015 4	0.137	0.038 5	0.046 2	60	3 600	1 140
0.15	0.180	0.017 7	0.158	0.044 2	0.053 1	55	3 025	994
0.16	0.190	0.020 1	0.179	0.050 2	0.060 3	52	2 704	873
0.17	0.200	0.022 7	0.202	0.056 7	0.068 1	50	2 500	773
0.18	0.210	0.025 4	0.227	0.064	0.076 2	47	2 209	688
0.19	0.220	0.028 4	0.253	0.071 0	0.085 2	45	2 025	618
0.20	0.230	0.031 5	0.280	0.078 7	0.094 5	43	1 849	558
0.21	0.240	0.034 7	0.309	0.086 7	0.104	41	1 681	507
0.23	0.270	0.041 5	0.370	0.103	0.124	37	1 369	423
0.25	0.290	0.049 2	0.437	0.123	0.147	34	1 156	357
0.27	0.310	0.057 3	0.510	0.143	0.171	32	1 024	306
0.29	0.330	0.066 0	0.589	0.165	0.198	30	900	266
0.31	0.350	0.075 5	0.673	0.188	0.226	28	784	233
0.33	0.370	0.085 5	0.762	0.213	0.256	27	729	205
0.35	0.390	0.096 2	0.857	0.240	0.288	25	625	182
0.38	0.420	0.113 4	1.01	0.283	0.340	23	529	155
0.41	0.450	0.132 0	1.17	0.330	0.396	22	484	133
0.44	0.480	0.152 1	1.35	0.380	0.456	20	400	115
0.47	0.510	0.173 5	1.54	0.433	0.520	19	361	101
0.49	0.530	0.188 6	1.67	0.471	0.565	18	324	93.1
0.51	0.560	0.204	1.82	0.510	0.612	17	317	85.9
0.53	0.580	0.221	1.96	0.552	0.663	17.2	295	79.3
0.55	0.600	0.238	2.11	0.595	0.714	16.6	275	73.9
0.57	0.620	0.255	2.26	0.637	0.765	16.1	259	68.7
0.59	0.640	0.273	2.43	0.682	0.819	15.6	243	64.3
0.62	0.670	0.302	2.69	0.755	0.906	14.8	222	57.9
0.64	0.690	0.322	2.89	0.805	0.966	14.4	207	54.7

续表

标称直径(mm)	外皮直径(mm)	截面积(mm^2)	质量(kg/km)	$j=2.5\ A/mm^2$时,导线容许通过电流(A)	$j=3\ A/mm^2$时,导线容许通过电流(A)	每厘米可绕匝数(匝)	每立方厘米可绕匝数(匝)	20℃时电阻值(Ω/km)
0.67	0.720	0.353	3.14	0.882	1.05	13.8	190	49.7
0.69	0.740	0.374	3.33	0.935	1.12	13.5	182	46.9
0.72	0.770	0.407	3.72	1.01	1.22	12.9	166	43
0.74	0.800	0.430	3.83	1.07	1.29	12.5	156	40.8
0.77	0.830	0.466	4.15	1.16	1.39	12	144	37.6
0.80	0.860	0.503	4.48	1.25	1.50	11.6	134	34.9
0.83	0.890	0.541	4.28	1.35	1.62	11.2	125	32.4
0.86	0.920	0.581	5.17	1.45	1.74	10.8	117	30.2
0.90	0.960	0.636	5.67	1.59	1.90	10.4	108	27.5
0.93	0.990	0.679	6.05	1.69	2.03	10.1	102	25.8
0.96	1.02	0.724	6.45	1.81	2.17	9.8	96	24.2
1.00	1.08	0.785	7.00	1.96	2.35	9.25	85.6	22.4
1.04	1.12	0.849	7.87	2.12	2.54	8.92	79.5	20.6
1.08	1.16	0.916	8.16	2.29	2.74	8.62	74.3	19.2
1.12	1.20	0.986	8.78	2.46	2.95	8.33	69.4	17.75
1.16	1.24	1.057	9.41	2.64	3.17	8.06	65	16.6
1.20	1.28	1.131	10.0	2.84	3.39	7.81	61	15.5
1.25	1.33	1.227	10.9	3.06	3.68	7.51	56.4	14.3
1.30	1.38	1.327	11.8	3.31	3.98	7.24	52.4	13.2
1.35	1.43	1.431	12.7	3.57	4.29	7	49	12.2
1.40	1.48	1.539	13.7	3.84	4.61	6.75	45.56	11.4
1.45	1.53	1.651	14.7	4.12	4.95	6.53	42.44	10.6
1.50	1.58	1.767	15.7	4.41	5.30	6.32	39.94	9.89
1.56	1.64	1.911	17.0	4.77	5.73	6.09	37.08	9.18
1.62	1.70	2.06	18.3	5.15	6.18	5.88	34.57	8.50
1.68	1.76	2.22	19.7	5.55	6.66	5.68	32.26	7.92
1.74	1.82	2.38	21.1	5.95	7.14	5.49	30.14	7.36
1.81	1.90	2.57	22.9	6.42	7.71	5.26	27.66	6.83
1.88	1.97	2.78	24.7	6.95	8.34	5.07	25.70	6.30
1.95	2.04	2.99	26.6	7.47	8.97	4.9	24.01	5.87
2.02	2.11	3.20	28.5	8.00	9.60	4.73	22.37	5.48
2.10	2.20	3.46	30.8	8.65	10.3	4.54	20.61	5.06
2.26	2.36	4.01	35.7	10.0	12.0	4.23	17.89	4.38
2.44	2.54	4.67	41.6	11.6	14.0	3.93	15.44	3.75
2.63		5.43	48.4	13.5	16.2			3.23

续表

标称直径(mm)	外皮直径(mm)	截面积(mm^2)	质量(kg/km)	$j=2.5\ A/mm^2$时,导线容许通过电流(A)	$j=3\ A/mm^2$时,导线容许通过电流(A)	每厘米可绕匝数(匝)	每立方厘米可绕匝数(匝)	20℃时电阻值(Ω/km)
2.83		7.00	56.0	17.5	21.0			2.79
3.05		8.14	65.1	20.3	24.4			2.4
3.28		9.40	75.3	23.5	28.2			2.08
3.53		10.90	87.2	27.2	32.7			1.80
3.80		12.63	101	31.5	37.9			1.55
4.10		14.70	117	36.7	44.1			1.33
4.50		17.71	141	44.2	53.1			1.10
4.80		20.16	161	50.4	60.4			0.968
5.20		23.66	189	59.1	70.9			0.829

漆包圆钢线拉力见表3-74。

表3-74　漆包圆铜线拉力表

线号SWC	直径(mm)	拉力(N)	直径(英寸)	美规AWG	线号SWC	直径(mm)	拉力(N)	直径(英寸)	美规AWG
漆包圆铜线拉力表					漆包圆铜线拉力表				
25	0.508	13	0.02	24	45	0.071	0.4	0.002 8	41
26	0.457	11	0.018	25	46	0.061	0.3	0.002 4	42
27	0.417	9	0.016	26	47	0.051	0.26	0.002	44
28	0.376	8	0.014 6	27	48	0.041	0.17	0.001 6	46
29	0.345	7	0.013 5	27 1/2		0.037 5	0.15	0.001 47	46 1/2
30	0.315	6	0.012 5	28		0.035 5	0.13	0.001 4	47
31	0.295	5	0.011 5	29		0.033 5	0.12	0.001 33	47 1/2
32	0.273	4.5	0.010 8	29 1/2	49	0.031 5	0.11	0.001 25	48
33	0.254	4	0.01	30		0.03	0.10	0.001 2	48 1/2
34	0.234	3.5	0.009	31		0.028	0.09	0.001 1	49
35	0.213	3	0.008 3	31 1/2		0.025	0.07	0.001	50
36	0.193	2.5	0.007 6	32 1/2		0.022 5	0.06	0.000 9	51
37	0.173	2	0.006 8	33 1/2		0.02	0.05	0.000 8	52
38	0.152	1.5	0.006	34 1/2		0.017 5	0.04	0.000 7	53
39	0.132	1.3	0.005 2	35 1/2		0.015 1	0.03	0.000 6	54 1/2
40	0.122	1.1	0.004 8	36		0.012 5	0.02	0.000 48	56
41	0.112	1	0.004 4	37		0.011	0.018	0.000 44	57
42	0.102	0.8	0.004	38		0.01	0.015	0.000 4	58
43	0.091	0.7	0.003 6	39		0.009	0.012	0.000 36	59
44	0.081	0.6	0.003 2	40		0.008	0.010		60

漆包线在使用时，需要去掉线端头的部分漆皮，以便接线。漆包线去漆皮的方法一般有如下三种：

(1)燃烧去漆法　将线端需要去掉漆皮的部分，在酒精灯的火焰上燃烧，使漆皮炭化，然后，迅速浸入乙醇中。取出后，用洁净的棉花或棉布擦净，漆皮即可去掉。

(2)甲酸去漆法　将线端需要去掉漆皮的部分，插入常温的甲酸溶液中，经数分钟后取出，用蘸有乙醇的棉花将甲酸擦净，漆皮即可去掉。在甲酸中加入少量丙酮或苯能减少刺激性气味。

(3)碱液去漆法　将线端需要去掉漆皮的部分，插入50%浓度的苛性钠溶液中，然后取出，用蒸馏水洗去碱液，漆皮即可去掉。碱液浓度越高，去掉漆皮的时间越短。

二、绕包线

电工产品所用绕包线是用天然丝、玻璃丝、绝缘纸或合成树脂薄膜等紧密绕包在导电线芯上，形成绝缘层；也有在漆包线上再绕包绝缘层的。除薄膜绝缘层外，其他如玻璃丝等须经胶粘绝缘漆的浸渍处理，以提高其电性能、机械性能和防潮性能；除少数天然丝外，一般绕包线的特点是：绝缘层是组合绝缘，比漆包线的漆膜层要厚些，电性能较高，能较好地承受过负荷，一般应用于大中型电工产品中；薄膜绝缘绕包线则具有更高的机械性能和电性能，用于大中型电机设备中。绕包线的品种、规格和特点见表3-75。

表3-75　绕包线品种、规格和特点

类别	产品名称	型号	规格①(mm)	特点		
				耐温等级(℃)	优点	局限性
纸包线	纸包圆铜线	Z	1.0～5.6	A(105)②	在油浸变压器中作线圈，耐电压击穿性优	绝缘纸容易破裂
	纸包圆铝线	ZL	1.0～5.6			
	纸包扁铜线	ZB	a边0.9～5.6 b边2.0～18.0			
	纸包扁铝线	ZLB	a边0.9～5.6 b边2.0～18.0			

续表

类别	产品名称	型号	规格[①] (mm)	特点		
				耐温等级 (℃)	优点	局限性
玻璃丝包线及玻璃丝包漆包线	双玻璃丝包圆铜线	SBEC	0.25～6.0	B(130)	(1) 过负载性优 (2) 耐电晕性优 (3) 玻璃丝包漆包线的耐潮性好	(1) 弯曲性较差 (2) 耐潮性较差
	双玻璃丝包圆铝线	SBELC	0.25～6.0			
	双玻璃丝包扁铜线	SBECB	*a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0			
	双玻璃丝包扁铝线	SBELCB	*a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0			
	单玻璃丝包聚酯漆包扁铜线	QZSBCB	*a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0			
	单玻璃丝包聚酯漆包扁铝线	QZSBLCB	*a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0			
	双玻璃丝包聚酯漆包扁铜线	QZSBECB	*a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0			
	双玻璃丝包聚酯漆包扁铝线	QZSBELCB	*a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0			
	单玻璃丝包聚酯漆包圆铜线	QZSBC	0.53～2.50			
	单玻璃丝包缩醛漆包圆铜线	QQSBC	0.53～2.50	E(120)	(1) 过负载性优 (2) 耐电晕性优 (3) 耐潮性优	弯曲性较差
	双玻璃丝包聚酯亚胺漆包扁铜线 单玻璃丝包聚酯亚胺漆包扁铜线	QZYSBEFB QZYSBFB	*a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0 *a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0	F(155)	(1) 过负载性优 (2) 耐电晕性优 (3) 耐潮性优	弯曲性较差
	硅有机漆双玻璃丝包圆铜线 硅有机漆双玻璃丝包扁铜线	SBEG SBEGB	0.25～6.0 *a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0	H(180)	(1) 过负载性优 (2) 耐电晕性优 (3) 用硅有机漆浸渍改进了耐水耐潮性能	(1) 弯曲性较差 (2) 硅有机浸渍漆黏合能力较差，绝缘层的机械强度较差
	双玻璃丝包聚酰亚胺漆包扁铜线 单玻璃丝包聚酰亚胺漆包扁铜线	QYSBEGB QYSBGB	*a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0 *a* 边 0.9～5.6 *b* 边 2.0～18.0	H(180)	(1) 过负载性优 (2) 耐电晕性优 (3) 耐潮性优	弯曲性较差

续表

类别	产品名称	型号	规格①(mm)	特点		
				耐温等级(℃)	优点	局限性
丝包线	双丝包圆铜线	SE	0.05～2.50	A(105)②	(1) 绝缘层的机械强度较好 (2) 油性漆包线的介质损耗角正切小 (3) 丝包漆包线的电性能优	如果不浸渍,丝包线的耐潮性差
	单丝包油性漆包圆铜线	SQ	0.05～2.50			
	单丝包聚酯漆包圆铜线	SQZ	0.05～2.50			
	双丝包油性漆包圆铜线	SEQ	0.05～2.50			
	双丝包聚酯漆包圆铜线	SEQZ	0.05～2.50			
薄膜绕包线	聚酰亚胺薄膜线包圆铜线	Y	2.5～6.0	220	(1) 耐热性和低温性优 (2) 耐辐射性优 (3) 在高温下电压击穿性能好 (4) 和玻璃丝包线相比槽满率较高	在含水密封系统中易水解
	聚酰亚胺薄膜绕包扁铜线	YB	*a* 边 2.0～5.6 *b* 边 2.0～16.0			
	玻璃丝包聚酯薄膜绕包扁铜线	—	*a* 边 1.12～5.6 *b* 边 2.0～15.0	E(120)	(1) 耐电压击穿性能优 (2) 绝缘层的机械强度高	绝缘层较厚,槽满率较低

注：① 圆线规格以线芯直径表示,扁线以线芯窄边(*a*)及宽边(*b*)长度表示；
② 系指在油中或用浸渍漆处理后的耐温等级。

1. 玻璃丝包圆线和丝包圆线

玻璃丝包圆线和丝包圆线的规格尺寸和最大外径见表 3－76。

表 3－76 玻璃丝包圆线和丝包线的导线直径和最大外径 mm

导线直径(铜铝)		玻璃丝包线最大外径		丝包线最大外径				
标称直径	公差	单玻璃丝包漆包线	双玻璃丝包线	双线包线	单丝包油性漆包线	双丝包油性漆包线	单丝包聚酯漆包线	双丝包聚酯漆包线
0.050	±0.003			0.16	0.14	0.18	0.14	0.18
0.060	±0.003			0.17	0.15	0.19	0.16	0.20
0.070	±0.003			0.18	0.16	0.20	0.17	0.21
0.080	±0.003			0.19	0.17	0.21	0.18	0.22
0.090	±0.003			0.20	0.18	0.22	0.19	0.23

续表

导线直径(铜铝)		玻璃丝包线最大外径		丝包线最大外径				
标称直径	公差	单玻璃丝包漆包线	双玻璃丝包线	双线包线	单丝包油性漆包线	双丝包油性漆包线	单丝包聚酯漆包线	双丝包聚酯漆包线
0.100	±0.005			0.21	0.19	0.23	0.20	0.24
0.110	±0.005			0.22	0.20	0.24	0.21	0.25
0.120	±0.005			0.23	0.21	0.25	0.22	0.26
0.130	±0.005			0.24	0.22	0.26	0.23	0.27
0.140	±0.005			0.25	0.23	0.27	0.24	0.28
0.150	±0.005			0.26	0.24	0.28	0.25	0.29
0.160	±0.005			0.28	0.26	0.30	0.28	0.32
0.170	±0.005			0.29	0.27	0.31	0.29	0.33
0.180	±0.005			0.30	0.28	0.32	0.30	0.34
0.190	±0.005			0.31	0.29	0.33	0.31	0.35
0.200	±0.005			0.32	0.30	0.35	0.32	0.36
0.210	±0.005			0.33	0.32	0.36	0.33	0.37
0.230	±0.005			0.36	0.35	0.39	0.36	0.41
0.250	±0.005		0.49	0.38	0.37	0.42	0.38	0.43
(0.270)	±0.010							
0.280	±0.010			0.41	0.40	0.45	0.41	0.46
(0.290)	±0.010							
0.310	±0.010			0.44	0.43	0.48	0.44	0.49
0.330	±0.010			0.47	0.46	0.51	0.48	0.53
0.350	±0.010			0.49	0.48	0.53	0.51	0.55
0.380	±0.010			0.52	0.51	0.56	0.53	0.58
0.400	±0.010			0.54	0.53	0.58	0.55	0.60
0.420	±0.010			0.56	0.55	0.60	0.57	0.62
0.450	±0.010			0.59	0.58	0.63	0.60	0.65
0.470	±0.010			0.61	0.60	0.65	0.62	0.67
0.500	±0.010			0.64	0.63	0.68	0.65	0.70
0.530	±0.010	0.73	0.79	0.67	0.67	0.72	0.69	0.74
0.560	±0.010	0.76	0.82	0.70	0.70	0.75	0.72	0.77
0.600	±0.010	0.80	0.86	0.74	0.74	0.79	0.76	0.81
0.630	±0.010	0.83	0.89	0.77	0.77	0.83	0.79	0.84
0.670	±0.010	0.88	0.93	0.82	0.82	0.87	0.85	0.90
(0.690)	±0.010							
0.710	±0.015	0.93	0.98	0.86	0.86	0.91	0.89	0.94
0.750	±0.015	0.97	1.02	0.91	0.91	0.97	0.94	1.00
(0.770)	±0.015							
0.800	±0.015	1.02	1.07	0.96	0.96	1.02	0.99	1.05

续表

导线直径(铜铝)		玻璃丝包线最大外径		丝包线最大外径				
标称直径	公差	单玻璃丝包漆包线	双玻璃丝包线	双线包线	单丝包油性漆包线	双丝包油性漆包线	单丝包聚酯漆包线	双丝包聚酯漆包线
(0.830)	±0.015							
0.850	±0.015	1.07	1.12	1.01	1.01	1.07	1.04	1.10
0.900	±0.015	1.12	1.17	1.06	1.06	1.12	1.09	1.15
(0.930)	±0.015							
0.950	±0.015	1.17	1.22	1.11	1.11	1.17	1.14	1.20
1.000	±0.015	1.25	1.29	1.17	1.18	1.24	1.22	1.28
1.060	±0.020	1.31	1.35	1.23	1.25	1.31	1.28	1.34
1.120	±0.020	1.37	1.41	1.29	1.31	1.37	1.34	1.40
1.180	±0.020	1.43	1.47	1.35	1.37	1.43	1.40	1.46
1.250	±0.020	1.50	1.54	1.42	1.44	1.50	1.47	1.53
1.300	±0.020	1.55	1.59	1.47	1.49	1.55	1.52	1.58
(1.350)	±0.020							
1.400	±0.020	1.65	1.69	1.57	1.59	1.65	1.62	1.68
(1.450)	±0.020							
1.500	±0.020	1.75	1.81	1.67	1.69	1.75	1.72	1.78
(1.560)	±0.020							
1.600	±0.020	1.87	1.91	1.78	1.80	1.87	1.83	1.90
1.700	±0.025	1.97	2.01	1.88	1.90	1.97	1.93	2.00
1.800	±0.025	2.07	2.11	1.98	2.00	2.07	2.03	2.10
1.900	±0.025	2.17	2.21	2.08	2.10	2.17	2.13	2.20
2.000	±0.025	2.27	2.31	2.18	2.20	2.27	2.23	2.30
2.12	±0.030	2.39	2.48	2.30	2.32	2.39	2.35	2.42
2.24	±0.030	2.51	2.60	2.42	2.44	2.51	2.47	2.54
2.36	±0.030	2.63	2.72	2.54	2.56	2.63	2.59	2.66
2.50	±0.030	2.77	2.86	2.68	2.70	2.77	2.73	2.80
2.65	±0.030		3.01					
2.80	±0.030		3.16					
3.00	±0.030		3.37					
3.15	±0.030		3.52					
3.35	±0.030		3.72					
3.55	±0.040		3.92					
3.75	±0.040		4.12					
4.00	±0.040		4.37					
4.25	±0.040		4.63					
4.50	±0.050		4.88					
4.75	±0.050		5.13					

续表

导线直径(铜铝)		玻璃丝包线最大外径		丝包线最大外径				
标称直径	公差	单玻璃丝包漆包线	双玻璃丝包线	双线包线	单丝包油性漆包线	双丝包油性漆包线	单丝包聚酯漆包线	双丝包聚酯漆包线
5.00	±0.050		5.38					
5.30	±0.050		5.68					
5.60	±0.050		5.98					
6.00	±0.060		6.38					

注：所有括号内的规格系漆包线的保留规格，不推荐使用。

2. 玻璃丝包扁线

扁电磁线截面尺寸标准如图 3-14 所示。玻璃丝包扁线的绝缘厚度见表 3-77。

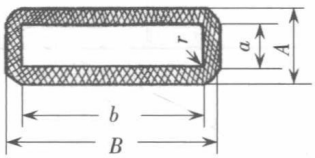


图 3-14　扁电磁线截面尺寸标准

表 3-77　玻璃丝包扁线绝缘厚度　　mm

导线标称尺寸		绝缘厚度					
		双玻璃丝包扁线		单玻璃丝包漆包扁线		双玻璃丝包漆包扁线	
a(窄边)	b(宽边)	$A-a$	$B-b$	$A-a$	$B-b$	$A-a$	$B-b$
0.90～1.90	2.00～3.75	0.28～0.35	0.25	0.24～0.37	0.29	0.34～0.47	0.37
	4.00～6.00	0.30～0.37	0.25	0.25～0.39	0.29	0.36～0.50	0.37
	6.30～8.00	0.31～0.39	0.25	0.26～0.40	0.29	0.38～0.52	0.37
	8.50～14.00	0.34～0.43	0.25	0.27～0.42	0.29	0.40～0.55	0.37
2.00～3.75	2.80～6.00	0.30～0.38	0.31	0.25～0.39	0.33	0.36～0.51	0.43
	6.30～10.00	0.33～0.41	0.31	0.27～0.41	0.33	0.40～0.54	0.43
	10.60～14.00	0.35～0.44	0.31				
	15.00～18.00	0.37～0.46	0.31				
4.00～5.60	5.60～10.00	0.36～0.45	0.40	0.30～0.45	0.42	0.43～0.58	0.52
	10.60～14.00	0.38～0.48	0.40				
	16.00～18.00	0.42～0.52	0.40				

注：玻璃丝包扁线的最大尺寸以扁导线标称尺寸加正公差或漆包扁线最大尺寸加绝缘最大厚度计算。

3. 纸包圆线

纸包圆线的绝缘厚度见表 3－78。

表 3－78　纸包圆线绝缘厚度　　mm

导线直径 d			
1.00～2.12		2.24～5.6	
绝缘标称厚度 $D-d$	绝缘厚度允许偏差	绝缘标称厚度 $D-d$	绝缘厚度允许偏差
0.30	±0.05	0.30	±0.05
0.45	±0.05	0.45	±0.05
0.80	±0.10	0.80	±0.10
		1.20	±0.12
		1.80	±0.15
		4.25	±0.30

注：纸包圆线的最大外径(D)以导线标称直径加正公差加绝缘最大厚度计算。D 代表纸包线外径。

4. 纸包扁线

扁电磁线截面尺寸标准如图 3－14 所示。纸包扁线绝缘厚度见表 3－79，变压器用纸包扁线的纸包增重率见表 3－80。

表 3－79　纸包扁线绝缘厚度　　mm

绝缘标称厚度	0.45	0.60	0.95	1.35	1.60	1.95	2.45	2.95
最大绝缘厚度($A-a$)	0.57	0.74	1.14	1.56	1.84	2.23	2.77	3.32
最小绝缘厚度($B-b$)	0.40	0.53	0.85	1.23	1.46	1.78	2.25	2.70

注：纸包扁线的最大尺寸以扁导线标称尺寸加正公差加绝缘最大厚度计算。

表 3－80　变压器用纸包扁线的纸包增重率(%)　　mm

厚 / 宽	0.90	1.00	1.08	1.16	1.25	1.35	1.45	1.56	1.68	1.81	1.95	2.10	2.26	2.44	2.63	2.88	3.05	3.28	3.53	3.8	4.1	4.4	4.7	5.1	5.5
2.10	7.89	7.83	7.32	6.93	6.54	6.18	5.86	5.57	5.32	5.07	—	4.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.26	7.65	7.54	7.07	6.70	6.29	5.95	5.65	5.38	5.12	4.93	—	—	4.50	—	4.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.44	7.40	7.25	6.80	6.44	6.07	5.75	5.44	5.16	4.92	4.60	4.44	4.50	—	4.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.53	7.23	7.05	6.61	6.23	5.87	5.54	5.26	5.10	4.72	4.50	4.27	4.31	—	3.90	3.73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.83	7.03	6.82	6.39	6.04	5.65	5.36	5.09	4.83	4.58	4.34	4.12	3.73	3.93	3.74	—	3.42	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.05	—	6.63	6.22	5.86	5.52	5.20	4.92	4.66	4.43	4.18	3.99	3.96	3.77	3.58	3.41	3.27	3.17	—	—	—	—	—	—	—	—
3.28	—	6.45	6.05	5.67	5.36	5.04	4.77	4.52	4.28	4.05	3.86	3.82	3.63	3.45	3.28	3.14	—	2.87	—	—	—	—	—	—	—
3.53	—	6.28	5.90	5.54	5.22	4.90	4.64	4.38	4.16	3.93	3.73	3.69	3.49	3.32	3.16	3.01	2.88	2.76	2.64	—	—	—	—	—	—
3.8	—	6.13	5.75	5.40	5.09	4.78	4.52	4.26	4.02	3.82	3.62	3.56	3.37	3.20	3.04	2.89	2.77	2.64	—	2.44	—	—	—	—	—
4.1	—	6.00	5.59	5.26	4.95	4.65	4.40	4.16	3.92	3.71	3.52	3.44	3.26	3.08	2.92	2.80	2.67	2.54	2.43	2.33	2.30	—	—	—	—
4.4	—	5.86	5.50	5.16	4.84	4.55	4.30	4.05	3.88	3.62	3.42	3.34	3.16	3.04	2.84	2.70	2.57	2.47	2.36	2.25	2.21	2.11	—	—	—
4.7	—	5.76	5.38	5.07	4.74	4.45	4.20	3.96	3.74	3.53	3.34	3.25	3.09	2.91	2.75	2.63	2.50	2.38	2.28	2.17	2.13	—	—	—	—
5.1	—	5.65	5.26	4.95	4.64	4.35	4.10	3.87	3.62	3.44	3.25	3.16	2.99	2.83	2.67	2.54	2.40	2.30	2.19	2.09	2.04	1.96	—	1.80	—
5.5	—	5.55	5.16	4.85	4.55	4.26	4.02	3.78	3.56	3.36	3.17	3.06	2.91	2.75	2.57	2.45	2.33	2.23	2.12	2.02	1.96	1.89	1.81	1.72	1.66
5.9	—	5.46	5.09	4.78	4.46	4.18	3.94	3.71	3.50	3.28	3.09	2.99	2.84	2.67	2.53	2.39	2.27	2.15	2.06	1.95	1.90	1.82	1.75	1.66	—
6.4	—	5.36	4.99	4.68	4.39	4.12	3.87	3.63	3.40	3.21	3.02	2.92	2.74	2.60	2.46	2.32	2.20	2.09	1.99	1.90	1.84	1.75	1.68	1.60	1.53
6.9	—	5.27	4.93	4.62	4.32	4.03	3.80	3.55	3.34	3.15	2.95	2.85	2.71	2.54	2.38	2.26	2.14	2.04	1.93	1.84	1.77	1.69	1.62	1.54	1.47
7.4	—	5.20	4.85	4.55	4.25	3.98	3.74	3.52	3.20	3.08	2.90	2.81	2.64	2.48	2.34	2.22	2.09	1.99	1.88	1.79	1.73	1.64	1.57	1.49	1.42
8.0	—	5.14	4.77	4.88	4.19	3.91	3.68	3.44	3.24	2.98	2.86	2.77	2.58	2.43	2.29	2.16	2.04	1.94	1.83	1.74	1.67	1.59	1.51	1.44	1.38
8.6	—	5.07	4.71	4.43	4.12	3.87	3.61	3.42	3.19	2.97	2.81	2.67	2.53	2.37	2.24	2.12	2.00	1.89	1.78	1.70	1.62	1.55	1.48	1.39	1.33
9.3	—	—	—	—	—	3.79	3.57	3.35	3.15	2.94	2.78	2.64	2.48	2.33	2.19	2.07	1.95	1.85	1.75	1.65	1.58	1.50	1.44	1.36	1.29
10.0	—	—	—	—	—	—	—	3.30	3.09	2.90	2.73	2.58	2.44	2.29	2.15	2.03	1.91	1.81	1.70	1.62	1.54	1.47	1.39	1.32	1.25
10.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.87	2.68	2.55	2.40	2.24	2.11	1.99	1.87	1.77	1.67	1.58	1.50	1.43	1.36	1.28	1.23
11.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.51	2.36	2.21	2.07	1.96	1.84	1.74	1.63	1.55	1.47	1.40	1.33	1.25	1.19
12.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.48	2.32	2.18	2.04	1.92	1.81	1.70	1.60	1.52	1.44	1.36	1.30	1.22	1.16
13.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.15	2.01	1.89	1.78	1.67	1.57	1.49	1.41	1.34	1.27	1.19	1.13
14.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.12	1.99	1.87	1.75	1.65	1.55	1.46	1.38	1.31	1.24	1.15	1.11

5. 薄膜绕包线

薄膜绕包线，是指在圆铜线或扁铜线上，绕包以一层或多层的聚酯、聚酰亚胺、聚酰亚胺复合层等薄膜，绕结而成的。还可以在绕包好的薄膜外面再包一层或多层无碱玻璃丝，用绝缘漆浸渍经烘焙而成。该产品可用于交、直流高压电机、牵引电机、采油钻机等有较高要求的电机及高压电器绕组用。

(1) 玻璃丝包薄膜绕包扁线。

绝缘厚度的规格及击穿电压值见表 3-81。

表 3-81 玻璃丝包薄膜绕包扁线的绝缘厚度

名　　称	绝缘厚度(mm)	偏　差(%)	击穿电压(V)
玻璃丝包薄膜绕包扁线	0.4	−15	2 500
	0.5		4 500
	(0.6)		5 500

(2) 聚酰亚胺复合薄膜绕包线。

MYF-1 型聚酰亚胺复合薄膜一层绕包圆铜线的规格尺寸见表 3-82。MYFB-1、2 型绕包扁铜线规格见表 3-83。

表 3-82 聚酰亚胺复合薄膜一层绕包圆铜线的规格尺寸

导线标称直径 (mm)	标称截面 (mm^2)	绝缘厚度 (mm)	重　量 (kg/km)
2.00	3.142	0.20±0.05	28.76
2.12	3.530	0.20±0.05	32.23
2.24	3.941	0.20±0.05	35.90
2.36	4.374	0.20±0.05	39.78
2.50	4.909	0.20±0.05	44.66
2.65	5.516	0.20±0.05	50.08
2.80	6.158	0.20±0.05	55.82
3.00	7.069	0.20±0.05	64.12
3.15	7.793	0.20±0.05	70.55
3.35	8.814	0.20±0.05	79.68
3.55	9.898	0.20±0.05	89.37
3.75	11.04	0.20±0.05	99.68
4.00	12.57	0.20±0.05	113.34
4.25	14.19	0.20±0.05	127.81
4.50	15.90	0.20±0.05	143.14
4.75	17.72	0.20±0.05	159.36
5.00	19.64	0.20±0.05	176.44
5.30	22.06	0.20±0.05	198.24
5.50	24.63	0.20±0.05	221.16
6.00	28.27	0.20±0.05	253.67

表 3-83　聚酰亚胺复合薄膜扁铜线的规格尺寸

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
1.25×2.10	0.20±0.05	0.40±0.10	22.11	22.93
1.25×2.26			23.92	24.76
1.25×2.44			26.03	26.98
1.25×2.63			28.15	29.13
1.25×2.83			30.37	31.37
1.25×3.05	0.20±0.05	0.40±0.10	33.00	34.13
1.25×3.28			35.53	36.69
1.25×3.53			38.36	39.56
1.25×3.80			41.40	42.64
1.25×4.10			44.99	46.40
1.25×4.40	0.20±0.05	0.40±0.10	48.33	49.78
1.25×4.70			51.67	53.17
1.25×5.10			56.33	58.00
1.25×5.50			60.79	62.53
1.25×5.90			65.35	67.15
1.35×2.10	0.20±0.05	0.40±0.10	24.02	24.85
1.35×2.26			25.93	26.78
1.35×2.44			28.20	29.20
1.35×2.63			30.56	30.68
1.35×2.83			33.09	34.20
1.35×3.05	0.20±0.05	0.40±0.10	35.71	36.86
1.35×3.28			38.56	39.74
1.35×3.53			41.58	42.79
1.35×3.80			44.81	46.07
1.35×4.10			48.60	50.03
1.35×4.40	0.20±0.05	0.40±0.10	52.24	53.71
1.35×4.70			56.28	57.79
1.35×5.10			60.24	62.43
1.35×5.50			65.82	67.69
1.35×5.90			70.69	72.63
1.45×2.10	0.20±0.05	0.40±0.10	25.93	26.77
1.45×2.26			28.03	28.99
1.45×2.44			30.35	31.33
1.45×2.63			32.87	33.87
1.45×2.83			35.60	36.72

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
1.45×3.05	0.20±0.05	0.40±0.10	38.43	39.58
1.45×3.28			41.46	42.65
1.45×3.53			44.69	45.92
1.45×3.80			48.34	49.73
1.45×4.10			52.21	53.65
1.45×4.40	0.20±0.05	0.40±0.10	56.15	57.64
1.45×4.70			60.09	61.67
1.45×5.10			65.36	67.06
1.45×5.50			70.74	72.62
1.45×5.90			75.90	77.86
1.45×6.40	0.20±0.05	0.40±0.10	82.49	84.54
1.56×2.10			28.03	28.98
1.56×2.26			30.25	31.21
1.56×2.44			32.77	33.25
1.56×2.63			35.59	36.70
1.56×2.83	0.20±0.05	0.40±0.10	38.31	39.45
1.56×3.05			41.44	42.61
1.56×3.28			44.67	45.87
1.56×3.53			48.11	49.35
1.56×3.80			52.06	53.16
1.56×4.10	0.20±0.05	0.40±0.10	56.33	57.78
1.56×4.40			60.47	61.97
1.56×4.70			64.82	66.47
1.56×5.10			70.38	72.10
1.56×5.50			76.16	78.06
1.56×5.90	0.20±0.05	0.40±0.10	81.72	83.70
1.56×6.40			88.71	90.78
1.56×6.90			95.80	98.06
1.68×2.10			30.34	31.30
1.68×2.26			32.66	33.64
1.68×2.44	0.20±0.05	0.40±0.10	35.38	36.38
1.68×2.63			38.40	39.53
1.68×2.83			41.43	42.59
1.68×3.05			44.66	42.85
1.68×3.28			48.19	49.41

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
1.68×3.53	0.20±0.05	0.40±0.10	52.03	54.41
1.68×3.80			56.08	57.05
1.68×4.10			60.64	62.12
1.68×4.40			65.18	66.70
1.68×4.70			69.83	71.51
1.68×5.10	0.20±0.05	0.40±0.10	75.89	77.63
1.68×5.50			81.77	83.90
1.68×5.90			88.04	90.04
1.68×6.40			95.63	97.72
1.68×6.90			103.12	105.30
1.68×7.40	0.20±0.05	0.40±0.10	110.85	113.27
1.68×8.00			119.91	122.40
1.81×2.10			32.76	33.73
1.81×2.26			35.37	36.37
1.81×2.44			38.39	39.51
1.81×2.63	0.20±0.05	0.40±0.10	41.42	42.57
1.81×2.83			44.64	45.82
1.81×3.05			48.27	49.48
1.81×3.28			52.01	53.25
1.81×3.53			56.15	57.56
1.81×3.80	0.20±0.05	0.40±0.10	60.50	61.96
1.81×4.10			65.46	66.95
1.81×4.40			70.41	72.06
1.81×4.70			75.25	76.95
1.81×5.10			81.83	83.70
1.81×5.50	0.20±0.05	0.40±0.10	88.40	90.35
1.81×5.90			94.87	96.89
1.81×6.40			103.05	105.19
1.81×6.90			111.28	113.62
1.81×7.40			119.47	121.92
1.81×8.00	0.20±0.05	0.40±0.10	129.14	131.65
1.81×8.60			139.09	141.86
1.95×2.10			35.37	36.37
1.95×2.26			38.29	39.40
1.95×2.44			41.41	42.55

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
1.95×2.63	0.20±0.05	0.40±0.10	44.74	45.91
1.95×2.83			48.26	49.46
1.95×3.05			52.09	53.33
1.95×3.28			56.24	57.62
1.95×3.53			60.58	62.00
1.95×3.80	0.20±0.05	0.40±0.10	65.32	66.79
1.95×4.10			70.58	72.09
1.95×4.40			75.93	77.60
1.95×4.70			81.17	82.89
1.95×5.10			88.14	89.92
1.95×5.50	0.20±0.05	0.40±0.10	95.22	97.20
1.95×5.90			102.29	104.34
1.95×6.40			110.98	113.12
1.95×6.90			119.90	122.28
1.95×7.40			128.70	131.18
1.95×8.00	0.20±0.05	0.40±0.10	139.16	141.70
1.95×8.60			149.82	152.62
1.95×9.30			162.06	165.00
2.10×2.10			35.86	36.93
2.10×2.26			38.88	39.98
2.10×2.44	0.20±0.05	0.40±0.10	42.30	43.42
2.10×2.63			45.82	46.98
2.10×2.83			49.65	50.83
2.10×3.05			53.78	54.99
2.10×3.28			58.22	59.59
2.10×3.53	0.20±0.05	0.40±0.10	62.86	64.27
2.10×3.80			68.00	69.46
2.10×4.10			73.66	74.98
2.10×4.40			79.41	81.06
2.10×4.70			85.06	86.76
2.10×5.10	0.20±0.05	0.40±0.10	92.52	94.29
2.10×5.50			100.19	102.12
2.10×5.90			107.77	109.80
2.10×6.40			117.14	119.26
2.10×6.90			126.08	129.04

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
2.10×7.40	0.20±0.05	0.40±0.10	136.18	136.64
2.10×8.00			147.44	149.96
2.10×8.60			158.90	161.68
2.10×9.30			172.14	175.06
2.10×10.00			185.28	188.35
2.26×2.26	0.20±0.05	0.40±0.10	42.17	43.35
2.26×2.44			45.89	47.09
2.26×2.63			49.71	50.93
2.26×2.83			53.73	54.98
2.26×3.05			58.15	59.43
2.26×3.28	0.20±0.05	0.40±0.10	62.88	64.28
2.26×3.53			68.01	69.45
2.26×3.80			73.45	74.92
2.26×4.10			79.49	80.01
2.26×4.10			85.64	87.32
2.26×4.70	0.20±0.05	0.40±0.10	91.78	93.50
2.6×5.10			99.84	101.64
2.26×5.50			108.03	110.01
2.26×5.90			116.20	118.26
2.26×6.40			126.29	128.44
2.26×6.90	0.20±0.05	0.40±0.10	136.61	139.00
2.26×7.40			146.71	149.20
2.26×8.00			158.87	161.42
2.26×8.60			171.13	173.94
2.26×9.30			185.37	188.33
2.26×10.00	0.20±0.05	0.40±0.10	199.51	202.61
2.26×10.80			215.94	219.39
2.44×2.83			58.25	59.52
2.44×3.05			63.07	64.37
2.44×3.28			68.20	69.63
2.44×3.53	0.20±0.05	0.40±0.10	73.63	75.10
2.44×3.80			79.57	81.07
2.44×4.10			86.22	87.88
2.44×4.40			92.76	94.47
2.44×4.70			99.31	101.07

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
2.44×5.10	0.20±0.05	0.40±0.10	108.19	
2.44×5.50			116.86	
2.44×5.90			125.63	
2.44×6.40			136.62	
2.44×6.90			147.65.07	
2.44×7.40	0.20±0.05	0.40±0.10	158.64	161.17
2.44×8.00			171.71	174.29
2.44×8.60			184.96	187.81
2.44×9.30			200.30	203.30
2.44×10.00			215.54	218.69
2.44×10.80	0.20±0.05	0.40±0.10	233.28	236.78
2.44×11.60			250.85	254.53
2.63×2.63			58.35	59.62
2.63×2.83			63.07	64.36
2.63×3.05			68.30	69.72
2.63×3.28	0.20±0.05	0.40±0.10	73.73	75.18
2.63×3.53			79.66	81.15
2.63×3.80			86.02	87.53
2.63×4.10			93.15	94.83
2.63×4.40			100.21	101.95
2.63×4.70	0.20±0.05	0.40±0.10	107.24	109.03
2.63×5.10			116.82	118.80
2.63×5.50			126.20	128.26
2.63×5.90			135.66	137.79
2.63×6.40			147.45	149.67
2.63×6.90	0.20±0.05	0.40±0.10	159.38	161.85
2.63×7.40			171.80	173.65
2.63×8.00			185.38	188.15
2.63×8.60			199.50	202.39
2.63×9.30			216.04	219.08
2.63×10.00	0.20±0.05	0.40±0.10	232.48	235.67
2.63×10.80			251.52	255.06
2.63×11.60			270.39	274.12
2.63×12.50			291.69	295.62
2.83×2.83			68.19	69.61

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
2.83×3.05	0.20±0.05	0.40±0.10	73.82	75.27
2.83×3.28			79.65	81.14
2.83×3.53			85.89	87.41
2.83×3.80			92.22	94.48
2.83×4.10			100.48	102.20
2.83×4.40	0.20±0.05	0.40±0.10	108.14	110.03
2.83×4.70			115.79	117.73
2.83×5.10			125.86	127.88
2.83×5.50			136.03	138.12
2.83×5.90			146.20	148.36
2.83×6.40	0.20±0.05	0.40±0.10	158.93	161.33
2.83×6.90			171.62	174.13
2.83×7.40			184.32	186.92
2.83×8.00			199.62	201.71
2.83×8.60			214.84	215.03
2.83×9.30	0.20±0.05	0.40±0.10	232.55	235.66
2.83×10.00			250.32	253.55
2.83×10.30			270.76	274.35
2.83×11.60			291.14	294.90
2.83×12.50			313.94	317.91
3.05×3.05	0.20±0.05	0.40±0.10	79.25	81.24
3.05×3.28			86.08	87.60
3.05×3.53			92.82	94.37
3.05×3.80			100.25	101.86
3.05×4.10			108.51	110.27
3.05×4.40	0.20±0.05	0.40±0.10	116.78	118.71
3.05×4.70			125.03	127.01
3.05×5.10			135.90	137.95
3.05×5.50			146.87	149.00
3.05×5.90			157.74	159.80
3.05×6.40	0.20±0.05	0.40±0.10	171.57	174.02
3.05×6.90			185.12	187.72
3.05×7.40			198.86	201.52
3.05×8.00			215.26	218.12
3.05×8.60			231.69	234.66

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
3.05×9.30	0.20±0.05	0.40±0.10	250.83	253.95
3.05×10.00			270.04	273.59
3.05×10.80			292.01	295.64
3.05×11.60			313.59	317.70
3.05×12.50			338.49	342.51
3.28×3.28	0.20±0.05	0.40±0.10	92.94	94.60
3.28×3.53			100.27	101.97
3.28×3.80			108.11	109.85
3.28×4.10			116.95	118.24
3.28×4.40			125.81	127.76
3.28×4.70	0.20±0.05	0.40±0.10	134.65	136.66
3.28×5.10			146.32	148.39
3.28×5.50			158.21	160.47
3.28×5.90			169.98	172.32
3.28×6.40			184.67	187.10
3.28×6.90	0.20±0.05	0.40±0.10	199.26	201.79
3.28×7.40			214.09	216.57
3.28×8.00			231.71	234.60
3.28×8.60			249.33	252.36
3.28×9.30			269.87	273.05
3.28×10.00	0.20±0.05	0.40±0.10	290.59	294.09
3.28×10.80			314.16	317.85
3.28×11.60			337.64	341.51
3.28×12.50			364.04	369.12
3.28×3.53			108.11	109.55
3.53×3.80	0.20±0.05	0.40±0.10	116.64	118.43
3.53×4.10			126.20	128.14
3.53×4.40			135.65	137.64
3.53×4.70			145.09	147.14
3.53×5.10			157.76	159.87
3.53×5.50	0.20±0.05	0.40±0.10	170.45	172.76
3.53×5.90			183.12	185.51
3.53×6.40			198.91	201.40
3.53×6.90			214.84	217.57
3.53×7.40			230.64	233.47

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
3.53×8.00	0.20±0.05	0.40±0.10	249.56	252.51
3.53×8.60			268.48	271.56
3.53×9.30			290.62	293.85
3.53×10.00			312.84	316.40
3.53×10.80			338.22	341.96
3.53×11.60	0.20±0.05	0.40±0.10	363.49	367.42
3.53×12.50			392.10	396.44
3.80×3.80			125.89	127.84
3.80×4.10			136.04	138.03
3.80×4.40			146.29	148.33
3.80×4.70	0.20±0.05	0.40±0.10	156.44	158.53
3.80×5.10			170.13	172.42
3.80×5.50			183.70	186.06
3.80×5.90			197.27	199.71
3.80×6.40			214.26	216.80
3.80×6.90	0.20±0.05	0.40±0.10	231.40	234.18
3.80×7.40			248.45	251.28
3.80×8.00			268.82	271.83
3.80×8.60			289.24	292.37
3.80×9.30			313.15	316.61
3.80×10.00	0.20±0.05	0.40±0.10	337.00	340.62
3.80×10.80			364.18	368.38
3.80×11.60			391.35	395.34
3.80×12.50			422.16	426.57
3.80×13.50			456.20	460.86
3.80×14.50	0.20±0.05	0.40±0.10	490.23	495.14
4.10×4.10			143.65	145.64
4.10×4.40			154.60	156.64
4.10×4.70			165.64	167.74
4.10×5.10			180.34	182.63
4.10×5.50	0.20±0.05	0.40±0.10	195.01	197.38
4.10×5.90			209.98	212.12
4.10×6.40			227.97	230.51
4.10×6.90			246.50	249.29
4.10×7.40			264.80	267.70

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
4.10×8.00	0.20±0.05	0.40±0.10	286.72	289.74
4.10×8.60			308.74	311.89
4.10×9.30			334.56	338.03
4.10×10.00			360.19	363.80
4.10×10.80			399.59	393.40
4.10×11.60	0.20±0.05	0.40±0.10	418.96	422.96
4.10×12.50			452.17	456.59
4.40×4.40			166.44	168.54
4.40×4.70			178.19	180.34
4.40×5.10			193.99	196.34
4.40×5.50	0.20±0.05	0.40±0.10	209.76	212.19
4.40×5.90			225.43	227.94
4.40×6.40			245.27	248.01
4.40×6.90			264.96	267.82
4.40×7.40			284.56	287.52
4.40×8.00	0.20±0.05	0.40±0.10	308.19	311.27
4.40×8.60			331.81	334.82
4.40×9.30			359.42	362.96
4.40×10.00			386.98	390.68
4.40×10.80			418.45	422.34
4.40×11.60	0.20±0.05	0.04±0.10	449.93	454.00
4.40×12.50			485.54	490.04
4.70×4.70			190.82	193.16
4.70×5.10			207.64	210.05
4.70×5.50			224.51	227.00
4.70×5.90	0.20±0.05	0.40±0.10	241.29	243.85
4.70×6.40			262.43	265.23
4.70×6.90			283.42	286.34
4.70×7.40			304.32	307.34
4.70×8.00			329.54	332.69
4.70×8.60	0.20±0.05	0.40±0.10	354.94	358.38
4.70×9.30			384.29	387.90
4.70×10.00			413.74	417.51
4.70×10.80			447.32	451.27
4.70×11.60			481.10	485.45

续表

扁铜线标称尺寸 $a\times b$ (mm^2)	绝缘厚度 $A-a$(mm)		重　量(kg/km)	
	MYFB-1	MYFB-2	MYFB-1	MYFB-2
4.70×12.50	0.20±0.05	0.40±0.10	518.91	523.48
5.10×5.10			225.91	228.40
5.10×5.50			244.23	246.93
5.10×5.90			262.50	265.29
5.10×6.40			285.21	288.10
5.10×6.90	0.20±0.05	0.40±0.10	308.11	311.00
5.10×7.40			330.80	333.19
5.10×8.00			358.13	361.36
5.10×8.60			385.62	389.16
5.10×9.30			417.48	421.18
5.10×10.00	0.20±0.05	0.40±0.10	449.33	453.18
5.10×10.80			485.81	489.86
5.10×11.60			522.52	525.97
5.10×12.50			563.51	568.18
5.50×5.50			263.90	266.69
5.50×5.90	0.20±0.05	0.40±0.10	283.48	285.85
5.50×6.40			308.08	311.06
5.50×6.90			332.59	335.97
5.50×7.40			357.19	360.38
5.50×8.00			386.78	390.27
5.50×8.60	0.20±0.05	0.40±0.10	416.31	419.94
5.50×9.30			450.66	454.46
5.50×10.00			458.02	488.92
5.50×10.80	0.20±0.05	0.40±0.10	524.50	528.85
5.50×11.60			563.79	568.34
5.50×12.50			608.43	612.77

(3)H 级单玻璃丝包 HS(HF)薄膜绕结扁铜线。

绝缘厚度及击穿电压见表 3-84。

表 3-84　SBFMB/180 型薄膜绕结扁铜线的绝缘厚度及击穿电压

标称绝缘厚度(mm)	0.3	0.4	0.5
击穿电压(kV)	0.8	2.5	4.5

三、无机绝缘线

电工产品中所用无机绝缘线的绝缘层是用无机材料如陶瓷、氧化铝膜等组成的，但单一的无机绝缘层常有微孔存在，会影响电性能等，故一般常用有机绝缘漆浸渍后经烘干填实微孔。无机绝缘电磁线的特点是耐高温、耐辐射，主要用于在高温或有辐射的场合工作的电工设备中。无机绝缘电磁线的品种、规格、特点和主要用途见表 3－85。

表 3－85　无机绝缘电磁线品种、规格、特点和主要用途

类别	产品名称	型　号	规　格①（mm）	特　点		主要用途
				优　点	局限性	
氧化膜线	氧化膜圆铝线	YML YMLC②	0.05～5.0	（1）不用绝缘漆封闭的氧化膜耐温可达 250 ℃。用绝缘漆封闭的氧化膜，耐热性取决于绝缘漆 （2）槽满率高 （3）重量轻 （4）耐辐射性好	（1）弯曲性能差 （2）击穿电压低 （3）氧化膜耐刮性差 （4）耐酸、耐碱性能差 （5）不用绝缘漆封闭的氧化膜耐潮性差	起重电磁铁、高温制动器、干式变压器线圈，并用于需耐辐射场合
	氧化膜扁铝线	YMLB YMLBC②	a 边 1.0～4.0 b 边 2.5～6.3			
	氧化膜铝带(箔)	YMLD	厚 0.08～1.00 宽 20～900			
陶瓷绝缘线	陶瓷绝缘线	TC	0.06～0.50	（1）耐高温性能优，长期工作温度可达 500 ℃ （2）耐化学腐蚀性优 （3）耐辐射性优	（1）弯曲性差 （2）击穿电压低 （3）耐潮性差，如果没有密封层，不推荐在高湿度环境中使用	用于高温以及有辐射的场合

注：① 圆线规格以线芯直径表示，扁线以线芯窄边（a）、宽边（b）长度表示，带（箔）以导体厚、宽表示。

② 在氧化膜层上再涂以绝缘漆使其密封

1. 氧化膜铝带(箔)

氧化膜铝带(箔)是用阳极氧化法在铝带(箔)表面生成一层致密的三氧化二铝(Al_2O_3)膜而成，用氧化膜铝带(箔)绕制线圈可提高空间因数和线圈的热传导性能，未经绝缘密封的氧化膜铝带，一般加热到 350 ℃时，其击穿电压可保持在 180～220 kV；在直径 50 mm 圆棒上弯曲、两端共加重物 3.8 kg，其击穿电压仍保持在 200 kV 左右；在室温和相对湿度为 65%时，其绝缘电阻为 0.36×10^{11}～$0.40\times10^{11}\,\Omega$。

2. 陶瓷绝缘线

陶瓷绝缘线是在导线上浸涂玻璃浆后，经烘炉烧结而成的，可在 500 ℃高温环境下长期使用。在此温度下铜线将氧化，故线芯一般要采用镀镍铜线、镍包铜

线或不锈钢包铜线为导体。陶瓷绝缘线有极好的耐辐射性能，适宜在高能物理、宇航等领域中应用。

四、特种电磁线

特种电磁线是以能够适应特殊场合使用要求的材料为绝缘层的电磁线。在高温、超低温、高湿度、强磁场或高频辐射等环境下工作的仪器、仪表和其他电工产品中的电磁线，要求其绝缘结构和机电性能适应这些特殊环境的要求，保证具有良好的效果，特种电磁线就是为适应这些特殊要求而制造的。特种电磁线的品种、规格、特点和主要用途见表 3－86。

表 3－86　特种电磁线品种、规格、特点和主要用途

产品名称	型号	规格	特点			主要用途
			耐温等级℃	优点	局限性	
单丝包高频绕组线 双丝包高频绕组线	SQJ SEQJ	由多根漆包线绞制成线芯	Y(90)	(1) Q 值大 (2) 系多根漆包线组成，柔软性好，可降低趋肤效应 (3) 如使用聚氨酯漆包线有直焊性	耐潮性差	要求 Q 值稳定和介质损耗角正切小的仪表电器线圈
玻璃丝包中频绕组线	QZJBSB	宽 2.1～8.0 mm 高 2.8～12.5 mm①	B(130) H(180)	(1) 系多根漆包线组成，柔软性好，可降低趋肤效应 (2) 嵌线工艺简单		1 000～8 000 Hz 的中频变频机绕组
换位导线	QQLBH	a 边 1.56～3.82 mm b 边 4.7～10.8 mm	A(105)②	(1) 简化绕制线圈工艺 (2) 无循环电流，线圈内涡流损耗小 (3) 比纸包线的槽满率高	弯曲性能差	大型变压器线圈
潜水电机绕组线	QQV	线芯截面 0.6～11.0 mm²	Y(90)	聚乙烯绝缘耐水性能较好	槽满率低，绕制线圈时易损伤绝缘层	潜水电机绕组

续表

产品名称	型号	规格	特点			主要用途
			耐温等级℃	优点	局限性	
湿式潜水电机绕组线	—	线芯截面 0.5～7.5 mm²	Y(90)	(1) 聚乙烯绝缘耐水性良好 (2) 尼龙护套机械强度高	槽满率低	潜水电机绕组

注：① 宽、高系指多根漆包线绞合、压缩成形后的尺寸。
② 指在油中或用浸渍漆处理后的耐温等级

1. 换位导线

换位导线是由多根漆包线组成的，其外形如图 3－15 所示。

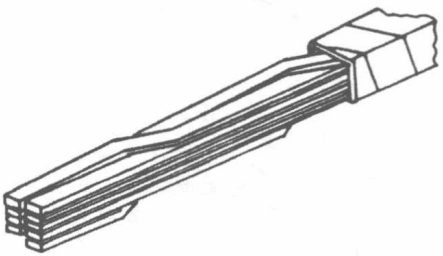


图 3－15　换位导线外形图

2. 潜水电机绕组线

潜水电机绕组线一般为铜线线芯，较大的线芯由多股导线绞制而成，线芯截面为 0.5～7.5 mm²，其结构如图 3－16 所示。图 b 为两层聚乙烯绝缘，中间加阻止层，以防局部击穿，阻止层一般采用尼龙、硅油等绝缘材料。潜水电机绕组线能在交流电压 500 V、温度 60 ℃、工作水压不超过 60 N/mm² 条件下长期工作。

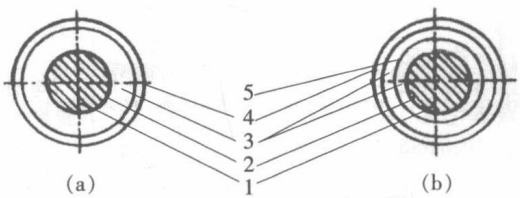


图 3－16　潜水电机绕组线结构示意图

1-导体；2-导体封闭层；3-聚乙烯绝缘层；4-尼龙层；5-阻止层

3. 高频绕组线

高频绕组线的规格尺寸见表 3－87。

表 3-87　高频绕组线规格尺寸

规格(mm) 直径×根数	最大外径(mm)		规格(mm) 直径×根数	最大外径(mm)	
	SQJ	SEQJ		SQJ	SEQJ
0.05×3	0.21	0.25	0.07×49	0.81	0.87
0.05×5	0.25	0.30	0.08×3	0.29	0.33
0.05×7	0.27	0.32	0.08×5	0.34	0.39
0.05×10	0.34	0.39	0.08×7	0.37	0.41
0.05×16	0.39	0.43	0.08×40	0.86	0.92
0.05×21	0.43	0.48	0.10×5	0.40	0.45
0.06×7	0.30	0.35	0.10×7	0.45	0.50
0.06×12	0.39	0.44	0.10×10	0.57	0.62
0.06×14	0.41	0.46	0.10×12	0.58	0.64
0.06×16	0.44	0.49	0.10×14	0.62	0.67
0.07×3	0.26	0.30	0.10×21	0.73	0.78
0.07×5	0.31	0.35	0.10×28	0.87	0.92
0.07×7	0.34	0.38	0.11×10	0.61	0.66
0.07×10	0.43	0.48	0.11×12	0.63	0.68
0.07×12	0.44	0.49	0.12×7	0.51	0.56
0.07×14	0.47	0.52	0.12×12	0.67	0.73
0.07×16	0.49	0.54	0.15×7	0.60	0.65
0.07×21	0.54	0.59	0.15×21	1.00	1.06
0.07×24	0.60	0.65	0.17×7	0.66	0.71
0.07×28	0.64	0.69	0.19×7	0.72	0.77
0.07×35	0.69	0.74	0.19×10	0.94	1.00

4. 中频绕组线

中频绕组线用聚酯漆包圆铜线绞合并压成扁形，外面再用玻璃丝编织而成。其绝缘厚度 $A-a$ 不大于 0.33 mm，$B-b$ 不大于 0.40 mm。规格尺寸见表 3-88。

表 3-88　中频绕组线规格尺寸

a(mm)	2.1	2.4	2.8	3.3	3.8	4.4	5.1	5.9	6.9
偏差(mm)	+0.2 ～ −0.4	+0.2 ～ −0.4	+0.2 ～ −0.4	+0.3 ～ −0.6	+0.3 ～ −0.6	+0.3 ～ −0.6	+0.3 ～ −0.6	+0.3 ～ −0.6	+0.3 ～ −0.6

续表

b (mm)	偏差 (mm)	根数/漆包线直径(mm)								
2.8	+0.2～−0.4	19/0.49	19/0.53	19/0.57						
3.3	+0.3～−0.6	19/0.53	19/0.57	19/0.62	19/0.67					
3.8	+0.3～−0.6	19/0.57	19/0.62	19/0.67	19/0.72	37/0.55				
4.4	+0.3～−0.6	19/0.62	19/0.67	19/0.72	37/0.55	37/0.59	37/0.64			
5.1	+0.3～−0.6		19/0.72	37/0.55	37/0.59	37/0.64	37/0.68	37/0.74		
5.9	+0.3～−0.6			37/0.59	37/0.64	37/0.68	37/0.74	61/0.62	61/0.67	
6.9	+0.3～−0.6				37/0.68	37/0.74	61/0.62	61/0.67	61/0.72	61/0.77
8.0	+0.3～−0.6					61/0.62	61/0.67	61/0.72	61/0.77	
9.3	+0.3～−0.6						61/0.72	61/0.77		

五、电磁线的选用

不同类型的电工产品和仪器仪表等，对电磁线的性能要求也不相同，为满足要求，目前已生产出各种不同性能的电磁线可供选择。选择时应根据产品的使用条件和制造工艺，有主次地分析对电磁线的有关性能要求，对所提供的电磁线进行比较，在满足主要性能要求的前提下，在选用电磁线时应重点考虑下列性能、指标：

(1) 电性能　导电线芯的电导率要合格，绝缘层要有足够稳定的耐电压能力和绝缘电阻。另外还要根据具体情况考虑选用有合适的介质损耗因数、Q 值、无磁性等要求的电磁线。

(2) 力学性能　根据所绕制的线圈形状和内径，选用柔软性适当的电磁线。在线圈绕制过程中，绝缘层应能承受磨刮、扭绞、弯曲以及拉伸压缩。为保护绝缘层不被损伤，应根据卷绕速度、弯曲半径、嵌线松紧等不同情况，选用具备适当性能的电磁线。

(3) 耐热等级与水热性能　根据产品所允许的温升或线圈和绕组中可能出现的最高热点温度，选用相应耐热等级的电磁线，同时还应留有适当的裕度。对经常出现过载的产品，要选用热冲击及软化击穿温度较高的电磁线。

(4) 相容性　电磁线与有关组合绝缘材料的相容性，是选用和使用电磁线必须考虑的。绝缘浸渍漆对电磁线的相容性影响很大。

(5) 空间因素　提高利用空间因素，缩小产品的体积。

(6) 环境条件及其他因素　也是考虑电磁线使用的一个方面。

电工产品选用电磁线选例见表 3－89。

表 3-89　电工产品

种类	电磁线名称	耐温等级 ℃	交流发电机		
			大型	中小型	一般用途
漆包线	油性漆包线	A(105)			
	缩醛漆包线	E(120)			●②
	聚氨酯漆包线	E(120)			
	环氧漆包线	E(120)			
	聚酯漆包线	B(130)			●
	聚酯亚胺漆包线	F(155)			●
	聚酰胺酰亚胺漆包线	200		●	
	聚酰亚胺漆包线	220			
	自黏直焊漆包线	E(120)			
	自黏性漆包线	E(120),B(130)			
	耐制冷剂漆包线	A(105)			
	聚酯亚胺-聚酰胺酰亚胺漆包线	F(155)		●	
绕包线	纸包线	A(105)			
	玻璃丝包线	B(130),H(180)		●	●
	玻璃丝包漆包线	E(120),F(155),H(180)	●	●	
	丝包线	A(105)			
	丝包漆包线	A(105)			
	聚酰亚胺薄膜绕包线	220	●		
	玻璃丝包聚酯薄膜绕包线	E(120)	●	●	
其他电磁线	氧化膜铝带(箔)	—			
	高频绕组线	Y(90)			
	换位导线	A(105)			

注:① 包括互感器、调压器、电抗器等。
② 表中注有“●”者,表示可供选用的电磁线

选用电磁线举例

交流电动机							直流电动机	变压器①					仪表信号电设备用线圈	电力系统用线圈
通用大型	通用中小型	通用微型	起重、辊道型	防爆型	耐制冷剂型	电动工具	轧钢、牵引型	高温干式	一般干式	油浸大型	油浸中小型	高频		
												●	●	
	●	●				●			●		●	●	●	●
		●										●	●	
	●				●			●	●		●	●		●
	●	●					●	●	●			●	●	●
	●	●	●	●	●	●	●	●	●					●
	●	●	●		●	●	●	●						
						●		●						
		●											●	
		●											●	
					●						●			●
	●	●	●	●	●	●	●	●						
										●	●			
●	●		●	●			●	●	●					●
●			●	●			●	●	●					●
													●	
													●	
●							●	●						
●	●		●	●										
								●	●					
													●	
									●					

第三节　电气装备用电线电缆

电气装备用电线电缆类别较多本手册仅介绍通用橡套软电缆和一些常用的橡套电缆。

电气装备用电线电缆型号中字母的含义见表 3－90。

表 3－90　电气装备用电线电缆型号中字母含义

分类代号或用途	绝　缘	护　套	派　生
A－安装线	V－聚氯乙烯	V－聚氯乙烯	P－屏蔽
B－布电线	F－氟塑料	H－橡套	R－软
F－飞机用低压线	Y－聚乙烯	B－编织套	S－双绞
Y－一般工业移动电器用线	X－橡皮	L－腊克	B－平行
T－天线	ST－天然丝	N－尼龙套	D－带形
HR－电话软线	SE－双丝包	SK－尼龙丝	T－特种
－配线	VZ－阻燃聚氯乙烯	VZ－阻燃聚氯乙烯	P_1－缠绕屏蔽
I－电影用电缆	R－辐照聚乙烯		
SB－无线电装置用电缆	B－聚丙烯		

一、通用橡套软电缆

通用橡套软电缆的导电线芯采用软铜线束绞，结构柔软，大截面的导线表面采用纸包，改善弯曲性能；绝缘采用天然丁苯橡皮，抗老化性能较好；护层采用同样橡皮，户外型产品采用全氯丁橡胶或以氯丁橡胶为主的混合橡皮，抗老化性能及机械性能均较好。产品结构分轻型、中型、重型三类。一般轻型橡套电缆适用于日用电器、小型电动设备，柔软、轻巧、弯曲性能好；中型橡套电缆普遍用于工农业各部门；重型橡套电缆用于港口机械、探照灯、大型排灌站等场合。通用橡套电缆的产品品种见表 3－91，其产品规格见表 3－92。

表 3－91　普通橡套软电缆产品品种

产品名称	型　号	导线长期工作最高允许温度（℃）	主要用途
轻型通用橡套电缆	YQ	65	连接交流电压 250 V 及以下轻型移动电气设备和日用电器
户外型通用轻型橡套电缆	YQW		同上，具有耐气候性和一定的耐油性能
中型通用橡套电缆	YZ		连接交流电压 500 V 及以下各种移动电气设备（包括各种农用电动装置）

续表

产品名称	型号	导线长期工作最高允许温度(℃)	主要用途
户外型通用中型橡套电缆	YZW	65	同上,具有耐气候性和一定的耐油性能
重型通用橡套电缆	YC		同YZ,但能承受较大的机械外力作用,如港口机械用
户外型通用重型橡套电缆	YCW		同上,具有耐气候性和一定的耐油性能

注:线芯长期允许工作温度不超过65℃;"W"型派生电缆具有耐气候和一定的耐油性能,适宜于在户外或接触油污的场合使用

表3-92 通用橡套软电缆产品规格

型号	电压等级(V)	主线芯导线截面(mm^2)	芯数	
			主线芯	地线芯
YQ、YQW	250	0.3～0.75	2,3	—
YZ、YZW	500	0.5～6	2,3	—
			3	1
YC、YCW	500	2.5～120	1,2,3	—
			3	1

300/300VYQ,YQW轻型橡套软电缆结构尺寸见表3-93。

表3-93 300/300VYQ,YQW轻型橡套软电缆结构尺寸

芯数×标称截面(mm^2)	导电线芯	绝缘标称厚度(mm)	护套标称厚度(mm)	平均外径(mm)		20℃时导体电阻(Ω/km)不大于	
	根数/单线标称直径(mm)			下限	上限	铜芯	镀锡铜芯
2×0.3	16/0.15	0.5	0.7	4.6	6.6	69.2	71.2
2×0.5	28/0.15	0.5	0.7	5.0	7.2	39.0	40.1
3×0.3	16/0.15	0.5	0.7	4.8	7.0	69.2	71.2
3×0.5	28/0.15	0.5	0.7	5.2	7.6	39.0	40.1

300/500VYZ,YZW中型橡套软电缆结构尺寸见表3-94。

450/750VYC,YCW重型橡套软电缆结构尺寸见表3-95。

表 3-94　300/500VYZ,YZW 中型橡套软电缆结构尺寸

芯数×标称截面(mm²)	导电线芯根数/单线标称直径(mm)	绝缘标称厚度(mm)	护套标称厚度(mm)	平均外径(mm)		20 ℃时导体电阻(Ω/km)不大于	
				下限	上限	铜芯	镀锡铜芯
2×0.75	24/0.20	0.6	0.8	6.0	8.2	26.0	26.7
2×1	32/0.20	0.6	0.9	6.4	8.8	19.5	20.0
2×1.5	30/0.25	0.8	1.0	8.9	10.5	13.3	13.7
2×2.5	49/0.25	0.9	1.1	9.4	12.5	7.98	8.21
2×4	56/0.30	1.0	1.2	11.0	14.0	4.95	5.09
2×6	84/0.30	1.0	1.3	12.5	17.0	3.30	3.39
3×0.75	24/0.20	0.6	0.9	6.6	8.8	26.0	26.7
3×1	32/0.20	0.6	0.9	6.8	9.2	19.5	20.0
3×1.5	30/0.25	0.8	1.0	8.4	11.0	13.3	13.7
3×2.5	49/0.25	0.9	1.1	10.0	13.0	7.98	8.21
3×4	56/0.30	1.0	1.2	11.5	14.5	4.95	5.09
3×6	84/0.30	1.0	1.3	13.0	18.0	3.30	3.39
4×0.75	24/0.20	0.6	0.9	7.2	9.6	26.0	26.7
4×1	32/0.20	0.6	0.9	7.6	10.0	19.5	20.0
4×1.5	30/0.25	0.8	1.1	9.4	12.5	13.3	13.7
4×2.5	49/0.25	0.9	1.2	11.0	14.0	7.98	8.21
4×4	56/0.30	1.0	1.3	13.0	16.5	4.95	5.09
4×6	84/0.30	1.0	1.4	14.5	20.0	3.30	3.39
四芯三大一小结构						（主线芯导体电阻）	
3×1.5+1×1.0	30/0.25 +32/0.20	0.8/0.6	1.1	9.4	12.0	13.3	13.7
3×2.5+1×1.5	49/0.25 +30/0.25	0.9/0.8	1.2	11.0	14.0	7.98	8.21
3×4+1×2.5	56/0.30 +49/0.25	1.0/0.9	1.3	13.0	16.0	4.95	5.09
3×6+1×4	84/0.30 +56/0.30	1.0/1.0	1.4	14.5	19.5	3.30	3.39
5×0.75	24/0.20	0.6	1.0	8.0	11.0	26.0	26.7
5×1	32/0.20	0.6	1.0	8.4	11.5	19.5	20.0
5×1.5	30/0.25	0.8	1.1	10.0	13.5	13.3	13.7
5×2.5	49/0.25	0.9	1.3	12.5	15.5	7.98	8.21
5×4	56/0.30	1.0	1.4	14.5	18.0	4.95	5.09
5×6	84/0.30	1.0	1.6	16.5	22.5	3.30	3.39

注：四芯三大一小结构中接地线芯的直流电阻值与同型号相应截面主线芯相同

表 3-95　450/750VYC,YCW 重型橡套软电缆结构尺寸

芯数×标称截面（mm^2）	导电线芯根数/单线标称直径（mm）	绝缘标称厚度（mm）	护套标称厚度（mm）			平均外径（mm）		20 ℃时导体电阻（Ω/km）不大于	
			一层	双层		下限	上限	铜芯	镀锡铜芯
				内层	外层				
1×1.5	30/0.25	0.8	1.4			5.6	7.2	13.3	13.7
1×2.5	49/0.25	0.9	1.4			6.4	8.0	7.98	8.21
1×4	56/0.30	1.0	1.5			7.2	9.0	4.95	5.09
1×6	84/0.30	1.0	1.6			8.0	11.0	3.30	3.39
1×10	84/0.40	1.2	1.8			9.8	13.0	1.91	1.95
1×16	126/0.40	1.2	1.9			11.0	14.5	1.21	1.24
1×25	196/0.40	1.4	2.0			12.5	16.5	0.780	0.795
1×35	276/0.40	1.4	2.2			14.0	18.5	0.554	0.565
1×50	396/0.40	1.6	2.4			16.5	21.0	0.386	0.393
0.272	0.277								
1×95	475/0.50	1.8	2.8			21.0	26	0.206	0.210
1×120	608/0.50	1.8	3.0			23.0	28.5	0.161	0.164
1×150	756/0.50	2.0	3.2			25.0	32.0	0.129	0.132
1×185	925/0.50	2.2	3.4			27.5	34.5	0.106	0.108
1×240	1 221/0.50	2.4	3.5			30.5	38.0	0.080 1	0.081 7
1×300	1 525/0.50	2.6	3.6			33.5	41.5	0.064 1	0.065 4
1×400	2 013/0.50	2.8	3.8			37.5	46.5	0.048 6	0.049 5
2×1.5	30/0.25	0.8	1.5			9.0	11.5	13.3	13.7
2×2.5	49/0.25	0.9	1.7			10.5	13.5	7.98	8.21
2×4	56/0.30	1.0	1.8			12.0	15.0	4.95	5.09
2×6	84/0.30	1.0	2.0			13.5	18.5	3.30	3.39
2×10	84/0.40	1.2	3.1	—	—	18.5	24.0	1.91	1.95
2×16	126/0.40	1.2	3.3	1.3	2.0	21.0	27.5	1.21	1.24
2×25	196/0.40	1.4	3.6	1.4	2.2	24.5	31.5	0.780	0.795
2×35	276/0.40	1.4	3.9	1.5	2.4	27.5	35.5	0.554	0.565
2×50	396/0.40	1.6	4.3	1.7	2.6	32.0	41.0	0.386	0.393
2×70	360/0.50	1.6	4.6	1.8	2.8	36.0	46.0	0.272	0.227
2×95	475/0.50	1.8	5.0	2.0	3.0	40.5	50.5	0.206	0.210
3×1.5	30/0.25	0.8	1.6	—	—	9.6	12.5	13.3	13.7
3×2.5	49/0.25	0.9	1.8	—	—	11.5	14.5	7.98	8.21
3×4	56/0.30	1.0	1.9	—	—	13.0	16.0	4.95	5.09
3×6	84/0.30	1.0	2.1	—	—	14.5	20.0	3.30	3.39
3×10	84/0.40	1.2	3.3	—	—	20.0	25.5	1.91	1.95
3×16	126/0.40	1.2	3.5	1.4	2.1	22.5	29.5	1.21	1.24

续表

芯数×标称截面（mm²）	导电线芯根数/单线标称直径（mm）	绝缘标称厚度（mm）	护套标称厚度（mm）			平均外径（mm）		20 ℃时导体电阻（Ω/km）不大于	
			一层	双层		下限	上限	铜芯	镀锡铜芯
				内层	外层				
3×25	196/0.40	1.4	3.8	1.5	2.3	26.5	34.0	0.780	0.795
3×35	276/0.40	1.4	4.1	1.6	2.5	29.5	38.0	0.554	0.565
3×50	396/0.40	1.6	4.5	1.8	2.7	34.5	43.5	0.386	0.393
3×70	360/0.50	1.6	4.8	1.9	2.9	38.5	49.5	0.272	0.277
3×95	475/0.50	1.8	5.3	2.1	3.2	44.0	54.0	0.206	0.210
3×120	608/0.50	1.8	5.6	2.2	3.4	48.0	59.0	0.161	0.164
3×150	756/0.50	2.0	6.0	2.4	3.6	53.0	66.5	0.129	0.132
4×1.5	30/0.25	0.8	1.7	—	—	10.5	13.5	13.3	13.7
4×2.5	49/0.25	0.9	1.9	—	—	12.5	15.5	7.98	8.21
4×4	56/0.30	1.0	2.0	—	—	14.5	18.0	4.95	5.09
4×6	84/0.30	1.0	2.3	—	—	16.5	22.0	3.30	3.39
4×10	84/0.40	1.2	3.4	—	—	21.5	28.0	1.91	1.95
4×16	126/0.40	1.2	3.6	1.4	2.2	24.5	32.0	1.21	1.24
4×25	196/0.40	1.4	4.1	1.6	2.5	29.5	37.5	0.780	0.795
4×35	276/0.40	1.4	4.4	1.7	2.7	33.0	42.0	0.554	0.565
4×50	396/0.40	1.6	4.8	1.9	2.9	38.0	48.5	0.386	0.393
4×70	360/0.50	1.6	5.2	2.0	3.2	43.0	55.0	0.272	0.277
4×95	475/0.50	1.8	5.9	2.3	3.6	49.0	60.5	0.206	0.210
4×120	608/0.50	1.8	6.0	2.4	3.6	53.0	65.5	0.161	0.164
4×150	756/0.50	2.0	6.5	2.6	3.9	59.0	74.0	0.129	0.132
四芯三大一小结构								（主线芯导体电阻）	
3×2.5+1×1.5	49/0.25 +30/0.25	0.9/0.8	2.0	—	—	12.5	15.5	7.98	8.21
3×4+1×2.5	56/0.30 +49/0.25	1.0/0.9	2.0	—	—	14.5	17.5	4.95	5.09
3×6+1×4	84/0.30 +56/0.30	1.0/1.0	2.2	—	—	16.0	21.0	3.30	3.39
3×10+1×6	84/0.40 +84/0.30	1.2/1.0	3.0	—	—	20.5	26.5	1.91	1.95
3×16+1×6	126/0.40 +84/0.30	1.2/1.0	3.5	1.3	2.2	23.0	30.5	1.21	1.24
3×25+1×10	196/0.40 +84/0.40	1.4/1.2	4.0	1.6	2.4	28.0	35.5	0.780	0.795

续表

芯数×标称截面（mm^2）	导电线芯根数/单线标称直径（mm）	绝缘标称厚度（mm）	护套标称厚度（mm）			平均外径（mm）		20 ℃时导体电阻（Ω/km）不大于	
			一层	双层		下限	上限	铜芯	镀锡铜芯
				内层	外层				
3×35+1×10	276/0.40 +84/0.40	1.4/1.2	4.0	1.6	2.4	30.0	38.5	0.554	0.565
3×50+1×16	396/0.40 +126/0.40	1.6/1.2	5.0	2.0	3.0	36.0	46.0	0.386	0.393
3×70+1×25	360/0.50 +196/0.40	1.6/1.4	5.0	2.0	3.0	40.0	51.0	0.272	0.277
3×95+1×35	475/0.50 +276/0.40	1.8/1.4	5.0	2.0	3.0	44.0	55.0	0.206	0.210
3×120+1×35	608/0.50 +276/0.40	1.8/1.4	5.0	2.0	3.0	46.5	59.0	0.161	0.164
3×150+1×50	756/0.50 +396/0.40	2.0/1.6	5.0	2.0	3.0	52.0	66.0	0.129	0.132
5×1.5	30/0.25	0.8	1.8	—	—	11.5	15.0	13.3	13.7
5×2.5	49/0.25	0.9	2.0	—	—	13.5	17.0	7.98	8.21
5×4	56/0.30	1.0	2.2	—	—	16.0	19.5	4.95	5.09
5×6	84/0.30	1.0	2.5	—	—	18.0	24.5	3.30	3.39
5×10	84/0.40	1.2	3.6	—	—	24.0	31.0	1.91	1.95
5×16	126/0.40	1.2	3.9	1.5	2.4	27.0	35.5	1.21	1.24
5×25	196/0.40	1.4	4.4	1.7	2.7	32.5	41.5	0.780	0.795

注：四芯三大一小结构中接地线芯的直流电阻值与同型号相应截面主线芯相同

二、电机、电器引出线

电机、电器引出线　其工作电压为 0.38～10 kV，耐温与电机的耐温等级要相配，且长期工作温度要比电机最高工作温度低 50～70 ℃，并要求电线耐浸渍、耐烘焙、耐寒、不延燃。常用绝缘层有耐热橡皮、丁腈-聚氯乙烯复合物、乙丙橡胶、硅橡胶或氟橡胶，护套为丁腈橡胶、氯丁橡胶或氯醚橡胶。引接线的导体都用铜芯，采用柔软结构，导体单根铜线都镀锡。

电机、电器引出线型号、名称用途见表 3-96。

表 3-96　电机、电器引出线的型号、名称和用途

型　号	名　称	主　要　用　途	标准号
JBF	丁腈聚氯乙烯复合物绝缘引接线	供交流电压 500 V 及以下 B 级绝缘电机、电器作引接线	JB1138—76
JBQ	橡皮绝缘丁腈护套引接线	供交流电压 1140 V 及以下 B 级绝缘电机、电器作引接线	JB1171—76
JBHF	6 kV 橡皮绝缘氯丁护套引接线	供交流电压 5 kV，B 级绝缘电机电器作引接线	JB1813—76
JBYH	氯磺化聚乙烯橡皮绝缘引接线	用于电压 6 kV 及以下的 B 级绝缘电机、电器引接线	JB1812—77
JHGX	硅橡皮绝缘电机引出线	用于交流 500 V 或直流 1 000 V 及以下电机、电器引出线	企业标准
JFFB JCFB	氟玻璃绝缘电机引接线	适用于 500 V 及以下 F 级、C 级绝缘用四氟玻璃绝缘引接线	企业标准
JFE	乙丙橡皮绝缘引出线	适用于交流 500 V、1 140 V、F 级绝缘电机、电器引接线	企业标准
JBYS-10 kV	10 kV 氯磺化聚乙烯绝缘高压电机引接线	适用于交流 10 kV 及以下的 B 级绝缘电机、电器的引接线	企业标准
JFEM	乙丙橡皮绝缘氯醚护套 F 级引接线	适用于交流电压 500 V、1 140 V、600 V 及以下的 F 级绝缘电机、电器引接线用	企业标准

电机、电器引出线的规格见表 3-97。

表 3-97　电机、电器引出线的规格

型号		导线截面（mm^2）	绝缘厚度（mm）	电线最大外径（mm）	制造长度
JBF		0.030～50	0.4～1.6	1.1～14.7	电线的交货长度不小于 20 m，允许长度不小于 1.5 m 的短线段交货，其数量应不超过交货总长度的 10%；
JBQ	500 V	0.20～120	0.6～1.6	3.9～24.6	
	1 140 V	0.50～120	1.0～1.8	5.1～25.0	
JBHF		6～120	3.5	15.2～30.8	电线的交货长度不小于 20 m，允许长度不小于 1.5 m 的短线段交货，其数量应不超过交货总长度的 10%；
JBYH	500 V	0.2～120	0.8～2.0	2.4～21.6	
	1 140 V	0.5～120	1.2～2.0	3.8～21.6	
	6 000 V	6～120	5	14.5～28.0	
JHGX		0.75～240	1.2～3.0	3.7～29.1	

续表

型号		导线截面（mm^2）	绝缘厚度（mm）	电线最大外径（mm）	制造长度
JFFB JCFB		0.25～95.0	0.60～1.4	2.3～17.6	15 m，允许 1.5 m 及以上的短线段交货，其数量不超过总交货长度 20%
JFE	500 V	0.75～6		3.2～5.6	电线的交货长度不小于 20 m，允许长度不小于 1.5 m 的短线段交货，其数量应不超过交货总长度的 10%
	1 140 V	0.75～6		3.6～6.0	
JBYS	10 kV	6.0～95	5.5	16.2～27.3	
JFEM	500 V	0.75～120		4.0～22.8	
	1 140 V	0.75～120		4.8～23.2	
	6 000 V	6～120		13.8～28.0	

电机、电器引出线的直流电阻见表 3－98。

表 3－98　电机、电器引出线直流电阻

导线截面（mm^2）	直流电阻（Ω/km）	
	JBQ、JBHF、JBYH、JFE、JFEM	JBF
0.03	—	693
0.06	—	339
0.12	—	145
0.2	89.9	84.9
0.3	67.3	63.6
0.4	46.9	44.3
0.5	38.5	36.4
0.75	25.7	24.3
1	18.9	18.7
1.5	12.6	11.9
2.5	7.59	7.17
4	4.54	4.41
6	3.00	2.92
10	1.78	1.73
16	1.18	1.14
25	0.716	0.695
35	0.528	0.512
50	0.384	0.373
70	0.270	—

续表

导线截面(mm²)	直流电阻(Ω/km)	
	JBQ、JBHF、JBYH、JFE、JFEM	JBF
95	0.197	—
120	0.158	—
150	—	—
185	—	—
240	—	—

JBF 型引接线耐电压性能见表 3－99；JBQ 型引接线耐电压性能见表 3－100，JBYS 型引接线耐电压性能见表 3－101。

表 3－99　JBF 型引接线耐电压性能

绝缘厚度(mm)		0.4	0.5～0.7	1.0	1.2	1.4	1.6 及以上
试验电压(V)	火花耐压试验	2 000	4 000	6 000	7 000	8 000	9 000
	浸水工频耐压试验(浸入水中 6 h 后，耐压 1 min)	1 000	1 500	2 000	2 000	2 000	2 000

表 3－100　JBQ 型引接线耐电压性能

绝缘厚度(mm)			0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6 及以上
试验电压(V)	火花耐压试验		4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000
	浸水工频耐压试验(浸入水中 6 h 后，耐压 5 min)	工作电压	500			1 140		
		试验电压	2 000			3 500		

表 3－101　JBYS 型引接线耐电压性能

产品电压等级(V)	浸水工频耐压试验(V，浸入水中 6 h 后，耐压 5 min)
500	2 000
1 140	3 500
6 000	15 000

三、电器、仪表安装线

电器、仪表安装线的型号、名称和用途见表 3－102。

表 3-102　电器、仪表安装线的型号、名称及用途

型　号	名　　称	主要用途
ASV ASVR ASVRP	纤维及聚氯乙烯绝缘安装线 纤维及聚氯乙烯绝缘安装软线 纤维及聚氯乙烯绝缘屏蔽安装软线	供电器及仪表线路安装用
ACSEL	薄膜天然丝腊克安装线	供弱电流电器及仪表固定安装用
ACBL ACBLP	薄膜玻璃丝腊克安装线 薄膜玻璃丝腊克屏蔽安装线	供弱电流电器及仪表固定安装用
ASER ASEBR AKBR AKER AKEBR AKEBJR	天然丝双绕包软线 天然丝双绕包及编织软线 合成纤维编织软线 合成纤维双绕包软线 合成纤维双绕包及编织软线 合成纤维双绕包及编织涂胶软线	产品为镀锡铜导线，供弱电流电器及仪表固定安装用
AKBLR ASMLR ASMLRP ABEBL ABEBLP AQSEL AVLR AVLRP AVBL AVBLP	合成纤维编织腊克软线 天然丝及棉纱绕包棉纱编织腊克软线 同上。加屏蔽层 玻璃丝双绕包及编织腊克软线 同上。加屏蔽层 天然丝双绕包，腊克电线 聚氯乙烯、纱编织、腊克软线 聚氯乙烯、纱编织、腊克软线，加屏蔽层 聚氯乙烯、玻璃丝编织、腊克软线 聚氯乙烯、玻璃丝编织、腊克软线，加屏蔽层	产品为镀锡铜线，适用于弱电流电器及仪表线路安装用

电器、仪表安装线的规格见表 3-103。

表 3-103　电器、仪表安装线规格

型　号	导线截面(mm^2)	电线最大外径(mm)	制造长度
ASV ASVR ASVRP	0.07～1.50 0.12～1.50 0.12～1.50	1.1～2.7 1.3～3.0 2.0～3.3(1 芯) 4.6～5.8(2 芯) 4.9～6.3(3 芯)	100 m，允许以 3 m 及以上的短线段交货，其数量不超过总交货长度 10% (不少于 20 m)
ACSEL ACBL ACBLP	0.05～0.50 0.35～4.0 0.35～4.0	1.2～2.0 2.1～4.4 2.7～5.0	

续表

型　号	导线截面(mm²)	电线最大外径(mm)	制造长度
ASER	0.06～2.50	0.7～1.5	
ASEBR	0.06～2.50	1.0～3.0	
AKBR	0.05～0.50	0.7～1.5	
AKEBR	0.05～2.50	1.0～3.0	
AKEBJR	0.05～2.50	1.0～3.0	
AKBLR	0.20～1.00	1.6～2.4	100 m，允许以 3 m 及以上的短线段交货，其数量不超过总交货长度 10%
ASMLR	0.20～1.00	1.8～2.6	
ASMLRP	0.20～1.00	2.4～3.1	
ABEBL	0.20～1.50	1.6～2.6	
ABEBLP	0.20～1.50	2.2～3.2	（不少于 20 m）
AQSEL	0.10～0.75	1.0～1.7	
AVLR	0.35～5	2.4～5.5	
AVLRP	0.35～5	3.1～6.3	
AVBL	0.35～5	2.2～5.4	
AVBLP	0.35～5	2.8～6.0	

四、测量仪表、计算机用电缆

1. 阻燃型测量仪表、计算机用电缆

阻燃型测量仪表、计算机用电缆的型号、名称及使用特性见表 3－104。电缆供各机房和测量仪表及计算中心连接用，可传输电流和信号，并具有优异的防干扰性能，可用于室内及敷设于槽架、电缆槽道、沟内及管道内；电缆结构有二线组及三线组，其结构及规格分别见表 3－105 及表 3－106。

表 3－104　阻燃型测量仪表、计算机用电缆的型号、名称及使用特性

型号	名　称	额定电压(V)	电缆长期允许工作温度(℃)	短路时(5S)导体允许最高温度(℃)	敷设时允许最低温度(℃)	电缆允许最小弯曲半径	标准号
ZR－YEPH	乙丙橡皮绝缘线组屏蔽阻燃橡皮护套电缆	300	90	250	－15	不小于 10 D（电缆外径）	企业标准

表 3-105　ZR-YEPH 型二线组电缆结构及规格

规　格	主线芯			通信线			电缆计算外径(mm)	20 ℃时电缆导电线芯直流电阻不大于(Ω/km)	20 ℃时电缆线芯绝缘电阻不小于(MΩ/km)
	二线组(组)	截面(mm^2)	导线结构(根数/线径)(mm)	芯数(芯)	截面(mm^2)	导线结构(根数/线径)(mm)			
1(2×1.5 mm^2)+(1×1 mm^2)	1	1.5	7/0.52	0	1.0	7/0.43	10.5	13.5	1 123
4(2×1.5 mm^2)+(1×1 mm^2)	4			1			18.5	14.1	
7(2×1.5 mm^2)+(1×1 mm^2)	7			1			22.3		
10(2×1.5 mm^2)+(1×1 mm^2)	10			1			28.1		

表 3-106　ZR-YEPH 型三线组电缆结构及规格

规格	主线芯			电缆计算外径(mm)	20 ℃时电缆导电线芯直流电阻不大于(Ω/km)	20 ℃时电缆线芯绝缘电阻不小于(MΩ/km)
	三线组(组)	截面(mm^2)	导线结构(根数/线径)(mm)			
	1	1.5	7/0.52	11.0	13.5	1 123

2. 计算机用多对电缆

产品适用于电子计算机、弱电仪器设备等的信号传输，型号为 JVV-JVPV 型，使用环境温度为－40～65 ℃，其规格结构数据见表 3-107，交货长度见表 3-108。

表 3-107　JVV-JVPV 型计算机用电缆的规格及结构

对数	线芯标称截面(mm)	线芯结构		电缆最大外径(mm)		20 ℃时的直流电阻不大于(Ω/km)	计算重量(kg/km)	
		根数/直径(mm)	外径(mm)	JVV	JVPV		JVV	JVPV
2	0.08	7/0.127	0.381	4.7	5.2	226	19.43	33.25
4	0.08	7/0.127	0.381	5.6	6.1		31.18	46.97
8	0.08	7/0.127	0.381	7.0	7.5		53.43	71.48
12	0.08	7/0.127	0.381	8.0	8.5		71.79	93.10
18	0.08	7/0.127	0.381	10.4	10.9		118.51	152.11
24	0.08	7/0.127	0.381	11.12	11.8		139.29	175.99
30	0.08	7/0.127	0.381	12.6	13.2		179.32	220.87

续表

对数	线芯标称截面(mm)	线芯结构		电缆最大外径(mm)		20℃时的直流电阻不大于(Ω/km)	计算重量(kg/km)	
		根数/直径(mm)	外径(mm)	JVV	JVPV		JVV	JVPV
36	0.08	7/0.127	0.381	13.7	14.3	226	217.34	262.99
43	0.08	7/0.127	0.381	15	15.7		266.85	321.32
50	0.08	7/0.127	0.381	15.0	16.8		302.98	362.88
61	0.08	7/0.127	0.381	17.7	18.6		388.18	470.21
75	0.08	7/0.127	0.381	19.2	20.1		447.36	535.10
91	0.08	7/0.127	0.381	20.7	21.6		553.82	649.15
100	0.08	7/0.127	0.381	21.6	22.1		579.46	674.88
2	0.2	7/0.2	0.6		6.7	90		56.42
4	0.2	7/0.2	0.6		8.9			92.48
8	0.2	7/0.2	0.6		10.9			153.94
12	0.2	7/0.2	0.6		14.0			217.53
18	0.2	7/0.2	0.6		17.4			340.75

表 3-108　JVV-JVPV 型计算机用电缆的交货长度

对数×截面(mm^2)	交货长度(m)	短段电缆长度(m)	短段电缆占总长度的百分数
2×0.08～100×0.08	30 以上	5～29	20
2×0.2～4×0.2	50 以上	5～49	
8×0.2～18×0.2	50 以上	10～49	

3. 阻燃聚氯乙烯绝缘黏合带状电缆

产品适用于电气、仪表、电视机、计算机等设备的内部连接。电缆额定电压交流 300 V，最高工作温度 105 ℃，其型号及技术数据见表 3-109。

表 3-109　阻燃聚氯乙烯绝缘黏合带状电缆的型号及技术数据

型号	芯数	标称截面(mm^2)	根数/直径(mm)	绝缘厚度(mm)		绝缘外径 D	电缆尺寸			20℃时直流电阻不大于(Ω/km)	计算重量(kg/km)	20℃时绝缘电阻不小于(MΩ/km)
				标称	最薄		颜色排列	厚	宽			
DVY-3-3	2～50	0.14	7/0.16	0.4	0.3	1.3	棕依红次橙循黄环绿或蓝按紫用灰户白要黑求	1.3	$D \cdot n$	139	3.41n	15
			7/0.16*								3.16n	
		0.2	1/0.6	0.4	0.3	1.5		1.5		85.9	4.68n	
			7/0.2								4.41n	
			7/0.2*	0.4	0.3	1.5		1.5		85.9	4.53n	
		0.3	16/0.15	0.4	0.3	1.6		1.6		67.4	5.22n	
		0.3	17/0.16	0.4	0.3	1.65		1.65		57.4	5.85n	
		0.35	7/0.25	0.4	0.3	1.6		1.6		54.4	5.65n	
		0.5	7/0.3	0.4	0.3	1.8		1.8		38.5	7.57n	

注：* 为整体镀锡；n 为电缆芯数

交货长度：电缆成圈交货，2～10 芯电缆，每圈 100 m 或 50 m，每圈内电缆的最短长度为 10 m，每圈内接头不多于 3 个；11～50 芯电缆，每圈一根，最短长度为 10 m。

4. 阻燃聚氯乙烯绝缘彩色带状电缆

产品的型号，使用条件及技术参数见表 3－110。

表 3－110　阻燃聚氯乙烯绝缘彩色带状电缆的型号、使用条件及技术参数

型　号	额定电压（V）	工作温度（℃）	20 ℃时直流电阻（Ω/km）不大于	20 ℃时绝缘电阻（MΩ/km）不小于	芯数	标称截面（mm^2）	根数/直径（mm）	交货长度（m）
DVY－1－2 DVY－2－1	交流 300	80	226	100	10、11、16、20、24、26、30、34、40、50、60、64	0.08	7/0.127	50±5
DVY－2－2 DVY－2－3 DVY－2－4 DVY－2－5	交流 150							

五、电焊机用软电缆

电焊机用软电缆的导线采用柔软型结构，导线外包一层聚酯薄膜绝缘带，绝缘和护套采用较好的橡皮，厚度也较大，以保证在复杂的环境条件下使用具有良好的绝缘、抗老化和机械性能。产品分铜芯橡套软电缆（YH）和铝芯橡套软电缆（YHL），铝芯电缆的线芯采用铝合金，既大大减轻了电缆重量，又能保证具有足够的机械强度。电焊机用软电缆用作电焊机二次侧接线及连接电焊钳的软电缆，其产品结构尺寸见表 3－111。工作电压 220 V。

表 3－111　电焊机用电缆结构尺寸

导线截面（mm^2）	YH			YHL		
	导线结构（根数/直径，mm）	绝缘厚度（mm）	最大外径（mm）	导线结构（根数/直径，mm）	绝缘厚度（mm）	最大外径（mm）
10	322/0.2	1.6	9.1	—	—	—
16	513/0.2	1.8	10.7	228/0.3	1.8	10.7
25	798/0.2	1.8	12.6	342/0.3	1.8	12.6
35	1 121/0.2	2.0	14.0	494/0.3	2.0	14.0
50	1 596/0.2	2.2	16.2	703/0.3	2.2	16.2

续表

导线截面（mm^2）	YH			YHL		
	导线结构（根数/直径，mm）	绝缘厚度（mm）	最大外径（mm）	导线结构（根数/直径，mm）	绝缘厚度（mm）	最大外径（mm）
70	999/0.3	2.6	19.3	999/0.3	2.6	19.3
95	1 332/0.3	2.8	21.1	1 332/0.3	2.8	21.1
120	1 702/0.3	3.0	24.5	1 702/0.3	3.0	24.5
150	2 109/0.3	3.0	26.2	2 109/0.3	3.0	26.2
185	—	—	—	2 590/0.3	3.2	28.8

六、无线电装置用电缆

无线电装置用电缆是供移动式无线电装置用的电缆，分为一般性的橡套电缆（SBH）和具有屏蔽作用的橡套电缆（SBHP）两种，其产品规格见表 3－112，工作温度为－50～50 ℃。

表 3－112　无线电装置用电缆产品规格

型　号	芯　数	额定电压（V）		
		250	500	3 000
		导线截面（mm^2）		
SBH	2～8，10，12，14	0.35～2.5	0.75～2.5	1.5～2.5
	2 及 3	4～10	4～10	—
SBHP	1～8，10，12，14	0.35～2.5	0.75～2.5	1.5～2.5
	2 及 3	4～10	4～10	—

七、摄影光源用软电缆

摄影光源用软电缆的导体线芯采用多股细铜线先束后绞制成软细的柔软型结构，绝缘层及护套采用乙丙橡皮，允许工作温度为 90 ℃，型号为 GE R－500，其规格与结构见表 3－113。

表 3-113　摄影光源软电缆规格与结构

导线芯数与截面(mm^2)				导线结构(根数/直径,mm)	绝缘厚度(mm)	护套厚度(mm)			
单芯	2 芯	2 芯平型	4 芯			单芯	2 芯	2 芯平型	4 芯
—	1.0	1.0	1.0	32/0.2	1.0	—	1.5	1.5	1.5
—	1.5	1.5	1.5	48/0.2	1.0	—	1.5	1.5	1.5
—	2.5	2.5	2.5	77/0.2	1.0	—	1.5	1.5	2.0
—	4.0	4.0	4.0	126/0.2	1.0	—	1.5	1.5	2.0
—	6.0	6.0	6.0	189/0.2	1.0	—	2.0	2.0	2.0
10	10	10	—	323/0.2	1.2	1.5	2.0	2.0	—
16	16	16	—	513/0.2	1.2	1.5	2.0	2.0	—
25	25	25	—	798/0.2	1.4	2.0	2.5	2.5	—
35	35	35	—	1 121/0.2	1.4	2.0	2.5	2.5	—
50	50	50	—	1 596/0.2	1.6	2.0	2.5	2.5	—

八、电梯电缆

电梯电缆是供高层建筑电梯及其他起重运输等设备传递信号及控制之用,是一种信号传递用控制电缆,适应自由悬吊和多次弯曲,其截面见图 3-17,其品种和用途见表 3-114。

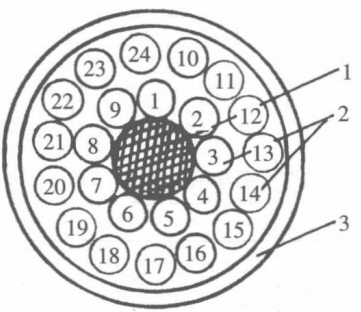


图 3-17　电梯电缆截面

1-尼龙加强绳;2-绝缘线芯;3-橡皮护套

表 3-114　电梯电缆品种和用途

产品名称	型　号	工作电压(V)	长期工作最高温度(℃)	规　格	用　途
电梯用信号电缆	YT	250	65	截面：0.75 mm² 芯数：24,30,42	户内移动信号线路用
	YIF				户外或接触油污及要求不延燃的移动信号线路用
电梯用控制电缆	YTK	500	65	截面：1.0 mm² 芯数：8,18,24	同 YT 的条件，控制线路用
	YTKF				同 YTF 的条件，控制线路用

电缆均为多芯，导电线芯要用铜绞线，绝缘层采用橡皮，成缆时中心有尼龙加强绳，以承受电缆悬吊时自重，并使之柔软，护套采用机械强度高的橡皮。

电梯电缆的规格见表 3-115。

表 3-115　电梯电缆的规格

芯数×标称截面(mm²)	导电线芯根数/单线标称直径(mm)	绝缘标称厚度(mm)	护套标称厚度(mm)	平均外径上限(mm)	20 ℃导体直流电阻(Ω/km)不大于	
					铜芯	镀锡铜芯
(6×0.75)	24/0.20	0.8	1.5	14.8	27.3	28.0
6×1.0	32/0.20	0.8	1.5	15.3	20.5	21.0
(9×0.75)	24/0.20	0.8	2.0	18.3	27.3	28.0
9×1.0	32/0.20	0.8	2.0	18.9	20.5	21.0
(12×0.75)	24/0.20	0.8	2.0	22.9	27.3	28.0
12×1.0	32/0.20	0.8	2.0	23.7	20.5	21.0
(18×0.75)	24/0.20	0.8	2.0	24.0	27.3	28.0
18×1.0	32/0.20	0.8	2.0	24.8	20.5	21.0
(24×0.75)	24/0.20	0.8	2.5	27.5	27.3	28.0
24×1.0	32/0.20	0.8	2.5	28.4	20.5	21.0
(30×0.75)	24/0.20	0.8	2.5	30.9	27.3	28.0
30×1.0	32/0.20	0.8	2.5	32.0	20.5	21.0

注：① 括号内的芯数和截面为非优先的结构；
② 上述芯数并不排除其他芯数或更多芯数的结构

九、机车车辆用电缆

机车车辆用电缆的导电线芯采用软铜线绞制的柔软结构，绝缘采用天然丁苯橡皮，护套采用耐臭氧和不延燃性的氯丁橡胶，地铁车辆用电缆采用防霉性好的

配方橡皮。机车车辆用电缆分电气化车辆用电缆和地铁车辆用电缆，其产品品种及其用途见表 3－116，产品规格见表 3－117。

表 3－116　机车车辆用电缆产品品种

产品名称	型号	导线长期工作最高允许温度(℃)	主要用途
电气化车辆用橡皮绝缘非燃性橡套电缆 电气化车辆用橡皮绝缘棉纱编织电线	DCHF DCBX	65	连接直流电压 500 V、1 000 V、2 000 V 及以下的电气化车辆内部的电气设备用
地铁车辆用橡皮绝缘丁腈聚氯乙烯复合物护套电缆	DCXVF	65 (最低环境温度－35 ℃)	供地下铁道机车车辆用各种供电装置，照明、通信、广播之用。电压级为交流 500 V 或直流 1 000 V；直流 3 000 V。通信、广播用的交流电压为 250 V 及以下
地铁车辆用橡皮绝缘氯丁护套电缆	DCXHF		
地铁车辆用橡皮绝缘氯丁护套多芯屏蔽电缆	DCXHFP		
地铁车辆用丁聚物绝缘聚氯乙烯护套屏蔽广播线	DCVFVP		

表 3－117　机车车辆用电线电缆产品规格

型号	芯数	导线截面(mm²)	电压(V)	
			直流	交流
DCHF	1	1.0～25	500	—
		1.0～95	1 000	—
DCBX		1.5～300	2 000	—
DCXVF	1	1.0～6	1 000，3 000	500
DCXHF	1	10～120	1 000，3 000	500
DCXHFP	多芯	26×1.5＋2×0.5	1 000	500
DCVFVP	2	2×0.5	—	250

十、防水橡套电缆

防水橡套电缆供向潜水电机传输电能用。交流电压 500 V 及以下，环境温度为－40～60 ℃，允许最高工作温度不超过 65 ℃。电缆在长期浸水并有较大水压的工作情况下，具有良好的电气绝缘性能。电缆柔软、弯曲性能好，能承受经常移动，型号为 JHS，其结构见表 3－118。

表 3-118　防水橡套电缆结构

芯数	芯数×截面（mm^2）	导线结构（根数/直径，mm）	绝缘厚度（mm）	橡套厚度（mm）	计算外径（mm）	计算质量（kg/km）
单芯	1×4	49/0.32	1.2	2.0	9.3	
	1×6	49/0.39	1.2	2.0	9.9	
	1×10	49/0.52	1.4	2.0	12.1	
	1×16	84/0.49	1.4	2.0	13.5	
	1×25	133/0.49	1.6	2.5	16.2	
	1×35	133/0.58	1.6	2.5	17.5	
	1×50	133/0.68	1.6	2.5	19.0	
	1×70	189/0.68	1.6	2.5	21.4	
三芯	3×2.5	49/0.26	1.0	2.0	13.4	282
	3×4	49/0.32	1.0	2.0	15.5	386
	3×6	49/0.39	1.0	2.0	16.9	485
	3×10	49/0.52	1.2	2.5	22.3	850
	3×16	49/0.64	1.2	2.5	24.6	1 103
	3×25	98/0.58	1.4	2.5	31.6	1 774
	3×35	133/0.58	1.4	2.5	33.8	2 164
四芯	3×2.5+1×1.5	49/0.26+19/0.32	1.0+1.0	2.0	15.1	349
	3×4+1×2.5	49/0.32+49/0.26	1.0+1.0	2.0	16.5	425
	3×6+1×4	49/0.39+49/0.32	1.0+1.0	2.5	18.9	596
	3×10+1×6	49/0.52+49/0.39	1.2+1.0	2.5	23.2	943
	3×16+1×6	49/0.64+49/0.39	1.2+1.0	2.5	25.3	1 180
	3×25+1×6	98/0.58+49/0.39	1.4+1.0	2.5	32.4	1 895
	3×25+1×6	133/0.58+49/0.39	1.4+1.0	2.5	34.4	2 268

十一、家用电器用接插线

1. 铜芯聚氯乙烯绝缘纤维编织软电线

聚氯乙烯绝缘纤维编织软电线的型号、规格及用途见表 3-119。交货长度为 100 m。

表 3-119　聚氯乙烯绝缘纤维编织软电线的型号、规格及用途

型号	导体标称截面（mm^2）	绝缘平均厚度（mm）	近似总直径（mm）		20 ℃时软线最大直流电阻（Ω/km）	用　途	标准号
			2 芯	3 芯			
RVSB	0.50	0.60	5.4	8.5	30.0	供交流电压 250 V 及以下各种家用电器电源连接之用	企业标准
	0.75	0.60	5.8	6.2	26.0		
	1.0	0.60	6.2	6.6	19.5		
	1.5	0.70	7.1	7.6	18.0		

2. 接插头线

接插头线的型号、名称、用途及使用特性见表 3－120，规格结构见表3－121。

表 3－120　接插头线的型号、名称、用途及使用特性

型号	名　称	用　途	电缆长期允许工作温度不超过	标准号
PB	单相二极不可重接插头线	用于交流电压 250 V 及以下或直流 500 V 及以下的各种移动式电气器具，无线电设备，仪器仪表，家用电器与电源之间的连接	70 ℃	GB 2099—80
PS	单相三极不可重接插头线		65 ℃	

表 3－121　接插头线的规格与结构

型号及规格	插头线结构				
	相	极数	插头代号	额定电流(A)	匹配电线型号及规格(芯×mm^2)
PB1A－25－RVB2	单	2	1	2.5	RVB　2×0.2(2×12/0.15)
PB1－25－RVB3	单	2	1	2.5	RVB　2×0.3(2×16/0.15)
PB1－25－RVB4	单	2	1	2.5	RVB　2×0.4(2×23/0.15)
PB1－25－RFB3	单	2	1	2.5	RFB　2×0.3(2×16/0.15)
PB1－25－RFB4	单	2	1	2.5	RFB　2×0.4(2×23/0.15)
PB1－25－RFFB3	单	2	1	2.5	RFFB　2×0.3(2×16/0.15)
PB1－25－RFFB4	单	2	1	2.5	RFFB　2×0.4(2×23/0.15)
PB2－25－RVB3	单	2	2	2.5	RVB　2×0.3(2×16/0.15)
PB2－25－RVB4	单	2	2	2.5	RVB　2×0.4(2×23/0.15)
PB2－25－RVB5	单	2	2	2.5	RVB　2×0.5(2×28/0.15)
PB2－25－RFB3	单	2	2	2.5	RFB　2×0.3(2×16/0.15)
PB2－25－RFB4	单	2	2	2.5	RFB　2×0.4(2×23/0.15)
PB2－25－RFFB3	单	2	2	2.5	RFFB　2×0.3(2×16/0.15)
PB2－25－RFF4	单	2	2	2.5	RFF　2×0.4(2×23/0.15)
PB3－25－RVB4	单	2	2	2.5	RVB　2×0.4(2×23/0.15)
PB3－25RVVB5	单	2	3	2.5	RVVB　2×0.5(2×28/0.15)
PB3－25RVVB4	单	2	3	2.5	RVVB　2×0.4(2×23/0.15)
PB3－25RFB3	单	2	3	2.5	RFB　2×0.3(2×16/0.15)
PB4－60－RVB4	单	2	4	6	RVB　2×0.4(2×23/0.15)
PB4－60－RVB5	单	2	4	6	RVB　2×0.5(2×28/0.15)
PB4－60－RVVB7	单	2	4	6	RVVB　2×0.75(2×42/0.15)
PB4－60－RVB7	单	2	4	6	RVB　2×0.75(2×42/0.15)
PB4－60－RFB4	单	2	4	6	RFB　2×0.4(2×23/0.15)
PB5－60－RVB4	单	2	5	6	RVB　2×0.4(2×23/0.15)
PB5－60－RVVB7	单	2	5	6	RVVB　2×0.75(2×42/0.15)

续表

型号及规格	插头线结构				
	相	极数	插头代号	额定电流(A)	匹配电线型号及规格(芯×mm²)
PB6－60－RVVB7	单	2	6	6	RVVB2×0.75(2×42/0.15 mm)
PB8－60－RVB7	单	2	8	6	RVB2×0.75(2×42/0.15 mm)
PB1－25－RVFB3	单	2	1	2.5	RVFB2×0.3(2×16/0.15 mm)
PB2－25RFFB5	单	2	2	2.5	RFFB2×0.5(2×28/0.15 mm)
PB4－60RFB5	单	2	4	6	RFB2×0.5(2×28/0.15 mm)
PB4－60RFB7	单	2	4	6	RFB2×0.75(2×42/0.15 mm)
PS7－60RVV7	单	3	7	6	RVV3×0.75(2×42/0.15 mm)
PS9－60RVV5	单	3	9	6	RVV3×0.5(2×28/0.15 mm)
PS9－60RVV7	单	3	9	6	RVV3×0.75(2×42/0.15 mm)
PS0－75RVV7	单	3	0	7.5	RVV3×0.75(2×42/0.15 mm)

3. 不可重接插头线

不可重接插头线的型号、名称、用途及使用特性见表3－122，规格见表3－123。

表3－122　不可重接插头线的型号、名称、用途及使用特性

型　号	名　称	用　途	电线长期允许工作温度	标准号
PBB	单相二极不可重接插头平型软线	适用于交流额定电压250 V及以下的室内各种移动电气器具，无线电设备和照明灯具连接电源之用	不超过70 ℃	GB1002—80
PBT	单相二极不可重接插头平型护套软线			
PBYY	单相二极不可重接圆插销插头圆形护套软线			
PB－VDE	单相二极不可重接圆插销插头扁形护套软线			
PB－SAA	单相二极不可重接插头扁形护套软线			
PB－SPT－1	单相二极不可重接插头平型软线			
PB－SPT－2	单相二极不可重接插头平型软线			
PSY	单相三极不可重接插头圆形护套软线			
PSYH	单相三极不可重接插头圆型编织软线			
PSYY	单相三极不可重接圆插销插头圆型护套软线			
$PSYY_2$	单相三极不可重接双重接地插头圆型护套软线			
PSY－SJT×2	单相三极不可重接插头插座圆型护套软线			
PSY－SVT	单相三极不可重接圆插销插头圆型护套软线			

表 3-123　不可重接插头线的规格

型号	匹配导线(mm^2)	极数	额定电流(A)
PBE-25	RVB　2×0.3	2	2.5
PBB-40	RVB　2×0.5	2	4
PBB-60	RVB　2×0.75	2	6
PBT-60	RVVB　2×0.75	2	6
PBT-75	RVVB　2×0.75	2	7.5
PSY-40	RVV　3×0.50	3	4
PSY-60	RVV　3×0.75	3	6
PSYY-50	RVV　3×0.75	3	5
$PSYY_2$-10/16	RVV　3×0.75	3	10/16

4. 聚氯乙烯绝缘插头电源线

产品适用于可移式单相两极日用电器，无线电设备和电子仪表等与电源间的连接，其主要技术性能见表 3-124，结构规格见表 3-125。

表 3-124　聚氯乙烯绝缘插头电源线的主要技术性能

型　号	使用温度(℃)	额定电压(V)	最大工作电流(A)	20 ℃时绝缘电阻(MΩ)每根不小于	20 ℃直流电阻(Ω/km)不大于
RVV-2P-1	−30～65	交流 250	6	100	24.3

表 3-125　聚氯乙烯绝缘插头电源线的结构规格

型　号	芯数×标称截面(mm^2)	线芯结构根数/直径(mm)	电源线外形尺寸(mm)	计算重量(kg/km)	交货长度(m)
RVV-2P-1	2×0.75	42/0.15	4.0×6.0	10.12	2

5. 阻燃型聚氯乙烯插头电源线

产品适用于可移式单相二极日用电器、无线电设备和电子仪表等与电源间的连接，其主要技术性能见表 3-126，结构规格见表 3-127。

表 3-126　阻燃聚氯乙烯插头电源线的主要技术性能

型　号	使用温度(℃)	额定电压(V)	最大工作电流(A)	20 ℃时绝缘电阻(MΩ)每根不小于	20 ℃时直流电阻(Ω/km)不大于
RVVZ-2P RVVZ-2P-1 RVVZ-2G	−30～65	交流 250	6	2	24.3

表 3－127　阻燃聚氯乙烯插头电源线结构规格

芯数×标称截面（mm^2）	线芯结构根数/直径(mm)	电源线外形尺寸(mm)	计算重量(kg/km)	交货长度(m)（每根）
2×0.75	42/0.15	4.0×6.0	10.12	2.3、2.5、2.5

十二、公路车辆用电缆电线

1. 公路车辆用低压电缆

公路车辆用低压电缆的型号、名称及用途见表 3－128，规格范围见表 3－129，交货长度见表 3－130。

表 3－128　公路车辆用低压电缆的型号、名称及用途

型　号	名　称	主要用途	标准号
QVR	公路车辆用铜芯聚氯乙烯绝缘低压电线	车辆电器及仪表线路用	BG9328—88
QFR	公路车辆用铜芯聚氯乙烯-丁腈复合物绝缘低压电线		
QVR－105	公路车辆用铜芯耐热 105 ℃聚氯乙烯绝缘低压电线	车辆高温区电器及仪表线路用	
QVVR	公路车辆用铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套低压电缆	车辆与挂车间电器线路用	

表 3－129　公路车辆用低压电缆的规格范围

型　号	芯　数	标称截面(mm^2)
QVR QFR QVR－105	1	0.2～120
QVVR	7	1×2.5＋6×1.5

表 3－130　公路车辆用低压电缆的交货长度

电缆型号及规格	长度(m)不小于	
	标准	短段
QVR　QFR QVR－105　0.2～2.5 mm^2	200	20
QVR　QFR 4～120 mm^2 QVR－105 QVVR1×2.5 mm^2＋6×1.5 mm^2	100	20

2. 汽车及拖拉机用低压腊克线

汽车及拖拉机用低压腊克线的型号、名称及用途见表 3－131。规格见表 3－132。交货长度 QXL 型应不小于 100 m，QBXL 型应不小于 50 m。

表 3－131　汽车及拖拉机用低压腊克线的型号、名称及用途

型　号	名　称	用　途	标准号
QXL	汽车及拖拉机照明腊克电线	供照明及信号仪表接线用	JB676—65
QBXL	汽车及拖拉机发动机用腊克电线	供连接发动机的起动仪表用，有防油性能	

表 3－132　汽车及拖拉机用低压腊克线的规格

型　号	标称截面 (mm^2)	导电线芯根数/单线直径(mm)	电线最大外径 (mm)	铜　量 (kg/km)
QXL	1.0	19/0.26	4.0	10.0
	1.5	19/0.32	4.3	14.0
	2.5	19/0.41	5.0	24.0
	4	49/0.32	5.7	36.0
	6	49/0.39	6.4	53.0
	10	49/0.52	9.1	94.0
QBXL	16	84/0.49	10.0	145
	25	133/0.49	11.8	238
	35	133/0.58	14.2	323
	43	133/0.64	15.5	419

3. 汽车及拖拉机用高压火线

产品供汽车及拖拉机发动机高压点火系统线路连接之用。具有良好的耐热性、耐寒性、柔软和一定的耐油性及不延燃性，电线使用温度－40～70 ℃。产品的型号、名称及规格见表 3－133。电线的交货长度应不小于 15 m。

表 3－133　汽车及拖拉机发动机高压点火线的型号、名称及规格

型号	名　称	导电线芯根数/单线直径(mm)	外线最大外径(mm)	重　量 (kg/km)	标准号
QGV	汽车及拖拉机用铜芯聚氯乙烯绝缘高压点火线	19/0.26 (7/0.39)	7.3	60	JB675—71
QGXV	汽车及拖拉机用铜芯橡皮绝缘聚氯乙烯护套高压点火线	7/0.39			
QGX	汽车及拖拉机用铜芯橡皮绝缘氯丁橡皮护套高压点火线	7/0.39			

4. 汽车及拖拉机用全塑料高压阻尼点火线

产品适合于汽车及拖拉机上发动机高压点火系统用的电线。具有抑制和衰

减点火系统所产生对通信设备干扰的无线电波。产品的型号名称及参考数据见表 3－134。交货长度不少于 15 m。

表 3－134　汽车及拖拉机用全塑料高压阻尼点火线型号、名称及参考数据

型号	名　称	导电线芯根数/单线直径(mm)	电线最大外径(mm)	电线重量(kg/km)	标准号
QG	汽车及拖拉机用塑料高压阻尼点火线	1/2.3	7.3	51	JB1172—71

十三、电气设备用电线电缆的选用

1. 线缆的载流量

铜芯绝缘导线在环境温度为 25 ℃，导线最高允许温升为 70 ℃时的安全载流量见表 3－135。

表 3－135　铜芯绝缘导线安全载流量/A

导线截面面积/mm²	导线明敷	穿金属管敷设			穿塑料管敷设		
		2 根	3 根	4 根	2 根	3 根	4 根
1.0	21/19	15/14	14/13	12/11	13/12	12/11	11/10
1.5	27/24	20/19	18/17	17/16	17/16	16/15	14/13
2.5	35/32	28/26	25/24	23/22	25/24	22/21	20/19
4	45/42	37/35	33/31	30/28	33/31	30/28	26/25
6	58/55	49/47	43/41	39/37	43/41	38/36	34/32
10	85/75	68/68	60/57	53/50	59/56	52/49	46/44
16	110/105	86/82	77/73	69/65	76/72	68/65	60/57
25	145/138	113/107	100/95	90/85	100/95	90/85	80/75
35	180/170	140/133	122/115	110/105	125/120	110/105	98/93
50	230/215	175/165	154/146	137/130	160/150	140/132	123/117
70	285/265	215/205	193/183	173/165	195/185	175/167	155/148
95	345/320	260/250	235/225	210/200	240/230	215/205	195/185
120	400/375	300/285	270/266	245/230	278/265	250/240	227/215
150	470/430	340/320	310/295	280/270	320/305	290/280	265/250
185	540/490	385/380	355/340	320/300	360/355	330/325	300/280

注：分子是橡皮绝缘导线载流量，分母是塑料绝缘导线载流量

2. 选用注意事项

电气装备用电线电缆在选用时首先要注意线缆的耐压等级符合要求；其次是载流量的选择，电气装备用电线电缆选择载流量时主要依据线缆使用的发热情况，根据装备的工作状态，如要求长期可靠运行，则选择的载流量应比额定载流量要小，其他一般情况可选择接近额定载流量，极短时工作状态的可选择较大载流量，由于线缆不是特别长，故可不考虑压降方面的影响；再次是环境因素，线缆在高温环境中使用时应考虑降低载流量或选用耐高温电缆，固定敷设线缆如直埋时需要校正载流量，另外，强电线缆与信号电缆要分开敷设；最后考虑线缆的机械强度和敷设或使用时线缆的最小弯曲半径要符合要求。

第四节　电 力 电 缆

电力电缆是电气工程中完成大功率输配电常用的一种导线。它在结构上与绝缘电线有些类似，有导电线芯、绝缘层、护层、屏蔽层。所不同之处在于工作电压高，电流大，一切要求都比普通绝缘线要高。

按电缆绝缘材料分，电力电缆可分为油浸纸绝缘电缆、塑料绝缘电缆、橡皮绝缘电缆、气体绝缘电缆等。油浸纸绝缘电缆具有耐压强度高、耐热能力好和使用年限长等优点，但工作时，其中的浸渍油会流动，因此它两端的高度差有一定的限制，否则电缆低的一端可能因油压很大使端头胀裂漏油，而高的一端则可能因油流失而使绝缘干枯，耐压降低，甚至击穿。

塑料电缆具有抗酸碱、防腐蚀和重量轻等优点，已基本取代油浸纸绝缘电缆。它适用于有化学腐蚀及高度差较大的场所敷设。塑料电缆有两种，一种是聚氯乙烯绝缘和聚氯乙烯护套电缆，另一种是交联聚乙烯绝缘和聚氯乙烯护套电缆，其电气性能更优越。聚氯乙烯电缆和交联聚乙烯电缆结构见图 3－18 和图 3－19。

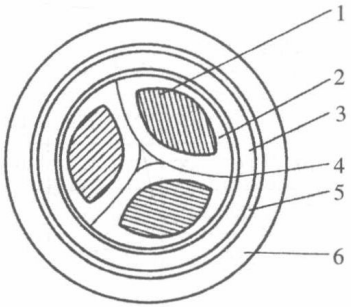


图 3－18　聚氯乙烯电缆

1-导线；2-聚氯乙烯绝缘；3-聚氯乙烯内护套；4-铠装层；5-填料；6-聚氯乙烯外护套

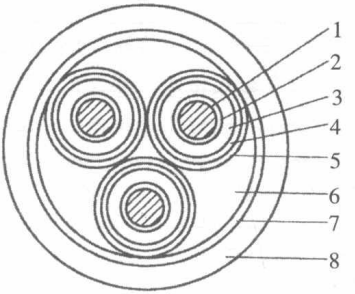


图 3－19　交联聚乙烯电缆

1-导线；2-导线屏蔽层；3-交联聚乙烯绝缘层；4-半导体层；5-铜带；6-填料；7-扎紧布带；8-聚氯乙烯外护套

按电缆护层分，可分为裸铅包电缆、铠装电缆、塑料护套电缆、橡套电缆等。其中铠装电缆又按铠装的不同，分为钢带铠装与钢丝铠装两类。

按电缆芯线数目，常分为单芯电缆、双芯电缆、三芯电缆、四芯电缆和五芯电缆。

电力电缆的缆芯是由软铜(铝)绞线组成，要求电阻率小，以减少功率损耗和热量。绝缘层应保证绝缘在长期工作条件下，以及在储存、运输、敷设等情况下，不降低原有的电性能，同时护层也保证内部不受外来的机械损伤。

另外还有特殊用途的电缆，如阻燃电力电缆、低烟低卤电力电缆、低烟无卤电力电缆和耐火电力电缆等。

电力电缆主要种类、性能和型号见表 3－136。

表 3－136　电力电缆主要种类、性能和型号

绝缘类型	电缆名称	电压等级/kV	允许最高工作温度/℃	常用型号
塑料绝缘电缆	聚氯乙烯	10 kV 及以下	65	VV、VLV、VV22、VLV22、ZRA(C)－VV、ZRA(C)－VLV、NF－VV、NF－VV22
	聚乙烯	6～220 kV	70	YV、YLV
	交联聚乙烯	6～220 kV	90(10 kV 及以下) 80(20 kV 及以下)	YJV、YJLV、YJV22、YJLV22
橡皮绝缘电缆	普通橡皮	6 kV 及以下	65	XV、XLV
	乙丙橡皮	1～35 kV	80	XEV
	丁基橡皮	1～35 kV	80	XF、XLF

续表

绝缘类型	电缆名称	电压等级/kV	允许最高工作温度/℃	常用型号
油浸纸绝缘电缆	自容式充油电缆	110～750 kV	75～80	CYZQ102、CYZQ302、CYZQ141
	不滴流电缆铅(铝)套	1～35 kV	65～80	ZLD、ZLLD、ZLD02、ZQD、ZLQD、ZQD02
	不滴流电缆分相铅(铝)套	1～35 kV	65～80	ZQFD22、ZLQFD22、ZQFD23、ZLQFD23

一、油浸纸绝缘电力电缆

油浸纸绝缘电力电缆有铅护套或铝护套的铜芯或铝芯电缆等品种。绝缘方式有普通型、滴干型和不滴流型三种。单芯电缆的导电线芯为圆形，用电缆纸带以同心式多层绕包；多芯电缆的导电线芯制成半圆形、椭圆形或扇形，每根线芯上分别绕包多层绝缘纸带(即芯绝缘)，几根线芯绞合成缆，其空隙处填有电缆麻、电缆纸绳，使之形成圆形，再绕包上一定厚度的绝缘纸带(即带绝缘)。电压稍高的电缆线芯表面及绝缘层外层采用半导电屏蔽层。纸绝缘层经浸渍处理，采用不同的浸渍剂分别制成普通型电缆、滴干绝缘电缆和不滴流电缆。电缆的内护层采用热压铅或铝的密封护套，根据不同敷设场合的条件，为了能承受电缆的拉力和保护电缆内护层免受机械损伤或腐蚀等破坏，电缆采用沥青浸渍电缆麻被、钢带或细钢丝铠装等外护层。10 kV 及以下三芯油浸纸绝缘电力电缆的结构见图 3-20。

图 3-20　三芯油浸纸绝缘电力电缆结构

油浸纸绝缘电力电缆的生产范围：额定电压为 1～35 kV；芯数为 1～4 芯；单芯的截面为 2.5～800 mm^2、多芯的截面为 2.5～400 mm^2，截面等级依次为 2.5 mm、4 mm、6 mm、10 mm、16 mm、25 mm、35 mm、50 mm、70 mm、95 mm、

120 mm、150 mm、185 mm、240 mm、300 mm、400 mm、500 mm、625 mm、800 mm^2。油浸纸绝缘电力电缆广泛应用于交流电压的输配电网中，作为传输电能之用，也可用于直流，其工作电压可提高 1 倍。滴干绝缘电缆和不滴流电缆用于高落差及垂直敷设场合，不滴流电缆也可用于热带地区。油浸纸绝缘电力电缆的型号及其敷设场合见表 3－137，纸绝缘铅包电力电缆的产品规格见表 3－138，纸绝缘铝包电力电缆的产品规格见表 3－139。

表 3－137　油浸纸绝缘电力电缆的型号及其敷设场合

品种＼型号	单芯和多芯统包型		分相铅包型		外护层种类	敷设场合
	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯		
油浸纸绝缘铅包电力电缆	ZLQ	ZQ	—	—	裸铅护套	敷设在室内、隧道及沟管中，对电缆应没有机械外力作用，对铅护套有中性环境
	ZLQ1	ZQ1	—	—	麻被层	同 ZLQ，但可用于有腐蚀的环境
	ZLQ2	ZQ2	ZLQF2	ZQF2	钢带铠装，外麻被	直埋于土壤中，能承受机械外力，不能承受大的拉力
	ZLQ20	ZQ20	ZLQF20	ZQF20	裸装带铠装	敷设在室内、隧道及沟管中，其余同 ZLQ2
	ZLQ3	ZQ3	—	—	细钢丝铠装，外麻被	敷设在土壤中，能承受机械外力，并能承受相当的拉力
	ZLQ30	ZQ30	—	—	裸细钢丝铠装	敷设在室内及矿井中，其余同 ZLQ3
	ZLQ5	ZQ5	ZLQF5	ZQF5	粗钢丝铠装，外麻被	敷设在水中，能承受较大的拉力
油浸纸滴干绝缘铅包电力电缆	ZLQP2	ZQP2	ZLQPF2	ZQPF2	钢带铠装，外麻被	用于一定范围内的垂直或高落差敷设
	ZLQP20	ZQP20	ZLQPF20	ZQPF20	裸钢带铠装	
	ZLQP3	ZQP3	—	—	细钢丝铠装，外麻被	
	ZLQP30	ZQP30	—	—	裸细钢丝铠装	
	ZLQP5	ZQP5	ZLQPF5	ZQPF5	粗钢丝铠装外麻被	

续表

品种＼型号	单芯和多芯统包型		分相铅包型		外护层种类	敷设场合
	铝芯	铜芯	铝芯	铜芯		
铝包电力电缆油浸纸绝缘	ZLL	ZL	—	—	裸铝护套	敷设在室内、隧道及沟管中，对电缆应没有机械外力，对铝护套有中性环境
	ZLL11	ZL11	—	—	一级防腐麻被层	同ZLL，但可用于对铝护层有腐蚀的环境
油浸纸绝缘铝包电力电缆	ZLL12	ZL12	—	—	一级防腐钢带铠装，外麻被	直埋于对铝护层有腐蚀的土壤中，能承受较大机械外力，但不能承受拉力
	ZLL120	ZL120	—	—	一级防腐裸钢带铠装	敷设在对铝护层有腐蚀的室内、隧道及沟管中，其余同ZLL12
	ZLL13	ZL13	—	—	一级防腐细钢丝铠装，外麻被	敷设在对铝护层有腐蚀的土壤和水中，能承受机械外力和相当的拉力
	ZLL130	ZL130	—	—	一级防腐裸细钢丝铠装	敷设在对铝护层有腐蚀的室内、隧道及矿井中，其余同ZLL13
	ZLL15	ZL15	—	—	一级防腐粗钢丝铠装	敷设在对铝护层有腐蚀的水中，能承受较大的拉力
	ZLL22	ZL22	—	—	二级防腐钢带铠装	敷设在对铝护层和钢带或钢丝均有严重腐蚀的环境中，其余分别同{ZLL12 / ZLL13 / ZLL15}
	ZLL23	ZL23	—	—	二级防腐细钢丝铠装	
	ZLL25	ZL25	—	—	二级防腐粗钢丝铠装	
纸绝缘电力电缆不滴流浸渍剂	ZLQD3	ZQD3	—	—	细钢丝铠装，外麻被	敷设在土壤中，能承受机械外力并能承受相当的拉力
	ZLQD30	ZQD3	—	—	裸细钢丝铠装	敷设在室内、隧道及矿井中，其余同ZLQD3
	ZLQD5	ZQD5	—	—	粗钢丝铠装，外麻被	敷设在水中，能承受较大的拉力

表 3-138　油浸纸绝缘铅包电力电缆的产品规格

型号	线芯数	额定电压(kV)					
		1	3	6	10	20	35
		导电线芯截面(mm^2)					
ZQ，ZLQ，ZQ1，ZLQ1	1	2.5～800	6～625	10～500	16～500	25～400	50～300
ZQ2，ZLQ2，ZQ20，ZLQ20①		4～800	6～625	10～500	16～500	—	—
ZQ3，ZLQ3，ZQ30，ZLQ30②		50～800	35～625	—	—	—	—
ZQP2，ZLQP2，ZQP20，ZLQP20①		4～500	6～500	10～95	16～95	—	—
ZQP3，ZLQP30，ZQP30，ZLQP30②		50～500	35～500	35～95	35～95	—	—
ZQ，ZLQ，ZQ1，ZLQ1，ZQ2，ZLQ2，ZQ20，ZLQ20	2	2.5～150	—	—	—	—	—
ZQ3，ZLQ3，ZQ30，ZLQ30 ZQP2，ZLQP2，ZQP20，ZLQP20		25～150 4～120	— —	— —	— —	— —	— —
ZQP3，ZLQP3，ZQP30，ZLQP30		25～120	—	—	—	—	—
ZQ，ZLQ，ZQ1，ZLQ1，ZQ2，ZLQ2，ZQ20，ZLQ20	3	2.5～240	4～240	10～240	16～240	—	—
ZQ3，ZLQ3，ZQ30，ZLQ30，ZQ5，ZLQ5		25～240	25～240	16～240	16～240	—	—
ZQF2，ZLQF2，ZQF20，ZLQF20		—	—	—	—	25～185	50～185
ZQF5，ZLQF5		—	—	—	—	25～185	50～150
ZQP2，ZLQP2，ZQP20，ZLQP20		4～150	6～150	16～150	—	—	—
ZQP3，ZLQP3，ZQP30，ZLQP30，ZQP5，ZLQP5		25～150	25～150	16～120	—	—	—
ZQPF2，ZLQPF2，ZQPF20，ZLQPF20		—	—	16～150	25～150	—	—
ZQPF5，ZLQPF5		—	—	16～150	25～150	—	—
ZQ，ZLQ，ZQ1，ZLQ1，ZQ2，ZLQ2，ZQ20，ZLQ20	4	4～185	—	—	—	—	—
ZQ3，ZLQ3，ZQ30，ZLQ30 ZQP2，ZLQP2，ZQP20，ZLQP20		16～185 4～120	— —	— —	— —	— —	— —
ZQP3，ZLQP3，ZQP30，ZLQP30		16～120	—	—	—	—	—
ZQ5，ZLQ5		25～120	—	—	—	—	—
ZQP5，ZLQP5		25～120	—	—	—	—	—

注：① 单芯钢带铠装电缆仅能用于直流输配电线路中；

② 单芯钢丝铠装电缆采取隔磁措施后，亦可应用于交流系统。

表 3－139　油浸纸绝缘铝包电力电缆的产品规格

型号	芯数	额定电压(kV)			
		1	3	6	10
		导电线芯截面(mm^2)			
ZL，ZLL，ZL11，ZLL11，ZL12，ZLL12，ZL120，ZLL120，ZL22，ZLL22	1	50～625	50～625	50～500	50～500
ZL13，ZLL13，ZL130，ZLL130，ZL23，ZLL23		50～625	50～625	—	—
ZL，ZLL，ZL11，ZLL11，ZL12，ZLL12，ZL120，ZLL120，ZL22，ZLL22	2	16～150	—	—	
ZL13，ZLL13，ZL130，ZLL130，ZL23，ZLL23		25～150	—	—	—
ZL，ZLL，ZL11，ZLL11，ZL12，ZLL12，ZL120，ZLL120，ZL22，ZLL22	3	10～240	10～240	10～240	16～240
ZL13，ZLL13，ZL130，ZLL130，ZL23，ZLL23，ZL15，ZLL15，ZL25，ZLL25		25～240	25～240	16～240	16～240
ZL，ZLL，ZL11，ZLL11，ZL12，ZLL12，ZL120，ZLL120，ZL22，ZLL22	4	10～185	—	—	—
ZL13，ZLL13，ZL130，ZLL130，ZL23，ZLL23		16～185	—	—	—
ZL15，ZLL15，ZL25，ZLL25		25～120	—	—	—

注：① 单芯铠装电缆仅能用于直流输配电线路中。

二、橡皮绝缘电力电缆

橡皮绝缘电力电缆的导电线芯有铜芯和铝芯两种，橡皮绝缘，内护层有铅包、聚氯乙烯及氯丁橡胶护套，有的电缆还采用钢带铠装沥青浸渍麻被外护层。三芯橡皮绝缘电力电缆结构见图 3－21。

橡皮绝缘电力电缆生产范围：额定电压为 0.5～6 kV；芯数为 1～4 芯；单芯的截面为 1.0～500 mm^2、多芯的截面为 1.5～185 mm^2，截面档次与油浸纸绝缘电力电缆的基本相同。橡皮绝缘电力电缆广泛应用于定期移动的场合，作固定敷设之用，氯丁橡胶和聚氯乙烯护套都可用于要求非燃或不延燃的场合。橡皮绝缘电力电缆的品种与敷设场合见表 3－140，其产品规格见表3－141。

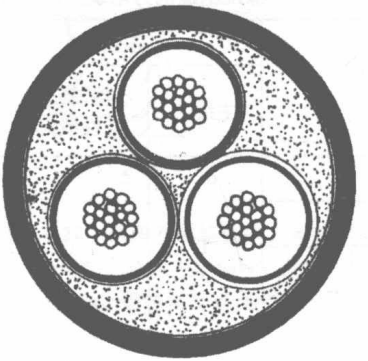


图 3－21　三芯橡皮绝缘电力电缆结构

表 3－140　橡皮绝缘电力电缆的品种与敷设场合

品种	型号		外护层种类	敷设场合
	铝芯	铜芯		
橡皮绝缘铅包电力电缆	XLQ	XQ	无外护层	敷设在室内、隧道及沟管中。不能承受机械外力和振动，对铅层应有中性环境
	XLQ2	XQ2	钢带铠装，外麻被	直埋敷设在土壤中，能承受机械外力，不能承受大的拉力
	XLQ20	XQ20	裸钢带铠装	敷设在室内、隧道及沟管中。其余同 XLQ2
橡皮绝缘聚氯乙烯护套电力电缆	XLV	XV	无外护层	敷设在室内、隧道及沟管中。不能承受机械外力
	XLV29	XV29	钢带铠装	敷设在地下，能受一定机械外力作用，但不能受大的拉力
橡皮绝缘氯丁橡套电力电缆	XLF	XF	无外护层	敷设于要求防燃烧的场合，其余同 XLV

表 3-141　橡皮绝缘电力电缆的产品规格

型号	芯数		额定电压(V)	
	主线芯	接地或中性线芯	500	6 000
			导线截面(mm^2)	
XLV XLF	1	0	2.5～630	—
XV XF			1～240	—
XLQ			2.5～630	4～500
XQ			1～240	2.5～400
XLV XLF	2	0	2.5～240	—
XV XF XQ			1～185	—
XLV20 XLQ XLQ2 XLQ20			4～240	—
XV29 XQ2 XQ20			4～185	—
XLV XLF	3	0 或 1	2.5～240	—
XV XF XQ			1～185	—
XLV20 XLQ XLQ2 XLQ20			4～240	—
XV29 XQ2 XQ20			4～185	—

三、聚氯乙烯绝缘电力电缆

聚氯乙烯绝缘电缆的导电线芯有铜芯和铝芯两种，单芯电缆的导电线芯为圆形，多芯电缆的线芯可为圆形、扇形或半圆形。绝缘层采用聚氯乙烯电缆绝缘料热挤压而成，多芯电缆的线芯绝缘采用分色标志，主线芯取黄、绿、红色，中性线芯用黑色，中性线芯也可采用裸导体结构；6 kV 单芯电缆的绝缘层表面及多芯电缆在成缆绕包塑料带前，绕包两层铝带或一层铜带。电缆护套采用聚氯乙烯普通电缆护套料，其护层结构有三种：一是无铠装层仅有聚氯乙烯护套(VLV、VV 型)；二是由聚氯乙烯挤制或聚氯乙烯带绕包的内衬垫，其外用钢带铠装(VLV29，VV29 型)或钢丝铠装(VLV39、VV39、VLV59、VV59)，铠装层外再挤压聚氯乙烯外护套；三是只有内护层和铠装层，没有外护套的裸铠装(VLV30、VV30、VLV50、VV50)。三芯聚氯乙烯绝缘电力电缆结构见图 3-22。

聚氯乙烯绝缘电力电缆生产范围：额定电压为 1～6 kV；芯数为 1～4 芯；单芯的截面为 1～800 mm^2，多芯的截面为 1～300 mm^2，截面等级与油浸纸绝缘电力电缆的基本相同。聚氯乙烯绝缘电力电缆适用于交流 6 kV 及以下电压级的电力线路中，作为固定敷设、传输电能的干线及支线电缆，其工作温度应不超过 65 ℃，没有敷设位差的限制。聚氯乙烯绝缘电力电缆的品种及其敷设场合见表

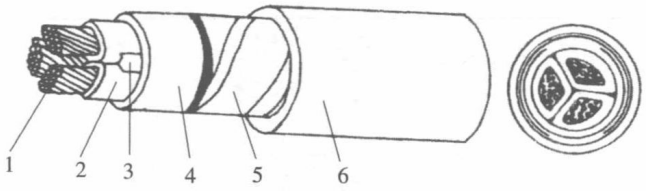


图 3－22　聚氯乙烯绝缘电力电缆结构

1-导电线芯；2-聚氯乙烯绝缘；3-边角填充；
4-内衬垫；5-铠装钢带；6-聚氯乙烯护套

3－142，其产品规格见表 3－143。

表 3－142　聚氯乙烯绝缘电力电缆的品种及其敷设场合

型号		护层种类	敷设场合
铝芯	铜芯		
VLV	VV	聚氯乙烯护套，无铠装层	敷设在室内、隧道及沟管中，不能承受机械外力的作用
VLV29	VV29	内钢带铠装，聚氯乙烯护套	直埋敷设在土壤中，能承受机械外力，不能承受大的拉力
VLV30	VV30	聚氯乙烯护套，裸细钢丝铠装	敷设在室内、矿井中。能承受机械外力和相当的拉力
VLV39	VV39	内细钢丝铠装，聚氯乙烯护套	敷设在水中，能承受相当的拉力
VLV50	VV50	聚氯乙烯护套，裸粗钢丝铠装	敷设在室内、矿井中，能承受较大拉力
VLV59	VV59	内粗钢丝铠装，聚氯乙烯护套	敷设在水中，能承受较大的拉力

表 3－143　聚氯乙烯绝缘电力电缆产品规格

型　号		芯数	额定电压(kV)	
铝　芯	铜　芯		1	6
			导电线芯标称截面(mm^2)	
—	VV	1	1～800	10～500
VLV	—		2.5～800	10～500
VLV29	VV29		10～800	10～500
—	VV	2	1～150	10～150
VLV	—		2.5～150	10～150
VLV29	VV29		4～150	10～150

续表

型　号		芯数	额定电压(kV)	
铝　芯	铜　芯		1	6
			导电线芯标称截面(mm^2)	
— VLV VLV29	VV — VV29	3	1～300 2.5～300 4～300	10～300 10～300 10～300
VLV39；VLV30 VLV59；VLV50	VV39；VV30 VV59；VV50		—	16～300
VLV VLV29	VV VV29	4	4～185	—

注：有铠装的单芯电缆仅适用于直流系统。

四、交联聚乙烯绝缘电力电缆

交联聚乙烯绝缘电力电缆的特点是其绝缘层采用交联聚乙烯。交联聚乙烯是聚乙烯在高能射线(如γ射线、α射线、电子射线等)或交联剂的作用下，使其大分子之间生成交联，可提高其耐热等性能。采用交联聚乙烯作绝缘的电缆，其长期工作温度可提高到90 ℃，能承受的瞬时短路温度可达170～250 ℃。

交联聚乙烯绝缘电缆产品结构与聚氯乙烯绝缘电力电缆基本相同。导电线芯有铜芯和铝芯两种，单芯电缆线芯为圆形，多芯电缆线芯为圆形或半圆形；每相绝缘分别由内屏蔽层、交联聚乙烯绝缘层及外屏蔽层所组成，导电线芯的屏蔽(内屏蔽层)采用半导电交联聚乙烯复合物挤包，绝缘屏蔽(外屏蔽层)采用双面涂胶的半导电丁基橡胶布带绕包或用半导电高分子复合物挤包。绝缘屏蔽半导体层外面均重叠绕包一层电工用韧铜带；移动式的电缆则编织一层镀锡铜丝，铜带外再绕包一层聚氯乙烯带或电缆纸；护层结构与聚氯乙烯绝缘电力电缆基本相同，采用聚氯乙烯护套、钢带或钢丝铠装，分无铠装(VJLV、VJV、VJLVF、VJVF)、内铠装(VJLV29、VJV29、VJLV39、VJV39、VJLV59、VJV59)及裸铠装(VJLV30、VJV30、VJLV50、VJV50)；多芯电缆各主线芯有分色标志，采用除红色以外的彩色纤维(纱或丝)放置在外屏蔽铜带里层或在外屏蔽的半导电丁基橡胶布带上印有彩色条纹，以区别各相。交联聚乙烯电力电缆的结构见图3-22。

交联聚乙烯绝缘电力电缆的生产范围：额定电压为6 kV、10 kV、20 kV及35 kV；芯数为1及3芯；单芯的截面为16～500 mm^2，三芯的为16～240 mm^2，截面等级与油浸纸绝缘电力电缆基本相同；广泛应用于交流电压的输配电网中，作传输电能之用，可替代油浸纸绝缘电力电缆，无敷设位差的限制，还可用于定期移动的固定敷设场合，除具有较高的耐热性能外，且有良好的耐寒性能。交联聚乙

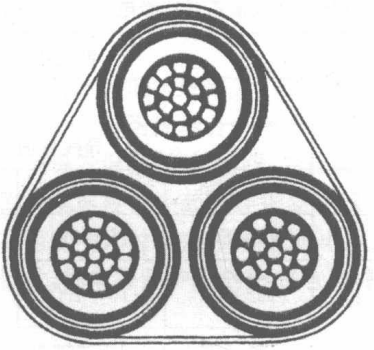


图 3-22　交联聚乙烯绝缘电力电缆结构

烯绝缘电力电缆的品种及其敷设场合见表 3-144，其产品规格见表 3-145，交联聚乙烯绝缘电力电缆长期连续负荷载流量见表 3-146。

表 3-144　交联聚乙烯电力电缆品种及其敷设场合

型号		名　称	敷　设　场　合
铜芯	铝芯		
YJV	YJLV	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆	敷设在室内外、隧道内(须固定在托架上)、混凝土管组或电缆沟中，允许在松散土壤中直埋，电缆不能承受机械外力作用，但可经受一定的敷设牵引
YJVF	YJLVF	交联聚乙烯绝缘、分相聚氯乙烯护套电力电缆	同 YJV、YJLV 型
YJV29	YJLV29	交联聚乙烯绝缘、聚氯乙烯护套内钢带铠装电力电缆	敷设在地下，电缆能承受机械外力作用，但不能承受大的拉力
YJV30	YJLV30	交联聚乙烯绝缘、聚氯乙烯护套裸细钢丝铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及矿井中，电缆能承受机械外力作用，并能承受相当的拉力
YJV39	YJLV39	交联聚乙烯绝缘、聚氯乙烯护套内细钢丝铠装电力电缆	敷设在水中或具有落差较大的土壤中，电缆能承受相当的拉力
YJV50	YJLV50	交联聚乙烯绝缘、聚氯乙烯护套裸粗钢丝铠装电力电缆	敷设在室内、隧道内及矿井中，电缆能承受机械外力作用，并能承受较大的拉力
YJV59	YJLV59	交联聚乙烯绝缘、聚氯乙烯护套内粗钢丝铠装电力电缆	敷设在水中，电缆能承受较大的拉力

注：① 单芯电缆不允许敷设在铁质管道中，允许在非磁性管道中敷设；
② 一般情况下，不制造单芯钢带铠装电力电缆。

表 3-145　交联聚乙烯绝缘电力电缆产品规格

型　号		芯数	额定电压(kV)			
铝芯	铜芯		6	10	20	35
			导线截面(mm^2)			
YJLV	YJV	1	16～500	16～500	25～400	50～300
YJLV	YJV	3	16～500	16～400	25～185	50～70
YJLV30 YJLV50	YJV30 YJV50		16～500	16～400	25～185	50～150
YJLV29	YJV29		16～500	16～400	25～185	50～150
YJLV39	YJV39		16～500	16～400	25～185	50～120
YJLV59	YJV59		16～500	16～400	25～185	50～70
YJLVF	YJVF		16～500	16～400	25～185	50～150

表 3-146　交联聚乙烯电缆长期连续负荷载流量(A)

三芯 10 kV 交联聚乙烯电缆					单芯 35 kV 交联聚乙烯电缆				
导线最高温度 90 ℃ 环境温度 25 ℃ 电缆中心距 $s=2d$ 土壤热阻系数 $g=100$(℃ · cm/W)					导线最高温度 80 ℃ 环境温度 25 ℃ 电缆中心距 $s=2d$ 土壤热阻系数 $g=100$(℃ · cm/W)				
导线截面(mm^2)	埋地		空气		导线截面(mm^2)	埋地		空气	
	铜芯	铝芯	铜芯	铝芯		铜芯	铝芯	铜芯	铝芯
16	118	92	121	94	—	—	—	—	—
25	151	117	158	123	—	—	—	—	—
35	180	140	190	147	—	—	—	—	—
50	217	169	231	180	50	213	166	260	206
70	260	202	280	218	70	256	202	317	247
95	307	240	335	261	95	301	236	377	295
120	348	272	388	303	120	342	269	433	339
150	394	308	445	347	150	385	303	492	386
185	441	344	504	394	185	429	339	557	437
240	504	396	587	461	240	495	390	650	512
300	567	481	671	527	300	550	439	740	586
400	654	518	790	623	—	—	—	—	—
500	730	580	893	710	—	—	—	—	—

注：上列载流量系根据计算而得，供选择时参考。

五、电力电缆附件

电缆附件是电缆线路不可缺少的组成部分，其中包括有终端、连接盒、压力箱及护层接地保护器等。以上每一种附件均有多种不同品种和规格，适合不同的场合。电缆终端是一个与其他输变设备(如架空线、变压器等)相连接的端子。连接盒是用在长的线路将各段电缆连接在一起的连接器。压力箱主要是配合充油电缆用的，内有弹性元件，在温度变化时，它能保持充油电缆内部油压正常。护层接地保护器是一种半导体器件，用来限制护层的感应电压，防止外护层电压过高产生击穿损坏。

常用电缆附件型号及适用范围见表 3－147。

表 3－147　常用电缆附件型号及适用范围

附件名称	常用型号	使用范围
直通型绕包式终端及连接附件	JRB 型	35 kV 及以下电力电缆
瓷套式终端及连接附件	WCT 型、WCTJ 型	
应力锥式绕包终端及连接附件	WRB 户外型、NRB 户内型	10 kV 及以下电力电缆
瓷套式终端及连接附件	WCY、WCYL、WCGL、NCS 型	
铸铁电缆终端盒及连接盒	WG 型户外倒挂式	10 kV 及以下电力电缆，不宜用于严重污秽地区，有鸟害或严重积雪地区较适宜
	WS 型户外扇形	10 kV 及以下电力电缆。6 kV 以下选用普通型，10 kV 电缆选用加强型
	NS 型户内扇形	10 kV 及以下电力电缆
	LB 型整体式	
	LBT 型对接式	
尼龙电缆终端盒及连接盒	NTN 型户内	
整体式铸铝单芯电缆连接盒	LBL 型	

续表

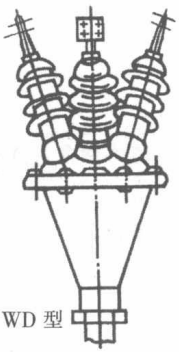
附件名称	常用型号	使用范围
线芯连接金具	DTS、DTJS DT、DTJ	适合电力电缆等铜绞合导体，在导体连接处，密封要求不高且不要求承受很大拉力时
	DTM、DTMJ、 DLM、DLMJ	适合油浸纸、交联聚乙烯绝缘电力电缆等铜绞合导体，在导体连接处，要求能堵油或防潮并能承受较高拉力时
线芯连接金具	GLM、GLMJ	适合油浸纸绝缘与挤出电力电缆等铝绞合导体，在导体连接处，要求能堵油并能承受较高拉力时
	GTS、GTJS、GT GTJ、GL、GLJ	适合电力电缆等铜绞合导体，在导体连接处，不要求承受很大拉力时

1. 终端

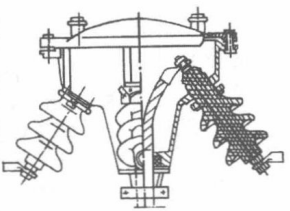
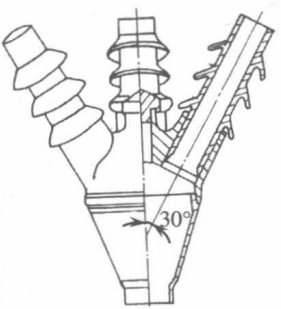
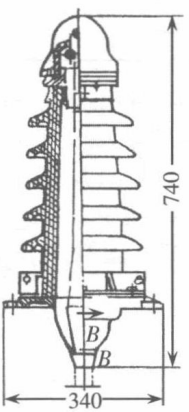
终端又称终端头。

(1) 油浸纸绝缘低压电力电缆终端　它是由壳体(铸铁、陶瓷、环氧树脂等材料制成)、瓷套、出线端子和组装用密封件、支撑装置等部分组成。组装后壳体内浇灌绝缘复合剂以增强绝缘。低压电缆终端的品种及特点和结构图见表3-148。

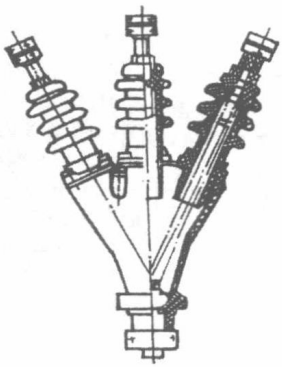
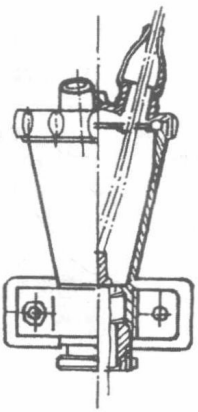
表3-148　油浸纸绝缘低压电力电缆终端的品种及特点和结构图

名称、型号	性能特点	适用场合	结构图
鼎足式终端WD型(铸铁壳)、WDC型(瓷壳)	(1) 3或4个瓷套如鼎足倒放(WDC型瓷套和壳体连在一起) (2) 各芯施加增绕绝缘，壳体内浇灌沥青混合物或环氧树脂 (3) 性能稳定，安全裕度大 (4) WD型尺寸大，较笨重；WDC型尺寸小，较轻便 (5) WDC型不宜承受机械冲击或槌击	(1) 适用于户外的塔杆上、墙边或设备的支架上 (2) WD型不宜用于有严重腐蚀的场合，WDC型不受限制	 WD型

续表

名称、型号	性能特点	适用场合	结构图
倒挂式终端 WG 型（铸铁壳）	（1）顶部采用大壳盖，使水分不能进入壳内。线芯由侧面向下引出，使水分无法沿连接杆螺纹渗入到绝缘内。特别适用于多雨和潮湿地区 （2）电缆芯端部受弯曲较大 （3）安装方便 （4）外形尺寸比 WD 型还大	同上。特别适用于多雨和潮湿地区，但不宜用于严重污秽和有强烈振动的场合	
环氧树脂终端	（1）将预制的环氧树脂壳体、壳盖、防雨套管与电缆组装后，再在安装现场浇灌环氧树脂，固化后成为一个整体 （2）体积小、重量轻、密封性好、机械强度高 （3）品质受现场制作工艺影响较大 （4）在日光强烈地区和潮湿地区，应涂以保护漆或涂料	适用于无严重污秽的场合，较多用于变电装置附近，对高落差敷设的低端和环境温度较高的场所更为适宜	
单芯电缆套管式终端 558 型、511 型、512 型	（1）套管可根据电压级、污秽程度、海拔高度的不同而改变 （2）20～35 kV 级的设计有内补油装置的油罐，以补充电缆上端淌流流失的浸渍剂，不致形成贫油状态	可供 35 kV 及以下单芯电缆和 20～35 kV 分相铅（铝）护套电缆用。适用于户外及各种环境，亦可用于相应电压级的橡皮或塑料电缆，但应采用低温浇灌剂	

续表

名称、型号	性能特点	适用场合	结构图
扇形终端 WS(铸铁壳、户外用)、NS(铸铁壳、户内用)	(1) 三个瓷套在一个平面上,适宜靠墙安装 (2) 形状扁平,另两个方向尺寸则较大 (3) 壳体结构牢固	适宜于易受外力作用、环境较恶劣和安全要求较高的场合	
鼎足式户内终端 NTN(尼龙料)、NTC(瓷质)	(1) 结构小巧,轻便 (2) 一般场合中使用性能良好 (3) NTC 为整体瓷件;NTN 为全尼龙装配式	户内用 NTN 不宜用于环境温度高、污秽多、有火种的场合,但可用于有轻度化学腐蚀的环境中,特别适用于配电设备附近。NTC 的使用场合没有限制,但不宜承受机械冲击	

(2) 橡皮、塑料绝缘低压电力电缆终端　它是由手套形分支盒、自粘带绕包的增强绝缘、保护带、接线端子等几部分所组成。户外型须加雨罩,不附加浇注剂,是干式结构。施工、维修方便,但电性能及耐潮湿性能较差,适用于干燥和较清洁的环境中。

10 kV 塑料、橡皮电缆终端结构如图 3-23 所示。

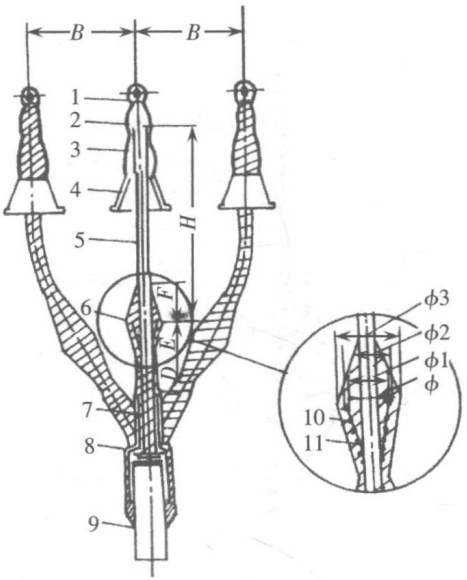


图 3－23　10 kV 塑料、橡皮电缆终端

1-导线接线端子；2-自黏性橡胶带；3-塑料胶黏带；4-雨罩(户外用)；
5-电缆绝缘线芯；6-屏蔽环；7-电缆屏蔽层；8-三芯分支手套；
9-接地铜线；10-铝屏蔽带；11-半导电布带

2. 终端的制作工艺

10 kV 交联聚乙烯绝缘电缆户内、户外热缩终端头制作工艺。

热收缩型终端头，是由一种具有“弹性记忆效应”的橡胶材料制成，是一种经加工后遇热收缩的高分子材料。终端头主要由热收缩应力控制管、无泄漏耐气候管、密封胶、导电漆、手套、防雨罩等组成。厂家有操作工艺的可按厂家工艺操作，否则应按下列程序制作。

(1) 剥塑料护套、锯钢甲　按图 3－24 剥除塑料护套，在距剖塑口 30 mm 处扎一道 3～4 匝绑线，将钢甲锯除。在距钢甲末端 20 mm 处将内护套及填料剥除。

(2) 焊接地线　用截面面积不小于 25 mm^2 的镀锡铜辫按图 3－25 的方法在三相线芯根部的铜屏蔽上各绕一圈，并用锡焊点焊在铜屏蔽上，然后用镀锡铜线绑在钢甲上，并用焊锡焊牢。在铜辫的下端(从塑料护套切断处开始)用焊锡填满铜辫，形成一个 30 mm 的防潮层。

(3) 套分支手套　将热收缩手套套至根部然后用喷灯开始加热，从中部开始往下收缩，然后再往上收缩，使手套均匀地收缩在电缆上。当手套内未涂密封胶时，则应在手套根部的塑料护套上及接地铜辫上缠 30 mm 的热熔胶带，以保证手

套处有良好的密封。

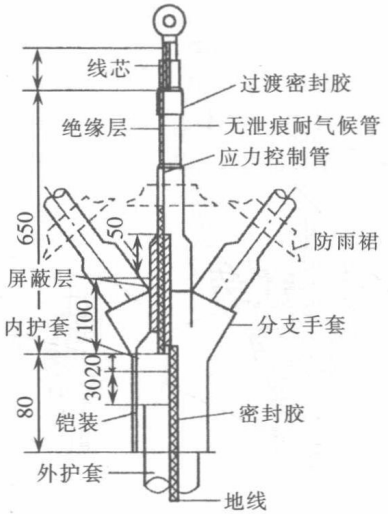


图 3-24　热收缩头剥切尺寸

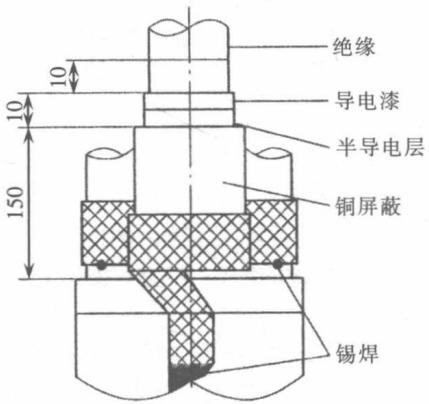


图 3-25　接地线的连接方法

(4) 剥除铜屏蔽及半导电屏蔽层　按图 3-24 尺寸将铜屏蔽层及半导电屏蔽层剥除，用 ϕ1.0 mm 镀锡铜丝在距内护套 150 mm 处绑扎两圈，将绑线至末端的铜屏蔽剥除，注意不能损伤半导电层，在距铜屏蔽末端 10 mm 处将至末端的半导电屏蔽层剥除。剥时不应损伤绝缘。在保留的 10 mm 导电层上，在靠绝缘一端用玻璃片刮一个5 mm 的斜坡，最后用 0 号砂纸将绝缘表面打磨光滑、平整。

(5) 涂导电漆或包半导电胶　用汽油将绝缘表面擦净，擦时应保持从末端往

根部擦，防止将半导电层的炭黑擦到绝缘表面。然后在距半导电层末端 10 mm 处的绝缘层上包两圈塑料带，其目的是为了使导电漆刷得平整、无尖刺，在绝缘表面刷导电漆10 mm 和在半导电层末端的 5 mm 斜坡上刷导电漆，导电漆要涂刷整齐。当不用导电漆而采用半导电胶带时，则应在此 15 mm 处包半导电胶带一层，再把临时包的两圈塑料带拆除。

(6) 套应力控制管　当绝缘表面不光滑时，则应在绝缘表面套应力管部分涂上一层薄薄的硅脂。而后将应力控制管套至屏蔽上(压铜屏蔽层 50 mm)从上至下进行收缩。

(7) 套无泄漏耐气候管　用清洁剂将绝缘表面、应力控制管和手套的手指表面擦净，在手指上缠一层密封胶带，分别将三只无泄漏耐气候管套至手指根部。从手指与应力控制管接口处开始加热收缩，先向下收缩完后再向上收缩。

(8) 压接线鼻子及套过渡密封管　用接线鼻子孔深加 5 mm 将末端绝缘剥除，然后套上接线鼻子进行压接。用密封胶填满空隙，套上过渡密封管从中部向两端加热收缩。加热收缩前应先对接线鼻子加热，以使密封胶充分熔化黏合。

户内终端头到此结束，户外终端头还要加以下工序。

(9) 热缩防雨罩　热手套的手指末端向上测量 200 mm，用热收缩安装一个防雨罩，再往上每隔 60 mm 加一个防雨罩，10 kV 户外终端头应加三个防雨罩，如图 3－26 所示。

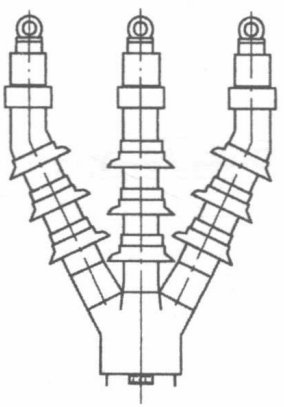


图 3－26　户外型热收缩电缆头

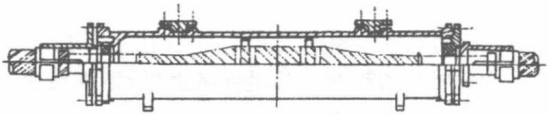
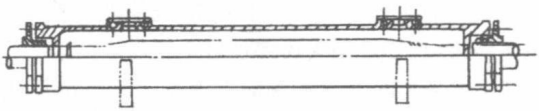
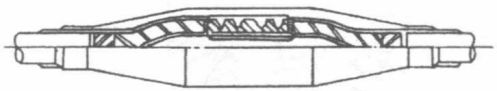
热收缩中间头的基本制作工艺和终端头基本制作工艺类同。

3. 连接盒

连接盒又称中间接头。

(1) 低压电力电缆连接盒　它的外壳用铸铁或铝合金整体制成，两端及灌注孔用机械密封；或用环氧树脂灌模固化成型，其品种、特点和结构示意图见表 3－149。

表 3-149　低压电力电缆连接盒的品种及特点

名称	结构特点	适用场合
LB 系列中间连接盒	(1) 结构示意图如下  (2) 外壳用铸铁或铝合金整体制成，两端电缆引入处及灌注孔处用机械密封 (3) 安装方便，结构简单	适用于 10 kV及以下电缆的隧道敷设和直埋敷设
LL 系列中间连接盒	(1) 结构示意图如下  (2) 外壳用铸铝整体制成，两端电缆引入处及灌注孔处用机械密封 (3) 安装方便，结构简单	适用于 20～35 kV分相铅包、铝包电缆的隧道敷设和直埋敷设
环氧树脂中间连接盒	(1) 结构示意图如下  (2) 电缆线芯绕包后放在金属或塑料的模子中，灌注环氧树脂，固化后去除模子 (3) 防止线芯沿轴向和径向渗油是工艺控制的关键 (4) 要能严格保证内外密封时性能良好，否则埋地敷设易渗水击穿	适用于 10 kV及以下电缆的隧道敷设，如用于直埋敷设，应注意密封

(2) 塑料、橡皮绝缘低压电力电缆连接盒　以 10 kV 级为例，它的结构见图 3-27；其主要尺寸见表 3-150。

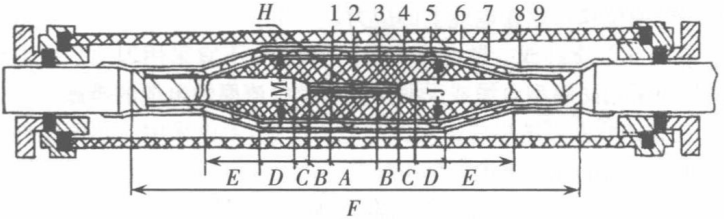


图 3－27　10 kV 塑料、橡皮电缆连接盒

1-连接管；2-自黏性橡胶带；3-半导电带(或纸)；4-铝屏蔽带；5-软铜丝；6-塑料胶黏带；7-布带；8-多股镀锡铜带；9-塑料连接盒

表 3－150　10 kV 塑料、橡皮电缆连接盒的主要尺寸

导线面积 (mm^2)	尺寸(mm)								
	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*H*	*J*	*M*
16	76	10	25	40	100	610	10	38	83
25	78	10	25	40	100	620	12	40	87
35	80	10	25	40	100	640	14	42	91
50	84	10	25	40	100	650	16	44	95
70	90	10	25	40	100	670	18	46	100
95	100	10	25	40	100	690	21	49	106
120	105	15	30	40	110	780	23	51	111
150	105	15	30	40	110	820	25	53	115
185	110	15	30	40	110	850	27	55	120
240	120	15	30	40	110	910	31	59	128

六、电力电缆选择

电力电缆型号选择，应根据环境条件、敷设方式、用电设备的要求和产品技术数据等因素来确定，以保证电缆的使用寿命。一般考虑以下原则。

(1) 在一般环境和场所内，宜采用铝芯电缆；在振动剧烈和有特殊性要求的场所，应采用铜芯电缆；规模较大的重要公共建筑和设备宜采用铜芯电缆。

(2) 埋地敷设的电缆，宜采用有外护层的铠装电缆。在无机械损伤可能的场所，也可采用塑料护套电缆或带外护套的铅(铝)包电缆。

(3) 在可能发生位移的土壤中(如沼泽、流沙、大型建筑附近)埋地敷设电缆时，应采用钢丝铠装电缆或采取措施(如预留电缆长度，用板桩或排桩加固土壤

等)消除因电缆位移作用在电缆上的应力。

(4) 在有化学腐蚀或杂散电流腐蚀的土壤中,不宜采用埋地敷设电缆。如必须埋地时,应采用防腐型电缆或采取防止杂散电流腐蚀电缆的措施。

(5) 三相四线制系统中应采用四芯电力电缆,不应采用三芯电缆再加一根单芯电缆或以导线、电缆金属护套作中性线。

(6) 架空电缆宜采用有外护层的电缆或全塑电缆。

(7) 敷设在管内或排管内的电缆,宜采用塑料护套电缆,也可采用裸铠装电缆或采用特殊加厚的裸铅(铝)包电缆。

(8) 在三相系统中,不得将三芯电缆中的一芯接地。

(9) 在电缆沟或电缆隧道内敷设的电缆,不宜采用有易燃易爆的外护层,宜采用裸铠装电缆、裸铅(铝)包电缆或阻燃塑料护套电缆。

电力电缆截面积选择应根据电缆在线路中所承受的传输容量以及短路电流来选择。对于标准系列电缆应按其载流量来选择标称截面,并按短路电流来校核其截面。

通常铜芯电缆的载流量选择在 1～4 A/mm^2,铝芯电缆的载流量选择在 0.8～3 A/mm^2,电缆标称截面大时取小值,电缆标称截面小时取大值,并根据电缆使用时环境温度及散热好坏进行校正,乘以 0.6～1 的系数。

对于长距离电缆还需进行线路压降校核,使供电电压质量符合要求。

电缆的最大允许位差见表 3-151。

表 3-151 电缆的最大允许位差

电缆类型	最大允许位差(m)	
	铅护层	铝护层
普通黏性浸渍电缆		
1～3 kV 铠装	25	25
无铠装	20	25
6 kV	15	20
10 kV	15	—
20～35 kV	5	—
不滴流电缆		
塑料绝缘电缆	无限制	
橡皮绝缘电缆		

各种电缆护层的适用敷设场合见表 3-152。

表 3-152 各种电缆护层的适用敷设场合

序号	名称		型号	适用敷设场合													备注
				敷设方式								环境条件					
				架空	室内	电缆沟	隧道	管道	竖井	埋地	水下	易燃	移动	多砾石	一般腐蚀	严重腐蚀	
1	裸金属护套	平铝护套	L	√	√	√	√					√				√	
		皱纹铝护套	LW	√	√	√	√					√			√		
		铅护套	Q	√	√	√	√	√				√			√		
2	橡皮护套	一般橡套		√	√	√	√	√					√		√	√	
		不延燃橡套	F	√	√	√	√	√				√	√		√	√	耐油
		耐寒橡套	H	√	√	√	√	√					√		√	√	到−50 ℃
3	塑料护套	聚氯乙烯护套	V	√	√	√	√	√		√		√	√		√	√	有普通、耐寒柔软等品种
		聚乙烯护套	Y	√	√	√	√	√		√			√		√	√	
		双护套	YV	√	√	√	√	√		√		√	√		√	√	内护套：聚乙烯 外护套：聚氯乙烯

续表

序号	名称			型号	适用敷设场合													备注
					敷设方式								环境条件					
					架空	室内	电缆沟	隧道	管道	竖井	埋地	水下	易燃	移动	多砾石	一般腐蚀	严重腐蚀	
4	一级防腐外护层	铝(L或LW)	塑料护套	11	√	√	√	√	√		√		√			√	√	推荐埋地用
		铅(Q)			√	√	√	√	√				√			√	√	
		皱纹钢管(GW)			√	√	√	√	√		√		√			√	√	
		裸钢带铠装		120		√	√	√					√			√		
		钢带铠装		12		√	√	○			√		○		√	√		
		裸单层细圆钢丝		130						√			√			√		
		单层细圆钢丝		13						○	√	√	○		√	√		
		裸双层细圆钢丝		140						√			√			√		
		双层细圆钢丝		14						○	√	√	○		√	√		
		裸单层粗圆钢丝		150						√			√			√		
		单层粗圆钢丝		15						○	√	√	○		√	√		
		裸双层粗圆钢丝		160						√			√			√		可承受大拉力
		双层粗圆钢丝		16						○		√	○			√		可承受大拉力

续表

序号	名称		型号	适用敷设场合													备注
				敷设方式								环境条件					
				架空	室内	电缆沟	隧道	管道	竖井	埋地	水下	易燃	移动	多砾石	一般腐蚀	严重腐蚀	
5	二级防腐外护层	钢带铠装	22							√		√		√		√	
		单层细圆钢丝	23						√	√	√	√		√		√	
		双层细圆钢线	24						√	√	√	√		√		√	
		单层粗圆钢丝	25						○	√	√	○		√		√	
		双层粗圆钢丝	26						○		√	○				√	可承受大拉力
6	普通外护层（仅用于铅护套）	麻被	1		√	√	√								√		淘汰产品
		裸钢带铠装	20		√	√	√					√			√		
		钢带铠装	2		√	√	○			√					√		
		裸单层细圆钢丝	30						√			√			√		
		单层细圆钢丝	3						○	√	√	○		√	√		
		裸双层细圆钢丝	40						√			√			√		
		双层细圆钢丝	4						○	√	√	○		√	√		
		裸单层粗圆钢丝	50						√			√			√		
		单层粗圆钢丝	5						○	√	√	○		√	√		
		裸双层粗圆钢丝	60						√			√			√		可承受大拉力
		双层粗圆钢丝	6						○		√	○			√		可承受大拉力

续表

序号	名称		型号	适用敷设场合														备注
				敷设方式								环境条件						
				架空	室内	电缆沟	隧道	管道	竖井	埋地	水下	易燃	移动	多砾石	一般腐蚀	严重腐蚀		
7	内铠装塑料外护层（全塑电缆用）	钢带	29		✓	✓	✓			✓		✓		✓		✓		
		单层细圆钢丝	39						✓	✓	✓	✓		✓		✓		
		单层粗圆钢丝	59						✓		✓	✓		✓		✓		
8	特种护层	防霉	TH	湿热带有防霉要求地区														
		防鼠		鼠类活动地区（电缆外径在 15 mm 以下时）														
		防白蚁		白蚁活动地区														
		防雷		雷电活动地区的易遭雷击地段														
		防辐射		放射线辐射地区														

注：1. “✓”表示适用；“○”表示外被层为玻璃纤维时适用。

2. 适用范围是根据技术性和经济性考虑的，无标记者不推荐采用。

3. 裸金属护套一级防腐外护层，由沥青复合物加聚氯乙烯套组成。

4. 铠装一级防腐外护层，由衬垫层、铠装层和外被层组成。衬垫层由两个沥青复合物、聚氯乙烯带和浸渍皱纸带的防水组合层所组成。外被层由沥青复合物、浸渍电缆麻（或浸渍玻璃纤维）和防止粘合的涂料组成。

5. 裸铠装一级防腐外护层的衬垫层与铠装一级外护层的衬垫层相同，没有外被层。

6. 铠装二级防腐外护层的衬垫层与铠装一级外护层的衬垫层相同。钢带及细钢丝铠装的外被层由沥青复合物和聚氯乙烯护套组成。粗钢丝铠装的镀锌钢丝外面应挤包一层聚氯乙烯护套或其他同等效能的防腐涂层，以保护钢丝免受外界腐蚀。

7. 单芯钢带铠装电缆不适用于交流线路。

七、电力电缆试验

电力电缆的性能是否合格，在使用前要求对其测试，由于电缆品种多，使用范围广，工作环境与条件差异大，性能要求自然各不相同，检验项目很难统一，需结合产品的具体要求，进行相应的试验。主要有以下几方面。

1. 测量绝缘电阻

绝缘电阻是判断电缆电性能的基本参数，它主要取决于所选用的绝缘材料和电缆的结构。另外，电缆的生产工艺和环境条件对绝缘电阻的影响也很显著。绝缘电阻的测试有三种方法。出厂试验或鉴定，一般用兆欧表法或高阻计法。研究性试验或仲裁试验用直流比较法。应用最多的是兆欧表法。国家试验标准中将各类电力电缆换算到 20 ℃时每千米的最低绝缘电阻值见表 3－153 至表 3－155。

表 3－153　黏性油浸纸和不滴流油浸纸绝缘电缆最低绝缘电阻值

额定电压/kV	0.1～1	≥6
绝缘电阻/MΩ·km	100	200

表 3－154　额定电压 6 kV 及以下的橡皮绝缘电缆最低绝缘电阻值

电缆截面面积/mm²	50 及以下	70～185	240
绝缘电阻/MΩ·km	50	35	20

表 3－155　塑料电缆最低绝缘电阻值

电缆额定电压/kV		1	6	10	35
绝缘电阻/MΩ·km	聚氯乙烯电缆	40	60	—	—
	聚乙烯电缆	—	1 000	1 200	3 000
	交联聚乙烯电缆	—	1 000	1 200	3 000

2. 直流耐压试验及泄漏电流测量

耐压试验是一种对电缆的无损检验，通过这种试验，既不会损伤产品的绝缘，影响产品的性能，又能迅速发现产品的缺陷，可进行及时处理，所以是生产和安装交接中最常用的试验方法。

耐压试验的基本方法是在电缆绝缘上加上高于工作电压一定倍数的电压值，保持一定时间，而不被击穿。耐压试验分为交流和直流两种。电缆出厂时多进行交流耐压试验；而电缆的预防性试验和交接试验，多采用直流耐压试验。

直流耐压试验时，电缆线芯一般是接负极。因为如接正极，若绝缘中有水分存在，将会因渗性作用使水分移向电缆护层，结果使缺陷不易发现。

在进行直流耐压试验的同时，还应进行泄漏电流测量，以反映电缆的绝缘电阻。其测量原理与用摇表测量绝缘电阻完全相同。但泄漏电流测量较绝缘电阻测量更易于发现绝缘的缺陷，是电缆试验中的重要项目。

直流耐压试验和泄漏电流测量试验方法是一致的，泄漏电流试验也是直流耐压试验的一部分，但其作用是不相同的。电缆的泄漏电流是检查绝缘状况，试验电压较低；电缆直流耐压试验是考验绝缘的耐电强度，其试验电压较高。

电力电缆的直流耐压试验及泄漏电流测量标准见表 3－156 至表 3－160。

表 3－156　黏性油浸纸绝缘电缆直流耐压试验电压标准

电缆额定电压 $U_0 \cdot U$/kV	0.6/1	6/6	8.7/10	21/35
直流试验电压/kV	$6U$	$6U$	$6U$	$5U$
试验时间/min	10	10	10	10

注：U_0 为电缆线芯对地或对金属屏蔽层间的额定电压，U 为电缆额定线电压。

表 3－157　不滴流油浸纸绝缘电缆直流耐压试验电压标准

电缆额定电压 $U_0 \cdot U$/kV	0.6/1	6/6	8.7/10	21/35
直流试验电压/kV	6.7	20	37	80
试验时间/min	5	5	5	5

表 3－158　充油绝缘电缆直流耐压试验电压标准

电缆额定电压 U/kV	66	110	220	330
直流试验电压/kV	$2.6U$	$2.6U$	$2.3U$	$2U$
试验时间/min	15	15	15	15

表 3－159　塑料绝缘电缆直流耐压试验电压标准

电缆额定电压 U_0/kV	0.6	1.8	3.6	6	87	12	18	21	26
直流试验电压/kV	2.4	7.2	15	24	35	48	72	84	104
试验时间/min	15	15	15	15	15	15	15	15	15

表 3－160　橡皮绝缘电力电缆直流耐压试验电压标准

电缆额定电压 U/kV	6
直流试验电压/kV	15
试验时间/min	5

试验时，试验电压可分 4～6 阶段均匀升压，每阶段停留 1 min，并读取泄漏电流值。当泄漏电流很不稳定，或随试验电压升高而急剧上升，或随试验时间延长

有上升现象，说明电缆可能有缺陷，应找出缺陷部位并予以处理。

黏性油浸纸绝缘及不滴流油浸纸绝缘电缆泄漏电流的三相不平衡系数不应大于2，当10 kV及以上电缆的泄漏电流小于20 μA和6 kV及以下电缆泄漏电流小于10 μA时，其不平衡系数不作规定。

做直流电缆耐压试验和泄漏电流试验时，应断开电缆与其他设备的一切连线，并将电缆线芯短路接地，充分放电1～2 min。当试验全部结束后不要立即拆除接地线或用手接触电缆线芯，应将其对地进行放电。

在进行直流电缆耐压试验时，必须执行有关高压安全规程，做好安全措施。

第五节　控制电缆

控制电缆型号的编写以用途的代表字母列为首位，其编制规律见表3－161。

表3－161　控制电缆型号的编写及其字母含义

类别用途	导体	绝缘	护套、屏蔽特征	外护层	派生、特性
K—控制电缆	T—铜芯 L—铝芯	Y—聚乙烯 V—聚氯乙烯 X—橡皮	Y—聚乙烯 V—聚氯乙烯 F—氯丁胶 Q—铅套 P—屏蔽	02、03 20、22 23、30 32、33	1、2 80、105

控制电缆的主要种类见表3－162。

表3－162　控制电缆的名称及适用范围

名　称	适用范围	标准号
橡皮和塑料绝缘控制电缆	适用于直流和交流50～60 Hz，额定电压600/1 000 V及以下控制、信号、保护及测量线路用	JB 678—82
聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制电缆	适用于交流额定电压450/750 V及以下，配电装置中仪表的接线	GB 9330—88
船用控制电缆（乙丙、聚氯乙烯、天然丁苯胶、交联聚乙烯绝缘）	适用于交流额定电压250 V及以下的各种河海船舶及海上石油平台等水上建筑物传输电能用	GB 9332—88
交联聚乙烯绝缘控制电缆	适用于固定敷设在额定电压为0.6/1 kV及以下的配电装置中电器仪表接线	企业标准

续表

名　称	适 用 范 围	标准号
乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆	主要用于发电厂、地下铁道、高层建筑、石油化工等有阻燃防火要求的场合，可为配电装置中电器仪表作传递信号及测量用，额定交流电压为 600 V	企业标准
电子计算机用屏蔽控制电缆	适用于防干扰性能要求较高的计算机仪表等作连接用的控制电缆	企业标准

一、聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制电缆

1. 聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的型号、名称及使用范围

聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的型号、名称及使用范围见表 3－163。

表 3－163　聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的型号名称及使用范围

型　号	名　称	使用范围
KVV	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制电缆	敷设在室内、电缆沟、管道固定场合
KVVP	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套编织屏蔽控制电缆	敷设在室内、电缆沟、管道等要求屏蔽的固定场合
$KVVP_2$	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套钢带屏蔽控制电缆	敷设在室内、电缆沟、管道等要求屏蔽的固定场合
KVV_{22}	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套钢带铠装控制电缆	敷设在室内、电缆沟、管道、直埋等能承受较大机械外力等固定场合
KVV_{32}	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套细钢丝铠装控制电缆	敷设在室内、电缆沟、管道、竖井等能承受较大机械拉力等固定场合
KVVR	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制软电缆	敷设在室内，移动要求柔软，屏蔽等场合
KVVRP	铜芯聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯护套编织控制软电缆	敷设在室内，移动要求柔软，屏蔽等场合

2. 聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的特性

(1) 使用特性。聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的使用特性见表 3－164。

表 3－164　聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的使用特性

电缆导体长期允许工作温度(℃)	敷设温度不低于(℃)	允许弯曲半径，应不小于电缆外径		
		无铠装	有铠装或铜带屏蔽	有屏蔽层软电缆
70	0	6 倍	12 倍	6 倍

(2) 技术性能。电缆的绝缘厚度及绝缘电阻见表 3－165。电缆的外护套的标称厚度规定见表 3－166。

表 3－165　聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的绝缘厚度及绝缘电阻

标称截面 (mm^2)	绝缘标称厚度 (mm)	绝缘电阻(MΩ/km)不小于	
		20 ℃	70 ℃
0.5	0.6	13	0.013
0.75	0.6	12	0.12
1.0	0.6	11	0.011
1.5	0.7	11	0.011
2.5	0.8	10	0.010
4	0.8	8.5	0.008 5
6	0.8	7	0.007 0
10	1.0	6.5	0.006 5

表 3－166　聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的外护套标称厚度

护套前外径(mm)	10 及以下	10.01～15	15.01～25	25.01～30	30.01 及以上
标称厚度 (mm)	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2

电缆的导体结构及直流电阻见表 3－167。

表 3－167　聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的导体结构及直流电阻

标称截面 (mm^2)	导体结构		20 ℃时导体直流电阻 (Ω/km)不大于	
	种类	根数/单线标称直径(mm)	不镀锡	镀锡
0.5	3	16/0.20	39.0	40.1
0.75	1	1/0.97	24.5	24.8
0.75	2	7/0.37	24.5	24.8
0.75	3	24/0.20	26.0	26.7
1.0	1	1/1.13	18.1	18.2
1.0	2	7/0.43	18.1	18.2
1.0	3	32/0.20	19.5	20.0
1.5	1	1/1.38	12.1	12.2
1.5	2	7/0.52	12.1	12.2
1.5	3	30/0.25	13.3	13.7
2.5	1	1/1.78	7.41	7.56
2.5	2	7/0.68	7.41	7.56

续表

标称截面（mm^2）	导体结构		20℃时导体直流电阻（Ω/km）不大于	
	种类	根数/单线标称直径（mm）	不镀锡	镀锡
2.5	3	50/0.25	7.98	8.21
4	1	1/2.25	4.61	4.70
4	2	7/0.85	4.61	4.70
6	1	1/2.76	3.08	3.11
6	2	7/1.04	3.08	3.11
10	2	7/1.35	1.83	1.84

3. 聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的规格

聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的规范见表3-168。

表3-168 聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的规范

型号	额定电压（V）	导体标称截面（mm^2）							
		0.5	0.75	1.0	1.5	2.5	4	6	10
		芯数							
KVV KVVP	450/750	—	2～61				2～14		2～10
$KVVP_2$		—	4～61				4～14		4～10
KVV_{22}		—	7～61			4～61	4～14		4～10
KVV_{32}		—	19～61		7～61		4～14		4～10
KVVR		4～61					—		—
KVVRP		4～61			4～48		—		—

注：推荐的芯数系列为：2、3、4、5、7、8、10、12、14、16、19、24、27、30、37、44、48、52和61芯。

聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的外径及重量（见表3-169）。

表 3-169 聚氯乙烯绝缘及护套控制电缆的外径及重量

芯数×标称截面(mm²)	电缆计算外径(mm)							电缆计算重量(kg/km)						
	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP
2×0.75	8.1	9.3						72.93	114.04					
2×1.0	8.46	9.66						81.86	124.7					
2×1.5	9.44	10.64						109.77	157.22					
2×2.5	10.84	11.94						154.89	201.49					
2×4	11.86	13.9						187.31	346.23					
2×6	13	15.06						241.39	351.27					
2×10	16.4	17.80						391.38	502.6					
3×0.75	8.47	9.67						87.0	130					
3×1.0	8.86	10.06						98.74	143.6					
3×1.5	9.92	11.12						127.36	177.63					
3×2.5	11.43	12.63						181.38	238.68					
3×4	12.52	14.58						234.9	347.8					
3×6	14.41	15.81						329.85	470.6					
3×10	17.36	18.76						511.84	632.63					
4×0.5						8.70	9.90						96.24	141.7
4×0.75	9.11	10.31	9.22			9.32	10.52	104.25	153.6	144.6			114.6	164.79
4×1.0	9.54	10.74	9.60			9.66	10.86	119.45	163.72	153.73			123.87	179.63
4×1.5	10.72	11.92	10.74			10.99	12.19	156.25	203.93	192.43			158.36	210.86
4×2.5	12.41	14.47	12.90			12.56	14.62	226.17	330.8	276.43			228.78	336.8
4×4	14.30	15.70	14.03	16.58	19.68			315.95	436.3	367.5	505.48	856.82		
4×6	15.68	17.08	15.26	17.81	20.01			413.79	530.79	467.4	619.78	995.15		
4×10	18.99	20.83	19.88	22.43	25.89			644.2	768.3	728.57	947.41	1 584.51		

续表

芯数×标称截面(mm²)	电缆计算外径(mm)							电缆计算重量(kg/km)						
	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP
5×0.5						9.34	10.54						108.7	164.78
5×0.75	9.8	11.00	9.96			10.04	11.24	119.76	162.34	152.7			122.68	174.98
5×1.0	10.29	11.49	10.31			10.42	11.62	142.67	193.87	174.92			148.69	208.7
5×1.5	11.61	12.81	12.23			11.91	13.11	190.04	248.63	226.43			200.6	267.6
5×2.5	14.16	15.56	13.91			14.32	15.72	290.02	390.63	325.73			296.03	399.72
5×4	15.54	16.94	15.18	17.63	20.83			383.45	501.9	437.5	586.8	962.21		
5×6	17.08	18.48	16.55	19.54	22.20			505.75	626.8	567.6	737.54	1 130.02		
5×10	21.82	22.62	22.27	24.18	27.68			830.34	989.39	924.65	1 125.58	1 814.6		
7×0.5						10.02	11.22						118.98	164.9
7×0.75	10.53	11.73	10.56	13.77		10.80	12.00	146.19	202.8	178.4	317.42		149.86	218.9
7×1.0	11.07	12.27	11.04	14.25		11.22	12.42	169.37	216.9	209.8	354.53		172.48	224.4
7×1.5	12.54	14.40	13.11	15.66	17.66	12.87	14.73	225.52	330.63	289.6	425	712.21	233.43	338.97
7×2.5	15.30	16.70	14.97	17.52	20.62	15.48	16.88	353.07	471.8	398.98	554.23	923.11	359.63	482.6
7×4	16.83	18.23	16.38	18.93	22.03			473.2	601.6	527.9	701.68	1 108.25		
7×6	18.54	19.94	17.91	20.90	24.36			652.75	789.7	717.63	900.55	1 484.27		
7×10	23.69	24.49	24.14	26.09	29.55			1 082.04	1 216.4	1 145.93	1 397.35	2 140		
8×0.5						10.54	11.74						126.70	174.6
8×0.75	11.09	12.29	11.75	14.30		11.38	12.58	166.09	217.8	206.7	344.09		174.67	229.84
8×1.0	11.67	13.53	12.26	14.81		11.83	13.69	193.51	243.86	230.63	378.34		196.98	254.64
8×1.5	13.91	15.31	13.78	16.33	19.43	14.27	15.67	277.69	387.6	312.73	467.37	811.74	285.87	393.64
8×2.5	16.17	17.57	15.78	18.33	21.43	16.37	17.77	405.73	524.8	486.7	614.93	1 002.06	412.83	536.76
8×4	17.82	19.66	17.74	20.29	23.75			545.12	681.37	589.79	789.37	1 354.84		

续表

芯数×标称截面(mm²)	电缆计算外径(mm)							电缆计算重量(kg/km)						
	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP
8×6	20.10	21.50	19.39	21.94	25.40			748.25	898.35	792.9	989.19	160.03		
8×10	25.13	26.13	25.58	27.53	30.99			1 210.54	1 386.6	1 236.9	1 542.73	2 332.2		
10×0.5						12.28	14.14						147.63	194.76
10×0.75	12.96	15.02	13.51	16.06		13.32	15.38	205.7	300.45	214.63			216.14	310.4
10×1.0	14.34	15.74	14.15	16.70		15.54	15.94	256.23	368.2	300.43	449.8		269.45	386.59
10×1.5	16.30	17.70	16.03	18.58	21.68	16.74	18.14	340.29	456.3	387.45	558.86	957.37	352.4	472.83
10×2.5	19.10	20.50	18.95	21.50	24.96	19.34	20.74	500.89	639.9	572.9	753.69	1362.57	516.4	647.87
10×4	22.18	22.98	21.43	23.38	26.84			721.68	863.7	787.98	956.51	1 618.64		
10×6	24.46	25.46	23.47	25.42	28.88			956.11	1108.3	992.78	1 203.32	1 931.78		
10×10	29.94	30.94	30.39	33.00	37.90			1 523.6	1 648.7	1 590.4		3 160.9		
12×0.5						12.63	14.49						176.45	224.6
12×0.75	13.99	15.39	13.86	16.41		14.37	15.77	240.07	345.6	301.45			252.86	356.73
12×1.0	14.74	16.14	14.53	17.08		14.95	16.35	289.43	396.73	312.34	485.86		295.78	403.45
12×1.5	16.78	18.18	16.48	19.03	22.13	17.24	18.64	386.87	498.64	423.78	609.67	1 018.54	394.96	512.46
12×2.5	19.69	21.53	19.50	22.05	25.51	20.54	21.78	572.52	703.6	654.6	829.44	1 455.01	531.63	712.88
12×4	22.85	23.65	22.05	24.00	27.46			825.22	970.6	887.93	1061.91	1 744.3		
12×6	25.22	26.22	24.17	26.12	29.58			1 102.34	1 276.4	1 189.6	1 356.71	2 100.8		
14×0.5						13.22	15.28						198.76	246.71
14×0.75	14.63	16.03	14.45	17.00		15.02	16.42	285.63	396.7	312.73			296.98	408.23
14×1.0	15.42	16.82	15.16	17.71		15.64	17.04	321.8	443.7	398.72	530.02		333.63	457.64
14×1.5	17.58	18.98	17.24	20.23	23.69	18.07	19.74	432.29	550.6	492.73	684.8	1248.47	445.6	564.78
14×2.5	21.27	22.51	20.42	22.97	26.03	21.54	22.78	670.16	800.4	721.45	913.82	1 563.59	683.64	814.71

续表

芯数×标称截面（mm^2）	电缆计算外径(mm)							电缆计算重量(kg/km)						
	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP
14×4	23.96	24.76	23.09	25.04	28.50			929.26	1078.3	973.45	1171.9	1 388.3		
14×6	26.48	27.48	25.34	27.29	30.75			1 246.48	1 300.6	1 203.9	1 508.77	2 290.6		
16×0.5						14.52	15.92						246.7	291.84
16×0.75	15.32	16.72	15.11	17.66		15.74	17.14	312.4	423.63	400.9			323.67	441.90
16×1.0	16.17	17.57	15.87	18.42		16.40	17.80	359.8	469.4	389.74	576.52		373.78	487.4
16×1.5	18.47	19.87	18.07	21.06	24.52	18.99	20.39	485.73	596.73	489.73	745.82	1 337.18	496.79	614.92
16×2.5	22.08	23.60	22.03	23.98	27.44	23.08	23.88	775.5	880.6	789.63	1 005.3	1 687.08	787.62	892.44
19×0.5						15.20	16.60						287.45	346.78
19×0.75	16.05	17.45	15.80	18.35	21.45	16.50	17.90	347.7	456.78	386.74		637.5	359.68	473.4
19×1.0	10.95	18.35	16.60	19.59	22.25	17.20	18.60	408.28	517.38	413.6	645.14	1 039.2	421.6	529.60
19×1.5	19.40	21.24	19.39	21.94	25.40	20.55	21.79	533.63	674.89	612.3	824.36	1 442.2	564.89	696.43
19×2.5	23.94	24.74	23.09	25.04	28.50	24.24	25.04	1 053.94	1 053.94	986.78	1 119.76	1 834.57	898.97	1 069.32
24×0.5						17.46	18.86						327.68	396.43
24×0.75	18.48	19.88	18.09	21.08	24.54	19.02	20.42	400.74	523.84	476.43		1 021.5	414.96	536.79
24×1.0	19.56	21.40	19.49	22.04	25.50	19.86	21.70	510.24	634.54	580.6	776.6	1401.8	516.78	656.83
24×1.5	23.54	24.34	22.91	24.86	28..32	21.20	25.00	744.12	866.76	792.34	1 001.49	1 709.87	759.4	884.51
24×2.5	27.74	28.74	26.63	28.58	32.04	28.10	29.10	1 110.76	1 258.4	1 179.63	1 376.05	2 199.52	1 128.76	1 279.49
27×0.5						17.81	19.21						359.6	489.6
27×0.75	18.85	20.25	18.88	21.43	24.89	19.41	20.81	476.8	600.34	503.4		1 180.5	492.64	634.6
27×1.0	20.56	21.80	19.87	22.42	25.88	20.87	22.11	578.68	713.9	612.45	821.34	1458.14	596.49	737.87
27×1.5	24.02	24.82	23.36	25.31	28.77	24.69	25.49	807.21	957.4	886.75	1 063.83	1 788.95	924.73	983.76
27×2.5	28.32	29.32	27.18	29.13	32.59	28.69	29.69	1 209.34	1 359.4	1 286.43	1 480.54	2 316.24	1 225.64	1378.4

续表

芯数×标称截面（mm^2）	电缆计算外径(mm)							电缆计算重量(kg/km)						
	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP
30×0.5						18.40	19.80						396.78	554.7
30×0.75	19.49	21.33	19.48	22.03	25.49	20.67	21.91	523.7	635.7	600.45		1 240.5	539.49	658.41
30×1.0	21.68	22.48	20.51	23.06	26.52	22.00	22.80	651.32	786.9	725.6	883.6	1 536.35	667.42	799.44
30×1.5	24.83	25.83	24.12	26.07	29.53	25.53	26.53	882.34	1 093.4	891.43	1 150.64	1 893.2	897.41	1 123.45
30×2.5	29.32	30.32	28.10	30.85	35.61	29.70	30.70	1 327.09	1 473.5	1 384.4	1 808.46	2 851.49	1 343.6	1 493.4
37×0.5						19.72	21.56						470.6	594.32
37×0.75	21.95	22.75	21.42	23.37	26.83	22.58	23.38	600.79	704.83	588.45		1 398.7	616.83	731.83
37×1.0	23.21	24.01	22.54	24.40	27.95	23.56	24.36	771.25	912.4	887.63	1 013.75	1 710.95	792.4	945.63
37×1.5	26.44	27.64	25.83	27.78	31.24	27.41	28.41	1 050.85	1 196.7	1 105.6	1 831.31	2 127.94	1 072.4	1 224.5
37×2.5	31.54	33.20	30.83	33.58	37.68	31.96	33.63	1 591.67	1 741.7	1 681.4	2 139.03	3 213.37	1 612.8	1 768.47
44×0.5						22.42	23.82						540.98	620.63
44×0.75	24.38	25.38	23.71	25.66	29.12	25.10	26.10	745.83	887.6	809.95		1 576.4	764.63	908.73
44×1.0	25.32	27.02	24.99	26.94	30.40	26.22	27.22	915.81	1 035.8	987.63	1 184.22	1 952.98	938.4	1 076.90
44×1.5	29.74	30.74	28.75	32.16	36.26	30.62	31.62	1 251.35	1 394.8	1 315.7	1 817.02	2 838.9	1 274.6	1 421.69
44×2.5	36.00	37.20	34.37	37.56	41.22	36.48	37.68	1 950.81	2 100.8	2 018.4	2 532.19	3 699.66	1 974.9	2 128.67
48×0.5						23.37	24.17						598.7	686.94
48×0.75	24.76	25.76	24.06	26.01	29.47	25.49	26.49	832.6	927.4	887.98		1 789.4	854.4	958.31
48×1.0	26.22	27.22	25.37	27.32	30.78	26.63	27.63	967.97	1 097.8	1 023.6	1 236.28	2 018.99	986.9	1 118.4
48×1.5	30.22	31.22	29.20	32.61	36.71	31.12	32.12	1 326.06	1 487.6	1 397.6	1 890.52	2 935.65	1 352.6	1 508.97
48×2.5	36.58	37.28	34.92	38.11	41.67	37.08	38.28	2 070.87	2 147.3	2 097.4	2 662.87	3 843.2	2 094.6	2 178.4
52×0.5						23.96	24.76						634.6	763.23
52×0.75	25.39	26.39	24.66	26.61	30.07	26.14	27.14	898.45	1 009.7	935.75		1 920.3	912.45	1 034.61

续表

芯数×标称截面（mm^2）	电缆计算外径（mm）							电缆计算重量（kg/km）						
	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP	KVV	KVVP	$KVVP_2$	KVV_{22}	KVV_{32}	KVVR	KVVRP
52×1.0	26.90	27.90	26.00	27.95	31.41	27.32	28.32	1 035.24	1 187.63	1 113.4	1 305.04	2 109.39	1 056.78	1 212.9
52×1.5	31.02	32.68	30.62	33.37	36.67	31.95		1 420.95	1 578.98	1 493.6	1 997.35	3 068.23	1 449.8	
52×2.5	37.57	39.21	35.84	39.03	41.59	38.08		222.09	2 396.9	2 298.75	2 819.99	4 032.11	2 249.6	
61×0.5						25.28	26.28						689.72	812.44
61×0.75	26.81	27.81	26.00	27.95	31.41	27.62	28.62	967.6	1 087.4	1 025.6		2 084.6	991.6	1 109.6
61×1.0	28.43	29.43	27.44	29.39	32.85	28.88	29.84	1 186.72	1 316.8	1 256.78	1 470.46	2 314	1 209.7	1 348.7
61×1.5	33.50	34.70	32.33	35.08	39.18	34.49		1 680.42	1 837.4	1 745.6	2 241.5	3 366.54	1 698.7	
61×2.5	40.24	41.44	37.91	41.10	43.66	40.78		2 599.11	2 749.8	2 599.4	3 175.45	4 461.1	2 612.3	

二、交联聚乙烯绝缘控制电缆

1. 交联聚乙烯绝缘控制电缆(简称交联塑控缆)的型号及名称

交联聚乙烯绝缘控制电缆的型号及名称见表 3－170。

表 3－170　交联塑控缆的型号及名称

型　号	名　称	型　号	名　称
KYJV	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套控制电缆	KYJ22	交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套控制电缆
KYJV－FR	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套阻燃控制电缆	KYJ22－FR	交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套阻燃控制电缆
KYJVP	交联聚乙烯绝缘铜丝编织屏蔽聚氯乙烯护套控制电缆	KYJ32	交联聚乙烯绝缘细钢丝铠装聚氯乙烯护套控制电缆
KYJVP－FR	交联聚乙烯绝缘铜丝编织屏蔽聚氯乙烯护套阻燃控制电缆	KYJ32－FR	交联聚乙烯绝缘细钢丝铠装聚氯乙烯护套阻燃控制电缆

2. 交联聚乙烯绝缘控制电缆的规格范围

交联聚乙烯绝缘控制电缆的规格范围 3－171。

表 3－171　交联塑控缆规格范围

标称截面(mm^2)	电　缆　型　号			
	KYJV、KYJV－FR	KYJVP、KYJVP－FR	KYJ22、KYJ22－FR	KYJ32、KYJ32－FR
	芯　数			
1	4—37	4—37	6—37	19—37
1.5	4—37	4—37	4—37	10—37
2.5	4—37	4—37	4—37	8—37
4	4—14	4—14	4—14	6—14
6	4—10	4—10	4—10	6—10

注：缆芯规格为 4、5、6、7、8、10、12、14、16、19、24、27、30、33、37 芯。

3. 交联聚乙烯绝缘控制电缆的结构尺寸及电气性能

交联塑控缆导体长期允许工作温度为 90 ℃，结构尺寸及电气性能见表 3－172。

表 3-172　交联塑控缆(实心导体)结构尺寸及电气性能

芯数	标称截面 (mm^2)	绝缘厚度 (mm)	电缆型号							导线最大直流电阻 20 ℃时 (Ω/km)	最小绝缘电阻 90 ℃时 (MΩ/km)
			KYJV、KYJV-FR			KYJVP、KYJVP-FR					
			护套厚度 (mm)	电缆外径(近似) (mm)	电缆重量(近似) (kg/km)	编织铜丝直径 (mm)	护套厚度 (mm)	电缆外径(近似) (mm)	电缆重量(近似) (kg/km)		
4	1	0.7	1.5	10.1	122	0.2	1.5	13.3	241	18.1	1.231
	1.5	0.7	1.5	10.8	153	0.2	1.5	14.0	279	12.1	1.049
	2.5	0.7	1.5	11.8	202	0.2	1.5	15.0	340	7.41	0.879
	4	0.7	1.5	13.0	276	0.2	1.5	16.2	457	4.61	0.731
	6	0.7	1.5	14.2	364	0.2	1.5	17.4	528	3.08	0.627
5	1	0.7	1.5	10.8	142	0.2	1.5	14.0	268	18.1	1.231
	1.5	0.7	1.5	11.6	180	0.2	1.5	14.8	315	12.1	1.049
	2.5	0.7	1.5	12.7	240	0.2	1.5	15.9	387	7.41	0.879
	4	0.7	1.5	14.1	332	0.2	1.5	17.3	527	4.61	0.731
	6	0.7	1.5	15.4	441	0.2	2.0	19.8	657	3.08	0.627
6	1	0.7	1.5	11.6	168	0.2	1.5	14.8	303	18.1	1.231
	1.5	0.7	1.5	12.5	207	0.2	1.5	15.7	352	12.1	1.049
	2.5	0.7	1.5	13.7	279	0.2	1.5	16.9	437	7.41	0.879
	4	0.7	1.5	15.2	388	0.2	2.0	19.4	601	4.61	0.731
	6	0.7	1.5	16.7	518	0.25	2.0	21.1	777	3.08	0.627

续表

芯数	标称截面（mm²）	绝缘厚度（mm）	电缆型号							导线最大直流电阻 20 ℃时（Ω/km）	最小绝缘电阻 90 ℃时（MΩ/km）
			KYJV、KYJV－FR			KYJVP、KYJVP－FR					
			护套厚度（mm）	电缆外径（近似）（mm）	电缆重量（近似）（kg/km）	编织铜丝直径（mm）	护套厚度（mm）	电缆外径（近似）（mm）	电缆重量（近似）（kg/km）		
7	1	0.7	1.5	11.6	176	0.2	1.5	14.8	311	18.1	1.103
	1.5	0.7	1.5	12.5	227	0.2	1.5	15.7	372	12.1	0.956
	2.5	0.7	1.5	13.7	310	0.2	1.5	16.9	468	7.41	0.784
	4	0.7	1.5	15.2	435	0.2	1.5	19.4	648	4.61	0.665
	6	0.7	1.5	16.7	584	0.2	2.0	21.1	843	3.08	0.563
8	1	0.7	1.5	12.8	200	0.2	2.0	16.0	348	18.1	1.103
	1.5	0.7	1.5	13.8	258	0.2	2.0	17.0	417	12.1	0.956
	2.5	0.7	1.5	15.2	353	0.2	2.0	19.4	566	7.41	0.784
	4	0.7	1.5	16.9	495	0.25	2.0	21.3	757	4.61	0.665
	6	0.7	2.9	19.6	706	0.25	2.0	24.0	953	3.08	0.563
10	1	0.7	1.5	14.2	239	0.2	1.5	17.4	402	18.1	1.103
	1.5	0.7	1.5	15.4	312	0.2	2.0	19.6	528	12.1	0.956
	2.5	0.7	1.5	17.0	428	0.25	2.0	21.4	692	7.41	0.784
	4	0.7	2.0	20.0	646	0.25	2.0	23.4	898	4.61	0.665
	6	0.7	2.0	22.0	863	0.25	2.0	26.4	1 147	3.08	0.563
12	1	0.7	1.5	14.6	270	0.2	1.5	17.8	438	18.1	1.103
	1.5	0.7	1.5	15.9	356	0.2	2.0	20.1	579	12.1	0.956
	2.5	0.7	1.5	17.5	494	0.25	2.0	21.9	764	7.41	0.784
	4	0.7	2.0	20.6	746	0.25	2.0	24.0	1 005	4.61	0.665

续表

芯数	标称截面（mm^2）	绝缘厚度（mm）	电缆型号							导线最大直流电阻 20 ℃时（Ω/km）	最小绝缘电阻 90 ℃时（MΩ/km）
			KYJV、KYJV－FR			KYJVP、KYJVP－FR					
			护套厚度（mm）	电缆外径（近似）（mm）	电缆重量（近似）（kg/km）	编织铜丝直径（mm）	护套厚度（mm）	电缆外径（近似）（mm）	电缆重量（近似）（kg/km）		
14	1	0.7	1.5	15.3	304	0.2	2.0	19.5	518	18.1	1.103
	1.5	0.7	1.5	16.6	402	0.2	2.0	20.8	634	12.1	0.956
	2.5	0.7	2.0	19.4	602	0.25	2.0	22.8	846	7.41	0.784
	4	0.7	2.0	21.6	850	0.25	2.0	25.0	1 121	4.61	0.665
16	1	0.7	1.5	16.0	338	0.2	2.0	20.2	561	18.1	1.103
	1.5	0.7	1.5	17.4	450	0.2	2.0	21.6	692	12.1	0.956
	2.5	0.7	2.0	20.3	672	0.25	2.0	23.7	928	7.41	0.784
19	1	0.7	1.5	16.8	386	0.2	2.0	21.0	620	18.1	1.103
	1.5	0.7	2.0	19.3	557	0.2	2.0	22.5	771	12.1	0.956
	2.5	0.7	2.0	21.3	774	0.25	2.0	24.7	1 042	7.41	0.784
24	1	0.7	2.0	20.4	518	0.2	2.0	23.6	745	18.1	1.103
	1.5	0.7	2.0	22.2	688	0.2	2.0	25.4	934	12.1	0.956
	2.5	0.7	2.0	24.6	961	0.25	2.0	28.0	1 270	7.41	0.784
27	1	0.7	2.0	20.8	564	0.2	2.0	24.0	795	18.1	1.103
	1.5	0.7	2.0	22.6	753	0.2	2.0	25.8	1 003	12.1	0.956
	2.5	0.7	2.0	25.1	1 059	0.25	2.0	28.5	1 373	7.41	0.784

续表

芯数	标称截面（mm^2）	绝缘厚度（mm）	电缆型号							导线最大直流电阻 20℃时（Ω/km）	最小绝缘电阻 90℃时（MΩ/km）
			KYJV、KYJV－FR			KYJVP、KYJVP－FR					
			护套厚度（mm）	电缆外径（近似）（mm）	电缆重量（近似）（kg/km）	编织铜丝直径（mm）	护套厚度（mm）	电缆外径（近似）（mm）	电缆重量（近似）（kg/km）		
30	1	0.7	2.0	21.5	614	0.2	2.0	24.7	614	18.1	1.103
	1.5	0.7	2.0	23.4	822	0.2	2.0	26.6	1 081	12.1	0.956
	2.5	0.7	2.0	26.0	1 160	0.25	2.0	29.4	1 485	7.41	0.784
33	1	0.7	2.0	22.2	663	0.2	2.0	25.4	663	18.1	1.103
	1.5	0.7	2.0	24.2	891	0.2	2.0	27.4	1 159	12.1	0.956
	2.5	0.7	2.0	26.9	1 261	0.25	2.0	30.3	1 598	7.41	0.784
37	1	0.7	2.0	23.0	727	0.2	2.0	26.2	727	18.1	1.103
	1.5	0.7	2.0	25.1	982	0.2	2.0	28.3	1 259	12.1	0.956
	2.5	0.7	2.0	27.9	1 395	0.25	2.0	31.3	1 743	7.41	0.784

注：控缆导体有实心和绞合两种，结构尺寸及电气性能基本相同。

三、乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆

1. 乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆的型号及名称

乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆的型号及名称见表 3-173。

表 3-173 电缆型号名称

型　号	名　称
KEYH	乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆
KEPYH	乙丙绝缘铜丝编织全屏蔽氯磺化聚乙烯护套控制电缆
ZR-KEYH	乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套阻燃控制电缆
ZR-KEPYH	乙丙绝缘铜丝编织全屏蔽氯磺化聚乙烯护套阻燃控制电缆

2. 乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆的规格及使用特性

乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆的规格及使用特性见表 3-174。

表 3-174 乙丙绝缘氯磺化聚乙烯护套控制电缆的规格及使用特性

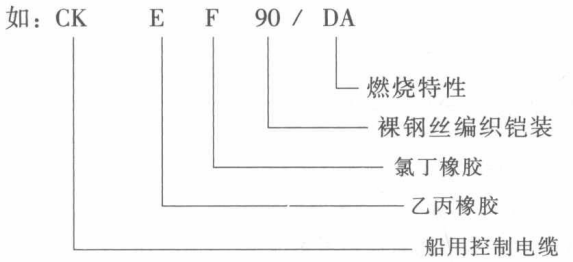
型　号	标称截面(mm^2)	芯数	体长期允许工作温度(℃)	敷设允许最低温度(℃)	敷设时最小弯曲半径不小于
KEYH、KEPYH	0.75,1.0,1.5,2.5	2～37			
ZR-KEYH,ZR-KEPYH	4.0	2～14	90	−15	4D
	6.0	2～10			

四、船用控制电缆

船用控制电缆型号,以类别专门用途组合列为首位,其后编制规律见表 3-175。

表 3-175 船用控制电缆型号编制及其字母含义

类别、用途、导体	绝缘	内护套	外护层(铠装及外套)	特性代号	备注
CK—船用控制电缆 T—铜(一般省略)	E—乙丙橡胶 J—交联聚乙烯 S—硅橡胶 X—天然丁苯橡胶 V—聚氯乙烯	V—聚氯乙烯 F—氯丁橡胶 H—氯磺化聚乙烯	80、82、90、92	DA—燃烧特性(在火焰条件下)	D—单根燃烧 A—有烟、有酸有毒



乙丙绝缘氯丁内套裸钢丝编织铠装船用控制电缆

船用控制电缆的类别及使用特性见表 3－176。

表 3－176　船用控制电缆的类别及使用特性

电缆类别	长期允许工作温度（℃）	额定电压（V）	最小弯曲半径(mm)		
			金属编织铠装型	非铠装型	
			任何 D	$D\leqslant 25$	$D>25$
乙丙绝缘船用控制电缆	85	250	$6D$	$4D$	$6D$
聚氯乙烯绝缘船用控制电缆	60				
天然丁苯胶绝缘船用控制电缆	70				
交联聚乙烯绝缘船用控制电缆	85				

注：D 为电缆外径。

1. 乙丙绝缘船用控制电缆

（1）乙丙绝缘船用控制电缆的型号、名称及使用条件见表 3－177。

表 3－177　乙丙绝缘船用控制电缆的型号、名称及使用条件

型　　号	名　　称	使用条件
CKEF/DA	乙丙绝缘氯丁外套船用控制电缆	固定敷设特性代号：DA 型－符合单根垂直燃烧试验
$CKEF_{80}$/DA	乙丙绝缘氯丁内套裸铜丝编织铠装船用控制电缆	
CKE_{82}/DA	乙丙绝缘铜丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆	
$CKEF_{90}$/DA	乙丙绝缘氯丁内套裸钢丝编织铠装船用控制电缆	
$CKEF_{92}$/DA	乙丙绝缘氯丁内套钢丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆	

续表

型　号	名　称	使用条件
CKEH/DA	乙丙绝缘氯磺化聚乙烯外套船用控制电缆	固定敷设特性代号：DA 型-符合单根垂直燃烧试验
$CKEH_{80}$/DA	乙丙绝缘氯磺化聚乙烯内套裸铜丝编织铠装船用控制电缆	
$CKEH_{90}$/DA	乙丙绝缘氯磺化聚乙烯内套裸钢编织铠装船用控制电缆	
$CKEH_{92}$/DA	乙丙绝缘氯磺化聚乙烯内套钢丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆	
CKEV/DA	乙丙绝缘聚氯乙烯外套船用控制电缆	
$CKEV_{80}$/DA	乙丙绝缘聚氯乙烯内套裸铜丝编织铠装船用控制电缆	
$CKEV_{90}$/DA	乙丙绝缘聚氯乙烯外套裸钢丝编织铠装船用控制电缆	
$CKEV_{92}$/DA	乙丙绝缘聚氯乙烯内套钢丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆	

(2) 乙丙绝缘船用控制电缆的规格。

乙丙绝缘船用控制电缆的规格范围及导体结构见表 3-178。

表 3-178　乙丙及聚氯乙烯绝缘船用控制电缆的规格范围及导体结构

型号	芯数	标称截面(mm^2)	导体结构根数/单线直径(mm)		标称绝缘厚度(mm)
			截面 1 mm^2	截面 0.75 mm^2	
所有 DA 型	2、4、7、10、14、19、24、30、37	0.75、1	7/0.43	7/0.37	0.7

2. 聚氯乙烯绝缘和护套船用控制电缆

(1) 聚氯乙烯绝缘和护套船用控制电缆的型号、名称和使用条件见表 3-179。

表 3-179　聚氯乙烯绝缘和护套船用控制电缆的型号、名称和使用条件

型　号	名　称	使用条件
CKVV/DA	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯外套船用控制电缆	固定敷设特性代号：DA—符合单根垂直燃烧试验

续表

型　号	名　称	使用条件
$CKVV_{80}$/DA	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯内套裸铜丝编织铠装船用控制电缆	固定敷设特性代号：DA—符合单根垂直燃烧试验
CKV_{82}/DA	聚氯乙烯绝缘铜丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆	
$CKVV_{90}$/DA	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯内套裸钢丝编织铠装船用控制电缆	
$CKVV_{92}$/DA	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯内套钢丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆	

(2) 聚氯乙烯绝缘和护套船用控制电缆的规格范围(见表 3-180)。

表 3-180　聚氯乙烯绝缘和护套船用控制电缆的规格范围

型号 DA 型	芯　数	标 称 截 面(mm^2)
所有型号	2、4、7、10、14、19、24、30、37	0.75、1

3. 天然丁苯胶绝缘船用控制电缆

天然丁苯胶绝缘船用控制电缆的型号及名称见表 3-181。

表 3-181　天然丁苯胶绝缘船用控制电缆的型号及名称

型　号	名　称
CKXF	天然丁苯绝缘氯丁外套船用控制电缆
$CKXF_{80}$	天然丁苯绝缘氯丁内套裸铜丝编织铠装船用控制电缆
CKX_{82}	天然丁苯绝缘铜丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆
$CKXF_{90}$	天然丁苯绝缘氯丁内套裸钢丝编织铠装船用控制电缆
$CKXF_{92}$	天然丁苯绝缘氯丁内套钢丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆
CKXV	天然丁苯绝缘聚氯乙烯外套船用控制电缆
$CKXV_{80}$	天然丁苯绝缘聚氯乙烯内套裸铜丝编织铠装船用控制电缆
$CKXV_{90}$	天然丁苯绝缘聚氯乙烯内套裸钢丝编织铠装船用控制电缆
$CKXV_{92}$	天然丁苯绝缘聚氯乙烯内套钢丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆

天然丁苯胶绝缘船用控制电缆的规格范围见表 3-182。

表 3-182　天然丁苯胶绝缘船用控制电缆的规格范围及导体结构

型号	芯数	标称截面(mm²)	标称绝缘高度(mm)		导体结构:根数/单线截面(mm²)			
			电缆标称截面(mm²)		电缆标称截面(mm²)			
			0.75、1、1.5	2.5	0.75	1	1.5	2.5
所有型号	2、4、7、10、14、19、24、30、37	0.75、1、1.5、2.5	0.7	0.8	7/0.37	7/0.43	7/0.52	7/0.68

4. 交联聚乙烯绝缘船用控制电缆

交联聚乙烯绝缘船用控制电缆的型号、名称及使用条件见表 3-183。

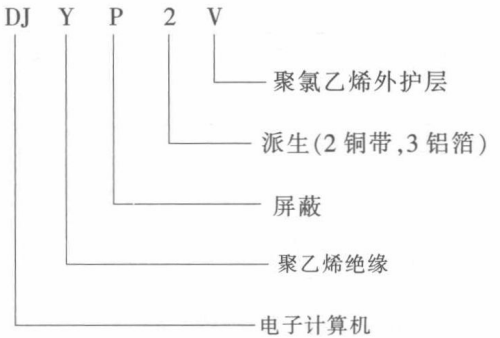
表 3-183　交联聚乙烯绝缘船用控制电缆的型号、名称及使用条件

型　号	名　称	使用条件
CKJV/DA	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯外套船用控制电缆	固定敷设特性代号:DA 型
$CKJV_{80}$/DA	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯内套裸铜丝编织铠装船用控制电缆	
CKJ_{82}/DA	交联聚乙烯绝缘铜丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆	
$CKJV_{90}$/DA	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯内套裸钢丝编织铠装船用控制电缆	
$CKJV_{92}$/DA	交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯内套钢丝编织铠装聚氯乙烯外套船用控制电缆	

交联聚乙烯绝缘船用控制电缆的规格范围(与聚氯乙烯绝缘和护套船用控制电缆同,见表 3-180)。

五、电子计算机用屏蔽控制电缆

电子计算机用屏蔽控制电缆适用于交流额定电压为 300 V/500 V 及以下,对于防干扰性能要求较高的电子计算机、检测仪表、仪器仪表作连接用的控制电缆。其型号含义如下:



$DJYP_2V$ 是铜芯聚乙烯绝缘，对绞铜带屏蔽，聚氯乙烯护套电子计算机控制电缆。

电子计算机用屏蔽控制电缆的型号、名称及使用范围(见表 3－184)。

电缆长期允许工作温度不超过＋65 ℃；电缆敷设时的温度应不低于0 ℃，电缆弯曲半径不小于电缆外径的 10 倍。

表 3－184　电缆型号名称及使用范围

型　　号	名　　称	使用范围
$DJYP_2V$	聚乙烯绝缘、对绞铜带绕包屏蔽、聚氯乙烯护套电子计算机用控制电缆	固定敷设在室内、电缆沟中、管道内
$DJYP_2VP_2$	聚乙烯绝缘、对绞铜带绕包屏蔽、铜带绕包总屏蔽聚氯乙烯护套电子计算机用控制电缆	
$DJYP_3V$	聚乙烯绝缘，对绞铝箔聚酯薄膜合带绕包屏蔽、聚氯乙烯护套电子计算机用控制电缆	
$DJYP_3VP_3$	聚乙烯绝缘、对绞铝箔聚酯薄膜合带绕包屏蔽、铝箔聚酯薄膜复合带绕包总屏蔽、聚氯乙烯护套电子计算机用控制电缆	

电子计算机用屏蔽控制电缆的规格尺寸及重量见表 3－185、表 3－186。

表 3－185　$DJYP_2V$ 型、$DJYP_3V$ 型电缆规格及重量

缆芯对数(对)	线芯结构根数/单线直径(mm)	成缆结构(对)	电缆最大外径(mm)	重　量(kg/km)	
				$DJYP_2V$	$DJYP_3V$
1	1/1.01	1	8.9	91.5	72.3
2	1/1.01	2	15.2	200.6	161.0
3	1/1.01	3	16.1	261.0	202.5
4	1/1.01	4	17.6	325.5	248.0

续表

缆芯对数(对)	线芯结构根数/单线直径(mm)	成缆结构(对)	电缆最大外径(mm)	重量(kg/km)	
				$DJYP_2V$	$DJYP_3V$
5	1/1.01	5	19.2	391.7	295.1
7	1/1.01	1+6	22.0	544.2	409.5
(8)	1/1.01	1+7	23.9	626.0	474.0
(9)	1/1.01	1+8	25.5	714.4	542.3
10	1/1.01	2+8	27.6	763.0	570.2
12	1/1.01	3+9	28.5	877.0	619.3

注:括号内的芯数不常用。

表 3-186 $DJYP_2VP_2$ 型、$DJYP_3VP_3$ 型电缆规格

缆芯对数(对)	线芯结构根数/单线直径(mm)	成缆结构(对)	电缆最大外径(mm)	重量(kg/km)	
				$DJYP_2VP_2$	$DJYP_3VP_3$
1	1/1.01				
2	1/1.01	2	16.2	243.5	190.9
3	1/1.01	3	17.1	319.3	234.0
4	1/1.01	4	18.6	407.7	281.7
5	1/1.01	5	21.3	521.8	329.5
7	1/1.01	1+6	23.0	644.7	450.6
(8)	1/1.01	1+7	24.7	744.8	518.0
(9)	1/1.01	1+8	28.5	833.7	589.3
10	1/1.01	2+8	28.6	891.5	620.5
12	1/1.01	3+9	29.5	1 009.7	698.3

注:括号内的芯数不常用。

第六节 信号电缆

信号电缆型号的编制多以用途的代号字母为首位,编制规律见表 3-187。

表 3－187　信号电缆型号的编制及其字母含义

类型、用途	导体	绝缘	内护套	外护套
P—信号电缆	T—铜芯 （一般省略） L—铝芯	V—聚氯乙烯 Y—聚乙烯	L—铝套 V—聚氯乙烯护套	11、2 20、29

如：P　Y　V　29

- 29 — 内钢带铠装
- V — 聚氯乙烯外护套
- Y — 聚乙烯绝缘
- P — 信号电缆

铜芯聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套内钢带铠装信号电缆

信号电缆外护套编号意义如下：

2——钢带铠装麻披护层；

11——裸金属护套一级外护层；

20——裸钢带铠装护层；

29——内钢带铠装护层；

一、信号电缆的型号、名称、用途及使用条件

信号电缆的型号、名称、用途及使用条件 3－188。

表 3－188　信号电缆的型号、名称、用途及使用条件

型　号	名　　称	用　　途	使用条件	标准号
PVV	聚氯乙烯绝缘及护套信号电缆	供交流电压 250 V 及以下的铁路信号联络、火警信号、电报及自动机的线路装置用	在环境温度－40～50 ℃使用，不低于－5 ℃条件下敷设	电(D) 88—62
PVV_2	聚氯乙烯绝缘及护套钢带铠装信号电缆			
PVV_{20}	聚氯乙烯绝缘及护套裸钢带铠装信号电缆			
PYV PVV_{29}	聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套信号电缆；聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套内钢带铠装信号电缆	供交流电压 250 V 及以下的铁路信号联络、火警信号、电报及自动机的线路装置用	在不低于－40 ℃环境温度下使用	企业标准

续表

型　号	名　　称	用　　途	使用条件	标准号
JXYP-P	聚氯乙烯绝缘及护套屏蔽信号电缆	适用于具有屏蔽要求的控制信号设备、电信电子设备及自动化装置	使用温度：－40～65 ℃；敷设温度：不低于－15 ℃；弯曲半径：不小于电缆外径4倍	企业标准
FSPH	聚四氟乙烯绝缘双绞屏蔽橡胶护套信号电缆	适用于野外恶劣环境条件下，移动使用的无线电装置之电气信号连接	环境温度：－55～＋250 ℃；相对湿度：达98 %，温度为40 ℃	企业标准
SYV	同轴多芯高频信号电缆	适用于计算机、雷达、通信设备及无线电装置多组高频信号的传输	使用温度：－40～＋65 ℃；相对湿度：40 ℃时达98 %；敷设时温度：不低于－15 ℃	企业标准

二、聚氯乙烯绝缘信号电缆

1. 聚氯乙烯绝缘及护套信号电缆

聚氯乙烯绝缘及护套信号电缆的规格及重量见表3－189。

表3－189　电压250 V聚氯乙烯绝缘及护套信号电缆的规格及重量

芯数	电缆外径(mm)			电缆重量(kg/km)		
	PVV	PVV_2	PVV_{20}	PVV	PVV_2	PVV_{20}
2	10.0	19.4	15.4	102	505	414
3	10.4	19.8	15.8	119	533	440
4	11.1	20.5	16.5	139	573	476
5	11.9	21.3	17.3	162	619	517
7	12.8	22.2	18.2	196	678	571
9	14.7	24.9	20.9	262	932	831
12	16.0	26.2	22.2	294	1 009	872
14	16.7	26.9	22.9	328	1 068	952
16	18.5	28.7	24.7	405	1 207	1 085
19	19.4	29.6	25.6	446	1 280	1 152
21	20.2	30.4	26.4	489	1 351	1 218
24	23.2	33.4	29.4	500	1 467	1 316
27	23.6	33.8	29.8	647	1 628	1 475
30	24.3	34.5	30.5	693	1 699	1 541

续表

芯数	电缆外径(mm)			电缆重量(kg/km)		
	PVV	PVV_2	PVV_{20}	PVV	PVV_2	PVV_{20}
33	25.1	35.3	31.3	745	1 779	1 616
37	26.0	36.2	32.2	812	1 877	1 709
42	27.9	38.1	34.1	925	2 056	1 877
44	28.8	39.0	35.0	953	2 116	1 931
48	29.2	39.4	35.4	1 015	2 192	2 005

2. 聚氯乙烯绝缘及护套屏蔽信号电缆

聚氯乙烯绝缘及护套屏蔽信号电缆的主要技术性能：

试验电压：(交流 50 Hz)芯线对屏蔽层 500 V；芯线对芯数 1 000 V 试验 5 分钟不击穿；

绝缘电阻：(20 ℃)不小于 500 MΩ/m。

规格结构尺寸见表 3－190。

表 3－190　JXYP－P 型信号电缆的结构尺寸

芯数/标称截面(mm^2)	电缆外径(mm)	芯数/标称截面(mm^2)	电缆外径(mm)	芯数/标称截面(mm^2)	电缆外径(mm)	芯数/标称截面(mm^2)	电缆外径(mm)	芯数/标称截面(mm^2)	电缆外径(mm)
2×0.12	6.8	4×0.35	8.3	7×1.00	12.0	19×0.30	14.4	30×0.75	21.9
2×0.20	7.0	4×0.50	8.5	10×0.12	11.5	19×0.35	15.3	30×1.00	23.1
2×0.30	7.0	4×0.75	9.5	10×0.20	11.6	19×0.50	15.5	37×0.12	18.4
2×0.35	7.2	4×1.00	9.9	10×0.30	11.7	19×0.75	17.5	37×0.20	18.5
2×0.50	7.4	5×0.12	8.3	10×0.35	12.4	19×1.00	18.4	37×0.30	18.6
2×0.75	8.2	5×0.20	8.4	10×0.50	12.6	24×0.12	16.3	37×0.35	20.5
2×1.00	8.6	5×0.30	8.6	10×0.75	14.8	24×0.20	16.4	30×0.50	20.7
3×0.12	7.0	5×0.35	9.0	10×1.00	15.5	24×0.30	16.5	37×0.75	23.5
3×0.20	7.2	5×0.50	9.2	14×0.12	12.4	24×0.35	17.6	37×1.00	25.2
3×0.30	7.3	5×0.75	10.3	14×0.20	12.5	24×0.50	17.8	44×0.12	21.1
3×0.35	7.6	5×1.00	10.8	14×0.30	12.6	24×0.75	21.4	44×0.20	21.2
3×0.50	7.8	7×0.12	9.0	14×0.35	13.9	24×1.00	21.9	44×0.30	21.3
3×0.75	8.6	7×0.20	9.1	14×0.50	14.1	30×0.12	17.2	44×0.35	22.6
3×1.00	9.0	7×0.30	9.2	14×0.75	15.9	30×0.20	17.3	44×0.50	23.0
4×0.12	7.8	7×0.35	9.6	14×1.00	16.7	30×0.30	17.4	48×0.30	21.6
4×0.20	7.9	7×0.50	9.9	19×0.12	14.2	30×0.35	18.5	48×0.50	23.3
4×0.30	8.0	7×0.75	11.5	19×0.20	14.3	30×0.50	18.7		

三、聚乙烯绝缘信号电缆

聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套信号电缆的结构尺寸见表 3－191。

表 3－191　PYV、PYV_{20}型信号电缆的结构尺寸

芯　数	电缆外径(mm)		电缆重量(kg/km)	
	PYV	PYV_{20}	PYV	PYV_{20}
2	8.1	11.2	70	205
3	8.4	11.5	82	210
4	9.0	12.1	96	243
5	9.6	12.7	113	270
7	10.3	13.4	135	324
9	11.6	—	171	—
10	12.5	15.6	183	389
12	12.8	—	205	—
14	13.4	16.5	229	447
16	14.0	—	258	—
19	14.7	17.8	289	527
21	15.3	—	317	573
24	16.8	20.4	354	634
27	17.2	20.7	387	673
30	17.8	22.1	420	841
33	18.8	22.7	461	888
37	19.5	23.4	516	948
42	21.7	26.0	586	1 087
44	21.7	26.0	605	1 106
48	22.0	26.3	649	1 211
61	24.4	28.2	813	1 345

四、同轴多芯高频信号电缆

SYV 系列同轴多芯高频信号电缆的主要技术特性见表 3－192，规格结构数据见表 3－193。

表 3－192　SYV 系列同轴多芯高频信号电缆的主要技术特性

同轴电缆型规	SYV－50－1	SYV－50－2－1	SYV－75－2	SYV－75－3
波阻抗(Ω)	50±3.5	50±3.5	75±5	75±3
衰　减 (30MHz)	≤0.336 dB/m	≤0.203 dB/m	≤0.22 dB/m	1.22 dB/m

续表

同轴电缆型规	SYV－50－1	SYV－50－2－1	SYV－75－2	SYV－75－3
绝缘电阻（MΩ/km）	＞1 000	＞10 000	＞10 000	＞10 000
试验电压（50 Hz）	1 000 V	2 000 V	1 500 V	3 000 V
外径(mm)	1.9±0.10	2.9±0.10	2.9±0.10	5.0±0.25

注：有无总屏蔽按需方要求，并可以根据需方提出的技术要求生产数种型规同轴线缆芯的综合型多芯同轴电缆。

表 3－193　SYV 系列同轴多芯高频信号电缆的规格、结构数据

芯数	同轴电缆型规	电缆最大外径（mm）	芯数	同轴电缆型规	电缆最大外径（mm）
4	SYV－50－1	7.6	4	SYV－75－2	12
7		8.9	7		12
10		11.4	10		15.6
19		13.5	19	SYV－75－3	19.6
28		17.0	4		15.9
4	SYV－50－2－1	9.8	7		18.9
7		12.0	10		24.9
10		15.5	19	SYV－50－2－1	30.0
19		18.6	55		22.5～23.5
28		23.0			

交货长度：大于 50 m，允许不短于 15 m 的短电缆交货，但其数量不超过交货量的 10%，也可以按双方协议的长度交货。

第七节　通 信 电 缆

传输电气信息用的电缆称通信电缆。通信电缆型号的编制通常以用途或专门用途字母列为首位，编制规律见表 3－194。

表 3－194　通信电缆型号编制及其字母含义

类别、用途	导体	绝缘	内护套	特征	外护层	派生
H—市内电话缆 HB—通信线 HE—长途通信缆	T—铜芯 L—铝芯 G—铁芯	V—聚氯乙烯 Y—聚乙烯	H—橡套 L—铝套 Q—铅套	C—自承式 D—带形 E—耳机用	02、03 20、21 22、23	1—第一种 2—第二种

续表

类别、用途	导体	绝缘	内护套	特征	外护层	派生
HH—海底通信缆 HJ—局用电缆 HQ—同轴电缆 HR—电话软线 HP—配线电缆 HU—矿用话缆 HW—岛屿通信缆 CH—船用话缆 ……		X—橡皮 YF—泡沫聚乙烯 Z—纸	V—聚氯乙烯 ……	J—交换机用 P—屏蔽 S—水下 Z—综合型 W—尾巴电缆 ……	31、32 33、41 42、43 ……	

注：外护层型号为旧标准，型号含义与电力电缆相同。

一、船用通信电缆

1. 船用橡皮绝缘通信电缆

船用橡皮绝缘通信电缆的型号、名称及用途见表 3－195，规格见表 3－196。

表 3－195　船用橡皮绝缘通信电缆的型号、名称及用途

型号	名　称	用　途	标准号
GHHrP	船用橡皮绝缘屏蔽耐油橡套电信电缆	用于船舶及其他水上浮动建筑物中交流电压 500 V 及以下，或直流电压 1 000 V 及以下的电力、照明和控制装置，以及交流电压 250 V 及以下或直流电压 500 V 及以下的电信装置中作固定敷设，可能接触油类，避免日光直射的线路之用	JB1105—77
$CHHrP_{32}$	船用橡皮绝缘屏蔽耐油橡套镀锡铜丝编织电信电缆	同上，用于防干扰场所	

表 3－196　船用橡皮绝缘电缆的规格

型号	标称截面（mm^2）	芯　数
CHHrP $CHHrP_{32}$	0.75	2,3,4,5,7,10,(12),14,(16),19,24 (27),30,(33),37,(41),44,48

2. 船用对称式通信电缆

船用对称式通信电缆的型号、名称见表 3－197。规格见表 3－198。电缆使用在交流或直流 60 V 的系统，故障情况下也可在交流或直流 250 V 及以下正常运转，0.5 mm^2 或 0.75 mm^2 规格可用于控制系统。船用对称式通信电缆的型号

及名称见表 3－197，船用对称式通信电缆的规格 3－198。

表 3－197　船用对称式通信电缆的型号及名称

型号	名　称	标准号
CHE_{82}	乙丙绝缘铜丝编织铠装聚氯乙烯外套对称式船用通信电缆	GB9333—88
$CHEV_{82}$	乙丙绝缘聚氯乙烯内套铜丝编织铠装聚氯乙烯外套对称式船用通信电缆	
CHV_{82}	聚氯乙烯绝缘铜丝编织铠装聚氯乙烯外套对称式船用通信电缆	
$CHVV_{82}$	聚氯乙烯绝缘聚氯乙烯内套铜丝编织铠装聚氯乙烯外套对称式船用通信电缆	

表 3－198　船用对称式通信电缆的规格

型号	标称截面（mm^2）	芯　数　规　格
CHE_{82}、$CHEY_{82}$	0.5、0.75	1×2，2×2，4×2，7×2，10×2，14×2，19×2，24×2，30×2，37×2，48×2
CHV_{82}	0.3	5×2，10×2，15×2，20×2，25×2，30×2，40×2，50×2，60×2，80×2，100×2
$CHVV_{82}$	0.5、0.75	1×2，2×2，4×2，7×2，10×2，14×2，19×2，24×2，30×2，37×2，48×2

二、通信光缆

通信光缆产品型号编制以类别、用途字母列为首位，其余字母编制规律见表 3－199。

表 3－199　通信光缆型号的编制及字母含义

类别用途	光导纤维	加强构件	充增特征	内护套	外护层	光纤包（涂）覆形式
G—通用光缆	A_1—多模光纤 B_1—单模光纤 （A_1B_1为二氧化硅系纤维）	F—非金属加强构件 （金属型则省略无符号）	T—填充型 （非填充型的省略，无符号）	L—铝 Y—聚乙烯 V—聚氯乙烯 A—铝聚乙烯黏结型式 S—铝聚乙烯黏结皱纹铜管综合式 Z—聚乙烯纵包皱纹钢带综合式	02；03 22；23 32；33 ……	L—一次涂覆 S—松包 T—松包内填充 J—紧包 （只在产品规格中表示）

1. 通信光缆的产品型号、名称及主要用途

通信光缆的型号、名称及主要用途见表 3－200。

表 3－200　通信光缆的型号、名称及主要用途

型号	名　称	主 要 用 途	标准号
GA	金属加强构件铝聚乙烯黏结护套通信光缆	固定敷设，用于架空、管道或隧道等场合	ZBK13001—87
GA 22	金属加强构件铝聚乙烯黏结护套钢带铠装聚氯乙烯套通信光缆	固定敷设，用于架空、管道或隧道等场合，并可埋地	
GA 23	金属加强构件铝聚乙烯黏结护套钢带铠装聚乙烯套通信光缆		
GA 32	金属加强构件铝聚乙烯黏结护套细钢丝铠装聚氯乙烯套通信光缆		
GA 33	金属加强构件铝聚乙烯黏结护套细钢丝铠装聚乙烯套通信光缆	固定敷设，用于架空、管道或隧道等场合，并可埋地	
GS 03	金属加强构件铝聚乙烯黏结-皱纹钢管综合护套聚乙烯套通信光缆		
GL 02	金属加强构件铝套聚氯乙烯套通信光缆		
GL 03	金属加强构件铝套聚乙烯套通信光缆	ZBK13001—87	
GL 22	金属加强构件铝套钢带铠装聚氯乙烯套通信光缆		
GL 23	金属加强构件铝套钢带铠装聚乙烯套通信光缆		
GL 33	金属加强构件铝套细钢丝铠装聚乙烯套通信光缆	固定敷设，用于水线	
GY	金属加强构件聚乙烯护套通信光缆	固定敷设，用于架空	
GV	金属加强构件聚氯乙烯护套通信光缆	固定敷设，用于架空或室内	
GZ 03	金属加强构件聚乙烯-纵包皱纹钢带综合护套聚乙烯套通信光缆	固定敷设，用于架空	
GTA	金属加强构件填充型铝聚乙烯黏结护套通信光缆	固定敷设，用于架空、管道或隧道等场合	
GTA 22	金属加强构件填充型铝聚乙烯黏结护套钢带铠装聚氯乙烯套通信光缆	固定敷设，用于架空、管道或隧道等场合，并可埋地。	
GTA 23	金属加强构件填充型聚乙烯黏结护套钢带铠装聚乙烯套通信光缆	固定敷设，用于架空、管道或隧道等场合，并可埋地	

续表

型号	名　　称	主　要　用　途	标准号
GTA 32	金属加强构件填充型铝聚乙烯黏结护套细钢丝铠装聚氯乙烯套通信光缆		
GTA 33	金属加强构件填充型铝聚乙烯黏结护套细钢丝铠装聚乙烯套通信光缆		
GTS 03	金属加强构件填充型铝聚乙烯黏结—皱纹钢管综合护套聚乙烯套通信光缆		
GFY	非金属加强构件聚乙烯护套通信光缆	固定敷设，用于架空	
GFV	非金属加强构件聚氯乙烯护套通信光缆	固定敷设，用于架空或室内	
GFTY	非金属加强构件填充型聚乙烯护套通信光缆	固定敷设，用于架空、管道或隧道等场合	
GFTV	非金属加强构件填充型聚氯乙烯护套通信光缆		

2. 通信光缆的规格

光缆产品内、置放高、低频四线组及其信号线对时，规格和数量均参照同轴综合通信电缆。

组合形式举例：GFTY　8×A1S+3×4×0.9(高)+10×4×0.9(低)+4×1×0.6

上述规格产品为非金属加强构件填充型聚乙烯护套型通信光缆。规格为8根二氧化硅系多模渐变型松包光纤+3个高频四线组+10个低频四线组+4根信号线综合结构产品。

光缆的交货长度规定见表3-199。

表3-199　光缆的交货长度规定

品　　种	规定长度(mm)	短段长度不小于(m)
含高低频四线组综合光缆	500±10 1 000±20	250
其他光缆	1 000±20 2 000±40	500

第八节　其他类型电缆

一、直流高压软电缆

主要指仪器用直流或脉动直流高压电缆，为医疗检测和工业设备配套。

1. 品种系列、结构和性能

仅X射线机用的电缆是一个较完善的系列，其他只能算单一品种。常用产品型号见表3-200。

表3-200　常用直流高压软电缆型号和规格

品种		型号	电压(kV)	电流(A)
X射线机用电缆		XZ-50 XZ-75 XZ-100 XZ-150 XZ-200	50 75 100 150 200	10
乳腺摄影机电缆		GZRS	40	5
中子治疗机电缆		GEE	300	
聚乙烯高压电缆		GEYV	150 200	10
电子枪用电缆		GZXQ	30 60 100 150	20 30 30 15
电子枪用屏蔽电缆		GZQP	30	6
电子轰击炉用电缆①	聚氯乙烯	GZVHG	30	60
	橡皮	GZXHG	80	90
	聚乙烯	GZYHG	40	140
高压电炉用电缆		GZYXL	50	35
静电发生器用电缆		GZYJ	90 120 150	1 6 6
真空镀膜用电缆		GZXD	30	30
橡胶绝缘高压电缆		GZX	30	30

注：① 其右栏指三种绝缘材料。

X射线机用的电缆是一种较典型的结构，导体截面 1.5 mm^2(19/0.32)，有两根橡胶绝缘的线芯，用于X射线管灯丝加热，另一根是包半导电橡胶的控制线芯，三芯成缆后挤半导电橡胶，作为电场屏蔽，然后挤绝缘橡胶，再挤半导电橡胶，铜线编织，挤护套。对于无外屏蔽的电缆，不考虑绝缘的长期工作电场强度，在使用时空气介质承受大部分的电位梯度。

2. 使用要点

无外屏蔽电缆在敷设时应架空，避免与金属和人体接触，但有些移动设备，不能避免与人体和地面接触，应有严格限制电流的措施。这些电缆的设计寿命一般只考虑 0.5～2 年，需定期更换。有内外屏蔽的电缆，可安全地工作，使用寿命较长。直流高压软电缆，目前最高电压等级为 500 kV。所有电缆的终端都需配套设计制造。

二、加热电缆

具有高电阻线芯或发热元件的电线电缆，通电后散发热量，用于加热周围环境或介质，诸如生活设施、植物栽培、工业设备、液体输送管道、油井、机场跑道等。

1. 品种系列、结构和性能

可从恒功率型和自控温型来考虑两个基本系列。恒功率加热电缆按温度可分为 60 ℃、90 ℃、120 ℃、150 ℃、180 ℃五个等级，低温的可用一般塑料、橡胶绝缘和护套，90 ℃及以上等级可用氧化镁、交联聚烯烃、氟塑料等绝缘和护套。自控温型按温度可分为 65 ℃、85 ℃、110 ℃、130 ℃、150 ℃五个等级，大多用氟塑料绝缘和护套。加热电缆发热功率，一般为 10～50 W/m，特殊的为 70 W/m 以上。大致有以下几种电缆：

(1) 合金纤芯氧化镁绝缘加热电缆。其结构和制造方法与氧化镁电力电缆相同，可制成单芯、二芯、三芯，在铜套外可挤尼龙护套，工作温度为 90 ℃。

(2) 橡胶或塑料绝缘和护套加热电缆。其中心为一根有绝缘的铜线，其外以螺旋形疏绕电阻丝，再挤绝缘和护套，电阻丝一端与铜芯焊接，并加以绝缘，另一端连接另外一根绝缘铜线，最后装配注塑插头，工作温度不宜超过 60 ℃。

(3) 氟塑料绝缘及护套恒功率加热电缆。需用一台专用定距绝缘剥离机，用剥离机刀先在挤有 F-46 护套的两根平行放置的铜芯 F-46 绝缘线的两个窄侧，分别等距剥去约 1 mm 宽的绝缘，且两根绝缘线的裸铜点必须等距错开，在两根绝缘芯的护套外疏绕电阻丝，每两个裸铜部分之间的电阻丝就构成发热元件。从工艺上考虑，绕包最好与剥离绝缘连续进行，并应校验电阻丝与铜的接触情况，然后在其外挤包 F-46 绝缘。为改善散热，绝缘外用铜线编织，最外层再挤 F-46 护套。使用时两根平行铜线接电源，编织层接地。工作温度不宜超过 150 ℃。

(4) 用导电交联塑料制成的自控温加热电缆。其发热元件形状与平行电视馈线相似，但材料是含炭黑的交联聚乙烯或交联氟塑料，两根平行导体接通电源

后，中间导电塑料发热，由于导电塑料有较大的正电阻温度系数，温度升高或降低会自动调节功率，因此能保持恒温，按不同材料，工作温度为 60～150 ℃。

(5) 多晶体自控温电缆。其发热元件为圆形多晶体片(如 $BaTiO_3$)，等距离镶嵌在预先冲孔的氟塑料带上，其两侧敷上铜线编织带构成电极，其外挤氟塑料绝缘和护磁。两条编织带通电后，多晶体发热，同样利用其较大的正电阻温度系数，达到自控温效应。多晶体的温度、寿命和电压特性均比半导体塑料好。工作温度由绝缘材料而定。

(6) 油井加热电缆。有铝芯铅护套电缆和铜芯聚酯薄膜绝缘丁腈橡胶护套钢丝铠装电缆两种，在井下的三根导体短接，并密封绝缘，井上的三根导线接三相电源，直接利用大电流通过主线芯发热，使原油黏度降低，增加出油量。

2. 使用要点

氧化镁绝缘电缆，寿命最长，最可靠，用于重要建筑工程、机场跑道等。一般生活设施、植物栽培温室等可用橡胶塑料绝缘电缆。管道保温可用其他品种电缆。恒功率电缆需配控温系统，而自控温电缆则不需要。油井加热电缆系老产品，使用时收、放电缆不宜过快，应常注意其腐蚀情况，这种电缆现已使用不多。

三、特种电缆

特种电缆有耐热电缆、特高温电线电缆、核电站用电缆等品种，随着高新技术的发展，今后有记忆性的非线性功能电缆将有新的发展。

1. 矿物绝缘电缆

矿物绝缘电缆是耐火电缆品种之一，能通过 IEC331 标准试验要求，因此在发生火灾时，一定时间内电缆能保持正常工作。最常用的是氧化镁绝缘，其型号见表 2－39，结构为铜芯，铜套，为了防腐，可挤聚氯乙烯或尼龙护套，分轻型(500 V)和重型(750 V)两种。氧化镁电缆较硬，敷设时要正确控制长度。氧化镁电缆机械性能优良，在压扁状态下，并在火焰中仍能维持工作。氧化镁电缆制造工艺比较复杂，先在铜管和导体之间灌氧化镁粉并加以压实，或者先将氧化镁粉压成空心小柱子，穿入导体和铜管，然后通过拉拔、退火再拉拔等工序制成电缆。在加工过程中还需检测氧化镁的密实性、铜管的气密性等项目。氧化镁容易吸潮，因此成品应加以密封套，施工时应适当割去端头受潮的电缆，并立即制作终端或连接盒，必要时，可通电加热，驱除潮气后再制作终端。

表 3－201　氧化镁电缆型号和规格

型号	电压 (V)	标称截面 (mm^2)	芯数	绝缘厚度 (mm)
BTTQ BTTVQ	500	1～4	1,2	0.65
BTTQ BTTVQ	500	1～2.5	3,4,7	0.75
BTTZ BTTVZ	750	1～150	1,2,3,4,7	1.30

2. 云母带绝缘电缆

将大鳞片云母纸或粉云母纸用甲基苯基硅树脂黏合在两层无碱玻璃布之间，烘焙制成耐火带料，以 50 %搭盖度绕包在导体上，其外挤阻燃聚氯乙烯绝缘和护套；或挤阻燃氯磺化氯乙烯，硫化后再挤阻燃聚氯乙烯护套。这种电缆也能通过 IEC331 燃烧试验，而价格比氧化镁电缆低，较软而容易敷设，但云母带不能过度弯曲，因此不易制造很小规格的电线电缆。

3. 特高温电线电缆

主要指工作温度在 400 ℃以上的电线电缆，耐热性比四氟乙烯绝缘电线更为优越，导体采用铜、不锈钢、镍等，绝缘和护套为有机和无机材料结合所组成，使用材料有石英纤维、石棉、有机硅黏合剂等，这类电线在高温下不燃烧和焦化，并无有害物质逸出，最终只丧失机械性能，但保持一定电气性能，能满足静态或动态的工作条件。

KE－1000 型和 KK－1000 型可在 700 ℃下长期工作，900～1 000 ℃间歇工作，1 200 ℃下瞬时工作。NWW－500 型性能见表 2－40。

表 3－202　NWW－500 型电线性能

线芯材料	芯数	截面（mm^2）	绝缘电阻	弯曲半径	电压（V）	使用温度
铜	1～7	0.5～2	500 ℃时＞400（MΩ·m）	不小于绝缘外径 5 倍	600 或 1 000	500 ℃时工作两年以上
不锈钢	2～4	2～4				
镍	1	4.5～6				

4. 核电站用电缆

电缆结构与一般火力发电厂用电缆基本相同，而所用材料要求很高，必须通过以下试验：

（1）热老化试验。试验温度各国不同，美国为 138 ℃、300 h，相当于寿命 40 年。

（2）辐照试验。老化试验后进行 γ 射线辐照试验，美国对缓和环境电缆的吸收剂量规定为 7×10^5 Gy；严酷环境为 15×10^5 Gy。

（3）模拟 LOCA/HELB(Loss of Cooling Accident/High Energy Line Break) 试验。主要根据核反应堆设计要求确定试验条件，在容器内以规定的温度、蒸汽压力和时间进行循环试验，并喷射化学溶液，常采用含 1.5 %硼酸溶液，并在室温下用氢氧化钠调节其 pH 至 10.5。喷射速度对水平投影面为 34.2 L/min·m^2。

（4）浸水耐电压试验。对缓和环境电缆，在 γ 辐射试验后卷绕在 20 倍电缆外径的金属圆柱体上；对严酷环境电缆则为 40 倍，然后浸入室温水中，以 3.15 MV/m梯度施加电压，5 min 不击穿为合格。

第九节　母　　线

一、母线的分类和作用

在变配电所中各级电压配电装置的电气连接、变压器至开关柜的电气连接、各种电器之间的电气连接所采用的裸导线或绞线，统称为母线。母线的作用是汇流、分配和传送电能。由于母线在运行中有巨大的电功率通过，短路时，母线承受着很大的发热和电动力效应。因此，必须经过计算分析和比较，合理地选择母线材料、截面形状和截面积，以符合安全经济运行的要求。

以材质分主要有铜母线、铝母线、钢母线和合金母线等。以防护方式分母线主要有裸母线和封闭式母线(插接式母线)。裸母线又有硬母线和软母线之分。

常用母线型号和用途见表 3－203。硬母线性能 3－204。

表 3－203　常用母线型号和用途

类　别	常 用 型 号	用　途
裸母线	铜硬(软)母线 TMY(TMR)	配电所配电系统
	铝硬(软)母线 LMY(LMR)	配电所配电系统
	钢母线 CT	变电所配电系统
	铝锰合金管形母线	变电所配电系统
	扩径导线软母线 LGJK、LGKK	330～500 kV 变电所作母线用
封闭式母线	密集绝缘插接式母线槽 CCX6	配电所配电系统
	共箱隔相母线 GGFM 型	用于 10～15.75 kV 发电厂的厂用变压器至开关柜及配套设备柜电气回路连接
	共箱母线 GXFM 型	用于 6.3～10 kV 发电厂的厂用变压器至开关柜及配套设备柜电气回路连接

表 3－204　硬母线性能

材　质	硬　铜	硬　铝
密度/(g/cm^2)	8.9	2.7
抗拉强度/MPa	厚度 $\delta \leqslant 1.25$ mm，>300 厚度 δ 在 1.35～3.28 mm，>270 厚度 δ 在 3.5～7 mm，>260 厚度 $\delta \geqslant 7$，>250	<120
20 ℃时电阻率/($\Omega \cdot mm^3/m$)	1.72×10^{-2}	2.95×10^{-2}

续表

材　质	硬　铜	硬　铝
熔点/℃	1 083	658
每 1 ℃温度电阻系数	3.82×10^{-3}	3.6×10^{-3}
伸长率(%)	6	3
轧制截面误差	<1 %	<3 %

二、裸母线选择和安装

裸母线又称汇流排，是高低压配电装置常用的配电母线。工厂配电系统中较多选用铜、铝硬母线，较少选用软母线和管型线母线。

TMY 型铜硬母线常用规格见表 3-205，LMY 型铝硬母线常用规格见表 3-206。

表 3-205　TMY 型铜硬母线常用规格

型号规格宽×厚/mm×mm	质量/kg·m^{-1}	型号规格宽×厚/mm×mm	质量/kg·m^{-1}
TMY-30×4	1.07	TMY-60×6	3.19
TMY-30×5	1.33	TMY-60×8	4.26
TMY-30×6	1.59	TMY-80×8	5.68
TMY-40×4	1.42	TMY-80×10	7.10
TMY-40×5	1.78	TMY-100×8	7.10
TMY-40×6	2.13	TMY-100×10	8.88
TMY-50×5	2.22	TMY-120×8	8.53
TMY-50×6	2.66	TMY-120×10	10.66

表 3-206　LMY 型铝硬母线常用规格

型号规格宽×厚/mm×mm	质量/kg·m^{-1}	型号规格宽×厚/mm×mm	质量/kg·m^{-1}
TMY-20×3	0.16	TMY-60×6	0.97
LMY-20×4	0.22	LMY-80×6	1.30
LMY-30×3	0.24	LMY-80×8	1.73
LMY-30×4	0.32	LMY-80×10	2.16
LMY-40×4	0.43	LMY-100×6	1.62
LMY-40×5	0.54	LMY-100×8	2.16

续表

型号规格宽×厚/mm×mm	质量/kg·m^{-1}	型号规格宽×厚/mm×mm	质量/kg·m^{-1}
LMY-50×5	0.68	LMY-100×10	2.70
LMY-50×6	0.81	LMY-120×8	2.59
LMY-60×5	0.81	LMY-120×10	3.24

母线型号选择应根据使用环境、运行要求，额定电压，长期发热情况或经济电流密度等要求。母线截面则需按经济电流密度选择，选择后要经热稳定和动稳定校验。对于热稳定感兴趣读者可查阅一般电气书籍即可验证。对于母线动稳定检验可以归结为求最大允许跨距

$$l_{max} = \sqrt{10\sigma_{ux} W / f^{(3)}} \text{ (cm)}$$

式中 σ_{ux}——母线的允许应力(MPa)。一般铜为 140 MPa，钢为 160 MPa，槽形铝排为 42 MPa，矩形铝排为 70 MPa；

W——母线截面系数(cm^3)。当母线竖放时 $W=b^2h/6$；横放时 $W=bh^2/6$。其中 b 为母线的厚度，h 为母线的宽度；

$f^{(3)}$——三相短路时，母线单位长度(cm)所受的力(N)。

动稳定校验结果若母线实际跨距小于 l_{max} 则认为动稳定性符合要求。

母线加工前应对母线材料进行检查，母线表面应光洁，不应有裂纹、折皱、夹杂物及变形和扭曲现象。母线的配置应按设计规定，相同布置的主母线、分支母线、引下线及设备连接线应对称一致。

1. 硬母线的加工

硬母线加工主要包括矫正母线、测量划线、切割下料、弯曲和接触面加工等工序。母线矫正方法有手工矫正和机械矫正。手工矫正是将母线放在平台上或平直的型钢等垫块上，采用敲打方式将母线锤平，敲打时用力要适当，以防止母线变形。截面较大的母线应采用母线矫正机进行矫正，也就是利用丝杠顶压顶板的方式将母线矫正。母线应按现场直接量出母线的实际安装尺寸下料。小截面的母线可用钢锯切割，大截面母线可使用电动圆齿锯切割，切口上的毛刺应用锉刀去掉。

矩形母线的弯曲有平弯、立弯和扭弯三种方式。矩形硬母线的立弯与平弯见图 3-28。一般为提高弯曲的精确度，通常应先用粗铁丝做好样模。矩形母线宜采用冷弯。如采取热弯方式时应注意加热温度不应超过以下规定值：铜——350 ℃；铝——250 ℃；钢——600 ℃。对于铝母排，为了不过热，一般采用在弯曲处表面涂上黑漆加热至母排表面现出红色为止。母线起始弯曲点距最近的绝缘子上的母线支持夹板的边缘应大于 50 mm，且应不大于母线两支持点之间距离的 1/4。母线起始弯曲点距母线连接位置应大于 30 mm。

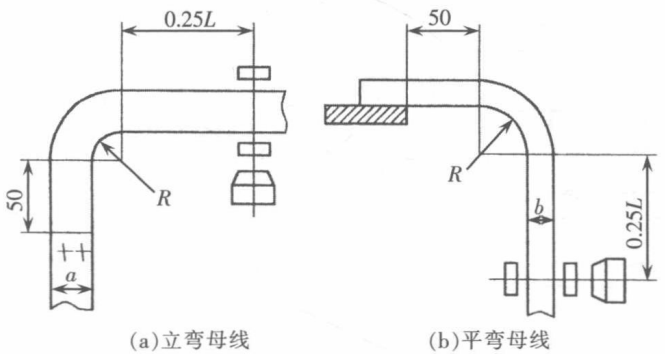
母排平弯时一般采用平弯机弯曲，当母线弯曲到一定程度后，应及时用样模

进行比较校核，以使母线达到合适的弯度。母排立弯时，一般采用立弯机弯曲，母线弯曲处不应有裂纹及显著的折皱。母线最小允许弯曲半径详见表 3－207。

表 3－207　母线最小弯曲半径(*R*)

母线种类	弯曲方式	母线断面尺寸/mm	最小弯曲半径/mm		
			铜	铝	钢
矩形母线	平弯	50×5 及其以下	2*b*	2*b*	2*b*
		125×10 及其以下	2*b*	2.5*b*	2*b*
	立弯	50×5 及其以下	1*a*	1.5*a*	0.5*a*
		125×10 及其以下	1.5*a*	2*a*	1*a*
棒形母线		直径为 16 及其以下	50	70	50
		直径为 16 及其以下	100	150	150

注：*a*—母线的宽度，*b*—母线的厚度。



(a)立弯母线　　(b)平弯母线

图 3－28　矩形硬母线的立弯与平弯

a-母线宽度；*b*-母线厚度；*L*-母线两支点间的距离

施工中母排拧麻花弯一般采用扭弯器。母线扭转 90°时，扭转部分的长度不应小于母线宽度的 2.5 倍。见图 3－29。

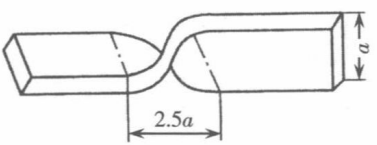


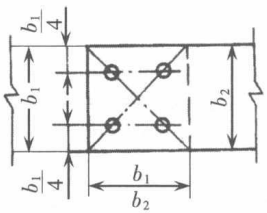
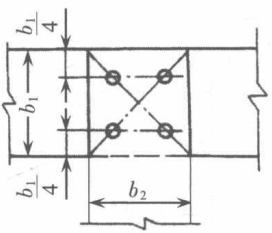
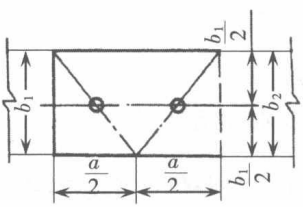
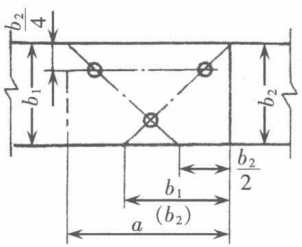
图 3－29　母线扭转 90°

母排与电气设略连接、母排间的螺栓连接需钻孔的孔眼直径应大于连接螺栓直径 1 mm，孔眼应垂直，并去掉孔眼毛刺。孔眼位置及孔径大小应根据母线的尺寸和连接要求而定。孔眼间相互距离的误差应小于 0.5 mm。

2. 硬母线的连接

硬母线一般采用焊接、螺栓搭接、夹板搭接和夹持螺栓搭接的方式连接。母线搭接的几何尺寸如表 3－208 所示。

表 3－208　矩形母线搭接几何尺寸　　(mm)

图　例	类别	序号	连接尺寸		钻孔要求			螺栓规格
			b_1	b_2	a	ϕ	数量	
	直接连接	1	125	125		19	4	M18
		2	112	112		17	4	M16
		3	100	100		17	4	M16
		4	90	90		17	4	M16
		5	80	80		17	4	M16
		6	71	71		13	4	M12
	垂直连接	7	125	125		19	4	M18
		8	125	112～71		17	4	M16
		9	112	112～71		17	4	M16
		10	100	100～71		17	4	M16
		11	90	90～71		17	4	M16
		12	80	80～71		17	4	M16
		13	71	71		13	4	M12
	直线连接	14	63	95		13	3	M12
		15	56	84		13	3	M12
		16	50	75		13	3	M12
	直线连接	17	45	90		13	2	M12
		18	40	80		13	2	M12
		19	35.5	71		11	2	M10
		20	31.5	63		11	2	M10
		21	28	56		11	2	M10
		22	25	50		11	2	M10

3. 矩形母线的载流量

(1) 常用尺寸规格矩形母线每极单片在温度为 70 ℃时的载流量见表 3－209。

表 3－209　常用尺寸规格矩形母线每极单片在温度为 70 ℃时的载流量

尺寸 宽×厚 (mm)	LMY 铝母线载流量(A)						TMY 铜母线载流量(A)					
	交　流			直　流			交　流			直　流		
	25 ℃	30 ℃	35 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃
15×3	165	155	145	165	155	145	210	198	185	210	198	185
20×3	215	202	189	215	202	189	275	258	242	275	258	242
25×3	265	249	233	265	249	233	340	320	299	340	320	299
30×4	365	343	321	370	348	326	475	447	418	475	447	418
40×4	480	451	422	480	451	422	625	587	550	625	587	550
40×5	540	507	475	545	512	479	700	658	616	705	662	620
50×5	665	625	585	670	630	590	860	808	757	870	817	765
50×6	740	695	651	745	700	656	955	897	840	960	902	845
60×6	870	817	765	880	827	774	1 125	1 060	990	1 145	1 075	1 010
80×6	1 150	1 080	1 010	1 170	1 100	1 030	1 480	1 390	1 350	1 510	1 420	1 330
100×6	1 425	1 340	1 255	1 455	1 370	1 280	1 810	1 700	1 590	1 875	1 760	1 650
60×8	1 025	965	902	1 040	977	915	1 320	1 240	1 160	1 345	1 265	1 185
80×8	1 320	1 240	1 160	1 355	1 274	1 193	1 690	1 590	1 490	1 755	1 650	1 545
100×8	1 625	1 530	1 430	1 690	1 590	1 488	2 080	1 955	1 830	2 180	2 050	1 920
120×8	1 900	1 785	1 670	2 040	1 920	1 795	2 400	2 255	2 110	2 600	2 440	2 290
60×10	1 155	1 085	1 015	1 180	1 110	1 040	1 475	1 386	1 300	1 525	1 433	1 342
80×10	1 480	1 390	1 305	1 540	1 450	1 355	1 900	1 785	1 670	1 990	1 870	1 750
100×10	1 820	1 710	1 600	1 910	1 800	1 680	2 310	2 170	2 030	2 170	2 320	2 170
120×10	2 070	1 950	1 820	2 300	2 160	2 025	2 650	2 490	2 330	2 950	2 770	2 600

(2) 常用尺寸规格矩形母线每极 2～4 片在温度为 70℃时的载流量见表 3－210。矩形截面母线不同温度下安全载流量校正系数见表 3－211。

表 3-210　常用尺寸规格矩形母线每极 2～4 片在温度为 70 ℃时的载流量表

尺寸宽×厚(mm)	LMY 铝母线载流量(A)						TMY 铜母线载流量(A)					
	交　流			直　流			交　流			直　流		
	2 片	3 片	4 片	2 片	3 片	4 片	2 片	3 片	4 片	2 片	3 片	4 片
60×6	1 350	1 720	—	1 555	1 940	—	1 740	2 240	—	1 990	2 495	—
80×6	1 630	2 100	—	2 055	2 460	—	2 110	2 720	—	2 630	3 220	—
100×6	1 935	2 500	—	2 515	3 040	—	2 470	3 170	—	3 245	3 940	—
60×8	1 680	2 180	—	1 840	2 330	—	2 160	2 790	—	2 485	3 020	—
80×8	2 040	2 620	—	2 400	2 975	—	2 620	3 370	—	3 095	3 850	—
100×8	2 390	3 050	—	2 945	3 620	—	3 060	3 930	—	3 810	4 690	—
120×8	2 650	3 380	—	3 350	4 250	—	3 400	4 340	—	4 400	5 600	—
60×10	2 010	2 650	—	2 110	2 720	—	2 560	3 300	—	2 725	3 530	—
80×10	2 410	3 100	—	2 735	3 400	—	3 100	3 990	—	3 510	4 450	—
100×10	2 860	3 650	4 150	3 350	4 160	5 650	3 610	4 650	5 300	4 325	5 385	7 250
120×10	3 200	4 100	4 650	3 900	4 860	6 500	4 100	5 200	5 900	5 000	6 250	8 350

注　1. 表中数据是指当环境温度为 25 ℃时的载流量。

2. 导体扁平放时，当导体宽度在 60 mm 及以下时，载流量应按表列数值减少 5 %；当宽度在 60 mm以上时，应减少 8 %。

表 3-211　矩形截面母线不同温度下安全载流量校正系数

周围空气温度/℃	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
校正系数	1.36	1.31	1.25	1.20	1.13	1.07	1.00	0.93	0.85	0.76	0.66

三、封闭插接母线选择和安装

(一)封闭插接母线的选择

封闭、插接母线适用于干燥和无腐蚀性气体的室内场所，除专用外不应使用在潮湿和有腐蚀性气体的场所。封闭、插接母线是把铜或铝母线用绝缘夹板夹在一起，用空气绝缘或缠包绝缘带绝缘，置于优质钢板外壳内。

封闭插接母线有单相二线制、单相三线制、三相三线制、三相四线制及三相五线制，可以依需要选用。

封闭插接母线本身结构紧凑，可以借助于增加母线槽的数量延伸线路。通过各种连接件与变压器配电箱等连接十分方便，还便于中间分支，适用于大电流的配电干线，可以缩短施工工期。由于使用钢材较多，造价很高。

（二）封闭插接母线的安装

（1）封闭、插接母线安装应符合下列规定。

① 母线与外壳同心，允许偏差为±5 mm。

② 段与段连接时，两相邻段母线及外壳应对准，连接后不应使母线及外壳受到额外应力。

③ 母线水平敷设时，至地面的距离不应小于 2.2 m。垂直敷设时，距地面 1.8 m 以下部分应采取防止机械损伤措施，但在配电室、电气竖井、技术层等电气专用房间内时除外。

（2）封闭、插接母线的接地应符合下列规定。

① 用金属外壳作为保护外壳的封闭插接母线，其外壳必须接地，但外壳不得作保护线（PE）和中性保护共用线（PEN）使用。

② 每段母线间用不小于 16 mm^2 的编织软铜带跨接，使母线外壳互相连成一体。

③ 母线、支架等接近裸露的导体应与 PEN 线或 PE 线连接可靠。

（3）500 V 以下低压母线交接试验时应符合下列规定。

（三）母线安装的安全净距要求

母线带电部分之间，带电部分与非带电部分之间的安全净距均不应小于表 3-212 中的规定。

表 3-212　母线间的安全距离

项次	最小距离（mm） 部　位	额定电压					
		室内				室外	
		0.4	1～3	6	10	0.4	1～10
1	带电部分至接地部分	20	75	100	125	75	200
2	不同相的带电部位之间	20	75	100	125	75	200
3	带电部分至栅栏	800	825	850	875	825	950
4	带电部分至网状遮栏	100	175	200	225	175	300
5	带电部分至板状遮栏	50	105	130	155	—	—
6	变配电所无遮栏母线至地面	2 300	2 375	2 400	2 425	2 500	2 700
7	不同时停电检修的无遮栏母线之间	1 875	1 875	1 900	1 925	2 000	2 200
8	出线套管至室外通道的地面	3 650	4 000	4 000	4 000	—	—

注　（1）室内海拔超过 1 000 m 或室外海拔超过 2 000 m 时，本表项次 1 值应按每升高 100 m 增大 1 %进行修正，项次 2～7 值应分别增加项次 1 的修正数值。

（2）本表所列各值不适用于制造厂生产的电器产品。

（四）母线固定

母线通常固定在绝缘子上，母线排列应整齐，同一段母线应在同一水平面上。母线支持点距离不应大于表 3－213 所列数值。

表 3－213　母线支持点距离　　（单位：mm）

母线安装方式 / 额定电压(kV)	水平或垂直
0.4	900
3～10	1 200

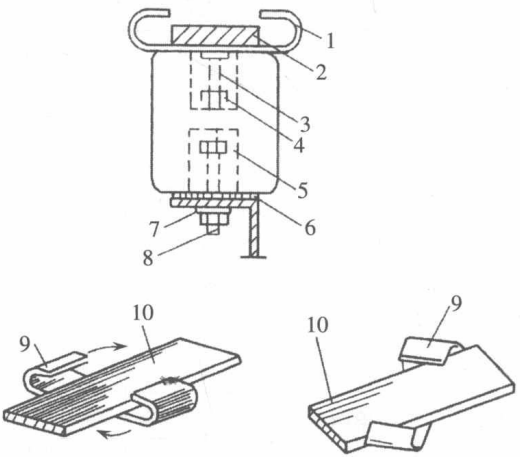
注　0.4 kV 的垂直母线，支持点距离大于表中数值且无法加设支持点时，应加设母线绝缘夹板。

母线在绝缘子上的固定方式有以下三种：

（1）用螺栓将母线拧紧在绝缘子上。这种方式必须事先根据绝缘子的位置，在母线相应的位置上钻出椭圆形的孔，以便运行中母线温度变化后有伸缩的余地，而不致拉坏绝缘子，长度大于 20 mm 的母线应有补偿措施。

（2）用夹板固定母线。这种方式不需要在母线上钻孔，只需将母线夹在夹板中间，用螺栓将夹板紧固即可。母线采用铁夹板固定时，不应形成闭合磁路。

（3）用卡板固定母线。这种方式最为简单，只需将母线放入固定在绝缘子上的卡板，然后将卡板转动一个角度卡住母线即可，如图 3－30 所示。



图－30　WX－01 型电车绝缘子及母线安装图

1-母线卡板；2-母线；3-机螺丝；4-螺母；
5-水泥砂浆；6-橡胶或石棉纸垫圈；7-弹簧垫圈；
8-螺栓；9-卡板；10-母线

四、母线的颜色标志和相序的排列

(1) 主回路母线的颜色标志见表 3－214。

表 3－214　主回路母线的颜色标志

回　路	类　别	颜　色　标　志
三相交流	第 1 相(A 相) 第 2 相(B 相) 第 3 相(C 相) 中性线 接地中性线	黄色 绿色 红色 淡蓝色 黄/绿双色(每种色宽为 15～100 mm,交替标注)
直流	正极(＋) 负极(－) 中线	棕色 蓝色 淡蓝色

(2) 母线相序的排列见表 3－215。

表 3－215　主回路母线相序的排列

类　别		垂直排列	水平排列	前后排列
三相交流	A 相	上方	左方	远方
	B 相	中方	中方	中间
	C 相	下方	右方	近方
直　流	正极	上方	左方	远方
	负极	下方	右方	近方
中线或中性接地线		最下方	最右方	最近方

第四章　电阻合金

电阻合金是制造电阻的重要材料，因具有温度系数小、稳定性好、机械强度高等特点，被广泛应用于电机、电器、仪器仪表及电子工业等领域。

电阻合金按其用途分为调节元件用电阻合金、精密元件用合金、电位器用电阻合金以及传感器用电阻合金。

第一节　调节元件用电阻合金

调节元件用电阻合金具有机械强度高，抗氧化和耐腐蚀性能好，工作温度较高等优点，主要用于电流和电压的调节与控制元件的绕组。调节元件用电阻合金的主要材料有康铜、新康铜、镍铬合金等，其性能和特点见表 4－1。

表 4－1　调节元件用电阻合金的性能和特点

名称	主要成分（%）	电阻率 ρ（20 ℃）（$\Omega \cdot mm^2/m$）	电阻温度系数 α（10^{-6}/℃）	对铜热电动势 E_a（μV/℃）	密　度 d（g/cm^3）	抗拉强度 σ_b（N/mm^2）	伸长率 δ（%）	最高工作温度（℃）	特点
康铜	Ni39 ～ 41，Mn1～2，Cu 余量	0.48	≈50	－43	8.9	390～590	15～30	500	抗氧化性能良好
新康铜	Mn10.8 ～ 12.5，Al2.5～4.5，Fe 1.0～1.6，Cu 余量	0.48	≈50	0.3～0.5	8.0	390～540	15～30	500	抗氧化性能比康铜差，价较廉
镍铬	Gr20 ～ 23，Ni 余量	1.09	≈70	3.5～4.0	8.4	640～780	10～30	500	焊接性能较差
镍铬铁	Gr15 ～ 18，Ni55 ～ 61，Fe 余量	1.12	≈150	＜1	8.2	640～780	20～35	500	焊接性能较差
铁铬铝	Cr12 ～ 15，Al3.5 ～ 5.5，Fe 余量	1.26	≈120	3.5～4.5	7.4	540～740	10～30	500	焊接性能较差

一、康铜

康铜用于制造各种电器和电阻元件，其使用温度不大于 500 ℃。康铜电阻合金以铜镍为主要成分，其特点是电阻温度系数较低、电阻系数较高，抗氧化性能和机械加工性能良好，耐腐蚀和易钎焊。

(1) 合金品种、化学成分及机械物理性能。康铜电阻合金有线材、片材和带材等品种。按国家标准 GB 6145—1985，康铜电阻的牌号为 6J40。化学成分及性能见表 4－1。

(2) 合金的规格尺寸及单位长度标称电阻值。康铜电阻合金线材、带材的尺寸规格及单位长度电阻值见表 4－2，康铜电阻合金带每米标称电阻值见表 4－3。康铜电阻合金带材的有效截面积见表 4－4。

表 4－2　康铜电阻合金线材、带材的尺寸规格及单位长度电阻值

线径(mm)		截面积 (mm^2)	每米电阻值(Ω/m)				每米标称质量(g/m)
标称值	允差		标称值	允差	下限	上限	
0.020	±0.002	0.000 314	1528	±10%	1 375	1 681	0.002 8
0.022		0.000 380	1263		1 136	1 389	0.003 4
0.025		0.000 491	978		880	1 076	0.004 4
0.028		0.000 616	780		702	857	0.005 5
0.032	±0.003	0.000 804	597	±8%	549	645	0.007 1
0.036		0.001 018	472		434	509	0.009 0
0.040		0.001 257	382		351	413	0.011 2
0.045		0.001 590	302		278	326	0.014 1
0.050		0.001 963	244		225	264	0.017 4
0.056		0.002 463	195		179	210	0.021 9
0.063		0.003 117	154		142	166	0.027 7
0.071		0.003 959	121		112	131	0.035 2
0.080		0.005 027	95.5		87.9	103.1	0.044 6
0.090		0.006 362	75.5		69.4	81.5	0.056 5
0.100		0.007 854	61.1		56.2	66.0	0.069 7
0.112		0.009 852	48.7		45.3	52.1	0.087 5
0.125	±0.005	0.012 27	39.1	±7%	36.4	41.9	0.109
0.140		0.015 93	31.2		29.0	33.4	0.137
0.150		0.017 67	27.2		25.3	29.1	0.157
0.160		0.020 11	23.9		22.2	25.5	0.179
0.170		0.022 70	21.1		19.7	22.6	0.202
0.180		0.025 45	18.9		17.5	20.2	0.226
0.190		0.028 35	16.9		15.7	18.1	0.252

续表

线径(mm)		截面积 (mm^2)	每米电阻值(Ω/m)				每米标称质量(g/m)
标称值	允差		标称值	允差	下限	上限	
0.200	±0.005	0.031 42	15.3	±6%	14.4	16.2	0.279
0.212		0.035 30	13.6		12.8	14.4	0.313
0.224		0.039 41	12.2		11.4	12.9	0.350
0.250		0.049 09	9.78		9.19	10.37	0.436
0.280		0.061 58	7.80		7.33	8.26	0.547
0.315	±0.010	0.077 93	6.16	±5%	5.85	6.47	0.692
0.355		0.098 98	4.85		4.61	5.09	0.879
0.400		0.125 7	3.82		3.63	4.01	1.12
0.450		0.159 0	3.02		2.87	3.17	1.41
0.500		0.196 3	2.44		2.32	2.57	1.74
0.560	±0.015	0.246 3	1.95	±4%	1.87	2.03	2.19
0.630		0.311 7	1.54		1.48	1.60	2.77
0.710		0.395 9	1.21		1.16	1.26	3.52
0.750		0.441 8	1.09		1.04	1.13	3.92
0.800		0.502 7	0.955		0.917	0.993	4.46
0.850		0.567 4	0.846		0.812	0.880	5.04
0.900		0.636 2	0.755		0.724	0.785	5.65
0.950		0.708 8	0.677		0.650	0.704	6.29
1.000		0.785 4	0.611		0.587	0.636	6.97
1.060	±0.020	0.882 5	0.544	±4%	0.522	0.566	7.84
1.120		0.985 2	0.487		0.468	0.507	8.75
1.180		1.094	0.439		0.421	0.456	9.71
1.250		1.227	0.391		0.375	0.407	10.9
1.320		1.368	0.351		0.337	0.365	12.2
1.400		1.539	0.312		0.299	0.324	13.7
1.500		1.767	0.272		0.261	0.282	15.7
1.600		2.011	0.239		0.229	0.248	17.9
1.700	±0.025	2.270	0.211	±4%	0.203	0.220	20.2
1.800		2.545	0.189		0.181	0.196	22.6
1.900		2.835	0.169		0.163	0.176	25.2
2.000		3.142	0.153		0.147	0.159	27.9
2.120		3.530	0.136		0.131	0.141	31.3
2.240	±0.030	3.941	0.122	±4%	0.117	0.127	35.0
2.360		4.374	0.110		0.105	0.114	38.8
2.500		4.909	0.097 8		0.093 9	0.101 7	43.6
2.650		5.515	0.087 0		0.083 5	0.090 5	49.0
2.800		6.158	0.078 0		0.074 8	0.081 1	54.7
3.000		7.069	0.067 9		0.065 2	0.070 6	62.8

续表

线径(mm)		截面积 (mm^2)	每米电阻值(Ω/m)				每米标称质量(g/m)
标称值	允差		标称值	允差	下限	上限	
3.150	±0.035	7.793	0.061 6	±4%	0.059 1	0.064 1	69.2
3.350		8.814	0.054 5		0.052 3	0.056 6	78.3
3.550		9.898	0.048 5		0.046 6	0.050 4	87.9
3.750		11.04	0.043 5		0.041 7	0.045 2	98.1
4.000		12.57	0.038 2		0.036 7	0.039 7	112
4.250		14.19	0.033 8		0.032 5	0.035 2	126
4.500		15.90	0.030 2		0.029 0	0.031 4	141
4.750	±0.040	17.72	0.027 1	±4%	0.026 0	0.028 2	157
5.000		19.63	0.024 4		0.023 5	0.025 4	174
5.300	±0.050	22.06	0.021 8	±4%	0.020 9	0.022 6	196
5.600		24.63	0.019 5		0.018 7	0.020 3	219
6.000	±0.060	28.27	0.017 0	±4%	0.016 3	0.017 7	251
6.300		31.17	0.015 4		0.014 8	0.016 0	277

表 4-3　康铜电阻合金带每米标称电阻值

厚度 (mm)	宽　度(mm)								
	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0
	每米电阻(Ω/m)								
0.180	0.450								
0.200	0.405								
0.224	0.362	0.285							
0.250	0.324	0.255	0.196						
0.280	0.289	0.228	0.175						
0.315	0.257	0.203	0.155	0.124					
0.355	0.228	0.180	0.138	0.110					
0.400	0.203	0.160	0.122	0.098 0	0.076 5				
0.450	0.180	0.142	0.109	0.087 1	0.068 0	0.054 4	0.043 5		
0.500	0.162	0.128	0.098 0	0.078 4	0.061 2	0.049 0	0.039 2		
0.560	0.145	0.114	0.087 5	0.070 0	0.054 7	0.043 7	0.035 0		
0.630	0.129	0.101	0.077 7	0.062 2	0.048 6	0.038 9	0.031 1		
0.710	0.114	0.089 9	0.069 0	0.055 2	0.043 1	0.034 5	0.0276		
0.800	0.101	0.079 8	0.061 2	0.049 0	0.038 3	0.030 6	0.024 5	0.019 4	
0.900	0.090 1	0.070 9	0.054 4	0.435	0.034 0	0.027 2	0.021 8	0.017 3	
1.000	0.081 1	0.063 8	0.049 0	0.039 2	0.030 6	0.024 5	0.019 6	0.015 5	0.012 2
1.120	0.072 4	0.057 0	0.043 7	0.035 0	0.027 3	0.021 9	0.017 5	0.013 9	0.010 9

续表

厚度(mm)	宽　度(mm)								
	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0
	每米电阻(Ω/m)								
(1.200)	0.067 5	0.053 2	0.040 8	0.032 7	0.025 5	0.020 4	0.016 3	0.013 0	0.010 2
1.250	0.064 8	0.051 1	0.039 2	0.031 3	0.024 5	0.019 6	0.015 7	0.012 4	0.009 80
1.400	0.057 9	0.045 6	0.035 0	0.028 0	0.021 9	0.017 5	0.014 0	0.011 1	0.008 75
(1.500)	0.054 0	0.042 6	0.032 7	0.026 1	0.020 4	0.016 3	0.013 1	0.010 4	0.008 16
1.600	0.050 7	0.039 9	0.030 6	0.024 5	0.019 1	0.015 3	0.012 2	0.009 72	0.007 65
1.800	0.045 0	0.035 5	0.027 2	0.021 8	0.017 0	0.013 6	0.010 9	0.008 64	0.006 80
2.000	0.040 5	0.031 9	0.024 5	0.019 6	0.015 3	0.012 2	0.009 80	0.007 77	0.006 12

表 4-4　康铜电阻合金带材的有效截面积　　(单位:mm²)

厚度(mm)	允差(mm)	宽　度(mm)								
		6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0
		允　差(mm)								
		±0.3	±0.3	±0.3	±0.4	±0.4	±0.5	±0.5	±0.6	±0.7
0.180	±0.010	1.066								
0.200		1.184								
0.224		1.327	1.684							
0.250	±0.010 −0.020	1.481	1.880	2.450						
0.280		1.658	2.106	2.744						
0.315		1.865	2.369	3.087	3.859					
0.355		2.102	2.670	3.479	4.349					
0.400	±0.020	2.369	3.003	3.920	4.900	6.272				
0.450		2.665	3.384	4.410	5.513	7.056	8.820	11.03		
0.500		2.961	3.760	4.900	6.125	7.840	9.800	12.25		
0.560	+0.020 −0.030	3.316	4.211	5.488	6.860	8.781	10.98	13.72		
0.630		3.731	4.738	6.174	7.717	9.878	12.35	15.43		
0.710		4.205	5.339	6.958	8.698	11.13	13.92	17.40		
0.800	±0.030	4.738	6.016	7.840	9.800	12.54	15.68	19.60	24.70	
0.900		5.330	6.768	8.820	11.03	14.11	17.64	22.05	27.78	
1.000	±0.040	5.922	7.520	9.800	12.25	15.68	19.60	24.50	30.87	39.20
1.120		6.633	8.422	10.98	13.72	17.56	21.95	27.44	34.57	43.90
(1.200)		7.106	9.024	11.76	14.70	18.82	23.52	29.40	37.04	47.04
1.250		7.403	9.400	12.25	15.31	19.60	24.50	30.63	38.59	49.00

续表

厚度（mm）	允差（mm）	宽度（mm）								
		6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0
		允差（mm）								
		±0.3	±0.3	±0.3	±0.4	±0.4	±0.5	±0.5	±0.6	±0.7
1.400	±0.050	8.291	10.53	13.72	17.15	21.95	27.44	34.30	43.22	54.88
(1.500)		8.883	11.28	14.70	18.38	23.52	29.40	36.75	46.31	58.80
1.600		9.475	12.03	15.68	19.60	25.09	31.36	39.20	49.39	62.72
1.800	±0.060	10.66	13.54	17.64	22.05	28.22	35.28	44.10	55.57	70.56
2.000		11.84	15.04	19.60	24.50	31.36	39.20	49.00	61.74	78.40

二、新康铜

新康铜用于制造各种电器变阻器和电阻元件。使用温度与康铜一样，以铜、锰为主要成分，电阻率与电阻温度系数与康铜相同，对铜的热电势略小于康铜，密度小于康铜，价格比康铜低。在电阻器的制造中大量取代康铜。

新康铜电阻合金可分为线材和带材等品种，根据标准 GB6149—1985，合金品排为 6J11。其化学成分可参阅表 4-1。

新康铜电阻合金的尺寸规格及单位长度电阻值、质量见表 4-5。

表 4-5　新康铜电阻合金的尺寸规格及单位长度电阻值、质量

线径（mm）		截面积（mm^2）	每米电阻值		每米标称质量（g/m）
标称值	允差		标称值（Ω/m）	允差（%）	
0.315	±0.010	0.077 93	6.29	±7	0.623 4
0.355		0.098 98	4.95		0.791 8
0.400		0.125 7	3.90		1.005
0.45		0.159 0	3.08		1.272
0.50	+0.01 −0.02	0.196 3	2.50		1.571
0.56		0.246 3	1.99		1.970
0.63		0.311 7	1.57		2.494
0.71		0.395 9	1.24		3.167
0.75		0.441 8	1.11		3.534
0.80		0.502 7	0.975		4.021
0.85		0.567 4	0.864		4.540

续表

线径(mm)		截面积 (mm^2)	每米电阻值		每米标称质量 (g/m)
标称值	允差		标称值 (Ω/m)	允差 (%)	
0.90	±0.02	0.636 2	0.770	±6	5.089
0.95		0.708 8	0.691		5.671
1.00		0.785 4	0.624		6.283
1.06		0.882 5	0.555		7.060
1.12		0.985 2	0.497		7.882
1.18		1.093	0.448		8.749
1.25		1.227	0.399		9.817
1.32		1.368	0.358		10.95
1.40		1.539	0.318		12.32
1.50		1.767	0.277		14.14
1.60		2.011	0.244		16.08
1.70		2.270	0.216		18.16
1.80		2.545	0.193		20.36
1.90	+0.02	2.835	0.173	±6	22.68
2.00	−0.03	3.142	0.156		25.13
2.12		3.530	0.139		28.24
2.24	±0.03	3.941	0.124	±5	31.53
2.36		4.374	0.112		34.99
2.50		4.909	0.099 8		39.27
2.65		5.515	0.088 8		44.12
2.80		6.158	0.079 6		49.26
3.00	+0.03 −0.04	7.069	0.069 3	±5	56.55
3.15		7.793	0.062 9		62.34
3.35		8.814	0.055 6		70.51
3.55		9.898	0.049 5		79.18
3.75		11.04	0.044 4		88.36
4.00		12.57	0.039 0		100.5
4.25		14.18	0.034 6		113.5
4.50		15.90	0.030 8		127.2
4.75	±0.04	17.72	0.027 6	±4	141.8
5.00		19.63	0.025 0		157.1
5.30		22.06	0.022 2		176.5
5.60		24.63	0.019 9		197.2
6.00		26.27	0.018 6		226.2
6.30	±0.05	31.17	0.015 7		249.4
6.70		35.26	0.013 9		282.1
7.10		39.59	0.012 4		316.7
7.50		44.18	0.011 1		353.4
8.00		50.27	0.009 75		402.1

注 1. 计算每米标称电阻时，电阻率取 0.49 μΩ·m。

2. 计算每米标称质量时，密度取 8 g/cm^3。

新康铜电阻合金带材的有效截面积可参阅表 4-4。其圆角系数及截面积参数与康铜相同。

新康铜电阻合金带材的尺寸规格及单位长度标称电阻值见表 4-6。

表 4-6　新康铜电阻合金带材的尺寸规格及单位长度电阻值、质量

厚度(mm)	宽　度(mm)								
	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0	25.0	31.5	40.0
	每米电阻(Ω/m)								
0.180	0.460								
0.200	0.414								
0.224	0.369	0.291							
0.250	0.331	0.261	0.200						
0.280	0.296	0.233	0.179						
0.315	0.263	0.207	0.159	0.127					
0.355	0.233	0.184	0.141	0.113					
0.400	0.207	0.163	0.125	0.100	0.078 1				
0.450	0.184	0.145	0.111	0.088 9	0.069 4	0.055 6	0.044 4		
0.500	0.165	0.130	0.100	0.080 0	0.062 5	0.050 0	0.040 0		
0.560	0.148	0.116	0.089 3	0.0714	0.055 8	0.044 6	0.035 7		
0.630	0.131	0.103	0.079 4	0.063 5	0.049 6	0.039 7	0.031 7		
0.710	0.117	0.091 8	0.070 4	0.056 3	0.044 0	0.035 2	0.028 2		
0.800	0.103	0.081 4	0.062 5	0.050 0	0.039 1	0.031 2	0.025 0	0.019 8	
0.900	0.091 9	0.072 4	0.055 6	0.044 4	0.034 7	0.027 8	0.022 2	0.017 6	
1.000	0.082 7	0.065 2	0.050 0	0.040 0	0.031 3	0.025 0	0.020 0	0.015 9	0.012 5
1.120	0.073 9	0.058 2	0.044 6	0.035 7	0.027 9	0.022 3	0.017 9	0.014 2	0.011 2
1.250	0.066 2	0.052 1	0.040 0	0.032 0	0.025 0	0.020 0	0.0160	0.012 7	0.010 0
1.400	0.059 1	0.046 5	0.035 7	0.028 6	0.022 3	0.017 9	0.014 3	0.011 3	0.008 9
1.600	0.051 7	0.040 7	0.031 2	0.025 0	0.019 5	0.015 6	0.012 5	0.009 9	0.007 8
1.800	0.046 0	0.036 2	0.027 8	0.022 2	0.017 4	0.013 9	0.011 1	0.008 8	0.006 9
2.000	0.041 4	0.032 6	0.025 0	0.020 0	0.015 6	0.012 5	0.010 0	0.007 9	0.006 3

注：本表电阻率取 0.49 μΩ·m。

三、镍铬、镍铬铁、电阻合金

镍铬合金牌号成分为 Cr20Ni80，镍铬铁牌号成分为 Cr15Ni60，系高电阻电热合金材料。由于电阻率比康铜和新康铜大、耐温高、抗氧化性能好，除了电热合金材料外，它还是理想的电阻合金材料。其电阻温度系数高于康铜类电阻，适宜在功率较大的电动机启动、调速、制动用的变阻器中作为电阻元件应用。

镍铬、镍铬铁电阻合金材料的尺寸规格及有关技术参数可参见热电材料。

四、铁铬铝合金

铁铬铝合金牌号为 1Cr13A14。由于新的铁铬铝品种（如 0Cr25A115，0Cr27A17Mo2 等）的发展，1Cr13A14 铁铬铝转向电阻合金的应用，其尺寸规格主要偏重于适用变阻器使用的带材制造，因其电阻率比康铜类、镍铬类合金高，能在高温状态下使用，是大功率变阻器中理想的电阻材料，其化学成分、物理性能可参考本章第二节热电合金材料。其尺寸规格、质量、长度及电阻换算见表 4-7 至表 4-9。

表 4-7　铁铬铝(1Cr13A14)电阻合金线材尺寸规格、质量、长度及电阻换算

线径 (mm)	截面积 (mm^2)	每米表面积 (cm^2/m)	每米质量 (kg/m)	每千克长度 (m/kg)	20 ℃电阻 米(Ω/m)	20 ℃每欧长度 (m/Ω)
0.10	0.007 8	3.14	0.000 058 1	17 206	159.2	0.006 28
0.12	0.011 3	3.77	0.000 0837	11 949	110.5	0.009 05
0.15	0.017 7	4.71	0.000 131	7 647	70.74	0.014 14
0.17	0.022 7	5.34	0.000 168	5 954	55.07	0.048 16
0.19	0.028 4	5.97	0.002 10	4 766	44.09	0.022 68
0.21	0.034 6	6.60	0.000 256	3 902	36.09	0.027 71
0.25	0.049 1	7.85	0.000 363	2 753	25.46	0.039 27
0.27	0.057 3	8.48	0.000 424	2 360	21.83	0.045 80
0.29	0.066 1	9.11	0.000 489	2 046	18.92	0.052 84
0.31	0.075 5	9.74	0.000 559	1 790	16.56	0.060 4
0.35	0.096 2	11.00	0.000 712	1 405	12.99	0.077 0
0.40	0.125 7	12.57	0.000 930	1 075	9.95	0.100 5
0.45	0.159 0	14.14	0.00 118	850	7.86	0.127 2
0.50	0.196 3	15.71	0.00 145	688	6.37	0.157 1
0.60	0.283	18.85	0.00 209	478	4.42	0.226
0.70	0.385	22.0	0.00 285	351	3.248	0.308
0.80	0.503	25.1	0.003 72	269	2.487	0.402
0.90	0.636	28.3	0.004 71	212	1.965	0.509
1.00	0.785	31.4	0.005 81	172	1.592	0.628
1.20	1.131	37.7	0.008 37	119	1.105	0.905
1.40	1.539	44.0	0.011 39	87.8	0.812	1.232
1.60	2.01	50.3	0.014 88	67.2	0.622	1.608
1.80	2.54	56.5	0.018 83	53.1	0.491	2.036
2.00	3.14	62.8	0.023 25	43.0	0.398	2.513
2.20	3.80	69.1	0.028 13	35.5	0.329	3.041
2.50	4.91	78.5	0.036 32	27.5	0.255	3.927
2.80	6.16	88.0	0.045 6	21.9	0.203	4.926
3.00	7.07	94.2	0.052 3	19.1	0.177	5.655
3.50	9.621	110.0	0.071 2	14.0	0.130	7.697
4.00	12.57	125.7	0.093 0	10.8	0.099 5	10.053
4.50	15.90	141.4	0.117 7	8.50	0.078 6	12.72
5.00	19.63	157.1	0.145 3	6.88	0.063 7	15.71
5.50	23.8	172.8	0.175 8	5.69	0.052 6	19.01
6.00	28.3	188.5	0.209 2	4.78	0.044 2	22.62
6.50	33.2	204	0.245 6	4.07	0.037 7	26.55
7.00	38.5	220	0.284 8	3.51	0.032 5	30.79

注：1. 计算每米电阻时采用标称电阻率为 1.25 μΩ·m。

2. 计算每米质量时采用密度为 7.4 g/cm^3。

表 4-8　铁铬铝(1Cr13A14)电阻合金线材尺寸规格
(按国家标准 GB1234—1985 所列出的尺寸范围)

带　　材	冷轧带材	热轧带材
厚度(mm)	0.2～3.5	2.5～7.0
宽度(mm)	6～80	15～250

表 4-9　铁铬铝(1Cr13A14)电阻合金尺寸规格

厚度(mm)	宽　度(mm)									
	6	6.5	8	9	10	11	15	24	25	32
0.8	0.277	0.256	0.208	0.185	0.166	0.145	0.106	0.066 4	0.063 8	0.049 8
0.95	0.233	0.215	0.175	0.156	0.140	0.122	0.089 5	0.055 9	0.053 7	0.042 0
1.0	0.222	0.205	0.166	0.148	0.133	0.116	0.085 0	0.053 1	0.051 0	0.039 9
1.1	0.201	0.186	0.151	0.134	0.121	0.105	0.077 3	0.048 3	0.046 4	0.036 2
1.2	0.185	0.170	0.139	0.123	0.111	0.096 6	0.070 9	0.044 3	0.042 5	0.033 2
1.3	0.170	0.157	0.128	0.114	0.102	0.089 2	0.065 4	0.040 9	0.039 2	0.030 7
1.45	0.153	0.141	0.115	0.102	0.091 7	0.080 0	0.058 6	0.036 7	0.035 2	0.027 5
1.5	0.148	0.136	0.111	0.098 5	0.088 7	0.077 3	0.056 7	0.035 4	0.034 0	0.026 6
1.6	0.139	0.128	0.104	0.092 3	0.083 1	0.072 5	0.053 1	0.033 2	0.031 9	0.024 9
1.75	0.127	0.117	0.095 0	0.084 4	0.076 0	0.066 3	0.048 6	0.030 4	0.029 2	0.022 8
1.85	0.120	0.111	0.089 9	0.079 9	0.071 9	0.062 7	0.046 0	0.028 7	0.027 6	0.021 5
2.0	0.111	0.102	0.083 1	0.073 9	0.066 5	0.058 0	0.042 5	0.026 6	0.025 5	0.019 9
2.54	0.087 3	0.080 5	0.065 4	0.058 2	0.052 4	0.045 7	0.033 5	0.020 9	0.020 1	0.016 0

注：(1) 表中所列电阻值计算时采用电阻率为 1.25 μΩ·m。

(2) 计算截面积采用宽度×厚度×圆角系数；宽度≤10 mm，圆角系数取 0.94；宽度＞10 mm，圆角系数取 0.98。

(3) 有关 ZX9、ZX15 及 1983 年 12 月通过样机鉴定新系列(ZX□)电阻器中配用电阻元件所用铁铬铝电阻合金带材尺寸规格可参阅《简明实用电工手册》第六章　电阻器和变阻器(上海市电子电器技术协会编著，上海科学技术出版社出版)。

第二节　精密元件用电阻合金

精密元件用电阻合金具有电阻温度系数小、稳定性好、对铜热电动势小等特点，一般制成聚酯高强度漆包线，主要用于仪器、仪表中作绕组，按其用途可分为电工仪器用锰铜合金、分流器用锰铜合金及高电阻率合金等。

一、电工仪器用锰铜合金

此类电阻合金以铜、锰、镍为主要成分，具有较高的电阻率(略低于康铜、新康铜)、很小的电阻温度系数，铜热电势低，具有良好的电阻长期稳定性等特点。主要用于电工仪器，如电桥、电位差计及标准电阻中的电阻元件。电工仪表用锰铜

电阻合金的品种、性能和特点见表 4－10。

表 4－10　电工仪表用锰铜电阻合金的品种、性能和特点

品种		合金牌号	主要成分（%）	电阻率 ρ（20 ℃）（$\mu\Omega \cdot m$）	电阻温度系数		对铜热电动势（μV/℃）	密度 γ（g/cm^3）	特点
					α（$\times 10^{-6}$/℃）	β（$\times 10^{-6}$/℃）			
锰铜线、片	1 级	6J12	Mn11～13 Ni2～3 Cu 余量	047±0.03	−3～+5	−0.7～0	1	8.44	电阻稳定性高，焊接性能好，抗氧化性能较差
	2 级				−5～+10				
	3 级				−10～+20				

电工仪器用锰铜电阻合金线材尺寸规格、单位长度标称电阻值见表 4－11，锰铜电阻合金单位长度标称质量见表 4－12。

表 4－11　电工仪器用锰铜电阻合金线材尺寸规格、单位长度标称电阻值

线径(mm)		每米电阻值(Ω/m)					
		锰铜 1、2、3 级		F1 锰铜		F2 锰铜	
标称值	允差	标称值	允差	标称值	允差	标称值	允差
0.020	±0.002	1 496	±10%				
0.022		1 236					
0.025		957					
0.028		763					
0.032	±0.003	584	±8%				
0.036		462					
0.040		374					
0.045		296					
0.050		239					
0.056		191					
0.063		151					
0.071		119		69.6	±8%	87.5	±8%
0.080		93.5		55.0		69.2	
0.090		73.9		44.6		56.0	
0.100		59.8					
0.112	±0.005	47.7	±7%	35.5	±7%	44.7	±7%
0.125		38.3		28.5		35.9	
0.140		30.5		22.7		28.6	
0.150		26.6		19.8		24.9	
0.160		23.4		17.4		21.9	
0.170		20.7		15.4		19.4	

续表

线径(mm)		每米电阻值(Ω/m)					
		锰铜 1、2、3 级		F1 锰铜		F2 锰铜	
标称值	允差	标称值	允差	标称值	允差	标称值	允差
0.180 0.190	±0.005	18.5 16.6	±7%	13.8 12.3	±7%	17.3 15.5	±7%
0.200 0.212 0.224 0.250 0.280	±0.005	15.0 13.3 11.9 9.57 7.63	±6%	11.1 9.92 8.88 7.13 5.68	±6%	14.0 12.5 11.2 8.96 7.15	±6%
0.315 0.355 0.400 0.450 0.500	±0.010	6.03 4.75 3.74 2.96 2.39	±5%	4.49 3.54 2.79 2.20 1.78	±5%	5.65 4.45 3.50 2.77 2.24	±5%
0.560 0.630 0.710 0.750 0.800 0.850 0.900 0.950 1.000	±0.015	1.91 1.51 1.19 1.06 0.935 0.828 0.739 0.663 0.598	±4%	1.42 1.12 0.884 0.792 0.696 0.617 0.550 0.494 0.446	±4%	1.79 1.41 1.11 0.996 0.875 0.775 0.692 0.621 0.560	±4%
1.060 1.120 1.180 1.250	±0.020	0.533 0.477 0.430 0.383	±4%	0.397 0.355 0.320 0.285	±4%	0.499 0.447 0.402 0.359	±4%
1.320 1.400 1.500 1.600	±0.020	0.343 0.305 0.266 0.234	±4%	0.256 0.227 0.198 0.174	±4%	0.322 0.286 0.249 0.219	±4%
1.700 1.800 1.900 2.000 2.120	±0.025	0.207 0.185 0.166 0.150 0.133	±4%	0.154 0.138 0.123 0.111 0.0992	±4%	0.194 0.173 0.155 0.140 0.125	±4%

续表

线径(mm)		每米电阻值(Ω/m)					
		锰铜 1、2、3 级		F1 锰铜		F2 锰铜	
标称值	允差	标称值	允差	标称值	允差	标称值	允差
2.240	±0.030	0.119	±4%	0.088 8	±4%	0.112	±4%
2.360		0.107		0.080 0		0.101	
2.500		0.095 7		0.071 3		0.089 6	
2.650		0.085 2		0.063 5		0.079 8	
2.800		0.076 3		0.056 8		0.071 5	
3.000		0.066 5		0.049 5		0.062 2	
3.150	±0.035	0.060 3	±4%	0.044 9	±4%	0.056 5	±4%
3.350		0.053 3		0.039 7		0.049 9	
3.550		0.047 5		0.035 4		0.044 5	
3.750		0.042 6		0.031 7		0.039 8	
4.000		0.037 4		0.027 9		0.035 0	
4.250		0.331		0.024 7		0.031 0	
4.500		0.029 6		0.022 0		0.027 7	
4.750	±0.040	0.026 5	±4%	0.019 8	±4%	0.024 8	±4%
5.000		0.023 9		0.017 8		0.022 4	
5.300	±0.050	0.021 3	±4%	0.015 9	±4%	0.019 9	±4%
5.600		0.019 1		0.014 2		0.017 9	
6.000	±0.060	0.016 6	±4%	0.012 4	±4%	0.015 6	±4%
6.300		0.015 1		0.011 2		0.014 1	

表 4-12　锰铜电阻合金单位长度标称质量

标称线径 (mm)	截面积 (mm^2)	每米标称质量(g/m)		
		锰铜 1、2、3 级	F1 锰铜	F2 锰铜
0.020	0.000 314	0.002 7	0.002 7	0.002 6
0.022	0.000 380	0.003 2	0.003 3	0.003 2
0.025	0.000 491	0.004 1	0.004 3	0.004 1
0.028	0.000 616	0.005 2	0.005 4	0.005 2
0.032	0.000 814	0.006 8	0.007 0	0.006 8
0.036	0.001 018	0.008 6	0.008 9	0.008 6
0.040	0.001 257	0.010 6	0.010 9	0.010 6
0.045	0.001 590	0.013 4	0.013 8	0.013 4
0.050	0.001 963	0.016 6	0.017 1	0.016 5
0.056	0.002 463	0.020 8	0.021 4	0.020 7

续表

标称线径 (mm)	截面积 (mm^2)	每米标称质量(g/m)		
		锰铜 1、2、3 级	F1 锰铜	F2 锰铜
0.063	0.003 117	0.026 3	0.027 1	0.026 2
0.071	0.003 959	0.033 4	0.034 4	0.033 3
0.080	0.005 027	0.042 4	0.043 7	0.042 2
0.090	0.006 362	0.053 7	0.055 3	0.053 4
0.100	0.007 854	0.066 3	0.068 3	0.066 0
0.112	0.009 852	0.083 2	0.085 7	0.082 8
0.125	0.012 27	0.104	0.107	0.103
0.140	0.015 39	0.130	0.134	0.129
0.150	0.017 67	0.149	0.154	0.148
0.160	0.020 11	0.170	0.175	0.169
0.170	0.022 70	0.192	0.197	0.191
0.180	0.025 45	0.215	0.221	0.214
0.190	0.028 35	0.239	0.247	0.238
0.200	0.031 42	0.265	0.273	0.264
0.212	0.035 30	0.298	0.307	0.297
0.224	0.039 41	0.333	0.343	0.331
0.250	0.049 09	0.414	0.427	0.412
0.280	0.061 58	0.520	0.536	0.517
0.315	0.077 93	0.658	0.678	0.655
0.355	0.098 98	0.835	0.861	0.831
0.400	0.125 7	1.06	1.09	1.06
0.450	0.159 0	1.34	1.38	1.34
0.500	0.196 3	1.66	1.71	1.65
0.560	0.246 3	2.08	2.14	2.07
0.630	0.311 7	2.63	2.71	2.62
0.710	0.395 9	3.34	3.44	3.33
0.750	0.441 8	3.73	3.84	3.71
0.800	0.502 7	4.24	4.37	4.22
0.850	0.567 4	4.79	4.94	4.77
0.900	0.636 2	5.37	5.53	5.34
0.950	0.708 8	5.98	6.17	5.95
1.000	0.785 4	6.63	6.83	6.60
1.060	0.882 5	7.54	7.68	7.41
1.120	0.985 2	8.32	8.57	8.28
1.180	1.094	9.23	9.51	9.19

续表

标称线径 (mm)	截面积 (mm^2)	每米标称质量(g/m)		
		锰铜 1、2、3 级	F1 锰铜	F2 锰铜
1.250	1.227	10.4	10.7	10.3
1.320	1.368	11.5	11.9	11.5
1.400	1.539	13.0	13.4	12.9
1.500	1.767	14.9	15.4	14.8
1.600	2.011	17.0	17.5	16.9
1.700	2.270	19.2	19.7	19.1
1.800	2.545	21.5	22.1	21.4
1.900	2.835	23.9	24.7	23.8
2.000	3.142	26.5	27.3	26.4
2.120	3.530	29.8	30.7	29.7
2.240	3.941	33.3	34.3	33.1
2.360	4.374	36.9	38.1	36.7
2.500	4.909	41.4	42.7	41.2
2.650	5.515	46.6	48.0	46.3
2.800	6.158	52.0	53.6	51.7
3.000	7.069	59.7	61.5	59.4
3.150	7.793	65.8	67.8	65.5
3.350	8.814	74.4	76.7	74.0
3.550	9.898	83.5	86.1	83.1
3.750	11.04	93.2	96.1	92.8
4.000	12.57	106	109	106
4.250	14.19	120	123	119
4.500	15.90	134	138	134
4.750	17.72	150	154	149
5.000	19.63	166	171	165
5.300	22.06	186	192	185
5.600	24.63	208	214	207
6.000	28.27	239	246	238
6.300	31.17	263	271	262

锰铜电阻合金的质量性能以国家标准 GB6145—1985 为依据，其主要技术标准如下：

(1) 表面质量：线及带材表面应平滑、光洁，不允许有裂缝、夹缝、起皮等质量问题。

(2) 化学成分及部分物理性能可参阅表 4-10。

二、分流器用锰铜电阻合金

分流器用锰铜电阻合金在 30～50 ℃范围内的电阻值最大，可用于温升较高、温度变化范围较宽的分流器或分压器上。分流器用锰铜合金有 F1 级和 F2 级两

种，F1 级用作准确度较高的分流器，F2 级用作精密电阻器、分流器和一般电阻器。它们的性能和特点见表 4－13。

表 4－13　分流器用锰铜合金的性能和特点

名称	主要成分（%）	电阻率 ρ（20 ℃）（Ω·mm²/m）	电阻温度系数 α（10^{-6}/℃）	电阻温度系数 $-\beta$（10^{-6}/℃）	对铜热电动势 E_a（μV/℃）	密度 d（g/cm³）	抗拉强度 σ_b（N/mm²）	伸长率 δ（%）	工作温度（℃）	特点
F1 级①	Mn8～10，Si1～2 Cu 余量	0.35	0～10	0～0.25	≤2	8.4	390～540	10～30	20～80	电阻对温度曲线较平坦，在宽温度范围内阻值误差比 F2 级小
F2 级	Mn11～13，Ni2～5，Cu 余量	0.44	0～40	0～0.7	≤2	8.4	390～540	10～30	20～80	电阻最高点温度比通用型锰铜高

注：① 主要成分同硅锰铜（见表 6.2.2），但两者的电阻温度系数不同。F1 级适用于准确度较高的分流器。

分流器用锰铜电阻合金的尺寸规格，单位长度电阻值见表 4－11，单位长度标称质量见表 4－12。质量性能以国家标准 GB6145—1985 为依据，化学成分及物理性能可参阅表 4－13。

三、高电阻率电阻合金

高电阻率电阻合金的品种、性能和特点见表 4－14。

表 4－14　高电阻率电阻合金的品种、性能和特点

名称	主要成分（%）	电阻率 ρ（20 ℃）（μΩ·m）	平均电阻温度系数 α（0～100 ℃）（$\times10^{-6}$/℃）	对铜热电动势（μV/℃）	密度 γ（g/cm³）	抗拉强度 σ_b（$\times10^6$N/m²）	伸长率 δ（%）	工作温度（℃）	特　点
镍铬铝铁	Cr18～20 Al1～3 Fe1～3 Ni 余量	1.33	−20～20	≤2	8.1	784～980	10～25	−65～125	电阻系数大，电阻温度系数小，对铜热电动势小，机械强度高、耐磨、抗氧化，焊接性能略差

续表

名称	主要成分（%）	电阻率 ρ（20 ℃）（$\mu\Omega \cdot m$）	平均电阻温度系数 α（0～100 ℃）（$\times 10^{-6}$/℃）	对铜热电动势（μV/℃）	密度 γ（g/cm^3）	抗拉强度 σ_b（$\times 10^6$N/m^2）	伸长率 δ（%）	工作温度（℃）	特　点
镍铬铝铜	Cr18～20 Al2～4 Cu1～3 Ni 余量	1.33	−20～20	≤2	8.1	784～980	10～25	−65～125	特点同镍铬铝铁，焊接性能比其略好
镍铬锰硅	Cr17～19 Mn2～4 Si1～4 Al，Ni 余量	1.35	−20～20	≤2	8.1	784～980	10～25	−65～125	特点同上，焊接性能比镍铬铝铜略好
镍铬铝矾	Cr17～19 Al3～5 V3～5 Mn，Ni 余量	1.70	−30～30	≤5	8.1	≈1 570	≈15	−65～125	焊接性能较差
镍铬铝钼	Mn34～37 Cr7～10 Mo，Ni 余量	1.90	−50～50	≤7		≈1 570	6～10	−65～125	焊接性能较好

高电阻率电阻合金线材可分为裸线和聚酯漆包两种，精密电阻合金线的规格尺寸及允差见表 4－15。

表 4－15　精密电阻合金线的规格尺寸及允差

裸线直径（mm）	允许偏差（mm）	裸线直径（mm）	允许偏差（mm）
0.010～0.015	±0.001	>0.05～0.10	±0.004
>0.015～0.025	±0.002	>0.10～0.20	±0.005
>0.025～0.05	±0.003		

第三节　电位器用电阻合金

电位器用电阻合金主要用于各种电位器及滑线电阻，具有耐腐蚀性能好、表面光洁、接触电阻小而恒定等特点。

一、电位器用电阻合金的规格、性能和特点

常用电位器和滑线电阻的材料有康铜、新康铜、镍铬类等。这些材料的性能规格等参数，可查阅表 4－1 至表 4－14。滑线锰铜的性能特点见表4－16。

表 4－16　滑线锰铜的性能特点

名称	主要成分（%）	20 ℃ 电阻率 ρ （$\mu\Omega \cdot m$）	电阻温度系数 α （$\times 10^{-6}$/℃）	密度 γ （g/cm^3）	抗拉强度 σ_b （$\times 10^6 N/m^2$）	伸长率 δ （%）	工作温度（℃）	特　点
滑线锰铜	Mn12～13 Ni1～3 Al，Cu 余量	0.45	0～40	8.4	400～500	10～30	20～80	抗氧化性比通用锰铜好，焊接性能好，电阻对温度曲线较平坦

二、电位器用贵金属电阻合金的性能和特点

电位器贵金属电阻合金的性能和特点见表 4－17。

表 4－17　电位器用贵金属电阻合金的性能和特点

类型	名　称	主要成分（%）	电阻率 ρ （20 ℃）（$\Omega mm^2/m$）	平均电阻温度系数 α （0～100 ℃）（10^{-6}/℃）	抗拉强度 σ_b（N/mm^2）		特　点
					硬	软	
铂基	铂铑	Rh10，Pt 余量	0.19	1 700	≈1 180	≈490	（1）具有较好化学稳定性，但对有机物质的抗侵蚀性能差； （2）接触电阻较低； （3）耐磨性好
	铂铱	Ir10，Pt 余量	0.25	1 330	≈1 230	≈540	
	铂钌	Ru10，Pt 余量	0.42	470	≈1 370	≈7 800	
	铂铜 8.5	Cu8.5，Pt 余量	0.50	330	≈1 470	≈780	
	铂钨	W8，Pt 余量	0.62	280	≈1470	≈98 600	
	铂铜 20	Cu20，Pt 余量	0.90	100	≈1 380	≈590	

续表

类型	名　称	主要成分(%)	电阻率 ρ (20 ℃) ($\Omega mm^2/m$)	平均电阻温度系数 α (0～100 ℃) ($10^{-6}/℃$)	抗拉强度 σ_b (N/mm^2)		特　点
					硬	软	
金基	金银铜	Ag20，Cu30，Au余量	0.12		≈940	≈640	(1) 化学性能较稳定，特别能抗有机物质的侵蚀；(2) 具有较稳定的接触电阻；(3) 摩擦系数较大；(4) 接触力大时，耐磨性能不够高
	金镍铜	Ni7.5，Cu1.5，Au余量	0.19				
	金镍	Ni5，Au余量	0.14	71		≥490	
	金镍铬	Ni5，Cr1，Au余量	0.24	35	750	380	
	金钯铁	Pd40.5，Fe10，Au余量	1.9	20～75			
	金钯铁铝	Pd50，Fe11，Al1，Au余量	0.75～2.30	≈0			
钯基	钯银	Ag40，Pd余量	0.42	30	≈1080	≈390	(1) 机械性能及耐磨性能好；(2) 抗腐蚀性能好，但抗有机物质的侵蚀性能差
	钯银铜	Ag36，Cu4，Pd余量	0.45	30	≈880	≈490	
	钯钼	Mo10，Pd余量	0.90		≈1380	≈590	
银基	银锰锡1	Mn6～8，Sn0.5～1.5，Ag余量	0.28	0～5			(1) 能抗有机酸、含氨化合物、稀NaCl、HNO_3、NaOH溶液和CO_2等气体，适合于海洋性及潮湿环境，但易硫化；(2) 具有良好的电接触性能；(3) 硬度低
	银锰锡7.5	Mn7～8，Sn7～8，Ag余量	0.53	10～20			

第四节　传感元件用电阻合金

传感元件用电阻合金主要用于仪器中，制成应变、温度、磁场和压力等参数的传感元件。这种传感元件可以把上述这些参数的变化转变为相应的电阻变化，以便于对它们进行测量、控制和补偿。这种电阻合金具有传感灵敏度高，复现性和互换性好，反应快，漂移小及稳定性好等特性，按所传感的参数和作用分为应变元件用电阻合金、温度补偿用电阻合金及测量用电阻材料。

一、应变元件用电阻合金

应变元件用电阻合金制成的传感元件主要用于测定应变、伸长率和应力等。应变元件用电阻合金具有灵敏系数大、电阻温度系数小、对铜的热电动势小等特点。应变元件用电阻合金有铁基、镍基和贵金属基各类合金，其性能和特点见表4-18、表4-19。

表4-18　应变元件电阻合金性能和特点(一)

类型	名称	主要成分(%)	电阻率 ρ (20℃) ($\mu\Omega\cdot m$)	平均电阻温度系数 α ($\times10^{-6}$/℃)	电阻对温度线性关系范围 (℃)	应变灵敏系数 K	抗拉强度 σ_b ($\times10^6$ N/m^2)	对铜热电动势 (μV/℃)	特　点
铁基	铁镍铬铝	Ni32～37 Cr6～9 Mo,Fe 余量	1.13	100～470	20～230	2.1～3.6	1150	≈3.5	(1) 高温下抗氧化性能比镍基好；(2) 高温下蠕变大；(3) 冷加工性能较差；(4) 原料丰富、成本低
铁基	铁铬铝	Cr20～23 Al3～7 V,Mθ,Fe 余量	1.45	−40～40	—	2.7	750		
		Cr20～23 Al8～12 Fe 余量	1.78	≈−120	20～1 000	2.0			

续表

类型	名称	主要成分（%）	电阻率 ρ（20 ℃）（μΩ·m）	平均电阻温度系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	电阻对温度线性关系范围（℃）	应变灵敏系数 K	抗拉强度 σ_b（$\times10^6$ N/m²）	对铜热电动势（μV/℃）	特点
镍基	镍铜	Ni40～45 Mn1～4 Cu余量	0.48	−20～20	20～300	2.0	400～700	−43	（1）冷加工性能较好，易拉制成细线； （2）电阻对温度关系的直线性较好； （3）工作温度一般不高于400 ℃
	镍铬	Cr20～23 Ni余量	1.10	≈70	20～400	2.2	700～1 350	≈4	
	镍铬铝铁	Cr18～23 Al1～3 Fe1～3 Ni余量	1.33	−10～10	20～400	2.1	900～1 300	≈3	
	镍铬铝	Cr18～23 Al1～3 Ni余量	1.45	−30～30	20～450	2.0	≈1 200		
	镍钼铝	Mo20～25 Al1～3 Ni余量	1.55	−30～30	−200～20 20～520	2.1	≈1 400	≈8	

表4-19　应变元件用电阻合金性能和特点（二）

类型	名称	主要成分（%）	电阻率 ρ（20 ℃）（μΩ·m）	平均电阻温度系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	电阻对温度线性关系范围（℃）	应变灵敏系数 K	抗拉强度 σ_b（$\times10^6$ N/m²）	对铜热电动势（μV/℃）	特点
贵金属基	铂钨	W8，Pt余量	0.66	≈230	0～700	3.5～4	≈900	6.1	（1）高温下抗氧化性能好，稳定性好； （2）除金钯铁外，电阻对温度关系的直线性较好； （3）随温度升高、应变灵敏系数下降较大； （4）原材料贵重
		W8，5Pt余量	0.68	≈200	0～700	3.5～4	≈980	6.4	
		W9，5Pt余量	0.75	≈170	0～700	3～3.5	≈1 200	6.5	
	铂钯钼	Pd45，Mo10 Pt余量	0.86	≈130	0～450	2.5	≈800	6.8	
	铂钨铼	W7.5，Re5.5 Pt余量	0.84	≈88	0～300	2.8	≈1370	3.6	
	金钯铁	Pd48，Fe10 Au余量	1.60～1.78	−20～20	非线性	≈2	≈1 280	1	

二、温度补偿用电阻合金

温度补偿用电阻合金具有负值电阻温度系数，其电阻值随温度的升高而降低，适用于电工仪表中作线路温度补偿。若电工仪表中的铜线电阻因温度升高而电阻值增大时，可用这种电阻合金起抵消作用，使之得到补偿。温度补偿用电阻合金的材料有铁锰铝，其性能和特点见表 4－20。

表 4－20　温度补偿用电阻合金的性能和特点

名　称	主要成分（%）	电阻率，ρ（20 ℃）（$\Omega \cdot mm^2/m$）	平均电阻温度系数 α_a（10^{-6}/℃）	对铜热电动势 E_a（μV/℃）	工作温度（℃）	特　点
铁锰铝	Mn32～37，Al 5～7，Fe 余量	1.25～1.35	－300～－200	＜2	－50～60	焊接性能较差

三、测温用电阻材料

测温用电阻材料具有较高的正值电阻温度系数，其电阻值随温度上升而显著增大，可利用它们的电阻变化来测量温度，其常用材料为铂、铜、镍等纯金属线，其有关性能见表 4－1。

第五章　电热材料

电热合金主要用于制造各种电阻加热设备的加热元件，作为电阻体加入电路中，将电能转变为热能，使加热设备温度升高。电热合金具有较高的电阻率和稳定性，电阻温度较低；通过电流能产生较高的热量和稳定的功率；抗高温氧化性强，耐腐蚀性好，有足够的高温强度，在不同的工作条件下，有足够的使用寿命。有良好的加工性能，以满足不同类型结构成型的需要。

第一节　电热材料的品种及性能

电热材料有金属和非金属之分，金属电热材料有贵金属及其合金（如铂、铂铱、钯等）和重金属及其合金（如钨、钼、镍铬、铁铬铝等），通常铁铬铝用得较多；非金属电热材料有硅碳（亦称碳化硅）和硅钼（亦称二硅化钼）等。常用的电热材料中，合金材料使用较广。高熔点纯金属材料的工作温度一般比合金高，但它需在保护气氛中工作。硅碳及硅钼电热材料是制成元件状态供应的，其工作温度也较高，但质硬而脆，使用中不如金属电热材料方便。此外，还有在金属套管内绝缘埋入合金电热线形成管状电加热元件，所用绝缘材料一般为氧化镁粉。

常用电热合金及电热元件的品种和性能见表 5－1。

表 5－1　电热合金及电热元件的品种和性能

品种及型号		推荐使用温度/℃	元件最高使用温度/℃	物理及力学性能					特点	使用说明
				密度/(g/cm³)	电阻率 P_{20}/(×10⁻⁶ Ω·m)	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	熔点/℃		
铁铬铝合金	1Cr13Al4	900～950	1 100	7.4	1.26	588～735	≥16	1 450	高温抗氧化性及耐温高于镍铬；高温强度低于镍铬；电阻率高，铁素体组织，有磁性，高温长期使用晶粒易长大变脆	使用温度高，已能满足大部分工业加热设备需要，能设计加工成各种形状元件，适应加热设备结构需要，功率范围广，能适应高精度控温
	0Cr13Al6Mo2	1 050～1 200	1 300	7.2	1.40	686～834	≥12	1 500		
	0Cr25Al5	1 050～1 200	1 300	7.1	1.40	637～785	≥12	1 500		
	0Cr21Al6Nb		1 350	7.1	1.45	686～785	≥12	1 510		
	0Cr27Al7Mo2	1 200～1 300	1 400	7.1	1.53	686～785	≥10	1 520		

续表

品种及型号		推荐使用温度/℃	元件最高使用温度/℃	物理及力学性能					特点	使用说明
				密度/(g/cm³)	电阻率 P_{20}/(×10⁻⁶ Ω·m)	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	熔点/℃		
镍铬合金	Cr15Ni60	850～950	1 050	8.2	1.15	637～785	≥20	1 390	高温强度高于铁铬铝，高温抗氧化性及耐温略低于铁铬铝，电阻率较高，奥氏体组织，基本无磁性，加工性能好	使用条件基本与铁铬铝同，但耐温较低，适用于1000 ℃以下的中温加热设备
	Cr20Ni80	950～1 050	1 150	8.4	1.11	637～785	≥20	1 400		
	Cr30Ni70		1 250	8.1	1.20		≥20	1 380		
镍铁合金	Ni45Fe		350	8.1	0.52	539～637	≥20～35	1 425	电阻率较低，电阻温度系数大，具有功率自控作用，有磁性，抗腐蚀性较差	涂覆绝缘层适用于电热纺织物作低温发热元件，可用于快热式设备中
	Ni55Fe		500	8.3	0.36	539～637	≥20～35	1 425		
高熔点纯金属	Pt(铂)		1 600	21.5	0.106	157～177		1773	使用温度高，铂可在空气中使用，其氧化物在高温下挥发影响使用寿命。钨、钼须在惰性气体、真空或氢气中使用。钽须在惰性气体或真空中使用。电阻率低，电阻温度系数大	使用时需配调压装置，材料价高，适用于实验室及特殊高温要求的设备
	Mo(钼)	1 400～1 500	1 800	10.2	0.0563	785～1 177		2 622		
	Ta(钽)	1 800～2 000	2 200	16.6	0.124	294～441		2996		
	W(钨)	2 000～2 200	2 400	19.3	0.0549	1 079		3 400		
硅碳棒、硅碳管(SiC)		1 250～1 400	1 500	3.1～3.2	1 000 左右 (1 400 ℃)	抗折 39～49			高温强度高，质硬而脆，电阻值一致性较差，易老化，电阻率随使用时间而增大	需配调压装置，对不同炉型适应性差，为使三相电网平衡，应一组三根同时调换

续表

品种及型号	推荐使用温度/℃	元件最高使用温度/℃	物理及力学性能					特点	使用说明
			密度/(g/cm³)	电阻率 P_{20}/(×10⁻⁶ Ω·m)	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	熔点/℃		
硅铝棒(MoSi2)	1 500～1 600	1 700	5.3～5.5	0.25	抗弯 245～343			抗氧化性好，不易老化，正向电阻温度系数较大，室温下硬而脆，1 350 ℃开始变软，低温下不易形成保护性二氧化硅	需配调压装置，对不同炉型适应性差，耐急冷、急热性差
管状电加热元件		被加热介质温度 550 ℃以下						结构简单，热效率高，可直接在各种介质(空气、液体)中加热，机械强度高，可制成多种形状，拆装方便，使用温度不高	须按不同型号在规定的加热介质中使用，适用于液体，易溶金属，加热、空气加热、干燥及日用电热、电器器具
石墨(C)	2 300(真空)	3 000						能耐 300 ℃以上高温，电阻率高，须配低压大电流变压器，须在真空或保护气氛中工作，石墨蒸气易污染炉膛和工件	用于 1 700 ℃以上高温电炉

第二节　金属线带电热元件

一、铁铬铝系材料

电阻率较高，电阻温度系数小，使用温度较高，单位表面积允许功率($W_{允}$)高，高温抗氧化、抗硫及抗各种碳氧气氛的侵蚀能力较强，价格便宜，在功率、电压和元件截面尺寸相同条件下，其用量比镍铬合金电热体用量少。其缺点是冷加工性能较差，经高温加热后晶粒粗大、变脆，难于修复。在氮气中使用时，铬和铝易形成氮化物，其使用寿命比在空气中低。一般铁铬铝电热元件应预先或定期在空气中加热到 1 000～1 100 ℃，保温 5 h 形成致密氧化膜，可延长使

用寿命。

铁铬铝合金是最常用的电热材料，它可制成线状、带状或装在电热管中，广泛用于工业电阻炉和家用电热器具。

1. 铁铬铝合金电热线

广泛用做日用电炉、电烙铁、电熨斗及电热管，其规格见表 5－2。

表 5－2　常用铁铬铝合金电热线(丝)的规格及主要技术数据

线径/mm	截面积/mm²	质量/(kg/m)		每千克长度/(m/kg)		20 ℃时电阻/(Ω/m)	
		0Cr25Al5	0Cr27Al7Mo2	0Cr25Al5	0Cr27Al7Mo2	0Cr25Al5	0Cr27Al7Mo2
0.1	0.007 9	0.000 06	0.000 06	17 933	17 933	178.3	191.0
0.2	0.031 4	0.000 22	0.000 22	4 483	4 483	44.59	47.77
0.3	0.070 7	0.000 50	0.000 50	1 993	1 993	19.80	21.22
0.4	0.125 7	0.000 89	0.000 89	1121	1 121	11.14	11.93
0.5	0.196 4	0.001 4	0.001 4	717.3	717.3	7.130	7.640
0.6	0.282 7	0.002 0	0.002 0	498.3	498.3	4.953	5.306
0.7	0.384 8	0.002 7	0.002 7	366.0	366.0	3.640	3.893
0.8	0.502 7	0.003 6	0.003 6	280.2	280.2	2.790	2.983
0.9	0.636 2	0.004 5	0.004 5	221.4	221.4	2.200	2.358
1.0	0.785 4	0.005 6	0.005 6	179.3	179.3	1.783	1.910
1.1	0.950 3	0.006 8	0.006 8	151.9	151.9	1.475	1.578
1.2	1.131	0.008 0	0.008 0	125.5	125.5	1.238	1.326
1.4	1.539	0.011	0.011	91.49	91.49	0.910	0.975
1.6	2.011	0.014	0.014	70.02	70.02	0.697	0.849
1.8	2.545	0.018	0.018	55.34	55.34	0.550	0.589
2.0	3.142	0.022	0.022	44.82	44.82	0.446	0.477
2.2	3.801	0.027	0.027	37.05	37.05	0.368	0.395
2.5	4.909	0.035	0.035	28.69	28.69	0.285	0.306
2.8	6.158	0.044	0.044	22.87	22.87	0.227	0.244
3.0	7.069	0.050	0.050	19.92	19.92	0.198	0.212
3.5	9.621	0.068	0.068	14.64	14.64	0.145 5	0.155 9
4.0	12.57	0.089	0.089	11.20	11.20	0.111 4	0.119 4
4.5	15.90	0.113	0.113	8.857	8.857	0.088 0	0.094 3
5.0	19.63	0.139	0.139	7.173	7.173	0.071 3	0.076 4
5.5	23.76	0.168	0.168	5.928	5.928	0.058 9	0.063 1
6.0	28.27	0.201	0.201	4.981	4.981	0.049 5	0.053 1
6.5	33.18	0.235	0.235	4.244	4.244	0.042 2	0.045 2
7.0	38.48	0.273	0.273	3.660	3.660	0.036 4	0.039 0

2. 铁铬铝合金电热带

常用铁铬铝合金电热带的规格及主要技术数据见表 5－3。

表 5-3　常用铁铬铝合金电热带的规格及主要技术数据

厚/mm×宽/mm	截面积/mm²	质量/(kg/m)		每千克长度/(m/kg)		20 ℃时电阻/(Ω/m)	
		1Cr13Al4	0Cr25Al5	1Cr13Al4	0Cr25Al5	1Cr13Al4	0Cr25Al5
0.6×6	3.384	0.025 0	0.024 0	39.93	41.62	0.372	0.414
7	3.948	0.029 2	0.028 0	34.23	35.68	0.319	0.355
8	4.512	0.033 4	0.032 0	29.95	31.22	0.279	0.310
0.7×6	3.948	0.029 2	0.028 0	34.23	35.68	0.319	0.355
7	4.606	0.034 1	0.032 7	29.34	30.58	0.274	0.304
8	5.264	0.039 0	0.037 4	25.67	26.76	0.239	0.266
0.8×6	4.512	0.033 4	0.032 0	29.95	31.22	0.279	0.310
7	5.264	0.039 0	0.037 4	25.67	26.76	0.239	0.266
8	6.016	0.044 5	0.042 7	22.46	23.41	0.209	0.233
0.9×6	5.076	0.037 6	0.036 0	26.62	27.75	0.248	0.276
7	5.922	0.043 8	0.042 0	22.82	23.78	0.213	0.236
8	6.768	0.050 1	0.048 1	19.97	20.81	0.186	0.207
1.0×10	9.40	0.069 6	0.066 7	14.38	14.98	0.134 0	0.148 9
12	11.76	0.087 0	0.083 5	11.49	11.98	0.107 1	0.119 6
14	13.72	0.101 5	0.097 4	9.852	10.26	0.091 8	0.102 0
16	15.68	0.116 0	0.111 3	8.621	8.985	0.080 4	0.089 3
18	17.64	0.130 5	0.125 2	7.663	7.987	0.071 4	0.079 4
20	19.60	0.145 0	0.139 2	6.897	7.184	0.064 3	0.071 4
25	24.50	0.181 3	0.174 0	5.516	5.747	0.051 4	0.057 1
1.2×10	11.28	0.083 5	0.080 1	11.98	12.49	0.111 7	0.124 1
12	14.11	0.104 4	0.100 2	9.579	9.980	0.089 3	0.099 2
14	16.46	0.121 8	0.116 9	8.210	8.554	0.076 6	0.090 6
16	18.82	0.139 3	0.133 1	7.179	7.485	0.067 0	0.074 4
18	21.17	0.156 7	0.150 3	6.382	6.653	0.059 5	0.066 1
20	23.52	0.174 0	0.167 0	5.747	5.988	0.053 6	0.059 5
25	29.40	0.217 6	0.208 7	4.596	4.792	0.042 9	0.047 6
1.4×10	13.16	0.097 4	0.093 4	10.27	10.70	0.095 7	0.106 4
12	16.46	0.121 8	0.116 9	8.210	8.554	0.076 6	0.085 1
14	19.21	0.142 2	0.136 4	7.032	7.231	0.065 6	0.072 9
16	21.95	0.162 4	0.155 8	6.158	6.418	0.057 4	0.063 8
18	24.70	0.182 8	0.175 4	5.470	5.701	0.051 0	0.056 7
20	27.44	0.203 1	0.194 8	4.924	5.113	0.045 9	0.051 0
25	34.30	0.253 8	0.243 5	3.940	4.107	0.036 7	0.040 8
1.6×10	15.04	0.111 3	0.106 8	8.985	9.363	0.083 8	0.093 1
12	18.82	0.139 3	0.133 6	7.179	7.485	0.067 0	0.074 4
14	21.95	0.162 4	0.155 8	6.158	6.418	0.057 4	0.063 8
16	25.09	0.185 7	0.178 1	5.385	5.615	0.050 2	0.055 8
18	28.22	0.208 8	0.200 4	4.789	4.990	0.044 7	0.049 6
20	31.36	0.232 1	0.222 7	4.308	4.490	0.040 2	0.044 2
25	39.20	0.291 0	0.278 3	3.447	3.593	0.321	0.035 7
2.2×20	39.20	0.290 1	0.278 3	3.447	3.592	0.032 1	0.035 7
25	49.00	0.362 6	0.347 9	2.758	2.874	0.025 7	0.028 6

3. 镍铬合金系材料

有较高的高温强度，经高温使用后，其常温力学性能不发生大变化，且有良好的冷加工性和焊接性，便于维修。在氮基气氛中工作，寿命无变化。其缺点是在含硫气氛中元件表面层形成硫化物，降低使用寿命。在含 CO 还原性气氛中长期工作，氧化膜破坏，表面渗碳，电热元件表面熔点降低，产生裂纹甚至熔断，所以在 CO 气氛中工作，使用温度不能超过 1 040 ℃，镍铬系材料电阻率较小，电阻温度系数较大，价格高。

4. 高熔点金属钼、钨、钽、铂等

电阻温度系数很大，工作状态下为保持功率稳定，应配备调压器，改变电热元件的端电压。

二、电热合件的选用及计算

1. 电热合金选用时应注意的问题

(1) 选用合金时，需要考虑其本身特性，包括：

① 高温时铁铬铝合金强度的降低大大低于镍铬合金，因此在需一定的高温场合，应选用镍铬合金而不宜选用铁铬铝合金。

② 铁铬铝合金在高温使用后，不但会变脆，还会伸长，再加上高温强度降低，如支撑、安装不当，必定会产生变形、短路等现象，设计时应考虑。但镍铬合金使用后，伸长不显著。

③ 电热合金的电阻率会随温度的变化而变化。可用电阻率修整系数 C_t（工作温度下的电阻率 ρ_t 与 20 ℃时的电阻率 ρ_{20} 之比）来表示电阻随温度的变化。常用的电热合金电阻率修正系数见表 5-4。一般情况下，电阻率修正系数越小越好，这样工作温度就比较平稳。

表 5-4　常用的电热合金电阻率修正系数

温度(℃) / 牌号	20	100	200	300	400	500	600
Cr20Ni30	1.000	1.028	1.096	1.096	1.125	1.153	1.173
Cr15Ni60	1.000	1.013	1.029	1.046	1.062	1.074	1.073
Cr20Ni80	1.000	1.006	1.016	1.024	1.031	1.035	1.026
1Cr13Al4	1.000	1.015	1.029	1.044	1.059	1.074	1.089
0Cr13Al6Mo2	1.000	1.001	1.003	1.007	1.014	1.028	1.048
0Cr21Al6	1.000	1.001	1.003	1.009	1.017	1.032	1.052
0Cr21Al6Nb	1.000	0.997	0.996	0.994	0.991	0.990	0.990
0Cr25Al5	1.000	1.002	1.005	1.008	1.013	1.017	1.022

续表

温度(℃) 牌号	20	100	200	300	400	500	600
0Cr27Al7Mo2	1.000	0.997	0.994	0.992	0.992	0.992	0.992
钼	1.000	1.362	1.822	2.280	2.740	3.200	3.660
铂	1.000	1.291	1.645	1.987	2.320	2.640	2.950
钽	1.000	1.275	1.621	1.960	2.310	2.650	2.990
钨	1.000	1.352	1.801	2.280	2.790	3.320	3.850
Cr20Ni30	1.192	1.211	1.230	1.250	1.269		
Cr15Ni60	1.083	1.089	1.097	1.105	1.115		
Cr20Ni80	1.019	1.017	1.021	1.028	1.038		
1Cr13Al4	1.104	1.120	1.134				
0Cr13Al6Mo2	1.053	1.057	1.060	1.063	1.066	1.069	
0Cr21Al6	1.059	1.064	1.068	1.071	1.074	1.080	
0Cr21Al6Nb	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	0.990	
0Cr25Al5	1.026	1.029	1.031	1.034	1.036	1.040	
0Cr27Al7Mo2	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	0.992	
钼	4.120	4.580	5.060	5.580	6.110	6.640	7.180
铂	3.250	3.530	3.810	4.080	4.330	4.580	5.230
钽	3.340	3.680	4.020	4.350	4.670	4.960	4.810
钨	4.390	4.940	5.490	6.050	6.620	7.190	7.780

(2) 选用电热合金时,除了考虑电热合金本身的特性外,还应考虑被加热工件的工艺要求、设备的结构型式以及使用条件。

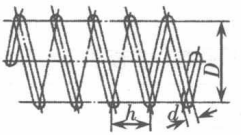
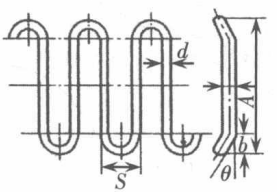
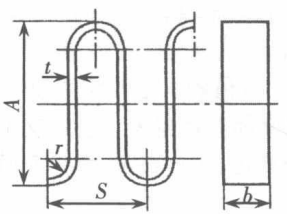
(3) 电热合金最高使用温度。表 5-1 中列出的最高使用温度是指合金在干燥空气中允许的本身表面温度,它高出被加热物质或电热元件周围介质的温度 100 ℃以上。在其他气氛中使用时,其允许最高工作温度应适当降低。一些常用电热合金在各种气氛中的最高使用温度见表 5-5。

表 5-5 一些常用电热合金在各种气氛中的最高使用温度(单位:℃)

气氛 合金牌号	空气	氢	分解氨	燃烧氨	氮	含硫氧化性气氛	吸热式气体	放热式气体	真空 10^{-3} 以下
0Cr13Al6Mo2 0Cr25Al5	1 300	1 250	1 150	1 000	950	1 050	1 100	1 150	1 100
0Cr27Al7Mo2	1 400	1 350	1 250	1 000	950	1 150	1 200	1 250	1 150
Cr20Ni80	1 150	1 150	1 100	1 100	1 100	不适宜	950	1 050	1 100

(4) 电热合金在高温时强度下降，所以除在结构中考虑一定的支承外，对元件的形状和尺寸也应合理选择，防止螺旋圈倒塌导致短路。电热合金元件的形状及尺寸比例见表 5-6。

表 5-6　电热合金元件的形状及尺寸比例

种　类	元 件 形 状	尺 寸 比 例	
线材螺旋形元件		铁铬铝合金 $h \geqslant 2d$ D：700 ℃以下$(7\sim10)d$ 700～1 000 ℃$(6\sim8)d$ 1 000 ℃以上$(5\sim7)d$	镍铬合金 $h \geqslant 2d$ $D=(6\sim12)d$
线材波形（之字形）元件		$b=\left(\frac{1}{4}\sim\frac{1}{6}\right)A$；$S \geqslant 3d$；$\theta=10°\sim20°$ 铁铬铝合金 $A=150\sim250$ mm 镍铬合金 $A=200\sim300$ mm	
带材波形（之字形）元件		铁铬铝合金 $t \geqslant 1.5$ mm；$S \geqslant 2b$ $b=(5\sim15)t$，一般取 10 $A<80t$ $r=(4\sim8)t$ 当 $b/t>10$ 是，为防止高温时元件倒伏，应加辅助挂钩或支撑	镍铬合金 $S \geqslant 2b$ $r \geqslant 3t$ A：平放在炉底时为 100～150 mm，挂在炉壁上时为 200～300 mm

(5) 为了降低元件引出端的温度，减少电能损失和便于连接电源线元件，引出棒或带的截面积至少应为元件截面积的 3 倍。

(6) 低电压大电流的加热设备中，以采用板、带材电热合金为宜。工业炉应选用 ϕ3 mm 以上电热丝，一般在 10 kW 以上应选用三相电源供电以减少电热合金线径。对功率在 12 kW 以下的实验电路可选用 ϕ3 mm 以下电热丝。

2. 电热合金牌号的确定

可根据炉温要求查阅表 5-1 进行选定。

3. 合金截面尺寸的确定

(1) 合金材料截面尺寸计算公式。

① 圆线线径的公式如下：

$$d = 34.3\sqrt[3]{\frac{P^2\rho_t}{U^2\omega}} \tag{5-1}$$

$$\rho_t = C_t\rho_{20}$$

式中 d——电热合金材料直径，mm；

P——元件功率，kW；

ρ_t——元件温度 t 时的电阻率，$\mu\Omega \cdot m$；

C_t——元件温度 t 时的电阻率温度修正系数，可查表 5-4；

ρ_{20}——元件温度 20 ℃时的电阻率；

ω——元件表面负荷，W/cm^2。

② 带材截面尺寸的计算为：

$$t = \sqrt[3]{\frac{P^2\rho_t}{20m(m+1)U^2\omega}} \tag{5-2}$$

$$m = b/t$$

式中 t——带材厚度，mm；

b——带材宽度，mm；

m——带材宽厚比。

由上面计算公式可知，需要在设备功率、供电电压、合金牌号以及电热元件采用的表面负荷值等参数确定后，才能算出电热合金材料的截面尺寸。

(2) 表面负荷的选用。表面负荷 ω 是表示电热元件发热能力的量，它是指电热元件表面上每平方厘米所能散发的功率。ω 值的大小决定着表示电热元件温度与炉内温度之间的差额。ω 值越大，两温度的差额越大。它的选用与电热合金的材质、规格、电热设备的构造、敞露与封闭程度、工作温度、加热介质、介质温度、传热方式等有密切关系。

表 5-7 为铁铬铝合金（OCr25Al5）表面负荷选用范围。镍铬合金（Cr20Ni80）的工作温度比铁铬铝合金低，故镍铬合金的表面负荷需相应减少，为表 5-7 中所列数值的 80%左右。设计中还应考虑元件结构形状对散热条件的影响，散热条件好的表面负荷可较大。带材元件比线材元件的散热好，因此其表面负荷可较高些。一般可高出表所列线材的 20%。

表 5-7　铁铬铝合金(0Cr25Al5)表面负荷选用范围

电热设备类型	工业电阻炉		日用电炉		电烙铁		电熨斗	管状电加热元件
	炉温 1000～1200 ℃	炉温 950 ℃	开启式	半开启式	外热式	内热式		
材料形状	线材	线材	线材	线材	带材	带材	带材	线材
表面负荷选用范围 (W/cm^2)	1.0～1.5	1.4～1.8	4～6	13～15	2～3	8～10	5～8	8～25

在电热元件工作温度范围相同情况下，炉温愈高，表面负荷需相应减少以减少元件温度与炉温之间的温差，否则元件温度将随着增高，使元件过热，寿命缩短。反之炉温降低，表面负荷可相应增大。

在炉温相同情况下，增大表面负荷将提高元件温度，缩短元件寿命。但因电功率不变，增大表现负荷可相应减小元件表面积，以减少电热合金材料用量。反之，减少表面负荷，可延长元件使用寿命，但需增加电热合金的用量。因此正确选用表面负荷，既能做到节约电热合金材料，又能保证电热元件有较长使用寿命。

第三节　硅碳电热元件

一、硅碳电热元件的特性

1. 硅碳(SiC)电热元件的特性

硅碳电热元件有很大的电阻率，在 800 ℃左右有一最低电阻值，低于 800 ℃，电阻温度系数为负值，800 ℃以上为正值。注意这一特点可防止因电压骤增而烧毁。新安装的硅碳棒，在使用 60～80 h 后，电阻率增加 15%～20%，其后增加缓慢。这种现象称为“老化”。显然，在电压不变的情况下，电流减少，功率降低。为保持功率稳定，必须提高硅碳棒端电压，所以使用硅碳棒电热体的高温电阻炉，都配调压器或可控硅调压装置。

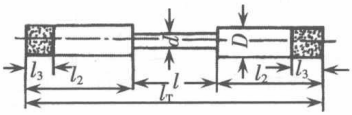
硅碳棒具有良好的化学稳定性，与硫酸、盐酸、硝酸不发生反应；但碱、碱土金属、硅酸及硼化物在高温下对它有腐蚀作用；水蒸气对它有强烈的氧化作用；要谨慎操作。碳化硅棒耐急冷急热温度变化的性能较差，所以加热、冷却速度不能太快。

2. 硅碳棒的结构及技术参数

硅碳棒它由发热部和接线端两部分组成。它有棒状及管状等不同形式。分成粗端部、等直径、三相型、槽型、螺纹管等各种不同结构。硅碳棒尺寸规格、每支电阻值及允许负荷见表 5-8。单螺纹硅碳尺寸规格、每支电阻值及允许负荷见

表 5-9。

表 5-8　硅碳棒尺寸规格、每支电阻值及允许负荷



d—发热部直径(mm)　D—接线端直径(mm)
l—发热部长度(mm)　l_2—接线端长度(mm)
l_3—喷铝部长度(mm)　l_T—元件总长度(mm)

规格 ($d/l/l_2$)	各部尺寸(mm)						发热部表面积 (πdl) (cm^2)	1400℃时电阻 (Ω) (±10%)	下列炉温时每支元件的允许负荷(W) (元件温度=1450℃)			
	发热部		接线端		铝长度 l_3	全长 l_T			1100℃ (w=26.3)	1200℃ (w=20.5)	1300℃ (w=13.47)	1400℃ (w=4.91)
	直径 d	长度 l	直径 D	长度 l_2								
6/60/75	6	60	12	75	25	210	11.31	2.2	297	232	152.3	55.5
6/100/130	6	100	12	130	25	360	18.85	3.5	496	386	254	92.6
8/100/85	8	100	14	85	30	270	25.1	2.4	660	515	338	123.2
8/100/130	8	100	14	130	30	360	25.1	2.4	660	515	338	123.2
8/150/85	8	150	14	85	30	320	37.7	3.6	992	773	508	185.1
8/150/150	8	150	14	150	30	450	37.7	3.6	992	773	508	185.1
8/180/60	8	180	14	60	30	300	45.2	4.4	1 189	927	609	222
8/180/150	8	180	14	150	30	480	45.2	4.4	1 189	927	609	222
8/200/85	8	200	14	85	30	370	50.3	4.8	1 323	1 031	678	247
8/200/150	8	200	14	150	30	500	50.3	4.8	1 323	1 031	678	247
8/250/100	8	250	14	100	30	450	62.8	6.2	1 652	1 287	846	308
8/250/150	8	250	14	150	30	550	62.8	6.2	1 652	1 287	846	308
8/300/85	8	300	14	85	30	470	75.4	7.4	1 983	1 546	1 016	370
8/400/85	8	400	14	85	30	570	100.5	10	2 640	2 060	1 354	493
12/100/200	12	100	18	200	35	500	37.7	1.1	992	773	508	185.1
12/150/200	12	150	18	200	35	550	56.5	1.7	1 486	1 158	761	277
12/200/200	12	200	18	200	35	600	75.4	2.2	1 983	1 546	1 016	370
12/250/200	12	250	18	200	35	650	94.2	2.8	2 480	1 931	1 269	463
12/300/200	12	300	18	200	35	700	113.1	3.4	2 970	2 320	1 523	555
12/300/250	12	300	18	250	35	800	113.1	3.4	2 970	2 320	1 523	555

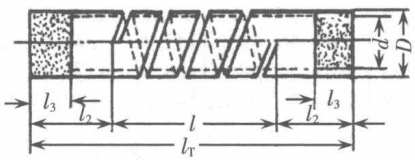
续表

规格 ($d/l/l_2$)	各部尺寸(mm)						发热部表面积 (πdl) (cm^2)	1400℃时电阻 (Ω) (±10%)	下列炉温时每支元件的允许负荷(W) (元件温度=1450℃)			
	发热部		接线端		铝长度 l_3	全长 l_T			1100℃ (w=26.3)	1200℃ (w=20.5)	1300℃ (w=13.47)	1400℃ (w=4.91)
	直径 d	长度 l	直径 D	长度 l_2								
14/200/250	14	200	22	250	40	700	88	1.8	2 310	1 804	1 185	432
14/200/350	14	200	22	350	40	900	88	1.8	2 310	1 804	1 185	432
14/250/250	14	250	22	250	40	750	110	2.2	2 890	2 260	1 482	540
14/250/350	14	250	22	350	40	950	110	2.2	2 890	2 260	1 482	540
14/300/250	14	300	22	250	40	800	131.9	2.6	3 470	2 700	1 777	648
14/300/350	14	300	22	350	40	1 000	131.9	2.6	3 470	2 700	1 777	648
14/400/250	14	400	22	250	40	900	175.9	3.5	4 630	3 610	2 370	864
14/400/350	14	400	22	350	40	1 100	175.9	3.5	4 630	3 610	2 370	864
14/500/250	14	500	22	250	40	1 000	220	4.4	5 790	4 510	2 960	1 080
14/500/350	14	500	22	350	40	1 200	220	4.4	5 790	4 510	2 960	1 080
14/600/250	14	600	22	250	40	1 100	264	5.2	6 940	5 410	3 560	1 296
14/600/350	14	600	22	350	40	1 300	264	5.2	6 940	5 410	3 560	1 296
18/250/250	18	250	28	250	50	750	141.4	1.3	3 720	2 900	1 905	694
18/250/350	18	250	28	350	50	950	141.4	1.3	3 720	2 900	1 905	694
18/300/250	18	300	28	250	50	800	169.6	1.7	4 460	3 480	2 280	833
18/300/350	18	300	28	350	50	1 000	169.6	1.7	4 460	3 480	2 280	833
18/300/400	18	300	28	400	50	1 100	169.6	1.7	4 460	3 480	2 280	833
18/400/250	18	400	28	250	50	900	226	2.3	5 940	4 630	3 040	1 110
18/400/350	18	400	28	350	50	1 100	226	2.3	5 940	4 630	3 040	1 110
18/400/400	18	400	28	400	50	1 200	226	2.3	5 940	4 630	3 040	1 110
18/500/250	18	500	28	250	50	1 000	283	2.7	7 440	5 800	3 810	1 390
18/500/350	18	500	28	350	50	1 200	283	2.7	7 440	5 800	3 810	1 390
18/500/400	18	500	28	400	50	1 300	283	2.7	7 440	5 800	3 810	1 390
18/600/250	18	600	28	250	50	1 100	339	3.4	8 920	6 950	4 570	1 664
18/600/350	18	600	28	350	50	1 300	339	3.4	8 920	6 950	4 570	1 664
18/600/400	18	600	28	400	50	1 400	339	3.4	8 920	6 950	4 570	1 664
18/800/250	18	800	28	250	50	1 300	452	4.6	11 890	9 270	6 090	2 220
18/800/350	18	800	28	350	50	1 500	452	4.6	11 890	9 270	6 090	2 220
25/300/400	25	300	38	400	70	1 100	236	1.0	6 210	4 840	3 180	1 159
25/400/400	25	400	38	400	70	1 200	314	1.3	8 260	6 440	4 230	1 542
25/600/500	25	600	38	500	70	1 600	471	2.0	12 390	9 660	6 340	2 310
25/800/500	25	800	38	500	70	1 800	628	2.6	16 520	12 870	8 460	3 080

续表

规格 ($d/l/l_2$)	各部尺寸(mm)						发热部表面积 (πdl) (cm^2)	1400℃时电阻 (Ω) (±10%)	下列炉温时每支元件的允许负荷(W) (元件温度=1450℃)			
	发热部		接线端		铝长度 l_3	全长 l_T			1100℃ (w=26.3)	1200℃ (w=20.5)	1300℃ (w=13.47)	1400℃ (w=4.91)
	直径 d	长度 l	直径 D	长度 l_2								
30/100/400	30	1 000	45	400	100	1 800	942	1.7	24 800	19 310	12 690	4 630
30/100/500	30	1 000	45	500	100	2 000	942	1.7	24 800	19 310	12 690	4 630
30/1 500/400	30	1 500	45	400	100	2 300	1 414	2.6	37 200	29 000	19 050	6 940
30/1 500/500	30	1 500	45	500	100	2 500	1 414	2.6	37 200	29 000	19 050	6 940
30/2 000/500	30	2 000	45	500	100	3 000	1 885	3.4	49 600	38 600	25 400	9 260
30/2 000/650	30	2 000	45	650	100	3 300	1 885	3.4	49 600	38 600	25 400	9 260
40/2 000/500	40	2 000	60	500	100	3 000	2 510	2.8	66 000	51 500	33 800	12 320
40/2 000/650	40	2 000	60	650	100	3 300	2 510	2.8	66 000	51 500	33 800	12 320

表 5-9　单螺纹硅碳管尺寸规格、每支电阻值及允许负荷



d—硅碳管内径(mm)　D—硅碳管外径(mm)
l—螺纹带长度(mm)　l_2—接线端长度(mm)
l_3—喷铝部长度(mm)　l_T—元件总长度(mm)

规格 ($D/d\times l/l_2$)	各部尺寸(mm)						发热部表面积 (πdl) (cm^2)	1400℃时电阻 (Ω) (±10%)	下列炉温时每支元件的允许负荷(W) (元件温度=1 450℃)			
	直径		螺纹带长度 l	接线端长度 l_2	喷铝长度 l_3	全长 l_T			1100℃ (w=26.3)	1200℃ (w=20.5)	1300℃ (w=13.47)	1400℃ (w=4.91)
	外径 D	内径 d										
40/30×200/100	40	30	200	100	30	400	251	3～6	6 600	5 150	3 380	1 232
40/30×300/100	40	30	300	100	30	500	377	5～8	9 920	7 730	5 080	1 851
40/30×400/100	40	30	400	100	30	600	503	7～10	13 230	10 310	6 780	2 470
50/40×300/100	50	40	300	100	35	500	471	4～7	12 390	9 660	6 340	2 310
50/40×400/100	50	40	400	100	35	600	628	6～9	16 520	12 870	8 460	3 080
50/40×500/100	50	40	500	100	35	700	785	8～11	20 600	16 090	10 570	3 850

续表

规格 ($D/d\times l/l_2$)	各部尺寸(mm)						发热部表面积 (πdl) (cm^2)	1400 ℃时电阻 (Ω) (±10%)	下列炉温时每支元件的允许负荷(W) (元件温度=1 450 ℃)			
	直径		螺纹带长度 l	接线端长度 l_2	喷铝长度 l_3	全长 l_T			1100 ℃ (w=26.3)	1200 ℃ (w=20.5)	1300 ℃ (w=13.47)	1400 ℃ (w=4.91)
	外径 D	内径 d										
60/50×400/100	60	50	400	100	40	600	754	5～7	19 830	15 460	10 160	3 700
60/50×500/100	60	50	500	100	40	700	942	7～10	24 800	19 310	12 690	4 630
60/50×600/100	60	50	600	100	40	800	1 131	9～12	29 700	23 200	15 230	5 550
70/60×500/100	70	60	500	100	45	700	1 100	7～10	28 900	22 600	14 820	5 400
70/60×600/100	70	60	600	100	45	800	1 319	8～11	34 700	27 000	17 770	6 480
70/60×700/100	70	60	700	100	45	900	1 539	9～12	40 500	31 500	20 700	7 560
80/70×600/100	80	70	600	100	50	800	1 508	7～10	39 700	30 900	20 300	7 400
80/70×700/100	80	70	700	100	50	900	1 759	8～11	46 300	36 100	23 700	8 640
80/70×800/100	80	70	800	100	50	1 000	2 010	9～12	52 900	41 200	27 100	9 870
90/80×600/100	90	80	600	100	55	800	1 696	7～10	44 600	34 800	22 800	8 330
90/80×700/100	90	80	700	100	55	900	1 979	8～11	52 000	40 600	26 700	9 720
90/80×800/100	90	80	800	100	55	1 000	2 260	9～12	59 400	46 300	30 400	11 100
100/90×600/100	100	90	600	100	60	800	1 885	7～10	49 600	38 600	25 400	9 260
100/90×700/100	100	90	700	100	60	900	2 200	8～11	57 900	45 100	29 600	10 800
100/90×800/100	100	90	800	100	60	1 000	2 510	9～12	66 000	51 500	33 800	12 320

注：因硅碳管内部散热条件比外部差得多，故仅以其外表面作为发热部表面积。

二、硅碳电热元件的选用

1. 硅碳元件支数的计算

(1) 根据电热设备所需要总功率 P 及按表 5-8 选定的表面负荷 ω，即可用下式算出硅碳元件发热部的总面积。

$$S=\frac{P}{\omega} \tag{5-3}$$

(2) 根据电热设备的实际尺寸，从表 5-6 或表 5-7 中选定一种合适的硅碳元件发热部长度 l 和接线端长 l_2。表中同一发热部长度的元件有多种直径可供选用，可从中选定一种直径 d(棒)或 D(管)，用下式算出元件支数 Z(三相电路中，需把 Z 凑成 3 的倍数)。

$$Z=\frac{S}{\pi dl} \quad (\text{棒}) \tag{5-4}$$

$$Z=\frac{S}{\pi Dl} \quad (\text{管}) \tag{5-5}$$

(3) 支数确定以后，可用下式算出每支功率 P_1，即

$$P_1 = \frac{P}{Z} \tag{5-6}$$

2. 每支元件的允许负荷

表 5-8 与表 5-9 中列出了不同炉温下每支元件的允许负荷。这是把元件温度规定为 1 450 ℃，从表 5-10 查得炉温在 1100 ℃、1200 ℃、1300 ℃、1400 ℃时的表面负荷分别为 26.3 W/cm²、20.5 W/cm²、13.47 W/cm²、4.91 W/cm²。把它们分别乘以每支发热部表面积 πdl(棒)或 πDl(管)，求得各种规格的元件在不同炉温下的每支允许负荷。这一允许负荷在使用过程中不得超过，否则将加速元件老化。

硅碳元件在不同元件温度和炉温下的表面负荷值见表 5-10。

表 5-10 硅碳元件在不同元件温度和炉温下的表面负荷值 W/cm²

元件温度(℃)	炉温(℃)											
	1 000	1 050	1 100	1 150	1 200	1 250	1 300	1 350	1 400	1 450	1 500	1 550
1 100	4.63	2.45										
1 150	7.37	5.19	2.74									
1 200	10.41	8.23	5.78	3.04								
1 250	13.77	11.60	9.15	6.41	3.37							
1 300	17.47	15.29	12.84	10.1	7.06	3.70						
1 350	21.6	19.38	16.93	14.19	11.15	7.78	4.09					
1 400	26.0	23.9	21.74	18.67	15.63	12.26	8.57	4.48				
1 450	30.9	28.8	26.3	23.6	20.5	17.17	13.47	9.39	4.91			
1 500	36.3	34.1	31.7	28.9	25.9	22.5	18.82	14.73	10.26	5.35		
1 550	42.1	39.9	37.5	34.7	31.7	28.3	24.6	20.5	16.05	11.15	5.80	
1 600	48.4	46.2	43.8	41.0	38.0	34.6	30.9	26.8	22.4	17.46	12.11	6.32

注：计算表面积时，只考虑工作部分，两粗端不计。

三、硅碳电热元件使用注意事项

(1) 硅碳棒的接线方式以单相并联和三角形并联为佳，负荷易于平衡。这样既保护元件，又能获得均匀的炉温。

(2) 要注意硅碳棒阻值匹配，以达到功率平衡。对旧棒或阻值标记模糊的棒，可通电使发热部表面温度升至 1 100～1 200 ℃，记录该温度下的电压和电流值，以欧姆定律求出电阻值，以便配阻使用，切忌以冷态电阻值进行匹配。

(3) 硅碳元件在长期使用过程中，由于材料的氧化，其电阻值逐渐增大，因此在使用过程中必须配用调压器调节供电电压以保持设备所需功率。

设定允许硅碳元件使用过程中电阻可因老化而增至初始电阻的 4 倍。根据

$U=\sqrt{P_1R}$计算，则调压器的调节范围上限应为起始使用电压的 2 倍。

第四节　硅钼棒电热元件

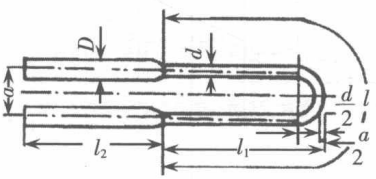
一、硅钼棒电热元件的特性

硅钼(MoSi2)电热元件是一种粉末冶金制品，表面有一层 SiO_2 薄膜，耐高温氧化。硅钼棒电阻温度系数大，使用时要配调压器，其电阻率不随使用时间长短变化。因此，新旧棒可以混合作用。其性能与玻璃相似，室温下硬脆，高于 1 350 ℃时变软，有延展性，一般不适宜水平安装。与碳化硅棒相比，硅钼棒使用温度更高，在空气、水蒸气、二氧化氮及二氧化碳气氛中，最高工作温度可达 1 700 ℃。硅钼棒热稳定性差，在 400～700 ℃之间易发生低温氧化，所以应避免在此温度范围内工作。硅钼棒亦应避免与酸类接触。目前，非金属加热元件主要用于工作温度超过金属电热元件允许范围的高温炉和某些特殊工作环境。

二、硅钼棒电热元件的规格及电气参数

硅钼棒电热元件是由二硅化钼粉末冶金方法经挤压成形、高温烧结而成。根据其外形可分为“U”形棒和直形棒两种。棒的两端较粗的是冷端，端头喷铝为连接部分，以安装磨成锥形后与热端采用氩弧焊成一体。硅钼棒尺寸规格见表 5－11，ϕ6/13 mm，(a=50 mm)硅钼棒各种规格及电气参数见表 5－12，ϕ9/18 mm (a=60 mm)硅钼棒各种规格及电气参数见表 5－13。

表 5－11　硅钼棒尺寸规格



产品规格	l	a	D	d
ϕ6/13	≤300 >300	40;50 50	13	6
ϕ9/18	≤300 >300	40;50;60 50;60	18	9

注：(1) 发热体总长 $l=2\left(l_1-\frac{a}{2}-\frac{d}{2}\right)+\frac{\pi a}{2}$(mm)。

(2) l 及 l_2 见表 5－12 与表 5－13。

表 5－12　ϕ6/13 mm(a=50 mm)硅钼棒各种规格及电气参数

发热端长度 l_1			(mm)	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1 000
发热体总长 l			(mm)	323	423	523	623	723	823	923	1 023	1 123	1 223	1 323	1 423	1 523	1 623	1 723	1 823	1 923	2 023
接线端长度 l_2	电参数		r_R(Ω)	0.043 4	0.056 9	0.070 3	0.083 7	0.0972	0.1106	0.1241	0.1375	0.1509	0.1644	0.1778	0.1913	0.2047	0.2181	0.2316	0.2450	0.2585	0.2719
			U_R(V)	5.6	7.4	9.14	10.9	12.6	14.4	16.1	17.9	19.6	21.4	23.1	24.9	26.6	28.4	30.1	31.8	33.6	35.3
			P_R(W)	734	961	1 188	1415	1642	1869	2096	2323	2550	2777	3005	3232	3459	3686	3913	4140	4367	4594
150	r_L(Ω)	0.0038	r_1(Ω)	0.0472	0.0607	0.0741	0.0875	0.1010	0.1144	0.1279	变压器选用：输出电压应按表内数值增加 20% 输出电流应按表内数值增加 40%										
	U_L(V)	0.5	U_1(V)	6.1	7.9	9.6	11.4	13.1	14.9	16.6											
	P_L(W)	65	P_1(W)	799	1026	1253	1480	1707	1934	2161											
200	r_L(Ω)	0.0054	r_1(Ω)	0.0485	0.0620	0.0754	0.0888	0.1023	0.1157	0.1292	0.1426	0.1560	0.1695	0.1829	0.1964						
	U_L(V)	0.7	U_1(V)	6.3	8.1	9.8	11.6	13.3	15.1	16.8	18.6	20.3	22.1	23.8	25.6						
	P_L(W)	87	P_1(W)	821	1048	1275	1502	1729	1956	2183	2410	2637	2864	3082	3319						
250	r_L(Ω)	0.0054	r_1(Ω)	0.0498	0.0633	0.0767	0.0901	0.1036	0.1170	0.1305	0.1439	0.1573	0.1708	0.1842	0.1977	0.2111	0.2245	0.2380	0.2514	0.2649	0.2783
	U_L(V)	0.8	U_1(V)	6.4	8.2	9.9	11.7	13.4	15.2	16.9	18.7	20.4	22.2	23.9	25.7	27.4	29.25	30.9	32.6	34.4	36.1
	P_L(W)	108	P_1(W)	842	1069	1296	1523	1750	1977	2204	2431	2658	2885	3113	3340	3567	3794	4021	4248	4475	4702
300	r_L(Ω)	0.0077	r_1(Ω)	0.0511	0.0646	0.0780	0.0914	0.1049	0.1183	0.1318	0.1452	0.1586	0.1721	0.1855	0.1990	0.2124	0.2258	0.2393	0.2527	0.2662	0.2796
	U_L(V)	1.0	U_1(V)	6.6	8.4	10.1	11.9	13.6	15.4	17.1	18.9	20.9	22.4	24.1	25.9	27.6	29.4	31.1	32.8	34.6	36.3
	P_L(W)	130	P_1(W)	864	1091	1318	1545	1772	1999	2226	2453	2680	2907	3135	3362	3589	3816	4043	4270	4497	4724
350	r_L(Ω)	0.0090	r_1(Ω)	0.0524	0.0689	0.0793	0.0927	0.1062	0.1196	0.1331	0.1465	0.1599	0.1734	0.1868	0.2003	0.2137	0.2271	0.2406	0.2540	0.2675	0.2809
	U_L(V)	1.2	U_1(V)	6.8	8.6	10.3	12.1	13.8	15.6	17.3	19.1	20.8	22.6	24.3	26.1	27.8	29.6	31.3	33.0	34.8	36.5
	P_L(W)	150	P_1(W)	886	1113	1304	1567	1794	2021	2248	2475	2702	2929	3157	3384	3611	3838	4065	4292	4519	4746
400	r_L(Ω)	0.0102	r_1(Ω)	0.0536	0.0671	0.0805	0.0939	0.1074	0.1208	0.1343	0.1477	0.1611	0.1746	0.1880	0.2015	0.2149	0.2283	0.2418	0.2552	0.2687	0.2821
	U_L(V)	1.3	U_1(V)	6.9	8.7	10.4	12.2	13.9	15.7	17.4	19.2	20.9	22.9	24.4	26.2	27.9	29.7	31.4	33.1	34.9	36.6
	P_L(W)	173	P_1(W)	907	1134	1361	158	1815	2042	2269	2496	2723	2950	3178	3405	3632	3859	4086	4313	4540	4767
450	r_L(Ω)	0.0116	r_1(Ω)		0.0684	0.0818	0.0952	0.1087	0.1221	01356	0.1490	0.1624	0.1759	0.1893	0.2028	0.2162	0.2296	0.2431	0.2565	0.2700	0.2834
	U_L(V)	1.5	U_1(V)		8.9	10.6	12.4	14.1	15.9	17.6	19.4	21.1	22.9	24.6	26.4	28.1	29.9	31.6	33.3	35.1	36.8
	P_L(W)	195	P_1(W)		1156	1383	1610	18.7	2064	2291	2518	2745	2972	3200	3427	3654	3881	4108	4335	4562	4789
500	r_L(Ω)	0.0128	r_1(Ω)		0.0697	0.0831	0.0965	0.1100	0.1234	0.1369	0.1503	0.1637	0.1772	0.1906	0.2041	0.2175	0.2309	0.2444	0.2578	0.2713	0.2847
	U_L(V)	1.7	U_1(V)		9.1	10.8	12.6	14.3	16.1	17.8	19.6	21.3	23.1	24.8	26.6	28.3	30.1	31.8	33.5	35.3	37.0
	P_L(W)	217	P_1(W)		1178	1405	1632	1859	2086	2313	2540	2737	2994	3222	3449	3676	3903	4130	4357	4584	4811
550	r_L(Ω)	0.0141	r_1(Ω)			0.0844	0.0978	0.1113	0.1247	0.1382	0.1516	0.1650	0.1785	0.1919	0.2054	0.2188	0.2322	0.2457	0.2591	0.2726	0.2860
	U_L(V)	1.8	U_1(V)			10.9	12.7	14.4	16.2	17.9	19.7	21.4	23.2	24.9	26.7	28.4	30.2	31.9	33.6	35.4	37.1
	P_L(W)	238	P_1(W)			1426	1653	1880	2109	2334	2561	2788	3015	3243	3470	3697	3924	4151	4378	46605	4832
600	r_L(Ω)	0.0154	r_1(Ω)			0.0857	0.0991	0.1126	0.1260	0.1395	0.1529	0.1663	0.1798	0.1932	0.2067	0.2201	0.2335	0.2470	0.2604	0.2739	0.2873
	U_L(V)	2.0	U_1(V)			11.1	12.9	14.6	16.4	18.1	19.9	21.6	23.4	25.1	26.9	28.6	30.4	32.1	33.8	35.6	37.3
	P_L(W)	260	P_1(W)			1448	1675	1902	2129	2356	2583	2810	3037	3265	3492	3719	3946	4173	4400	4627	4854
650	r_L(Ω)	0.0167	r_1(Ω)				0.1004	0.1139	0.1273	0.1408	0.1542	0.1976	0.1811	0.1945	0.2080	0.2214	0.2348	0.2483	0.2617	0.2752	0.2886
	U_L(V)	2.2	U_1(V)				13.1	14.8	16.6	18.3	20.1	21.8	23.6	25.3	27.1	28.8	30.6	32.3	34.0	35.8	37.5
	P_L(W)	281	P_1(W)				1696	1923	2150	2377	2604	2831	3058	3286	3513	3740	3967	4194	4421	4648	4875
700	r_L(Ω)	0.0179	r_1(Ω)				0.1016	0.1151	0.1285	0.1420	0.1544	0.1688	0.1823	0.1957	0.2092	0.2226	0.2360	0.2495	0.2629	0.2764	0.2898
	U_L(V)	2.3	U_1(V)				13.2	14.9	16.7	18.4	20.2	21.9	23.7	25.4	27.2	28.9	30.7	32.4	34.1	35.9	37.6
	P_L(W)	303	P_1(W)				1718	1945	2172	2399	2626	2853	3080	3308	3535	3762	3989	4216	4443	4670	4897
750	r_L(Ω)	0.0192	r_1(Ω)						0.1298	0.1433	0.1567	0.1701	0.1836	0.1970	0.2105	0.2239	0.2373	0.3608	0.2642	0.2777	0.2911
	U_L(V)	2.5	U_1(V)						16.9	18.6	20.4	22.1	23.9	25.6	27.4	29.1	30.9	32.6	34.6	36.1	37.8
	P_L(W)	325	P_1(W)						2194	2421	2648	2875	3102	3330	3557	3784	4011	4238	4465	4692	4919
800	r_L(Ω)	0.0205	r_1(Ω)						0.1311	0.1446	0.1580	0.1714	0.1849	0.1983	0.2118	0.2252	0.2386	0.2520	0.2655	0.2790	0.2924
	U_L(V)	2.7	U_1(V)						17.1	18.8	20.6	22.3	24.1	25.8	27.6	29.3	31.1	32.8	34.5	36.3	38.0
	P_L(W)	346	P_1(W)						2215	2442	2669	2896	2123	3351	3578	3805	4032	4259	4486	4713	4940

炉内温度：1500 ℃

表面负荷：12 W/cm²

元件发热端温度：1625 ℃

元件接线端平均温度：800 ℃

电流：130 A

表 5-13　硅钼棒尺寸规格

发热端长度 l_1			(mm)	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
发热体总长 l			(mm)	325	425	525	625	725	825	925	1025	1125	1225	1325	1425	1525	1625	1725	1825	1925	2025
接线端长度 l_2	电参数		$r_R(\Omega)$ $U_R(V)$ $P_R(W)$	0.0194 4.6 1095	0.254 6.0 1438	0.0314 7.5 1776	0.0373 8.9 2114	0.0433 10.3 2453	0.0493 11.7 2791	0.0553 13.2 3129	0.0612 14.6 3468	0.0672 16.0 3806	0.0732 17.4 4144	0.0791 18.8 4482	0.0851 20.3 4821	0.0911 21.7 5159	0.0971 23.1 5497	0.1030 24.5 5836	0.1090 26.0 6174	0.1150 27.4 6512	0.1210 28.8 6851
150	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0020 0.5 114	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$	0.0214 5.1 1213	0.0274 6.5 1552	0.0334 8.0 1890	0.0393 9.4 2228	0.0453 10.8 2567	0.0513 12.2 2905	0.0573 13.7 3243	0.0632 15.1 3582	变压器选用：输出电压应按表内数值增加 20% 输出电流应按表内数值增加 40%									
200	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0027 0.6 151	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$	0.0221 5.2 1250	0.0281 6.6 1589	0.0341 8.1 1927	0.0400 9.5 2265	0.0460 10.9 2604	0.0520 12.3 2942	0.0580 13.8 3280	0.0639 15.2 3619										
250	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0033 0.8 189	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$	0.0227 5.4 1288	0.0287 6.8 1627	0.0347 8.3 1965	0.0406 9.7 2303	0.0466 11.1 2642	0.0526 12.5 2980	0.0586 14.0 3318	0.0645 15.4 3657	0.0705 16.8 3995	0.0765 18.2 4333	0.0824 19.6 4671	0.0884 21.1 5010	0.0944 22.5 5348	0.1004 23.9 5686				
300	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0040 1.0 227	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$	0.0234 5.6 1326	0.0294 7.0 1665	0.0354 8.5 2003	0.0413 9.9 2341	0.0473 11.3 2680	0.0533 12.7 3018	0.0593 14.2 3356	0.0652 15.6 3695	0.0712 17.0 4033	0.0772 18.4 4371	0.0831 19.8 4709	0.0891 21.3 5048	0.0951 22.7 5386	0.1011 24.1 5724	0.1070 25.5 6063	0.1130 27.0 6401	0.1190 28.4 6739	0.1250 29.8 7078
350	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0047 1.1 265	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$		0.0301 7.1 1703	0.0361 8.6 2041	0.0420 10.0 2379	0.0480 11.4 2718	0.0540 12.8 3056	0.0600 14.3 3394	0.0659 15.7 3733	0.0719 17.1 4071	0.0779 18.5 4409	0.0838 19.9 4747	0.0898 21.4 5086	0.0958 22.8 5424	0.1018 24.2 4562	0.1077 25.6 6101	0.1137 27.1 6439	0.1197 28.5 6777	0.1257 29.9 7116
400	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0053 1.3 303	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$		0.0307 7.4 1741	0.0367 8.8 2079	0.0426 10.2 2417	0.0486 11.6 2756	0.0546 13.0 3094	0.0606 14.5 3432	0.0665 15.9 3771	0.0725 17.3 4109	0.0785 18.7 4447	0.0844 20.1 4785	0.0904 21.6 5124	0.0964 23.0 5462	0.1024 24.4 5800	0.1083 25.8 6139	0.1143 27.3 6477	0.1203 28.7 6815	0.1263 30.1 7154
450	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0060 1.4 341	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$			0.0374 8.9 2117	0.0433 10.3 2455	0.0493 11.7 2794	0.0553 13.1 3132	0.0613 14.6 3470	0.0672 16.0 3890	0.0732 17.4 4147	0.0792 18.8 4485	0.0851 20.2 4823	10.0911 21.7 5162	0.0971 23.1 5500	0.1031 24.5 5838	0.1090 25.9 6177	0.1150 27.4 6515	0.1210 28.8 6853	01270 30.2 7192
500	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0067 1.6 378	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$			0.0381 9.1 2154	10.0440 10.5 2492	0.0500 11.9 2831	0.0560 13.3 3169	0.0620 14.8 3507	0.0679 16.2 3846	0.0739 17.6 4184	0.0799 19.0 4522	0.0858 20.4 4860	0.0918 21.9 5199	0.0978 23.3 5537	0.1038 24.7 5875	0.1097 26.1 6214	0.1157 27.6 6552	0.1217 29.0 6890	0.1277 30.4 7229
550	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0073 1.7 416	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$				0.0446 10.6 2530	0.0506 12.0 2869	0.0566 13.14 3207	0.0626 14.9 3545	0.0685 16.3 3884	0.0745 17.7 4222	0.0805 19.1 4560	0.0864 20.5 4898	0.0924 22.0 5237	0.0984 23.4 5575	0.1044 24.8 5913	0.1103 26.2 6252	0.1163 237.7 6590	0.1223 29.1 6928	0.1283 30.5 7267
600	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0080 1.9 454	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$	炉内温度：1500 ℃			0.0453 10.8 2568	0.0513 12.2 2907	0.0573 13.6 3245	0.0633 15.1 3583	0.0692 16.5 3922	0.0752 17.9 4260	0.0812 19.3 4598	0.0871 20.7 4936	0.0931 22.2 5275	0.0991 23.6 5613	0.1051 25.0 5951	0.1110 26.4 6290	0.1170 27.9 6628	0.1230 29.3 6966	0.1290 30.7 7305
650	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0087 2.1 492	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$	表面负荷：12 W/cm²			0.0460 11.0 2606	0.0520 12.4 2945	0.0580 13.8 3283	0.0640 15.3 3621	0.0699 16.7 3960	0.0759 18.1 4298	0.0819 19.5 4636	0.0878 20.9 4974	0.0938 22.4 5313	0.0998 23.8 5651	0.1058 25.2 5989	0.1117 26.6 6328	0.1177 28.1 6666	0.1237 29.5 7004	0.1297 30.9 7343
700	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0094 530	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$	元件发热端温度：1625 ℃ 元件接线端平均温度：800 ℃			0.0467 11.1 2644	0.0527 12.5 2983	0.0587 13.9 3321	0.0647 15.4 3659	0.0706 16.8 3998	0.0766 18.2 4336	0.0826 19.6 4674	0.0885 21.0 5012	0.0945 22.5 5351	0.1005 23.9 5689	0.1065 25.3 6027	0.1124 26.7 6366	0.1184 28.2 6704	0.1244 29.6 7042	0.1304 31.0 7381
750	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0100 2.4 568	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$	电流：238 A			0.0473 11.3 2682	0.0533 12.7 3021	0.0593 14.1 3359	0.0653 15.6 3697	0.0712 17.0 4036	0.0772 18.4 4374	0.0832 19.8 4712	0.0891 21.2 5050	0.0951 22.7 5389	0.1011 24.1 5727	0.1071 25.5 6065	0.1130 26.9 6404	0.1190 2864 6742	0.1250 29.8 7080	0.1310 31.2 7419
800	$r_L(\Omega)$ $U_L(V)$ $P_L(W)$	0.0107 2.5 605	$r_1(\Omega)$ $U_1(V)$ $P_1(W)$				0.0480 11.4 2719	0.540 12.8 3058	0.0600 14.2 3396	0.0660 15.7 3734	0.0719 17.1 4073	0.0779 18.5 4411	0.0839 19.9 4749	0.0898 21.3 5087	0.0958 22.8 5426	0.1018 24.2 5764	0.1078 25.6 6102	0.1137 27.0 6441	0.1197 28.5 6779	0.1257 29.9 7117	0.1317 31.3 7456

三、硅钼棒选用的估算

计算每支元件的热端功率 P

$$P = I^2 \rho_t \frac{4l_2}{1\,000\pi d^2} = \frac{\rho_{bm}\pi dl}{100}$$

式中 ρ_t 为发热端在1650 ℃时电阻率，可查得 $\rho_{20\,℃}=0.25\ \Omega \cdot mm^2/m$，$C_t=15.19$，得

$$\rho_t = C_t \rho_{20\,℃} = 15.19 \times 0.25 = 3.8(\Omega \cdot mm^2/m)$$

硅钼棒的热端、冷端及每支元件的参数计算公式见表 5-14。

表 5-14 硅钼棒的热端、冷端及每支元件的参数计算公式

电 阻	热端 $r_R=3.8\frac{4l}{1\,000\pi a^2}$	冷端 $r_L=1.7\frac{2\times 4l}{1\,000\pi D^2}$	每支 $r=r_R+r_L$
电 压	热端 $U_R=Ir_R$	冷端 $U_L=Ir_L$	每支 $U=U_R+U_L$
功 率	热端 $P_R=U_RI$	冷端 $P_L=U_LI$	每支 $P=P_R+P_L$

将 $d=6$ mm 和 $d=9$ mm 分别代入下式

$$I = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{d^3\rho_{bm}10}{\rho_t}}$$

可分别得出：$I=130$ A 和 $I=238$ A。

假定元件的冷端平均温度为 800 ℃，可查出 $C_t=6.8$，故冷端的电阻率

$$\rho_L = C_t \rho_{20\,℃} = 6.8 \times 0.25 = 1.7(\Omega \cdot mm^2/m)$$

用表 5-14 中公式可以算出每支元件的 r、U 和 P 值。

根据电炉的实际尺寸，从表 5-18 或表 5-19 选定一种合适的规格，并把所需电炉总功率 P_2 除以选定规格的每支功率 P，算出元件支数 Z（在三相电路中，须把 Z 折算成 3 的倍数）。

对于阴影范围内的其他操作点也可采用此法计算。

四、硅钼棒使用注意事项

(1) 硅钼棒加热元件用于电炉时，其安装方法有垂直吊挂和水平安装两种。在一般情况下，硅钼棒元件用于电炉中时多为垂直吊挂。当需要水平安装时，电炉连续使用最高工作温度不得超过 1 550 ℃。

(2) 当元件在 400～800 ℃温度范围内长期作用时，会破坏元件表面的石英玻璃层而使元件发生低温氧化，因而不能在此温度长期使用。

第五节　管状加热元件

一、管状加热元件的特性、结构及种类

管状电热元件(又称电热管)是由铁铬铝或镍铬电热线(丝)作为发热体，外面套以金属护套(钢、铜或铬镍锑)，中间填以电熔结晶(氧化镁等)填料而组成。具有结构简单，可直接在液体中加热、热效率高、机械强度好等特点，可弯成各种形状，安装与使用均方便，广泛用作各种家用电热器具中的发热体。

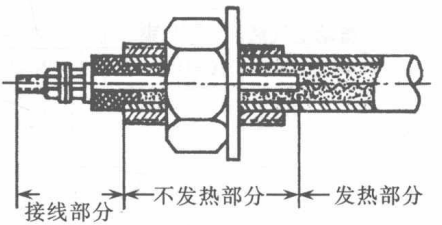


图 5-1　管状电加热元件结构示意图

管状电加热元件结构示意图如图 5-1。

管状电热元件的种类及主要数据见表 5-15。

表 5-15　管状电热元件的型号和用途

型　　号	用　　途	最高工作温度/℃	管子材料
JGQ1、JGQ2、JGQ3	加热流动空气	≤300	碳钢管
JGQ4、JGQ5、JGQ6	加热静止空气	≤300	碳钢管
JGQ7、JGQ8	加热流动空气	≤300	碳钢管
JGY1、JGY2	加热静止油	≤300	碳钢管
JGY3	加热循环油	≤100	碳钢管
JGS1	加热水	敞开：100 ℃ 密闭(压力 0.3 MPa)： ≤120 ℃	碳钢管
JGS2、JGS3			纯铜管
JGX1、JGX2、JGX3	敞开式槽内供硝盐液加热	≤550	不锈钢管
JGJ1、JGJ2、JGJ3	敞开式槽内供碱液加热	≤550	碳钢管
JGM1、JGM2	各种金属模具加热	≤300	碳钢管

二、管状加热元件的应用

管状加热元件的选用见表 5-16。

表 5-16　管状电加热元件的选用

型号	加热介质		管子材料	管子单位表面负荷(W/cm²)	工作温度(℃)	每支功率的范围	
						220 V	380 V
JGQ	非流动空气		#10 钢	1.2～1.8	300	0.5～1.5 kW	2～3kW
			1Cr18Ni9Ti	1.2～3.0	500（管子温度 800 ℃）		
	流动空气风速＞6 m/s		#10 钢	1.8～3.0	300		
			1Cr18Ni9Ti	2～4			
JGY	油	静止	#10 钢	2.5～2.8	300	1～8 kW	5～4 kW
		流动	#10 钢	3～6	100		
JGS	水		铜、#10 钢、1Cr18Ni9Ti	5～10	100～105	1～5 kW	4～7 kW
JGX	硝盐		1Cr18Ni8Ti	3～3.5	550		2～7 kW
JGJ	碱		#10 钢	3～3.5	550		2～7 kW
JGM	金属模具		#10 钢 1Cr18Ni9Ti	2～4	220	36 V 0.2～1.5 kW 55 V 0.2～0.3 kW 110 V 0.2～0.5 kW 220 V 0.2～1.5 kW	
	石蜡		#10 钢	1.6～1.8	200		
	低熔点金属		#10 钢 1Cr18Ni9Ti	3～4（嵌入式）	500		

注：管状电加热元件的尺寸、形状可参阅有关厂的产品资料。

各种型号的管形电热元件的技术数据见表 5-17 至表 5-25。

表 5-17　JGQ 型管状电热元件的技术数据

型　号	电　压 (V)	功　率 (kW)	外形尺寸(mm)			每支重量 (kg)
			总长 A	B	C	
JGQ1-220/0.5	220	0.5	490	330	—	1.25
JGQ1-220/0.75	220	0.75	690	530	—	1.60
JGQ2-220/1.0	220	1.0	490	330	200	1.83
JGQ2-220/1.5	220	1.5	690	530	400	2.62
JGQ3-380/2.0	380	2.0	590	430	300	3.43
JGQ3-380/2.5	380	2.5	690	530	400	4.00
JGQ3-380/3.0	380	3.0	790	630	500	4.50

续表

型　　号	电　压（V）	功　率（kW）	外形尺寸(mm)			每支重量（kg）
			总长 A	B	C	
JGQ4－220/0.8	220	0.8	800	128	53	1.20
JGQ4－220/1.0	220	1.0	1 000	128	53	1.42
JGQ4－220/1.2	220	1.2	1 200	128	53	1.65
JGQ4－220/1.4	220	1.4	1 400	128	53	1.87
JGQ5－220/0.7	220	0.7	860	660	100	0.97
JGQ5－220/0.8	220	0.8	1 260	860	200	0.40
JGQ5－220/0.9	220	0.9	1 560	960	300	1.72
JGQ5－220/1.1	220	1.1	1 860	1 160	350	2.04
JGQ5－220/1.2	220	1.2	2 060	1 260	400	2.26
JGQ5－220/1.3	220	1.3	2 260	1 260	500	2.48
JGQ5－220/1.5	220	1.5	2 560	1 560	500	2.80
JGQ6－36/0.25	36	0.25	260	120	70	—
JGQ6－55/0.25	55	0.25	260	120	70	—
JGQ6－55/0.3	55	0.3	340	200	70	—
JGQ6－110/0.4	110	0.4	390	250	70	—
JGQ6－110/0.5	110	0.5	440	300	70	—
JGQ6－220/0.6	220	0.6	660	500	70	—

表 5－18　JGY 型管状电热元件的技术数据

型　　号	功　率（V）	电　压（kW）	总长 A（mm）	B 浸入油中长度（mm）	每支重量（kg）
JGY2－220/1	1	220	307	230	1.45
JGY2－220/2	2	220	507	430	1.90
JGY2－220/3	3	220	707	630	2.35
JGY2－220/4	4	220	922	845	2.83
JGY4－220/5	5	220	697	620	2.45
JGY4－220/6	6	220	807	730	2.70
JGY4－220/8	8	220	1 007	930	3.05
JGY3－220/1	1	220	625	595	0.77
JGY3－220/2	2	220	825	795	1.01
JGY3－220/3	3	220	925	895	1.13
JGY3－220/4	4	220	1 125	1 095	1.37

表 5-19　JGS1 型管状电热元件的技术数据

型　号	电　压（V）	功　率（kW）	外形尺寸(mm)				每支重量（kg）
			总长 A	B 最低液面	C	每根引出棒长	
JGS1-380/1	380	1	440	360	340	230	2.00
JGS1-380/2	380	2	480	400	380	230	2.15
JGS1-380/3	380	3	580	500	480	230	2.53
JGS1-380/4	380	4	675	575	490	255	2.80
JGS1-380/5	380	5	775	675	540	255	3.08
JGS1-380/6	380	6	870	770	560	255	3.33
JGS1-380/7	380	7	875	755	660	275	3.50

表 5-20　JGS2 型管状电热元件的技术数据

型　号	电　压（V）	功　率（kW）	外形尺寸(mm)			每支重量（kg）
			总长 A	B 浸入水中尺寸	C	
JGS2-220/1	220	1	330	275	—	0.50
JGS2-220/2	220	2	480	425	—	0.67
JGS2-220/3	220	3	390	335	250	0.83
JGS2-220/4	220	4	515	460	375	1.13
JGS2-220/5	220	5	640	585	500	1.43

表 5-21　JGS3 型管状电热元件的技术数据

型　号	电　压（V）	功　率（kW）	外形尺寸(mm)				每支重量（kg）
			总长 A	B 浸入水中尺寸	ϕD	引出棒长	
JGS3-220/0.5	220	0.5	145	100	60	60	0.40
JGS3-220/1	220	1	175	130	60	70	0.48
JGS3-220/1.5	220	1.5	200	155	60	70	0.65
JGS3-220/2	220	2	250	205	60	125	0.70
JGS3-220/2.5	220	2.5	120	75	80	90	0.55

表 5－22　JGS4 型管状电热元件的技术数据

型　号	电　压 (V)	功　率 (kW)	外形尺寸(mm)						每支重量 (kg)
			A	*B*	*C*	引出棒长	Ø	*H*	
JGS4－220/1	220	1	435	405	380	200	12	50	0.50
JGS4－220/2	220	2	585	555	530	200	12	50	0.73
JGS4－220/3	220	3	785	755	730	200	12	50	0.98
JGS4－380/4	380	4	700	670	625	225	16	80	1.60
JGS4－380/5	380	5	850	820	775	225	16	80	1.93
JGS4－380/6	380	6	1 075	1 045	1 000	250	16	80	2.41
JGS4－380/7	380	7	1 225	1 195	1 150	250	16	80	2.73

表 5－23　JGX1、JGJ1 型管状电热元件的技术数据

型　号	电　压 (V)	功　率 (kW)	外形尺寸(mm)				每支重量 (kg)
			A	*B* 最低液面	每根引出棒长度	总　长	
JGX1－380/2	380	2	800	550	635	2 315	4.0
JGX1－380/3	380	3	1 080	830	635	2 875	4.9
JGX1－380/4	380	4	1 380	1 130	635	3 475	6.0
JGX1－380/5	380	5	1 800	1 450	735	4 315	7.5
JGX1－380/6	380	6	2 100	1 750	735	4 915	8.7
JGX1－380/7	380	7	2 500	2 150	735	5 710	9.7
JGJ1－380/2	380	2	800	550	635	2 315	3.7
JGJ1－380/3	380	3	1 080	830	635	2 875	4.5
JGJ1－380/4	380	4	1 380	1 130	635	3 475	5.4
JGJ1－380/5	380	5	1 800	1 450	735	4 315	6.8
JGJ1－380/6	380	6	2 100	1 750	735	4 915	7.6
JGX1－380/7	380	7	2 500	2 150	735	5 710	9.0

表 5－24　JGX2、JGJ2 型管状电热元件的技术数据

型　号	电　压 (V)	功　率 (kW)	外形尺寸(mm)				每支重量 (kg)
			A	*B* 最低液面	每根引出棒长度	总　长	
JGX2－380/2	380	2	540	430	260	2 315	3.7
JGX2－380/3	380	3	680	570	400	2 875	4.7
JGX2－380/4	380	4	850	650	530	3 475	5.4
JGX3－380/5	380	5	770	570	460	4 315	7.2
JGX3－380/6	380	6	870	670	560	4 915	8.0
JGX3－380/7	380	7	1 020	820	685	5 710	9.0

续表

型　号	电　压 (V)	功　率 (kW)	外形尺寸(mm)				每支重量 (kg)
			A	B 最低液面	每根引出棒长度	总　长	
JGJ2-380/2	380	2	540	430	260	2 315	3.5
JGJ2-380/3	380	3	680	570	400	2 875	4.4
JGJ2-380/4	380	4	850	650	530	3 475	5.1
JGJ3-380/5	380	5	770	570	460	4 315	7.0
JGX3-380/6	380	6	870	670	560	4 915	7.8
JGX3-380/7	380	7	1 020	820	685	5 710	8.7

表 5-25　JGM3 型管状电热元件的技术数据

型　号	总长 L(mm)	发热长 L_1 (mm)	电　压 (V)	功　率 (kW)	重量 (kg)
JGM3-220/0.3	150±10	80	220	0.3	0.25
JGM3-220/0.5	200±10	130	220	0.5	0.29
JGM3-220/0.8	300±10	230	220	0.8	0.44
JGM3-220/1.0	350±10	280	220	1.0	0.49
JGM3-220/1.2	450±10	380	220	1.2	0.67
JGM3-220/1.5	550±20	180	220	1.5	0.83
JGM3-220/1.8	650±20	580	220	1.8	0.97
JGM3-220/2.2	750±20	680	220	2.2	1.16
JGM3-220/2.6	850±20	780	220	2.6	1.25
JGM3-220/3.0	1 000±20	930	220	3.0	1.53
JGM3-220/3.2	1 100±20	1 030	220	3.2	1.56

三、JGW 型远红外电热管

JGW 型远红外电热管的外形见图 5-2，规格及外形尺寸见表 5-26。

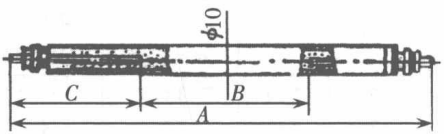


图 5-2　JGW 型电热管的外形

表 5－26　JGW 型电热管件的规格及外形尺寸

型　号	电　压（V）	功　率（kW）	外形及安装尺寸(mm)			重　量（kg）
			A	*B*	*C*	
JGW1－220/0.5	220	0.5	860	660	100	0.89
JGW1－220/0.65		0.65	1 260	860	200	1.32
JGW1－220/0.75		0.75	1 560	960	300	1.64
JGW1－220/0.9		0.9	1 860	1 160	350	1.96
JGW1－220/1.0		1.0	2 060	1 260	400	2.18

管状电热元件使用时的注意事项：

(1) 各种型号的元件是根据各种加热介质采用不同的管子表面负荷进行设计的，所以不能互换使用。因水的散热条件比空气优越，用于水中的 JGS 型的管子表面负荷大于在空气中使用的 JGQ 型。如果用 JGS 型电热元件加热空气，则由于它的管子表面负荷过大，将使元件温度过高而烧坏。

(2) 用于液体中的电热元件必须把其有效长度全部浸入液体中，防止暴露于液面以上的部分过热而烧坏。

(3) 因固体的散热条件不如液体，所以在盐浴或碱浴炉中，当盐或碱尚在固态时，电热元件必须降低电压使用，以降低其表面负荷，待其全部熔化成液态后，方可升至额定电压。

(4) 元件的工作电压不得超过其额定值的 10%。

(5) 元件外壳应有效地接地，以利安全。

常用电热材料在各种气氛中的最高使用温度见表 5－4。

四、板状电热器

电热板是管状元件的一种变形体，它以电阻丝作发热体，以氧化镁作绝缘物。它的外形如图 5－3 所示。

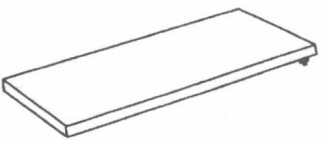


图 5－3　电热板外形

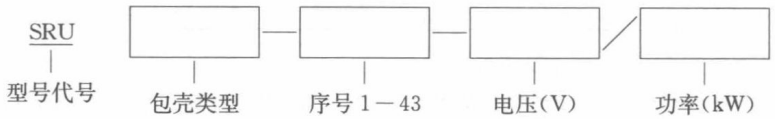
电热板一般用于干燥作业，安装在各种敞开或封闭式的烘道、烘箱中用来干燥木纤维、烘漆等；可作为红外线发生器；可熔铅、熔锡、熔蜡等；还可以作为实验室加热器和食品工业中烘面包、饼干等用。电热板的规格及外形尺寸见表 5－27。

表 5－27　电热板的规格及外形尺寸

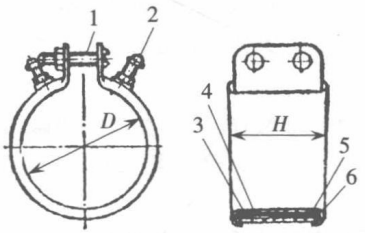
尺寸(mm)	150×300×12				
电压(V)	220				
功率(W)	200	400	600	800	1 000

第六节　电　热　圈

电热圈用于塑料机械、挤出机及管道加热，外壳为金属板材，发热材料为镍铬或铁铬铝电热合金材料，用云母片做绝缘骨架。有圆形、半圆形、弧形、平面及异形等多种。其中的一种电热圈型号组成如下：



电热圈的外形见图 5－4，规格及技术参数见表 5－28 和表 5－29。



1-紧固螺钉；2-接线螺钉；3-外层金属包壳；
4-电热丝；5-云母片；6-内层金属包壳

图 5－4　电热圈的结构图

表 5－28　单包壳电热圈的规格及技术参数

型　号	内径 D(mm)	高度 H(mm)	最大功率 P(W)
SRU1.2－1	42	30	120
SRU1.2－2	45	30	130
SRU1.2－3	50	30	150
SRU1.2－4	53	30	160
SRU1.2－5	53	40	200
SRU1.2－6	53	50	250
SRU1.2－7	60	30	170
SRU1.2－8	60	40	250
SRU1.2－9	60	50	300
SRU1.2－10	65	30	180
SRU1.2－11	65	40	250
SRU1.2－12	70	40	280
SRU1.2－13	70	50	350
SRU1.2－14	75	30	220
SRU1.2－15	75	40	300

续表

型　号	内径 D(mm)	高度 H(mm)	最大功率 P(W)
SRU1.2-16	80	30	230
SRU1.2-17	80	40	300
SRU1.2-18	80	50	380
SRU1.2-19	90	30	250
SRU1.2-20	90	40	350
SRU1.2-21	90	50	450
SRU1.2-22	100	50	500
SRU1.2-23	100	60	600
SRU1.2-24	110	40	400
SRU1.2-25	110	50	530
SRU1.2-26	110	60	650
SRU1.2-27	115	40	450
SRU1.2-28	115	50	550
SRU1.2-29	120	40	450
SRU1.2-30	120	50	600
SRU1.2-31	120	60	700
SRU1.2-32	130	40	500
SRU1.2-33	130	50	600
SRU1.2-34	140	40	530
SRU1.2-35	140	50	650
SRU1.2-36	140	60	800
SRU1.2-37	150	40	550
SRU1.2-38	150	50	700
SRU1.2-39	160	40	600
SRU1.2-40	160	50	750
SRU1.2-41	160	60	900
SRU1.2-42	170	50	800
SRU1.2-43	170	60	1 000
SUR3.4-1	70	50	350
SUR3.4-2	70	70	500
SUR3.4-3	80	50	400
SUR3.4-4	80	70	550
SUR3.4-5	90	50	450
SUR3.4-6	90	70	650
SUR3.4-7	100	50	500
SUR3.4-8	100	70	700
SUR3.4-9	110	50	550
SUR3.4-10	110	70	800

续表

型　号	内径 D(mm)	高度 H(mm)	最大功率 P(W)
SUR3.4-11	115	50	550
SUR3.4-12	115	70	800
SUR3.4-13	115	90	1 000
SUR3.4-14	120	50	600
SUR3.4-15	120	70	850
SUR3.4-16	120	90	1 000
SUR3.4-17	130	50	600
SUR3.4-18	130	70	850
SUR3.4-19	130	90	1 100
SUR3.4-20	140	50	650
SUR3.4-21	140	70	900
SUR3.4-22	140	90	1 200
SUR3.4-23	150	50	700
SUR3.4-24	150	70	1 000
SUR3.4-25	150	90	1 300
SUR3.4-26	170	50	800
SUR3.4-27	170	70	1 100
SUR3.4-28	170	90	1 500

表 5-29　双包壳电热圈的技术数据

型　号	电热圈内径 (D)mm	电热圈高度 H(mm)	最大设计功率 P(w)
SRU3.4-1	70	50	350
SRU3.4-2	70	70	500
SRU3.4-3	80	50	400
SRU3.4-4	80	70	550
SRU3.4-5	90	50	450
SRU3.4-6	90	70	650
SRU3.4-7	100	50	500
SRU3.4-8	100	70	700
SRU3.4-9	110	50	550
SRU3.4-10	110	70	800
SRU3.4-11	115	50	550
SRU3.4-12	115	70	800
SRU3.4-13	115	90	1 000
SRU3.4-14	120	50	600
SRU3.4-15	120	70	850
SRU3.4-16	120	90	1 000
SRU3.4-17	130	50	600
SRU3.4-18	130	70	850

续表

型　　号	电热圈内径 (D)mm	电热圈高度 H(mm)	最大设计功率 P(w)
SRU3.4-19	130	90	1 100
SRU3.4-20	140	50	650
SRU3.4-21	140	70	900
SRU3.4-22	140	90	1 200
SRU3.4-23	150	50	700
SRU3.4-24	150	70	1 000
SRU3.4-25	150	90	1 300
SRU3.4-26	170	50	800
SRU3.4-27	170	70	1 100
SRU3.4-28	170	90	1 500

第七节　远红外电热元件

利用远红外线加热干燥是一项新技术，它适用于各种有机物、高分子物质和含水物质，如油漆、绝缘漆、纺织品、粮食、木材、烟草、蔬菜和药材的干燥；食品的烘焙；金属的退火热处理和应力消除；治疗人体疾病等方面。具有投资省、烘干时间短、升温速度快、占地面积少、烘物质量高和消耗电能少等优点，一般可节电30%～50%。远红外电热元件有金属管状、陶瓷类和直热式远红外辐射元件。

一、金属管状远红外元件

金属管状远红外元件是在普通金属管状电加热元件上加涂远红外辐射涂层而制成的，可以做成不同长度、各种形状。它具有起动升温快、热效率高、使用寿命长和安装维修方便等优点，但它的表面负荷率较小，一般不大于4 W/cm^2，不适用于大功率高温加热。元件的直径有10 mm、12 mm、14 mm及16 mm等几种，它的基体管有不锈钢和碳钢两种材质。碳钢管面覆盖的远红外辐射涂料不易脱落；而在有腐蚀性气体或使用温度较高的场所，宜选用不锈钢管。

二、陶瓷类远红外元件

陶瓷类远红外元件有碳化硅板和锆英石板等。它的制造工艺简易，使用方便、寿命长，节电效果好，适用于温度较高、辐射强度大的加热炉，但它一般比较脆，不耐碰撞和振动，安装、检修较麻烦。碳化硅板加热器的规格性能见表5-30。

表 5-30 碳化硅板加热器的规格性能

尺寸(mm)	单件电压(V)	单件功率(W)
150×250×40	110～220	600～800
250×300×40	110～220	800～1 000
150×500×40	110～220	800～1 000

三、直热式远红外元件

直热式远红外元件是在电阻带朝向炉心的正面涂覆远红外辐射涂料，而在电阻带的背面涂覆低辐射率的二氧化铝涂料。它的表面负荷率较大，可达 10 W/cm²，被照射面可得到较大的辐射强度，达到较高的加热温度。

四、远红外辐射材料及涂覆工艺

1. 辐射材料

常用的辐射材料可分为六大体系，其配方见表 5-31。

表 5-31 常用远红外辐射材料的配方

编号	体 系	配方(按质量比)
1	α-Fe_2O_3	α-Fe_2O_3 单一体
2	TiO_2-ZrO_2	TiO_2 80%、ZrO_2 20%
3	TiO_2-ZrO_2	TiO_2 77%、ZrO_2 20%、Nb_2O_5 3%
4	TiO_2-ZrO_2	TiO_2 72%、ZrO_2 20%、Fe_2O_3 2%、Cr_2O_3 2% MnO_2 2%、Co_2O_3 2%
5	TiO_2-Fe_2O_3	TiO_2 80%、Fe_2O_3 20%
6	SiC-Fe_2O_3	SiC 60%、Fe_2O_3 25%、SiO_2 10%、Ni_2O_3 3%、MnO_2 2%
7	SiC-Fe_2O_3	SiC 80%、Fe_2O_3 15%、Ni_2O_3 3%、MnO_2 2%
8	Re 稀土	ReCaMnFeOx(铁锰酸稀土钙)
9	ZrO_2 · SiO_2	ZrO_2 · SiO_2 68%、Fe_2O_3 7%、MnO_2 2.5%、Cr_2O_3 2%、Co_2O_3 0.5%、黏土 20%
10	ZrO_2 · SiO_2	ZrO_2 · SiO_2 52%、矾土 15%、Fe_2O_3 3%、Cr_2O_3 3%、MnO_2 2%、苏州机选土 10%、漳州黑土 15%
11	ZrO_2 · SiO_2	ZrO_2 · SiO_2 50%、Fe_2O_3 25%、Cr_2O_3 20%、MnO_2 5%、2 号阳黏土 10%、阿拉伯树胶 1%

2. 涂覆工艺

常用的涂层方法有等离子喷涂法、涂刷法、撒布法和复合烧结法四种，其中涂刷法工艺简单、施工方便，不需专用设备，应用最普遍。

涂刷法和刷漆的工艺一样，先将金属加热元件或碳化硅电加热元件进行喷砂及用有机溶剂清洗处理，然后用毛刷将预制的料浆均匀地涂刷在电加热元件上，涂层厚 0.2～0.4 mm，晾干后，在 100 ℃～200 ℃温度下烘 2 h 即可。

涂刷的料浆是用黏结剂与远红外辐射涂料按一定的比例（质量比）经球磨或搅拌混合均匀制得的，其配方见表 5－32。

表 5－32　远红外料浆配方

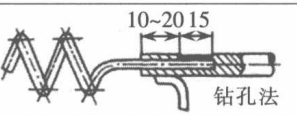
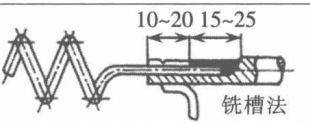
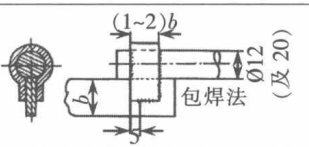
材料名称 / 质量比	远红外辐射材料	硅溶胶	中性水玻璃	有机硅高温漆	水	二甲苯
配方一	4	1～2	—	—	适量	—
配方二	2	—	1～2	—	适量	—
配方三	2	—	—	1	—	1

铁铬铝合金在焊接过程中，较易出现晶粒长大而产生脆性，且不能用热处理将它消除，故要求快速焊接，为缩短焊接时间，应尽可能增大焊接电流。最好采用氩弧焊，也可采用直流电弧焊。为了限制受热范围，可采用分段间隔焊接。每次只焊一小段，留一小段不焊，再焊另一小段，最后再补焊齐全。焊缝的起点与终点须离元件末端 5 mm，以防止两端单股处过热脆断。焊好后须在 800 ℃左右退火，以消除焊接应力。对镍铬合金的焊接，电弧焊及气焊都可采用。

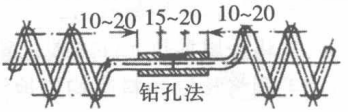
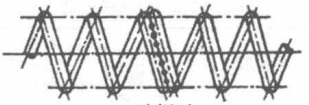
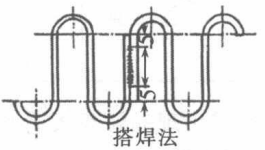
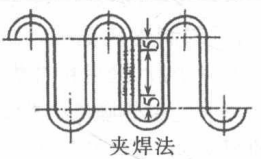
焊接铁铬铝合金时须使用同样材料的焊条。

焊接方式见表 5－33。

表 5－33　电热合金的各种常用焊接方式（单位：mm）

焊接类型		焊接方式	适用材料
引出棒与元件间焊接	线状元件		铁铬铝与镍铬合金
			
	带状元件		

续表

焊接类型		焊接方式	适用材料
元件之间焊接	线状元件	 钻孔法	铁铬铝合金
		铣槽法	
		 对焊法	镍铬合金
	带状元件	 搭焊法	镍铬合金
		 夹焊法	铁铬铝合金

第六章　热电偶材料

热电偶广泛用于测量和控制温度。它具有测控精确可靠、结构简单、使用方便等优点，工作温度可以从 4.2 K(−268.95 ℃)的深低温直至 2 800 ℃的超高温。热电偶测温原理示意图见 6-1。

图 6-1 中的 A 和 B 是两根合金成分不同、但具有一定热电特性的材料，称为热电极；它们的一端焊接在一起，构成一支热电偶。热电偶的焊接端称为工作端或热端，测温时将工作端插在测温部位，其温度为 t_1；另一端称为自由端或冷端，跨接指示仪表 M，其温度为 t_2。如果热电偶两端温度不同($t_1 > t_2$)，在回路中将产生热电动势，由指示仪表 M 显示出来。

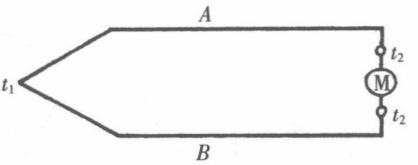


图 6-1　热电偶测温原理示意图

第一节　常用热电偶及电偶丝

一、热电偶性能及技术参数

常见热电偶材料物理性能见表 6-1。

表 6-1　常用热电偶材料物理性能

型号及名称		密度 (g/cm^3)	熔点 (℃)	20 ℃时的电阻率 ($\mu\Omega \cdot cm$)	平均电阻温度系数($℃^{-1}$)	标准号
S	铂铑$_{10}$	20.00	1847	19.0	0～1600 ℃　1.40×10^{-3}	GB 3772—1983
	铂	21.46	1769	9.8	0～1600 ℃　3.10×10^{-3}	
R	铂铑$_{13}$	19.60	1865	19.6	0～1600 ℃　1.33×10^{-3}	GB 1598—1986
	铂	21.46	1769	9.8	0～1600 ℃　3.10×10^{-3}	
B	铂铑$_{30}$	17.60	1925	—	—	GB 2902—1982
	铂铑$_{6}$	20.60	1820	17.7	—	
K	镍铬	8.50	1430	70.0	0～1200 ℃　2.90×10^{-4}	GB 2614—1985
	镍硅	8.60	1410	23.0	0～1200 ℃　16.30×10^{-4}	

续表

型号及名称		密度 (g/cm^3)	熔点 (℃)	20 ℃时的电阻率 ($\mu\Omega \cdot cm$)	平均电阻温度系数($℃^{-1}$)	标准号
E	镍铬	8.50	1430	70.0	0～1000 ℃ 2.90×10^{-4}	GB 4993—1985
	康铜	8.80	1250	49.0	0～1000 ℃ 0.05×10^{-3}	
J	铁	7.80	1534	12.0	0～600 ℃ 9.50×10^{-3}	GB 4994—1985
	康铜	8.80	1250	49.0	0～600 ℃ 0.05×10^{-3}	
T	铜	8.90	1083	1.7	20～400 ℃ 4.30×10^{-3}	GB 2903—1982
	康铜	8.80	1250	49.0	20～400 ℃ 0.05×10^{-3}	
N	镍铬硅	8.40	1425	100.0	0～1200 ℃ 0.78×10^{-4}	ZBN 05004—1988
	镍硅	8.50	1405	33.0	0～1200 ℃ 14.90×10^{-4}	
NiCr-AuFe0.07	镍铬	8.50	1430	70.0	—	GB 2904—1982
	金铁	19.20	1063	2.9	—	
Cu-AuFe0.07	铜	8.90	1083	1.7	—	GB 2904—1982
	金铁	19.20	1063	2.9	—	

注：由于生产厂家在制造工艺和化学成分上的微小差异，表中的数据与实际材料可能略有不同。

常用热电偶的使用温度范围及允许偏差见表 6-2。

表 6-2　常用热电偶的使用温度范围及允许偏差

型号及名称		温度范围 (℃)	允许偏差(℃)		
			Ⅰ 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级
S	铂铑$_{10}$-铂	0～600	—	±1.5	—
		0～1100	±1	—	—
		600～1600	—	±0.25 %t	—
		1100～1600	±[1+(t−1100)×0.003]	—	—
R	铂铑$_{13}$-铂	0～1600	±1 或 ±[1+(t−1100)×0.003]	±1.5 或 ±0.25 %t	—
B	铂铑$_{30}$-铂铑$_{6}$	600～1700	—	±0.25 %t	—
		600～800	—	—	±4
		800～1700	—	—	±0.5 %t

续表

型号及名称		温度范围（℃）	允许偏差（℃）		
			Ⅰ 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级
K	镍铬-镍硅	−40～1100	±1.5 或 ±0.4 %t	—	—
		−40～1300	—	±2.5 或 ±0.75 %t	—
		−200～40	—	—	±2.5 或 ±1.5 %t
E	镍铬-康铜	−40～800	±1.5 或 ±0.4 %t	—	—
		−40～90	—	±2.5 或 ±0.75 %t	—
		−200～40	—	—	±2.5 或 ±1.5 %t
J	铁-康铜	−40～750	±1.5 或 ±0.4 %t	±2.5 或 ±0.75 %t	—
T	铜-康铜	−40～350	±0.5 或 ±0.4 %t	±1 或 ±0.75 %t	—
		−200～40	—	—	±1 或 ±1.5 %t
N	镍铬硅-镍硅	−40～1100	±1.5 或±0.4 %t	—	—
		−40～1300	—	±2.5 或 ±0.75 %t	—
		−200～40	—	—	±2.5 或 ±1.5 %t
NiCr-AuFe0.07	镍铬-金铁	−270～0	±0.5	±1.0	—
Cu-AuFe0.07	铜-金铁	−270～196	±0.5	±1.0	—

常用热电偶材料的整百摄氏度热电动势见表 6－3。

表 6-3　常用热电偶材料的整百度热电势(单位:mV)

温　度 (℃)	型　号				
	S	R	B	K	E
−270	—	—	—	−6.458	−9.835
−200	—	—	—	−5.891	−8.824
−100	—	—	—	−3.553	−5.237
100	0.645	0.647	0.033	4.095	6.317
200	1.440	1.468	0.178	8.137	13.419
300	2.323	2.400	0.431	12.207	21.033
400	3.260	3.407	0.786	16.395	28.943
500	4.234	4.471	1.241	20.640	36.999
600	5.237	5.582	1.791	24.902	45.085
700	6.274	6.741	2.430	29.128	53.110
800	7.345	7.949	3.154	33.277	61.022
900	8.448	9.203	3.957	37.325	68.783
1 000	9.585	10.503	4.833	41.269	76.358
1 100	10.754	11.846	5.777	45.108	—
1 200	11.947	13.224	6.783	48.828	—
1 300	13.155	14.624	7.845	52.398	—
1 400	14.368	16.035	8.952	—	—
1 500	15.576	17.445	10.094	—	—
1 600	16.771	18.842	11.257	—	—
1 700	17.942	20.215	12.426	—	—
1 800	—	—	13.585	—	—

温　度 (℃)	型　号				
	J	T	N	NiCr-AuFe0.07	Cu-AuFe0.07
−270		−6.258	−4.345	−5.280	−1.702
−200	−7.890	−5.603	−3.990	−4.117	−0.896
−100	−4.632	−3.378	−2.407	−2.167	−0.309

续表

温　度（℃）	型　号				
	J	T	N	NiCr-AuFe0.07	Cu-AuFe0.07
100	5.268	4.277	2.774	—	—
200	10.777	9.286	5.912	—	—
300	16.325	14.860	9.340	—	—
400	21.846	20.869	12.972	—	—
500	27.388	—	16.744	—	—
600	33.096	—	20.609	—	—
700	39.130	—	24.526	—	—
800	45.498	—	28.456	—	—
900	51.875	—	32.370	—	—
1 000	57.942	—	36.248	—	—
1 100	63.777	—	40.076	—	—
1 200	69.536	—	43.836	—	—
1 300	—	—	47.502	—	—
1 400	—	—	—	—	—
1 500	—	—	—	—	—
1 600	—	—	—	—	—
1 700	—	—	—	—	—
1 800	—	—	—	—	—

热电偶材料有棒状、片状、膜状和丝状，通常用丝状材料。

常用热电偶的正负极材料见表 6-4。

表 6-4　常用热电偶的正负极材料

序号	热电偶名称或代号	正极材料		负极材料		热电偶标准
		代　号	名义成分	代　号	名义成分	
1	B型	BP	PtRh30	BN	PtRh6	GB2902—1982. IEC
2	R型	RP	PtRh13	RN	Pt100	GB1598—1986. IEC
3	S型	SP	PtRh10	SN	Pt100	GB3772—1983. IEC

续表

序号	热电偶名称或代号	正极材料		负极材料		热电偶标准
		代号	名义成分	代号	名义成分	
4	N型	NP	NiGr14.5Si1.5	NN	NiSi45Mg0.1	ZBN05004—1988. IEC
5	K型	KP	NiCr10	KN	NiSi3	GB2614—1985. IEC
6	J型	JP	Fe	JN	NiCu55	GB4994—1985. IEC
7	E型	EP	NiCr10	EN	NiCu55	GB4993—1985. IEC
8	T型	TP	Cu100	TN	NiCu55	GB2903—1982. IEC
9	镍铬-金铁	NiCr	NiCr10	AuFe	Au-0.07(at)%	GB2904—1982
10	铜-金铁	Cu	Cu100	AuFe	Au-0.07(at)%	GB2904—1982
11	钨铼3-钨铼25	WRe3	WRe3	WRe25	WRe25	ZBN05003—1988. ASTME696—1984
12	钨铼5-钨铼26	WRe5	WRe5	WRe26	WRe26	ZBN05003—1988. ASTME988—1984
13	钨铼5-钨铼20	WRe5	WRe5	WRe20	WRe20	ГОСТ3044—1984
14	镍铬-考铜(XK)	HX9.5	HX9.5	МНМЦ43-0.5	CuNi40Mn0.5	ГОСТ3044—1984, ГОСТ492—1973
15	HK-CA	HK	Ni17Co2Al2Mn1Si	CA	Ni35Al1.5Mn1Si1	ГОСТ6071—1951 ГОСТ6072—1951

注：P代表正极，N代表负极。

常用热电偶的特点和用途见表6-5。

表6-5 常用热电偶的特点和用途

型号与名称	特点	用途
S 铂铑$_{10}$-铂	测温精度高，复现性好，热电动势稳定，温度与热电动势有很好的线性关系。热电偶材料的熔点高、化学稳定性好，有良好的高温抗氧化性能。适合于氧化性气氛中使用	作有色金属熔炼、热处理炉等高温测量。S型经选择，用作标准传递
R 铂铑$_{13}$-铂		

续表

型号与名称	特　点	用　途
B 铂铑$_{30}$-铂铑$_{6}$	在100 ℃以下微分电动势很小，通常不需用补偿导线。稳定性好，测量温度高，高温下晶粒长大倾向性小，适合于真空惰性及氧化性气氛中使用	钢液测温及各种高温炉的测控
K 镍铬-镍硅	在廉金属热电偶中综合性能最优，可以部分代替1 300 ℃以下的贵金属热电偶的使用。适合于真空、惰性及氧化性气氛中使用	用于1 300 ℃以下的热处理炉、加热炉的温度测控
E 镍铬-康铜	在标准化的热电偶中，它的微分电动势最高。在石油化工中使用其耐蚀性及耐热性能好，适合于氧化性气氛及弱还原性气氛中使用	适用于750 ℃以下的温度测控及石油化工等生产过程测温
J 铁-康铜	微分电动势较高，原材料价格低。适合于石油、化工中的弱还原性气氛环境中及氧化性气氛中	用在600 ℃以下的氧化性气氛及弱还原性气氛的测温
T 铜-康铜	在300 ℃以下有较好的热电动势均匀性和稳定性，测温精度高，低温时灵敏度高。在潮湿空气中有较好的抗腐蚀性能，焊接性能好，价格低廉	用在300 ℃以下的温度测量，尤其是电机、电器的温升测量，低温标准传递
N 镍铬硅-镍硅	减少了在550 ℃以下由于镍铬极合金的有序、无序转变对热电动势的影响，提高了合金的抗氧化性能，因此，它的性能比K型热电偶优良	用在1 300 ℃以下的温控及需由低温至高温的循环测量
WRe3-WRe25 WRe5-WRe26	使用温度可高达2 300 ℃，高温强度和塑性好，灵活度高，是1 800 ℃以上的测温唯一可供使用的热电偶	适合于惰性、真空、还原性干燥的氢气中使用
NiCr-AuFe0.07 镍铬-金铁	热电动势的均匀性和复现性好，性能稳定，低温灵感度高	适用于－270～0 ℃的深低温测量
Cu-AuFe0.07 铜-金铁	在－270～－196 ℃范围内，性能稳定，灵敏度高等	主要用于宇航、核反应等低温测量

二、热电偶丝相关参数

标准热电偶丝的线径与使用温度上限见表 6-6。

表 6-6 标准热电偶丝的线径与使用温度上限

线径 ϕ (mm)	推荐长期使用的最高温度(℃)				
	K 型	E 型	J 型	T 型	N 型
0.3	700	350	300	200	700
0.5	800	350	300	200	800
0.8,1.0	900	450	400	250	900
1.2	1 000	450	400	250	1 000
1.6	1 000	550	500	350	1 000
2.0	1 100	550	500		1 100
2.5	1 100	650	600		1 100
3.2	1 200	750	600		1 200

常用热电偶的微分电动势见表 6-7。

表 6-7 常用热电偶的微分电动势(单位:μV/℃)

温 度 (℃)	型 号				
	S	R	B	K	E
−270	—	—	—	—	1.55
−200	—	—	—	15.20	25.13
−100	—	—	—	30.50	45.18
0	5.40	5.289	0.25	39.475	58.696
100	7.33	7.48	0.90	41.37	67.51
200	8.46	8.84	1.99	39.95	74.02
300	9.14	9.74	3.05	41.46	77.91
400	9.57	10.37	4.06	42.22	80.04
500	9.89	10.89	5.03	42.61	80.89
600	10.19	11.35	5.93	42.53	80.68
700	10.54	11.84	6.82	41.93	79.75
800	10.87	12.31	7.64	41.00	78.43

续表

温　度（℃）	型　号				
	S	R	B	K	E
900	11.20	12.77	8.40	39.96	76.70
1 000	11.53	13.22	9.11	38.93	74.93
1 100	11.83	13.63	9.76	37.84	—
1 200	12.02	13.91	10.35	36.50	—
1 300	12.12	14.07	10.86	34.90	—
1 400	12.12	14.12	11.27	—	—
1 500	12.03	14.06	11.55	—	—
1 600	11.85	13.88	11.69	—	—
1 700	11.49	13.50	11.66	—	—
1 800	—	—	11.48	—	—

第二节　补 偿 导 线

工业上应用的热电偶，其自由端（冷端）常靠近热源，温度波动较大。为了消除因自由端温度变化所产生的测量误差，通常采用补偿导线，如图 6-2 所示。

用补偿导线 C、D 将热电偶 A、B 的自由端从热源近处的 t_2 点延伸至远离热源、温度较恒定的 t_3 点。C、D 可分别看作是 A、B 的延长线，回路中的总热电动势将不受中间温度 t_2 变化的影响。补偿导线价格低廉，在使用贵金属热电偶时，如延伸距离较长，必须使用补偿导线。在连接补偿导线时，正、负极性不能接反。

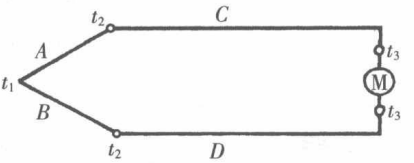


图 6-2　使用补偿导线的测温回路

一、补偿导线的型号、绝缘层标识及性能参数

标准化补偿导线有 SC、KC、KX、EX、JX、TX 六种型号。型号的首位字母为配热电偶的分度号，第二位字母中若是“C”表示是补偿型补偿导线，若是“X”则表示是延伸型补偿导线。在补偿导线合金丝中用“P”表示正极，用“N”表示负极。补偿导线的使用温度范围，G 型一般为－40～100 ℃，H 型一般为－40～200 ℃。按热电特性允许偏差又可分为精密级（A 型）和普通级（B 型）。标准化补偿导线

的型号、配用的热电偶、绝缘层标识及性能参数见表5－42。

补偿导线一般采用聚氯乙烯作绝缘层或炉套层，耐热导线多采用聚四乙烯和无碱玻璃纤维织物做绝缘，并用有机硅漆浸渍、烘干制成护套层。屏蔽层采用镀锡(或锌)铜丝编织物或复合铝(或钼)带绕包而成。

二、补偿导线合金丝的品种、成分及技术参数

补偿导线合金丝的品种、成分及技术参数见表6－8，适用于型号为S、K、E的工业热电偶补偿导线。

表6－8　补偿导线合金丝的品种、成分及技术参数

品　种	型　号	主要成分(%)				20 ℃时的电阻率($\mu\Omega \cdot m$)	抗拉强度(N/mm^2)	延伸率(%)
		Ni+Co	Cu	Mn	Cr			
铜镍合金	B0.6	0.53～0.63	余量	—	—	<0.03	≥19.6	≥25
康　铜	BMn40～1.5	39～41	余量	1.0～2.0	—	<0.50	≥39.2	≥20
考　铜	BMn43～0.5	42.5～44	余量	0.1～1.0	—	<0.50	≥39.2	≥20
镍铬合金	NiGr9	余量	—	—	8.5～9.5	<0.75	≥49	≥25
纯　铜	T					<0.0184	≥19.6	≥25

常用补偿导线的性能与用途见表6－9。

表6－9　常用补偿导线的性能与用途

品　种	热电动势 mV(允差 mV)					往复电阻值(Ω/m)①	补偿导线极性及绝缘皮颜色标志		配用热电偶
	100 ℃	150 ℃	200 ℃	300 ℃	400 ℃				
铜-铜镍0.6 (Cu-CuNi0.6)	0.643 (±0.023)	1.025<br$\binom{+0.024}{-0.055}$	1.436 (±0.064)	2.315 (±0.072)	3.250 (±0.072)	<0.04	铜(+) 铜镍(−)	红(+) 绿(−)	铂铑10(+) 铂　(−)
镍铬-考铜 (NiCr10-CuNi43Mn0.5)	6.95 (±0.30)	10.69 (±0.38)	14.66 (±0.43)	22.90 (±0.43)	31.48 (±0.43)	<1.25	镍铜(+) 考铜(−)	红(+) 黄(−)	镍铬(+) 考铜(−)
铜-康铜 (Cu-CuNi40-Mn1.5)	4.10 (±0.15)	6.13 (±0.20)	8.13 (±0.23)	12.21 (±0.23)	16.40 (±0.23)	<0.648	铜　(+) 康铜(−)	红(+) 蓝(−)	镍铬(+) 镍硅(−) (镍铝)
铜-铜镍1.8 (Cu-CuNi1.8)	1.35 (±0.05)	2.05 (±0.09)	2.96 (±0.11)	4.61 (±0.16)	6.37 (±0.16)	<0.04	铜　(+) 铜镍(−)	红(+) 白(−)	钨铼5(+) 钨铼20(−)

注：① 补偿导线的往复电阻值是指当温度为20 ℃，长度各为1 m，截面积各为1 mm^2 时的两导线总阻值。

三、补偿导线合金丝的直径及允许误差

补偿导线合金丝的直径及允许误差见表 6－10。

表 6－10　补偿导线合金丝的直径及允许误差

合金丝直径(mm)	允许误差(mm)
0.30,0.41,0.43,0.52	±0.02
0.80	+0.03 −0.02
1.13,1.37,1.76	±0.03

四、补偿导线的使用注意事项

(1) 各类型的补偿导线必须与相应型号的热电偶配合使用。

(2) 补偿导线与热电偶材料连接时，正负极必须相互对应，两个接线处于相同的温度点。

第三节　特种热电偶

一、铠装热电偶

铠装热电偶又称套管热电偶，它是由热电偶丝、绝缘材料和金属外套管三者组合而成的坚实体，用于冶金、机械、电工、电子、化工、原子能等行业。它的结构剖面见图 6－3。

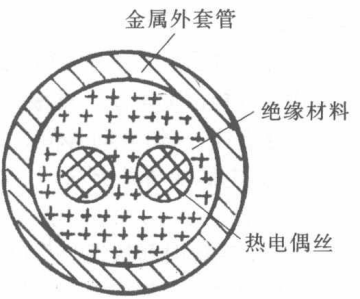


图 6－3　铠装热电偶结构剖面图

铠装热电偶反应速度快，时间常数小，使用范围广，便于安装在狭小或结构复杂的测温部位，能承受高压、冲击与震动。热电偶线处于密封状态，不易受各种介

质侵蚀，热稳定性高，使用寿命长。外径 0.25～10 mm，长度可从几十至几百米，并可制成多芯或不等断面结构。

铠装热电偶的品种有铂铑 30-铂铑 6、铂铑 10-铂、铂钼 5-铂钼 0.1、镍铬-镍硅、镍铬-镍铝、镍铬-考铜、铜-康铜等。

二、薄膜热电偶

薄膜热电偶是一种具有薄膜状工作端接点的热电偶，一般采用真空蒸镀、真空溅射、化学涂覆等工艺将热电偶材料薄膜沉积在云母、陶瓷等非金属材料基板上。由于薄膜的热容量很小，其时间常数可达毫秒级以下，适用于测量瞬变的表面温度和快速测量轧辊、轴承及燃气轮机叶片等表面温度。有镍-铁(0～300 ℃)、银-镍(0～600 ℃)及其他测更高温度的品种。

三、非金属热电偶

非金属热电偶的主要特点是熔点高、耐腐蚀和可在含碳、硫等气氛中测温，多数非金属热电偶的热电动势和热电势率均较大，但它的脆性大。具有代表性的品种有：

(1)二硅化钨—二硅化钼　在金属蒸气、氧化性气氛、水蒸气、二氧化碳等介质中可测温至 1 600 ℃。

(2)石墨—碳化钛　在渗碳介质和含氮与一氧化碳气氛中使用，一般可测温至2 000 ℃，最高可达 2 500 ℃；在 500 ℃以上，热电特性呈线性；2 400 ℃时的热电动势为160 mV；600～2 500 ℃时的平均热电热率为 65 μV/℃。

第四节　热电偶材料的选用

在选用热电偶材料时，主要从以下几个方面考虑：

(1) 使用温度范围。对于给定测温范围，应注意长期和短期使用极限温度以及热电偶丝材料的线径与使用温度极限的关系。可根据表 5-40 进行选择。

(2) 测温精度要求。选用稳定性好、热电动势值高、微分电动势大的热电偶材料可以提高温度精度。此外，热电偶的矫正方法、补偿导线的精度和配对仪表等对热电偶的测温精度有一定影响。

(3) 响应时间要求。热电偶的响应时间快慢与热电偶丝材料的粗细、热端的焊接、保护套管的材料等有关，丝材越细，响应时间越快，但使用寿命短，使用温度极限低。

(4) 环境气氛。使用过程中热电偶所处的环境气氛有氧化性、还原性、中性、真空及腐蚀性等气氛。应根据环境气氛和工作介质的不同，按表 6-11 选择。

表 6-11　标准化补偿导线的型号、配用的热电偶、绝缘层标识及性能参数

型号	配用热电偶	绝缘层标识		往复电阻不大于(Ω)	100 ℃		200 ℃	
		正　极	负　极		热电动势(mV)	允许偏差	热电动势(mV)	允许偏差
SC	铂铑$_{10}$-铂	SPC 红	SNC 绿	0.1	0.645	A±0.023 (3 ℃) B±0.037 (5 ℃)	1.44	— B±0.057 (5 ℃)
KC	镍铬-镍硅	KPC 红	KNC 蓝	0.8	4.095	A±0.063 (2.5 ℃) B±0.105 (2.5 ℃)	—	— —
KX	镍铬-镍硅	KPX 红	KNX 黑	1.5	4.095	A±0.063 (1.5 ℃) B±0.105 (2.5 ℃)	8.137	A±0.063 (1.5 ℃) B±0.100 (2.5 ℃)
EX	镍铬-康铜	EPX 红	ENX 棕	1.5	6.317	A±0.102 (1.5 ℃) B±0.170 (2.5 ℃)	13.49	A±0.111 (1.5 ℃) B±0.183 (2.5 ℃)
JX	铁-康铜	JPX 红	JNX 紫	0.8	5.268	A±0.081 (1.5 ℃) B±0.135 (2.5 ℃)	10.777	A±0.083 (1.5 ℃) B±0.138 (2.5 ℃)
TX	铜-康铜	TPX 红	TNX 白	0.8	4.277	A±0.024 (0.5 ℃) B±0.047 (1 ℃)	9.286	A±0.043 (0.8 ℃) B±0.083 (1.5 ℃)

注：1. 铂铑$_{30\text{-}6}$铂铑热电偶不需配用补偿导线。

2. X 表示延长型导线，即用本身偶丝延长作为补偿导线。

3. 往复电阻是指 20 ℃时，长度各 1 m，截面各为 1 mm^2 的正负两导线的总阻值。

4. A 表示精密型；B 表示普通型。

第五节　热电偶材料的焊接

热电偶材料常用的焊接方法有气焊、碳弧及汞弧焊接。

1. 气焊焊接

气焊焊接使用由乙炔—氧(或氢—氧)混合气体燃烧的火焰，须调节至乙炔稍微过量的中性焰后使用。焊接时，将接点放在焰心以外 1.2～2.0 mm 的位置加热；操作时，火焰应时起时落，不能始终停留在一点；两金属线一经熔合，立即移开火焰，冷却后即可获得一球形接点。

2. 碳弧焊接

碳弧焊接可使用交流或直流电弧焊接，以直流较好；在直流下，热电偶线作正极，碳电极作负极，接通电源后，将碳极尖端对准热电偶线，轻轻接触后，迅速拉开，使产生电弧；当热电偶线刚熔化时，立即拉开碳极，使电弧中断，熔融金属形成球状接点。较易氧化的材料可在氩气保护下焊接。

3. 汞弧焊接

汞弧焊接适用于焊接 0.3～1.5 mm 线径的热电偶线，可使用交流或直流，电压为 20～60 V；使用直流电时，须将热电偶线接正极，杯盛水银接负极(不能接反，否则水银剧烈蒸发，对人体有害。可在水银表面覆上一层变压器油，以防止焊接点氧化和水银蒸发)；焊接时，将热电偶线端碰上水银表面，然后稍微提高，使产生电弧；热电偶线很快熔化，这时提起热电偶线使电弧熄灭，冷凝后，即形成一球状接点，焊接点的结晶组织细而致密，气孔及杂质较少，焊接质量较高。

第七章　热双金属材料

第一节　热双金属材料的概述

热双金属片是由两层不同热膨胀系数的金属(或合金)彼此牢固结合的组合材料,其中热膨胀系数较高的一层称为主动层;热膨胀系数较低的一层称为被动层。有时为了获得特殊性能的双金属片,还可以有第三层、第四层,但习惯上仍然统称为热双金属片。

热双金属片受热时,主动层自由膨胀的长度大于被动层,如图 7-1 所示;但由于两层结合在一起,相互牵制,主动层的自由膨胀受到被动层的限制,产生向外的张力;而被动层的自由膨胀受到主动层的拉伸,产生向内的拉力,这两个力组成的力矩使热双金属片弯曲成主动层凸起、被动层凹进的圆弧形,如图 7-1 所示。冷却时,则与上述情况相反。当这种弯曲受到限制时,将产生推力,即把热能转变为机械能,可推动某些部件动作。热双金属片的厚度愈小、长度愈大,受热弯曲程度愈大。一般热双金属片厚度为 0.1 cm 左右,通常制成弧状或卷成螺旋状。

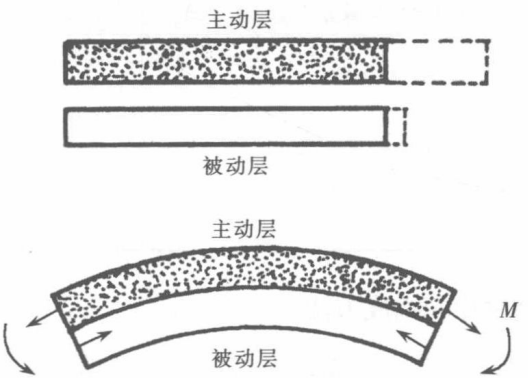


图 7-1　热双金属片弯曲原理示意图

第二节　热金属材料的类型与构成方法

一、热双金属片的类型、特点和应用

热双金属片的类型、特点和应用见表 7－1。

表 7－1　热双金属片的类型、特点和应用

类　型	特　　点	应　　用
高灵敏型	具有高的热敏性和电阻率，较低的弹性模量和允许应力，较差的抗腐蚀性能	可用于温度指示和温度控制，适用于小型电器和仪器仪表
通用型	具有一般的热敏性，5J1480 的主动层含铬，5J1580 的主动层含锰，5J1412 的主动层是黄铜，电阻率较低但导热率较高	可用于温度指示，温度补偿和温度控制，适用于低压电器、家用电器和仪器仪表
低温型	在低温具有较高的热敏性	适用于低温范围的仪器仪表，如温度计和气象仪器
高温型	线性温度范围可达 350～400 ℃，高温下有较高的强度和抗氧化性	适用于高温状态下工作的仪器仪表，如 400 ℃以下的温度计
特殊型	热敏性和电阻率较低，在 300 ℃以上停止弯曲，可避免在高温下产生过大应变	适用于特殊环境下的电器和仪器
耐腐蚀型	具有一定的耐腐蚀性	适用于腐蚀介质中的仪器仪表
电阻型	热敏性基本一致，电阻率 6～140 μΩ·cm，牌号中注有 A 的主动层为铁镍锰合金，注有 B 的主动层为铁镍铬合金	适用于各种电流挡的低压电器，以使产品达到同一性

二、热双金属片的构成方法

主动层与被动层的结合工艺方法，是热双金属制造的关键。其结合工艺目前采用较普遍的是热轧法、爆炸法、熔融法。国际上以冷轧法较普遍，热双金属片结合层的结合方法及特点见表 7－2。

采用爆炸法、熔融法、热轧法生产的热双金属片质量轻（单件尺寸短），但产品性能均匀性差，会造成产品特性不一致，特别是用于三相电器中会造成动作不同步。冷轧法生产的热双金属片是将组合层带材在固相压机上采用大压缩率进行冷轧结合。根据组合层带材长度连续轧合。因而产品质量小、尺寸长、性能均匀、

结合层尺寸精确厚度均匀、复层质量高、热扩散小、复层纯度高及生产效率高。

目前国内一些热双金属片生产单位先后自制或引进了固相轧机改进产品生产工艺方法，使热双金属片的质量得到进一步提高。

表 7-2　热双金属片结合层的结合方法及特点

结合工艺	特　点
热轧法	将两层组合材料结合面合在一起，沿结合面四周进行电焊焊接封闭，进行加热轧制，使两层材料压结在一起。用此法其主动层与被动层的厚度比应控制适当
爆炸法	利用炸药爆炸所产生的冲击力将两层金属压结在一起，此法虽简便，但不能在厂房内进行，应在野外安全地带进行，其生产率较低、材料单重小
熔融法（液相结合）	是将低熔点材料放在高熔点的金属上，通过加热使低熔点金属或合金在接近熔融状态下相互焊合。此法或称之为液相结合
冷轧法（固相结合）	将主动层及被动层带材，连续地在冷轧机上用大压缩率进行轧合，此法制成的产品主动、被动、中间各层厚薄均匀、结合平整、尺寸精确、生产率高

第三节　热双金属片组合材料

热双金属片组合材料为主动层与被动层两层，在电阻型产品中，加有中间层即其由三层材料组成，有些耐腐蚀型产品在主动与被动层外各附加防腐蚀复层形成四层材料。

常用热双金属片的品种、性能及组合材料见表 7-3。

表 7-3　常用热双金属片的品种、性能及组合材料

牌　号	组合层材料			比弯曲 $(20^{+5}_{0}\sim 130^{0}_{-5}℃)$ $(\times10^{-6}℃^{-1})$	电阻率 (20±5 ℃) (μΩ·cm)	弹性模量 (MPa, 不小于)	线性温度范围 (℃)	允许使用温度范围 (℃)	允许应力 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	维氏硬度		比热容[J/(kg·K)]	密度 (g/cm^3)	推荐热处理温度和时间	类型
	主动层	中间层	被动层								主动层	被动层				
5J20110	Mn75Ni15Cu10		Ni36	20.8	113	113 000	−20～150	−70～200	135	675～765	190～240	200～255	500	7.7	260～280 ℃ 1～2 h	高灵敏型
5J1480	Ni22Cr3		Ni36	14.3	80.0	147 000	−20～180	−70～350	180	720～810	270～340	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	通用型
5J1580	Ni20Mn6		Ni36	15.0	80.0	147 000	−20～180	−70～350	180	675～765	235～295	200～255	500	8.1	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1413	Cu62Zn38		Ni36	14.6	13.0	98 000	−20～180	−70～250	90	585～675	165～210	200～255	500	8.3	180～200 ℃ 1～2 h	
5J1380	Ni19Mn7		Ni34	13.8	80.0	147 000	−50～100	−70～350	180	675～765	255～320	200～255	500	8.1	300～320 ℃ 1～2 h	低温型
5J1070	Ni19Cr11		Ni42	10.8	70.0	152 000	+20～350	−70～500	180	720～810	270～340	200～255	500	8.0	380～400 ℃ 1～2 h	高温型
5J0756	Ni22Cr3		Ni50	7.8	56.0	152 000	0～400	−70～500	180	765～855	270～340	210～265	500	8.2	400～420 ℃ 1～2 h	
5J1017	Ni		Ni36	10.0	17.0	152 000	−20～180	−70～400	135	540～630	185～235	200～255	500	8.4	300～320 ℃ 1～2 h	特殊型
5J1075	Ni16Cr11		Ni20-Co26Cr8	10.8	75.0	166 000	−20～200	−70～550	180		370～420	300～330	500	8.0	400～420 ℃ 1～2 h	耐腐蚀型

续表

牌　号	组合层材料			比弯曲 $(20^{+5}_{0}\sim 130^{-0}_{-5}℃)$ $(\times10^{-6}℃^{-1})$	电阻率 (20±5 ℃) (μΩ·cm)	弹性模量 (MPa, 不小于)	线性温度范围 (℃)	允许使用温度范围 (℃)	允许应力 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	维氏硬度		比热容[J/(kg·K)]	密度 (g/cm^3)	推荐热处理温度和时间	类型
	主动层	中间层	被动层								主动层	被动层				
5J1306A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	13.8	6.00	122 000	−20～150	−70～200	135	495～765	235～295	200～255	500	8.3	250～270 ℃ 1～2 h	电阻型
5J1306B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	13.5	6.00	122 000	−20～150	−70～200	135	495～765	270～340	200～255	500	8.3	250～270 ℃ 1～2 h	
5J1411A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	14.9	11.0	122 000	−20～150	−70～200	135	495～765	235～295	200～255	500	8.2	250～270 ℃ 1～2 h	
5J1411B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	14.2	11.0	122 000	−20～150	−70～200	135	495～765	270～340	200～255	500	8.2	250～270 ℃ 1～2 h	
5J1417A	Ni20Mn6	Cu	Ni36	14.9	17.0	122 000	−20～150	−70～200	135	495～765	235～295	200～255	500	8.2	250～270 ℃ 1～2 h	
5J1417B	Ni22Cr3	Cu	Ni36	14.2	17.0	122 000	−20～150	−70～200	135	495～765	270～340	200～255	500	8.2	250～270 ℃ 1～2 h	
5J1320A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	13.3	20.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	235～295	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1320B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	13.0	20.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	270～340	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1325A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	13.9	25.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	235～295	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1325B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	13.5	25.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	270～340	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1430A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	14.8	30.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	235～290	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	

续表

牌号	组合层材料			比弯曲 $(20^{+5}_{0}\sim 130^{-0}_{-5}℃)$ $(\times10^{-6}℃^{-1})$	电阻率 (20±5 ℃) (μΩ·cm)	弹性模量 (MPa, 不小于)	线性温度范围 (℃)	允许使用温度范围 (℃)	允许应力 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	维氏硬度		比热容[J/(kg·K)]	密度 (g/cm^3)	推荐热处理温度和时间	类型
	主动层	中间层	被动层								主动层	被动层				
5J1430B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	14.0	30.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	270～340	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	电阻型
5J1435A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	14.8	35.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	235～295	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1435B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	14.0	35.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	270～340	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1440A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	14.8	40.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	235～295	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1440B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	14.0	40.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	270～340	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1455A	Ni20Mn6	Ni	Ni36	14.9	55.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	235～295	200～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J1455B	Ni22Cr3	Ni	Ni36	14.1	55.0	152 000	−20～150	−70～200	180	495～765	270～340	270～255	500	8.2	300～320 ℃ 1～2 h	
5J15120	Mn75Ni15 Cu10		Ni45Cr6	15.3	125	122 000	−20～200	−70～250	135	—	190～240	215～270	500	7.6	260～280 ℃ 1～2 h	
5J14140	Mn75Ni15 Cu10		Ni36	14.5	140	113 000	−20～150	−70～200	135	540～720	190～240	200～255	500	7.5	260～280 ℃ 1～2h	

第四节　常用热双金属片

热双金属片的结构简单牢固，动作可靠，广泛应用于电工、电子、电信和交通运输、农业等方面的自动控制仪器和测量仪表中。热双金属片常用品种的尺寸规格见表 7－4；其特点及应用见表 7－1。

7－4　热双金属片常用品种的尺寸规格

厚度(mm)		宽度(mm)		长　度
规　格	允许偏差	规　格	允许偏差	
≤0.15	−0.015	20～80	±0.5	成卷供应
0.15～0.25	−0.02	20～80		
0.25～0.5	−0.03	20～100		
0.5～0.75	−0.04	20～120	±1.0	直条供应，长度为 0.5～1.5 m。也可成卷供应
0.75～1.0	−0.05	20～120		
1.0～1.3	−0.06	20～120	±1.0	直条供应，长度为 0.5～1.5 m
1.3～1.6	−0.07	20～120		
1.6～2.0	−0.08	20～120		
2.0～3.0	−0.10	20～120		

注：1. 以冷轧状态供应。

2. 宽度一般以 5 mm 为进级单位。

1. 电阻型热双金属片

电阻型热双金属片是由一层用高导电金属或合金制成的附加层与热双金属组元牢固地结合在一起的制品。附加层夹在热双金属组合层之间，或覆盖在热双金属片表面；改变附加层的厚度比，就可以调整制品要求的电阻率。用这种热双金属片作电气保护装置的敏感元件，在同一外形、尺寸的保护装置中，只要更换不同电阻率的敏感元件，便能作多种不同容量的过载保护。电阻型热双金属片的主要性能见表 7－5。

2. 高温型热双金属片

高温型热双金属片的线性温度范围较宽，在高温下有良好的抗氧化性能，为了避免过高的热应力，它的比弯曲值较低，适用于 300 ℃以上环境温度中使用，最高的工作温度可达 650 ℃。高温型热双金属片的主要性能见表 7－6。

3. 耐腐蚀型热双金属片

耐腐蚀型热双金属片按其耐腐蚀的措施一般分组元合金耐腐蚀型、防腐蚀覆盖型和表面处理型三类，适合于恶劣环境或特定的腐蚀介质（如在冷水、热水、蒸气、高湿度空气、海洋性热带气候或某些工业气氛）中使用。耐腐蚀型双热金属片

的主要性能及特点见表 7－7。

表 7－5　电阻型热双金属片的主要性能

类　型	电阻率 ρ(20 ℃) ($\Omega \cdot mm^2/m$)	比弯曲 K (10^{-6}/℃)	弹性模量 E (N/mm^2)
R161	1.621	8.6	
R141	1.410	13.3	134 000
R112	1.120	19.3	140 000
R90	0.930	13.0	169 000
R80	0.786	13.5	177 000
R70	0.656	13.5	177 000
R60	0.582	13.1	172 000
R50	0.499	13.0	172 000
R40	0.430	13.3	177 000
R33	0.332	13.1	177 000
R25	0.250	13.1	177 000
R20	0.206	13.0	177 000
R16①	0.160	13.5	160 000
R15	0.148	13.1	177 000
R11	0.119	13.1	177 000
R8	0.083	13.0	177 000
R5	0.051	13.3	124 000
R3	0.036	11.7	190 000

表 7－6　高温型热双金属片的主要性能

组合层材料		比弯曲 K (10^{-6}/℃)	电阻率 ρ(20 ℃) ($\Omega \cdot mm^2/m$)	弹性模量 E (N/mm^2)	线性温度 范围上限(℃)
主动层	被动层				
Ni19Cr11	Ni42	10.6	0.70	≥170 000	≈+300
Ni20Mn6	Ni42	12.4	0.65	≥160 000	≈+310
3Ni24Cr2	Ni50	7.5	0.57	≥170 000	≈+400
Ni20Mn6	Ni29Co18	12.0	0.56	≥140 000	≈+450
Ni20Mn6	Ni50	9.0	0.69	≥160 000	≈+500
Ni46Cr22	Cr22	3.5	0.85	195 000	≈+650

表 7-7　耐腐蚀型热双金属片的主要性能及特点

组合层材料				比弯曲 K (10^{-6}/℃)	电阻率 ρ (20 ℃) (Ω·mm²/m)	弹性模量 E (N/mm²)	特　点
覆盖层	主动层	被动层	覆盖层				
	Ni10Cr-12Mn16 1Cr18Ni9Ti	Ni36CuTa-NbMo Ni20Cr8Co25		12.0 7.5	0.88 0.78	170 000 ≥160 000	以耐腐蚀型合金作组合层，热敏感性能较低
1Cr18-Ni9Ti 1Cr18-Ni9Ti	Mn75-Ni15Cu10 Ni20Mn6	Ni36Nb Ni36	0Cr13	15.0 11.5	1.10 0.08	≥130 000 ≥160 000	以耐腐蚀金属或合金作覆盖层，有较高热敏感性能，但切边处仍易锈蚀
	3Ni24Cr2	Ni36		15.0	0.80	≥160 000	通过一定的表面处理，以提高耐腐蚀能力，可保持材料原有性能

第五节　特殊型热双金属片

特殊型热双金属片是根据某些特殊要求所制造的具有相应的特殊性能的制品。

1. 磁致热双金属片

它是由 Ni22Cr3Fe、Ni36Fe、纯 Ni(具有高的负磁致伸缩系数)和 Ni50Fe(具有正磁致伸缩系数)四种金属所组成，必要时在 Ni50Fe 与 Ni 之间还加入 Cu 分流层。这种热双金属片既有热敏感性能，又对磁场产生反应，它在过载电流感应所产生的磁场作用下将发生磁弯曲，并与由热引起的热弯曲叠加在一起，能使断路器更快地断开；而磁弯曲比热弯曲发生得更快，可用来克服动作机构的静摩擦阻力，提高断路器动作的灵敏度。

2. 无磁热双金属片

它磁化率小、感温灵敏度高。

3. 高强度热双金属片

它的抗张强度在室温下可达 1 400 N/mm²。

4. 中子敏感热双金属片

它具有对中子敏感性能，用于核反应堆内作控制和保护装置的元件。

5. 高温敏感热双金属片

它具有在10～150 ℃感温性能很低、而在150 ℃以上感温性能高及电阻率较低等性能。

6. 低热敏双金属片

它具有热敏感性能和电阻率较低、在300 ℃以上温度时停止弯曲的性能，可避免在高温下产生过大应变。

第六节　热双金属的牌号含义、尺寸规格及质量要求

一、热双金属片牌号、代号含义

国家标准规定牌号含义由两部分组成：第一部分为5J，表示热双金属（其中J表示精密合金类别）；第二部分为数字，其前两位数字表示比弯曲公称值整数乘以10^{-6}，从第三位数字起表示电阻率公称值。

以牌号5J1480举例说明，其中5J表示热双金属片；前两位数字14表示该牌号热双金属片的比弯曲值为$14\times10^{-6}/℃$；后面的数字80表示该牌号热双金属片其电阻值为80 $\mu\Omega\cdot$ cm。

二、热双金属片产品的标记

标记示例：

(1) 厚度为1.2 mm、宽度为120 mm、定尺长度为1 000 mm的5J1480热双金属片带材，其标记为：5J1480—1.2×120×1 000。

(2) 厚度为0.5 mm、宽度为100 mm成卷的5J1480的热双金属片带材，其标记为：5J1480—0.5—100。

三、热双金属尺寸规格及允许偏差

热双金属片带材可成卷或以直条供货，常用热金属产品的尺寸规格及允许偏差见表7-8。

表7-8　常用热金属产品的尺寸规格及允许偏差

厚　度(mm)		宽　度(mm)		长　度(mm)	
尺寸	允许偏差	尺寸	允许偏差	尺寸	允许偏差
0.10～0.25	±0.010	≥50	+2 0	≥500	+10 0
>0.25～0.50	±0.015				
>0.50～0.75	±0.020			≥350	+10 0
>0.75～1.50	±0.030				
>1.50～3.00	±0.050				

四、热双金属的外形质量和性能质量要求

1. 热双金属片外形质量要求

对热双金属片外形质量要求如下：

(1) 热双金属带的组元层应结合良好，不得有分层，厚度比应均匀一致，边缘不得有毛刺和裂口。

(2) 热双金属带材不得有严重扭曲。

(3) 尺寸偏差应符合表 7－8 的规定。

2. 热双金属性能质量要求

对热双金属元件性能质量要求如下：

(1) 化学成分在保证热双金属带材性能合格条件下，组合层化学成分可不作考核依据。

(2) 热双金属带除了比弯曲、电阻率、弹性模量、扭转、反复弯曲等项性能应符合国家标准规定外，可根据供需双方协议，其中比弯曲也可由弯曲系数或温曲系数代替。

第七节　热双金属片的热处理及选用

一、热双金属元件的稳定化热处理

在热双金属片的生产以及元件的制作与装配过程中，各道加工工序都会在元件中产生残余应力。为了使元件能长期工作稳定，必须对其进行热处理，减少和再分配这些应力，以保持元件的稳定性和均匀性，否则，随着温度升高或时间消逝将产生性能变化。

热双金属元件可在空气或惰性气体的炉中进行热处理。在热处理过程中，元件必须能自由弯曲。假如元件在装配之后，在操作或加工过程中，其经受的温度较热处理温度高，则可把它们置于高于其最高工作温度 50 ℃的环境中进行处理，但在十分高的温度下，必须考虑由于材料软化而使强度降低的问题。

对动作频繁、精度高的热双金属元件，为使其所受应力均匀，宁可增多热处理次数，也不宜采用高的热处理温度，一般进行 2～3 次。若在处理过程中发生元件的稍微变形而需要进行调整，则在其后需进一步热处理。另外，保温时间也不宜长。

对于经常工作在 0 ℃以下的热双金属元件，应增加热处理工序，以提高元件在低温下工作的稳定性。

热处理时，温度升降不宜过快。在处理炉中，元件应留足够空隙，使在受热弯曲时互不相碰。

二、热双金属元件的选用和热双金属成形零件的采用

1. 热双金属元件的选用

为了使热双金属元件执行某一种特定的动作，需考虑下列诸因素，以选用合适的品种：

(1) 热双金属元件的热敏性。热双金属元件的热敏性即指温度变化时其材料的弯曲性能，目前标志其热敏性的主要有温曲率、比曲率、弯曲系数和敏感系数。

(2) 热双金属元件的电阻率和电阻的温度系数。以热传导方式间接加热的元件，应选用导热性能好的材料，也可在元件上附加铜层。若靠辐射传递热量，则选用的材料表面最好是暗黑色的。

(3) 常用工作温度范围和最高工作温度。热双金属元件的常用工作温度范围，应在其材料的线性温度范围内。这时热双金属元件具有恒定的和最大的灵敏度，超出此范围其灵敏度随温度增高而降低。在热双金属元件要超出线性范围时，则应控制其工作温度在允许使用范围内即不超过最高工作温度。

(4) 强度。对于承受较大弯曲应力和重负荷的场合，应选用强度较高的热双金属元件，但对于需弯曲成形的元件，不宜选用过硬的材料。

(5) 特殊要求。在特殊环境下，应对元件表面采取防护措施。如在较恶劣的环境中，应采用耐腐蚀性热双金属元件；在低温环境中可用油漆或塑料涂层；在高温环境中的元件表面可电镀 Ni、Cu、Sn 等。

(6) 经济性。热双金属元件常规品种一般是面对面地全面结合的，但为了提供彩色电视显像管阴极罩支座用材料而新近发展了边对边结合的横向结合热双金属元件，在选用时要特别注意。

2. 热双金属成型零件的采用

热双金属元件的成型是一项技术性较强的工艺设计和制造的过程，对热双金属元件形状的确定及挠度、机械作用力、热作用力的计算都需认真考虑。对材料加工过程中及元件完成后还需考虑稳定化热处理。对非专业单位需用热双金属元件时，可直接购买成型热双金属成型零件。

根据所需作用方式，可采用如下的成型零件：

(1) 平直式 U 形热双金属，用于或多或少的直线运动。

(2) 双金属圆盘，作用力大时仅作微小而精确的直线运动。

(3) 平螺旋与直螺旋形，用于旋转式运动。

(4) 各种形状的成型冲制作，用于特殊用途。

如果环境温度变化剧烈，导致热双金属操作仪器的功能误差不能忽略不计时，常应考虑环境温度补偿装置。一部分这种补偿可适当地由反向热双金属制成的成形件来完成。

第八章　弹性合金材料

弹性是指金属在外力作用下产生变形、当外力取消后又恢复到原来形状和大小的一种特性。弹性合金具有良好的弹性性能；同时还具有一定的导电性、无磁性或一定的导磁性，以及耐热、耐腐蚀、耐磨和高硬度等性能。弹性合金主要用于制造仪器、仪表中的弹性元件：如游丝、张丝、悬丝、簧片、膜片等。弹性元件的质量优劣，关系着仪器仪表的精度、稳定性和使用寿命。

常用弹性材料的类别与品种见表 8－1。

表 8－1　常用弹性合金材料的类别与品种

类　别	品　　种
高弹性合金材料	3J1、3J2、3J3 NiBe2、NiBe2Ti、NiBe2Co3W6、NiBe2Co3W8 3J21、3J22、3J24、YC-11 Cr17Ni7Al、Cr15Ni7Mo2Al、0Cr14Ni8Mo2Al、Cr12Mn5Ni4Mo3Al
高温高弹性合金材料	NiCr19W10CobTiAl，NiCr15Nb9Mo3Al，NiCr15Nb9Mo3W2Al，NiCr15Ti3AlNb、Cr15Ni26Ti2Mo、NiCr10Co13Mo4W6Ti
恒弹性合金	3J53，Ni42CrTi，YC-12，3J58，Ni45CrTi，Ni39Mo8Ti，Ni39Mo5，NbTi39A15，NbMo3Zr2，5Cr2Ti2
耐腐蚀弹性合金材料	0Cr20Ni65Ti2AlNb，NiCr47Mo3，Ni40Cr17Mo5Cu3，Ti31Cr18Ni9Ti，2Cr19Ni9Mo，1Cr18Ni12Mo2Ti，00Cr26Ni35Mo3Cu4Ti，0Cr17Ni17Mo7Cu2，00Cr16Ni75Mo2Ti，00Cr16Ni60Mo17W4，0Ni65Mo28Fe5V，NiCu28-2.5-15
铜基弹性合金	QBe2，QBe1.9，QBe1.7，QTi3.5，QTi6-1 QSn6.5-0.1，QSn6.5-0.4，QSn4-3，QSi3-1，BZn15-20

第一节　弹性合金的基本知识

表征弹性合金基本性能的有弹性极限、弹性模量、切变模量、弹性模量温度关系数，弹性后效及疲劳极限等。

1. 弹性极限（σ_e）

弹性材料在保持弹性变形的前提下可能承受的最大应力，称为弹性极限，用 σ_e 表示。弹性极限越高，材料性能越好。

2. 弹性模量(E)

弹性材料受到拉伸或压力作用时，在弹性变形范围内，应力 σ 与应变 ε 的比值 E 称为弹性模量，即 $E=\sigma/\varepsilon$。弹性模量越大，材料刚度越大，在一定应力作用下发生应变越小。

3. 切变模量(G)

弹性材料受到扭转作用力时，在弹性范围内，剪切应力 τ 与切应变 γ 的比值 G 称为切变模量，即 $G=\tau/\gamma$。切变模量也是衡量材料刚度的指标，其值越大，在一定应力作用下，发生变形越小。

4. 弹性模量或切变模量的温度系数(β_E)

在一定温度范围内，弹性模量或切变模量随温度变化的相对变化率 β_E 称为弹性模量温度系数或切变模量的温度系数。即

$$\beta_E=\frac{E_2-E_1}{E_1}\cdot\frac{1}{t_2-t_1}(1\times10^{-6}/℃)$$

这一温度系数越小，则弹性元件的温度误差就越小。

5. 弹性后效

弹性材料在受到低于弹性极限的恒定应力作用时，首先产生一符合虎克定律的弹性应变 ε_e；然后随着应力作用时间的延长，应变逐渐增大，但其应变速度逐渐减慢，直至达到平衡应变值；通常把应力作用 10 分钟后缓慢增加的那一部分应变值 $\Delta\varepsilon_{10}$ 称为残余应变值，$\Delta\varepsilon_{10}/\varepsilon_e$ 的比值称为弹性后效值 H_{10}。弹性后效越小，则仪器、仪表的精度越高。

6. 疲劳极限

弹性材料在重复或交变应力(拉伸和压缩)作用下，在规定的周期基数($1\sim10\times10^7$)内不产生裂断时所承受的最大应力。疲劳极限越高，性能越好，它直接关系到其性能的稳定性和使用寿命。

第二节　高弹性合金材料

高弹性合金具有较高的弹性极限和弹性模量，弹性后效较低，并有较好的不锈性和一定的耐酸碱腐蚀等性能，但导电性能差。大部分高弹性合金呈弱磁性，有些可在高温下使用。这类合金有铁镍铬基、镍铍基和钴铬镍钼基等。

1. 铁镍铬基高弹性合金

这类合金在淬火状态下有良好的塑性，时效硬化后获得高弹性、低弹性后效等良好的综合性能；冷变形后进行时效处理，弹性更高，但塑性较差；在软态下，点焊、缝焊、氢弧焊及电子束焊性能均好，在时效处理后，点焊与缝焊性能较差；如要进行低温锡铅焊接，应在合金表面镀镍后进行。合金具有耐磁性，耐酸碱腐蚀性能也较好。

2. 镍铍基高弹性合金

这类合金在淬火状态下有良好的塑性，时效处理后获得高导电性、高弹性、高强度、高的抗疲劳和耐腐蚀性能；它具有磁性。由于它具有较高的导电性能，故又称高导电高弹性合金。

3. 钴铬镍钼基高弹性合金

这类合金具有优良的耐热性和耐腐蚀性；淬火后需通过大的冷加工变形后再进行时效处理，方能获得高的弹性性能和硬度。

高弹性合金材料的化学成分及物理性能见表 8－2，高弹性合金热处理规范及机械性能见表 8－3。

表 8－2　高弹性合金材料的化学成分及物理性能

合金材料		最高工作温度（℃）	线膨胀系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	密度 γ（g/cm³）	电阻率 ρ（$\mu\Omega\cdot$m）	主要特点与用途
铁镍铬基	3J1（Ni36，Cr12，Ti3，Al1，Fe余量）	200	12～14	7.9	0.9～1.0	耐腐蚀性、工艺性较好，具有弱磁耐腐蚀，时效处理后可获得高的弹性和强度。用于膜片、膜盒、波纹管、弹簧等
	3J2（Ni36，Cr12，Ti3，Al1，Mo5，Fe余量）					耐热性较高。从室温至300℃，强度下降不超过4%。余同3J1
	3J3（Ni36，Cr12，Ti3，Al1，Mo8，Fe余量）					耐热性更高。从室温至500℃，强度下降不超过11%。余同3J1

续表

合金材料		最高工作温度（℃）	线膨胀系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	密度 γ（g/cm³）	电阻率 ρ（μΩ·m）	主要特点与用途
镍铍基	NiBe2(Be2，Ni 余量)	250	13.5（硬时效）	8.1	0.35(软) 0.10(硬时效)	室温及高温弹性均优于 3J1。从室温至 200 ℃，弹性极限值从 1 185 N/mm² 下降至 1 010 N/mm²。用于微动开关接触簧片，高温下使用的特殊弹簧等
	NiBe2Ti（Be2，Ti0.5，Ni 余量）	250	14.5	8.84		在 NiBe2 合金中加入钛，抗疲劳和耐腐蚀性较好，用途同 NiBe2
	NiBe2Co3W6（Be1.7，Co3，W6，Ni 余量）	400			0.35	耐热性优于 NiBe2，电阻温度系数较低，用途同 NiBe2
	NiBe2Co3W8（Be1.7，CO3，W8，Ni 余量）	450			0.52	耐热性更高，用途同 NiBe2
钴铬镍钼基	3J21（Co40，Ni15，Cr20，Mo7，Mn2，C<0.12，Fe 余量）	400	13～16	8.3	0.9～1.0	弹性高。耐腐蚀、无磁，具有高弹性、高强度和良好的耐疲劳性能。用于 400 ℃以下的航空仪表用弹簧，精密机械的轴尖、平膜片、发条、游丝等
	3J22(Co40，Ni15，Cr20，Mo3.5，W4，Mn2，C<0.12，Fe 余量）	450	14～16	8.5	0.9～1.0	冷热加工性能比 3J21 有所改善。有较高的加工时效强化效果。用途同上

续表

合金材料		最高工作温度（℃）	线膨胀系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	密度 γ（g/cm³）	电阻率 ρ（$\mu\Omega\cdot$m）	主要特点与用途
钴铬镍钼基	3J24（Co40，Ni19，Cr12，Mo3.5，Ti2，Mn2，Al0.5，C<0.12 Fe余量）	400	14.0	8.5	1.0～1.1	具有很高的冷变形能力。时效后组织是γ固溶体。此外，软态时效也有一定强化效果。用于形状较复杂的弹性元件
	YC-11（Co42，Cr17，W10，Mo4，Mn2，C<0.08，Ni余量）	400		8.7	0.9～1.1	耐腐蚀、高硬度、耐磨、抗冲击。丝材淬火后经92%冷变形，塑性优于3J22，弯折90°不断，便于校直下料。时效温度范围宽。用于航空与电测仪表轴尖及其他弹性元件
沉淀硬化不锈钢	0Cr17Ni7Al（Cr17，Ni7，Al1，C≤0.09，Fe余量）	400	（20～320 ℃） 17.5* 11.8** 10.9*** 12.0****	7.65～7.67	0.84～0.87	对氧化性腐蚀介质有良好的耐蚀性。可焊接，高温性能好。用于弹簧及结构件
	0Cr15Ni7Mo2Al（Cr15，Ni7，Mo2，Al1，C≤0.09，Fe余量）	430	（20～320 ℃） 15.3* 10.1** 11.0***	7.68～7.80	0.80～0.82	淬火后塑性优于3J1，易加工成深波纹膜片。时效处理后，弹性性能好，具有特别高的蠕变强度，在425 ℃为0Cr17Ni7Al的三倍。冷处理后时效变形很小。用于膜片、弹簧等

续表

合金材料		最高工作温度(℃)	线膨胀系数 α ($\times10^{-6}$/℃)	密度 γ (g/cm^3)	电阻率 ρ ($\mu\Omega\cdot$m)	主要特点与用途
沉淀硬化不锈钢	0Cr14Ni8Mo2Al (Cr14，Ni8，Mo2，Al1，Co0.5，Fe余量)	425		7.68～7.95		性能与上相似，但由于含碳量较低，抗晶界腐蚀能力和韧性较高。在400℃左右，有较高的高温稳定性。用途同上
	Cr12Mn5Ni4MO$_3$Al (Cr12，Mn5，Ni4，Mo3，Al1，C≤0.09，Fe余量)		(20～100℃) 16.21 (固溶处理) 13.74 (时效)	7.71～7.80	0.797	与Cr15Ni7Mo2Al相比，降低铬、镍含量，并提高了马氏体转变点Ms温度。固溶处理后不必进行中温调节，直接冷处理及时效，可获得良好的综合力学性能。也可在固溶处理后经不同变形量冷加工及时效处理获得很高的强度。用于弹簧等

* 固溶处理。** 高温调节。*** 中温调节。**** 冷加工变形。

表8-3 高弹性合金热处理规范及机械性能

合金名称		推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 b (N/mm^2)	伸长率 δ (%)	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ (N/mm^2)	弹性极限 σ_s (N/mm^2)	弹性模量 E (N/mm^2)	弹性模量温度系数 β_E ($\times10^{-6}$/℃)	硬度 HV
铁镍铬基	3J1	软化：920～980℃水冷 软时效：650～720℃，2～4 h 硬时效：600～650℃，2～4 h	735～784 >1 176 >1 372	35～40 >8 >5	245～392 833～1 078 1 274	784 * 882 *	171 500～210 700 176 400～215 600	100	150～180 340～360 360
	3J2	软化：980～1 000℃水冷 软时效：750℃，2～4 h 硬时效：700℃，2～4 h	833～882 1 225～1 372 1 372	30～35 8～10 5	490～588 882～1 078 1 274	833	186 200	100	200～215 420～450 450

续表

合金名称		推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 b (N/mm^2)	伸长率 δ (%)	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ (N/mm^2)	弹性极限 σ_s (N/mm^2)	弹性模量 E (N/mm^2)	弹性模量温度系数 β_E ($\times10^{-6}/℃$)	硬度 HV
铁镍铬基	3J3	软化：980～1 050 ℃，水冷 软时效：750 ℃，2～4 h 硬时效：700 ℃，2～4 h	882～931 1 372～1 421 1 372	20～25 6～7 5	588～637 1 078～1 127 1 274	931	205 800	100	200～230 485～495 495
镍铍基	NiBe2	软化：1 020～1 050 ℃ 水冷 软时效：500～520 ℃；2～3 h 硬态：70% 硬时效：480～500 ℃，2～3 h	<833 1 666～1 793 >980 >1 666	>25 3.5～7.5 >3 >3	>441 1 372～1 470 >686 >1 421	882～1 078 >1 176	196 000 >186 200 205 800		<250 500 >285 >550
	NiBe2Ti	软化：1 020～1 050 ℃ 水冷 软时效：500 ℃，2～3 h	1 568		1 372	833	196 000		225 500
	NiBe2Co3W6	软化：1 060 ℃水冷 硬时效：600 ℃，45 min	1 715		1 666	1 607	196 000 ～205 800		165～185 430～560
	NiBe2Co3W8	软化：1 060 ℃水冷 硬时效：600 ℃，45 min	1 715		1 685	1 617	196 000 ～205 800		190～220 540～590
钴铬镍钼基	3J21	软化：1 150～1 180 ℃，水淬硬时效：500～550 ℃，4 h	686～784 2 450～2 646	40～50 3～5	2 254～2 450	1 372～1 568	196 000	200～250	180～200 600～700
	3J22	软化：1 150～1 180 ℃，水淬硬时效：500～550 ℃，4 h	686～735 2 940～3 136	40～50 4～6	2 254～2 744	1 617～1 666	205 800	200～250	180～200 ≥750
	3J24	软化：1 150～1 180 ℃，水淬硬时效：500～550 ℃，4 h	686～784 1 960～2 156	55～60 4～6	343～392 1 764～1 960	>1 176	215 600	200～250	140～160 550～600
	YC-11	软化：1 160～1 180 ℃，水淬 硬态：90%冷加工度 硬时效：550 ℃，4 h	931～1 078 >2 156	≥40 1.5～2.0		≥392 ≥1 078	≥166 600 ≥215 600		≥280 ≥560 ≥804

续表

合金名称		推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 b (N/mm²)	伸长率 δ (%)	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ (N/mm²)	弹性模量 E (N/mm²)	硬度 HV
沉淀硬化不锈钢	0Cr17Ni7Al	固溶处理:1 030～1 050 ℃,空冷	891	35	274		165
		高温调节:同上+950～960 ℃	911	19	284		165
		冷处理:同上+(−73 ℃),8 h	1 205	9	784		348
		时效处理:同上+450～500 ℃,4 h	1 587	7	1 490		470
		中温调节:750～760 ℃	1 000	9	686		295
		时效处理:同上+550～575 ℃,90 min	1 382	6	1 333		460
		50%冷加工变形	1 480	5	1 274		430
		时效处理:同上+480 ℃,20～30 min	1 725	2	1 656	202 370	528
	0Cr15Ni7Mo2Al	固溶处理:1 030～1 050 ℃,空冷	891	30	372		183
		高温调节:同上+950～960 ℃	1 029	12	274		165
		冷处理:同上+(−73 ℃),8 h	1 235	7	862		392
		时效处理:同上+450～500 ℃,4 h	1 656	6	1 480	199 920	510
	0Cr15Ni7Mo2Al	中温调节:750～760 ℃	990	7	657	199 920	270
		时效处理:同上	1 440	7	1 372		460
		+550～575 ℃,90 min	1 509	5	1 303		460
		50%冷加工变形	1 822	2	1 793		540
		时效处理:同上+480 ℃,20～30 min					
	0Cr14Ni18Mo2Al	固溶处理:975～1 000 ℃,空冷	862	25	382		176
		高温调节:同上+925 ℃					
		冷处理:同上+(−73 ℃),8 h					
		时效处理:同上+500 ℃,1 h	1 617	5	1 480		528
	Cr12Mn5Ni4Mo3Al	固溶处理:1 040～1 060 ℃空冷	1 137	24	1 029	185 220	185
		同上+冷处理(−78 ℃)	1 401	16	1 411	189 140	440
		同上+520 ℃±10,1～2 h	1 607	16		198 940	516
		冷变形+520 ℃±10,1～2 h	1 617～2 352			208 740	

* 弯曲弹性极限。

第三节　高温高弹性合金材料

这类合金的工作温度一般在500 ℃左右，耐腐蚀性能良好；作为耐热弹性元件，冷变形不宜超过30%。这类合金有镍铬铌基、铁镍铬基等。其化学成分、物理性能、特点与用途见表8-4，其热处理规范、机械与弹性性能见表8-5。

表8-4　高温高弹性合金材料的化学成分及物理性能

合金材料	最高工作温度（℃）	线膨胀系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	密度 γ（g/cm^3）	电阻率 ρ（$\mu\Omega\cdot$m）	主要特点与用途
NiCr19W10Co6TiAl（Cr19、W10、Co6、Ti3、Al1.5、C0.05、Ni余量）	500				无磁性。500 ℃以下的塑性、弹性及强度均优于3J1、3J2、3J3。在热带气候及腐蚀介质中的稳定性良好。用于弹性敏感元件如膜片以及弹簧等
NiCr15Nb9Mo3Al（Cr15、Nb9、No3、Al1、C0.06、Ni余量）	550	13.5	8.5	1.4	无磁性。固溶处理后塑性优于3J21。在500～550 ℃有高的抗松弛性能。在20～50 ℃的浓硝酸中耐腐蚀性极好。用途同上
NiCr15Nb9Mo3W2Al（Cr15、Nb9、Mo3、W2、Al1、C0.06、Ni余量）	550		8.5	1.38	无磁性。时效处理后合金组织为[(Ni，Cr)$_3$(Nb，W，Mo，Al)]强化相。抗松弛性能更高，在550 ℃、200 h应力下降14%。焊接性能良好。用途同上
NiCr15Ti3AlNb（Cr15、Ti3、Al1、Nb1、C0.06、Ni余量）	500	16.5			在室温时弹性和强度低于3J1，但500 ℃时具有较好的抗松弛性能。700 ℃时具有较高的屈服极限稳定性，用于载荷不高（392 N/mm^{2}以下）但在受热条件下工作的弹性元件，如彩色电视显像管的聚焦栅等

续表

合金材料	最高工作温度（℃）	线膨胀系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	密度 γ（g/cm^3）	电阻率 ρ（$\mu\Omega\cdot$m）	主要特点与用途
Cr15Ni26Ti2Mo（Cr15、Ni26、Ti2、Mo1、Fe余量）	500	16.9	8.0	0.90	固溶状态下的塑性良好。时效处理后的弹性与3J1相当。高低温机械性能良好。20%盐雾中有优良耐蚀性，用于高温弹性元件及结构部件
NiCr10Co13Mo4W6Ti（Cr10、Co13、Mo4、W6、Ti1、A10.7、Nb1.5、C0.04、Ni余量）	600				在固溶状态下的塑性良好。可进行冲压、弯曲及缠绕等加工，在600 ℃高温下具有较好的弹性及抗松弛性能，用于彩色电视显像管的支撑弹簧片、自动化仪表调压阀门弹簧、发电机油门弹簧片

表 8-5　高温高弹性合金材料的热处理规范及机械性能

合金名称	推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 σ_b（N/mm^2）	伸长率 δ（%）	屈服极限 $\sigma_{0.2}$（N/mm^2）	弹性极限 σ_s（N/mm^2）	弹性模量 E（N/mm^2）	弹性模量温度系数 β_E（$\times10^{-6}$/℃）	硬度 HV
NiCr19W10Co6TiAl	软化：1 160 ℃，水淬	784	35	441				205～215
	软时效：800 ℃，4 h 1 h+700 ℃，2 h	1 274	11	1 078	833	200 900		528
		1225（500 ℃）	7（500 ℃）	1 029（500 ℃）	784（500 ℃）	166 600（500 ℃）		
	30%硬时效：800 ℃，1 h+700 ℃，2 h	1 519	4	1 372	1 127	210 700		594
		1 372（500 ℃）	3（500 ℃）	1 225（500 ℃）	1 029（500 ℃）	176 400（500 ℃）		
NiCr15Nb9Mo3Al	软化：1 100～1 150 ℃，水淬	568～666	35～40	412～490				200～215
	软时效：750 ℃，5 h	1 421 1 352（500 ℃）	15 13（500 ℃）	1 274	980 490（500 ℃）	210 700 186 200（500 ℃）	200～300	460～500
	25%硬时效：700 ℃，5 h	1 813	5	1 744		210 700		

续表

合金名称	推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 σ_b (N/mm²)	伸长率 δ (%)	屈服极限 $\sigma_{0.2}$ (N/mm²)	弹性极限 σ_s (N/mm²)	弹性模量 E (N/mm²)	弹性模量温度系数 β_E ($\times10^{-6}$/℃)	硬度 HV
NiCr15Nb9Mo3W2Al	软化：1 150～1 170 ℃，水淬 软时效：750 ℃，5 h	754～980 1 470～1 666	30～40 10～12	441～539 1 225～1 421	1 078～1 176	205 800		210 510
NiCr15Ti3AlNb	软化：1 000～1 050 ℃，水淬 软时效：750 ℃，4 h	764～882 1 225 1 078 (500 ℃)	40～45 28 26 (500 ℃)	294～441 823 784 (500 ℃)	617	213 640		145 320
Cr15Ni26Ti2Mo	软化：1 050～1 080 ℃，水淬 硬态：60%冷加工度 硬时效：600～650 ℃，2～5 h	833 1 029～1 078 1 421～1 519 1 196 (500 ℃)	30 2 2.5～3.0 3～4 (500 ℃)			191 100 163 660 (500 ℃)		120 370～375 440～550
NiCr10Co13Mo4W6Ti	50%硬时效：650～700 ℃，2～4 h	1 176～1 327	≥3 (600 ℃)			176 400 ～181 300 (600 ℃)	200～280 (600 ℃)	≥450

第四节　恒弹性合金

这类合金淬火后塑性良好，易于加工成型制作各种弹性元件；时效处理后具有较高的弹性；但它对磁场敏感，使用温度范围较窄；且对化学成分、热处理参数的变化都较敏感，在使用时要正确选用时效温度。这类合金大部分是时效硬化型铁磁性铁镍基合金。其化学成分、物理性能、特点与用途见表 8－6；其热处理规范、机械与弹性性能见表 8－7。

表 8-6　恒弹性合金材料的化学成分及物理性能

合金材料	工作温度范围（℃）	线膨胀系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	密度 γ（g/cm^3）	电阻率 ρ（$\mu\Omega\cdot$m）	居里点 T（℃）	主要特点与用途
3J53（Ni42，Cr5.5，Ti2.5，C0.05，Fe余量）	−40～80	8.3	8.4	1.0～1.1	115～120	具有低的弹性模量温度系数与频率温度系数，机械品质因数大于9 000。缺点是性能对成分变化较敏感，用于弹性敏感元件如膜片、弹簧管等，以及频率元件如机械滤波器中振子，频率谐振器中音叉、谐振电器中簧片等
Ni40Cr6Ti（Ni42，Cr6.5，Ti2.8，C0.05，Fe余量）	−50～60	8.7	8.1	1.0～1.2	80～90	切变模量温度系数较3J53低，对成分敏感性小，用于螺旋弹簧、延迟线等
YC-12（Ni42，Cr3.5，Ti2，Mo2.5，Cu0.3，C0.05，Fe余量）	20～150	7.0			180～185	频率温度系数≤1×10^{-6}/℃。对热处理敏感性比3J53小，机械品质因素大于10 000，用于频率元件及弹性元件
3J58（Ni43，Cr5.5，Ti2.5，C0.05，Fe余量）	−40～120	8.3		1.0	150～160	频率温度系数比3J53小，工作温度范围有所扩大，用途同3J53
Ni45CrTi（Ni45，Cr6，Ti2.5，C0.05，Fe余量）	−40～200	8.0		1.0		增加镍含量，工作温度范围进一步扩大，用途同3J53
Ni39Mo8Ti（Ni39，Mo8，Ti2，Fe余量）	20～40			1.0		弹性后效小，用作0.2级电磁系电表张丝，其力矩温度系数小于0.05%/10 ℃。但与铜基合金相比则电阻大，较难焊接，有磁性
Ni39Mo5CrTi（Ni39，Mo5，Cr3，Ti2，Fe余量）	20～40			1.1		通过适当控制冷加工度与热处理规范，张丝的力矩温度系数小于0.03%/10 ℃，弹性后效小于0.03%。弱磁性。用于0.1级电磁系电表张丝

续表

合金材料	工作温度范围（℃）	线膨胀系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	密度 γ（g/cm³）	电阻率 ρ（$\mu\Omega\cdot$m）	居里点 T（℃）	主要特点与用途
NbTi39Al5（Ti39.5，Al5.5，Nb余量）	20～500	8.8		0.9～1.1		无磁性铌基合金。高温及耐蚀性均好。弹性模量及其温度系数均较小。弹性极限接近 980 N/mm²。在 150 ℃的 5%硫酸、盐酸和磷酸中，在 200 ℃的 35%硝酸和有机酸中均有良好的耐蚀性。用于无磁恒弹性张丝和特殊用途弹簧
NbMo3Zr2，5Cr2Ti2（Mo3.5，Zr2.5，Cr2，Ti2，C0.03，Nb余量）	20～600					同上。工作温度更高，抗松弛性能良好。在 700 ℃，200 h，应力下降 5%～6%

表 8-7　恒弹性合金材料的热处理规范及机械性能

合金名称	推荐热处理规范及合金状态	抗拉强度 σ_b（N/mm²）	伸长率 δ（%）	弹性模量 E（N/mm²）	弹性模量温度系数 β_E（$\times10^{-6}$/℃）	频率温度系数 β_f（$\times10^{-6}$℃）	硬度 HV
3J53	软化：950～980 ℃，水冷 软时效：650～700 ℃，2～4 h 硬时效：600～650 ℃，2～4 h	539 >1 078 >1 225	40 >8 >5	 >171 500 >176 400	 <20 <20	 0～+20 0～+20	 360 400
Ni42Cr6Ti	软化：950 ℃，水冷 硬时效：650 ℃，4 h	1 568	>5	68 600（切变模量）	10		440
YC-12	软化：980～1 000 ℃，水冷 硬时效：500～600 ℃，4 h	>1 372	>3	196 000		≤1	>400
3J58	软化：950～980 ℃，水冷 硬时效：550～650 ℃，4 h	539 1 372	40 5	181 300		−50～+10	≥330
Ni45CrTi	软化：910～950 ℃，水冷 软时效：700 ℃，4 h 硬时效：600 ℃，4 h	637 1 176 1 470	45 20 10	176 400～186 200			130 300
Ni39Mo8Ti①	软化：950～1 000 ℃，水冷 硬时效：650～700 ℃，2 h	833 1 421～1 529	30 2～4		20	14	120 >400
Ni39Mo5CrTi①	硬时效：600～630 ℃，2 h	>1 470	>2	186 200～196 000	−50		>500

续表

合金名称	推荐热处理规范及合金状态	抗拉强度 σ_b (N/mm²)	伸长率 δ (%)	弹性模量 E (N/mm²)	弹性模量温度系数 β_E (×10⁻⁶/℃)	频率温度系数 β_f (×10⁻⁶℃)	硬度 HV
NbTi39Al5	软化:1 000 ℃,真空炉冷 软时效:700~725 ℃,5~10 h 硬时效:725 ℃,1 h	588~666 >931 1 029~1 176	25~28 3 2	110 740	−70~−90 (20~500 ℃)		>300 330
NbMo3Zr2.5Cr2Ti2	软化:1 600 ℃真空炉冷 软时效:950 ℃,2~3 h	882~980	3~6	102 900~112 700	1~2 (20~700 ℃)		350

① 为丝材。

第五节　耐腐蚀弹性合金材料

此类合金材料的耐腐蚀性能是指耐各种强酸、强碱以及化工上的尿素、乙烯、氯离子和硫化氢等腐蚀的性能。高弹性合金类中的 3J21 合金除了无磁、具有高弹性、高强度和良好的耐疲劳性能外，也能耐硫化氢腐蚀。这类合金主要是镍基、镍铬铁基材料。分为时效硬化型和加工硬化型两大类耐腐蚀弹性合金材料。

1. 时效硬化型耐腐蚀弹性合金

这类合金淬火后有良好塑性，时效处理后获得较高的强度和弹性；这类合金有镍基、铁镍铬基等。其品种、物理性能、特点与用途见表 8-8；其热处理规范、机械与弹性性能见表 8-9。

2. 加工硬化型耐腐蚀弹性合金

这类合金淬火后不能进行时效硬化，主要以冷加工变形提高其强度和弹性；冷加工变形后，再进行低温退火，可进一步提高其弹性。这类合金有镍基、铁镍铬基等。其化学成分、物理性能、特点与用途见表 8-8；其热处理规范、机械与弹性性能见表 8-9。

表 8-8　耐腐蚀弹性合金材料的化学成分及物理性能

合金名称		线膨胀系数 α (×10⁻⁶/℃)	密度 γ (g/cm³)	电阻率 ρ (μΩ·m)	主要特点和用途
时效硬化型	0Cr20Ni65Ti2AlNb (Cr20，Ti2.5，Al0.8，Nb1，C≤0.05，Ni 余量)	13.1 (16~100 ℃)	8.3		具有耐硫酸根或氟离子等氧化性硝酸以及 25% 硝酸的腐蚀性。还能耐硫化氢腐蚀，并有良好的高温强度。用于弹性敏感元件或其他结构件

续表

合金名称		线膨胀系数 α ($\times10^{-6}$/℃)	密度 γ (g/cm^3)	电阻率 ρ ($\mu\Omega\cdot$m)	主要特点和用途
时效硬化型	NiCr47Mo3 (Cr47，Mo3，Ni余量)	11～12	7.8	0.68～0.8	在硝酸中耐腐蚀性远优于3J1合金。在沸腾的56.7%硝酸中极耐蚀。耐强氧化性介质腐蚀和耐高温。用途同上
	Ni40Cr17Mo5Cu3Ti3 (Ni40，Cr17，Mo5，Cu3，Ti3，Fe余量)	11.3			能耐硫化氢和80 ℃和10%～60%硫酸腐蚀用途同上
加工硬化型	1Cr18Ni9Ti (Cr18，Ni9，Ti0.5，C≤0.12，Fe余量)	16.6 (20～100 ℃)	7.9	0.75	对下列介质有良好的耐腐蚀性 20 ℃：浓硝酸，95%浓硫酸；40 ℃：50%硝酸；90 ℃：78%硫酸＋6%硝酸；沸腾温度：50%磷酸；－15～－8 ℃：30～35%醋酸＋60%～80%醋酸乙烯 用于弹簧管、波纹管及其他结构元件等
	2Cr19Ni9Mo (Cr19，Ni9，Mo2，Mn3，C0.2，Fe余量)			0.88	具有较高的弹性极限、弹性模量和疲劳极限。加工性能良好。对缺口不敏感，用于照相机快门弹簧、钟表发条、电机恒压刷握等
	1Cr18Ni12Mo2Ti (Cr18，Ni12，Mo2，Ti0.5，C≤0.12，Fe余量)	16.1 (20～200 ℃)	7.9	0.75	在还原性介质中，耐腐蚀性优于1Cr18Ni9Ti，对下列介质有良好的耐腐蚀性： 20 ℃：40%硫酸，5%盐酸，80%磷酸，干燥氯气；沸腾温度：98%醋酸＋2%甲酸；120 ℃：78%氢氧化钠；180 ℃：尿液、氨、二氧化碳和水(压力1 960 N/mm^2)，用于膜片(盒)弹簧管等
	00Cr26Ni35Mo3Cu4Ti (Cr26，Ni35，Mo3，Cu4，Ti0.5，C≤0.03，Fe余量)	15.7 (26～100 ℃)		1.07	能耐45 ℃：50%硫酸；＜200 ℃：氟气；＜300 ℃：100%氯化氢；沸腾温度：65%硝酸；硫化氢等腐蚀 用于弹性敏感元件和结构件
	0Cr17Ni17Mo7Cu2 (Cr17，Ni17，Mo7，Cu2，C0.05，Fe余量)	16.6 (16～100 ℃)		1.07	在70 ℃对于65%硫酸和含氯、铁、铜等离子的硫酸，以及硫化氢均有良好的耐腐蚀性。用途同上

续表

	合金名称	线膨胀系数 α ($\times10^{-6}$/℃)	密度 γ (g/cm^3)	电阻率 ρ ($\mu\Omega\cdot$m)	主要特点和用途
加工硬化型	00Cr16Ni75Mo2Ti (Cr16，Mo2.5，Ti0.5，Fe≤8，C≤0.03，Ni余量)	14.3 (20～300 ℃)	8.5	1.15	合金在450～550 ℃的氢氟酸气氛中，虽有氧存在，不会产生晶间腐蚀。在5%稀氢氟酸中，对氧也不敏感。用途同上
	00Cr16Ni60Mo17W4 (Cr16，Mo17，W4，Fe≤7，C≤0.03，Ni余量)	12.0 (15～200 ℃)	8.9	1.30	既耐腐蚀又具有良好的高温弹性和高电阻率。在湿氯、次氯酸盐、醋酸、强氧化性盐溶液(氯化铁、氯化铜)中极耐腐蚀。也能耐＜600 ℃的高温：氢氟酸气氛：20 ℃：99%氢氟酸，85%磷酸；20～60 ℃：25%～50%硫酸。用途同上
加工硬化型	0Ni65Mo28Fe5V (Mo28，Fe5，V0.3，C≤0.05，Ni余量)	14.4 (0～100 ℃)	9.2	1.35	含钒(V)可降低晶间腐蚀倾向，在高温下具有较高强度、刚性、高电阻率和尺寸稳定性等。在下列介质中有良好的耐腐蚀性： 20 ℃：96%硫酸，37%盐酸，99%氢氟酸；沸腾温度：50%硫酸，85%磷酸；硫化氢。用途同上
	NiCu28-2.5-1.5 (Cu28，Fe2.5，Mn1.5，Ni余量)(蒙乃尔合金)	14.0	8.8	0.40	在有色金属与合金中，除铂与银外，此合金最耐氢氟酸腐蚀。对下列介质有良好耐腐蚀性； 20 ℃：48%～50%氢氟酸(无氧存在)；沸腾温度：10%硫酸；硫化氢。用途同上

表 8-9　耐腐蚀弹性合金材料的热处理规范及机械性能

	合金名称	推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 σ_b (N/mm²)	伸长率 δ (%)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (N/mm²)	弹性极限 σ_s (N/mm²)	弹性模量 E (N/mm²)	硬度 HV
时效硬化型	0Cr20Ni65Ti2AlNb	软化:1 080～1 100 ℃,水淬 软时效:750 ℃,8 h +650 ℃,8 h 15%硬时效:750 ℃,8 h +620 ℃,8 h	755～872 1 245 1 372～ 1 392	50～62 30～33 13～15	343～470		233 240	170～197 330～375 460～490
	NiCr47Mo3	软化:1 200～1 250 ℃,水淬 软时效:700～750 ℃,5 h	833～980 1 323～ 1 421	30～40 5～10	1 225 ～1 323	1 127～ 1 176	215 600～ 225 400	240 400～430
	Ni40Cr17Mo5Cu3Ti3	软化:1 050～1 080 ℃,水淬 软时效:700～750 ℃, 5～15 h 15%硬时效:750 ℃, 8 h+650 ℃,8 h	980 1 372	10 12～14	686		229 320	460～490
加工硬化型	1Cr18Ni9Ti	软化:1 000～1 100 ℃,水冷 半硬态 硬态 15%冷加工度+350 ℃,2 h	>539 735 882 931	>40	>196 539 882	274.4* 314*	171 500 196 000	300～320
	2Cr19Ni9Mo2	>85%冷加工度 +500 ℃,1.5 h	≥1 764	>2		1 176*	176 400	
	1Cr18Ni21Mo2Ti	软化:1 000～1 100 ℃,水冷 8～10 ℃冷加工度 15%冷加工度+420 ℃, 2 h	>539 588 794	>40 25	>216 823		1 372～ 1 862 198 940	280
	00Cr26Ni35Mo3Cu4Ti	软化:1 000～1 050 ℃,水冷 5%～8%冷加工度 +500 ℃,4 h 15%冷加工度+500 ℃, 4 h	>539 676～ 686 823	>40 25～26	>216 725		 187 180	147 140～250
	0Cr17Ni17Mo7Cu2	软化:1 140～1 160 ℃,水冷 15%冷加工度+650 ℃, 1 h	588 804	30	 647		 198 940	174 242～247

续表

合金名称		推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 σ_b (N/mm²)	伸长率 δ (%)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (N/mm²)	弹性极限 σ_s (N/mm²)	弹性模量 E (N/mm²)	硬度 HV
加工硬化型	00Cr16Ni75Mo2Ti	软化:1 050～1 100 ℃,水冷 硬态	>539 1225～1372	>35 2.5～3.8	>196			140 325～327
	00Cr16Ni60Mo17W4	软化:1180～1200 ℃,水冷 5%～10%冷加工度	686 1078～1166	>25 33～38	>343 696～735		196 000	208
	0Ni65Mo28Fe5V	软化:1 150～1 170 ℃,水冷 10%～30%冷加工度	>784 980～1176	>38 14～25	>343		211 680	325 400～460
	NiCu28-2.5-1.5(蒙乃尔合金)	软化:870～950 ℃,空冷 硬态	490～588 549～755	30～50 2～15			179 340	140～220

* 弯曲弹性极限。

第六节　铜基弹性合金材料

这类合金具有很高的导电性,耐大气腐蚀性能也好,多用作制造弹性敏感元件和高导电性的弹性元件,如电刷片、簧片、游丝、张丝等。这类合金有时效硬化型和加工硬化型两大类。

1. 时效硬化型铜基弹性合金

这类合金弹性模量低,时效硬化后显著提高弹性极限;淬火后塑性好,便于加工成复杂形状;导电、导热、抗疲劳及低温性能均好,撞击时不发生火花。其品种、物理性能、特点与用途见表 8-10;其热处理规范、机械及弹性性能见表 8-11。

2. 加工硬化型铜基弹性合金

这类合金主要依靠冷加工变形后获得弹性。冷加工硬化后,可通过低温退火,进一步提高弹性极限和降低弹性后效。这类合金弹性不如铍青铜高,但来源广、价格低,大量用于制造弹性敏感元件及簧片等。其品种、物理性能、特点与用途见表 8-10;其热处理规范、机械及弹性性能见表 8-11。

表 8-10　铜基弹性合金材料的化学成分及物理性能

合金名称		最高工作温度(℃)	线膨胀系数 α ($\times10^{-6}$/℃)	密度 γ (g/cm^3)	电阻率 ρ ($\mu\Omega\cdot$m)	主要特点与用途
时效硬化型	QBe2(铍青铜)(Be2，Ni0.4，Cu余量)	150	16.6	8.2	0.06～0.10	对大气、海水有良好的耐腐蚀性。用于制造膜片、波纹管、弹簧管、游丝、张丝、簧片、耐磨零件
	QBe1.9(铍镍钛铜)(Be1.9，Ni0.3，Ti0.2，Cu余量)	150		8.3	0.061	虽降低了含铍量，但添加了钛，有很优越的疲劳极限，在 235 N/mm^2 应力下，循环次数 1.30×10^7 不断，弹性极限亦高于 QBe2。对热处理时效敏感性小。弹性后效 H10＜0.2%。用途同上
时效硬化型	QBe1.7(铍镍钛铜)(Be1.7，Ni0.3，Ti0.2，Cu余量)	150			0.06	特性与 QBe1.9 相似，但机械性能稍低。用途同上
	QTi3.5(铜钛合金)(Ti3.5～4.0，Cu余量)	150	16.6	8.6	0.12～0.57	机械性能与 QBe2 接近，成本低，但耐腐蚀性和抗氧化性较差，用于簧片、弹簧等
	QTi6-1(铜钛铝合金)(Ti6，Al1，Cu余量)	150	15.0	8.4	0.97	机械性能高于 QTi3.5。比铍青铜成本低。在 10%氯化钠中有较好的耐腐蚀性。疲劳性能好。用于簧片、弹簧等

续表

	合金名称	最高工作温度（℃）	线膨胀系数 α（$\times10^{-6}$/℃）	密度 γ（g/cm^3）	电阻率 ρ（$\mu\Omega\cdot$m）	主要特点与用途
加工硬化型	QSn6.5～0.1（锡磷青铜）（Sn6.5，P0.1，Cu余量）	100	17.2	8.8	0.128	有良好的弹性、耐磨性、抗磁性和可焊性。能耐大气和淡水腐蚀。用于膜片、波纹管、弹簧管、簧片等
	QSn6.5～0.4（锡磷青铜）（Sn6.5，P0.4，Cu余量）	100	17.7	8.8	0.176	同上，弹性稍有提高，有高的疲劳极限。能耐海水腐蚀。用于弹簧管、合金丝网等
	QSn4-3（锡锌青铜）（Sn4，Zn3，Cu余量）		18.0	8.8	0.09	弹性低于QSn6.5-0.1。但有优良的冷热加工性能，用于电表中游丝、张丝等
	QSi3-1（硅锰青铜）（Si3，Mn1，Cu余量）		15.8	8.4	0.15	加工硬化后，具有高的屈服极限和弹性极限，特别优良的耐磨性。在低温下塑性仍不降低，用于螺旋弹簧等
	BZn15-20（锌白铜，德银）（Ni15，Zn20，Cu余量）		16.6	8.6	0.26	具有高的化学稳定性，冷热加工性能均好。弹性优于QSn6.5-0.1等锡磷青铜。焊接性能稍差。用于弹簧管、簧片等

表 8-11　铜基弹性合金材料的热处理规范及机械性能

	合金名称	推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 σ_b (N/mm²)	伸长率 δ (%)	弹性极限 σ_s (N/mm²)	弹性模量 E (N/mm²)	硬度 HV
时效硬化型	QBe2 (铍青铜)	软化:780～800 ℃氨气保护,水冷硬态	392～588	>30			<130
			>637	>2.5			>170
		软时效:310～330 ℃,2 h	>1 127	>2	735*	107 800～	>320
		硬时效:310～330 ℃,2 h	>1 176	>1.5	804*	127 400	>360
	QBe1.9 (铍镍钛铜)	软化:730～800 ℃,氨气保护,水冷硬态	392～588	>30			<120
			>637	>2.5			>160
		软时效:310～330 ℃,2～2.5 h	>1 127	>2	764*	112 700～	>350
		硬时效:310～330 ℃,2～2.5 h	>1 176	>1.5	852*	132 300	>370
	QBe1.7 (铍镍钛铜)	软化:780～800 ℃,氨气保护,水冷硬态	431	50		104 860	<120
			>588	>2.5			>150
		软时效:310～330 ℃,2 h	1 127	3.5		121 520	>310
		硬时效:310～330 ℃,2 h	>1 078	>2		127 400	>340
	QTi3.5 (铜钛合金)	软化:850～900 ℃,水冷	<490	>30		119 560	120～130
		冷轧	686～882	2.5～4.5		122 500	230～260
		硬时效:400 ℃,2 h	941～1 137	5～11	784	136 220	310
	QTi6-1 (铜钛铝合金)	软化:850～900 ℃,水冷	392～588	30			140
		硬态	833	2.5		117 600	200
		软时效:450 ℃,2 h	1 078	2	598	123 480	320
		硬时效:420 ℃,2 h	1 176	1.5	774	125 440	350
加工硬化型	QSn6.5-0.1 (铜磷青铜)	软化:600～650 ℃,空冷	>294	>38	343*		70～90
		硬态	>539	>8	392*	93 100～	160～200
		特硬态	>666	>2		112 700	
		60%冷加工度					
		60%冷加工度+260 ℃,1 h			539		
	QSn6.5-0.4 (锡磷青铜)	软化:600～650 ℃,空冷	>294	>38		109 760	80
		硬态	>539	>8			180
		特硬态	>666	>2			
	QSn4-3 (锡锌青铜)	软化:600 ℃,空冷	>294	>33			60
		硬态	>539	>3		121 520	160
		特硬态	>666	>2			
		60%冷加工度			431		
		60%冷加工度+150 ℃,30 min			519		

续表

	合金名称	推荐热处理温度及合金状态	抗拉强度 σ_b (N/mm²)	伸长率 δ (%)	弹性极限 σ_s (N/mm²)	弹性模量 E (N/mm²)	硬度 HV
加工硬化型	QSi3-1（硅锰青铜）	软化：700～750 ℃，空冷	>372	>45		117 600	
		硬态	>637	>5			
		特硬态	>735	>2			
		60%冷加工度			372		
		60%冷加工度+275 ℃，1 h			529		
	BZn15-20（锌白铜、德银）	软化：700～750 ℃，空冷	>343	>35		123 480	77
		硬态	>539	>1.5		137 200	183
		特硬态	>637	>1			
		60%冷加工度			490		
		60%冷加工度+300 ℃，4 h			608		

* 弯曲弹性极限。

第七节　常用弹性合金的品种、规格

1. 恒弹性合金的品种、规范

按 YB/Z22－1973 标准所列的 3J53、3J58 等频率元件用的恒弹性合金，其化学成分、机械性能见表 8－6、表 8－7。频率元件用的恒弹性合金品种、规格见表 8－12。

表 8－12　频率元件用的恒弹性合金品种、规格　　（单位：mm）

冷拉棒材		磨光棒材		冷轧带材				冷拉丝材	
直径	允许偏差	直径	允许偏差	厚度	允许偏差	宽度偏差		直径	允许偏差
						切边	不切边		
4.0～7.0	±0.06	4.0～7.0	−0.03	0.20～0.30	−0.03	+1	+10	0.50～0.80	±0.02
>7.0～10.0	±0.07	>7.0～10.0	−0.035	>0.30～0.40	−0.04	+1	+10	>0.80～1.20	+0.03 −0.02
>10.0～14.0	±0.08	>10.0～14.0	−0.035	>0.40～0.60	−0.05	+1	+10	>1.20～1.80	±0.03
>14.0～18.0	±0.10	>14.0～18.0	−0.04	>0.60～0.90	−0.06	+1	+10	>1.80～2.50	+0.04 −0.03
				>0.90～1.30	−0.07	+1	+10	>2.50～3.50	±0.04
				>1.30～1.80	−0.09	+1	+10	>3.50～4.50	+0.05 −0.04
				>1.80～2.50	−0.12	+1	+10		
				>2.50～3.50	−0.15	+1	+10		

2. 高弹性合金的品种、规格

按 YB138－1973、YB138－1973 标准所列的 3J1、3J53 弹性元件用合金和 3J21 无磁、耐蚀、高弹性合金的化学成分、机械性能，可参见表 8－10、表 8－11。高弹性合金品种、规格见表 8－13。

第八节　弹性合金的选用

(1) 制造弹性敏感元件要求合金材料具有较高的弹性极限、较低的弹性模量及较低的弹性后效；制造起弹力作用的簧片、接插件中的弹性件要求合金材料具有较高的弹性极限和足够高的弹性模量。

(2) 在腐蚀介质中工作的弹性元件应选用耐相应介质腐蚀的弹性合金。

(3) 带材弹性合金的性能不均匀，其头尾与边缘部位的弹性性能低于中间部位，取材时应避开性能低的部位。

(4) 对有方向性的弹性元件如簧片等，在落料时应予注意。

(5) 簧片等简单元件要求合金材料为硬态；膜片、波纹管等结构复杂的元件要求材料为软态；用加工硬化型弹性合金材料作膜片时，软态成型的加工度往往不能满足弹性性能要求，则需采用有一定加工度的合金材料来成型膜片。

各种弹性元件对合金材料的性能要求见表 8－14。

表 8－14　各种元件对弹性合金提出的不同要求

弹性元件类别	弹性极限	弹性模量	弹性模量温度系数	弹性后效	强度	伸长率	疲劳强度	耐蚀性	耐热性	导电性	磁性	表面状况	尺寸公差	成型性能	易焊性	举例
敏感元件	✓	✓	*	✓	—	✓	✓	*	*	*	*	✓	✓	✓	✓	膜片(盒)、波纹管、弹簧管、游丝、电磁传感器中的磁弹元件等
弹力元件	✓	✓	*	—	✓	✓	✓	*	*	*	—	✓	*	*	*	发条、螺旋弹簧、簧片等
动态应用元件	—	✓	✓	—	—	—	—	*	*	*	*	*	*	—	*	机械滤波器振子、延迟线、音叉等
挠性结构元件	*	✓	—	—	✓	✓	✓	*	*	—	—	*	—	✓	✓	进行密封、介质隔离、软轴连接等用的波纹管

注：(1) 符号说明：✓：有要求；*：根据具体情况有要求；—：一般无要求。

(2) 磁性栏一般指无磁性，有时指一定温度范围内有一定的磁性，如电磁传感器中的磁弹元件等。

(3) 此外，还有带材的方向性、性能均匀性等未列入本表。

第九节　弹性合金材料的表面清洗

合金材料因热处理在表面产生了氧化皮，一般可采用酸洗去除氧化皮，而尽量不使合金肌体受到腐蚀。对某些合金含量较高、氧化膜附着力强的材料，在酸洗前还必须先进行碱洗处理。碱洗主要靠硝酸钠、氢氧化钠强氧化作用，使氧化层中的低价氧化物转变为高价氧化物，形成体积变化、组织疏松，易于合金肌体分离，而使酸洗容易。常用高温碱洗液配方见表 8－15。

表 8－15　常用高温碱洗液配方

合金类别	碱液成分(%)	温度(℃)	时间(min)	说　明
铁-镍基 镍　基 钴　基	硝酸钠 65 氢氧化钠 30 氯化钠 5	450～500	30～40	碱洗处理后立即水淬

镍基、铁镍基等合金经碱洗后所用酸洗液配方见表 8－16。

表 8－16　镍基、铁镍基等合金经碱洗后所用酸洗液配方

合金类别	配方(%)	温度(℃)	说　明
铁-镍基 镍　基 钴　基	硫酸 16～18 硝酸 18～20 氟化钠 0.5～1.0 g/L 水余量	50～70	1. 新配酸不用加热 2. 3J1、3J53 含铝、钛的合金，酸洗效果很好
同上	同上。但氟化钠增至 2.0 g/L	同上	1. 同上 2. 含铬量高达 20%的合金用此配方更好
镍铬合金	硫酸 20 盐酸 3 硝酸钠 3 水余量	80	

铁镍铬基、钴基等不需要高温碱洗，可直接碱洗其酸洗液配方和酸洗配方见表 8－17、表8－18。

表 8-17　铁镍铬基、钴基等酸洗液配方

合金材料	配方(%)	温度(℃)	合金材料	配方(%)	温度(℃)
3J21	盐酸 25 氯化钠 2 硫酸 25 硝酸 5 水余量	室温	3J53	硝酸 10 硫酸 6～8 水余量	70～80

表 8-18　酸洗配方

合金材料	配方(%)	温度(℃)	说　明
铜基合金	硫酸 10 水余量	50～80	如氧化层太厚，每 1 000 mL 加重铬酸钠(或重铬酸钾)30 g
铜基合金	硫酸 50 硝酸 25 氯化钠 20 g/L 水余量	室温	光亮酸洗用
钛铜	硫酸 20 硝酸 10 水余量	60	

第九章　膨胀合金材料

第一节　膨胀合金的分类、名称、牌号、特点

膨胀合金按其膨胀性能可分为两大类，即低膨胀合金和具有一定膨胀系数的合金。前者在气温变动范围内(－60～＋80 ℃)，具有很低的膨胀系数，主要用于高精密仪表中作尺寸稳定零件；后者主要用于电真空器件作为封接材料，同各种介电材料进行封接，封接在一起的材料膨胀系数应相同或相近。

膨胀合金名称、牌号与特点见表 9－1。

表 9－1　膨胀合金牌号、名称与特点

合金名称	牌　号	特　性　用　途
低钴定膨胀玻封合金	4J44	在 20～500 ℃范围内具有一定的平均线膨胀系数；在电真空工业中用来和相应的硬玻璃进行气密封接
低钴定膨胀瓷封合金	4J46	在 20～500 ℃范围内具有一定的平均线膨胀系数；在电真空工业中用来和 95％三氧化二铝(Al_2O_3)瓷进行气密封接
无磁定膨胀瓷封合金	4J78 4J80 4J82	在 20～600 ℃范围内具有一定的平均线膨胀系数；可用作陀螺仪和其他电真空器件中的无磁瓷封接
铁镍钴玻封合金	4J29	在 20～450 ℃范围内具有与硬玻璃相近的线膨胀系数；用作电真空工业、晶体管工业中的封接结构材料，与硬玻璃匹配封接
铁镍钴瓷封合金	4J33 4J34	在－60～600 ℃范围内，具有与 95％三氧化二铝(Al_2O_3)陶瓷相近的线膨胀系数；在电真空工业中用作封接结构材料，可用以与95％三氧化二铝等陶瓷进行匹配封接
铁镍玻接合金	4J42 4J45 4J50 4J52	在给定温度范围内，具有一定的线膨胀系数；在电真空工业中用作封接结构材料。4J42、4J45、4J50、4J52 合金主要用于和软玻璃或陶瓷进行匹配封接

续表

合金名称	牌　号	特　性　用　途
铁镍玻封合金	4J54	4J54 合金主要用于和云母封接
杜美丝芯合金	4J43	杜美丝用于制造复铜丝的芯材、作软玻璃密封、灯泡引脚、二极管和电容器的引线等
铁镍铜玻封合金	4J41	用作各种电真空器件，该合金可代替杜美丝与相应的软玻璃进行匹配封接
铁镍铬玻封合金	4J6 4J47 4J48 4J49	在给定温度范围内，具有与软玻璃相近的膨胀系数；用于电真空工业用的封接结构材料，在给定温度范围内，用来与相应的软玻璃进行匹配封接
铁镍定膨胀合金	4J58	具有良好的尺寸稳定性能 用以制造具有良好的尺寸稳定性的精密线纹尺
无磁磁尺基体用铁锰合金	4J59	用以制作高精度无磁磁尺基体
铁铬玻封合金	4J28	具有耐腐蚀性能 为电真空工业用封接结构材料，在给定温度范围内用来与相应的软玻璃匹配封接
低膨胀合金	4J36 4J32	具有很低的膨胀系数 用以在给定温度范围内尺寸近似的恒定元件，广泛用于无线电工业、精密仪器、仪表及其他工业
易切削低膨胀合金	4J38	具有低的膨胀系数，易切削 用于在给定温度范围内具有低膨胀系数的场合
高温低膨胀合金	4J40	在－20～300 ℃范围内具有较低的平均膨胀系数 在电真空工业中用以制作各种速调管、微波管的谐振腔和外形尺寸随温度变化较小的零件

第二节　膨胀合金的技术性能

1. 物理性能

(1) 平均线膨胀系数。膨胀合金给定的热处理后，其平均线膨胀系数见表 9-2。

表 9-2　膨胀合金的平均线膨胀系数

合金牌号	热处理规范	平均线膨胀系数 α($\times10^{-6}$/℃)						
		20～50 ℃	20～100 ℃	20～200 ℃	20～300 ℃	20～400 ℃	20～450 ℃	20～500 ℃
4J44	在保护气体或真空中加热到850～900 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 400 ℃以下出炉			4.3～5.3	4.3～5.1	4.6～5.2	6.4～6.9	
4J46	在保护气体或真空中加热到850～900 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 300 ℃以下出炉				5.5～6.5	5.6～6.6	7.0～8.0	
4J78	在保护气体或真空中加热到1 000～1 050 ℃，保温 30～40 min，以不大于300 ℃/h的速度，冷却到300 ℃以下出炉						12.1～12.7	12.4～13
4J82	同 4J78						12.5～13.1	13.0～13.6
4J80	在保护气体或真空中加热到850～900 ℃，保温 30～40 min，以不大于300 ℃/h的速度，冷却到300 ℃以下出炉						12.7～13.3	13.0～13.6
4J29	在保护气体或真空中加热到960±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 400 ℃以下出炉					4.6～5.2	5.0～5.6	
4J33	在保护气体或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 400 ℃以下出炉				5.9～6.9		6.5～7.5	
4J34					6.2～7.2		20～600 ℃ 7.8～8.8	

续表

合金牌号	热处理规范	平均线膨胀系数 α($\times10^{-6}$/℃)						
		20～50 ℃	20～100 ℃	20～200 ℃	20～300 ℃	20～400 ℃	20～450 ℃	20～500 ℃
4J42 4J45 4J50 4J52 4J54	在保护气体或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度。冷却到 400 ℃以下出炉				4.4～5.6 6.5～7.7 8.8～10.0 9.8～11.0 10.2～11.4	5.4～6.6 6.5～7.7 8.8～10.0 9.8～11.0 10.2～11.4		
4J43	在保护气体或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 400 ℃以下出炉					5.6～6.8		
4J58	在保护气体或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 200 ℃以下出炉	10.5～11.5						
4J41	在保护气氛或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 400 ℃以下出炉				8.4～9.5	8.5～9.6		
4J46 4J47 4J48 4J49					7.5～8.5 8.2～9.2 8.4～9.4	9.5～10.5 8.0～8.6 8.5～9.5 9.2～10.2		
4J59	在保护气氛或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 300 ℃以下出炉				10.5～11.5			
4J28	在保护气氛或真空中加热到1 100±20 ℃，保温 15 min，空冷至室温							10.4～11.6

续表

合金牌号	热处理规范	平均线膨胀系数 α($\times10^{-6}$/℃)						
		20～50 ℃	20～100 ℃	20～200 ℃	20～300 ℃	20～400 ℃	20～450 ℃	20～500 ℃
4J36	在保护气氛或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 200 ℃以下出炉		≤1.8					
			≤1.5					
4J32	在保护气氛或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，水冷，然后加热到300～320 ℃，保温 4 h，以不大于 80 ℃/h 的速度，冷却到80 ℃以下出炉							
Ⅰ	在保护气氛或真空中加热到850±20 ℃，保温 1 h，以不大于300 ℃/h 的速度，冷却到 200 ℃以下出炉		≤1.8					
4J38	在保护气氛下加热至 850±20 ℃，保温 1 h，水冷，然后在300～320 ℃回火 2 h，以不大于80 ℃/h 的速度，冷却到80 ℃以下出炉				≤1.5		≤1.0	
Ⅱ	在保护气氛下加热至 850 ℃，保温1 h，以不大于 300 ℃/h 的速度，冷却到 200 ℃以下出炉	1.4	1.6					
4J40	在保护气氛下，加热到 850±20 ℃，保温 1 h，水淬，以 200 ℃回火 2 h，冷却至 50 ℃以下出炉				≤2.0			

(2) 膨胀合金的磁性能。4J41、4J46 膨胀合金的磁性能见表 9-3；4J59、4J41 膨胀合金的直流磁性能见表 9-4。

表 9-3　4J41、4J46 膨胀合金的磁性能

合金牌号	磁感应强度		剩余磁感应强度	矫顽力	最大磁导率	磁场强度
	B_{10}(T)	E_{100}(T)	B_r(T)	H_c(A/m)	μ_m(H/m)	H(A/m)
4J41			0.31	4.218		3 981
4J46	1.58	1.61	0.31	2.946	354.31	

表 9－4　4J59、4J41 膨胀合金的直流磁性能

4J41 膨胀合金		4J59 膨胀合金	
磁场强度(A/m)	磁感应强度(T)	磁场强度(A/m)	磁导率(H/m)×10^{-4}
7.962	0.02	3 981	79.715
15.924	0.04	7 962	79.723
23.885	0.07	11 943	79.731
39.91	0.14	15 924	79.731
79.62	0.38	23 886	79.731
159.24	0.62	31 848	79.731
398.1	0.89	39 810	79.731
796.2	1.10	47 772	79.739
1 990.5	1.36		
2 388.5	1.42		

2. 机械性能

部分膨胀合金的机械性能见表 9－5。

表 9－5　部分膨胀合金的机械性能

合金牌号		导热系数 λ_s [W/(m·℃)]			弹性模量 E (N/mm²)	抗拉强度 σ_b (N/mm²)	伸长率 δ (%)	维氏硬度 HV	屈服点 σ_s (N/mm²)	居里点 T(℃)
4J44		19.665(20 ℃)			128 870	550	29.8	149.5		
4J46	热处理温度 750 ℃	20.083(200 ℃)			137 200	527	34.8	137.4		
	850 ℃					519	35.4	134.6		
	950 ℃					483	36.7	128.1		
	1 050 ℃					466	34.3	125.6		
		20 ℃	300 ℃	600 ℃						
4J78										
4J80		13.807	15.481	16.736	221 676	868	54		353	
4J82		15.481	17.736	21.338	220 500	748	55		289	
		15.899	17.154	21.756	215 600	784	53		318	
4J41	软态					≤568	≥20			420
	硬态					≤784				
4J59					193 746	558	42.6	153		70
4J38	轧(锻)状态				165 620	769		153		
	退火状态					470		128		

第三节　膨胀合金的品种、规格及尺寸公差

膨胀合金的品种有：丝材、带材、棒材、板材、管材及锻材等。

1. 丝材

冷拉丝材直径及允许偏差见表 9－6。

表 9－6　冷拉丝材直径及允许偏差

直径(mm)	允许偏差(mm)		直径(mm)	允许偏差(mm)	
	普通精度	较高精度		普通精度	较高精度
0.10～0.20	±0.010	±0.005	>0.50～1.50	±0.03	±0.015
>0.20～0.30	±0.015	±0.008	>1.50～3.00	±0.04	±0.02
>0.30～0.50	±0.02	±0.010	>3.00～7.00	±0.05	±0.03

2. 带材

冷拉(轧)无缝管材外径、壁厚及允许偏差见表 9－7。

表 9－7　冷拉(轧)无缝管材外径、壁厚及允许偏差

外　径 (mm)	允许偏差(mm)		壁　厚 (mm)	允许偏差(mm)	
	普通精度	较高精度		普通精度	较高精度
0.3～3	−0.05	−0.03	0.1～0.3	±0.05	±0.03
>3～5	−0.06	−0.04	>0.3～0.5	±0.07	±0.04
>5～10	−0.10	−0.08	>0.5～1.0	±0.10	±0.06
>10～25	−0.20	−0.12	>1.0	±12%	±8%
>25～60	−1.0%	−0.6%			

3. 管材

冷轧带材厚度、宽度及允许偏差见表 9－8。

表 9-8　冷轧带材厚度、宽度及允许偏差

厚　度　(mm)		宽　度　(mm)		
尺　寸	允许偏差	尺　寸	允许偏差	
			切　边	不切边
0.02～0.04	−0.005	20～100	±1.0	+5
>0.04～0.05	−0.010			
>0.05～0.10	−0.015	50～250		
>0.10～0.20	−0.02			
>0.20～0.30	−0.03	50～300		
>0.30～0.40	−0.04			
>0.40～0.50	−0.05			
>0.50～0.70	−0.06			
>0.70～1.00	−0.07			
>1.00～1.30	−0.08			
>1.30～1.70	−0.10			
>1.70～2.30	−0.11			
>2.30～3.00	−0.13			
>3.00～4.00	−0.15			

4. 圆截面材

圆截面材直径及允许偏差见表 9-9。

表 9-9　圆截面材直径及允许偏差

直径(mm)	允许偏差(mm)		直径(mm)	允许偏差(mm)	
	普通精度	较高精度		普通精度	较高精度
5～10	−0.15	−0.10	>20～30	−0.25	−0.15
>10～20	−0.20	−0.12	>30～40	−0.30	−0.20

5. 热锻材

热锻材尺寸及其允许偏差见表 9-10。

表 9-10　热锻材尺寸及其允许偏差

直径或边长(mm)	允许偏差(mm)
20.0～35.0	±1.5
>35.0～50.0	+2 −1
>50.0～70.0	+4 −2
>70.0～150	+4 −3
>150～200	±4

6. 棒材

热轧棒材尺寸及其允许偏差见表 9－11。

表 9－11　热轧棒材尺寸及其允许偏差

直径或边长(mm)	允许偏差
6.0～9.0	±4
＞9.0～20.0	±0.5
＞20.0～30.0	±0.8
＞30.0～50.0	+3 −1
＞50.0～100	+3

7. 扁(板)材

热轧扁材尺寸及允许偏差，见表 9－12。

表 9－12　热轧扁材尺寸及允许偏差

厚度(mm)	允许偏差(mm)	宽度(mm)	允许偏差(mm)	长度
3.0～4.0	±0.2	60～300	+3 −2	不限
＞4.0～7.0	±0.3			
＞7.0～13.0	±0.4			
＞13.0～22.0	±0.5			

第十章　电触头材料

第一节　电触头材料的分类、特性及用途

触头材料按特性和用途可分为轻负载、中负载、重负载和真空触头四大类。分述如下。

一、轻负载触头材料

这类触头材料多用于信息技术领域及某些设备的控制、测量和调节系统中。由于负载小(电压小于 30 V、电流小于 60 A),一般不会发生触头熔焊。电器的高可靠性主要取决于触头材料的接触电阻的高稳定性。因此对触头的表面状态要特别重视,尽可能避免表面因吸附、氧化、腐蚀以及周围气氛等污染而形成表面膜。这类触头材料有金基、铂基、钯基和银基,常用轻负载触头材料的品种、性能及特点和用途见表 10-1。

二、中负载触头材料

中负载触头材料是指工作电压为 110～1 200 V,工作电流为 6～2 500 A,且接通和分断电流可达 10 kA 的触头,其相当于各类触头额定电流的 4～10 倍,如控制开关、接触器、负荷开关和电动机启动器等。要求这类触头材料导电性好、导热性好、接触电阻低而且稳定、抗熔焊、耐电弧烧损、极性转移少、寿命长。这类触头以银基为主,主要是银-金属和银-金属氧化物等。常用中负载触头材料的品种、性能及特点和用途见表 10-2。

三、重负载触头材料

重负载触头材料是指用于具有过电流、短路和接地保护功能的保护开关和断路器的触头材料,其额定电压 110～500 kV,额定电流 6～6 300 A,最大分断电流可达 1 000 倍额定电流。这类触头材料在大电流下要求具有良好的抗熔性和快速熄弧性能,以及长期承受高热负载能力。触头结构一般分别设置主触头和弧触头,必须采取措施提高触头运动的速度,加强吹弧及缩短熄弧时间。这类触头材料以钨基和钼基为主,由于钨、钼易氧化而增大接触电阻,从而大大提高温升,为此常与含石墨成分的银石墨、银碳化钨石墨配对使用。铜-钨比银-钨更易氧化,只能在油、SF_6 或真空中使用。近年来采用焊接制成自力型整体触头元件,用于

225、500 kV 的 SF_6 高压断路器中，效果良好。电子束焊接铜基触头克服了其他焊接方法带来的铜退火的缺点。常用重负载触头材料的品种、性能及用途见表 10－3。

四、真空触头材料

真空触头材料属于重负载触头材料范围。这种触头材料，在真空中不会产生影响导电的表面氧化膜，故不必采用贵重金属。真空电器要求触头材料具有更高的抗熔焊性和耐压强度、低的截流值和热电离子发射性能，以免影响介质强度的恢复能力和避免造成更高的过电压。为了避免在真空中出现触头冷汗，在合金配方中要添加少量的脆性元素。这在真空断路器中 Cu-Cr、Cu-Bi 系列触头材料应用最广泛。由于铜和铬蒸气压相近，在电弧作用下各自蒸发的数量接近，使用过程中能保持原来成分比例，故始终具有高分断能力。由于 Cu-Cr 触头材料不含蒸气压高、电子溢出功小的添加元素，所以在分断大电流时，灭弧室不会存在大量低熔点金属蒸气，触头之间的介质强度能迅速恢复，这是 Cu-Cr 触头优于 Cu-Bi 触头的关键，它可以减少触头间隙、缩小灭弧室等。Cu-Cr 触头还具有较强的吸气能力，可保持灭弧室真空度的恒定，延长灭弧室的使用寿命。此外，在应用中对 Cu-Cr 触头含气量要求宽于 Cu-Bi 触头，故在制造 Cu-Cr 触头时，可以适当减少除气数，从而简化工艺降低成本。在 Cu-Cr 中添加 Mo、Ta、Nb 等元素，可进一步提高耐压强度和抗熔焊、耐磨损、抗腐蚀等特性。常用真空触头材料的品种、性能与用途见表 10－4。

表 10－1　常用轻负载触头材料的品种、性能及特点和用途

序号	品种	代　号	熔点(℃)	热导率[W/(m·K)]	密度(g/cm³，不小于)	电阻率(μΩ·cm，不大于)	硬度 软-硬 HB	抗拉强度 (MPa)	特性和用途
1	铂铱	$PtIr_{10}$	1 780	30	21.6	24.5	105－216	340～650	机械强度高，耐腐蚀性优良，接触电阻稳定，价格昂贵。用于微电机调节器，汽车闪光灯，航天飞行器，报警器等用触头
		$PtIr_{20}$	1 815	18	21.7	30.0	200－260	700～1 000	
		$PtIr_{30}$	1 885	16	21.8	34.5	270－400	830～1 160	
2	铂镍	$PtNi_8$	1 660		19.1	27.0	180－280	600～950	硬度高，弹性好，接触电阻不如 PtIr 稳定。用于各种继电器、开关、微型电刷等
		$PtNi_{10}$	1 650		18.8	29.0	210	800～1 500	
3	铂金	$PtAu_{10}$	1 710	16	21.2	24.3	140－220	540～630	耐腐蚀性好，与纯铂相比不易形成聚合物，接触电阻非常稳定。用于微型精密继电器及开关

续表

序号	品种	代　号	熔点（℃）	热导率[W/(m·K)]	密度（g/cm³，不小于）	电阻率（μΩ·cm，不大于）	硬度 软-硬 HB	抗拉强度（MPa）	特性和用途
4	金银	$AuAg_{10}$	1 055		17.8	10.0	30		随着Au含量增高，耐腐蚀性增强，实际含金量超过70%才具有强的耐腐蚀性。AuAg合金与纯金相比不易粘着。用于通信设备用继电器、交换器、直流信号机、调压器、集电环、电刷等
		$AuAg_{20}$	1 040	326	16.4	10.0	38-115	190～380	
		$AuAg_{30}$	1 025		15.4	10.0	46-110	220～380	
		$AuAg_{90}$	970		11.0	4.3	52-90		
5	金银镍	$AuAg_{22}Ni_3$	1 011		15.9	11.4	100-185	350～570	力学性能好，材料转移少，接触电阻较稳定，可作部分铂镍的代用品。用于高灵敏继电器、闪光发生器、离心调节器等测量仪器，电钟用抗金属转移的精密触头，通信设备用触头，计算机键盘插针
		$AuAg_{26}Ni_3$	1 050		15.5	11.4	85-155	350～570	
		$AuAg_{25}Ni_5$	1 050		15.4	11.4	85-155	350～570	
6	金镍	$AuNi_5$	1 020	84	18.3	13.3	115-190	380～640	
		$AnNi_9$	1 060		17.2	20.0	−240		
7	金钴	$AuCo_5$	1 010		18.2	55.0	95-150	340～530	
8	金银铂	$AuAg_{25}Pt_6$	1 060	50.2	16.1	15.6	60-125	280～480	耐腐蚀性好，接触电阻低具有长寿命，可靠性高。用于通信继电器，测量仪器用化学稳定性最高的触头
	金银铂及其他	$AuAg_4Pt_9Cu_{14}$ $AuAg_{10}$ $Pt_5Cu_{14}Ni_1$ $AuPd_{30}Ag_{15}Cu_{10}Pt_5$	955 955		16.0 15.9 13.6	18.9 13.0 29.0	190-280 -290	620～900 1 178	为时效强化型合金，具有极高的弹性强度和硬度，耐腐蚀性优越。用于电话继电器、电位计电刷、滑动触头
9	钯银	$PdAg_{40}$ $PdAg_{90}$	1 320 1 060	29 142	11.4 11.6	42 5.7	100-200 60-160	370～750 280～550	特性与金银相似，但随着银含量增高，耐腐蚀性下降，硬度较高，价格便宜，含银量70%以下，能长期保持光泽，是最便宜的抗硫化材料，质硬，耐烧损材料转移比纯银少。用于电话继电器、电位计电刷、滑动触头
10	钯银铜	$PdAg_{20}Cu_{30}$ $PdAg_{30}Cu_{30}$	1 150 1 065		10.6 10.0	27.0 34.8	190-320 200-450	700～1 300 700～1 400	硬度极高，耐腐蚀性好，耐氧化性比Pd-Ag差，作为高弹性滑动触头具有优越的特性。用于各类滑动触头、电位计、微电机电刷等
11	银	Ag	960	418	10.5	1.67	30-90	200～360	导电导热性好，接触电阻低，加工性能好，抗硫化性差，有时变化，表面不会氧化。用于继电器、电话机、小电流接触器主触头及辅助触头

续表

序号	品种	代号	熔点(℃)	热导率[W/(m·K)]	密度(g/cm³，不小于)	电阻率(μΩ·cm，不大于)	硬度 软-硬 HB	抗拉强度(MPa)	特性和用途
12	细晶银	$AgNi_{0.15}$	960	418	10.5	180	40-100	220～360	性能与纯银相似，但晶粒细小，强度和耐腐蚀性能高于银。在应用中出现较高温度时可用它代替银
13	银铜	$AgCu_3$ $AgCu_5$	940 910	385 335	10.4 10.4	1.92 1.96	45-115 60-135	250～470 270～550	机械强度高，耐磨损性好，不易转移、价廉但抗氧化和耐蚀性差。在接触压力小的场合下使用，接触电阻不稳定。用于微电机换向器、集电环等的滑动部件及接触压力较大的开关触头
14	银镁镍	$Ag(Mg+Ni)_{0.5}$	960	418	10.5	2.32	40-170	220～400	能在软态下成型，通过内氧化，可提高硬度，且不再随时间而变化，对硫敏感与纯银相同，不宜与铜及铜合金覆层。用于微型继电器簧片，苛刻温度负载的触头

表 10-2　常用中负载触头材料的品种、性能及特点和用途

序号	品种	代号	熔点(℃)	热导率[W/(m·K)]	密度(g/cm³，不小于)	电阻率(μΩ·cm，不大于)	硬度 软-硬 HB	抗拉强度(MPa)	特性和用途
1	银镍 银镍石墨	$AgNi_{10}$ $AgNi_{10}C_{2\sim3}$	960 960	320～350 260	10.0 9.5	2.1 2.5	55-75 50-70	220～400	电弧运动特性好，接触电阻低而稳定，在直流下材料迁移少。用于低压接触器、继电器、特别适用于直流电器、家用电器
2	银铁	$AgFe_7$	960		10.0	2.0	55-70		抗熔焊性比 AgNi 好，但耐腐蚀性差，特别是潮湿地区易锈蚀。用于低压接触器、断路器等
3	银铜	$AgCu_{10}$ $AgCu_{28}$	870 779	335 335	10.3 10.1	2.0 2.1	70-150 100-175	280～550 300～650	机械强度高，耐磨损性好，转移少，只适宜接触压力大的场合使用，$AgCu_{28}$ 可达弹性硬度，抗氧化性差。用于接触压力大的开关触头

续表

序号	品种	代　号	熔点(℃)	热导率[W/(m·K)]	密度(g/cm^3，不小于)	电阻率($\mu\Omega$·cm，不大于)	硬度 软-硬 HB	抗拉强度 (MPa)	特性和用途
4	银氧化镉	$AgCdO_{10}$(I.O) $AgCdO_{10}$_T(I.O) $AgCdO_{10}$(P.M) $AgCdO_{12}$(I.O) $AgCdO_{12}$_T(I.O) $AgCdO_{12}$(P.M)	960 960 960 960 960 960	290 290 290 290 290 290	10.0 10.0 9.8 9.9 9.9 9.7	2.1 3.2 2.4 2.3 3.4 2.6	66-120 70-125 56-66 69-122 70-125 58-68		优良的抗熔焊及耐损蚀性，熄弧性能好，接触电阻较稳定。用于微型开关、低压接触器、低压断路器、大电流继电器等
5	银氧化锡	$AgSnO_2$(8)(P.M) $AgSnO_2$(10)(P.M) $AgSnO_2$(7)In_2O_3(3)(I.O) $AgSnO_2$(8)In_2O_3(4)-T(I.O) $AgSnO_2$(10)In_2O_3(4)-T(I.O) $AgSnO_2$(11.5)WO_3(0.5)	960 960 960 960 960		9.7 9.6 9.8 9.75 9.7 9.7	2.5 2.7 3.3 3.4 3.5 2.5	54-67 58-70 76-129 78-130 84-135 84-135		热稳定性好，抗熔焊性比AgCdO更佳，在直流下材料迁移少，内氧化速度缓慢，表面易聚集SnO_2，温升高，可通过添加W.Mo氧化物可降低温升。用于大、中容量交直流接触器，过电流继电器，低压开关等
6	银氧化锌	AgZnO(8)(P.M) AgZnO(8)(I.O) AgZnO(8)-T(I.O) AgZnO(10)(P.M) AgZnO(10)(I.O) AgZnO(10)-T(I.O)	960 960 960 960 960 960	330 330	9.5 9.7 9.7 9.4 9.55 9.55	2.6 3.2 3.4 2.7 3.4 3.5	61-71 66-120 70-125 64-78 72-127 76-129		抗熔焊，分断特性好，燃弧时间短，表面有拒氧化现象，用于中小容量断路器，漏电保护开关
7	银氧化铜	AgCuO(10)(P.M) AgCuO(10)(I.O) AgCuO(10)-T(I.O)	960 960 960		9.4 9.6 9.6	2.5 2.5 3.5	53-68 66-120 70-125		抗熔焊，耐损蚀。用于中等容量断路器和大电流接触器
8	多元银金属氧化物	Ag(CdO + SnO_2 + MeO)$_{16}$	960		9.7	3.7			综合了AgCdO及$AgSnO_2$的优点，既抗熔焊，又能满足温升的要求。用于交直流大电流接触器，过电流继电器

注　(I.O)为内氧化，(P.M)为粉末冶金。

表 10-3　常用重负载触头材料的品种、性能及用途

序号	品种	代　号	熔点（℃）	热导率［W/(m·K)］	密度（g/cm³，不小于）	电阻率（μΩ·cm，不大于）	硬度 HB（不小于）	抗拉强度（MPa）	特性和用途
1	银镍	$AgNi_{30}$	960	240～320	9.7	2.7	65	330～530	电弧运动特性好，通断时材料迁移少，其氧化物为绝缘物，特别适用于狭小外壳中通断，抗熔焊性差，常与 AgC 配对。用于直流快速开关、电源开关、电磁开关、各种低压断路器
2	银石墨	AgC_3Q	960	200～250	9.10	2.2	35		在接通短路电流时，抗熔焊性最好，接触电阻小，有自润滑作用，滑动性能好，抗电弧烧损性差。用于铁路信号继电器、大型调压器、电机电刷、高压磁吹断路器、电阻器的滑动部件等
		AgC_3P	960	200～250	9.10	2.4	25		
		AgC_5Q	960	200～250	8.60	2.5	35		
		AgC_5P	960	200～250	8.60	3.2	25		
3	银钨	AgW_{40}	90	290～330	12.40	2.6	85		高熔点，高硬度，耐损蚀，抗熔焊，材料转移少，通断过程中产生氧化物，随开闭次数增加，接触电阻剧增，以至温升超过标准，银碳化钨的接触电阻比 AgW 稳定。用于漏电保护开关、电动机保护开关、直流保护开关、直流快速开关、中压及高压压缩空气断路器
		AgW_{50}	960		13.15	3.0	105		
		AgW_{70}	960		14.90	3.8	150		
		AgW_{80}	960		16.10	4.6	180		
4	银碳化钨	$AgWC_{40}$	960	200	11.50	4.0	130		
		$AgWC_{65}$	960		13.00	5.0	160		
5	银碳化钨石墨	$AgWC_{12}C_3$	960		9.30	3.2	60		石墨的添加，可进一步防止 WC 的氧化，但降低了耐电弧烧损特性。与 AgW 配对用于各种低压断路器触头
		$AgWC_{12}C_3Ni_1$	960		10.3	2.8	80		
6	铜钨	CuW_{60}	1 083	120～230	12.75	3.7	140		高熔点，高硬度，切削性能好，抗熔焊极好，但比 AgW 更易氧化，只能在油、SF_6 等介质中使用，不能在空气中使用。用于中压油断路器、高压油断路器、SF_6 断路器、变压器用有载分接开关的弧触头
		CuW_{80}	1 083	120～230	15.15	5.0	220		
7	铜碳化钨	$CuWC_{15}$	1 083		9.15	2.80	80		抗熔焊，耐损蚀，由于 WC 分解生成 CO 和 CO_2 可保护其不受氧化。用于空气断路器代替部分 AgW
		$CuWC_{20}$	1 083		9.35	2.80	80		
		$CuWC_{50}$	1 083		12.5		140		
8	铜钨/铜铬自力型触头	CuW_{70} $CuCr_{0.6}$	1 083		14.5 8.0	4.1 2.15	175 110		本身具有弹力，不需外加弹簧，与铜钨特性相同。用于 SF_6 高压断路器
9	铜石墨	CuC_3	1 083		7.8	2.40	40		导电导热性好，抗熔焊，有自润滑特性，价廉，可部分代替 AgC。用于电动机换向器、微电机电刷、空气断路器
		CuC_5	1 083		7.0	3.40	30		

表 10-4　常用真空触头材料的品种、性能与用途

序号	名称	代号	主要成分的质量分数（%）	含气量的质量分数（$\times10^{-6}$，不大于）		密度（g/cm^3，不小于）	电导率（MS/m，不小于）	硬度 HB（不小于）	用　途
				氧	氮				
1	铜铋银	CuBiAg	Bi：0.4～0.7 Al：2.2～2.6 Cu 余量	8	3	8.90	50.0	45	10 kV 以下真空断路器及负荷开关
2	铜铋铝	CuBiAl	Bi：0.15～0.5 Al：9.5～11 Cu 余量	10	3	7.40	7.7	133	10 kV 以下真空断路器及负荷开关
3	铜铋铈	CuBiCe	Bi：0.4～0.8 Ce：0.1～0.15 Cu 余量	22	3	8.80	47.5	45	10 kV 以下真空断路器及负荷开关
4	铜铬	Cu-Cr	Cr：47～52 Cu 余量	500	50	7.80	15.0	80	35 kV 以下真空断路器及负荷开关
5	锑铋镶嵌合金	SbBi	Bi：9.5～10.5 Sb 余量	50		6.60	20.0		1140 V、600 A 以下真空接触器
6	铜铁镍钴	CuFeNiCo	Fe：2.5～3.5 Ni：3.5～4.5 Co：2.5～3.5 Cu 余量	20		8.85	10.5	80	1140 V、600 A 以下真空接触器
7	铜钨碳化钨	$Cu(W+WC)_{70}$	Cu：28～32 C：1～2 W 余量	60	2①	13.50	20.3	200	6 kV 以下真空接触器
8	铜钨锑	CuWTe-T	W：70 Te：1～2 Cu 余量	50	8	14.2	22.0	140	1～10 kV 真空接触器及负荷开关（630 A 以下）

① 为氢的质量分数。

第二节　电触头材料的选用

一、电气条件

要根据电器开关的特性功能进行选材。特性功能包括：电流种类和大小、电

压种类和高低、短路开断能力、负载大小、电弧大小和电寿命等电气条件。不同电气条件下的电触头材料的选择见表 10－5。

表 10－5　不同电气条件下的电触头材料的选择

电　气　条　件	选　用　材　料
额定电流 100 A 以下的接触器	Ag-Fe
额定电流 100 A 以上及 100 A 以下弹跳现象较严重的接触器	Ag-Cd0
额定电流 60 A 以上，分断电流 3 000 A 以下断路器	烧结、挤压法 Ag-Cd0
额定电流 400 A 以下，分断电流 20 000 A 以下的断路器	Ag-C 与 Ag-Ni 非对称触头对
额定电流 600 A 以上，分断电流 25 000 A 以上的断路器	Ag-W、Ag-WC
额定电流在 250 A 以上，分断电流在 15 000 A以上的断路器	可采用主弧两触头 主触头 Ag、Ag-Ni、Ag-Cd0 弧触头 Ag-W、Cu-W
线路保护开关，铁路信号继电器要求确保安全不得熔焊	烧结、挤压法 Ag-C、Ag-W、Ag-WC、Ag-Cd0
磁吹式开关： 磁场较弱时 磁场较强时 分断速度较快 分断速度较慢	 内氧化法 Ag-Cd0 烧结　挤压法 Ag-Cd0 烧结法 Ag-Cd0 内氧化法 Ag-Cd0
直流条件下使用时	可选用导热系数不同的两种材料分别制成阳极和阴极触头，导热系数高的材料作阳极，以防材料从阳极向阴极的正向转移
在有电感的回路或因触头运动速度快，分断时将出现高的电压峰值	选用电磨损小的触头材料

二、机械条件

要根据开关电器的动作原理、接触力大小、闭合力大小、断开与闭合频率和机械寿命等机械条件进行选材。

(1) 高压断路器的闭合力大，触头开距大，电弧强，触头材料将承受大的机械冲击力和强电弧的急热急冷作用，一般钨粒度细(1 μ 左右)的银-钨或铜-钨触头

材料易产生龟裂与破损。可选用钨粒度较粗的高韧性材料，虽其电磨损稍大，但可消除触头碎裂的故障。

(2) 真空接触器操作频繁，且常在小电流下分断。故应选用电磨损与截流均较小的电触头材料，如钨-铜铋锆和铜铁镍钴合金等。较大容量的真空接触器则宜选用不含钨的触头材料，因钨的剩余电流大，限制了它的电流分断能力。

(3) 真空断路器用来分断大的短路电流或过载电流，希望有较小的截流，主要要求具有足够大的抗熔焊和电流分断能力。当分断容量在 100 MV·A 左右时，一般选用铜铋铈合金。在分断容量更大的真空断路器中，则选用灭弧能力更强的电触头材料，如铜锑硒合金和铜铋银合金等。

(4) 对于轻负载触头，当条件不允许提高接触压力时，应选用贵金属合金作触头材料，但如果接触压力较高，则应选用硬度较高并能耐机械磨损的触头材料，以延长使用寿命。

(5) 触头最大间隙受条件限制不能增大时，应选用灭弧力较好的电触头材料，避免产生持续电弧。

三、环境条件

要根据电器开关所处的环境温度和湿度，触头周围是否有粉尘、易燃易爆气体和腐蚀性气体等环境条件进行选材。

(1) 在高湿度下使用的电触头材料，应选用耐腐蚀性能好的铂基、钯基、金基和银基合金等。

(2) 在硫化气体中，应选用耐腐蚀能力较强的铂基合金或钯银合金。

(3) 在汽油及其他油料气氛中，选用钨触头。

(4) 小电流触头上的尘埃，影响良好的接触。软质触头材料易黏附尘埃，且不易清除，因此应选用硬度较高的触头材料。

第三节　电触头的尺寸

电触头的尺寸决定于额定电流的大小。在额定电流相等的情况下，则应考虑开关操作频率、触头运动速度、触头间隙、接触压力等因素，如操作频率高，应加大尺寸，额定电流与电触头尺寸的关系见表 10-6。

表 10-6　额定电流与触头尺寸关系

额定电流（A）	交流接触器			
	厚度（mm）	面积（cm^2）	参考尺寸	
			圆形直径（mm）	正方形边长（mm）
10	1.0	0.15～0.20	4.5～5	4～4.5
20	1.0～1.5	0.3～0.5	6～8	5.5～7
40	1.5～2.0	0.5～0.8	8～10	7～9
50				
60	1.5～2.0	0.8～1.2	10～12	9～11
100	2.0～2.5	1.2～2.0	12～16	11～14
150	2.0～2.5	2.0～2.5	16～18	14～16
200				
250	2.5～3.0	2.5～3.2	18～20	16～18
400				
600	3.0～4.0	5.7～7.0	27～30	24～27
额定电流（A）	自动开关			
	厚度（mm）	面积（cm^2）	参考尺寸	
			圆形直径（mm）	正方形边长（mm）
10				
20	1.0～1.5	0.3	6	5.5
40				
50	1.5～2.0	0.35～0.5	6.5～8	6～7
60				
100	2.0～2.5	0.6～1.0	8.5～11	7.5～10
150				
200	3.0～4.0	2.0～2.6	16～18	14～16
250				
400	3.0～4.0	2.0～3.2	18～20	16～18
600	3.0～4.0	3.2～4.0	20～22.5	18～20

注：(1) 表列尺寸适用于银基触头。

(2) 触头形状如果是梯形或长方形时，可根据面积推算。

(3) 动触头表面带弧形，静触头为平面形。

第四节　电触头接触形式

触头接触形式有以下三种：

(1) 点接触。指球面对平面的接触。在小接触压力情况下，点接触的接触电

阻较小。如加大接触压力，接触电阻的下降并不很快。一般继电器等小功率电器选用。

（2）线接触。指圆柱与平面的接触。随着压力的增大，使接触面和接触数增多，故接触电阻下降较快。一般断路器等电器选用。

（3）面接触。指两平面间的接触。在大接触压力范围内，面接触电阻最小。一般断路器等电器选用。

第五节　电触头的焊接

电触头材料的接合方法有机械紧固法，硬钎焊法和焊接法为主。

不同的触头材料应选用不同的焊料和焊剂，为了提高焊接质量，可在真空或保护气体中焊接。电触头的焊接方法、特点及适用范围见表 10－7；几种常用焊料及其适用范围见表 10－8；几种常用焊剂及应用举例见表 10－9。

表 10－7　电触头的焊接方法、特点及适用范围

焊接方法	简要工艺过程	特　点	适用范围
火焰钎焊（或称银焊）	用氧-乙炔、煤气-空气、酒精-空气、甲苯-空气等作加热热源，加热工件上的焊料与焊剂；熔化后，加上另一工件，使互相连接	工艺过程简单，不需特殊设备，费用低。其缺点是劳动条件差，生产率低，焊接质量不稳定，被焊工件受到退火作用，硬度下降的区域较大	不宜采用其他焊接方法的导形工件
电阻焊（或称点焊）	把被焊工件叠放在两个铜电极之间，施加一定压力，并通入大电流。由于工件间接触电阻所产生的热量，使接触面熔化而焊接	操作过程简单，生产效率高，可进行自动或半自动操作。但对工件表面要求高，要求设备的电压和电极压力稳定，设备投资较大	薄片或厚薄相差较大的小型工件
电阻钎焊	同电阻焊相似，但在被焊工件之间，加上焊料和焊剂，用石墨电极加压通电，使焊料熔化而焊接	焊接质量好，劳动强度和操作条件比火焰钎焊大为改善，生产效率高	有规则工件
高频钎焊	把高频电流通入感应线圈，利用被焊工件的涡流损耗与磁滞损耗所产生的热量，使焊料迅速熔化而焊接	加热快、焊接质量好，劳动生产率高，但设备投资大，使用和维护要求高	有规则工件
氢气保护钎焊	把焊料放在被焊工件之间，放入氢气炉加热，使焊料熔化，把工件焊接。冷却后，推出炉外	焊接质量和劳动条件比火焰钎焊好，劳动生产率高	任何形状的大工件

表 10-8　常用的焊料及适用范围

名称	牌号	化学成分（%）			熔化温度（℃）		电阻率（$\mu\Omega \cdot m$）	特性及适用范围
		银	铜	锌	固相线	液相线		
25%银焊料	HLAgCu40-35 料 302	25	40	余	745	775	0.069	湿润性较好，流动性好，适用于铜及铜合金的焊接等
45%银焊料	HLAgCu30-25 料 303	45	30	余	660	725	0.097	机械强度较高，湿润性和流动性较好，适用于银、银钨、银镍、银铁等
50%银焊料	HLAgCu34-16 料 304	50	34	余	690	775	0.076	机械强度和塑性较好，湿润性好，适用于银、银镍、银钨、银铁等
65%银焊料	HLAgCu20-15 料 306	65	20	余	685	726	0.086	有较好的湿润性和流动性，适用于银氧化物和银钨等
70%银焊料	HLAgCu26-4 料 307	70	28	余	750	795	0.022	导电导热性好，适用于银铜复合材料，真空电器用铜合金触头等
72%银焊料	HLAgCu28 料 308	72	28	—	750	795	0.022	导电导热性好，特别适用于真空电器用铜合金触头
铜磷焊料	HLAgCu80-5 料 204	15	余		640	815	0.120	有较好的塑性和湿润性，适用于铜、铜钨、银钨
铜磷焊料	HLAgCu70-5	25	余		645	810	0.180	湿润性和塑性较好，导电性差，适用于铜钨、银石墨

注：HL×××为冶金部牌号，料×××为机电部牌号。

表 10-9　常用的焊剂及适用范围

序号	牌号及主要组成（%）	特性及应用范围
1	剂 101 KBF_4 70、HBO_3 30	熔点约 500 ℃，呈弱酸性，能有效地溶解各种氧化物，促进焊料的流动性。适用于银合金和铜合金触头的焊接

续表

序号	牌号及主要组成(%)	特性及应用范围
2	剂 101　30， $Na_2B_4O_7$ 70	能溶解焊件表面氧化物，去除表面的氧化膜，提高湿润性，适用于银氧化物和其他银基合金触头
3	剂 101　38， KBF_4 62	具有很强的去除焊件表面氧化物能力，并有良好的湿润性，适用于银钨、银碳化钨触头的焊接
4	剂 102 KBF_4 23、KF42、B_2O_3 35	能溶解焊件表面的氧化物，改善湿润性，适用于银石墨，银镍触头的焊接
5	粉 301 $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ 18 H_2BO_3 77，$AlPO_4$ 5	熔点约 650 ℃，呈酸性，能溶解氧化铜和氧化亚铜，适用于铜和铜合金触头的焊接
6	KBF_4 42，$KF_{42} \cdot H_2BO_3$ 18	具有很强的去除焊件表面的氧化膜能力，从而提高湿润性，主要适用于铜钨触头的焊接

第六节　银基电触头

一、触头符号及其标注方法

触头符号表示方法有触头材料的化学符号表示法及触头的代表符号表示法两种。

1. 化学符号表示法

触头按其制造工艺分为合金型及弥散混合物(陶瓷冶金法)两种，一般整体都是同一材料。近年来为了充分利用贵重金属——银，节约贵金属，国内生产厂家已从国外引进了双层及三层复合触头的制造工艺技术及设备。这类化学符号的表示法如下：

(1) 合金触头材料。将有关化学元素并列标出，如 AgCu、AgCE 等。

(2) 弥散混合物类型触头材料。将有关化学元素之间加一短划标出，如 Ag-CdO 等。

(3) 多层金属符合触头材料。将主层的有关化学元素之间加一短划，在其后用斜划分开，标出复合层材料的化学元素，如 Ag-CdO/Ag，Ag-CdO/Cu 等。

2. 银基触头代表符号表示方法

(1) 二元组分触头标注方法，方法如下。

(2) 三元组分触头及多元组分触头标注方法，方法如下。

(3) 各种银基触头的代表符号见表 10-10。

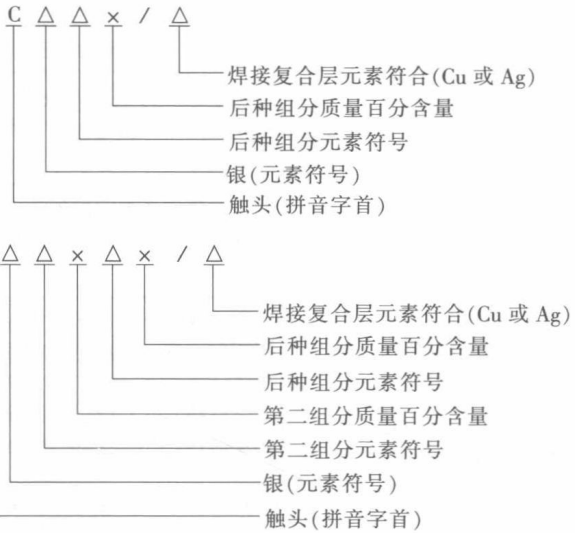


表 10-10　各种银基触头代表符号

触头材料名称	成分含量(%)	触头代表符号
银铁(7)	Fe(7%)	CAgFe(7)
银镍(10)	Ni(10%)	CAgNi(10)
银镍(30)	Ni(30%)	CAgNi(30)
银石墨(5)	C(5%)	CAgC(5)
银钨(30)	W(30%)	CAgW(30)
银钨(40)	W(40%)	CAgW(40)
银碳化钨(50)	WC(50%)	CAgWC(50)
银镉(5)	Cd(5%)	CAgCd(5)
银铜(10)	Cu(10%)	CAgCu(10)
银氧化镉(12)	CdO(12%)	CAgCdO(12)
银氧化镉(15)	CdO(15%)	CAgCdO(15)
银氧化铜(8)	CuO(8%)	CAgCuO(8)
银氧化锌(8)	ZnO(8%)	CAgZnO(8)
银氧化锡(10)	SnO_2(10%)	CAgSnO_2(10)
银氧化锡(6)氧化铟(2)	SnO_2(6%)In_2O_3(2%)	CAgSnO_2(6)In_2O_3(2)
银镍(29)石墨(1)	Ni(29%)C(1%)	CAgNi(29)C(1)
银碳化钨(10)石墨(1)	WC(10%)C(1%)	CAgWC(10)C(1)

二、银基电触头基本形状、符号及尺寸

银基电触头有平面及球面圆形薄片触头、平面及弧面矩形薄片触头、平面梯形薄片触头、平面及球面圆形铆接触头四种基本形状。

银基电触头的弧度半径与触头直径、宽度及弧面高度的关系，圆形、矩形及梯形薄片触头尺寸允许公差，圆形、矩形及梯形薄片触头尺寸标注方法，铆接触头尺寸标注方法等详见国标 GB5587—1985。

第十一章　熔体材料

第一节　熔体材料的种类与选用

熔体材料按使用场合和性能的要求不同，分为一般熔体、快速熔体和特殊熔体三种。其特点、性能与选用如下。

一、一般熔体

具有长期载流能力，故障时能在规定的时间内分断故障电流。其材料是随保护对象和功能要求而定。例如，保护电力线路用的熔体，若用来分断较小的过载电流和不很大的短路电流时，可采用锌或铅-锡类合金低熔点材料为熔体；反之，则采用添加适量的冶金效应材料金属铜作熔体。保护电动机和电热设备的熔体，要求具有较大的延时动作特性。保护电动机回路的小容量熔体，多用焊有低熔点金属的高熔点金属丝所构成的二元熔体。大容量的后备保护熔体有时用高熔点金属如铜等通过精密的形状、尺寸设计来达到。保护电热设备用的熔体，可采用对温度反应敏感的合金或化学物质作熔体。

二、快速熔体

在正常工作条件下，其功率损耗较低；在过载或短路情况下，则能迅速准确地切断故障电流，开断电流能力一般大于 50 kA(有效值)，出现在熔断器两端的电弧电压不大于电路中硅元件的击穿电压等。用作快速熔体的材料应具有优良的导电性和导热性，从室温到熔点和从熔点到沸点的热容量、熔化潜热及汽化潜热小，抗氧化稳定性好，机械加工性能好，与石英砂相容性好。银、铝等纯金属为常用快速熔体材料。

三、特殊熔体

特殊熔体的特点是：在大于 100 ℃的温度下，熔体的电阻率呈现非线性突变。金属钠、钾适用于制作自复熔断器的特殊熔体材料。

此外，材料质量对熔断器的特性和精度影响也很大，往往同一产品用国产的纯铜带为熔体，弧前时间-电流特性沿电流方向的误差为±15%，但进口的同规格铜带，弧前时间-电流特性误差则能控制在±10%以内，进口铜带的材料尺寸精度高，性能稳定，铜带的米电阻普遍比国产的米电阻低，用它对产品的温升、功耗也

能有所改善。

第二节　纯金属熔体材料

常用的纯金属熔体材料有银、铜、铝、锡、铅和锌等。在特殊情况下也采用其他金属作熔体材料。常用纯金属熔体材料及物理性能见表 11－1。

表 11－1　常用纯金属熔体材料及物理性能

物理性能	铝	银	铜	锌	铅	锡
密度(g/cm^3)	2.7	10.5	8.93	7.14	11.34	7.30
熔点(℃)	660.1	960.8	1 083	419.5	327.4	231.9
沸点(℃)	2 330	2 210	2 590	907	1 740	2 450
比热容(0～100 ℃)[J/(kg·K)]	916	226	386	393	130	226
热导率(0～100 ℃)[W/(m·K)]	238.6	418.7	393.6	111	34.3	48.1
熔化潜热(kJ/mol)	10.5	11.4	13.0	7.2	5.0	7.1
汽化潜热(kJ/mol)	291.4	251.2	304.8	115.1	178.8	293.0
线膨胀系数($\times10^{-6}℃^{-1}$)	23.5	19.1	17.0	31	29	23.5
电阻率(20 ℃)($\mu\Omega\cdot cm$)	2.69	1.6	1.67	5.92	20.6	12.8
高温电阻率($\mu\Omega\cdot cm$)/℃	4.78/200 7.30/400	4.7/500 7.6/900	4.6/500 8.1/1 000	11.0/200 16.5/400	36.0/200 50.0/300	16.8/100 23.0/200
热电常数 C ($\times10^8 A^2S/cm^4$)	4.42	8.00	11.72	1.3	0.15	0.46
密度(g/cm^3)	8.90	0.97	19.3	8.64	9.80	6.24
熔点(℃)	1 453	97.8	3 380	320.9	271	450
沸点(℃)	3 000	883	5 930	765	1 680	990
比热容(0～100 ℃)[J/(kg·K)]	452	1 235	134	233	125	205
热导率(0～100 ℃)(W/m·K)	87.9	125.6	165	92.1	7.95	5.86
熔化潜热(kJ/mol)	17.7	6.7	46.9	6.4	10.9	17.6
汽化潜热(kJ/mol)	374.3	97.1	736.9	99.6	179.2	107.6

续表

物理性能	铝	银	铜	锌	铅	锡
线膨胀系数($\times10^{-6}℃^{-1}$)	13.3	5	4.5	31	13.4	1.7//晶 27.5⊥晶
电阻率(20 ℃)($\mu\Omega\cdot$cm)	6.84	4.6	5.5	7.4	11.6	400×10^3
高温电阻率($\mu\Omega\cdot$cm)/℃	34.2/500 45.5/200	—	33/1 000 100/3 000	9.6/100 18.0/300	152/100 260/250	556×10^3/ 液态
热电常数 C ($\times10^8A^2S/cm^4$)	—	—	—	—	—	—

注　热电常数 $C=\sum\int i^2dt$，即熔化单位体积的熔体所需要的能量。

1. 银

银具有高的电导率和热导率。银质熔体无论是在空气中还是在石英砂中均能良好地承受长期通电和连续过载的作用。其电导率能在接近氧化的高温下也不显著降低，而且在高于 180 ℃的温度下能分解成纯银；银的耐腐蚀性好；与石英砂相容性好；焊接性和加工性也好，能制成精确尺寸和复杂外形的熔体，与触头焊接方便；在受热过程中，银能与其他金属形成共晶但不损害其稳定性；从性能上讲，银是最合适的熔体材料，但其属于贵重金属，资源很少。

由于银具有以上优点，虽然价格较贵，在电力和通信系统中，仍广泛用作快速熔断器和某些高质量、高性能的熔断器的熔体。

2. 铜

铜具有良好的导电、导热性能和可加工性，机械强度高，价格远比银低，铜质熔体熔化时间短，金属蒸气少，有利于灭弧。但铜质熔体在温度较高时易氧化，其熔断特性不够稳定，故对周期性变化的负载特别敏感。在周而复始的负载下，铜质熔体到熔化所需要的全部时间要比它连续通过同样电流所需要的时间短得多，使用寿命也远不如银质熔体。可通过采用将铜质熔体置于石英砂中或表面镀银等措施，使上述问题稍加改善。铜的热电常数比银大，不宜作快速熔断器的熔体，宜作精度要求较低且是保护一般电力回路熔断器的熔体。

3. 铝

铝的主要优点是价格低廉，在地壳中储量丰富，其导电性能仅次于银和铜，热电常数也比银和铜低，仅为银的一半，而熔断器的截流能力是与材料本身的热电常数成反比的，产品的截流指标将高于用银或铜为熔体的产品。但其耐氧化性能好，熔断特性较稳定，在某些场合可部分代替纯银作熔断器的熔体，铝熔体与铝触头的焊接问题和铝触头(铝触刀)表面的问题，目前国内均已解决，因此铝特别适合作快速熔断器的熔体，如 RS_5 系列快速熔断器就是采用铝质熔体。

对于用铝作一般线路保护用的熔断器的熔体，为了克服熔体表面上的氧化膜

所造成熔断器在小过载电流范围内熔断特性不稳定，可在熔体表面覆上一层低熔点的锌，锌的长度不超过熔体轴线方向尺寸的40%，厚度不小于铝熔体厚度25%。此外，也可采用静电喷涂方法在铝质熔体覆上一层为其质量1%～25%的碱金属或碱土金属氢化物。

4. 锌、锡和铝

锌、锡和铅的机械强度较低、热导率小、熔化时间长，用它们可大大降低对其他结构元件热稳定的要求，使熔断器的成本降低，但这些材料在贮存或正常运行中都会迅速老化。适宜用作保护小型电动机用的熔体，也可焊在银或铜丝上做成二元熔体用于延时熔断器中。

5. 钾、钠

钾和钠在高于熔点的温度下，其电阻具有相似的非线性的特性，从技术性能上讲，均可作自复熔断器(永久熔断器)的熔体材料，但从操作方面考虑，纳比钾更实用些。我国和日本均用钠制作自复熔断器的熔体。

6. 钨丝、镍铬丝和康铜丝

钨丝、镍铬丝和康铜丝的电阻率高，但尺寸精度好、机械强度也好，适合作各种小容量熔断器的熔体。

铜熔丝的额定电流及熔断电流见表11－2。

表11－2　铜熔丝的额定电流及熔断电流

直径 (mm)	标称截面 (mm^2)	额定电流 (A)	熔断电流 (A)	直径 (mm)	标称截面 (mm^2)	额定电流 (A)	熔断电流 (A)
0.234	0.043	4.7	9.4	0.70	0.385	25	50
0.254	0.061	5	10	0.80	0.5	29	58
0.274	0.059	5.5	11	0.90	0.6	37	74
0.295	0.068	6.1	12.2	1.00	0.8	44	88
0.315	0.078	6.9	13.8	1.13	1.0	52	104
0.345	0.093	8	16	1.37	1.5	63	125
0.376	0.111	9.2	18.4	1.60	2	80	160
0.417	0.137	11	22	1.76	2.5	95	190
0.457	0.164	12.5	25	2.00	3	120	240
0.508	0.203	15	29.5	2.24	4	140	280
0.559	0.245	17	34	2.50	5	170	340
0.60	0.283	20	39	2.73	6	200	400

第三节　低熔点合金熔体材料

低熔点合金熔体材料通常由不同成分的铋、镉、锡、铅、锑、铟等组成，熔点一般为60～200 ℃，低熔点合金材料的成分和熔点见表11－3。

表 11-3　低熔点合金材料的成分和熔点

化学成分的质量分数(%)					熔点(℃)
Bi	Pb	Sn	Cd	其他	
20	20	—	—	Hg60	20
45	23	8	5	In19	47
49	18	12	—	In21	57
50	27	13	10	—	70
52	40	—	8	—	92
53	32	15	—	—	96
54	26	—	20	—	103
55.5	44.5	—	—	—	124
56	—	40	—	Zn4	130
29	43	28	—	132	
57	—	43	—	138	
—	32	50	18	145	
50	50	—	—	160	
15	41	44	—	164	
33	—	67	—	166	
—	—	67	33	177	
—	38	62	—	183	
20	—	80	—	200	

锡、铅、铋和镉等为主要成分的共晶型低熔点合金，它对周围温度变化反应敏感，适合做保护电热设备用的各种熔断器的熔体，如温度熔断器。用它们制作熔体时往往需借助附加弹簧等所产生的机械力作用来提高熔断器动作的灵敏度，同时熔体本身还要考虑应有相应的机械强度。

铅熔丝的额定电流及熔断电流见表 11-4、表 11-5。

表 11-4　铅熔丝的额定电流及熔断电流

(熔丝成分：铅≥98%，锑 0.3%～1.5%)

直径(mm)	标称截面(mm^2)	额定电流(A)	熔断电流(A)	直径(mm)	标称截面(mm^2)	额定电流(A)	熔断电流(A)
0.08	0.005	0.25	0.5	0.98	0.75	5	10
0.15	0.018	0.5	1.0	1.02	0.82	6	12
0.20	0.031	0.75	1.5	1.25	1.23	7.5	15
0.22	0.038	0.8	1.6	1.51	1.79	10	20
0.25	0.049	0.9	1.8	1.67	2.19	11	22
0.28	0.062	1	2	1.75	2.41	12	24
0.29	0.066	1.05	2.1	1.98	3.08	15	30
0.32	0.080	1.1	2.2	2.40	4.52	20	40
0.35	0.096	1.25	2.5	2.78	6.07	25	50

续表

直径（mm）	标称截面（mm^2）	额定电流（A）	熔断电流（A）	直径（mm）	标称截面（mm^2）	额定电流（A）	熔断电流（A）
0.36	0.102	1.35	2.7	2.95	6.84	27.5	55
0.40	0.126	1.5	3	3.14	7.74	30	60
0.46	0.166	1.85	3.7	3.81	11.40	40	80
0.52	0.212	2	4	4.12	13.33	45	90
0.54	0.229	2.25	4.5	4.44	15.48	50	100
0.60	0.283	2.5	5	4.91	18.93	60	120
0.71	0.40	3	6	5.24	21.57	70	140
0.81	0.52	3.75	7.45				

表 11-5　铅熔丝的额定电流及熔断电流

（熔丝成分：铅 75%，锡 25%）

直径（mm）	近似类规线号	额定电流（A）	熔断电流（A）	直径（mm）	近似类规线号	额定电流（A）	熔断电流（A）
0.508	25	2	3.0	1.63	16	11	16.0
0.559	24	2.3	3.5	1.83	15	13	19.0
0.61	23	2.6	4.0	2.03	14	15	22.0
0.71	22	3.3	5.0	2.34	13	18	27.0
0.813	21	4.1	6.0	2.65	12	22	32.0
0.915	20	4.8	7.0	2.95	11	26	37.0
1.22	18	7	10.0	3.26	10	30	44.0

第四节　熔体的结构及选用

一、熔体的形状及尺寸

根据额定电流、额定电压及使用类别可设计熔体的形状和尺寸。额定电流在10 A及以下的熔体多采用丝状或等截面矩形狭带状熔体结构，大于10 A的则采用变截面片状结构，圆孔和V型变截面是两种最常用的结构形式。快速熔断器的熔体已由V型变截面逐步趋向采用圆孔。一般熔体，国内外都是采用圆孔或圆孔与V型变截面组合。熔体厚度推荐采用0.3 mm以下。常见熔体结构形状和使用寿命关系见表11-6。

表 11-6　常见熔体结构形状和使用寿命关系

熔体形状		熔体结构	寿命	说　明
线	均匀圆线 均匀扁线 带缺口变截面线	空心螺旋形	长	因应力集中，带缺口，变截面熔体，无论哪种结构型式，寿命均比均匀截面熔体短。熔体结构细小的变形，就可吸收较大的伸长，是直线形熔体最好的结构型式
		绕在实心管上	中	
		直线形	短	熔体结构需要很大的变形才能吸收伸长
带		波浪线 锯齿形	中	这些结构可部分吸收伸长
		绕在实心管上	短	
			最短	此结构形式熔体最易出现热疲劳

二、熔体电流密度的选择

对于有填料结构的铜质熔体，最小变截面处的电流密度宜控制在 100～160 A/mm²；快速熔断器中的银质熔体可达到 500～800 A/mm²；铝质熔体可达到 350～500 A/mm²；熔体厚度一般不超过 0.25 mm，熔体和熔管的间距应大于 3 mm。无填料熔断器中，用户可自行更换熔体，用铅锡丝为熔体的电流密度为 5～10 A/mm²；以变截面锌片为熔体的狭径处电流密度为 10～30 A/mm²。

熔体的电流密度一般可由下式进行估算

$$j^2 t = c \tag{11.1}$$

式中　j——熔体最小截面处的电流密度，A/mm²；

t——熔化时间，其大小是设定的，一般设定的熔化时间越小，计算的 j 值

越符合实际 s；

c——熔体材料的热电常数，A^2S/mm^4。

三、熔体的计算

当熔体为圆形截面时，最小熔化电流为

$$I_{min} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\rho}\tau}d^{1.5} = K_2 d^{1.5} \tag{11.2}$$

式中　I_{min}——最小熔化电流，A；

d——圆截面熔体的直径，mm；

K_2——常数，与熔体材料有关。

实际上，式(11.2)还与熔体的线径的大小有关。

当线径为 0.02～0.2 mm 时

$$I_{min} = \frac{d-0.005}{K_1} \tag{11.3}$$

当线径为 0.2 mm 时

$$I_{min} = K_2 d^{1.5} \tag{11.4}$$

对于处在空气中的熔体，其 K_1、K_2 值可从表 11-7 查得。

表 11-7　与材料有关的常数

材料	铜	银	铅	铝	锌	锡	铜镍合金 3∶2	铅锡合金 2∶1
K_1	0.034	0.031	—	—	—	—	—	—
K_2	80.0	68.9	10.8	59.1	14	12.8	44.4	10.8

若熔体埋在石英砂中，对于线径为 0.1～1.5 mm 的铜熔体有

$$I_{min} = 7.8d^{1.2}\text{(熔体上无锡球时)} \tag{11.5}$$

$$I_{min} = 5.2d^{1.2}\text{(熔体上有锡球时)} \tag{11.6}$$

式中　d——圆截面熔体的直径，mm。

截面为均匀的矩形铜熔体，处在空气中有

$$I_{min} = 150B\delta^{0.5} \tag{11.7}$$

式中　δ——熔体的厚度，mm；

B——熔体的宽度，mm。

对于变截面熔体的最小熔化电流是根据变截面熔体几何尺寸，计算出等效电阻来确定的。

四、熔体长度

熔体长度及变截面的狭径数，主要由熔断器的额定电压及熔断器的结构形式来确定。额定工作电压越高，要求断口数越多，使熄弧后平分在各断口上的恢复电压有所减轻，促使电弧不易重燃，但断口数的增加势必增大电弧总能量，同时熄弧瞬间过电压也相应增大，因此合理地选择狭径数也是非常重要的。

无填料熔断器的熔体长度可由下式估算

$$l = 1.5 + (0.01 \sim 0.035)U \tag{11.8}$$

式中 U——熔断器的额定电压，kV。

以石英砂为填料、截面为圆形的均匀丝状熔体的长度，可由下列经验公式计算，即

$$l = 1.5 + 0.05U \tag{11.9}$$

式中 U——熔断器的额定电压，kV。

以石英砂为填料，变截面状熔体的长度可按下式估算，即

$$l = 20 + (12 \sim 15)n \tag{11.10}$$

式中 n——熔体的狭径数。

实践证明：每个能够承受的最大电压一般为 200～250 V。熔体长度只要满足安装线路最大工频恢复电压值的要求，就应尽可能短，这样将能降低熔断器在开断过程中的过电压，同时对改善传热、散热和缩小熔断器的外形尺寸都很有利。

此外，熔体沿轴线方向至少有一处制成波浪形，使每一通电、停电期间熔体产生的膨胀、收缩而导致的热应力减少，提高熔体耐受过电流能力。

常见熔体结构形状和使用寿命关系见表 11－6。从表中可知：线状熔体以空心螺旋形结构最理想，片状熔体以波浪形、锯齿形结构较好，因为它们能够吸收熔体在热胀冷缩中的部分变形。

第十二章　电碳材料及其制品

第一节　电碳材料性质及主要用途

一、石墨的性质

石墨是一种天然出产的结晶形碳，如铁黑色或深钢灰色，质软具有滑腻感，成叶片状、鳞片状和致密块状，可沾污手指成灰黑色金属光泽，能导电，可用作抗磨材料和润滑剂；也可用于制造坩埚、电极、干电池等，高纯度的石墨可用作原子反应堆的减速剂。胶体石墨润滑剂的性能和用途见表 12－1。

表 12－1　胶体石墨润滑剂的性能和用途

名称	代号	石墨粉含量（质量分数）(%)	灰分含量（质量分数）(%)	主 要 用 途
胶体石墨粉剂	F—1 F—2 F—3	≥99 ≥98.5 ≥98	≤1 ≤1.5 ≤2	耐高温润滑剂基料；精密铸件砂；金属合金原料及粉末冶金原料；内燃机活塞干膜润滑剂；无线电碳膜原料；造船业高压蒸汽管路垫片涂料，电器业石墨阳极
胶体石墨油剂	y—1 y—2 y—3	≥24 ≥24 ≥24	≤1.5 ≤1.5 ≤2	金属零件减摩润滑剂；高转速机件润滑剂；航空润滑脂基料；锌铝合金铸模润滑剂；玻璃工业涂膜剂；高速切削用油减磨剂；可代替内燃机引擎润滑剂
胶体石墨水剂	S—0 S—1	≥17.5 ≥21	≤1.5 ≤2	电子管工业控制难熔金属丝润滑剂；机电工业压铸薄壁有色金属铸件涂膜剂；螺旋过热泵隔热润滑剂；玻璃工业涂膜剂；非油性高温(60 ℃)润滑材料
试剂石墨粉（纯石墨粉密度 2.09～2.25 g/cm^3）		≥99.9	残渣≤0.1	热力化学工程耐火材料；原电池无感电阻、电极材料；无缝钢管、金属丝延展干膜润滑材料；炸药研磨剂等

二、电碳制品的特性及主要用途

(1) 电碳制品是由碳、碳-石墨、天然石墨电化石墨和金属-石墨质材料等基体材料组成。它具有很多宝贵的特性,有些是金属导体所不具备的。它的基本特性有:能导电,并具有很大的各向异性;能导热,导热系数极高;耐高温,在无氧化性气体介质中能在3 000 ℃的高温下工作;机械强度在2 500 ℃以内随温度的升高而增大;密度小,介于镁与铝之间;温度超过3 500 ℃时,碳直接升华为气体;不与液体金属沾粘;自润滑性能好;化学稳定性好,仅与很强的氧化剂作用;热发射电流密度随温度的升高而急剧增大等。

(2) 电碳制品的主要用途有:电机用电刷;电力机车和无轨电车用碳滑板(块);电器用碳和石墨触头;弧光照明、碳弧气刨和光谱分析用碳和石墨电极;碳电阻;碳和石墨电热元件;电池用碳棒;电真空器件用高纯石墨件等。

第二节　电机用电刷

一、常用电刷的分类、特性及主要用途

电机用电刷按其原材料和制造工艺的不同,可分以下四个类别:

(1) 天然石墨电刷(S)。

(2) 树脂石墨碳刷(S),该类电刷和天然石墨电刷的原材料相同,但采用沥青或树脂等黏结剂。经烘焙或约1 000 ℃烧结而成。该类电刷具有良好的润滑性能和集流性能。适用于运行平稳的中小型直流电机和高速汽轮发电机集电环。

(3) 电化石墨类电刷(D),由炭黑、焦炭和石墨等各种碳素粉末等材料组成。经过约2 500 ℃的高温处理,使各种碳素材料转化为微晶形人造石墨。该类电刷具有优异的换向性能和自润滑性能,对换向器磨损较小。广泛适用于各类交直流电机。

(4) 金属石墨类电刷(J),主要由电解铜和石墨组成。但根据使用需要,也可采用银粉,铅粉等其他金属粉末。该类电刷具有高导电性能和自润滑性能。适用于高负荷、圆周速度低(35 m/s以下)和换向要求不高的电机。

常用电刷的技术性能和应用范围见表12-2。

表 12-2 常用电刷的技术性能和应用范围

类别	材质	型号	电阻率/(μΩ·m)	洛氏硬度(HR)钢球 φ10 mm		一对电刷接触电压降/V	50 h磨损(不大于)/mm	阻力系数(不大于)	工作条件			应用范围
				基本值	载荷/N				额定电流密度/(A/mm²)	允许圆周速度/(m/s)	电刷单位压力/kPa	
石墨电刷	天然石墨	S3	13	77	600	2.1	0.20	0.25	11	25	19.6～24.5	电压为 80～120 V 的直流电机
		S27	21	62	200	2.5	0.15	0.27	10	70	14.7～19.6	汽轮发电机集电环
电化石墨电刷	石墨基	D104	10	100	200	2.4	0.25	0.20	12	40	14.7～19.6	整流正常，负荷均匀，电压为 80～230 V 的直流电机
		D172	13	103	200	2.7	0.20	0.25	12	70	14.7～19.6	整流正常的直流电机、汽轮发电机集电环
	焦炭基	D213	29	89	1 000	2.6	0.15	0.25	10	40	19.6～39.2	有机械振动的直流电机、汽车发电机及牵引电机等
		D214	28	82	1 000	2.4	0.15	0.25	10	40	19.6～39.2	整流困难，电压为 220 V 以上具有冲击负荷的直流电机，如轧钢电机、励磁机
		D215	30	68	1 000	2.8	0.15	0.25	10	40	19.6～39.2	
		D252	15	85	600	2.5	0.15	0.25	12	45	19.6～24.5	整流困难，电压 80～230 V 的牵引电机、直流发电机、功率扩大机
	炭黑基	D308	40	86	1 000	2.6	0.15	0.25	10	40	19.6～39.2	整流困难的直流电机、高速直流电机、小型直流电机和功率扩大机
		D309	39	78	1 000	2.9	0.15	0.25	10	40	19.6～39.2	

续表

类别	材质	型号	电阻率/(μΩ·m)	洛氏硬度(HR)钢球 φ10 mm		一对电刷接触电压降/V	50 h磨损(不大于)/mm	阻力系数(不大于)	工作条件			应用范围
				基本值	载荷/N				额定电流密度/(A/mm²)	允许圆周速度/(m/s)	电刷单位压力/kPa	
电化石墨电刷	炭墨基	D374	44	70	1 000	2.7	0.25	0.25	12	50	19.6～39.2	整流困难的内燃与电力机车牵引电机、高速直流电机、轧钢电机、励磁机等
		D374B	57	83	1 000	2.8	0.25	0.25	12	50	19.6～39.2	
		D374D	45	70	1 000	2.6	0.20	0.25	12	50	19.6～39.2	
		D374F	57	90	1 000	2.7	0.20	0.20	12	50	19.6～39.2	牵引电动机和换向困难的直流电机
		D374L	50	90	1 000	2.9	0.12	0.20	12	50	19.6～39.2	小型高速串励电动机
		D374DL	45	90	1 000	3.4	0.15	0.25	12	50	19.6～39.2	
		D374N	58	83	1 000	2.8	0.20	0.20	12	60	19.6～39.2	机车牵引电动机和主发电机，汽轮发电机和高速励磁机，整流困难，具有机械振动和冲击负荷的轧钢电动机
		D376	60	99	1 000	2.9	0.25	0.25	12	50	19.6～39.2	
		D376N	62	99	600	2.9	0.20	0.20	12	50	19.6～39.2	
金属石墨电刷	不带黏结剂铜石墨	J101	0.12	87	400	0.25	0.80	0.20	20	20	17.64～22.54	低电压、高电流密度、绕线式电动机集电环
		J102	0.23	85	400	0.5	0.40	0.20	20	20	17.64～22.54	
		J113	0.13	70	400	≤0.5	0.60	0.20	20	20	17.64～22.54	
		J151	0.09	71	400	0.30	0.60	0.20	25	20	17.64～22.54	
		J164	0.09	75	400	0.30	0.70	0.20	20	20	17.64～22.54	

二、电刷的理化特性

电刷的理化特性有电阻系数、硬度和灰分杂质。

1. 电阻系数

在非金属中碳是良好的导电材料，但导电性不如金属。电化石墨的最低电阻系数约 7 Ω·mm²/m，与铜相差 400 倍，但在运行中电刷电阻引起的损耗较接触电阻和摩擦引起的损耗小。一般要求电刷的电阻系数波动范围要小，根据其电阻系数值以确定它的适用范围，见表 12-3。

表 12-3　电刷电阻系数值及适用范围

电阻系数值（Ω·mm²/m）	电刷基体类别	适用范围
50 以上	树脂石墨电刷、炭黑基和木炭基电化石墨电刷	换向困难的电机
30～50	炭黑基和木炭基电化石墨电刷	换向困难的电机
20～30	焦炭基电化石墨电刷	一般直流电机
10～20	石墨电刷、焦炭基和石墨基电化石墨电刷	一般直流电机
1～10	含有 25%～50%铜的金属石墨电刷	电压较低的电机
0.5～1	含有 60%～75%铜的金属石墨电刷	低压电机
0.1～0.5	高含铜量金属石墨电刷	低压大电流电机

2. 硬度

电刷的硬度和电阻系数，可以综合反映电刷的使用性能，它们中间之一偏离允许的极限值，就会影响使用效果。如电阻系数偏高而硬度值偏低，易产生较高的磨损；两者都偏高，易导致电压降过高、产生机械性火花；两者都偏低，则使磨损率增大，易出现电气性火花；电阻系数偏低而硬度值偏高，也易产生机械性火花。所以，要选用适当。

3. 灰分杂质

电刷中含有少量极细微的灰分，能提高电刷的耐磨性能，并对换向器和集电环有磨光的效能；但若含有少量硬质磨料颗粒，则会使换向器和集电环被严重磨损甚至拉成沟槽，对电机的危害极大，必须严格检定。

三、电刷的接触特性

(1) 瞬变接触电压降。接触电压降(Δu)是指当电流通过电刷、接触点薄膜、换向器或集电环时产生的电压降。如果电刷接触电压降超过了极限值，滑动接触点的电损耗将增大，并引起过热，时间过长，将损害电刷。对换向器来说，如接触电压降值过低，则可能在电刷下出现火花。

(2) 摩擦系数。摩擦是选择电刷必须考虑的一个重要因素。摩擦系数过大会使电刷在运行过程中引起振动,发出噪声,并导致接触不稳定,甚至使电刷碎裂。

电刷的摩擦系数受电刷和换向器(或集电环)的材质、接触面情况及运行条件的影响。在换向器或集电环上,电刷数量愈多、摩擦系数愈大、电机的圆周速度愈大时,则摩擦损耗也愈大。

四、电刷的结构

1. 电刷的规格

常用电刷的规格见表 12-4。

表 12-4 常用电刷的规格/mm

切向尺寸	轴向尺寸													
	2	2.5	3	(3.5)	4	(4.5)	5	(5.5)	6.5	8	10	12.5	16	20
1.6	5 6.5	5 6.5												
2		5 6.5	5 6.5	5 6.5 8	5 6.5 8									
2.5			5 8 10	5 8 10	8 10	8 10	8 10 12.5							
3		10			8 10 12.5	8 10 12.5	8 10 12.5	8 10 12.5	12.5 16					
3.5					8 10 12.5	8 10 12.5	8 12.5 16	8 16 20	12.5 16 20					
4	8 10	8 10	8 10	8 10			10 16 20	8 12.5 20	10 16 20	16 20	16 20			

续表

切向尺寸	轴向尺寸													
	2	2.5	3	(3.5)	4	(4.5)	5	(5.5)	6.5	8	10	12.5	16	20
4.5							8 12.5 20	10 16 20	12.5 16 20	12.5 16 20	16 20	16 20		
5		10 12.5	10 12.5	10 12.5	10 12.5	10 12.5		10 12.5 16	10 12.5 16	12.5 16 20	16 20	20	20 25	25
5.5									12.5 16	12.5 16 20	16 20	16 20 25	20 25	25

切向尺寸	轴向尺寸													
	3	4	5	6.5	8	10	12.5	16	20	25	32	40	50	
6.5	12.5	12.5 16	16		20 25	20 25	20 25 32	20 25 32	25 32	32 40	40			
8		16 20	16 20	20		20 25 32	20 25 32	25 32	25 32 40	32 40 50	40 50			
10			16 20	16 20 25	20 25 32		25 32 40	25 32 40	25 32 40	25 32 40 50	40 50 60	50 60		

续表

切向尺寸	轴向尺寸													
	3	4	5	6.5	8	10	12.5	16	20	25	32	40	50	
12.5				20 25	25 32	25 32		25 32 40	32 40 50	32 40 50	40 50 60	50 60 80	60 80	
16				20 25	25 32	32 40	32 40		32 40 50	32 40 50	40 50 60	40 50 60	60 80	
20					25 32	25 32 40	32 40 50	32 40 50		32 40 50 60	40 50 60	40 50 60	60 80	
25					32 40	32 40	32 40	32 40 50 60	32 40 50 60		40 50 60	40 50 60	60 80 100	
32						40 50 60	40 50 60	40 50 60	40 50 60	40 50 60 80 100		50 60 80 100	60 80 100	
40							40 50 60	40 50 60	40 50 60	50 60 80	50 60 80 100		80 100 125	

注：表中为电刷的径向尺寸系列(即长度)，单位均为 mm，加括号的尺寸不推荐使用，轴向、切向尺寸相同的正方形电刷不采用。

电刷的尺寸公差见表 12－5。

表 12－5　电刷的尺寸公差　　（单位：mm）

标称尺寸	t 和 a			r
	上偏差	下偏差	公　差	公　差
1.6、2、2.5　3	−0.02	−0.07	−0.05	±0.3
3.5、4、4.5、5、5.5	−0.03	−0.09	0.06	±0.3
6.5、8、10	−0.05	−0.13	0.08	±0.3
12.5、16	−0.06	−0.16	0.10	±0.5
20、25	−0.07	−0.19	0.12	±0.5
32、40、50	−0.08	−0.23	0.15	±0.8
60、80				±0.8
100、125				±1

注：对分瓣电刷，t 尺寸的下偏差值可适当增加：二分瓣为−0.02 mm，三分瓣为−0.04 mm。

2. 电刷的外形

电刷的外形有：辐射式、前倾式、后倾式及分层电刷等。

（1）辐射式电刷：又称径向式电刷。有两种型式：一种是平顶面辐射式电刷，适用于单向运转和正反向运转的电机；另一种是上端面倾斜的辐射式电刷，适用于单向运转的电机，由于电刷与刷握前壁紧靠，可保证稳定运行。

（2）前倾式及后倾式电刷：电刷对换向器倾斜一定角度，前倾式的倾角约 30°，后倾式的倾角约 15°，刷顶可采用平顶面或倾斜面。

（3）分层电刷：有很多型式；两块电刷拼合的称双子电刷，适用于高速、振动大和换向困难的电机，如电力机车和内燃机车，这种电刷易与换向器保持良好的吻合；中间黏结并互相绝缘的为多层黏合电刷，这种电刷的横向电阻大，对改善换向可以起到良好作用。

五、电刷的选用

正确选用电刷对于电机能否正常运行有密切的关系。因此选择电刷时，要综合考虑电机对电刷的技术要求和电刷的技术特性，包括接触特性（主要有接触电压降和摩擦系数）和理化特性。从电机的运行角度考虑，电刷的接触特性较理化特性更为重要。影响接触特性的因素很多，主要有电机的圆周速度、电流密度、施于电刷的单位压力以及周围介质情况。

电机对电刷的要求有：

（1）在换向器或集电环表面，能形成适宜的由氧化亚铜、石墨和水分等组成的表面薄膜。

（2）电刷的使用寿命长，同时对换向器或集电环的磨损小。

（3）电刷导电性能好，过载能力强。

(4) 电刷的电功率损耗和机械损耗小。

(5) 在电刷下不出现对电机有危害的火花。

(6) 电刷运行噪声小。

要满足上述要求,不完全取决于电刷本身,还需从电机的结构、电刷的安装、调整及运行条件等方面考虑,如正确安装刷握位置,合理调整磁极气隙,电刷安装在中性区等。

影响换向器或集电环上氧化膜厚度的最重要因素是换向器或集电环的温度和电刷的电流密度。换向器或集电环的温度影响氧化速度,电刷电流密度影响电刷表面的氧化物与碳发生化学反应还原成金属的速率。

因此,在选用电刷时一般应考虑:

(1) 电刷的接触压降值应与电机的换向困难程度、电流、电压相适应。若电刷接触电压降超过了极限值,电刷的电损耗将过大,引起过热。电刷接触压降过低,对换向器来说,则可能在电刷下出现火花。例如,一台低电压大电流直流发电机,电压为 6 V,电流为 3 000 A。如果采用 D308 电刷,一对电刷接触电压降 2.4 V所引起的能量损耗按公式(12.1)计算:

$$W_s = 2\Delta E \cdot I = 2.4 \times 3\,000 = 7\,200(\mathrm{W}) \tag{12.1}$$

式中:$2\Delta E$——一对电刷的接触电压降,V;

I——电流,A。

可见大量的能量损耗转化为热能损耗,造成电刷散热困难,这时应采用 J101 金属石墨为宜。又如,某台直流电机的电压为 500 V,换向条件较困难,一般以选用接触电压降较高的电刷为宜。因为在这种情况下,电流较小,即使采用电化石墨电刷,其接触电压降与电机的电压相比,几乎可以忽略不计,引起的能量损耗,对电机输出功率影响也较小。

(2) 对某些特殊用途的电机,因电机电刷和换向器的使用温度较高,如超过 150 ℃时,换向器表面薄膜变厚,接触电压降过大,容易产生火花。在这种情况下,应采用硬质电刷或特制的磨料电刷,以消除过厚的表面薄膜层。

(3) 对换向困难的特殊高速电机,如圆周速度为 70 m/s 以上的直流电机,必须选用特殊的电化石墨电刷,或采用分层电刷。

(4) 对牵引电动机、轧钢电动机和电焊发电机,应选用换向性能、机械强度和韧性好的电化石墨电刷,才能承受较大的电密度,并适应电机经常的轻载和空载运行。

六、电刷的装配方式

电刷的装配方式主要指电刷引出导线的连接方法。装配电刷引出导线通常有填塞法、扩铆法和模压法等方式。电刷引出导线装配方式见表 12-6。

表 12－6　电刷引出导线装配方式

装配方式	装配工艺	特点及适用范围
填塞法	将导线装入在刷体上预先钻好的锥形孔或螺纹孔内，用铜粉或镀银铜粉填塞	导线与刷体间的接触电阻小，结合牢固，适用于截面较大的电刷
扩铆法	在刷体上部钻孔、铣槽，将导线穿入刷体的容线槽，并绕在铜管上，将钢管两端扩张，导线即固定在刷体上（黑色电刷及含铜在 70％以下的金属石墨电刷，为降低导线与刷体间的接触电阻，需在容线槽内镀铜）	机械强度好，适用于振动条件下使用的电机，但厚度太薄的电刷，不宜采用此装配方式
焊接法	刷体上钻好焊接孔，孔内镀铜，将导线穿入刷体孔内，用焊锡焊牢	适用于小型、微型电刷，结构牢固、耐用
模压法	在上端钻孔，穿入导线，在模具中，用冲床冲压，或在坯料成形时，将导线直接压入	适用于含铜量高的电刷

七、电刷的使用维护、常见故障及故障处理

1. 电刷的安装

同一台电机应采用同一种型号的电刷，并将引出导线均匀地紧固在刷杆上，使每块电刷的电流分布均匀，以免产生过热和火花现象；对电流大、换向困难的电机，可采用双子电刷，其滑入边配用电流密度大或润滑性能好的电刷，滑出边则配用换向性能好的电刷，从而使电机运行状况得到改善。

2. 电刷的更换与磨合

经过长期运行的电刷，引出导线和金属附件有氧化、腐蚀或刷体磨耗长短不齐时，则需更换。电刷宜一次全部更换，不能新旧混用，否则会出现电流分布不均的现象。对中小型电机，在更换电刷前，先将换向器磨光研平，再用细玻璃砂纸（不可用金刚砂纸）沿电机运转方向研磨电刷；研磨后，先以 20％～30％电流负荷运转数小时，使电刷与换向器表面磨合，形成表面薄膜，再逐步提高电流至额定负荷。对于大型电机，可不停机，每次更换 20％的电刷，每次间隔 1～2 周；待磨合后，再逐次更换其余电刷，以保证机组正常持续运行。

电刷运行中常见故障与处理方法见表 12－7。

表 12-7　电刷运行中常见故障与处理方法

序号	故障现象	产生故障的原因	处理方法
(1)	电刷磨损异常	电刷选型不当；换向器偏摆、偏心；换向片、绝缘云母凸起等	应根据电机的运行条件选配合适的电刷，并排除故障
(2)	电刷磨损不均匀	电刷质量不均匀或弹簧压力不均匀	更换电刷或调整弹簧压力
(3)	电刷下出现有害火花	① 机械原因如：换向器偏摆、偏心；换向片、绝缘云母凸起和振动等；② 电气原因如：负荷变化迅速、电机换向困难、换向极磁场太强或太弱	① 排除外部机械故障；② 选用换向性能好的电刷；③ 调整气隙，移动换向极位置等
(4)	电刷导线烧坏或变色	① 电刷导线装配不良；② 弹簧压力不均	① 更换电刷；② 调整弹簧压力
(5)	电刷导线松脱	① 振动大；② 电刷导线装配不良	① 排除振源；② 更换电刷
(6)	换向器面拉成沟槽	电刷工作表面有研磨性颗粒，包括外部混入杂质；长期轻载、过冷、严重油污、有害气体，损害接触点间表面薄膜的形成	清扫电刷；更换电刷；排除故障
(7)	电刷或刷握过热	① 弹簧压力太大或不均匀；② 通风不良或电机过载；③ 电刷的摩擦系数大；④ 电刷型号混用；⑤ 电刷安装不当	① 降低或调整弹簧压力；② 改善通风或减小电机负荷；③ 选用摩擦系数小的电刷；④ 换用同一型号的电刷；⑤ 正确安装电刷

第三节　银石墨电刷

1. 适用范围

银石墨电刷适用于在电机或接触环上作为导入或导出电流的滑动接触体。

2. 技术要求

(1) 电刷刷体与软接线连接处的连接电阻、电刷软接线的脱出拉力应符合 JB/T 2623—1994《电机用电刷尺寸与结构型式》或图样的规定。

(2) 成品电刷 r 尺寸小于 21 mm 时，可在批量生产前先压制标准试样，并进行检验。

(3) J366 电刷的使用海拔高度不超过 12 000 m。

(4) 电刷的材质结构必须均匀，不应有裂纹、氧化、起泡、分层及外来夹杂物

等影响使用性能的表观缺陷。

(5) 电刷的外形尺寸与公差应符合图样规定。

(6) 电刷与刷握的非配合面的棱角上允许有深度不大于 0.5 mm 的掉角和缺口，当电刷截面在 $4\times5\ mm^2$ 以下时，允许有深度不大于 0.2 mm 的掉角和缺口。

(7) 需镀铜电刷的镀铜层应致密、均匀、紧贴电刷表面，不应有明显的氧化、腐蚀现象。

(8) 电刷软接线的性能应符合 GB/12970.4《铜电刷线》的规定。

(9) 电刷的性能应符合表 12-8 规定。

表 12-8　银石墨电刷的性能

型　号	电阻率，$\mu\Omega\cdot m$		体积密度，g/cm^3	
	基本值	波动率±%	基本值	波动率±%
J325	8.50	40	2.47	10
J350	2.40	65	3.24	
J360	0.75	60	3.70	
J366	1.50	90	3.60	15
J370	0.41	70	4.33	10
J375	0.25	60	4.80	
J380	0.20	60	5.35	
J385	0.10	80	6.00	15
J390	0.07	50	6.60	10

第四节　航空电机用电刷

一、适用范围

航空电机用电刷适用于航空电机的换向器或集电环上，作为导出或导入电流的滑动接触体。

二、型号与使用条件

航空电机用电刷的型号及其参考使用工作条件如表 12-9 所示。对于 TJ7、TJ7A、TJ8、TJ8A、TJ9、TJ10、TJ15、TJ22 电刷，应能在刷体温度不超过 180℃ 条件下长期工作，允许短时间内发热至 200℃。对于 TJ10、TJ15、TJ22 电刷，在高空试验过程中，允许电刷在短时间内发热至 230℃。

表 12-9　电刷的型号及参考使用工作条件

型号	参考使用工作条件(不大于),≤			
	电流密度,A/cm²	圆周速度,m/s	电刷压力,kPa	海拔高度,m
TJ5、TJ5A	70	15	58.8	12 000
TJ6	15	25	14.7～19.6	—
TJ7、TJ7A	27	55	58.8	18 000
TJ8、TJ8A	28	55	58.8	18 000
TJ9	27	55	73.5	20 000
TJ10	27	55	73.5	18 000
TJ14	27	55	73.5	20 000
TJ15	27	55	73.5	20 000
TJ22	35	40	41.7～49.0	20 000
TJQ6	15	15	24.5	12 000
TJQ8	15	15	24.5	15 000
TJQ12	24	15	58.8	15 000
TD2	10	25	19.6～24.5	—
TDQ4	20	19	73.5	12 000

三、技术要求

1. 电刷外形尺寸公差

电刷外形尺寸公差,应按下列标准公差进行设计和检查。对特殊要求者可按供需双方商定的产品图纸进行制造。

(1) 厚度和宽度。不应超过基孔制轴之偏差的 11 级精度(n11、d11 按 GB1801)范围。

(2) 当高度小于或等于 15 mm,偏差为+0.5 mm,当高度大于 15 mm 时偏差为+1 mm。

2. 电刷的表面质量

(1) 电刷材质结构必须均匀,不应有裂纹、起泡及外来机械杂质。

(2) 除与刷握配合面上的四个棱角外,其余棱角上允许有深度不大于0.5 mm 的缺口,当电刷截面在 4×5 mm² 以下时,允许有深度不大于 0.3 mm 的缺口。

(3) 电刷引出软接线应符合 GB/T12970.4 的要求,单个热压电刷的软接线及接头经氩弧焊后的软接线,允许出现紫红色。铜压板颜色允许变暗。经表面处

理后的附件，其表面不应有明显的斑点。电刷的镀铜层应均匀、细密，不应有绿色斑痕及黑色氧化现象。

(4) 刷体焊接处的镀铜层，不应有起泡；铆钉扩管后，允许扩管处有一个裂口，其裂口长度不应超过扩铆卷边的1/2；软接线露出不大于周长的1/4；垫圈、软接线、铆钉不允许有松动；填塞电刷不允许掉填塞粉现象。

(5) 填塞孔用树脂胶封口处的软接线根部发硬长度不应超过5 mm。

3. 电刷的电气物理技术性能

(1) 电刷的电气物理技术性能，在地面试验时，应符合表12-10规定；在高空试验时，应符合表12-11规定。

(2) 在短路换向器试验及高空试验过程中。电刷不应擦伤或沾污电机换向器，其碳粉不应堵塞换向器槽，电刷不应剥落或破裂。

表 12-10　电刷的电气物理技术性能(地面)

序号	型号	电阻率 μΩ·m	硬度		短路换向器试验							备注
					试验条件			技术性能				
			压入法硬度(钢球直径 7.94 mm) MPa	洛氏硬度 HR 10/392	电流密度 A/cm²	圆周速度 m/s	电刷压力 kPa	一对电刷接触电压降 V	50 h 磨损值 ≤mm	25 h 磨损值 ≤mm	摩擦系数	
1	TJ5A	1.7～8.3	78～275	67～113	15	15	19.6～24.5	≤2.0	0.40	—	0.22	用于 QZD 7100 等
2	TJ5	1.7～8.3	78～275	67～113	15	15	19.6～24.5	≤1.7	0.25	—	0.22	
3	TJ6	1.7～5.2	98～294	80～114	15	15	19.6	1.0～2.0	0.15	—	0.22	
4	TJ7	2.7～9.1	137～284	94～113	24	15	19.6～24.5	1.4～2.4	0.35	—	0.20	
5	TJ7A	2.7～9.1	137～284	94～113	24	15	19.6～24.5	1.4～2.4	0.35	—	0.20	
6	TJ8	5.5～14.6	127～275	91～113	24	15	19.6～24.5	2.0～2.8	0.50	—	0.20	
7	TJ8A	5.5～14.6	127～275	91～113	24	15	19.6～24.5	2.0～2.8	0.50	—	0.20	
8	TJ9	10～30	108～275	84～113	24	15	19.6～24.5	2.5～3.5	0.35	—	0.20	
9	TJ10	7～24	147～314	96～115	24～27	15～25	39.8～46.0	2.0～3.0	—	1.0	0.16	
10	TJ14	5～24	98～245	80～110	24～27	15～25	39.8～46.0	1.5～2.5	—	0.50	0.20	
11	TJ15	5～24	147～294	96～114	24～27	15～25	39.8～46.0	1.7～2.6	—	0.50	0.15	
12	TJ22	5～21	147～324	96～115	24～27	15～25	39.8～46.0	1.7～2.6	—	0.30	0.15	
13	TJQ6	0.3～1.9	147～353	96～116	15	15	19.6～24.5	≤1.4	0.30	—	0.20	
14	TJQ8	1.7～9.3	98～294	80～114	15	15	19.6～24.5	0.7～1.7	0.25	—	0.20	
15	TJQ12	1.7～9.1	78～275	67～113	15	15	19.6～24.5	≤1.7	0.25	—	0.17	
16	TD2	10～42	98～294	80～114	10	15	19.6～24.5	1.8～3.2	0.10	—	0.20	
17	TJQ4	10～42	98～294	80～114	10	15	19.6～24.5	≤3.2	0.12	—	0.20	

注:洛氏硬度与压入法硬度同时进行检查,但洛氏硬度值只作参考。

表 12－11　电刷的技术性能(高空试验)

序号	典型电机型号	电刷型号	电刷尺寸 mm	换向器或集电环直径 mm	电刷数量 块	电刷弹簧压力 N	试验条件									技术性能		
							电压,V		电流,A		转速 r/min	试验高度 m	环境温度 ℃	通风温度 ℃	通风总压 kPa	试验时间 h	电刷磨损值≤, mm	
							发电机	电动机	发电机	电动机								
1	QF—6	T17 TJ7A	7.2×17.5×25.5	99.2	12	5.6～6.9	$28.5^{+0.5}_{0}$	—	200	—	8 200 ±50	18 000	−40～ +50	−10～ +25	2.5～ 2.7	5	0.35	
2	2F—3B—1 2F—3B	TJ7 TJ7A	7.5×20×25	72	4	10.8～11.8	28.5	—	100	—	6 000	15 000	−40～ +50	−10～ +25	1.5	5	0.30	
3	DBL—750$^{A}_{B}$	TJ8 TJ8A	8×16×25 6.5×8×17	62/35.2	4 4	4.5～5.4 3.1～3.4	115±3.5	27±2.7	6.51	≤56	12 000	16 000 20 000	−20～ +40	—	—	5	0.4	1)
4	DBL—750	TJ8 TJ8A	8×16×25 6.5×8×17	62/35.2	4 4	4.5～5.4 3.1～3.4	115±3.5	27±2.7	6.51	≤56	12 000	15 000 18 000 18 000	−40～ +50	—	—	10	0.6	2)
5	DJF—4	TJ9	5×15×22 10×16×22	70.4/42	6	5.5～8.8	33	27	16	≤58	8 500	20 000	−50～ +60	—	—	5	0.3	
6	QF—12	TJ10	7.2×17.5×26	110	24	5.6～6.9	28.5	—	200 400	—	8 200	18 000	+5～ −10	—	3.5 ～3.7	5	0.5	3)
7	QF—12A	TJ14	7.2×17.5×26	110	24	5.6～6.9	28.5	—	360	—	8 200	19 000	20±3	20±3	3.5～ 3.7	5	0.5	
8	QF—12D 或 QF—12	TJ15	7.2×17.5×26	110	24	5.6～6.9	28.5	—	200 400	—	8 200	18 000	+5～ −10	+5～ −10	3.5 ～3.7	5	0.7	3)

续表

序号	典型电机型号	电刷型号	电刷尺寸 mm	换向器或集电环直径 mm	电刷数量 块	电刷弹簧压力 N	试验条件									技术性能		
							电压,V		电流,A		转速 r/min	试验高度 m	环境温度 ℃	通风温度 ℃	通风总压 kPa	试验时间 h	电刷磨损值≤, mm	
							发电机	电动机	发电机	电动机								
9	QF—18	TJ22	10×20×27.5	105	18	8.3～9.8	28.5	—	300 600	—	6 700	10 000	+10～ −10	—	3.9～ 4.1	5	0.35	6)
10	BZD—200	TDQ4	6.5×10×19	40	2	3.9～4.4	—	27	—	≤12	2 750 ±275	15 000	−40～ +60	—	—	5	0.2	4)
11	DBL—45	TJQ6	5×8×15 4×6.5×12	24	2	0.7～1.0	18.3±0.5	27	2.37	2.7～ 3.15	7 500 $^{+300}_{-450}$	15 000	−55～ +61	—	—	5	0.3	
12	BZD—76	TJQ8	5×10×15.5	35	4	1.2～1.5	—	27	—	≤5.8	5 800 ±600	15 000	−55～ +61	—	—	5	0.3	
13	ZD—220	TJQ12	5×10×15	34	4	2.0	—	27	—	≤16	10 500	25 000	+40	—	—	2.5	0.3	5)

注:1) 工作规范:16 000 m、−20 ℃,工作 75 min;然后在 20 000 m、+40 ℃,工作不超过 5 min,然后冷却交流机至−20 ℃为一周期;再按上述周期重复试验,共进行 5 h。

2) 工作规范:15 000 m、额定负荷 $COS_{\varphi}=0.9$,工作 5 h,每工作 1 h,10%过负荷 5 min;18 000 m、额定负荷 $COS_{\varphi}=0.9$,工作 0.5 h;18 000 m、75%的额定负荷工作 4.5 h。

3) 加负荷 200 A、400 A,各 30 min 交替运行。

4) 工作 2.5 h 后改变转向。

5) 电流短时允许到 38 A。

6) 加负荷 300 A、600 A,各 30 min 交替运行。

第五节　其他电碳制品

一、碳和石墨触头

碳和石墨触头具有导电性、导热性和自润滑性好，耐高温，不与金属沾粘以及化学性能稳定等特点，用于电气控制设备中作为导电的接触件，它的技术特性和用途见表 12－12。

表 12－12　碳和石墨触头的技术特性和用途

型号	硬度(N/mm^2)	电阻系数($\Omega \cdot mm^2/m$)	用途
C31	350～650(肖氏)	≤50	电铲控制器、汽车和拖拉机分电器
C32	350～650(肖氏)	≤50	
C33	100～350(洛氏)	8～20	

二、碳棒

碳在高温下直接升华为气体，并在燃烧时发射出强光，故碳棒用作电弧放电的电极，能产生很高的温度和发光强度。碳棒的品种按用途和使用特点分，主要有照明碳棒、碳弧气刨碳棒、光谱碳棒及电池用碳棒等。

1. 照明碳棒

用照明碳棒为电极的弧光灯，是照明设备中发光强度最高的一种。弧光灯可使用直流或交流电源，在相等的电流强度下，交流电弧的光通量比直流电弧的小 25%～50%，直流电弧更接近于点光源。照明碳棒按用途分有电影放映碳棒、高色温摄影碳棒、紫外线型和阳光型碳棒、照相制版碳棒等。

(1) 电影放映碳棒　用于电影放映机的直流弧光灯，是一种高光强的弧光碳棒，芯料是氟化铈。它能满足如下要求：具有足够的亮度，燃烧时稳定性好；燃烧速度低；保持干燥，在燃烧时不易引起电弧喷闪等。它的规格、技术特性、工作条件和用途见表 12－13。为了增加导电性和降低燃烧速度，外壳镀上一层薄铜。

表 12-13　电影放映碳棒的规格、技术特性、工作条件和用途

碳棒型号	规格(mm)	直径 1.2 mm 的火焰口中心的平均亮度($\times10^6$ cd/m^2)不小于	允许最大的燃烧速度(mm/h)	电流(A)	电压(V)	用途	备注
B107(+) B107(−)	ϕ7×355 ϕ6×230	480	350 130	50	38	普通银幕	镀铜
B108(+) B108(−)	ϕ8×355 ϕ7×230	500	320 130	60	42	普通银幕	镀铜
B109(+) B109(−)	ϕ9×355 ϕ8×230	700	650 130	90	55	宽银幕	镀铜

(2) 高色温摄影碳棒　用于拍摄影片的照明弧光灯，是一种高光强弧光碳棒，光强而色白，能发出近似太阳光的光谱，照射距离远，燃烧噪音小，对它的要求与电影放映碳棒基本相同。它的规格和工作条件见表 12-14。

表 12-14　高色温摄影碳棒的规格和工作条件

碳棒型号	规格(mm)	电流(A)	电压(V)	备注
B202(+) B202(−)	ϕ16×550 ϕ11×305	150～170	75～85	不镀铜
B203(+) B203(−)	ϕ16×550 ϕ13×305	190～230	85～95	不镀铜
B204(+) B204(−)	ϕ16×400 ϕ16×310	150～170	75～85	不镀铜

(3) 紫外线型碳棒和阳光型碳棒　用于橡胶、塑料、油漆和颜料等进行人工老化试验用的弧光灯，这两种碳棒的芯料中都含有钾盐。紫外线型碳棒用于封闭式交流弧光灯，弧光呈蓝紫色，含有丰富的紫外线光谱；阳光型碳棒用于非封闭式直流弧光灯，发出近似太阳光的光谱。紫外线型和阳光型碳棒的规格和工作条件见表 12-15。

表 12-15　紫外线型和阳光型碳棒的规格和工作条件

类型	碳棒型号	规格(mm)	电源	电流(A)	电压(V)	备注
紫外线型	B413	ϕ13×330	交流	12～17	50～80	不镀铜
		ϕ13×305				
阳光型	B423(+)	ϕ23×305	直流	60	50	镀铜
	B423(−)	ϕ13×305				

(4) 照相制版碳棒　用于照相制版作业晒版用的各种交流弧光灯。点燃时，

两电极间的球状白炽气体产生强烈的弧光，成为点状光源，光强而色白，色温近似太阳光，弧光稳定，燃烧速度慢，发光效率高。其规格和工作条件见表 12－16。

表 12－16　照相制版碳棒的规格和工作条件

碳棒型号	规格(mm)	电流(A)	电压(V)	备注
B313	φ13×355 φ13×305	30～50	30～60	不镀铜
B315	φ15×355 φ15×305	35～60	30～60	不镀铜
B316	φ16×355 φ16×305	40～65	30～60	不镀铜
B318	φ18×305	40～65	30～60	不镀铜

注：电源为交流电。

2. 碳弧气刨碳棒

碳弧气刨碳棒应用于碳弧气刨工艺，它可以进行挑焊根、焊缝返修时刨除缺陷，金属部件开坡口，刨除和修整铸件的冒口和铸疤，切割金属，钻孔以及拆除焊接件和铆接件等作业。具有加工效率高、质量高、操作方便、设备简单等优点。碳弧气刨碳棒的规格和工作条件见表 12－17。

表 12－17　碳弧气刨碳棒的规格和工作条件

碳棒型号	型式	规格(mm)	电流(A)
B504	圆形	φ4×355	150～250
B505		φ5×355	150～250
B506		φ6×355	200～300
B507		φ7×355	300～400
B508		φ8×355	300～400
B509		φ9×355	350～450
B510		φ10×355	350～450
B512		φ12×355	400～500
B514		φ14×355	500～600
B516		φ16×355	500～650
B5510	矩形	5×10×355	320～380
B5512		5×12×355	320～380
B5515		5×15×355	350～450
B5518		5×18×355	350～450
B5520		5×20×355	350～450
B5525		5×25×355	450～550
B5620		6×20×355	450～550

3. 光谱碳棒

光谱碳棒用作光谱分析用的摄谱仪的碳电极。具有纯度高、杂质含量低、不影响分析精度、机械强度高以及导电性和热稳定性好等特点。它的电弧波谱在2 000～3 500 Å(1 Å=10^{-10} m)范围内。其规格和技术特性见表12－18。

表 12－18　光谱碳棒的规格和技术特性

碳棒型号	规格(mm)	纯度(%)	杂质含量	相对密度	气孔率(%)	抗折强度(N/cm^2)	电阻系数($\Omega \cdot mm^2/m$)
B606 B608 B610 B613 B615	φ6×300 φ8×300 φ10×300 φ13×300 φ15×300	99.995～99.999	硼、硅、镁、铁元素光谱线微弱出现 铜、铝、钙元素光谱线微弱出现或不出现	1.6	25	4 000	9～12

4. 电池用碳棒

电池用碳棒通常用作电池或电池组的阳极，具有导电性和化学稳定性好等特性。它的规格和技术特性见表12－19。

表 12－19　电池用碳棒的规格和技术特性

规格(mm)	抗折强度(N/cm^2)不小于	电阻系数($\Omega \cdot mm^2/m$)不大于
φ4×(26～34)	4 000	50
φ6×(32～55)	5 000	60
φ8×(58～96)	1 700	60
φ10×85	1 800	70
φ15×(116～120)	1 700	80
φ18×(150～180)	1 500	80

三、高纯石墨件

高纯石墨是以石油焦和沥青焦为主要原料，经2 500 ℃以上高温处理制成的，所含杂质极低，用作大功率电子管的阳极和栅极，真空电炉用电热、隔热和支撑元件，以及电真空器件的石墨件等。它的主要特性：灰分不超过0.1%，特殊净化的可达0.001%以下，可使因杂质元素蒸发污染使用系统的现象减少到最低；结构致密，机械强度高，具有较大的支撑能力和抗震性能，在高温下不掉粉、不碎裂；电子热发射效率高，重量轻，能耐高速电子流的轰击；在高空中经高温除气处理后性能稳定，能保证设备在高真空状态下正常工作。高纯石墨的技术特性和用

途见表 12－20。

表 12－20　高纯石墨的技术特性和用途

型　　号	G21	G31	G41
灰分(%) 不大于	0.01	0.025	0.10
含硫量(%) 不大于	0.03	0.05	0.05
含钙量(%) 不大于	0.002	0.003	0.003
相对密度 不小于	1.60	1.50	1.50
电阻系数 ($\Omega \cdot mm^2/m$)	6～12	10～16	10～20
气孔率(%) 不大于	25	30	30
抗压强度(N/cm^2) 不小于	4 000	2 300	—
抗折强度(N/cm^2) 不小于	—	—	1 800
用途	真空电炉石墨电热元件	真空电炉石墨电热、隔热和支撑元件，石墨坩埚	大功率电子管石墨阳极和栅极，真空冶炼用石墨坩埚和电热元件

四、碳电阻片柱

碳电阻片柱是由许多平整的碳片或碳圈叠合而成的，其电阻值随压力负荷变化而在较大范围内改变，并能在除去压力负荷后恢复原来的电阻值。对碳电阻片柱的要求是电阻变化范围大、机械变形小。它用于发电机的自动电压调整器、电动机转速调整器、连续改变电阻的各种变阻器和压力调整器等电气设备。组成碳电阻片柱的碳片和碳圈是用炭黑和天然石墨的混合料制成的。碳电阻片柱的规格、冷态和热态技术特性分别见表 12－21 至表 12－23。

表 12-21 碳电阻片柱的规格 mm

型号	碳柱高度	中间电阻片规格			接触片规格			接触点规格	
		外径	内径	厚度	外径	内径	厚度	直径	高度
P1	90	18	13	0.5	—	—	—	—	—
P2	90	32	26	0.5	—	—	—	—	—
P5	90	60	50	1	—	—	—	—	—
P05	52	11	5	0.7	11	5	0.7	8.5	19
P06	52	11	5	0.7	11	5	0.7	8.1	19

表 12－22　碳电阻片柱的冷态技术特性

型号	不同压力负荷下碳柱的电阻(Ω)						碳柱的机械变形			碳柱的机械强度		接触点	
	0.85 N 不小于	0.2 N 不小于	0.3 N 不小于	8.5 N 不大于	10 N 不大于	12 N 不大于	压力负荷改变(N)		碳柱高度改变(mm) 不大于	静负荷试验次数	破坏力(N) 不小于	电阻系数 (Ω·mm²/m)	肖氏硬度
							由	到					
P1	—	92	—	—	5.2	—	10	0.2	1.5	5	150	—	—
P2	—	65	—	—	5.2	—	10	0.2	1.7	5	150	—	—
P5	—	—	35	—	—	5.2	12	0.3	1.7	5	150	—	—
P05	30	—	—	1.0	—	—	8.5	0.085	0.25	5	70	31～50	420～650
P06	60	—	—	2.0	—	—	8.5	0.085	0.25	5	70	31～50	420～650

表 12-23 碳电阻片柱的热态技术特性

型号	输入功率 (W)	工作温度 (℃)	压力负荷 (N)	补充压力负荷 (N)	热电阻(Ω) 不大于
P1	30	250	0.2	2.5	70
P2	60	250	0.2	2.5	43
P5	120	225	0.3	2.5	18
P05	60	200～280	0.10～0.25	—	14
P06	60	200～280	0.10～0.25	—	24

五、碳滑块和碳滑板

采用热挤压成型工艺制成的碳滑块和碳滑板，具有良好的导电、自润滑和抗磨性能以及较高的机械强度，是无轨电车和电力机车用以从接触网导线引入电能的滑动接触件。

1. 无轨电车滑块

碳质滑块与电力线的吻合比金属滑块为好，可大大减少无轨电车行驶时的火花，并可减少对城市的微波干扰，有效地保护了铜导体表面的光洁。正常情况下，在铜导体上滑行的碳质滑块，其寿命在 1 000 km 以上。无轨电车滑块的型号、规格及技术特性见表 12-24。

表 12-24 无轨电车滑块的型号、规格及技术特性

型号	规格 (mm)	电阻率 不大于 (μΩ·m)	硬度不小于		抗折强度 (Pa) 不小于	折断力 (N) 不小于	备注
			肖氏硬度	洛氏硬度			
C11-1	72×24×18	50	55	—	2 450	4 413	端面弧度
C11-2		80	—	67	—	3 040	R22.5 mm
C12-1	74×28×18	50	55	—	2 450	4 903	端面角度
C12-2		80	—	67	—	3 432	75°

2. 电力机车滑板

正常情况下，电力机车采用碳滑板，可使接触网的工作寿命延长 40 年，而碳滑板的工作寿命可达 50 000 km。电力机车滑板的型号、规格及技术特性见表 12-25。

表 12－25　电 6 力机车滑板型号、规格及技术特性

型号	规　格	电阻率（μΩ·m）不大于	肖氏硬度		体积密度（g/cm³）	抗折强度（MPa）不小于	沿长度方向抗压强度（MPa）不小于
			单个值	平均值不小于			
C21	(30～35)×36×(250～500)	38	58～100	62	1.60～1.80	28	57
C22	35×70×(500～1 000)	33	45～90	50	1.60～1.80	24	40
C23	35×70×(500～1 000)	20	40～70	45	1.60～1.85	20	40
C25	56×(500～750)	35	60～100	70	1.60～1.80	25	59

六、机械用碳制品

机械用碳制品主要用作离心泵、水轮机、反应釜及阀门中的密封环；压缩机、制氧机、鼓风机中的活塞环和叶片；潜水电机、印染机、纺织机、洗衣机、石膏板机、平板玻璃引上机和各种仪表中的轴承等。

机械用碳制品的技术性能见表 12－26，用途及工作条件见表 12－27。

表 12－26　机械用碳制品的技术性能

类别	型号	肖氏硬度 ≮	抗压强度（MPa）≮	抗折强度（MPa）≮	开口气孔率（%）≯	体积密度（g/cm³）≮
碳石墨材料	M103	65	140	40	20	1.60
	M121	65	80	28	17	1.56
	M126	60	58.3	24.5	20	1.6
	M134	50	68.6	30	23	1.46
	M161	60	100	36.5	30	1.50
	M163	60	90	42	13	1.68
	M164	70	90	38	16	1.55
	M165	80	100	40	12	1.60
	M671	100	150	50	9	1.67
	M672	120	200	70	3	1.70
	M673	90	90	30	12	1.63
	M103K	75	190	65	2.5	1.75
	M103H	75	184	66	2.5	1.75
	M103F	75	180	65	2.5	1.75
	M103Y	70	225	75	3	2.25
	M106H	65	170	55	2	1.62
	M106K	75	200	55	2.5	1.62
	M106B	60	200	65	2	2.40
	M106Sb	75	190	65	2.5	2.20
	M106T	70	240	70	3	2.40
	M112H	60	125	51	2	1.60
	M113L	70	300	130	3	2.10
	M114H	60	折断力 >6.86 N			

续表

类别	型号	肖氏硬度 ≤	抗压强度 (MPa) ≤	抗折强度 (MPa) ≤	开口气孔率 (%) ≥	体积密度 (g/cm^3) ≤
碳石墨材料	M120H	65	140	48	2	1.70
	M120K	75	160	55	2.5	1.70
	M120B	70	180	75	9	2.50
	M120Sb	70	170	60	2.5	2.20
	M120T	75	250	77	3	2.60
	M120P	95	200	57	3	1.80
	M126H	70	156.8	63.7	1.5	1.8
	M126K	70	156.8	63.7	3	1.65
	M152JH	80	156.8	44.1	2	1.70
	M158H	60	110	48	2	1.62
	M158K	70	150	55	3	1.62
	M161H	65	140	50	2.5	1.80
	M161K	65	140	50	5	1.80
	M161F	65	135	55	2.5	1.82
	M161Y	55	140	50	4.5	2.30
	M169Y	70	195	65	3	3.0
	WK9Q	55～75	200	77	2	2.60
	M671	100	150	50	9	1.67
	M672	120	200	70	3	1.70
	M673	90	90	30	12	1.63
电化石墨材料	M201	45	60	35	23	1.60
	M202	45	70	40	21	1.65
	M204	40	73.5	29.4	18	1.70
	M205	65	100	35	21	1.60
	M216	45	70	40	20	1.60
	M233	55	98	39.2	10	1.80
	M238	38	70	35	15	1.70
	M252	30	40	20	25	1.55
	M263	45	70	37	15	1.70
	M272	50～70	90	39	8	1.75
	M276	40	58.8	24.5	20	1.60
	M277	40	39.2	19.6	2.2	1.60
	M278	40	49	19.6	20	1.60
	M201H	50	83.2	40	2.5	1.82
	M201F	45	85	38	2.5	1.82
	M201Y	40	80	35	3.5	2.40
	M202K	48	100	45	2.5	1.82
	M202Y	45	85	40	3	2.35
	M202BK	51	105	41	2.5	1.82
	M204H	60	127.4	49	1	1.85
	M204K	60	137.2	39.2	4	1.85
	M205H	70	145	55	2.5	1.80
	M205K	70	150	55	2	1.80
	M205Y	60	160	60	3.5	2.30
	M205F	70	140	55	2.5	1.80
	M216H	50	95	45	2.5	1.83
	M216K	50	98	45	2.5	1.83

续表

类别	型号	肖氏硬度 ≮	抗压强度 (MPa) ≮	抗折强度 (MPa) ≮	开口气孔率 (%) ≯	体积密度 (g/cm^3) ≮
电化石墨材料	M216F	50	100	45	2.5	1.82
	M216Y	45	90	25	5	2.5
	M233H	70	156.4	53.9	2	1.8
	M238H	45	85	43	2.5	1.88
	M238K	50	100	45	3	1.85
	M252H	45	78.4	39.2	2	1.75
	M252K	50	88.2	34.3	5	1.80
	M254H	40	75	35	2	1.82
	M254K	45	85	38	2.5	1.81
	M254L	33	130	60	2	2.05
	M254B	30	65	35	7	2.50
	M254T	35	120	45	3	2.60
	M254Sb	35	80	35	2.5	2.20
	M255H	42	80	45	2	1.82
	M255K	40	90	50	3	1.75
	M262L	50	250	100	2	2.15
	M262B	60	200	70	2	2.38
	M262T	40	110	50	3	2.60
	M262P	64	138	48	2	1.80
	M276H	60	98	49	4	1.85
	M276K	60	88.2	44.1	4	1.85
	M277H	60	78.4	39.2	5	1.85
	M277K	60	78.4	34.3	5	1.85
	M278H	60	88.2	44.1	4	1.85
	M278K	60	83.3	39.2	5	1.85
	M357	45	110	55	1	1.75
金属石墨材料	M55-1	布氏硬度 (MPa) ≮ 600	延伸率 ≯10%	抗伸强度 (MPa) ≮ 180		8.8

注：型号中 H—环氧树脂；F—酚醛树脂；K—呋喃树脂；L—铝合金；Sb—锑；T—铜合金(青铜)；J—聚四氟乙烯；B—巴氏合金；P—玻璃；Y—银；WK9Q—浸青铜碳石墨。

表 12-27　机械用碳制品的用途及工作条件

型　号	用　途	摩擦副材料	设　备	工作介质及技术条件
M126 M134 M104	轴承、轴套、活塞环、导向环等	碳化钨、陶瓷、耐磨损铸铁等	印染机、压缩机等	温度 350 ℃，气体、油、液体等介质
M106H M106K	端面密封、活塞环、轴承	碳化钨、铸铁、青铜、硬质合金	离心泵、压缩机、流量仪表	油类，水，高温高压水蒸气，硫化氢，丙烷，液烃，液氧，一定浓度的酸、碱、盐溶液等。介质压力 7.5 MPa，PV 值 120，使用温度 200 ℃，转数 2 4000 r/min

续表

型　号	用　途	摩擦副材料	设　备	工作介质及技术条件
M120H M120K	端面密封、轴承、活塞环、旋片、防爆板	碳化钨、铸铁、青铜、硬质合金、镀铬钢	离心泵、真空泵、压缩机、潜水泵、锅炉预热器	油类、水、空气、弱酸、碱等，介质压力 3 MPa，PV 值 70～80，使用温度 200 ℃，转数 2 900 r/min
M120P M262P	机械密封环、轴承、电极其他结构零件	硬质合金、陶瓷、不锈钢、碳钢等	化工、化肥、炼油设备及其他机械	氢氟酸及相应的盐外，其他介质均能应用。温度 610 ℃（空气中），压力3 MPa，干摩擦系数 0.1～0.15
M121	刹车片、摩擦片	镀铬钢	离合器装置	干摩擦，使用温度 350 ℃
M161F M161K M161H	转子发动机旋片、汽油机旋片、印刷机旋片	铸铁、铝镀铬	转子发动机、汽油机、印刷机	空气，汽油温度 180～200 ℃
M163	制造抗磨的机械零件和密封材料	碳钢、刚玉、不锈钢、硬质合金、青铜、球墨铸铁	制药、化工机械、真空泵、压缩机	油类、水、高压蒸汽、酸、碱、（氢氟酸）、PV 值 120，使用温度≤400 ℃，介质压力 5 MPa
M164	$\phi \leqslant 600$ mm 的石墨轴承	碳钢镀铬	化工、化肥、炼油设备及其他设备	油、水、水蒸气、除强氧化性物质以外的酸、碱、盐介质、使用温度≤400 ℃
M165	$\phi \leqslant 600$ mm 的石墨密封环	YG_3、YG_6、YG_{20}、碳钢镀铬	化工、化肥、炼油设备及其设备中机械密封、旋转接头	油、水、水蒸气、除强氧化性物质以外的酸、碱、盐介质、使用温度≤400 ℃，介质压力 4 MPa
M169Y	配气阀座、轴承等	TZM 铜基合金	高速发动机	燃气，对磨性质：干摩擦压力 20 MPa，温度 1 350 ℃，转速 4 200 r/min
M112H	机械密封	陶瓷、金属	食品机械、水泵	水；
M113L	旋片等	镀铬钢	转子发动机、真空泵	空气、真空油、干摩擦，使用温度400 ℃，转速 12 000 r/min
M106T M120T M262T WK9Q	端面密封、轴承、配气盘、机车用滑板	硬质合金、不锈钢、镀铬钢、陶瓷、合金钢	蒸汽流量计、飞机发动机、油箱、起动电机、卷烟机、风机、高温热油泵	干摩擦、水、高温水、海水、水蒸气、有机物、油类等。使用温度－200～400 ℃

续表

型　号	用　途	摩擦副材料	设　备	工作介质及技术条件
M106Sb M120Sb M254Sb	端面密封、轴承、轴瓦等	硬质合金、碳化硅、氮化硅、不锈钢、镀铬钢、铸铁等	潜水泵、核二级泵、锅炉、给水泵、干燥炉等	油类、酸、碱、盐、空气、水等，使用温度 500 ℃，介质压力 10 MPa，转数5 000 r/min
M103F M205F	高压泵机械密封用静环	硬质合金、陶瓷	高压泵	温度不高于 180 ℃，酸、悬浮体、油、水等
M103Y M205Y	泵用轴承、机械密封用静环	硬质合金、碳钢(表面镀铬)	泵	油、水、温度≯200 ℃
M216 M202 M202B M103	压缩机、制氧机、汽轮机、水轮机用密封环、活塞环和导向环	不锈钢、45钢表面镀铬、铸铁	压缩机、制氧机、汽轮机、水轮机	空气、蒸汽、油类，200～450 ℃
M210F M202F M216F M202BF	潜水泵、屏蔽泵、轴承、泵的机械密封静环	硬质合金、陶瓷、碳钢表面镀铬、不锈钢表面堆焊 Co·Cr·W 合金	潜水泵、屏蔽泵	水、海水、重油、酸、有机溶剂，放射性介质，温度≯180 ℃
M202K M205BK	泵用轴承、机械密封用静环	不锈钢堆焊硬质合金、陶瓷	泵	碱、酸、汽油、悬浊液，温度≯200 ℃
M103K M205K	泵用机械密封静环			碱、酸、汽油、水、盐、悬浮体，温度≯200 ℃；
H202H M202BH	轴承、静环			碱、酸、汽油、悬浊液，温度≯200 ℃
M205H M103H	轴承、静环			碱、酸、油、水、盐、悬浮体，温度≯200 ℃
M210Y M202Y M202BY	泵用轴承	硬质合金、碳钢(表面镀铬)		油、水、温度≯200 ℃
M238	活塞环、轴承	镀铬钢	汽轮机	低压水蒸气，使用温度 500 ℃，介质压力 0.5 MPa
M254H M254K	端面密封、轴承、活塞环、配气盘	陶瓷、硬质合金、青铜、不锈钢、镀铬钢	离心泵、水轮机、压缩机、卷烟机、发酵罐、流量仪表	油类、水、有机酸、碱、盐等、介质压力 2 MPa 使用温度 200 ℃，转数2 900 r/min

续表

型　号	用　途	摩擦副材料	设　备	工作介质及技术条件
M255H	旋片等	铸铁	印刷机用真空加压泵等	空气，介质压力 2 MPa，使用温度 200 ℃，转数 1 440 r/min，干摩擦
M262L	端面密封、轴承	镀铬钢、硬质合金	离心泵、压缩机	空气、氨、液氧、油类，使用温度400 ℃，转数 20 000 r/min
M252 M204 M233	端面密封、轴承、活塞环等	不锈钢、表面硬化钢、碳化钨、青铜等	汽轮机、水轮机、涡轮发动机、印染机等	各种气体和液体等介质，温度 450 ℃
M126H M252H M204H M233H M114H	端面密封、涨圈密封、密封旋片、轴向密封、活塞环、轴承等	碳化钨、不锈钢、堆焊合金、硬质涂层等	离心泵、仪表、屏蔽泵、发酸罐、压缩机、气泵、柴油分配泵、印刷机、涡轮发动机	碱性和弱碱性介质，温度一般 180 ℃，压力 294 kPa，最高转速 10 000 r/min
M126K M252K M204K M104K			离心泵、仪表、发酵罐等	酸性和弱碱性介质，气体介质，温度一般 200 ℃，最高介质压力 980 kPa，最高转速 3 000 r/min
M152JH	活塞环、端面密封等	碳化钨、喷涂碳化钨、表面氮化钢等	气体压缩机、离心泵等	空气、氮气、水等介质，压力 6.86 MPa
M263	坩埚、活塞环、轴承	铸铁、不锈钢、青钢、陶瓷	真空镀膜机、压缩机	空气、油类、水、有机酸、碱、盐，使用温度≤500 ℃，介质压力 3 MPa
M272	活塞环、轴承、阀座	不锈钢、碳钢，陶瓷	压缩机、燃气机	热空气，油类、水，介质压力 05～5 MPa，温度 500 ℃，适用干摩擦
M356	轻型密封	铬钢、不锈钢	水泵	水
M353	制动片、润滑衬板	铜、不锈钢	气流纺纱机、热定型机	空气，非强酸、强碱性介质
M357	轴承等	不锈钢、碳钢、铬钢等	纺织印染机	水、过氧化氢、弱酸、弱碱、盐溶液、有机溶液，使用温度 200 ℃，介质压力 2 MPa，转数2 900 r/min

续表

型　号	用　途	摩擦副材料	设　备	工作介质及技术条件
M511	轴承、滑板、滑块、轴瓦及其他滑动部件	碳钢、铸铁、不锈钢、铸钢	冶金、轧钢、水利，运输、建筑、化肥、化工设备	用在高温 500 ℃以下，重载 50 MPa，低速≤1.5 m/s 无油润滑条件下摩擦系数 0.1～0.15
M671 M672 M673	轴承、密封环、填料环、刮片、石墨舟皿、坩埚止推环	硬质合金、陶瓷、碳钢、不锈钢	化工、化肥、仪表、冶炼、汽车、核工业等机械设备	酸、碱、盐、油、水蒸气使用温度≤400 ℃（空气中）≥400 ℃（还原性气氛）PV：0.6 MP am/s(干)PV：5 MP am/s(湿)摩擦系数 0.05～0.25(干摩擦)

七、送话器用碳砂

送话器用碳砂由含铁、硫杂质低的无烟煤制成，它是质地坚硬、流动性能好、对声波敏感和形状不规则的黑色闪光碳砂，是送话器的一个组成部分。当送话器工作时，装在碳砂杯中的碳砂的电阻值随声波的变化而改变，从而达到传递声音的目的。

送话器用碳砂的型号、用途、粒度及化学性能见表 12－28，电气物理性能见表 12－29。

表 12－28　送话器用碳砂的型号、用途、粒度及化学性能

型号	粒度(mm)	水分(%)≯	灰分(%)≯	含铁量(%)≯	用途
F_1、F_2	0.25～0.355	0.6	3	0.3	磁石式电话机
F_3、F_4、F_5	0.18～0.25	0.8	3	0.3	供电式电话机
F_6、F_7	0.14～0.25	0.3	2	0.3	喉头送话器

表 12－29　送话器用碳砂的电气物理性能

型号	受潮前					受潮后			
	电阻 (Ω/cm^3)	电阻随时间变化率 %	流动性 (cm^3/s) ≮	调变率 % ≮		电阻变化率 %	流动性 (cm^3/s) ≮	调变率 % ≮	
				振幅 0.05 μm	振幅 0.1 μm			振幅 0.05 μm	振幅 0.1 μm
F1	40～75	±15	0.60	8.0	17	+20 −10	0.50	6.5	16
F2	75～125	±15	0.60	8.0	17	+20 −10	0.48	6.5	16

续表

型号	受潮前					受潮后			
	电阻（Ω/cm³）	电阻随时间变化率%	流动性（cm³/s）≤	调变率%≤		电阻变化率%	流动性（cm³/s）≤	调变率%≤	
				振幅 0.05 μm	振幅 0.1 μm			振幅 0.05 μm	振幅 0.1 μm
F3	500～700	±15	0.65	8.0	17	+20 −10	0.55	6.5	16
F4	300～450	±15	0.65	8.0	17	+20 −10	0.55	6.5	16
F5	200～240	±15	0.65	8.0	17	+20 −10	0.55	6.5	16
F6	170～225	±15	0.70	8.0	17	+20 −10	0.60	6.5	16
F7	250～350	±15	0.70	8.0	17	+20 −10	0.60	6.5	16

八、特种石墨

1. 人造金刚石用石墨

人造金刚石用石墨系采用焦炭为基料，经混合、磨粉、压制、焙烧和高温石墨化处理而成。它是人工合成金刚石不可缺少的主要原材料。使用这种石墨合成的金刚石，具有产量多、颗粒大、强度高等优点。其型号、规格及适用范围见表12－30，技术性能见表12－31。

表12－30　人造金刚石用石墨的型号、规格及适用范围

型号	主要规格（mm）	极限偏差（mm）		适用范围
		直径	厚度	
T612	φ12×1.3、φ14×1.5、φ16×1.6、φ18×1.6、φ20×1.8、φ28.5×1.7、	+0.15 −0.35	±0.07	适用于合成 JR_1、JR_2 型金刚石
T621				适用于合成 JR_3、JR_4 型金刚石
T64P	φ12×1、φ12×1.2、φ16×1、φ16×1.2、φ18×1、φ18×1.2	+0.05 −0.05	±0.07	适用于合成 JR 型金刚石
	φ20×1、φ20×1.2 φ23×1、φ23×1.2 φ28×1、φ28×1.5	±0.05		
	φ50×1.2	±1		

表 12－31　人造金刚石用石墨的技术性能

型号	灰分(%)≤	气孔率(%)	石墨化度(%)≥
T612	0.025	25±5	80
T621	0.025	20±5	80
T64P	0.02	28±4	85

2. 电火花加工石墨

电火花加工石墨具有热导率高，热膨胀系数低、耐热冲击性强、自润滑性能好、不浸润被熔融金属等特点，其型号、规格及技术性能见表 12－32。

表 12－32　电火花加工石墨的型号、规格及技术性能

型号	规格(mm)	电阻率(μΩ·m)≯	肖氏硬度	抗折强度(MPa)≮	抗压强度(MPa)≮	灰分(%)≯	体积密度(g/cm³)≮
T502	110×230×460 100×260×260 ≤φ40×400	20	—	—	27.5	0.07	1.55
T555	φ100～200×400 ≥φ300×400	—	50～70	39	88		1.75

九、石墨制品

1. 电解用石墨阳极

电解用石墨阳极的型号 、规格及技术性能见表 12－33。

表 12－33　电解用石墨阳极的型号、规格及技术性能

型号	规格(mm)	电阻率(μΩ·m)≤	抗折强度(MPa)≥	抗压强度(MPa)≥	灰分(%)≤	体积密度(g/cm³)≥
CY－01	40×180×760	9	14.7	24.5	0.4	1.60

2. 连铸石墨

连铸石墨的型号、规格及技术性能见表 12－34。

表 12－34　连铸石墨的型号、规格及技术性能

型号	规格(mm)	电阻率(μΩ·m)≯	肖氏硬度≮	抗折强度(MPa)≮	抗压强度(MPa)≮	灰分(%)≯	体积密度(g/cm³)≮
T461	≤φ40×400 φ100～200×400 ≥φ300×400	20	30	25	35	0.5	1.70

3. 异形聚晶模

异形聚晶模的型号、规格及技术性能见表 12－35。

表 12－35　异形聚晶模的型号、规格及技术性能

型号	主要规格(mm)	灰分(%)≤	气孔率(%)	石墨化度(%)≥
T64J	6×6×6×4.3/ϕ12×6 5×5×5×4.2/ϕ12×6 4×4×4×3.1/ϕ12×6 7×7×7×5.2/ϕ16×9 ϕ6.3×6/ϕ12×9	0.025	26±4	65

十、青铜石墨含油轴承

青铜石墨含油轴承用粉末冶金方法制成，其自身具有均匀的毛细孔组织，经浸油后，润滑油便充满了所有毛细孔。如果在油中加入石墨，油和石墨便形成了润滑性很高的石墨—胶体润滑剂。当机械运转时，轴承因摩擦升温而膨胀，导致毛细孔容积缩小，加之润滑油亦因受热而膨胀，润滑油便自然溢出，提供了对轴的润滑作用。当工作停止后，温度降低，毛细孔的润滑油恢复原来状态，油便重新吸入毛细孔中，从而形成了自动润滑作用。一旦油量不足时，石墨还可单独担当起润滑作用。

青铜石墨含油轴承广泛应用于小型电机、汽车、拖拉机、纺织机械、航空工业、农业机械以及洗衣机等器械上。

青铜石墨含油轴承的技术性能：

(1) 体积浸油率(3# 机油)12%～30%；

(2) 体积密度 5.5～6.5 g/cm^3；

(3) 径向破坏强度一般≮ 245 N。

青铜石墨含油轴承的型号、结构型式、规格尺寸见表 12－36。

表 12－36　青铜石墨含油轴承的型号、结构型式及规格尺寸

型号	结构型式	尺寸(mm)							参考重量(g/个)
		内径 d	外径 D	高度 H	内倒角	外倒角	球面 ϕ	不同心度	
Z－02	筒型	$125^{+0.04}_{+0.01}$	$16^{+0.045}_{+0.01}$	$18.5^{+0.5}_{-1.6}$	0.5×45°	0.5×45°		0.10	9.0
Z－04		$16.22^{+0.03}_{-0.01}$	$19.25^{+0.005}_{+0.050}$	$15^{+0.5}_{-1.0}$		0.4×45°		0.10	10.0
Z－05		$19^{+0.19}_{+0.13}$	$22.7^{+0.075}_{+0.05}$	$17^{0}_{-1.1}$		0.5×45°		0.10	12.0

续表

型号	结构型式	尺寸(mm)							参考重量(g/个)
		内径 d	外径 D	高度 H	内倒角	外倒角	球面 ϕ	不同心度	
Z-13		$14^{+0.043}_{0}$	$16^{+0.103}_{+0.06}$	$19^{0}_{-0.52}$	0.5×45°	0.5×45°		0.10	9.5
Z-19		$18.2^{+0.065}_{+0.02}$	$24^{+0.1}_{+0.055}$	25±0.4		0.5×45°		0.10	28.0
Z-20		$23^{+0.084}_{+0.02}$	$28^{-0.10}_{+0.055}$	20±0.4	0.5×45°	0.5×45°			24.0
Z-21		$15^{+0.056}_{+0.02}$	$21^{+0.10}_{+0.055}$	20±0.3	0.5×45°	0.5×45°		0.10	23.0
Z-35		$10^{+0.022}_{0}$	$16^{+0.046}_{+0.028}$	14±0.25	0.5×45°	0.5×45°		0.03	10.0
Z-37		$10^{+0.022}_{0}$	$20^{+0.039}_{+0.025}$	14	0.5×45°	0.5×45°		0.08	21.4
Z-48		$19^{+0.21}_{+0.16}$	$21.7^{+0.095}_{+0.05}$	$17^{}_{-1.1}$		0.5×45°		0.10	9.0
Z-49		$14^{+0.035}_{0}$	$18^{+0.045}_{+0.01}$	20		0.5×45°		0.10	13.0
Z-50	球形	$10^{+0.022}_{0}$	19.8±0.2	15±0.15			20±0.1	0.08	16.5
Z-51		$12^{+0.027}_{0}$	$21.6^{0}_{-0.1}$	$16.5^{+0.2}_{0}$			22−0.26	0.52	18.0
Z-52		$10^{+0.016}_{0}$	15.5±0.2	11±0.12			16−0.12	0.16	10.0
Z-56	筒形	$10^{+0.055}_{+0.025}$	$16^{+0.075}_{+0.04}$	$15^{0}_{-0.43}$	0.5×45°	0.5×45°		0.06	11.0
Z-57		$14^{+0.034}_{+0.016}$	$20^{+0.05}_{+0.02}$	11.5±0.2	0.5×45°	0.5×45°			11.0
Z-58	法兰筒形	$10^{+0.08}$	$15.2^{+0.1}_{0}$	$13^{+0.2}_{0}$	0.5×45°	0.5×45°		0.05	11.0
Z-62		11±0.30	$28^{-0.052}_{0}$	3±0.15				//0.06 ⊥0.02	10.0
Z-63		$10^{+0.035}_{+0.013}$	$16^{-0.03}_{0}$	10	0.5×45°	0.5×45°		0.05	7.5
Z-66		$12^{+0.040}_{+0.016}$	$18^{+0.065}_{+0.040}$	14±0.3	0.5×45°	1.0×30°		0.02	12.0

续表

型号	结构型式	尺寸(mm)							参考重量(g/个)
		内径 d	外径 D	高度 H	内倒角	外倒角	球面 ϕ	不同心度	
Z-67		$13^{+0.25}_{0}$	$28^{-0.056}_{-0.035}$	$3^{+0.16}_{0}$	0.5×45°	0.5×45°		//0.05	6.5
Z-68		$12^{+0.04}_{0}$	$17^{-0.05}_{0}$	10.5±0.2	0.5×45°	0.5×45°			7.0
Z-69	球形	$12^{+0.024}_{+0.006}$	$23^{+0.15}_{0}$	18±0.15	0.5×45°		$24^{+0.18}_{0}$	0.07	24.0
Z-70		$10^{+0.022}_{0}$	$20^{+0.35}_{+0.10}$	14±0.15	0.5×45°		20±0.1	0.08	16.0
Z-72	筒形	$14^{+0.043}_{0}$	$16^{+0.103}_{+0.06}$	19−0.52		0.3×45°		0.08	9.5
Z-73		$14^{+0.043}_{0}$	$18^{+0.103}_{+0.06}$	17	0.5×45°	0.5×45°		0.08	10.0
Z-74		$14^{+0.043}_{0}$	$18^{+0.103}_{+0.06}$	14±0.35		0.5×45°		0.08	8.5
Z-75		$20^{+0.075}_{+0.03}$	$26^{-0.095}_{-0.05}$	19±0.42		0.8×45°			24.0
Z-76	球形	$12^{+0.015}_{0}$	20.2±0.15	14±0.15			20±0.1	0.08	14.0
Z-77	筒形	$6^{+0.038}_{+0.02}$	$10^{+0.045}_{+0.023}$	8−0.36	0.3×45°	0.3×45°		0.06	2.5
Z-78		$10^{+0.047}_{+0.025}$	$16^{+0.055}_{+0.023}$	L1:$18^{0}_{-0.43}$	0.5×45°	0.5×45°		0.06	12.0 7.0
Z-79	球形	$10^{+0.015}_{0}$	21.54	L2:$10^{0}_{-0.36}$ 14	0.7×45°		22±0.1	0.06	25.0
Z-80		$12^{+0.015}_{0}$		14±0.25	0.5×45°		22±0.1	0.06	18.0
Z-84	筒形	$10^{+0.023}_{+0.008}$	$14^{+0.024}_{+0.017}$	12.5		0.5×45°			10.0
Z-85	球形	$8^{+0.015}_{0}$		$11^{0}_{-0.27}$	0.5×45°		$16^{0}_{-0.11}$	0.05	10.0
Z-86		$10^{+0.023}_{+0.008}$		$13^{0}_{-0.15}$			$18^{0}_{-0.07}$	0.10	14.0
Z-87	法兰筒形	$10^{+0.015}_{+0.01}$	$30^{-0.035}_{-0.015}$	12	0.5×45°	0.5×45°		0.05	42.0

续表

型号	结构型式	尺寸(mm)							参考重量(g/个)
		内径 d	外径 D	高度 H	内倒角	外倒角	球面 ϕ	不同心度	
Z-88		$12^{+0.040}_{+0.016}$	$20^{+0.065}_{+0.040}$	18±0.3	0.5×45°	0.5×45°		0.08	22.0
Z-89		$8^{+0.038}_{+0.02}$	$12^{+0.036}_{+0.016}$	8±0.2		0.5×45°		0.06	3.0
Z-90	球形	$10^{+0.024}_{+0.008}$	10.8±0.2	15±0.1	0.5×45°		20±0.1	0.05	16.5
Z-91	筒形	$22.6^{+0.033}_{0}$	$28.55^{0}_{-0.033}$	$6^{0}_{-0.2}$	1×45°	1×45°			8.5
Z-92		$25^{+0.05}_{+0.02}$	$33^{-0.02}_{-0.003}$	$8^{0}_{-0.1}$					18.0
Z-93		$12^{+0.060}_{+0.025}$	$18^{+0.075}_{+0.04}$	19.5±0.1	0.4×45°	0.4×45°			18.0
Z-94	球形	$12^{+0.026}_{+0.006}$		$15^{0}_{-0.27}$			$20^{0}_{-0.15}$	0.05	27.0
Z-95	带脖球形	$10^{+0.025}_{+0.01}$	21.54 脖径门	总　高 16+0.27	0.5×45°		20±0.1	0.06	28.0
Z-99	球形	$10^{+0.025}_{+0.010}$		14±0.15	0.5×45°		22±0.1	0.06	25.0

第十三章　磁性材料的基础知识

第一节　磁性材料的分类

根据磁性材料所表现出的外部磁性不同，可分为抗磁性物质、顺磁性物质、铁磁性物质、反铁磁性物质、亚铁磁性物质和变磁性物质。其中铁磁性物质和亚铁磁性物质为强磁性物质，其他均为弱磁性物质。

根据磁性材料的矫顽力大小，一般分为软磁材料和永磁（硬磁）材料。

1. 软磁材料（导磁材料）。软磁材料的主要磁特性是磁导率高、矫顽力低（矫顽力≤1 kA/m）。在较低的外磁场下能产生较高的磁感应强度。在外磁场去除后，磁性又基本消失。该材料主要作为非传递、转换能量和信息的磁性零部件或器件。

2. 永磁材料。永磁材料的主要磁特性是矫顽力高，矫顽力＞1 kA/m，其饱和磁化后，再去除磁场，磁性体会储存一定的磁能量，能在较长时间内保持强而稳定的磁性。该材料主要用于需要产生恒定磁通的磁路中。在一定空间内提供恒定的磁场，作为磁场源。

第二节　磁性材料的主要性能、参数及其定义

一、磁感应强度、磁极化强度和磁场强度

饱和磁感应强度（饱和磁通密度）B_s，指磁性体被磁化到饱和时的磁感应强度（磁通密度）。

剩余磁感应强度（剩余磁通密度）B_r，指从磁性体的某一磁化状态，沿正常磁滞回线，把磁场单调地减小到零时的磁感应强度（磁通密度）。

饱和磁极化强度 J_s，指磁性体被磁化到饱和时的磁极化强度。

剩余磁极化强度 J_r，指从磁性体的某一磁化状态沿正常磁滞回线，把磁场单调地减小到零时的磁感应强度的数值。

磁场强度 H，指磁场中任意点的磁通密度大小和方向的量。它等于磁感应强度与磁导率之比。H 越大，稳定性越好。

二、磁化曲线

磁性材料在外磁场反复磁化下，以磁中性状态为出发点，磁场强度从零开始逐渐增加，其磁感应强度 B 随磁场强度 H 而变化的规律的曲线，就是该磁性材料的基本磁化曲线，通常简称磁化曲线，如图 13－1 所示的 $B-H$ 曲线。图中 B 值随着 H 的增加：在 Oa 段增加较快；ab 段则越来越慢；过 b 点后渐近饱和，B_s 称为饱和磁感应强度，其相应的磁场强度为 H_s，通常要求磁性材料有较高的 B_s 值。

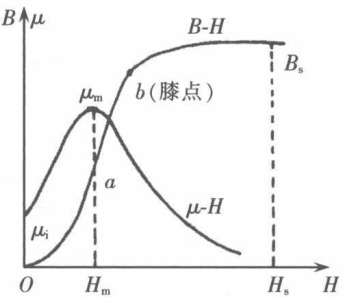


图 13－1　磁化曲线

在磁化曲线（$B-H$）上任何一点 B 与 H 之比就是磁导率 μ，即 $\mu = B/H$。根据 $B-H$ 曲线选点可以绘制出 $\mu-H$ 曲线，如图 13－1 所示。图中 μ_i 为初始磁化率；μ_m 为最大磁化率。软磁材料一般要求最高的 μ 值。在一定磁场强度下，μ 值越高，传递等量磁通所需要的材料就越少。在低磁场下使用的软磁材料，其初始磁化率 μ_i 更能恰当地反映出材料在工作情况下的磁性能。

三、磁滞回线

磁性材料在其磁化曲线上任意一点（a'）所对应的磁场强度变化一周（$H_1 \rightarrow O \rightarrow -H_1 \rightarrow O \rightarrow H_1$）、$B$值随之变化的曲线，即该材料在 a' 点的磁滞曲线，如图13－2 所示。

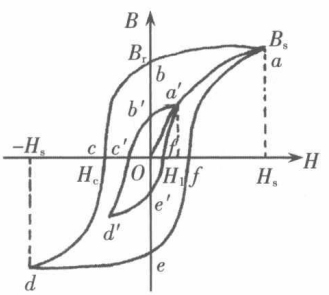


图 13－2　磁滞回线

图中：磁性材料在强度为 H_1 的磁场中被磁化至 a' 点时，再减少磁场，磁感应强度 B 不是沿 Oa' 曲线下降，而是沿另一曲线 $a'b'$ 下降，显然 B 的变化滞后于 H，这个现象称为磁滞。由于磁滞引起的损耗，称为磁滞损耗。由于磁滞原因，使 B 随 H 变化成为一闭合曲线 $a'b'c'd'e'f'a'$，称为磁滞回线。在磁化曲线 Oa 上任意点可对应的磁场强度变化一周，都可得到相应的磁滞回线。随着磁场强度增加，磁滞回线的面积也随着增大。当磁化达到饱和时，再增大磁场，磁滞回线的面积基本上不变，这时的磁滞回线称为极限磁滞回线，如图 13－2 中 $abcdefa$ 回线。由极限磁滞回线可以看出：当 H_s 降为零时，磁感应强度 B 并不回到零，而下降到 b 点，该点的 B_r 称为剩余磁感应强度，简称剩磁；当要 B 降为零，必须加一反向磁场 H_c，这个反向磁场的绝对值称为磁感应矫顽力，通常简称矫顽力（H_c）。

磁滞回线的面积与磁性材料的损耗有关。单位重量的磁性材料在交变磁场磁化下，所消耗的功率称为铁损(P)，它包括磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗。

磁滞回线的形状和面积直接表征磁性材料的主要磁特性：软磁材料的磁滞回线窄，故其矫顽力低，损耗也低，用它制成的器件工作稳定、效率高；矩磁材料的磁滞回线窄而接近矩形，其矫顽力低，剩磁比 R_r 高。适宜作记忆元件和开关元件；永磁材料经饱和磁化后，具有磁滞回线的面积宽，其剩磁 B_r 与矫顽力 H_c 值高，磁滞面积大等性能，储存磁能量大。

四、磁导率

磁导率的大小象征铁磁物质磁化难易程度。磁导率大表示容易磁化，磁导率小表示不易磁化。铁磁物质的磁导率一般都不是常数。磁导率分[绝对]磁导率 μ、起始磁导率 μ_1、最大磁导率 μ_m、回复磁导率 μ_{rrec}。

[绝对]磁导率 μ 指在磁化曲线上任意一点的磁感应强度与磁场强度之比的标量或矩阵量。对于各向同性媒质磁导率是标量，而对于各向异性媒质，则是矩阵量。绝对磁导率与磁常数的比值称为相对磁导率 μ_r。

起始磁导率 μ_i 指在磁化开如(原点)处的磁导率或当磁场强度小到趋近零时，振幅磁导率的极限值。

最大磁导率 μ_m 指起始磁化曲线上随磁场强度的不同而变化的磁导率的最大值，当磁导率最大时，如果再增加磁场强度，磁导率反而减小。

回复磁导率 μ_{rrec} 是指对应于回复线斜率的磁导率。

五、居里温度和温度系数及铁损

居里温度(居里点)T_c 指铁磁物质(或亚铁磁性物质)由铁磁状态转变为顺磁状态时的临界温度。当高于此温度时，便失去磁性而呈顺磁性。

感应温度系数 α_B 是用来衡量永磁材料经饱和磁化后，其磁感应强度在两个给定温度之间所引起的可逆的相对变化的程度。α_B 越小，温度稳定性好。感应温度系数为：

$$\alpha_B = (B_2 - B_1)[B_1(T_2 - T_1)]^{-1} \times 100\% \tag{13.1}$$

式中 B_1、B_2——温度在 T_1、T_2 时的磁感应强度；

α_B——T_2 到 T_1 之间的平均磁感应强度温度系数。

矫顽力温度系数 α_{He} 是用来衡量经饱和磁化后，永磁材料的矫顽力在两个给定温度之间所引起的可逆相对变化程度。α_{He} 越小，温度稳定性好。

磁导率温度系数 $\alpha_{\mu i}$ 是指材料起始磁导率在两个给定温度之间的相对变化量与温度差之比，磁导率温度系数 $\alpha_{\mu i}$ 越小，温度稳定性好。磁导率温度系数 $\alpha_{\mu i}$ 为：

$$\alpha_{\mu i}=\frac{\mu_2-\mu_1}{(T_2-T_1)\mu_i} \tag{13.2}$$

式中　μ_2、μ_1——温度 T_1、T_2 时的起始磁导率。

铁损 P 指每单位质量的铁磁材料在交变和脉动磁场中的磁滞损耗和涡流损耗之和。

六、其他磁性能

磁性体在磁化过程中产生的弹性变形，称为磁致伸缩。在磁化方向，磁性体长度的相对变化率，称为磁致伸缩系数。即

$$\lambda=\frac{\Delta L}{L} \tag{13.3}$$

式中　ΔL——在磁化方向上测得的长度变化。

磁致伸缩系数与磁化过程中的磁场强度有关。当磁场强度增长到一定值时，λ 趋向于恒定，此时的 λ 称为饱和磁致伸缩系数。

剩磁比（开关矩形比）R_r 是衡量开关磁心的磁滞回线接近矩形的程度。

$$R_r=\frac{B_r}{B_m} \tag{13.4}$$

式中　B_r、B_m——剩余磁感应强度和最大磁感应强度。

矩形比（记忆矩形比）R_s 是表示记忆磁芯磁滞回线接近矩形的程度。

$$R_s=\frac{B}{B_m} \tag{13.5}$$

式中　B、B_m——磁场强度为 $-H_m/2$ 和 H_m 时的磁感应强度。

第三节　磁性材料的品种

一、软磁材料与永磁材料

软磁材料的品种、主要特点和应范围见表 13-3。

表 13-3　软磁材料的品种、主要特点和应用范围

品　种	主　要　特　点	应　用　范　围
电工用纯铁	含碳量 0.04% 以下，饱和磁感应强度高，冷加工性好。但电阻率低，铁损高，有磁时效现象	一般用于直流磁场

续表

品种		主要特点	应用范围
硅钢片		铁中加入 0.8%～4.5%的硅，就是硅钢。它和电工用纯铁相比，电阻率增高，铁损降低，磁时效基本消除。但导热系数降低，硬度提高，脆性增大	电机、变压器、继电器、互感器开关等产品的铁心
铁镍合金		和其他软磁材料相比，在低磁场下，磁导率高，矫顽力低，但对应力比较敏感	频率在 1 MHz 以下的低磁场中工作的器件
铁铝合金		和铁镍合金相比，电阻率高，密度小，但磁导率低。随着含铝量增加，硬度和脆性增大，塑性变差	低磁场下和高磁场下工作的器件
软磁铁氧体		烧结体，电阻率非常高，但饱和磁感应强度低，温度稳定性比较差	高频或者高频率范围内的电磁元件
其他软磁材料	铁钴合金	饱和磁感应强度特高，饱和磁致伸缩系数和居里温度高，但电阻率低	航空器件的铁心、电磁铁磁极、换能器元件
	恒导磁合金	在一定的磁感应强度、温度和频率范围内，磁导率基本不变	恒电感和脉冲变压器等的铁心
	磁温度补偿合金	居里温度低，在环境温度范围内磁感应强度随温度升高后急剧地、近似线性地减少	磁温度补偿元件

永磁材料的种类和用途见表 13－4。

表 13－4　永磁材料的种类和用途

永磁材料			主要用途
铝镍钴合金	铸造铝镍钴合金	各向同性	一般磁电式仪表、微电机、里程表、速度计、磁分离器
		热磁处理各向异性	精密磁电式测量仪表、永磁电机、扬声器
		定向结晶各向异性	精密磁电式测量仪表、永磁电机、微电机、行波管、磁控管
	粉末烧结铝镍钴合金		微电机、永磁电机、继电器、小型仪表
铁氧体永磁材料	各向同性		微电机，笛簧接点元件、玩具
	高 B_r		扬声器、印刷电机、受话器、磁控管
	高 H_c		电动机、发电机、吸附用、磁分离器

续表

永　磁　材　料	主　要　用　途
稀土钴永磁材料	行波管、小型电机、大型发电机、副励磁机、扩音器、精密磁电式仪表、磁推轴承、医疗设备
黏结永磁材料	汽车启动电机、音响设备、计量仪表、通信设备、办公机械、电视、磁耦合器、医疗设备等
可加工永磁材料	里程表、罗盘仪、计量仪表、微电机、继电器
半硬磁材料	磁滞电机、铁簧继电器、门锁继电器等
钕铁硼合金	汽车启动电机、音圈电机、各种微电机、音响、磁共振设备等

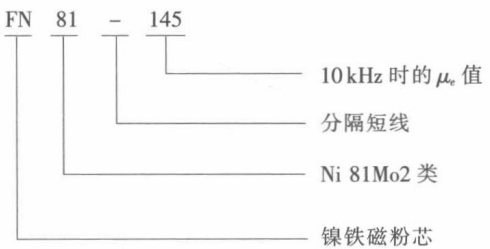
二、镍铁磁粉芯

镍铁磁粉芯是用 Ni81Mo2 和 Ni50 软磁粉末压制而成的环形粉芯。该类粉芯具有稳定性好，使用频率范围较宽等特点，主要用于滤波及谐振电路中。

1. 品种规格

粉芯按其有效磁导率分类。分类代号采用镍铁磁粉芯中“粉”和“镍”字汉语拼音的第一个大写字母，以主元素镍的名义成分值加测试频率 10 kHz 时的有效磁导率的值联合表示。

示例：

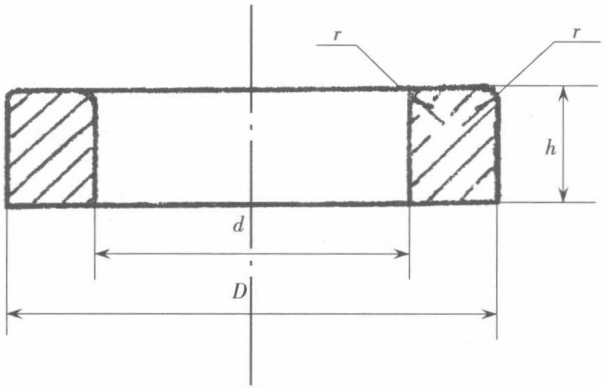


粉芯的分类及代号见表 13－5。

表 13－5　粉芯的分类及代号

牌　号	分　类　及　代　号					
Ni81Mo2	FN81－60	FN81－90	FN81－125	FN81－145	FN81－170	FN81－200
Ni50	FN50－70	FN50－90	FN50－110	—	—	—

粉芯的外形如下图所示。



图中：D——外径，mm；

d——内径，mm；

h——高度，mm；

r——圆角半径，mm。

粉芯的尺寸规格及允许偏差应符合表 13－6 的规定。

13－6　粉芯的尺寸规格及允许偏差　　（单位：mm）

D		d		h		r
基本尺寸	允许偏差	基本尺寸	允许偏差	基本尺寸	允许偏差	不大于
13	±0.4	8	±0.3	3～7	±0.2	0.5
15	±0.4	9	±0.3	3～7	±0.2	0.5
19	±0.4	13	±0.3	3～7	±0.2	0.5
22	±0.4	14	±0.3	3～7	±0.2	0.5
25	±0.5	14	±0.4	6～10	±0.3	2.5
26	±0.5	16	±0.4	6～10	±0.3	2.5
32	±0.5	20	±0.4	6～10	±0.3	3.0
36	±0.5	25	±0.4	6～10	±0.3	3.0
40	±0.5	26	±0.4	6～10	±0.3	3.5
44	±0.5	28	±0.4	6～10	±0.3	4.0
50	±0.5	32	±0.4	6～10	±0.4	4.5
52	±0.5	32	±0.4	6～12	±0.4	4.5
64	±0.5	40	±0.4	6～12	±0.4	6.0

2. 化学成分

粉芯的合金粉化学成分应符合表 13－7 的规定。在粉芯的磁性能符合规定要求时，化学成分不作为判定条件。

表 13－7

牌号	化学成分，%							
	C	Si	S	P	Mn	Ni	Mo	Fe
	不　大　于							
Ni81Mo2	0.03	0.30	0.02	0.02	0.30	79.00～81.00	1.80～2.20	余量
Ni50	0.03	0.30	0.02	0.02	0.30	49.00～51.00	—	余量

3. 性能

粉芯使用的环境条件为：

a. 温度：－55～＋125 ℃；

b. 相对湿度：40±2 ℃时达 98%；

c. 大气压力：666.6～213.3×10^3 Pa。

各类粉芯的有效磁导率及允许偏差应符合表 13－8 的规定。

表 13－8

类　别	有效磁导率，μ_e	允许偏差
FN81－60	60	±5
FN81－90	90	±10
FN81－125	125	±10
FN81－145	145	±10
FN81－170	170	±15
FN81－200	200	±15
FN50－70	70	±10
FN50－90	90	±10
FN50－110	110	±10

粉芯的有效品质因数为：

a. Ni81Mo2 类不小于 15；

b. Ni50 类不小于 5。

粉芯的有效磁导率温度系数为：

a. Ni81Mo2 类分为－100×10^{-6}/℃～200×10^{-6}/℃和不大于 450×10^{-6}/℃

两档；

b. Ni50 类不大于 200×10^{-6}/℃。

粉芯进行基本环境试验的项目包括：

a. 温度变化；

b. 恒定湿热；

c. 振动和冲击。

粉芯的外观应完整光洁。但允许有不影响使用性能的微小缺陷。

包装粉芯的盒(箱)外应注明“小心轻放”字样及防潮、易碎品标志。

粉芯贮存处温度为－10～＋40 ℃，相对湿度不大于 80%，周围应无酸、碱及其他有害气体杂质。

第十四章　软磁材料

第一节　电工用纯铁及低碳钢

一、电工用纯铁

铁具有高饱和磁感应强度、高磁导率和低矫顽力。它的纯度愈高，磁性能愈好。但制备高纯度的铁，工艺复杂，成本较高，因此，在工程技术上广泛采用的是电工用纯铁。电工用纯铁又称阿姆可铁，是一种铁含量为99.5%以上碳含量极低的软钢在冶炼电磁纯铁时，加入适量的铝或硅铝，以削弱碳、氮、氧等杂质的磁性的有害影响，成为铝镇静纯铁或硅铝镇静纯铁。制造电器、电信及仪表磁性元器件的纯铁一般采用厚度不大于4 mm的热轧或冷轧纯铁薄板或截面不大于250 mm^2的热轧、冷轧、热锻纯铁材。

纯铁在20 ℃时的物理性能见表14-1。

电工用纯铁品种的牌号、名称和用途见表14-2。

电工用纯铁品牌与磁性能见表14-3。

表14-1　纯铁在20 ℃时的物理性能

熔点(℃)	1 532	起始磁导率	199～477
α-γ相变温度(℃)	910	最大磁导率(mH/m)	4.4～25
密度(g/cm^3)	7.87	矫顽力(A/m)	20～100
电阻率(Ω·m)	10.7×10^{-8}	磁滞损耗(J/m^3)	70～400
饱和磁感应强度(T)	2.155		

表14-2　电工用纯铁的种类、名称、代号及用途

种　类	名　称	代　号	一　般　用　途
沸腾纯铁	电铁1 电铁1高	DT1 DT1A	不考虑磁时效的一般电磁元件和一般炉料
	电铁2 电铁2高	DT2 DT2A	不考虑磁时效的电磁元件和高纯度炉料

续表

种　类	名　称	代　号	一　般　用　途
铝镇静纯铁	电铁 3 电铁 3 高	DT3 DT3A	不考虑磁时效的一般电磁元件
	电铁 4 电铁 4 高 电铁 4 特 电铁 4 超	DT4 DT4A DT4E DT4C	在一定时效工艺下，保证无时效的电磁元件
硅铝镇静纯铁	电铁 5 电铁 5 高	DT5 DT5A	不考虑磁时效的一般电磁元件
	电铁 6 电铁 6 高 电铁 6 特 电铁 6 超	DT6 DT6A DT6E DT6C	在一定时效工艺下，保证无时效、磁性范围较稳定的电磁元件

注：代号中“DT”表示电工用纯铁，后面数字为序号，数字后的字母表示电磁性能等级，即“A”“E”“C”分别表示“高”“特”“超”级，未用字母表示的为“普”级。

表 14-3　电工纯铁品牌与磁性能

纯铁系列	牌号	H_c（A/m，不大于）	μ_m（mH/m，不小于）	在不同磁场下的 B 值(T)				用　途
				B_5	B_{10}	B_{25}	B_{50}	
原料纯铁	DT1			1.40	1.50	1.62	1.71	合金原材料
	DT2							粉末冶金原料、高纯炉料
电子管纯铁	DT7							电子管阳极、粉极边杆、代 Ni 材料
	DT8 DT8A							要求气密性的电子管零件
电磁纯铁	DT3 DT3A	1.2 0.9	7.5 8.8					不保证磁时效的一般电磁元件
	DT4 DT4A DT4E DT4C	1.2 0.9 0.6 0.4	7.5 8.8 11.3 15.0					在一定时效工艺条件下，保证无时效的电磁元件
	DT5 DT5A	1.2 0.9	7.5 8.8					不保证磁时效的一般电磁元件
	DT6 DT6A DT6E DT6C	1.2 0.9 0.6 0.4	7.5 8.8 11.3 15.0					在一定时效工艺下，保证无时效磁性稳定的电磁元件

注：表中 B_5、B_{10}、B_{25}、B_{50} 分别是磁场为 400 A/m、800 A/m、2 000 A/m、4 000 A/m 时的 B 值。

二、低碳钢

低碳钢又称无硅钢片，用作家用电器的小电机、小变压器和 75 kW 以下的非连续运行的电机铁芯。低碳钢的典型磁特性见表 14－4。

表 14－4　低碳钢的典型磁特性

饱和磁感应强度 B_s		矫顽力 H_c		起始磁导率 μ_i	
T	G	A/m	Oe	H=1Oe	H=10Oe
2.14	21 400	72	0.9	2 000	1 530

不同厚度下铁损* $P_{15/50}$(W/kg)			密度 (g/cm³)	电阻率 ($\times10^{-8}\Omega\cdot$m)
0.35 mm	0.47 mm	0.64 mm		
6.22	7.10	8.70	7.85	12.5

注：1Oe=79.85 A/m。

*　$P_{15/50}$表示波形为正弦波、频率为 50 Hz、磁感应强度峰值为 1.5 T 时，每千克材料的功率损耗。

低碳钢片冲片后需要进行脱碳退火以提高磁性。退火温度为 732～788 ℃，保护气氛为氢气、天然气或真空。常用的低碳钢碳的质量分数为 0.05%～0.08%，厚度为 0.50 mm 和 0.65 mm 两种。与硅钢相比，其硬度低，冲压特性好，在较强磁场下(2～4 kA/m)下磁感应强度高，电阻率高。

第二节　电工用硅钢片

硅钢片是在铁中加入 0.8%～4.5%硅的一种软磁材料。铁中加入硅后，可以提高电阻率，并有助于分离有害杂质、提高磁导率、降低矫顽力和铁损；但硬度和脆性增高、导热系数降低，对机械加工和散热不利，一般硅含量不超过 4.5%。硅钢片按制造工艺分热轧和冷轧两种，而冷轧又有取向和无取向之分。

目前我国生产的电工硅钢片有热轧硅钢片(带)、冷轧无取向电工硅钢片(带)、冷轧单取向电工硅钢片(带)和电信用冷轧单取向硅钢片(带)等 4 类。

电机工业使用的硅钢片厚度为 0.35 mm 和 0.50 mm；电信工业使用频率高，涡流损耗大，常采用 0.05～0.20 mm 的薄带硅钢。

常用硅钢片的应用范围见表 14－5。

一、热轧硅钢片

热轧硅钢片的磁性能在板材平面上呈各向同性，分下列两种：

(1) 硅的质量分数为 1%～2%的低硅钢片，具有高的 B_s 和好的力学性能，厚度一般为 0.5 mm，主要用作发电机和电动机转动部件材料，又称为热轧电机硅钢片。

(2) 硅的质量分数为 3%～5%的高硅钢片，具有低的损耗和高的磁导率，厚度多为0.35 mm，主要用作变压器的铁芯材料，又称为变压器硅钢片。热轧电工硅钢片的厚度和磁性能见表 14－6，高频用热轧硅钢性能见表 14－7。

热轧硅钢片的缺点是表面不光滑，因而叠装系数约为 92%。

表 14-5　常用硅钢片的应用范围

品　种	热　轧					冷轧无取向				冷轧单取向	
牌　号	DR 530-50	DR 510-50	DR325-35 DR405-50	DR280-35 DR315-50	DR255-35 DR290-50	DW540-50	DW470-50	DW310-35 DW360-50	DW265-35 DW310-50	DQ122G-30～DQ133G-30 DQ126G-35～DQ137G-35	DQ133-30～DQ179-30 DQ151-35～DQ183-35
大型交流发电机				○	○			○	○	○	○
大型交流电动机				○	○			○	○		
大型直流电机	○	○	○			○	○				
中型交流电动机	○	○				○	○				
小型交流电动机	○	○				○	○				
间歇运转电动机	○	○	○								
控制微电机		○	○	○		○	○				
电力变压器				○	○			○	○	○	○
电焊变压器			○			○	○				
音频变压器										○	○
电抗器、磁放大器								○	○	○	○
互感器									—	○	○
继电器			○			○					
扼流圈	○		○			○	○				

表 14-6　热轧电工硅钢片的厚度和磁性能

牌　号		厚度	最小磁感应强度(T)			最大铁损(W/kg)		弯曲次数	密度(g/cm^3)	
新牌号	旧牌号	(mm)	B_{25}	B_{50}	B_{100}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	不小于	酸洗钢板	未酸洗钢板
DR530-50	D22	0.50	1.51	1.61	1.74	2.20	5.30		7.75	7.70
DR510-50	D23	0.50	1.54	1.64	1.76	2.10	5.10			
DR490-50	D24	0.50	1.56	1.66	1.77	2.00	4.90			
DR450-50	—	0.50	1.54	1.64	1.76	1.85	4.50			
DR420-50	—	0.50	1.54	1.64	1.76	1.80	4.20			
DR400-50	—	0.50	1.54	1.64	1.76	1.65	4.00			
DR440-50	D31	0.50	1.46	1.57	1.71	2.00	4.40	4.0	7.65	—
DR405-50	D32	0.50	1.50	1.61	1.74	1.80	4.05	4.0		
DR360-50	D41	0.50	1.45	1.56	1.68	1.60	3.60	1.0	7.55	—
DR315-50	D42	0.50	1.45	1.56	1.68	1.35	3.15	1.0		
DR290-50	D43	0.50	1.44	1.55	1.67	1.20	2.90	1.0		
DR265-50	D44	0.50	1.44	1.55	1.67	1.10	2.65	1.0		
DR360-35	D31	0.35	1.46	1.57	1.71	1.60	3.60	5.0	7.65	—
DR325-35	D32	0.35	1.50	1.61	1.74	1.40	3.25	5.0		
DR320-35	D41	0.35	1.45	1.56	1.68	1.35	3.20	1.0	7.55	—
DR280-35	D42	0.35	1.45	1.56	1.68	1.15	2.80	1.0		
DR255-35	D43	0.35	1.44	1.54	1.66	1.05	2.55	1.0		
DR225-35	D44	0.35	1.44	1.54	1.66	0.90	2.25	1.0		

注：$P_{10/50}$、$P_{15/50}$分别表示频率 50 Hz 时 B 为 1.0 T 和 1.5 T 时的铁损。

表 14-7　高频用热轧硅钢性能

牌　号	厚度 (mm)	磁感应强度(T)			铁损(W/kg)		弯曲次数 (不小于)	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$, 不小于)
		B_5	B_{10}	B_{25}	$P_{7.5/400}$	$P_{10/400}$		
		不小于			不大于			
DR1750G-35	0.35	1.23	1.32	1.44	10.00	17.50	1	0.57
DR1250G-20	0.20	1.21	1.30	1.42	7.20	12.50	2	0.57
DR1100G-10	0.10	1.20	1.29	1.40	6.30	11.00	3	0.57

二、冷轧无取向电工硅钢片(带)

冷轧无取向电工硅钢片(带)中硅的质量分数为 0.5%～3.0%，通过冷轧与热处理的相互配合，破坏了晶粒的取向，使材料基本上呈各向同性。由于其含硅量低于取向硅钢，因而具有更高的 B_s。材料厚度有 0.35 mm 和 0.5 mm 两种，主

要用于制造电机的小型叠片铁芯，所以又称为冷轧电机硅钢片(带)。

冷轧无取向电工硅钢片(带)与热轧硅钢片相比，具有表面光滑、厚度均匀、利用率较高等特点，其叠装系数可高达96%，现在正逐步取代热轧硅钢片。冷轧无取向电工硅钢片(带)的磁性能见表14-8。

三、冷轧单取向电工硅钢片(带)

这类硅钢片(带)的质量分数为2.5%～3.5%。利用二次再结晶，绝大部分晶粒整齐排列形成高斯(Goss)结构。与热轧硅钢片相比，冷轧单取向硅钢片(带)具有更优越的磁性能，更好的塑性和表面质量，带材平滑，主要用于变压器制造，又称为冷轧变压器电工钢带。冷轧单取向电工硅钢片(带)的磁性能见表14-9。

四、电信用冷轧单取向硅钢片

这类硅钢片主要在电信和仪器仪表工业中得到了广泛的应用，用于制造各种变压器、扼流圈等电磁元件，使用的电流较小，频率较高，因此，要求在弱磁场范围内具有较高的磁导率和高的磁感应强度，在较高的频率下，涡流损耗要小。为了减少涡流损耗和提高交变磁场下的有效磁导率，钢片一般做得很薄，通常在0.2～0.05 mm。国产电信用厚度0.2 mm以下冷轧单取向硅钢片的性能见表14-10，0.35 mm厚度电信用冷轧硅钢片的牌号和性能见表14-11。表中DG牌号的钢带主要用于400 Hz以上，DQ牌号的钢带主要用于工频。

表14-8　冷轧无取向硅钢片(带)的磁性能

牌　号	厚度(mm)	铁损 $P_{15/30}$(W/kg) 不大于	磁感 B_{50}(T) 不小于	密度(g/cm^3)
DW270-35	0.35	2.70	1.58	7.60
DW310-35		3.10	1.60	7.65
DW360-35		3.60	1.61	7.65
DW435-35		4.35	1.65	7.70
DW500-35		5.00	1.65	7.75
DW550-35		5.50	1.66	7.75
DW315-50	0.50	3.15	1.58	7.60
DW360-50		3.60	1.60	7.65
DW400-50		4.00	1.61	7.65
DW465-50		4.65	1.65	7.70
DW540-50		5.40	1.65	7.75

续表

牌　　号	厚度(mm)	铁损 $P_{15/30}$(W/kg) 不大于	磁感 B_{50}(T) 不小于	密度(g/cm³)
DW620－50	0.50	6.20	1.66	7.75
DW800－50		8.00	1.69	7.80
DW1050－50		10.50	1.69	7.85
DW1300－50		13.00	1.69	7.85
DW1550－50		15.50	1.69	7.85

表 14－9　冷轧单取向硅钢片(带)的磁性能

牌　　号	厚度(mm)	铁损 $P_{15/50}$(W/kg) 不大于	磁感 B_{10}(T) 不小于	密度(g/cm³)
DQ122G－30	0.30	1.22	1.88	7.65
DQ133G－30		1.33	1.88	
DQ143G－30		1.43	1.79	
DQ147G－30		1.47	1.77	
DQ162G－30		1.62	1.74	
DQ179G－30		1.79	1.71	
DQ196G－30		1.96	1.68	
DQ126G－35	0.35	1.26	1.88	7.65
DQ137G－35		1.37	1.88	
DQ151G－35		1.51	1.77	
DQ166G－35		1.66	1.74	
DQ183G－35		1.83	1.71	
DQ200G－35		2.00	1.68	
DQ230G－35		2.30	1.63	

表 14－10　厚度 0.2 mm 以下电信用冷轧单取向硅钢片的性能

牌　号	厚度(mm)	铁损*(W/kg)				磁感应强度**(T)		矫顽力(A/m)
		$P_{1.0/400}$	$P_{1.5/400}$	$P_{1.0/1000}$	$P_{0.5/3000}$	B_{50}	B_{1000}	H_c
		不大于				不小于		不大于
DG3	0.025	—	—	—	35	—	1.60	60
DG3	0.03	—	—	—	35	—	1.65	45
DG4	0.03				30		1.70	40

续表

牌　号	厚度(mm)	铁损*(W/kg)				磁感应强度**(T)		矫顽力(A/m)
		$P_{1.0/400}$	$P_{1.5/400}$	$P_{1.0/1000}$	$P_{0.5/3000}$	B_{50}	B_{1000}	H_c
		不大于				不小于		不大于
DG1	0.05	—	21.0	—	—	0.60	1.55	36
DG2			19.0	—		0.80	1.60	34
DG3			17.0	24.0		0.85	1.66	32
DG4			16.0	22.0		0.90	1.70	32
DG5			15.0	20.0		1.05	1.75	32
DG6			14.5	19.0		1.10	1.75	32
DG1	0.08 0.10	—	22.0	—	—	0.60	1.55	36
DG2			19.0			0.80	1.66	32
DG3			17.0			0.90	1.66	28
DG4			16.0			1.00	1.70	26
DG5			15.0			1.05	1.75	26
DG6			14.5			1.20	1.80	26
DG3	0.15	—	19.0	—	—	0.90	1.65	26
DG4			18.0			1.00	1.75	26
DG5			17.0			1.10	1.75	26
DG6			16.5			1.13	1.75	26
DG1	0.20	12.0	—	—	—	—	1.55	—
DG2		11.0					1.60	
DG3		10.0					1.66	
DG4		9.0					1.70	
DG5		8.2					1.74	

注：① 铁损 $P_{1.0/400}$、$P_{1.5/400}$、$P_{1.0/1000}$、$P_{0.5/3000}$ 分别表示在频率为 400 Hz、磁感应强度值 1.0 T 时，400 Hz、1.5 T 时、1 000 Hz、1.0 T 时和 3 000 Hz、0.5 T 时的比铁损值。

② 磁感应强度 B_{50}、B_{1000} 分别表示磁场强度 50 A/m 和 1 000 A/m 时的磁感应强度值。

表 14-11　0.35 mm 厚度电信用冷轧硅钢片的牌号和性能

牌　号	厚度(mm)	磁感应强度 B(T，不小于)				铁损值 P(W/kg，不大于)		
		B_5	B_{10}	B_{25}	B_{50}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{17/50}$
DQ1	0.35	1.50	1.57	1.70	1.80	0.90	2.00	2.90
DQ2	0.35	1.56	1.62	1.75	1.83	0.80	1.80	2.60

续表

牌　号	厚度 (mm)	磁感应强度 B(T,不小于)				铁损值 P(W/kg,不大于)		
		B_5	B_{10}	B_{25}	B_{50}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{17/50}$
DQ3	0.35	1.64	1.67	1.80	1.86	0.70	1.60	2.30
DQ4	0.35	1.66	1.72	1.84	1.89	0.60	1.40	2.00
DQ5	0.35	1.65	1.74	1.87	1.91	0.54	1.25	1.83
DQ6	0.35	1.71	1.77	1.89	1.93	0.50	1.15	1.68

第三节　铁镍合金

铁镍合金是在铁中加入36%～81%的镍，经真空冶炼而成的铁磁材料，俗称坡莫合金，是仪器、仪表工业中常用的一种高级软磁材料。它在冶炼过程中，用改变成分的配比及工艺因素的方法，生产出多种磁性能各异的品种，如具有矩形磁滞回线、高磁感应强度、恒磁导率、高磁导率、高初始磁导率以及高磁致伸缩系数等品种，以适应各种需要。铁镍合金具有独特的性能，在弱磁场下有极高的磁导率和很低的矫顽力；但它的电阻率不高，饱和磁感应强度较低，宜在1 MHz以下频率范围的弱磁场中使用。铁镍合金含有稀有金属镍、成本较高，多制成小功率的磁性元件，在直流及低频(150～400 Hz)的弱磁场中使用。铁镍合金加工性好，可制作形状复杂、尺寸精确的元件。

常见的铁镍合金产品主要有带材、板材、管材、丝材和棒材等。常用的铁镍合金物理、机械性能见表14－12，铁镍软磁合金冷轧带直流磁性能见表14－13。

表14－12　常用的铁镍合金的物理、机械性能

牌号	ρ ($\mu\Omega\cdot$m)	d (g/cm^3)	居里温度 (℃)	λ_s ($\times10^{-5}$)	H_B	σ_b (N/mm^2)	δ_s (%)
1J46	0.45	8.2	400	25	130	—	—
1J50	0.45	8.2	500	25	130	450	37
1J54	0.60	8.2	360	—	125	500	40
1J51	0.45	8.2	500	—	—	450	37
1J52	—	8.2	—	—	—	—	—
1J34	0.50	8.7	610	—	—	540	42

续表

牌号	ρ ($\mu\Omega \cdot m$)	d (g/cm^3)	居里温度 (℃)	λ_s ($\times 10^{-5}$)	H_B	σ_b (N/mm^2)	δ_s (%)
1J65	0.25	8.35	600	—	—	540	43
1J67	0.45	8.48	530	—	—	540	50
1J79	0.55	8.6	450	2	120	560	50
1J80	0.62	8.5	330	—	130	560	40
1J83	0.50	8.6	460	—	—	490	50
1J76	0.55	8.6	400	2.4	—	—	—
1J85	0.56	8.75	—	0.5	—	—	—
1J86	0.60	8.85	—	0.5	—	—	—
1J77	0.55	8.6	350	—	—	540	40

表 14－13　铁镍软磁合金冷轧带直流磁性能

牌号	级别	厚度 (mm)	μ_i (mH/m, 不小于)	μ_m (mH/m, 不小于)	H_c (A/m, 不大于)	B_s (T, 不小于)	B_r/B_m 80(A/m)	特点和用途
1J46		0.02～0.04	2.5	22.6	32.0	1.5		N_i 含量 36%～50%，具有较高的饱和磁感强度，适用于中等磁场下工作的中小功率变压器、微电机、继电器、扼流圈、电磁离合器的铁芯，屏蔽罩、话筒振动膜片以及力矩电动机衔铁和导磁体等。为进一步提高合金磁性，可适当提高退火温度或稍延长保温时间，冷速对磁性影响不大，退火时可适当加快冷速以利提高效率及节约能源
		0.05～0.09	2.9	27.6	24.0	1.5		
		0.10～0.19	3.5	31.3	20.0	1.5		
		0.20～0.34	4.0	37.6	16.0	1.5		
		0.35～2.50	4.5	45.1	12.0	1.5		
1J50		0.02～0.04	2.7	25.0	24.0	1.5		
		0.05～0.09	3.5	35.1	20.0	1.5		
		0.10～0.19	4.0	40.1	14.4	1.5		
		0.20～0.34	4.5	50.1	11.2	1.5		
		0.35～1.0	4.6	62.7	9.6	1.5		
1J54		0.02～0.04	2.0	20.0	20.0	1.0		
		0.05～0.09	2.5	25.1	16.0	1.0		
		0.10～0.19	3.1	31.3	12.0	1.0		
		0.20～0.34	3.8	37.6	9.6	1.0		
		0.34～100	4.0	40.1	8.0	1.0		

续表

牌号	级别	厚度(mm)	μ_i(mH/m,不小于)	μ_m(mH/m,不小于)	H_c(A/m,不大于)	B_s(T,不小于)	B_r/B_m 80(A/m)	特点和用途
1J34		0.005～0.01		62.5	20	1.50	0.90	Ni含量34%～50%，具有矩形磁滞回线，在中等磁场下具有较高的磁导率和高饱和磁感应强度，适用于中小功率高灵敏度磁放大器和磁调制器、脉冲变压器以及计算机的元件
		0.02～0.04		75	16	1.50	0.90	
		0.05～0.08		112.5	9.8	1.50	0.90	
		0.10～0.20		137.5	8	1.50	0.87	
1J51	Ⅰ	0.005		19	40	1.50	0.80	
		0.01		25	32	1.50	0.83	
		0.02～0.09		50	20	1.50	0.85	
		0.10		50	18	1.50	0.85	
	Ⅱ	0.01		44	20	1.50	0.87	
		0.02～0.04		75	15	1.50	0.92	
		0.05～0.08		75	15	1.50	0.92	
		0.10		75	15	1.50	0.90	
	Ⅲ	0.01		75	15	1.52	0.91	
		0.02～0.04		95	13	1.52	0.94	
		0.05		100	11	1.52	0.91	
1J52		0.02～0.04		62.5	20	1.40	0.90	Ni含量65%左右，具有磁织构的特点，以及高μ_m和矩形磁滞回线，主要用于中功率磁放大器、继电器、扼流圈和计算机元件
		0.05～0.10		87.5	16	1.40	0.90	
1J65		0.005～0.01		100	8.0	1.30	0.90	
		0.02～0.04		125	6.4	1.30	0.90	
		0.05～0.09		187.5	4.8	1.30	0.90	
		0.10～0.50		275	3.2	1.30	0.90	
1J67		0.005～0.04		200	6.4	1.20	0.90	
		0.05～0.09		250	4.8	1.20	0.90	
		0.10～0.19		312.5	4.0	1.20	0.90	
		0.20～0.50		437.5	3.2	1.20	0.90	

续表

牌号	级别	厚度(mm)	μ_i(mH/m,不小于)	μ_m(mH/m,不小于)	H_c(A/m,不大于)	B_s(T,不小于)	B_r/B_m 80(A/m)	特点和用途
1J79		0.01	15.0	87.7	4.8	0.75		该类合金又称高 N_i 坡莫合金，在弱磁场下具有很高的起始磁导率和最大磁导率，但合金的 B_s 较低。主要用于弱磁场下的高灵敏度小功率变压器、小功率磁放大器、继电器、扼流圈、磁屏蔽等方面。1J79 有高的最大磁导率且稳定性较好，1J80 合金有好的动态特性和温度稳定性，但处理必须在高真空或高纯 H_2 以免氧化。1J83 合金具有高矩形比、用于快速磁放大器铁芯上，1J76 合金 N_i 含量稍低些，合金的温度稳定性好
		0.02～0.04	18.8	112.8	4.0	0.75		
		0.05～0.09	22.6	137.9	4.0	0.75		
		0.10～0.19	25.1	188.0	1.6	0.75		
1J80		0.005～0.01	17.5	75.2	4.8	0.65		
		0.02～0.04	22.6	94.0	4.0	0.65		
		0.05～0.09	25.1	112.8	3.2	0.65		
		0.10～0.19	27.6	150.4	2.4	0.65		
1J83		0.01	5.0	62.7	5.6	0.82	0.80	
		0.02～0.04	8.8	125.3	4.0	0.82	0.80	
		0.05～0.09	8.8	188.0	2.4	0.82	0.80	
		0.10	20.1	225.6	1.6	0.82	0.80	
1J76		0.02～0.04	18.8	75.2	4.8	0.75		
		0.05～0.09	22.6	125.3	3.2	0.75		
		0.10～0.19	25.1	175.5	2.8	0.75		
		0.20～0.50	31.3	225.6	1.44	0.75		

续表

牌号	级别	厚度(mm)	μ_i(mH/m,不小于)	μ_m(mH/m,不小于)	H_c(A/m,不大于)	B_s(T,不小于)	B_r/B_m 80(A/m)	特点和用途
1J85		0.005～0.01	20.1	87.7	4.80	0.70	—	具有最高的起始磁导率、极低的矫顽力和相当高的最大磁导率，对微弱信号反应灵敏。主要用于扼流圈、音频变压器、高精度电桥变压器、互感器、磁调制器、快速磁放大器、录音机磁头等铁芯上 1J85 合金超薄带具有铁损低的特点，还可用作 20 kHz 下开关电源的铁芯 1J85、1J86 合金磁性与热处理工艺关系极大，在 600～300 ℃ 应控制合适冷速 1J77 合金 Ni 含量较低，性能对热处理工艺不太敏感
		0.02～0.04	22.6	100.3	3.60	0.70		
		0.05～0.09	35.1	137.9	2.40	0.70		
		0.10～0.19	37.6	188.0	1.60	0.70		
		0.20～0.34	50.1	225.6	1.20	0.70		
		0.35～1.00	62.7	313.3	0.80	0.70		
		1.10～2.50	50.1	188.0	1.20	0.70		
		2.51～3.00	43.9	150.4	1.44	0.70		
1J86		0.005～0.01	12.5	100.3	4.00	0.6	—	
		0.02～0.04	37.6	137.9	2.40			
		0.05～0.09	50.1	188.0	1.44			
		0.10～0.19	62.7	225.6	1.20			
		0.20～0.34	75.2	275.7	0.72			
		0.35～1.00	62.7	250.7	1.20			
1J77		0.05～0.09	37.6	175.5	2.00	0.60	—	
		0.10～0.19	50.1	225.6	1.20			
		0.20～0.34	62.7	275.7	0.96			
		0.35～0.50	75.2	313.3	0.80			
1J403	Ⅰ	0.02		500	3.2	1.38	0.97	含 N、Co 和 Mo，μ_m 很高，具有矩形磁滞回线，适用于直流变换器、磁放大器、扼流圈及计算机元件
		0.05		625	1.38	1.38	0.97	
	Ⅱ	0.02		375	4.0	1.38	0.95	
		0.05		500	3.2	1.38	0.95	
		0.10		625	2.4	1.38	0.95	

应力对铁镍合金有着极其密切的影响，在进行冲剪、弯曲、拉伸以及辗压、装叠、卷绕等工艺过程中，或者受到冲击、振动和碰撞时，铁镍合金将产生不规则的内应力，会产生塑性变形，从而使磁导率下降、矫顽力增大，故需进行退火处理，以

消除内应力，使其磁性恢复到最佳状态。经热处理后的铁镍合金磁性元件，对应力更加敏感，因此必须轻拿轻放，小心保管，不能碰压或冲击；绕线时，不能直接绕在该磁性元件上，应该装盒绕制，避免应力再生，防止磁性能变劣。

第四节　铁铝合金

铁铝合金是以铁和铝(6%～15%)为主要组成成分，具有很高的电阻率，密度小，硬度高，耐磨性好；抗振动和抗冲击性能也好，用它制成的器件涡流损耗小，重量轻。但含铝量超过10%时，铁铝合金变脆，塑性降低，加工困难。它的饱和磁感应强度随含铝量增加而下降，通过热处理可获得高的磁导率和低的矫顽力。在某些场合可以代替铁镍合金使用。铁铝合金制成的元件必须进行高温退火，以提高磁性。

铁铝合金的牌号、含铝量、特点和主要用途见表14－14；其磁性范围见表14－15；其物理性能见表14－16。

表14－14　铁铝合金的牌号、含铝量、特点和主要用途

牌号	含铝量范围(%)	特　点	主要用途
1J6	5.5～6.0	在铁铝合金中有最高的饱和磁感应强度。其磁性能不如硅钢片，但有较好的耐腐蚀性	微电机、电磁阀等的铁心
1J12	11.6～12.4	其磁导率和饱和磁感应强度介于1J6与1J16之间，与1J50属于同类型的合金。有高的电阻率的抗应力、耐辐照等	控制微电机、中等功率的音频变压器脉冲变压器和继电器等的铁心
1J13	12.8～14.0	与纯镍比，其饱和磁感应强度高，矫顽力低，饱和磁致伸缩系数高。但抗腐蚀性不如纯镍	水声和超声器件，如超声清洗、超声探伤、研磨、焊接等器件
1J16	15.5～16.3	在铁铝合金中，它的磁导率最高、矫顽力最低。但饱和磁感应强度不高	在低磁场下工作的小功率变压器、磁放大器、互感器、磁屏蔽等

表 14-15　铁铝合金的磁性范围

序号	牌号	厚度 (mm)	直流磁性能			
			$\mu_{0.4}$	$\mu_{0.8}$	最大磁导率 μ_m	矫顽力 H_c
			(H/m)			(A/m)
1	1J6	0.35			0.003 75～0.007 5	32～48
2	1J12	0.2～0.5		0.002 5～0.006 8	0.018 8～0.062 5	5.6～12
3	1J13				0.006 25～0.012 5	48～57.6
4	1J16	0.10	0.003 13～0.004 38		0.031 3～0.043 8	5.6～7.2
		0.20	0.005～0.01		0.062 5～0.125	1.6～2.4
		0.35	0.005～0.01		0.062 5～0.125	1.6～2.4
		0.50	0.005～0.01		0.062 5～0.125	1.6～2.4

序号	直流磁性能							饱和磁致伸缩系数 (λ_s)	铁损(W/kg)	
	不同磁场强度下的磁感应强度值									
	B_5	B_{10}	B_{24}	B_{25}	B_{32}	B_{r24}	B_{r32}		$P_{7.5/400}$	$P_{10/400}$
	(Wb/m^2)									
1	1.15～1.25	1.25～1.35		1.35～1.50						
2									12.0～15.0	20.5～25.0
3			1.005～1.10	1.10～1.30		0.25～0.50	35～40×10^{-6}			
4				0.75～0.93			0.37～0.44			
				0.65～0.75			0.27～0.35			
				0.65～0.75			0.27～0.35			
				0.65～0.75			0.27～0.35			

表 14－16　铁铝合金的物理性能

牌号	电阻率 ($\mu\Omega \cdot cm$)	密度 (g/cm^3)	居里温度 (℃)
1J6	70(退火后)	7.2	730
1J12	100(退火后)	6.7	655
1J13	90(退火后) 125～130(淬火后)	6.6	510
1J16	140～160(淬火后)	6.5	400

第五节　软磁铁氧体

铁氧体是复合氧化物烧结体，是一种用陶瓷工艺制作的非金属磁性材料。与金属软磁材料相比，具有较高的电阻率，在高频磁场中使用，涡流损耗小；但其饱和磁感应强度低，温度稳定性较差。适于制造高频或较高频范围的电磁元件。软磁铁氧体常用的品种有铁氧体软磁材料、铁氧体矩磁材料和铁氧体压磁材料。

软磁铁氧体按其主要用途的分类见表 14－17。

表 14－17　软磁铁氧体按其主要用途的分类

性　能	单　位	低频变压器	中频电感器 天线棒	宽频带脉冲 变压器	高磁通密度 软磁铁氧体	高频电感器 功率变压器
起始磁导率μ_i		800～2 500	500～1 000	1 500～10 000	1 000～3 000	70～150
$\tan\delta/\mu_i$	$\times10^{-8}$	0.8～1.8(10 kHz) 1.5～10(100 kHz)	5～10(100 kHz) 10～40(1 MHz)	1～10(10 kHz) 4～60(100 kHz)		20～50(1 MHz) 60～120(10 kHz)
饱和磁感应强度 B_s	T	0.35～0.5	0.4	0.3～0.5	0.35～0.52	0.35～0.42
居里温度 T_c	C	140～210	200～280	90～280	180～280	350～490
电阻率 ρ	$\times10^{-8}\Omega \cdot m$	50～700	100～2 000	2～50	20～100	>105
近似成分的摩尔分数	%	MnO 27 ZnO 20 Fe_2O_3 53	MnO 34 ZnO 14 Fe_2O_3 52	MnO 27 ZnO 20 Fe_2O_3 53	MnO 30 ZnO 15 Fe_2O_3 55	NiO 32 ZnO 18 Fe_2O_3 50
使用频率	kHz	≤200	100～2 000	≤100 000	700～1 000	

一、铁氧体软磁材料

铁氧体软磁材料的电阻率为 $10^6 \sim 10^{12}/(\mu\Omega \cdot cm)$，适用于几千到几百兆赫兹的频率范围，其特点是初始磁导率 μ_i 高，比磁滞损耗系数($\tan\delta/\mu_i$)小，磁导率随温度变化小。常用的材料有镍锌和锰锌铁氧体，主要用于制作滤波线圈、脉冲变压器、可调电感器、高频扼流圈以及天线等的铁芯。铁氧体软磁材料常用的牌号和主要磁性能见表 14－18。

表 14－18　铁氧体软磁材料常用的牌号和主要磁性能

牌号	初始磁导率 μ_i ($\times10^{-6}$ H/m)	比损耗系数				磁导率比温度系数 $\alpha_{\mu i}/\mu_i$ (20～55 ℃)	比磁滞损耗系数 η_H ($\times0.16\pi^2\times10^6$)
		频率 f_1 (MHz)	$\tan\delta_1/\mu_i$ ($\times1/0.4\pi$)	频率 f_2 (MHz)	$\tan\delta_2/\mu_i$ ($\times1/0.4\pi$)		
R20	25	4	250	75	1 000	0～30	
R60	75	2	80	25	350	0～35	
RK1	125	1.5	70	15	200	0～5	
RK4	500	0.05	10	1.5	60	0～8	
R1K	1 250			0.5	35	0～3	0.05(10 kHz)
R6K	7 500	0.002	5			0～2	
R10K	12 500	0.002	3			±1	

牌号	减落系数 $D\cdot F\times1/0.4\pi$ (－5～45 ℃)	矫顽力 H_c (A/m)	饱和磁感应强度 B_s (Wb/m^2)	居里温度 T_c (℃)	电阻率 ρ ($\mu\Omega\cdot$cm)	密度 d (g/cm^3)
R20		1 200	0.22	350	10^{12}	4.0
R60		320	0.32	300	10^{11}	4.2
RK1	20	240	0.30	250	10^{11}	4.3
RK4		80	0.32	180	10^9	4.5
R1K		16	0.31	150	10^8	4.8
R6K	2	8	0.34	100	10^6	4.8
R10K	0.5	4	0.34	85	10^6	4.9

二、铁氧体矩磁材料

铁氧体矩磁材料的磁滞回线接近矩形，矫顽力越低，磁性能越好。电阻率比金属矩磁材料要高得多，因而涡流损耗极小。它的开关时间短，抗辐射性强，制造工艺简单，成本低，但其饱和磁感应强度低，温度稳定性也较差。它主要用于电子计算机、自动控制和远程控制中作记忆元件、开关元件和逻辑元件。

铁氧体矩磁材料通常分为两类：一类是在常温下使用的，称常温矩磁材料，典型品种是镁锰铁氧体；一类是在较宽温度范围内使用的，称宽矩磁材料，典型品种是锂锰铁氧体。锂锰铁氧体与镁锰铁氧体相比，其温度系数小，开关时间短，但其磁滞回线的矩形性稍差，矫顽力稍大。这两种铁氧体的磁性能见表 14－19。

表 14－19　镁锰和锂锰铁氧体的磁性能

种　类	饱和磁感应强度 B_s (Wb/m^2)	矫顽力 H_c(A/m)	剩磁比 B_r/B_s	居里温度 T_c(℃)
镁锰铁氧体	0.28	96	0.92	250
锂锰铁氧体	0.32	160～320	0.90	600

三、铁氧体压磁材料

铁氧体压磁材料是指含有钴离子的镍铁氧体。这种铁氧体由于磁致伸缩效应，使其处在一定的偏磁场和交流磁场同时作用下，将发生相同频率的机械振动，即压磁效应。利用其压磁效应可制造超声器件、回声器件以及机械滤波器、混频器、超声延迟线等。它和纯镍等金属压磁材料相比，能用于较高频率的场合，而金属压磁材料适用于低频和大功率场合。铁氧体压磁材料的磁性能见表 14－20。

表 14－20　铁氧体压磁材料的磁性能

饱和磁感应强度 B_s (Wb/m^2)	剩磁 B_r (Wb/m^2)	矫顽力 H_c (A/m)	居里温度 T_c(℃)	电阻率 ρ($\mu\Omega\cdot$cm)	密度 d(g/cm^3)	声速 c(m/s)
0.20～0.25	0.14～0.16	160～200	≥400	$\geqslant 10^{12}$	5	5 600

铁氧体材料选用时应注意以下几点：

(1) 在 1 MHz 频率以下工作，应选用 Mn—Zn 铁氧体；在 1～300 MHz 范围，应选用 Zi—Zn 铁氧体；高于 300 MHz 需用钡铁氧体。

(2) 在 1 MHz 以下频率，用铁氧体作为变压器和滤波器磁芯时，要求材料具有高的 μ 值；用于强磁场下的铁氧体，要求材料的 B_s 要高；在载波电话设备上用的，要求损耗低，且要求 μ 值随温度变化小。

(3) 用于广播和电视设备中的线圈、变压器及天线的磁芯材料，在 1 MHz 以

上要求铁氧体材料损耗低和 μ 值高。

(4) 用于非线性电路元件中(如放大器用的铁氧体),要求磁化强度为磁场幅度的非线性函数。

(5) 射频振荡电路调谐用的铁氧体材料,要求 μ 值和偏场具有适当的依赖关系,所加偏场可与射频场平行或垂直。

(6) 中等磁场下工作的变压器,要求器件小型化,则要求高 B_s(一般大于 0.5 T)铁氧体材料。

第六节　高饱和磁感应强度合金

常用的高饱和磁感应合金是含钴 50%、钒 1.4%～1.8%,其余为铁的铁钴合金,其牌号为 1J22。在软磁材料中,它的饱和磁感应强度最高,适合用于制作重量轻、体积小的空间技术用器件,如微电机、电磁铁、继电器等。它有很高的居里温度(980 ℃),适合于高温环境工作;它有很高的饱和磁致伸缩系数(60×10^{-6}),利用它作磁致伸缩换能器,输出能量很高;它经热处理后成为各向异性合金,其剩磁比和矫顽力可得到进一步改善;但它的电阻率低(≈27 $\mu\Omega\cdot$ cm),高频下铁损骤增,加工性差,容易氧化,价格昂贵。

1J22 合金的尺寸规格及允许偏差见表 14－21。

1J22 合金的磁性能范围见表 14－22。

表 14－21　1J22 合金的尺寸规格及允许偏差

产品种类	厚度或直径(mm)		宽度(mm)	长度(mm)不小于
	尺　寸	允许偏差		
冷轧带材	0.05～0.09	0 −0.015	60～120	5 000
				500
	>0.09～0.19	0 −0.02		200
	>0.19～0.25	0 −0.03		200
				200
	>0.25～0.40	0 −0.04		
	>0.40～0.70	0 −0.05		200
	>0.70～1.00	0 −0.06		

续表

产品种类	厚度或直径(mm)		宽度(mm)	长度(mm)不小于
	尺　寸	允许偏差		
冷拉丝材	0.10～0.19	±0.01	—	—
	>0.19～0.49	±0.02		
	>0.49～0.90	±0.03		
	>0.90～3.00	±0.04		
	>3.00～6.00	±0.06		
热轧(锻)扁材和棒材	6.0～8.0	±0.5	—	1 000
	>8.0～12.0	±1.0		1 000
	>12.0～35.0	±1.5		250
	>35.0～50.0	±2.0		250
	>50.0～80.0	±4.0		250
	>80.0～100.0	±5.0		150

表 14-22　1J22 合金的磁性能范围

厚度(mm)	直流磁性能					铁　损(W/kg)			
	不同磁场强度下的磁感应强度值				矫顽力 H_c (A/m)				
	B_4	B_{16}	B_{40}	B_{80}		$P_{15/50}$	$P_{20/50}$	$P_{15/400}$	$P_{20/400}$
	(Wb/m²)								
0.10	1.68～1.785	2.12～2.15	2.28～2.31	2.35～2.40	120～148	3.54～4.74	6.32～9.05	30.15～39	48.7～63.2
0.20	1.70～1.80	2.145～2.18	2.30～2.33	2.40～2.41	115.2～134.8	3.68～4.03	6.7～7.87	35.2～36.3	58.4～64.2
0.35	1.70～1.81	2.115～2.17	2.275～2.34	2.355～2.39	123.2～135.2	3.79～4.19	6.29～8.27	45.1～51.6	77.5～88.4

1J22 合金的热处理工艺是：退火气氛为氢或真空，随炉温至 850～900 ℃。保温 3 h，以 600 ℃/h 冷却到 600 ℃，炉温降到 300 ℃出炉。

第七节　高硬度高电阻高磁导合金

该合金具有高初始磁导率、高硬度、高电阻率，而且磁性对应力不敏感，耐磨性好，适用于制作录音机和磁带机磁头芯片以及微特电机、变压器、传感器、磁放大器等各种高频电感元件的铁芯。

此种合金的品种包括 1J87、1J88、1J89、1J90 和 1J91 的冷轧带材。

冷轧带材的尺寸规格及其允许偏差见表 14-23。

表 14-23　冷轧带材的尺寸规格及其允许偏差

厚　度(mm)		宽　度(mm)		长　度(mm)
尺　寸	允许偏差	尺　寸	允许偏差	
0.02～0.04	−0.005	40～160	±1.0	不　限
>0.04～0.09	−0.010	40～200		
>0.09～0.15	−0.015			
>0.15～0.25	−0.025			
>0.25～0.40	−0.04			
>0.40～0.70	−0.05			
>0.70～1.00	−0.07			

冷轧带材每米长度内的镰刀弯不得大于 3 mm。

冷轧带材不得有瓢曲、皱纹和显著的波浪(其波峰高与峰距之经不应大于 1/25)。

冷轧带材应成卷交货。厚度大于 0.05 mm 的带材,其带卷内径应大于 150 mm。

合金的牌号和化学成分应符合表 14-24 的规定。

表 14-24　合金的牌号和化学成分

合金牌号	化学成分 %										
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	Fe
			不大于								
1J87	≤0.03	0.30～0.60	0.30	0.020	0.020	78.5～80.5	1.60～2.20	6.50～7.50	—	—	余量
1J88	≤0.03	≤0.60	0.30	0.020	0.020	79.5～80.5	—	7.50～9.00	—	—	余量
1J89	≤0.03	0.50～1.00	0.30	0.020	0.020	78.5～80.5	3.50～4.50	3.00～3.60	1.80～2.80	—	余量
1J90	≤0.03	≤0.60	0.30	0.020	0.020	79.0～80.0	1.80～2.20	4.80～7.20	—	0.40～0.60	余量
1J91	≤0.03	≤0.60	0.30	0.020	0.020	75.5～80.0	—	7.70～8.40	—	0.90～1.20	余量

第八节　磁温度补偿合金

磁温度补偿合金的居里温度一般在 25～200 ℃之间。在居里温度以下,它的磁感应强度值随温度升高而近似线性地急剧下降。一般永磁体的磁体随温度升高而减弱,影响到用于仪表中的永磁体磁极气隙间的磁通密度改变,导致仪表测量误差;通常用磁温度补偿合金在永磁体两极间设置一磁分路,就能补偿磁路的

温度特性，使永磁体两极间的磁通密度基本保持不变。磁温度补偿合金的牌号和磁性能见表 14－25；磁温度补偿合金的成分、用途使用温度范围和退火工艺见表 14－26。

表 14－25　磁温度补偿合金的牌号和磁性能

牌号	在磁场强度 H=8 000 A/m 时各温度下的磁感应强度值(Wb/m²)					磁感应强度降落差 (Wb/m²)		
	−20 ℃	20 ℃	40 ℃	60 ℃	80 ℃	$B_{-20℃}\sim B_{20℃}$	$B_{20℃}\sim B_{40℃}$	$B_{20℃}\sim B_{80℃}$
1J30	0.40～0.60	0.20～0.45		0.02～0.13				
1J31	0.60～0.85	0.40～0.65		0.15～0.45				
1J32	0.80～1.10	0.60～0.95		0.40～0.75				
1J33		0.47～0.70			0.10～0.40			0.22～0.42
1J38	0.40～0.50	0.30～0.38	0.20～0.30			0.10～0.20	0.10～0.18	

表 14－26　磁温度补偿合金的成分、用途、使用温度范围和退火工艺

牌号	主要成分 %				用　途	使用温度范围(℃)	退火工艺
	Ni	Al	Cr	Fe 和其他			
1J30	29.50～30.50			余量	风向风速表、行波管、磁控管	−55～+70	将元件在保护气氛或埋入 Al_2O_3 粉中，加热到 800 ℃～1 000 ℃，保温 30～120 min，然后炉冷
1J31	30.50～31.50			余量			
1J32	31.50～32.50			余量			
1J33	32.80～33.80	1.00～2.00		余量	电压调节器	−40～+80	
1J38	37.50～38.50		12.50～13.50	余量	里程速度表、汽油表、电能表	−40～+60	

第九节　恒导磁合金

含镍 45%、钴 25%及钼 7%的铁镍钴和铁镍钴钼合金是一种在相当宽的磁感应强度、一定宽的温度和频率范围内，其磁导率基本不变的软磁材料，1J66 合金是其代表品种。它经热处理后，其磁导率的恒稳范围在 0.002～0.6 Wb/m² 之间，此时它的磁化曲线和磁滞回线接近于直线。恒导磁合金可用作恒电感和中等功率的单极性脉冲变压器等的铁芯。

恒导磁合金的性能见表 14－27。

表 14－27　恒导磁合金的性能

牌号	厚度 (mm)	级别	ΔB (T)	B_s (T)	B_r (T)	H_c (A/m)	μ_L (mH/m)	$\alpha_\sim$ (%)	$\alpha_\simeq$ (%)	α_T (%)
1J/34 h	0.10		1.45～1.50	1.55	0.30	3.98	4.4	—	—	5
1J67 h	0.05		1.20	1.27	0.03	3.98～7.96	5.0～6.3	10～15	—	5
1J66	0.05～1.0	Ⅰ	—	—	—	—	3.56	10	9	8
		Ⅱ	—	—	—	—	3.75	7	6	5

注：1. 摘自 GBn　201—1988。

2. $\Delta B=B_s-B_r$，μ_L 为感应磁导率，$\alpha_\sim$ 为交流稳定值，$\alpha_\simeq$ 为交直流稳定值，α_T 为温度稳定值。

3. α_T 在－50～＋90 ℃测得。

4. 1J66 的 $\alpha_\sim$ 测量频率为 60 Hz，分别在 $B_\sim=0.03$ T，0.3 T，0.45 T，0.6 T 下测量 μ_L，采用其中最大和最小 μ_L 值求得。1J66 的 $\alpha_\simeq$ 测量频率为 60 Hz 交流 $B_\sim=0.03$ T 的 μ_L 和再附加 $H=56$ A/m的直流磁场时的 $\mu_L 56$ 之差值与 μ_L 之比。

5. 1J67 h 的 $\alpha_\sim$ 是在 60～5 000 Hz 内有效磁导率 μ_e 的变化率。

恒磁导合金的电阻率是 25 μΩ·cm，密度 8.25 g/cm³；居里温度是 600 ℃。

1J66 的热处理工艺：退火气氛是氢气，随炉升温至 1 200 ℃，保温 3 h，以 100 ℃/h冷却到 600 ℃，炉温降至 300 ℃出炉；1J66 合金的磁场热处理工艺是：氢气保护下，加不小于16 000 A/m的磁场，随炉升温到 650 ℃，保温 1 h，以 50～100 ℃/h冷却到 200 ℃出炉。

第十节　非晶态软磁合金

非晶态软磁合金是一种新型磁性材料，磁导率高，饱和磁感应强度高，矫顽力低，功率损耗低，机械强度和硬度高，可用液态急冷法制成薄带。材料可用作节能型电力变压器磁芯，开关电源平滑电路扼流圈，磁放大器型开关电源可饱和扼流圈，磁屏蔽，EMI 滤波器，电涌噪声抑制扼流圈，新型磁传感器等。

非晶态软磁合金有钴基非晶合金、铁基非晶合金和铁镍基非晶合金等三大类。

一、钴基非晶合金

该类合金的特点是具有高磁导率，低矫顽力，电阻率较大，高频损耗低。适用于磁头芯片、变压器、互感器铁芯、磁屏蔽材料。目前，钴基非晶合金已大量用作图书防盗传感器、高频开关(频率为 20～500 kHz)铁芯。

二、铁基非晶合金

这类合金具有高的饱和磁感应强度，损耗为硅钢的 1/4～1/3，可取代硅钢片

做铁磁材料，主要用做电力变压器、电源变压器的铁芯，还可用作电磁传感器和电机芯片。目前该类合金在 50 Hz 配电变压器和 100 Hz 航空变压器中的应用已获得较大进展，在降低损耗，节约能源上越来越发挥它的优点。该类合金的缺点是饱和磁感应强度和铁芯占空系数较低，性硬，机械加工性差，在较高温度下性能不稳定。

三、铁镍基非晶态软磁合金

该类合金的性能介于钴基和铁基非磁晶合金之间，具有较高的 B_s 和较高的 μ 值，主要用于传递中等磁场强度、中等功率的电信号的变压器铁芯中。目前，在 50 Hz 漏电保护开关的零序互感器铁芯中获得较大应用，可取代高 Ni 坡莫合金。

非晶态软磁合金的性能见表 14－28。

表 14－28　非晶态软磁合金的性能

类　别	Co 基非晶态合金							
成　分	Co70 Fe5 Si15 B10	Co70.5 Ee4.5 Si10 B15	Co72 FeMo SiB (2705X)	Co FeNi NbSi B	Co FeMo MnSi B	Co Fe Nb B	Co FeNi CrSi B	Co FeV SiB
B_t(T)	0.84	0.85	1.00	0.71	0.78	0.70	0.65	0.69
B_t(T)①								
μ_r (mH/m)		(1 kHz) 12.5	(1 kHz) 15.0	(1 kHz) 25.0	(1 kHz) ≥50.1	(400 kHz) ≥0.5	(μ_1) 25.0	
μ_m (mH/m)	150.4			313.3	376.0		250.7	2 067.9
B_r/B_m				0.5	0.5			0.95
H_c (A/m)	0.16	1.60	1.44	1.20	0.56	1.60	1.20	0.24
损耗 (W/kg)				$P_{5/20k}$ ≤30	$P_{6/20k}$ ≤40 $P_{3/100k}$ ≤100			
ρ($\mu\Omega$·m)	1.80	1.15	1.15	1.30	1.35	1.20	1.35	1.20
T_x(℃)②	500	420	530	540	520	470	532	540

续表

类　别	FeNi 基非晶态合金			Fe 基非晶态合金				
成　分	Fe40 Ni40 P14 B6	Fe40 Ni40 (MoSiB)20	(FeNiV)78 (SiB)22	Fe82 (SiB)18	Fe81 Si4 B13 C2	Fe Cr Si B	Fe79 (SiB)21	Fe78 (SiB)22
B_t(T)	0.78	0.80	0.90	1.67	1.61	1.54	1.58	1.56
B_t(T)①			0.85	1.05		1.30	1.35	1.28
μ_r(mH/m)								
μ_m (mH/m)	1 103.0	250.7	501.3	(0.8 kHz) 275.7				
B_r/B_m	0.83	0.2～0.5	0.95			0.67	0.81	0.75
H_c (A/m)	0.48	1.52	1.20	2.40	0.64	3.2	3.2	7.2
损耗 (W/kg)						*P*10/50 0.12 *P*10/400 1.4	*P*10/50 0.01 *P*2/20K 10	*P*10/50 0.14 *P*10/400 0.2
ρ($\mu\Omega$·m)	2.00	1.35	1.35	1.25	1.25	1.60	1.30	1.25
T_x(℃)②	412	450	502	516	400	498	512	550

① B_t 为 80 A/m 时的磁感强度。

② T_x 为非晶态合金晶化的开始温度。

第十一节　纳米结晶软磁材料

纳米结晶软磁材料是一种性能优良的软磁材料。这种材料具有超微细的纳米晶粒(约 10 nm),其电磁性能优于普通结晶和非晶软磁材料。它的饱和磁感应强度(B_s)高达 1.70 T,有效磁导率(μ_e)可达 100 000,电阻率(ρ)高,磁芯损耗低,热磁稳定性好。这种材料可用液态急冷法制成薄带,也可用溅射法制成薄膜。可用作薄膜磁头、大功率变压器、高频率变压器、开关电源变压器、数据通信接口元件——脉冲变压器,在电磁兼容技术中作共模扼流圈、零相电抗器、可饱和电抗器、磁屏蔽、磁传感器等。

纳米结晶软磁材料的品种与性能见表 14-29。

表 14－29　纳米结晶软磁材料的品种与性能

合　金	t/μm	D/nm	B_s T	μ_e① $\times10^3$	H_c A/m	λ_s $\times10^{-6}$	ρ $\mu\Omega\cdot$m	W14/50② W/kg	W2/100k W/kg
$Fe_{90}Zr_7B_3$	20	16	1.63	29	5.5	−1.1	0.44	0.21	79.7
$Fe_{89}Zr_7B_3Cu_1$	20	12	1.64	34	4.5	−1.1	0.51		85.4
$(Fe_{0.89}Co_{0.02})_{90}Zr_7B_2Cu_1$	22	13	1.70	48	4.2	−0.1	0.53	0.03	80.8
$Fe_{89}Zr_7B_3Pd_1$	20	13	1.63	30	3.2				
$Fe_{90}Hf_7B_3$	18	13	1.59	32	4.5	−1.2	0.48	0.14	59.0
$Fe_{84}Nb_7B_9$	22	10	1.50	36	7.0	+0.1	0.58	0.14	75.7
$Fe_{83}Nb_7B_9Ca_1$	19	10	1.48	38	4.8		0.70	0.22	47.0
$Fe_{83}Nb_7B_9Cu_1$	19	8	1.52	49	3.8	1.1	0.64		54.7
$Fe_{86}Zr_{3.25}Nb_{3.25}B_{6.5}Cu_1$	19	9	1.61	110	2.0	−0.3	0.56		60.0
$Fe_{85.6}Zr_{3.3}Nb_{3.3}B_{6.8}Cu_1$	18	8	1.57	160	1.2	−0.3	0.56	0.05	49.0
$Fe_{84}Zr_{3.5}Nb_{3.5}B_8Cu_1$	19	8	1.53	120	1.7	+0.3	0.61	0.06	58.7
$Fe_{78}Si_9B_{13}$	20		1.56	10	3.5		1.37	0.28	166.0
$Co_{70.5}Fe_{4.5}Si_{10}B_{15}$	21	约 2	0.88	70	1.2	0	1.47		62.0
$Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$	20	10	1.28	85	1.1				49.4
$Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$③	18		1.24	100	0.5	−2.1	1.15		39.1

注：① f=kHz，H_m=0.4 A/m。

② $W_{a/b}$ 是在 $a\times10^{-1}$T 和 bHz 的磁芯损耗。

③ 参见 J. Appl. Phys.，1988，64，pp. 6044～6046。

第十二节　其他磁性材料

一、低膨胀合金材料

低膨胀合金常用的是铁镍合金，有 36%Ni—Fe 和 31%Ni—(4%～6%)Co—Fe 合金两类。其特点是热膨胀系数很小(小于 1.63×10^{-6}/℃)，低膨胀铁镍合金的平均线膨胀系数见表 14－30。在精密仪表、度量衡装置、精密测量设备等各方面有着重要的作用。

表 14-30 低膨胀铁镍合金的平均线膨胀系数

合金牌号	平均线膨胀系数($\times10^{-6}℃^{-1}$)					
	20～50 ℃	20～100 ℃	20～200 ℃	20～300 ℃	20～400 ℃	20～500 ℃
4J32	0.7	0.8	1.4	4.3	7.2	9.3
4J36	0.6	0.8	2.0	5.1	8.0	10.0
4J40	1.4	1.3	1.2	1.7	4.5	—

二、磁滞伸缩合金材料

磁滞伸缩是指由于磁化而引起的磁性物质的弹性变形。磁滞伸缩合金主要包括纯镍、镁铝(1J13)和镁钴(1J22)。这类合金主要用作超声波换能器铁芯，金属磁致伸缩材料的物理性能见表 14-31。

表 14-31 金属磁致伸缩材料的物理性能

材 料	电阻率 $\rho(\times10^{-8}\Omega\cdot m)$	饱和磁致伸缩系数 $\lambda_s(\times10^{-6})$	电机械耦合系数 k_m
Ni(99.9%)	7	−28	0.30
Ni50-Fe50(1J50)	40	+28	0.32
Ni95-Co5	10	−35	0.50
Co49-Fe49-V2(1J22)	30	−65	0.30
Fe87-Al13(1J13)	90	+30	0.22

20 世纪 80 年代中后期，国外已出现超磁滞伸缩合金 $SmFe_2$、T_bFe_2、$T_b(FeNi)_2$、$T_b(FeCo)_2$、$(T_{b1-x}Dy_x)Fe_2$、$T_{b1-x}Dy_x(Fe_{1-y}Mn_y)$等，$\lambda_0$ 可达 $1\ 100\times10^{-6}$～$2\ 500\times10^{-6}$，可用于强力驱动元件、控制元件和传感器元件，广泛用于计算机打印纸、磁带录像机的跟踪控制、机器人的功能部件、照相机自动聚焦的驱动、磁强性波元件及特种武器等最新用途，它正在逐步取代传统的压电陶瓷及上述合金。

三、磁屏蔽合金材料

凡具有高磁导率的合金都可用于磁屏蔽。这类合金主要是 Fe-Ni 合金中的 1J46、1J50、1J54、1J76、1J77、1J79、1J80、1J83、1J85、1J86 和 Fe-Ai 合金中的 1J16，它们的性能分别见本章第三节。

这类合金的选用原则是：所需屏蔽的磁场较强时，应选用具有较高磁感应强度的合金，屏蔽材料的截面积也要相应增大；所需屏蔽的磁场较弱时，应选用较高 μ_m 值的材料；所需屏蔽的磁场更弱时，则应选用高 μ_0 值材料。在选用高 μ 值材

料的同时还应考虑材料有一定的截面积，以保证预期的屏蔽效果。

四、矩磁合金材料

这类合金的磁滞回线近似矩形，矩形系数 B_r/B_m 大于 0.8，可用来制造磁放大器、无触点继电器、整流器、振流圈、调幅器和脉冲变压器的铁芯以及计算机和仪表元件。矩磁合金的物理和机械性能见表 14-32。其磁性能及用途见本章第三节。

表 14-32　矩磁合金的物理和机械性能

牌号	电阻率 ($\mu\Omega \cdot m$)	密度 (g/cm^3)	居里点 (℃)	抗拉强度 (N/mm^2)		伸长率(%)	
				冷硬态	软态	冷硬态	软态
1J34	0.50	8.70	—	—	540	—	42
1J51	0.45	8.20	500	—	450	—	37
1J52	—	8.20	—	—	—	—	—
1J65	0.25	8.35	600	—	540	—	43
1J67	0.45	8.43	530	930	540	3	50
1J83	0.50	8.60	460	1 030	470	3	50
1J403	0.55	8.55	600	—	—	—	—

第十三节　软磁材料的选用

软磁材料绝大多数是在交流磁场下使用，选用时主要考虑的因素是工作磁通密度、磁导率、损耗和价格等。可根据其磁化曲线确定工作点，如图 14-1 所示。

图 14-1 中，μ-H 曲线的峰值点，即最大磁导率 μ_m 点，所对应的磁场强度为 H_m，H_m 所对应的磁感应强度是 $B-H$ 曲线上的 m 点所对应的 B_m，m 点称为磁化曲线的拐点，是选用软磁材料工作点的参考点。

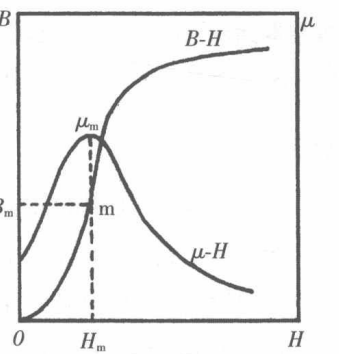


图 14-1　根据磁化曲线确定软磁材料工作点的示意图

一、高磁场下使用的软磁材料

高磁场下最常用的软磁材料是硅钢片。

电机和变压器铁芯用的硅钢片，其工作点往往选在磁化曲线上高于 m 点的某点，如冷轧单取向硅钢片和无取向硅钢片通常分别选在1.7 Wb/m^2 和 1.5 Wb/m^2 左右。这样，产品效率虽稍有降低，但铁芯的体积和质量将减少，硅钢片的特性得到充分利用。对于不同的产品应选用不同特性的硅钢片。例如：

(1) 电力变压器铁芯：为了减少损耗，要选用低铁损和高磁感应强度的材料。

(2) 小型电机铁芯：选用高磁感应强度的硅钢片，对其铁损的要求可放宽，因铁芯体积小，铁损比铜损要小，而磁感应强度高，可使铜损降低，电机的总损耗得到补偿，同时也可节约金属材料。

(3) 大型电机铁芯：因其铁芯体积大，铁损在总损耗中所占比例一般较高，对铁损应从严要求；大型高速电机，因离心力大，除要求有好的磁性外，还要有足够的抗拉强度。

(4) 间歇运转的电机铁芯：因启动频繁，应选用磁感应强度高的硅钢片，以减少启动电流，而对铁损不作严格要求。

(5) 互感器铁芯：主要要求误差小，工作点应选在 m 点或低于 m 点的 $B-H$ 曲线的线性部分。

二、低磁场下使用的软磁材料

低磁场下经常选用的软磁材料有铁镍合金、铁铝合金以及冷轧单取向硅钢薄带等。它们的磁导率和磁感应强度高，矫顽力低，能满足弱信号下的使用要求，但不同的产品仍要选用不同材料。例如：

(1) 磁放大器用的材料：要选用具有高饱和磁感应强度、高磁导率、高电阻率、低矫顽力和高剩磁比的 1J51 类铁镍合金。

(2) 电源变压器铁芯：要选用具有高饱和磁感应强度和高磁导率的冷轧单取向硅钢薄带；也可选用 1J50 类铁镍合金，1J50 类合金的饱和磁感应强度虽不及冷轧单取向硅钢薄带高，但因其磁导率高，所需变压器初级磁化电流小，功率因素高，铁损小，效率高。不过它的成本也高。

(3) 小功率音频变压器铁芯：因它不能有非线性失真，故通常选用 1J79 类铁镍合金或 1J16 类铁铝合金。

三、高频下使用的软磁材料

高频下一般选用具有较高磁导率、较低矫顽力和很高电阻率的铁氧体软磁材料，它的品种较多，应根据不同的使用频率范围选用合适材料。

四、特殊场合下使用的软磁材料

根据特殊场合的具体要求选用，例如：

(1) 空间技术中电器用的软磁材料，除保证产品性能外，还要求体积小、质量

轻，可选用饱和磁感应强度最高的 1J22 铁钴合金。

(2) 记忆元件和开关元件用的软磁材料，可选用具有矩形磁滞回线的铁氧体或铁镍合金。

(3) 自动控制系统的校正网络中做恒电感的扼流圈铁芯，可选用 1J66 恒磁导合金。

(4) 超声技术中使用的软磁材料，可选用具有高的磁致伸缩系数的 1J22 铁钴合金、1J13 铁铝合金或铁氧体压磁材料。

第十四节　常用软磁材料的热处理及表面处理

软磁材料在冲、剪和弯曲等加工过程中，由于机械应力和应变，会导致磁性恶化。因此软磁材料在冲、剪、弯曲加工后，必须采用消除应力退火工序，以消除机械应力和应变，恢复材料的原有磁性。

一、硅钢片退火工艺

硅钢片常用的退火工艺有砂封退火、保护气氛退火和连续退火三种。砂封退火工艺装备简单，保护气氛退火效果最好，连续退火效率最高。

(1) 砂封退火。将冲片和铁芯装入炉内，用砂密封，以防氧化。首先将炉升温至600 ℃，再以低于每小时 40 ℃的速度升温至 760～800 ℃，然后保温 2～4 h，再以低于每小时40 ℃的速度降温至 600 ℃，最后炉冷至 300 ℃以下出炉。

(2) 保护气氛退火。升温、保温和降温与砂封退火相似，不同的是当升温到 300 ℃，经一段时间除油后，再通入保护气氛。降温时，当温度降至 500 ℃或者更低值后，停止通保护气氛。通常采用的保护气氛有纯氮，或纯氮再混合 2%以下的纯氢。

(3) 连续退火。连续退火就是将硅钢片在炉内处于 760～800 ℃温度范围内，保持4 min左右，就能达到退火目的。由于保温时间短，不需要保护气氛。同时又因为是单片，受热或冷却时都比较均匀，因此无升温和降温速度要求。

二、电工用纯铁及合金的热处理

电工用纯铁、铁镍合金、铁钴合金、铁铝合金、恒导磁合金的热处理见表 14-33。

为了减少涡流损耗，除将软磁材料制成薄片外，还需在它的表面涂覆绝缘层，使片与片之间相互绝缘，也可在表面设法形成氧化绝缘层。涂层厚度要均匀，坚硬光滑，硅钢片漆膜厚度一般为 0.015～0.02 mm，不致使叠装系数过分下降，并且要有强附着力，能抗拒冲击和弯曲。涂层材料还要求有一定的电阻值和耐压强度、耐油性、耐热性和防潮性，干燥要快。冷轧钢片出厂时表面已涂绝缘层，使用

时一般不用再涂漆。热轧硅钢片使用时，需自行涂漆。

表 14-33　电工用纯铁、铁镍合金、铁钴合金、铁铝合金、恒导磁合金的热处理工艺

种类	牌号	退火气氛	加热温度及速度	保温时间(h)	冷　却　速　度	标准号
电工用纯铁			随炉升温至800 ℃，再以50 ℃/h的速度升温到860～930 ℃	4	以小于50 ℃/h冷到700 ℃，再炉冷至500 ℃以下出炉	YB200-75
铁镍合金	1J50 1J79	氢或真空	1 050～1 150 ℃ 随炉升温	3～6	以100～200 ℃/h速度冷却，300 ℃出炉	YB129-70
	1J51	氢或真空	1 050～1 100 ℃ 随炉升温	1	以100～200 ℃/h速度冷却，300 ℃出炉	YB129-70
	1J85	氢或真空	1 100～1 200 ℃ 随炉升温	3～6	以100～200 ℃/h冷到480 ℃，快冷到400 ℃出炉	YB129-70
铁铝合金	1J6	氢或真空	950～1 050 ℃ 随炉升温	2～3	以100～150 ℃/h冷却到250 ℃出炉	YB669-70 (暂行)
	1J12	氢或真空	1 050～1 200 ℃ 随炉升温	2～3	以100～150 ℃/h冷却到500 ℃，再以≤50 ℃/h速度冷却到小于200 ℃出炉	
	1J13	空气或氢	900～950 ℃ 随炉升温	2	以100 ℃/h冷至650 ℃再以不大于60 ℃/h冷却到200 ℃以下出炉	YB669-70 (暂行)
	1J16	氢或真空	950～1 150 ℃ 随炉升温	950 ℃，3～4 1 150 ℃，1.5	炉冷（300～500 ℃/h）到650 ℃淬入水中	

续表

种类	牌号	退火气氛	加热温度及速度	保温时间(h)	冷　却　速　度	标准号
铁合钴金	1J22	氢或真空	850～900 ℃ 随炉升温	3～6	以 50～100 ℃/h 冷到 750 ℃ 再以 180～240 ℃/h 冷到 300 ℃出炉	YB130-70
恒导磁合金	1J66	氢	1 200 ℃ 随炉升温	3	以 100 ℃/h 冷却到 600 ℃，炉冷到 300 ℃出炉	YB667-70 (暂行)

注：1J51 合金一般不经磁场热处理。若经磁场热处理后可进一步提高磁滞回线的矩形性和降低矫顽力。1J22 合金的磁场处理工艺是：在氢或真空中加热到 850 ℃，保温 4 h，从保温开始就加不小于 1 200～1 600 A/m 的直流磁场，以 50 ℃/h 冷到 750 ℃，再保温 3 h，然后以小于200 ℃/h冷却到 300 ℃出炉。1J66 合金的磁场热处理工艺是：氢气保护下加不小于 16 000 A/m 的磁场，随炉升温到 650 ℃，保温 1 h，以 50～100 ℃/h 冷却到 200 ℃出炉。1J16 合金冷到600～700 ℃时淬火，淬火介质是冰水、水、油或其他。

第十五章　永磁材料

第一节　铝镍钴合金

铝镍钴合金的特点是其组织结构比其他类别的永磁材料稳定，磁感应强度系数很小，居里温度高，矫顽力和最大磁能积在永磁材料可达中等以上，组织结构稳定。铝镍钴合金是目前我国电机、电器、仪器、仪表以及航空航天工业中应用较多的永磁材料。按制造工艺的不同分为铸造铝镍钴合金（亦称铸造磁钢）和粉末烧结铝镍钴合金（亦称烧结磁钢）。铝镍钴永磁合金的磁特性见表 15－1，铝镍钴永磁合金的其他特性及饱和磁化场见表 15－2。

表 15－1　铝镍钴永磁合金的磁特性

牌号	最大磁能积 $(BH)_{max}$ (kJ/m³)	矫顽力		剩磁 B_r (mT)	相对回复磁导率 μ_{rec}	国际和国内标准		
		H_{CB} (kA/m)	H_{CJ} (kA/m)					
	最小值				典型值	IEC	MMPA	JIS
LN10	9.6	40	43	600	4.5～5.5		ALNiCo3	YCM-4C
LNG12	12	40	43	700	6.0～7.0	R1-0-4	ALNiCo2	MCA18/8
LNG37	37	48	49	1 200	3.0～4.5	R1-1-1	ALNiCo5	
LNGT28	28	58	59	1 000	3.5～5.5	R1-1-4	ALNiCo6	
LNGT38	38	110	112	800	1.5～2.5	R1-1-5	ALNiCo8	MCA38/11
LNGT36J	36	140	148	700	1.5～2.5	R1-1-7	ALNiCo8HC	
LNG44	44	52	53	1 250	2.5～4.0	R1-1-2	ALNiCo5DG	
LNG52	52	56	57	1 300	1.5～3.0	R1-1-3	ALNiCo5.7	MCA60/6
LNGT60	60	110	112	900	1.5～2.5	R1-1-6	ALNiCo9	
LNGT72	72	112	114	1 050	1.5～2.5			MCA78/12
FLN8	8	40	43	520	4.5～5.5			
FLN12	12	40	43	700	6.0～7.0			
FLNG28	28	46	47	1 050	4.0～5.0	R1-1-21	ALNiCo6	

续表

牌号	最大磁能积 $(BH)_{max}$ (kJ/m³)	矫顽力		剩磁 B_r (mT)	相对回复磁导率 μ_{rec}	国际和国内标准		
		H_{CB} (kA/m)	H_{CJ} (kA/m)			IEC	MMPA	JIS
	最小值				典型值			
FLNG34	34	47	48	1 120	3.0～4.5	R1-1-20	ALNiCo5	
FLNGT31	31	107	111	760	2.0～4.0	R1-1-22	ALNiCo8	
FLNGT33J	33	136	150	650	1.5～3.5	R1-1-23	ALNiCo8HC	

一、铸造铝镍钴系永磁材料

铸造铝镍钴永磁材料是用铸造方法制得的，它具有较大的剩磁、很小的磁感应温度系数和较高的居里温度，组织结构稳定，其矫顽力和最大磁能积在永磁材料中达到中等以上的水平，是电机工业中应用很广的一种永磁材料。这类材料按制造工艺和合金组分的特点可分为三个系列。

(1) 各向同性铝镍型和铝镍钴型系列　这一系列材料制造工艺简单，可做成体积大或多对磁极的永磁体，但磁性能是铸造铝镍钴系中最低的，一般用于永磁电机、电气仪表中。

(2) 热磁处理各向异性铝镍钴型和铝镍钴钛型系列　这个系列的剩磁和最大磁能积比各向同性系列的大得多，但制造工艺复杂，在使用时，永磁体的磁极轴线不应偏离最优磁性方向。铝镍钴型与铝镍钴钛型相比，后者矫顽力高，剩余磁感应强度较低，制造工艺对性能影响较为敏感，磨削加工比较困难，宜作尺寸比(L/D)较小或体积较小的永磁体，如内磁结构仪表中的永磁体。

(3) 定向结晶各向异性铝镍钴型和铝镍钴钛型系列　这一系列的磁性能是铝镍钴系永磁材料中最高的，但工艺复杂，脆性大，易折断，应用时，永磁体的磁极轴线要与最优磁性方向一致。它可做成简单的柱体或空心柱体，最大高度为100～150 mm。这个系列的铝镍钴钛型合金的特点与热磁处理各向异性铝镍钴钛型合金相似。

表 15－2　铝镍钴永磁合金的其他特性及饱和磁化场

牌　号	饱和磁化场 (kA/m)	磁温度系数 α_B (%℃$^{-1}$)	居里温度 T_c (℃)	密　度 (g/cm^3)	电阻率 20 ℃ (×10^{-6}Ω·cm)
LN10	200	−0.022	907		
LNG12	240	−0.03	810	6.9～7.3	65
LNG37	240	−0.02	890		47
LNGT28		−0.02	860		50
LNGT38	400	−0.02～−0.025	850		53
LNGT36J		−0.02～−0.025		6.9～7.3	54
LNG44	240	−0.016	890		47
LNGT60	400	−0.02～−0.025	850		53
LNGT72	400	−0.02～−0.025	850		
FLN8	200		760		
FLN12	240		810		
FLNG28	240		890	6.7～7.0	54
FLNG34	240		890		50
FLNGT31	400		850		54
FLNGT33J					54

二、粉末烧结铝镍钴系永磁材料

粉末烧结铝镍钴系永磁材料用粉末冶金方法制成，不产生铸造缺陷，但磁性能略低，宜用作体积小或要求工作磁通均匀性高的永磁体。它表面光洁，不需磨削加工，密度小，原料消耗低。这类永磁材料分为各向同性铝镍型和铝镍钴型系列，热磁处理各向异性铝镍钴型和铝镍钴钛型系列两种，它们的特点与铸造铝镍钴系永磁材料的相应系列相似。这类材料多用作微电机、继电器等的永磁体。

三、铁氧体永磁材料

铁氧体永磁材料的矫顽力很高，回复磁导率较小，密度小，电阻率大，其最大磁能积不大，但最大回复磁能积却较大，故宜用作在动态条件下工作的永磁体，如仪表电机、磁疗器械和电声部件等的永磁体。由于它的剩磁很小，最大磁能积也小，而磁感应温度系数很高，故不宜用于测量仪表中。这类永磁材料分为各向同性和各向异性两个系列。各向异性系列沿外磁场方向磁性能最好。

四、稀土钴永磁材料

稀土钴永磁材料是由部分稀土金属和钴形成的一种金属间的化合物，常见的有钐钴、镨钴、镨钐钴、混合稀土钴以及铈钴铜等。它们具有优异的磁性能，其矫顽力和最大磁能积均高于其他永磁材料，适于作微型或薄片状永磁体。它们与铝镍钴系永磁材料相比，其居里温度低，磁感应温度系数较大，价格较贵，不宜用在高于 200 ℃温度下工作。这类材料只有各向异性系列，沿成型时所施外磁场方向上的磁性较好。镨钴、镨钐钴与钐钴相比，前者的工艺对磁性能影响不太敏感，价格较廉，但居里温度较低，温度的稳定性略差，其他磁性基本相似。这类材料一般用作传感器、助听器等的永磁体。

五、塑性变形永磁材料

塑性变形永磁材料是经过适当热处理后，有良好的塑性和机械加工性，可制成板、带、棒及线材或其他形状的永磁体。这类材料主要有永磁钢（碳钢、钨铬钢等）及铁钴钼型、铁钴钒型、铂钴、铜镍铁和铁铬钴型等合金。其中：永磁钢、铁钴钼型和铁钴钒型合金具有相当大的剩磁，但矫顽力较低，只宜作尺寸比（L/D）很大的永磁体；铂钴合金具有很高的矫顽力和最大磁能积，磁稳定性好，耐腐蚀性强，但剩余磁感应强度不高，价格较贵，可用作特殊要求的微型永磁体。

第二节　铁氧体永磁材料

铁氧体永磁材料是一类氧化物永磁材料，与铝镍钴合金相比，其矫顽力很高，剩磁和化学稳定性好，时效变化小，电阻大，密度小，质量小，剩磁感应强度小，温度系数大，耐机械冲击能力弱。该类永磁材料目前产量最大。由于其最大回复磁能积较大，宜作在动态条件下工作（如用于各类永磁电机）的永磁体。但因剩磁小，磁感应温度系数较大（比铝镍钴合金的大一个数量级），不宜用于电工测量仪表。

铁氧体的牌号见表 15－3。

表 15－3　铁氧体的牌号

材料类别		材料的主要性能参数		材料的主要特征		序　号
		$(BH)_{max}$的标称值				
符　号	意　义	符　号	意　义	符　号	意　义	
YN	黏结永磁	1～20	1～20 kJ/m³	T H	各向同性 高 H_{CB}、H_{CJ}	

铁氧体材料的分类见表 15－4。

表 15-4　铁氧体材料的分类

类　别	材料牌号	类　别	材料牌号
烧结永磁铁氧体材料	Y8T Y20 Y22H Y23 Y25 Y26H Y27H Y28 Y30H—1 Y30H—2 Y32 Y33	黏结永磁铁氧体材料	YN1T YN4T YN10 YN11 YN13 YN15

烧结永磁铁氧体材料的磁性能见表 15-5。

表 15-5　烧结永磁铁氧体的磁性能

材料编号	B_r(mT)	H_{CB}(kA/m)	H_{CJ}(kA/m)	$(BH)_{max}$(kJ/m^3)
Y8T	200～235	125～160	210～280	6.5～9.5
Y20	320～380	135～100	140～195	18.0～22.0
Y22H	310～360	220～250	280～320	20.0～24.0
Y23	320～370	170～190	190～230	20.0～25.5
Y25	360～400	135～170	140～200	22.5～28.0
Y26H	360～390	220～250	225～255	23.0～28.0
Y27H	370～400	205～250	210～255	25.0～29.0
Y28	370～400	175～210	180～220	26.0～30.0
Y30H—1	380～400	230～275	235～290	27.0～32.5
Y30H—2	395～415	275～300	310～335	28.5～32.0
Y32	400～420	160～190	165～195	30.0～33.5
Y33	410～430	220～250	225～255	31.5～35.0

黏结永磁铁氧体材料的磁性能见表 15-6。

表 15－6　黏结永磁铁氧体的磁性能

材料牌号	B_r (mT)	H_{CB} (kA/m)	H_{CJ} (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m³)	D (g/cm³)
YN1T	63～83	50～70	175～210	0.8～1.2	2.3
YN4T	135～155	85～105	175～210	3.2～5.0	3.8
YN10	220～240	145～165	190～225	9.0～10.6	3.4
YN11	230～250	160～185	225～260	10.0～12.0	3.5
YN13	250～270	175～195	200～230	11.5～14.5	3.6
YN15	≥270	175～190	200～230	≥14.5	3.7

烧结永磁铁氧体材料的技术性能与物理特性见表 15－7。

表 15－7　烧结永磁铁氧体的技术性能与物理特性

项　目	符　号	单　位	数　值	备　注
相对回复磁导率	μ_{rec}	—	1.05～1.3	
居里温度	T_C	℃	≥450	
剩磁温度系数	α_{Br}	$℃^{-1}$	−0.2%	0～100 ℃
磁化强度矫顽力的温度系数	α_{HCJ}	$℃^{-1}$	0.2%～0.5%	0～100 ℃
密度	D	g/cm^3	4.5～5.1	
电阻率	ρ	Ω·cm	$\geqslant 10^6$	
线膨胀系数	α_R	$℃^{-1}$	$7\sim15\times10^{-6}$	
硬度	HV	—	480～580	

黏结永磁铁氧体材料的技术性能与物理特性见表 15－8。

表 15－8　黏结永磁铁氧体的技术性能与物理特性

项　目	符　号	单　位	数　值	备　注
相对回复磁导率	μ_{rec}	—	1.05～1.3	
电阻率	ρ	Ω·cm	$10^7\sim10^{10}$	
线膨胀系数	α	$℃^{-1}$	18×10^{-5}	4～120 ℃
硬度	SHORE D	—	30～45	

第三节　稀土钴永磁材料

稀土钴永磁材料是用 R_xM_y 表示的金属间化合物，R 表示稀有元素，M 表示过渡族元素。在分组中有时同时使用 R、M 的一种或两种以上元素，这类化合物的磁晶各相异性常数极高，为 $10^6 \sim 10^7$ J/m，是具有优良磁性的永磁材料。磁体分 RCo_5（称为第一代稀土永磁材料）和 R_2Co_{17}（称为第二代稀土永磁材料）型两大类。RCo_5 按组元不同而分成钐钴合金（$SmCo_5$）、镨钴（$PrCo_5$）和钐镨钴[$(SMP)_rCo_5$]。由于纯稀土金属 Sm、Pr 价格昂贵，故用廉价稀土元素取代 Sm、Pr 而发展了廉价混合稀土钴合金（$MMCo_5$）和[$(SmMM)Co_5$]（MM 代表混合稀土），以及铸造的廉价铈钴铜合金[$Ce(CoCuFe)_5$]和 $R(CoCu)_5$ 合金。第二代稀土永磁材料（R_2Co_{17}）的主要成分为 $Sm_2(CoCuFeZr)_{17}$，与 RCo_5 相比较，其磁性能比较高，磁能积大，剩磁温度系数低，稳定性好，已部分取代 RCo_5 合金的应用。RCo_5 和 R_2Co_{17} 型永磁材料性能比较见表 15－9。

稀土钴永磁材料具有优异的磁性能。其矫顽力和最大磁能积是现有永磁材料中最高的品种。适宜作为微型或薄片状永磁状。

此类材料与铝镍钴系永磁材料相比，其居里温度低，磁感应温度系数较大，不宜在高于 200 ℃温度下工作。稀土钴永磁材料的品种牌号、磁性能分别见表 15－10 和表 15－11。

表 15－9　RCo_5 和 R_2Co_{17} 型永磁材料性能比较

性　能	RCo_5		R_2Co_{17}	
	A　型	B　型	A　型	B　型
最大磁能积 $(BH)_{max}$（kJ/m³）	104～120	152～168	160～192	232～248
剩磁 B_r（mT）	740～780	880～920	920～980	1 080～1 120
矫顽力 H_{CB}（kA/m）	520～576	680～720	560～720	480～544
H_{CJ}（kA/m）	600～760	960～1 280	＞800	496～560
相对回复磁导率 μ_{rec}	1.05～1.10	1.05～1.10	1.00～1.05	1.00～1.05
剩磁温度系数 α_B（%℃$^{-1}$）	－0.06	－0.05	－0.03	－0.03
密度 D（g/cm³）	8.1～8.2	8.1～8.3	8.3～8.5	8.3～8.5
硬度（HV）	450～500	450～500	500～600	500～600
电阻率 ρ（Ω·m）	6×10^{-3}	5×10^{-3}	9×10^{-3}	9×10^{-3}

表 15－10　稀土钴永磁合金的磁特性及饱和磁化场

牌　号	剩磁 B_r (mT)	矫　顽　力		最大磁能积 $(BH)_{max}$ (kJ/m³)	饱和磁化场 (kA/m)	国际和国外标准		
		H_{CB} (kA/m)	H_{CJ} (kA/m)			IEC	MMPA	JIS
	最　小　值							
XGS80/36	600	320	360	64～88	1 600			
XGS96/40	700	360	400	88～104	1 600			
XGS112/96	730	520	960	104～120	2 400	R5-1-1	14/14	
XGS128/120	780	560	1 200	120～135	2 400	R5-1-2		MPR135/60V
XGS144/120	840	600	1 200	135～150	240		16/18	
XGS160/96	880	640	960	150～183	3 200	R5-1-3	18/20	MPR170/68H
XGS196/96	960	690	960	183～207	3 200		20/15	
XGS196/40	980	380	400	183～200	1 600			
XGS208/44	1 020	420	440	200～220	1 600			
XGS240/46	1 070	440	460	220～250	1 600		28/7	
XGG-24A	1 000	676	1 193	175～207			22/12	

表 15－11　稀土钴永磁材料的其他性能

牌　号	平均温度系数 (0～100 ℃) (%℃$^{-1}$)	居里温度 T_c (℃)	密　度 (g/cm³)	相对回复磁导率 μ_{rec}	维氏硬度 HV	线膨胀系数 (×10^{-8}℃$^{-1}$)	电阻率 ρ (Ω·m)
XGS80/36	−0.09	450～500	7.8～8.0	1.10	450～500	10	5×10^{-4}
XGS96/40	−0.09	450～500	7.8～8.0	1.10	450～500	10	$5\sim10^{-4}$
XGS112/96	−0.05	700～750	8.0～8.3	1.05～1.10	450～500	10	5×10^{-4}
XGS128/120	−0.05	700～750	8.0～8.3	1.05～1.10	450～500	10	5×10^{-4}
XGS144/120	−0.05	700～750	8.0～8.3	1.05～1.10	450～500	10	5×10^{-4}
XGS160/96	−0.05	700～750	8.0～8.3	1.05～1.10	450～500	10	5×10^{-4}
XGS196/96	−0.05	700～750	8.1～8.3	1.05～1.10	450～500	10	5×10^{-4}
XGS196/40	−0.03	800～850	8.3～8.5	1.00～1.05	500～600	12.7	9×10^{-6}
XGS208/44	−0.03	800～850	8.3～8.5	1.00～1.05	500～600	12.7	9×10^{-6}
XGS240/46	−0.03	800～850	8.3～8.5	1.00～1.05	500～600	12.7	9×10^{-6}

第四节　磁滞合金材料

磁滞合金材料的磁特性介于软磁和永磁材料之间，矫顽力为 0.8～24 kA/m，磁滞回线面积较大。剩磁在 0.9 T 以上，比较接近永磁材料。多数磁滞合金材料有良好的塑性，可进行锻轧、拉丝、冲压、弯曲等。该类材料主要用于磁滞电机和铁簧继电器等。

一、磁滞合金材料的性能、特点、技术参数以及热处理制度

常用的磁滞合金材料有铁钴钒系列合金和铁锰镍、铁钴钨、铁钴钨钼合金冷轧带材、铁钴钼系列合金热锻、轧材等。其成分、性能以及热处理制度分别见表 15－12 至表 15－16。铁钴钒系列合金及 2J51、2J52、2J53 等未经热处理的冷轧带材，其规格及允许偏差见表15－17。铁钴钼系列合金 2J21、2J23、2J25 和 2J27 等未经热处理的热锻、热轧棒材，其规格及允许偏差见表 15－18。

表 15－12　磁滞合金材料的化学成分

牌号名称	化学成分(%)										
	钴	钒	镍	锰	钨	钼	碳	磷	硫	硅	铁
2J21	11～13	—	—	—	—	10.5～11.5	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.3	余
2J23	11～13	—	—	—	—	12.5～13.5	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.3	余
2J25	11～13	—	—	—	—	14.5～15.5	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.3	余
2J27	11～13	—	—	—	—	16.5～17.5	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.3	余
2J3	47～49	3～4	—	0.3～0.8	—	—	≤0.15	≤0.03	≤0.03	≤1.0	余
2J4	44～46	3.5～4.5	5.3～6.7	≤1.0	—	—	≤0.15	≤0.03	≤0.03	≤1.0	余
2J7	51～53	6.5～7.5	≤1.0	≤1.0	—	—	≤0.15	≤0.03	≤0.03	≤1.0	余
2J9	51～53	8.6～9.5	≤1.0	≤1.0	—	—	≤0.15	≤0.03	≤0.03	≤1.0	余
2J10	51～53	9.6～10.7	≤1.0	≤1.0	—	—	≤0.15	≤0.03	≤0.03	≤1.0	余
2J11	51～53	10.8～11.7	≤1.0	≤1.0	—	—	≤0.15	≤0.03	≤0.03	≤1.0	余
2J12	51～53	11.8≤12.7	≤1.0	≤1.0	—	—	≤0.15	≤0.03	≤0.03	≤1.0	余
2J51	11～13	—	—	≤0.5	14～15	—	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.5	余
2J52	15～17	—	—	≤0.5	10～11	5～6	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.5	余
2J53	—	—	3～4	11.5～12.5	—	2.5～3.5	≤0.03	≤0.03	≤0.03	≤0.5	余

表 15－13　常用磁滞合金的磁性能

牌号名称		合金材料磁滞性能			
		工作磁场强度 H_μ (kA/m)	工作磁感应强度 B_μ (T)	比磁滞损耗 P_μ (J/m³ · Hz)	能量系数 K_μ 不小于
各向异性铁钴钒	2J3	2.2～2.8	1.4～1.7	0.8	0.63
	2J4	4.0～5.2	1.3～1.6	1.5	0.62
	2J7	6.4～9.5	1.0～1.3	1.9	0.61
	2J9	8.8～12	0.9～1.25	2.2	0.59
	2J10	14.5～18.4	0.9～1.2	3.0	0.58
	2J11	16.0～20.7	0.9～1.2	3.5	0.58
	2J12	20～28	0.8～1.1	4.5	0.56
各向同性铁钴钼	2J21	9.5～12.7	1.0～1.3	2.0	0.48
	2J23	14.5～17.5	1.0～1.3	3.0	0.48
	2J25	16.0～22.4	0.9～1.2	3.8	0.50
	2J27	24～28.5	0.9～1.2	4.7	0.45
铁钴钨	2J51	2.8～4.0	1.2～1.6	1.0	0.58
铁钴钨钼	2J52	4.8～7.2	0.9～1.35	1.1	0.50
铁锰镍	2J53	6.4～12	0.6～0.9	1.0	0.45

表 15－14　常用磁滞合金的物理性能

牌号名称		永磁性能		物理性能				
		矫顽力 H_c (kA/m)	剩余磁感强度 B_r (T)	电阻率 ρ ($\mu\Omega$ · cm)	热膨胀系数 α(200～300 ℃) ($\times10^{-6}$/℃)	硬度(最终热处理后) (HRC)	抗拉强度 (N/mm²)	密度 γ (g/cm³)
各向异性铁钴钒	2J3	3.2	1.9	45	10.1	40～46	180	8.1
	2J4	4.5	1.65	33	10.7	40～46	180	8.2
	2J7	6.0	1.4	61	10.6	40～46	180	8.1
	2J9	9.5	1.3	65	10.6	40～46	180	8.1
	2J10	12	1.2	71	11.3	40～46	190	8.1
	2J11	16	1.1	77	11.2	40～46	170	8.1
	2J12	20	0.9	74	13.4	40～46	170	8.1
各向同性铁钴钼	2J21	8	1.2	35	11.24	35～42	220	8.2
	2J23	12	1.15	37	11.1	35～42	210	8.3
	2J25	16	1.05	42	11.2	35～42	210	8.3
	2J27	21.5	1.0	38	11.2	35～42	220	8.4

表 15－15　常用磁滞合金的最终热处理制度

牌号名称	淬　火			回　火		
	温　度（℃）	保温时间（min）	淬火介质	温　度（℃）	回火时间（min）	冷却方式
2J21 2J23	1 200±10	15～30	油	625～675	60	空冷
2J25 2J27	1 250±10			625～725		

注：热锻轧材建议按此表规范进行。

表 15－16　磁滞合金最终热处理制度

牌号名称	回火温度（℃）	保温时间（min）	冷却方式
2J3	620～660	20～30	空冷
2J4	600～660		
2J7	580～660		
2J9 2J10 2J11 2J12	580～640		
2J51 2J52 2J53	675～750 625～725 500～560	15～30	

注：冷轧带材建议按此表规范进行。

表 15－17　铁钴钒系列合金及 2J51、2J52、2J53 冷轧带材的规格及允许偏差

（单位：mm）

合金状态	厚　度		宽　度		长　度
	尺　寸	允许偏差	尺　寸	允许偏差	
冷轧带材	0.20～0.40 0.41～0.60 0.61～0.80	－0.03 －0.05 －0.07	50～120	±0.5	不小于 300

表 15－18　铁钴钼系列合金及 2J21、2J23、2J25 和 2J27 的规格及允许偏差

（单位：mm）

热锻棒材		热轧棒材	
直　径	允许偏差	直　径	允许偏差
31～45	+2.5	10～20	+0.8
46～70	+3.5	21～30	+1.0
71～100	+4.5		

二、磁滞电机转子对磁滞材料性能的要求

磁滞电机转子用的磁滞材料是以特定的（非饱和）磁化状态时的磁滞工作的，由定子绕组的磁场不断地进行反复磁化，因此，对磁滞材料的性能有特定的要求：

（1）能量系数 K_μ。要求 K_μ 要大，即 K_μ 接近于 1。这样磁滞电机的转子、定子铁芯和定子绕组三者易于配合；磁滞材料更易处于最佳点。

（2）比磁滞损耗 P_μ 以及 P_μ/H_μ。比磁滞损耗 P_μ 愈大，同样输出功率的磁滞电机的体积将愈小；对相同体积和输出功率的磁滞电机，P_μ/H_μ 愈大，电动机的效率愈高。但是，P_μ 大的材料，H_μ 也较大。所以，应权衡体积和效率的得失，选择 P_μ 和 P_μ/H_μ 适当的磁滞材料。

（3）工作点 B_μ、H_μ。一般要求材料工作磁场强度 H_μ 应等于定子绕组的磁场强度，同时还要求定子铁芯的磁感应强度与材料的工作感应强度 B_μ 配合，从而使磁滞电机的总损耗最小。如果转子材料的 B_r 较大时，定子铁芯的铁耗亦较大；而当转子材料的 H_μ 较大时，便需要较多的定子绕组，使导线损耗增大。

（4）磁稳定性和电阻率。应根据电机的技术和工作条件，选择相应磁稳定性的材料。对于启动力矩要求不高的磁滞电机，要求材料应具有较高的电阻率，以降低涡流损耗。

此外，选用的磁滞材料应有良好的塑性和机械切削等加工性。同时，还应适用于磁滞电机转子的需要。例如，对实心整体的转子，一般不应采用。

三、磁滞材料的最终热处理

磁滞材料经最终热处理后，硬度将增加，便不能进行机械切削。因此，最终热处理应在加工成磁滞电机转子形状后进行。对于不同系列，品种的合金，最终热处理要求也是不同的。常用磁滞合金的磁性能见表 15－13，常用磁滞合金的物理性能见表 15－14，常用磁滞合金的最终热处理制度见表 15－15，磁滞合金最终热处理制度见表 15－16。

第五节　钕铁硼合金

钕铁硼合金是一种新型稀土铁永磁材料，又称为第三代稀土永磁。其磁性能均是当今永磁材料中最高的，最大磁能积分别为 131 kJ/m³ 和 366 kJ/m³。由于它不含 Sm 等稀贵元素，原材料资源丰富、价廉，同时该合金的机械强度比其他永磁材料高，韧性好，密度比稀土钴永磁的小 13%，更有益于实现磁体轻量、小型化。如采用钕铁硼合金的永磁发电机，在同样输出功率的情况下，整机的体积质量可以减少 30%以上；在同样体积质量情况下，输出功率可增加 50%以上。钕铁硼合金正大量取代铝镍钴及其他磁钢，也正在不断取代永磁铁氧体。

钕铁硼尺寸公差见表 15－19。

钕铁硼化合物($R_2Fe_{14}B$)的基本特性见表 15－20。

表 15－19　钕铁硼尺寸公差　　mm

尺寸	烧结面	允许偏差		加工面	允许偏差			
		垂直于压制方向	压制方向		平磨	内外圆磨	线切割	切片
≤10		±0.25	±0.30		±0.05	±0.05	±0.03	±0.05
>10～20		±0.40	±0.45		±0.05	±0.08	±0.05	±0.08
>20～50		±0.70	±0.85		±0.10	±0.13	0.08	±0.15
>50～80		±1.10	±1.30		±0.15	±0.20	±0.13	±0.20

表 15－20　钕铁硼化合物($R_2Fe_{14}B$)的基本特性

化合物	晶格常数(nm)		$4\pi M_s$ (T)	H_a (kA/m)	T_c (K)
	a	c			
$Y_2Fe_{14}B$	0.876	1.200	1.41	2 069	565
$Ce_2Fe_{14}B$	0.876	1.211	1.17	2 069	424
$Pr_2Fe_{14}B$	0.880	1.223	1.56	5 968	565
$Nd_2Fe_{14}B$	0.880	1.220	1.60	5 809	585
$Sm_2Fe_{14}B$	0.880	1.215	1.52	11 937	616
$Cd_2Fe_{14}B$	0.879	1.209	0.89	1 910	661
$Tb_2Fe_{14}B$	0.877	1.205	0.70	17 507	620
$Dy_2Fe_{14}B$	0.876	1.201	0.71	11 937	598
$Ho_2Fe_{14}B$	0.875	1.199	0.81	5 968	573
$Er_2Fe_{14}B$	0.873	1.195	0.90	637	554
$Tm_2Fe_{14}B$	0.873	1.193	1.15	637	541

钕铁硼永磁材料的磁性能见表 15－21。

表 15－21　钕铁硼的磁性能

产品牌号	磁　性　能			
	最大磁能积$(BH)_{max}$ (kJ/m³)	剩磁 B_r (T)	矫顽力 H_{CB} (KA/m)	内禀矫顽力 H_{CJ} (KA/m)，≥
NTP208G	192～224	1.03～1.10	720～800	1 350
NTP208C	192～224	1.03～1.10	720～840	1 600
NTP240D	224～256	1.10～1.18	640～720	800
NTP240Z	224～256	1.10～1.18	760～880	1 120
NTP240G	224～256	1.10～1.18	760～880	1 350
NTP272D	256～288	1.18～1.25	640～720	800
NTP272Z	256～288	1.18～1.25	800～880	1 120

钕铁硼永磁材料的温度性能见表 15－22。

表 15－22　钕铁硼的温度性能

特　性	温度范围(K)	数　据
$-2B_r$,%/k	298～413	≤0.13
$-2H_{CJ}$,%/k		≤0.6
T,K		≥583

钕铁硼永磁材料的其他物理性能见表 15－23。

表 15－23　钕铁硼的其他物理性能

性　能	数　据
密度(g/cm³)	7.3～7.5
硬度(HV)	500～600
电阻率(μΩ·cm)	140～160
抗压强度(MPa)	740～810
热膨胀系数(垂直于取向方向)(10^{-6}/k)	－5.0～－4.6
热膨胀系数(平行于取向方向)(10^{-6}/k)	3.2～3.6

第六节　稀土系黏结永磁材料

稀土系黏结永磁主要使用了 $SmCo_5$、Sm_2Co_{17} 或 NdFeB 永磁体粉末，具有较高的磁性能。稀土系黏结永磁体的成型方法与铁氧体塑料永磁体基本相同，包括压制成型和注射成型两种。压制成型用热固性树脂(环氧树脂)黏结剂，黏结剂的质量分数为 2%～3%，磁性能是黏结永磁体中最高的，但是结构形状不能很复杂。注射成型用黏性较低的热塑性树脂(如尼龙)，树脂质量分数需要 2%～10%，因此其磁性能比压制成型的差，但生产性好，树脂能重复使用，原则上无废料。由于尼龙与磁粉没有黏合力，混炼前磁粉表面需要加耦联剂。稀土永磁体的表面处理很重要，不仅要提高磁粉和黏结剂的黏结力，还应起到防止磁粉氧化的作用。稀土黏结永磁注射成型工艺条件见表 15－24。各种稀土系黏结永磁性能见表15－25。

表 15－24　稀土黏结永磁注射成型工艺条件

工　艺　条　件		$SmCo_5$	Sm_2Co_{17}
成型性	磁粉平均粒度(μm)	6	38
	混炼扭矩(N·m)	34.3	58.8
	混炼温度(℃)	250	275
成型条件	注射温度(℃)	260	300
	注射压力(kg/cm²)	80	130
	模具温度(℃)	100	110
	取向磁场(kA/m)	＞1 194	＞1 194
特　性	最大磁能积(kJ/m³)	85	98
	充磁磁场(kA/m)	1 592	3 183
	重复使用性能劣化率(%/次)	2.6	2.5

表 15－25　各种稀土系黏结永磁性能

磁　粉	Sm_2TM_{17}		各向同性 NdFeB		各向异性 NdFeB	
成型方法	压缩	注射	压缩	注射	压缩	注射
B_r(mT)	870	640～680	660	520～550	820	700
H_{CB}(kA/m)	525	414～493	358～462	294～367	565～	454
H_{CJ}(kA/m)	795	716～954	557～716	557～676	1 353	1 313
$(BH)_{max}$(kJ/m³)	135	67.6～84	64～80	40～48	119～127	80～88
温度系数(%℃⁻¹)	－0.04	－0.035	－0.09	－0.09	－0.09	－0.09
密　度(g/cm³)	7.0	5.7～6.1	5.7～6.0	5.0～5.4	—	—

第七节　铁钴钒永磁合金

铁钴钒永磁合金适用于制作小截面永久磁铁及录音材料。

铁钴钒永磁合金的品种有冷拉丝材和冷轧带材。

冷拉丝材的直径及允许偏差见表 15－26。

表 15－26　冷拉丝材的直径及允许偏差

直　径(mm)	允许偏差(mm)
0.5～1.0	±0.02
>1.0～2.0	±0.03
>2.0～3.0	±0.05

冷轧带材的尺寸及允许偏差见表 15－27 的规定。

表 15－27　冷轧带材的尺寸及允许偏差

厚度(mm)		宽度(mm)		长度(mm)
尺寸	允许偏差	尺寸	允许偏差	不小于
0.20～0.40	－0.03	50～120	±0.5	300
>0.40～0.60	－0.05			
>0.60～0.80	－0.07			

注：丝材的椭圆度不得超过公差之半。丝材不得有“∞”字形。

铁钴钒永磁合金牌号和化学成分见表 15－28。

表 15－28　铁钴钒永磁合金牌号和化学成分

合金牌号	化学成分(%)								
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Co	V	Fe
	不大于								
2J31	0.12	0.70	0.70	0.025	0.020	0.70	51～53	10.8～11.7	余量
2J32	0.12	0.70	0.70	0.025	0.020	0.70	51～53	11.8～12.7	余量
2J33	0.12	0.70	0.70	0.025	0.020	0.70	51～53	12.8～13.8	余量

铁钴钒永磁合金材试样经热处理后，磁性能见表 15－29。

表 15-29 铁钴钒永磁材料合金的磁性能

合金牌号	丝材			带材		
	矫顽力 H_c (kA/m)	剩余磁感应强度 B_r (T)	$B_r \cdot H_c$ (Gs·Oe)	矫顽力 H_c (kA/m)	剩余磁感应强度 B_r (T)	$B_r \cdot H_c$ (Gs·Oe)
	不小于					
2J31	23.88	1.00	3.0×10^6	17.51	1.00	2.4×10^6
2J32	27.86	0.85	3.0×10^6	23.88	0.75	2.4×10^6
2J33	31.84	0.70	3.0×10^6	27.86	0.60	2.3×10^6

第八节 永磁材料的选用

选用永磁材料时，必须按磁路结构、工作状态合理选择。

一、在静态条件下工作的永磁体对材料的性能要求

静态条件指永磁体的气隙间距或气隙磁通保持不变。在这种状态下工作的永磁体，通常称为静态永磁体(亦称固定气隙永磁体)。如磁电式仪表、扬声器等器件用的永磁体。该类永磁体对材料的性能要求如下：

(1) 应有高的最大磁能积$(BH)_{max}$。$(BH)_{max}$愈大，做成的永磁体的性能愈好、体积愈小。

(2) 剩磁 B_r 和矫顽力 H_c。B_r 和 H_c 与永磁体的尺寸比 L/D(L 为有效磁路长度，D 为磁路有效截面的等效直径)有密切联系。L/D 较大时，要求材料的 B_r 要大，H_c 则可以小一些；L/D 较小时，要求 H_c 要大而 B_r 可以较小。这样，使负载线能通过退磁曲线的最大磁能积点。

(3) μ_{rec}要求较大。这样当受到 ΔH 作用后，在 ΔH 消失后，永磁体的性能降低不大。但是，一般情况下，μ_{rec}愈大，H_c 便较小，抗退磁能力较差。故选择时应兼顾 μ_{rec}和 H_c。

(4) 磁感应温度系数 α_B 和磁稳定性。α_B 希望愈小(绝对值)愈好。但是，有些对 α_B 的要求不太严格的应用场合，对于磁稳定性，则要求愈高愈好。

此外，要求材料的制造工艺，应适合于永磁性的形状或其他方面的需要。如多对磁极的永磁体，应尽量使用各向同性的材料。对工作磁通要求比较均匀的应用场合，应尽量采用粉末冶金方法造成的材料等。

二、在动态条件下工作的永磁体对材料的性能要求

动态条件指永磁体工作时气隙的距离或气隙磁通是变化的。在动态条件中

工作的永磁体称为动态永磁体(亦称变化气隙永磁体),如永磁吊头、永磁选矿机和永磁电机等用的永磁体。该类永磁体对材料的性能要求如下:

(1) 最大回复磁能积$(B_pH_p)_{max}$要大。$(B_pH_p)_{max}$愈大,动态永磁体工作能量愈高。$(B_pH_p)_{max}$可由下式计算:

$$(B_pH_p)_{max}=\frac{1}{4}[(BH)_{max}+\mu_{rec}H_d^2]$$

式中　H_d——最大磁能积点的磁场强度;

μ_{rec}——回复磁导率;

$(BH)_{max}$——最大磁能积,J/m^3。

对于某些材料,$(BH)_{max}$虽比较小,但若H_d比较大时,则$(BH)_{max}$也比较大。

(2) 矫顽力H_c应比静态永磁体的矫顽力H_c要大,即回复磁导率μ_{rec}要小。

(3) 对于剩磁B_r、磁感应温度系数α_B、磁稳定性和制造工艺等的要求与静态永磁体的要求基本相同。

(4) 应选用机械强度高的永磁体。

第九节　永磁体的充磁、退磁及老化处理

随时间的推延和外界条件(如温度、反磁场、高能粒子辐照、机械振动或冲击以及与强磁性物质接触等)的变化,都会引起永磁体组织结构和磁结构的改变,使其磁性能产生变化。永磁体组织结构改变引起磁性能改变,可通过对材料的重复热处理,使磁性能获得部分恢复;磁结构改变引起的磁性能变化,可通过对材料的重复磁化基本上得到恢复。

一、充磁

(1) 磁化磁场强度的确定。在闭合磁路中充磁时,所用的磁化磁场强度,应不小于材料的饱和磁化磁场强度,一般是材料矫顽力H_{cj}的3～5倍。磁化可在极短的时间内完成。

在非闭合磁路中充磁时,所需的磁场强度应比闭合时要大。其大小可由试验确定,即当磁场增加到某值时,永磁体的工作磁通值不再增加了,说明该值的磁化场强已使磁化体充磁饱和。

(2) 充磁方法。永磁体应在组装成磁路后,利用直流磁场或脉冲磁场充磁到饱和;否则,永磁体在充磁后再组装成磁路,会引起退磁。充磁磁场应由直流电磁铁、通直流电流或脉冲电流的单导线或线圈产生,也可由永磁体产生。

充磁时,应使充磁装置产生的磁场的轴线同永磁体工作时所要求的磁通轴线一致。对各向异性的永磁体,还应使永磁体工作时的磁通轴线与最优磁性方向一致。对已经磁化的稀土钴永磁材料制成的永磁体,如再充磁时,充磁方向应与原

定向磁通方向一致。

二、退磁

退磁的目的是使永磁体减少工作磁通或达到磁中性状态(完全退磁)。退磁方法常用的有三种:

(1) 交流退磁。将永磁体放入足够大的交变磁场中,并使磁场逐渐减弱进行退磁。交变磁场可利用空心线圈通以市电或由正负交变强脉冲电流来产生,各种永磁材料均可用此方法。

(2) 直流退磁。对永磁体施加适当强度的反向磁场使其退磁。由于材料不同,其 H_{cj} 也不同,反向磁场难以确定,所以不易完全退磁。

(3) 热退磁。将永磁体加热到居里温度以上,破坏各原子磁矩的长程秩序,以实现完全退磁。此方法仅适用于铁氧体、钐钴和钕铁硼等永磁材料。

三、永磁体的稳定性(老化)处理

永磁体的稳定性指反映永磁体充磁后,当受到外界环境因素和内部因素的影响时,其磁性能的变化程度,用磁感应衰减率(亦称退磁率)表示。影响磁稳定性的内部因素主要包括材料组织变化和磁后效应所引起的磁性改变。铝镍钴合金、铁氧体和稀土铝永磁材料都不会产生由于组织变化而引起的磁性变化。但各种永磁材料都会产生磁后效应,即在外界环境无任何变化,其磁性能也会随时间产生微小的退磁现象。影响磁稳定性的外部环境因素主要包括温度、干扰磁场、机械应力与强磁性体接触以及放射性效应等的影响,这些因素均有可能引起材料的磁性变化。

永磁体的稳定性处理主要是通过人工时效(老化处理),使材料组织结构和磁结构处于比较稳定的状态,使用中磁性衰减率相对地减小。人工时效通常在永磁体充磁后进行,时效条件是模拟并略高于永磁系统工作时所受的外界因素。例如,在正温和负温下工作的磁体,应在高于+50 ℃到低于−20 ℃之间,经多次循环加热和冷却,每次加热或冷却的时间各为 4～8 h。对需进行磁老化的永磁体,用交变磁场退磁,铝镍钴可退 5%～15%,铁氧体、钐钴、钕铁硼等可退 1%～5%。

第十节　永磁体的加工性能与简易测量方法

一、永磁体的加工性能

常用部分永磁体的加工特性及机械性能见表 15－30。

表 15－30　常用部分永磁体的加工特性及机械性能

材料	制造方法	加工性					脆性	密度 (g/cm^3)	电阻率 ($\Omega \cdot cm$)	线膨胀系数 ($\times 10^{-6}℃^{-1}$)
		金切	磨削	电加工	挤压	焊接				
铝镍钴	铸造、粉冶	不可	可，经济	可，费用大	不可	不良	脆	6.9～7.3	$(47\sim65)\times10^{-6}$	11～13
铁氧体	粉冶	不可	可，经济	不可	不可	不可	脆	4.0～5.2	$10^{6}\sim10^{8}$	9
钐钴	粉冶	不可	不可	可，经济	不可	不良	脆	7.8～8.5	$5\times10^{-4}\sim9\times10^{-6}$	10～12.7
钕铁硼	粉冶、快淬	不可	可，经济	可，经济	不可	不良	脆	7.4	1.6×10^{-4}	4.8
铁铬钴	轧拉，铸造	可(热处理前)	可，经济	可，经济	难	不良	脆	7.7	$(60\sim70)\times10^{-6}$	8.5

材料	硬度 (RC)	抗拉强度 (kgf^*/mm^2) (N/mm^2)	温度系数 $\frac{-\Delta B/B}{\Delta t}$ [%(每1℃)]	居里温度 (℃)	最高工作温度(1℃)
铝镍钴	47～59	2～21 (19.6～205.8)	−0.02～−0.03	810～890	450～550
铁氧体	45～60	3～7 (29.4～68.6)	−0.18～−0.20	450	约300
钐钴	22～27	3.5～4.2 (34.3～41.16)	−0.03～−0.09	450～500 (混合稀土) 700～850	250～300
钕铁硼	55	8.4 (82,32)	−0.09～−0.13	310	80～120
铁铬钴	40/50	20～30 (196～294)	−0.02	670	约300

* 1 kgf=9.8 N。

二、永磁体的简易测量方法

永磁体的简易测量方法有：

(1) 用霍尔探头置于工作气隙中，由特斯拉计直接读到工作气隙的磁通密度或场强。

(2) 用霍尔探头放在永磁体的表面某处，测得该处表面的 B 的法线分量。但应注意磁体表面各点的 B 值不同，边棱处最高但均不是 B_r。

(3) 用实际产品或模拟产品的磁路测量。例如，将永磁体放入仪表磁路中直接检验仪表磁体的磁性；对于永磁电机，可在电枢铁芯转动时测量其电动势来判断永磁体的动态磁性。

(4) 用面积一定的线圈从被测部位抽出来，利用磁通计测量其磁通量，再由 $B=\Phi/S$ 求得磁通密度或工作场强。

(5) 距永磁体一定距离放一舌簧接点，观察簧片是否接触，也可接上指示灯判断磁场的在小。

(6) 与标准磁体进行比较，在“日”字形磁路中对称开出两个相同的工作气隙，中间铁芯开一个细缝，工作气隙中分别放入标准磁体和待测磁体，细缝中测出的 B 值可反映被测磁体的好坏。

第十六章　绝缘材料基础知识

第一节　绝缘材料的基本概念

绝缘材料在各种电气设备、电工仪器仪表中使带电部件与其他部件相互隔离、起着机械支撑和固定，以及灭弧、散热、储能、防潮、防霉或改善电场的电位分布和保护导体的作用。采用优质的绝缘材料，合理使用绝缘材料的新技术，对提高电气设备的性能成本比和改善电气设备的功率重量比都具有显著的作用。

绝缘材料又叫电介质，按物态可分为气体、液体和固体。空气、氢、氮、二氧化碳、六氟化硫以及甲烷等都是良好的气体绝缘材料；变压器油、开关油、电容器油、电缆油等矿物油，十二烷基苯、聚异丁烯、硅油和三氯联苯等合成油以及蓖麻油等，都是优良的液体绝缘材料；固体绝缘材料中常用的有绝缘漆、纸、纸板及纤维制品、漆布、漆管和绑扎带等绝缘纤维浸渍制品、云母制品、塑料、橡胶、玻璃和电工陶瓷等。

第二节　绝缘材料的分类号及型号编制方法

一、绝缘材料的分类

绝缘材料的分类号均以 0 至 9 取 10 个号，其中空缺号为将来新产品预备号。

(1) 按应用或工艺特征划分 6 类，并以数字表示。

1——漆、树脂和胶类；2——浸渍纤维制品类；3——层压制品类；4——塑料类；5——云母制品类；6——薄膜、黏带和复合制品类。

(2) 在各大类中按使用范围及形态划分小类，并以数字表示。

① 漆、树脂及胶类：

0——有溶剂浸渍漆类；1——无溶剂浸渍漆类；2——覆盖漆类；3——瓷漆类；4——胶粘漆、树脂类；5——熔敷粉末类；6——硅钢片漆类；7——漆包线漆类；8——胶类。

② 浸渍纤维制品类：

0——棉纤维漆布类；2——漆绸类；4——玻璃纤维漆布类；6——防电晕漆布类；7——漆管类；8——绑扎带类。

③ 层压制品类：

0——有机底材层压板类；2——无机底材层压板类；3——防电晕及导磁层压板类；4——复铜箔层压板类；5——有机底材层压管类；6——无机底材层压管类；7——有机底材层压棒类；8——无机底材层压棒类。

④ 塑料类：

0——木粉填料塑料类；1——其他有机物填料塑料类；2——石棉填料塑料类；3——玻璃纤维填料塑料类；4——云母填料塑料类；5——其他矿物填料塑料类；6——无填料塑料类。

⑤ 云母制品类：

0——云母带类；1——柔软云母板类；2——塑料云母板类；3——玻璃塑型云母板类；4——云母带类；5——换向器云母板类；7——衬垫云母板类；8——云母箔；9——云母管。

⑥ 薄膜、黏带和复合制品类：

0——薄膜类；2——薄膜黏带类；3——橡胶及织物黏带类；5——薄膜绝缘纸及薄膜玻璃漆布复合箔；6——薄膜合成纤维复合箔；7——多种材质复合箔。

二、型号编制方法

电工绝缘材料产品的型号，一般以四位数字表示，必要时可增加第五位和附加数字或附加字母，其表示法如图 16－1 所示。

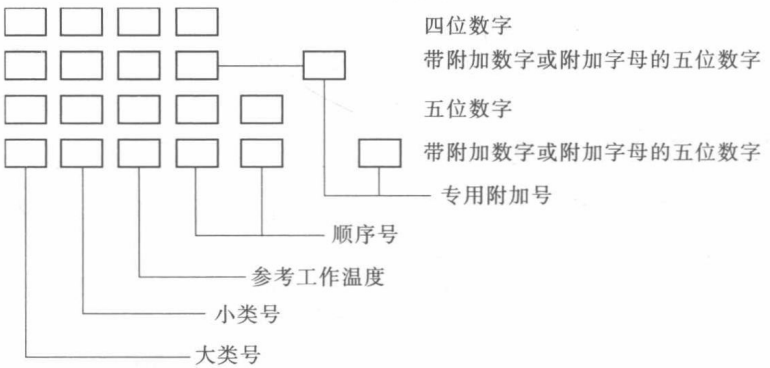


图 16－1　电工绝缘材料产品型号表示法

注：参考工作温度号：

1—参考工作温度为 105 ℃　　2—参考工作温度为 120 ℃

3—参考工作温度为 130 ℃　　4—参考工作温度为 155 ℃

5—参考工作温度为 180 ℃　　6—参考工作温度为 180 ℃

举例：

(1)1032 三聚氰胺醇酸浸渍漆；

(2) 2750 有机硅玻璃漆管；

(3) 3240 环氧酚醛层压玻璃布板；

(4) 3520 酚醛层压纸管；

(5) 4221 氨基石棉压塑料；

(6) 5133 醇酸柔软云母板；

(7) 5438—1 环氧玻璃粉云母带(注：云母制品中，无附加数字的为白云母制品，有附加数字的：1 为粉云母制品，2 为金云母制品，3 为鳞片云母制品)。

第三节　绝缘材料特性

绝缘材料并不是绝对不导电的材料，在外电场作用下，会发生电导、极化、损耗、击穿等过程，在长期使用条件下，还会发生老化。

一、电导率与电阻率

绝缘材料在被施加一定的直流电压后，就会流过微弱的电流，其中由内部带电质点导电而产生的电流，即漏导电流。漏电流密度 i_e 和直流电场强度 E 之比值 $r=i_e/E$，称为绝缘材料的电导率，电导率的倒数 ρ 为绝缘材料的电阻率。在固体绝缘材料中，漏导电流分为表面电流和体积电流两部分。电阻率也相应分两部分：表面电阻率 ρ_s，单位为 Ω，这表征绝缘材料表面的电导特性；体积电阻率 ρ_v，单位为 Ω·cm，它表征绝缘材料内部的电导特征，通常在 $10^9 \sim 10^{21}$ Ω·cm 范围内。

二、相对介电系数

电容器极间为真空时的电容量为 C_0，当极间充以某电介质时的电容量为 C，则两者比值 $\varepsilon_r=C/C_0$ 叫作电介质(即绝缘材料)的相对介电系数。C 总是比 C_0 大，故 ε_r 总是大于 1，这是绝缘材料极化所造成的。绝缘材料极化的结果，使靠近其表面处出现束缚电荷，相应地使电容器极板上的自由电荷也增加，造成电容量增大。绝缘材料的相对介电系数是表征在交流电场下绝缘材料极化程度的一个参数，极化质点的极化率 α 越大，相对介电系数 ε_r 就越大。

三、介质损耗

在交流电压作用下，绝缘材料中的部分电能将转变成热能，这部分的能量称为电介质损耗，单位时间内消耗的能量称为介质损耗功率。电介质损耗主要由电导和极化所引起，是导致绝缘材料发生热击穿的根源。工程上常用介质损耗角正切 $\tan\delta$ 作为衡量电介质损耗的参数。δ 是对绝缘材料施加交流电压后，绝缘材料中流过的电流和电压相角差的余角。绝缘材料在单位电场强度下，电场交变一次所产生的单位体积介质损耗功率称为损耗指数。

四、击穿强度

当施加于绝缘材料上的电场强度高于临界值时，就会使通过绝缘材料的电流剧增，绝缘材料发生破裂或分解而完全失去绝缘性能，这种现象称为电介质的击穿。绝缘材料发生击穿时的电压称为击穿电压 U_b，击穿时的电场强度称为击穿强度 E_b。在均匀电场中，设击穿处绝缘材料的厚度为 h，则 $E_b=U_b/h$。电介质的击穿机制大致如下：

(1) 气体电介质击穿：一般是在强电场中，气体中带电质子获得巨大能量碰撞分子电离产生一系列新电子，形成电子崩向阳极发展，最后形成一条具有高电导的通道，导致气体击穿。

(2) 液体电介质击穿：一般纯净液体的击穿和气体击穿机制相似，但工程上液体绝缘材料不可避免地含有杂质。当液体中含乳化状水滴和纤维时，在强电场下使纤维极化，引起电导剧增，局部温度骤升，最后导致热击穿；如液体中含有气体，在强电场下，液体局部过热，气体迁移集中形成气泡，导致局部发热更甚，附近液体汽化，使气泡逐渐扩大，形成两极导电小桥，导致整个电介质击穿。

(3) 固体电介质击穿：一般分为电击穿、热击穿和放电击穿三种形式。在强电场下，电介质内部带电质子剧烈运动，发生碰撞电离，破坏分子结构，增加电导，以致击穿，为电击穿；在强电场下，电介质由于介质损耗而发出热量，若来不及散发出去，温度升高，导致分子结构破坏而击穿，为热击穿；在强电场下，电介质内含气泡电离而放电，所含杂质也因受热而汽化产生气泡，使气泡放电进一步发展，导致整个材料击穿，为放电击穿。工程上常用液体电介质浸渍固体绝缘材料，以改善电场分布和散热条件，使击穿强度提高。

五、绝缘材料的老化

绝缘材料在运行过程中，由于各种因素的长期作用，会发生一系列不可逆的化学、物理变化，从而导致其电气性能和机械性能的劣化，这种变化通称老化，其变化过程称之为老化过程。影响绝缘材料老化的因素大致有热、电、光、氧化、机械力、射线和微生物等，需作具体分析，分清主次，采取相应措施，以延缓绝缘材料的老化过程。为了使绝缘材料获得最经济的使用寿命，特按其在正常运行条件下容许的最高工作温度进行分级，其耐热等级见表16－1。

表 16-1　绝缘材料的耐热等级

参考工作温度号	级别	适用绝缘材料类别	极限工作温度/℃
	Y	木材、棉花、纸、纤维等天然纺织品 以醋酸纤维和聚酰胺为基础的纺织品 易于热分解和熔化点较低的塑料	90
1	A	工作于矿物油中的Y级材料 用油或油树脂复合胶浸过的Y级材料 漆包线、漆布、漆丝的绝缘及油性漆、沥青漆等	105
2	E	聚酯薄膜和A级材料复合、玻璃布、油性树脂漆、聚乙烯醇缩醛高强度漆包线、乙酸乙烯耐热漆包线	120
3	B	聚酯薄膜，经合适树脂黏合式浸涂覆的云母、玻璃纤维、石棉等制品、聚酯漆、聚酯漆包线	130
4	F	以有机纤维材料补强和石棉带补强的云母片制品、玻璃丝、石棉、玻璃漆布、以玻璃丝布和石棉纤维为基础的层压制品、以无机材料作补强和石棉带补强的云母粉制品、化学热稳定性较好的聚酯和醇酸类材料、复合硅有机聚酯漆	155
5	H	无补强或以无机材料为补强的云母制品、加厚的F级材料、复合云母、有机硅云母制品、硅有机漆、硅有机橡胶聚酰亚胺复合玻璃布、复合薄膜、聚酰亚胺漆等	180
6	C	不采用任何有机黏合剂及浸渍剂的无机物，如石棉、云母、石英、玻璃和电瓷材料等	180以上

第十七章　气体电介质

在电气设备中，气体经常用作绝缘材料，在一些场合，它还具有灭弧、冷却和保护等作用。气体由于密度低，所以具有不同于液体和固体绝缘材料的特性。例如：相对介电常数很小，接近于1；电阻率很高；介质损耗极小，损耗角正切接近零，击穿后能够自恢复和不存在老化等。作为绝缘用的气体，它应满足如下一些要求：

(1) 较高的击穿强度；

(2) 惰性大，化学稳定性好，不燃不爆，不易老化，不易因放电而分解；

(3) 不与共存材料发生反应，无毒；

(4) 热稳定性好，导热性好；

(5) 沸点低，可在较低温度下正常工作；

(6) 易于制取，价格便宜。

第一节　气体电介质的种类和特性

一、空气

空气是存在于自然界的混合物，按体积计算各种成分的含量分别为：氮78.09%，氧20.95%，氩0.93%，二氮化碳0.03%及少量稀有气体，随地区不同还常含有水蒸气、工业废气等。空气的性能主要取决于氮氧成分。

常态下空气的击穿强度约30 kV/cm，在不均匀电场下，其击穿强度下降，起始电晕场强约为4 kV/cm。当气体的压力增大时，压缩空气的击穿电压明显升高。但压力增大时空气中的氧增多，会产生氧化问题。而当气体的压力降至10^{-5}～10^{-3} Pa的高真空状态时，即成为真空间隙绝缘。真空是理想的绝缘体，但在一定电压下也会发生击穿，电极的材质、形状、表面状况等对真空间隙的击穿强度有明显的影响。电极经热处理或火花放电处理后可使真空间隙的击穿电压升高。电极采用硬金属材料时，较之软金属材料，真空间隙的击穿电压也升高。在均匀电场下，真空间隙的击穿电压值是在间隙长度1 mm时30～50 kV，10 mm时200～400 kV。

在电气设备中，空气用作输电线路及变压器的绝缘或辅助绝缘；压缩空气用作断路器的绝缘和灭弧介质；真空用于高压真空开关、真空断路器和各种电子管等。

表 17-1　空气的物理性能与电气性能

序号	性能名称	数值
1	密度(g/l)(20 ℃,1 个大气压)	1.166
2	黏度(Pa·s)	$1.81\sim10^{-5}$
3	热膨胀系数(1/℃)(0 ℃～100 ℃)	3.76×10^{-3}
4	导热系数(W/m·℃)(30 ℃)	$2.14\sim10^{-2}$
5	绝热指数	1.4
6	定压比热(J/kg·℃)(25 ℃,1 个大气压)	1.77×10^{3}
7	电阻率(Ω·cm)	10^{18}
8	介质损耗角正切	$10^{-4}\sim10^{-6}$
9	相对介电系数　1 个大气压 20 个大气压 40 个大气压	1.000 58 1.011 08 1.021 8
10	直流击穿强度(kV/cm)	33

二、氮气

氮气是不活泼的中性气体,工业上一般用空气分离法制取。电工用氮气,最好用高纯氮,纯度应在 99.5%以上。氮气沸点较低,因而可在较低的温度和较高的压力下使用。其击穿强度比空气低一些。氮气主要用作标准电容器的介质以及变压器、电力电缆和通信电缆的保护气体,以防止绝缘油氧化、潮气侵入,并抑制热老化。

三、氢气

氢气是一种无色无味的气体,工业上通常用电解水方法制取。电工上常用纯度为 95%的高纯氢作为氢冷。氢气的密度是气体中最小的,因此其分子运动比其他分子快,所以具有很高的导热性。但氢气的绝缘强度仅为空气的 60%,又易燃易爆,目前在电工中应用不多,主要用作汽轮发电机的冷却介质。

四、六氟化硫

六氟化硫(SF_6)是一种无色、无臭、不燃烧、不爆炸、电负性很强的惰性气体。它具有较高的热稳定性和化学稳定性,在 1 500 ℃时,不与水、酸、碱、卤素、氧、氢、碳、银、铜和绝缘材料等作用,500 ℃时仍不分解;它具有良好的绝缘性能和灭弧性能,在均匀电场中,其击穿强度为空气和氮的 2.3 倍,在不均匀电场中约为 3 倍,在 3～4 个大气压下,其击穿强度与 1 个大气压下的变压器油相似,在单断口的灭弧室中,其灭弧能力约为空气的 100 倍,也远比压缩空气强。六氟化硫气体

可用于全封闭组合电器、电力变压器、电缆、电容器、避雷器和高压套管等；也可与氮或二氧化碳混合用作绝缘介质，以降低成本；采用高压力的六氟化硫气体或它的混合气体绝缘，由于其击穿场强增大，可有效地缩小设备的体积，降低造价，延长检修周期，特别适用于地下变电站等特殊条件使用的电气设备。六氟化硫气体(SF_6)的物理性能见表 17－2。

空气的物理性能与电气性能见表 17－1。

表 17－2　SF_6 的物理性能

序号	性能名称		数值
1	密度(g/l)20 ℃,1 个大气压 2 个大气压 6 个大气压 11 个大气压 16 个大气压		6.25 12.3 38.2 75.6 119
2	临界状态	温度(℃) 压力(N/cm^2) 密度(g/cm^3)	45.55 383.5 0.730
3	黏度(Pa·s)(30 ℃,1 个大气压)		1.54×10^{-5}
4	导热系数(W/m·℃)(30 ℃)		1.4×10^{-2}
5	绝缘指数		1.07
6	定压比热(J/kg·℃)(25 ℃,1 个大气压)		665.87
7	蒸发热(J/g)－40 ℃ 0 ℃ 40 ℃		17 976 12 600 4 200
8	在油中的可溶性(cm^3/cm^3)		0.297
9	在水中的可溶性(cm^3/cm^3)		0.001
10	相对介电系数 25 ℃(1 个大气压)		1.002

纯 SF_6 是无毒的，但若在合成过程中净化不彻底，有可能混有有毒杂质；另外，在使用过程中，由于火花和电弧的高温作用，也会分解出氟原子和某些有毒的低氟化合物。有些低氟化合物被潮气水解，会产生氟化氢等有强腐蚀性的剧毒物；氟原子在电弧区域内能与金属蒸气作用，生成氟化铜、氟化钨、氟化铅等粉末，在有水分的情况下，这些粉末易与硅、钙和碳等作用，影响这些材料的性能和使用寿命。因此，应用 SF_6 时要严格控制含水量，并对接触 SF_6 的各部件、容量等采取

除潮和防潮措施，以保证 SF_6 气体在运行中含水量不超过 150×10^{-6}。同时，还应采用适当的吸附剂，以清除在使用过程中产生的低氟化合物及水分。充有 SF_6 气体的设备或安装地沟内，在没有通风条件下，工作人员不能进入，以防窒息；需要接触 SF_6 气体的人应采取劳动保护措施。

五、氟化烃气体

氟化烃是指烃中的氢被氟取代的化合物，亦泛称氟利昂。其品种较多，可望作为绝缘气体的有四氟甲烷等。这类气体的共同特点是：不燃、无毒、无腐蚀性、化学和热稳定性好、击穿强度高。但其沸点偏高，在电弧或电晕放电作用下，会分解生成腐蚀性产物或碳渣，使绝缘性能下降和加速老化。另外，氟利昂的环境污染问题也需注意。

第二节　气体使用时应注意的问题

1. 关于气体的纯度与杂质的问题

气体的纯度对其电气性能和化学性能有很大的影响，必须严格控制。为保证充入电气设备中气体的纯度，在充气前要仔细对气体和待充气设备进行干燥净化处理；充气后要对绝缘气体中的水分和杂质含量进行控制和定期检测。例如在空气断路器中，普遍采用降压干燥法来控制空气的含水量，使其低于 0 ℃的饱和含量。但在 SF_6 断路器中，则常采用干燥剂，例如分子筛和氧化铝等吸附剂，来吸收气体中的水分和分解物，使断路器中的水分得到控制。吸附剂要定期更换和再生处理，通常是五年更换一次。

2. 关于可燃性和可爆性问题

在绝缘气体中，空气中含有氧，有助燃作用。氢气是易燃易爆的气体，在空气中，其爆炸极限以体积计，为 4%～74%，因此使用时要采取安全措施。

虽然多数绝缘气体本身是不燃不爆的，但它们通常以高压气体或液化状态装在钢瓶中或在高压下使用，如贮运或使用不当，也会发生爆炸事故，所以在贮运和使用时，必须严格按照有关气瓶安全规程进行操作。

3. 关于液化问题

在设备运行过程中，若绝缘气体发生液化或凝露，将不仅使气体的密度下降，达不到规定的耐电强度，而且在电极表面凝结时，还会改变间隙的电场分布。工程上可通过用加热器的方法来防止液化。

第十八章　液体电介质

第一节　液体电介质的基本知识

在常温下为液态的电介质叫作液体电介质，简称液体介质，亦称绝缘油、绝缘液体。液体电介质主要用在变压器、油断路器、电容器和电缆等电气设备中。通过液体电介质的浸渍和填充，消除了空气和气隙，从而提高了绝缘介质的击穿强度，并改善了设备的散热条件。在油断路器中，液体电介质还起到了灭弧作用。

液体电介质的一些主要指标简介如下。

1. 密度

密度反映绝缘油分子的结构和组成。不同类型的绝缘油，由于其分子的结构和组成不同，密度也不同；同一类型的绝缘油，由于馏分的控制和精制深度的差异，对油的密度也有影响。因此，绝缘油对密度有一定的要求。

2. 黏度

黏度是反映绝缘油液体分子运动内摩擦力的指标，是绝缘油运行的重要性能之一。油的黏度小，则流动性大，散热和灭弧效果佳。所以在一般高压电气设备中，总是希望黏度小一些。

黏度是温度的函数，温度升高，黏度下降，反之则上升。这种性能叫黏-温特性。若油的黏度受温度的影响较小，则黏温性能好，表明油品可在较宽的温度条件下使用，这是电气设备所希望的。

3. 闪点

油品的闪点是油加热时所产生的蒸气与空气的混合物接近火焰时发生短暂闪火的最低温度。为了保证安全运行，要求闪点尽可能高。闪点按其测试方法分为闭口杯法和开口杯法，闭口杯法又简称 PM 法，开口杯法又简称 COC 法。开口杯闪点比闭口杯闪点一般高 10 ℃以上。

4. 凝点

油品在规定的试验条件下失去流动性的最高温度叫作凝点，同义词还有倾点和流动点。凝点反映了油品的低温性能，是绝缘油的重要性能之一。绝缘油的凝固是不允许的，尤其是变压器油、开关油和高压电缆油等，这类油品都规定了较低的凝点指标。

5. 酸值

中和 1 克油品所需要的氢氧化钾毫克数称为酸值或中和值，它反映油品中酸

性物质的含量。油品在使用过程中，不可避免地将发生氧化，生成有机酸，因此酸值又是检查绝缘油运行中氧化程度和是否可继续使用的重要依据之一。

6. 水含量

含有水分的绝缘油，无论是矿物油还是合成油，其电气性能将会显著下降。绝缘油中的水分主要来自大气或绝缘材料劣化。芳烃的吸水性比烷烃大，而大多数合成油中芳烃含量比矿物油大，因而吸水也比矿物油大。另外，温度愈高，油溶解水分的能力也愈大。

7. 氧化安定性

绝缘油的氧化安定性亦称氧化稳度性，是衡量绝缘油抗氧化的能力。绝缘油的氧化产物主要是酸和水，对绝缘不利。为了减缓其氧化老化，常在精制后的油品中加入抗氧剂，并控制电气设备的使用温度或采取隔绝空气的保护措施。我国规定了变压器油的氧化安定性试验方法，试验结果以生成的沉淀物含量和酸值来衡量。

8. 介质损耗因数

绝缘油的损耗因数(损耗角正切)能在很大程度上反映油品质的好坏，决定油品是否可以继续运行。油中的固体颗粒、水分及其他极性物质都会造成较大的损耗因数。因此在油的制备和使用前，应尽量除去杂质和水分，并进行脱气、脱水处理，以达到损耗因数较小的要求。

9. 介电强度

液体电介质当然要求有尽量高的介电强度(击穿强度)。一般说来，极性较大的绝缘油介电强度较小，而极性较小的则介电强度较大。另外，分子中引入芳环或烃含量大的油，其介电强度也增大。实际运行中，温度、杂质、水分对油的介电强度也都有影响。

10. 电场稳定性

绝缘油的电场稳定性是指它在电场中承受电压和电离作用的能力，这可以通过析气性、比气散、油浸纸析气试验、浮动电极法和可视气体发生电压等试验来评价。下面简介析气性试验和比色散试验。

(1) 析气性：绝缘液体在承受足以引起通过气液交界中的气体先放电的电场强度作用时，由该液体放出气体或析出 X 蜡的现象叫作析气性。绝缘油放出气体和析出 X 蜡对电气设备极其有害，易导致设备局部过热甚至膨胀爆炸。为了安全运行，一般要选择析气性好的油或对析气性差的油进行改性，常根据使用要求，在调配时加入浓缩液芳烃或在使用时加入合成油来改善其析气性。

(2) 比色散：绝缘油的色散与其同温度时密度之比称为比色散。比色散与油品中的芳烃含量有关，芳烃含量愈大，比色散值也愈大。而芳烃含有苯环结构，能够吸氢，且析出 X 蜡很少，也就是说芳烃的析气性要优于烷烃，所以绝缘油的比色散值较大，意味着油中芳烃含量高，表明油的析气性好。一般说来，当油的比色

散值大于115时，芳烃的吸氢过程将大于烷烃的放气过程，油呈吸气状态，析气性好。

液体电介质按其来源分为矿物绝缘油、合成绝缘油和植物绝缘油。

第二节　常用矿物绝缘油

常用矿物绝缘油有变压器油、开关油、电缆油和电容器油4种。

1. 变压器油

主要用于灌注变压器、油开关，起着绝缘、灭弧和散热作用。变压器油的分类是以其凝固点为标准的，变压器油10#、25#、45#三个牌号分别表示其凝固点不高于－10 ℃、－25 ℃和－45 ℃。用户选择变压器油应根据变压器运行地区的平均气温来选用不同牌号的变压器油。一般情况下10#变压器油用于平均气温不低于－10 ℃的地区；25#变压器油用于寒区；45#油用于寒区和严寒区。目前生产的各牌号变压器油都加有抗氧化剂T501，各牌号变压器油混用时应作混油试验，以确保混合油质量。变压器油应进行脱水、脱气和过滤处理，使性能达到有关标准规定后充灌变压器。运行中的变压器油应防止油温过高，以减缓变压器油老化过程，延长变压器油的使用寿命。一般要求运行中变压器的上层油温不超过85 ℃，控制在65～70 ℃以下适宜。桶装变压器油应入库存放。严禁水分等杂质混入，盛装变压器油容器和加油用具应清洁。

2. 开关油

主要用于断路器熄灭电弧和触点之间的绝缘。根据国家标准中对开关油的暂行质量指标规定：开关油暂时以变压器油为替代品。具体选用时以使用地区气温为参考：气温在－10 ℃以下地区，应选用25#变压器油；在－20 ℃以下地区，应选用45#变压器油。

3. 电容器油

电容器油是将变压器油进一步精炼而制得的。其主要成分是环烷烃类的混合物，外观呈亮黄色、透明而微带黏性的中性液体。电容器油的电气性能优于变压器油，特点是损耗因数很小，体积电阻率及耐压强度较高。ε_H 及 $\tan\delta$ 值与温度、频率的关系不大，电容器油分为1号和2号两种。1号为电力电容器油，主要用于浸渍、充灌移相电容器、脉冲电容器等，起绝缘、散热和储能作用。2号为电信电容器油，用于电信电容器的浸渍，起着储能和绝缘作用。电容器油为电容器专用油，在使用和存储方面更为严格，两种电容器油不能混用或互相代替，更不得以变压器油代替或混合使用。

4. 电缆油

以电缆的绝缘强度和输电电压分为35 kV电缆油和高压电缆油两个牌号。35 kV电缆油用作实芯电缆的绝缘纸浸渍剂，使用时要混入松香，其质量比是：

油：松香＝7：3。高压电缆油中的 110 kV 和 220 kV 电缆油自 330 kV 高压电缆油投产应用后被其取代了。330 kV 电缆油代号根据电缆油标准 SY1356—86 定为 DL—330，其适用于 330 kV 以下自容式充油电缆作绝缘油。

各种矿物油的性能见表 18－1。

表 18－1　各种矿物油的性能

序号	性能名称	变压器油		开关油（45 号变压器油）	电容器油	电缆油	
		10 号	25 号			低压电缆油①（DL-1）（DL-1H）	高压电缆油（DL-Z）
1	运动黏度(m^2/s)0 ℃ 20 ℃ 50 ℃	— <30 7.5～9.6	— 20～30 8.5～9.6	— <30 6～9.6	— 37～45 9～12	— — 25～27（100 ℃）	20～50 8～18 3.5～6
2	闪点(℃)(闭口)	135～160	135～155	135～145	135～175	250～265②	>125
3	凝固点(℃)	−12～−10	−28～−25	−47～−45	−48～−45	−13～−12	<−45
4	酸值(mgKOH/g)	0.006～0.05	0.004～0.05	0.003～0.05	0.003～0.02	0.003～0.1	<0.008～0.01（115 ℃，96 h）
5	灰分(%)	0.001～0.005	0.002～0.005	0.003～0.005	0.001 5	—	—
6	残碳(%)	—	—	—	—	0.5～0.6	—
7	苛性钠抽出(级)	1～2	<2	2	<1	—	—
8	透明度(5 ℃时)	透明	透明	透明	透明	—	—
9	抗氧化安定性，氧化后沉淀物(%) 氧化后酸值(mgKOH/g)	0.01～0.1 0.02～0.35	0.06～0.1 0.04～0.35	0.02～0.10 0.048～0.35	— —	— —	— —
10	电阻率(Ω·cm)20 ℃ 100 ℃	— —	— —	— —	10^{14}～10^{15} >10^{13}	— —	— —
11	介质损耗角正切 20 ℃ 70 ℃ 100 ℃，50 Hz 100 ℃，10^3 Hz 老化后	 <0.005 0.002 5～0.025 — — —	 0.000 5～0.005 0.001～0.025 — — —	 — — — — —	 — — <0.005 <0.002 —	 — 0.01～0.03③ — — — 0.03～0.12③（150 ℃，48 小时）	 — <0.001 5④ — — — <0.004④（115 ℃，96 小时）
12	相对介电系数 20 ℃，50 Hz 10^3 Hz	— —	— —	—	2.1～2.3 2.1～2.3	— —	— —
13	击穿强度(kV/cm)	160～180	180～210	—	200～230	140～160③	<200

注：① DL-1 为自石油分馏精制而得的油，DL-1H 为重合油，重合油残碳允许不大于 0.8%；
② 开口法闪点；
③ 测试前油样允许在 100 ℃真空中干燥 2 h；
④ 测试前油样允许用真空干燥或过滤法处理。

第三节　常用合成绝缘油

常用的合成绝缘油有十二烷基苯、多氯联苯、聚异丁烯、硅油等，下面对其性能作一简要说明。合成油的主要性能见表 18-2。

1. 十二烷基苯

从结构上可分为软质烷基苯和硬质烷基苯两种，我国电子工程中多用软质烷基苯，因为其分子结构中碳数为 12 左右，故称为十二烷基苯。十二烷基苯黏度小，凝点低，介质损耗因数小，浸渍性好，常态时黏度低，有利于浸渍和提高导热性，毒性小，不易被污染，反复使用过的油经过一定处理后仍可使用。适宜用来浸渍纸介电容器、复合介质电容器或交、直流脉冲电容器。

2. 多氯联苯

又称氯化联苯(PCB)，是多氯化联苯异构体的复杂混合物。因其有毒性，目前已禁止使用。因其介电常数大，化学稳定性和抗析气性好，在高温下性能不易劣化，故曾作过电容器浸渍剂。

3. 聚异丁烯

聚异丁烯是一种无色黏稠的液体，化学性质非常稳定，吸湿性低，具有优良的电性能，在很宽的温度和频率范围内，损耗因数低，相对介电系数随温度变化小。因而聚异丁烯在电工上主要用作电容器和电缆的浸渍剂。

4. 硅油

硅油是无色或淡色的黏稠液体，按分子结构可分为甲基硅油、乙基硅油和苯甲基硅油等，在较宽的频率范围和温度范围内硅油的相对介电常数和介质损耗因数变化微乎其微，导热性优异，而且闪点高，凝固点低，能耐电晕和电弧，黏度稳定性随温度变化小，特别是其无毒性，对人无害，但缺点是黏度大，价格高。

不同分子结构的硅油性能也有特别之处。苯甲基硅油比甲基硅油的相对密度大、折光率高，闪点高，热稳定性、耐辐射性、耐氯化性能好，凝固点低，最低在一70 ℃时使用，在电场作用下其吸气性好。乙基硅油比甲基硅油耐热性差，但耐寒性好。

硅油既是一种优良的浸渍材料，又是一种良好抗氧化剂、脱膜剂和润滑剂。作为浸渍材料，其用作高温耐热和超小型电容器的浸渍剂；作为抗氧化剂，主要用作线绕电位器合金线的抗氧化剂。

表 18－2　合成油的主要性能

序号	性能名称	十二烷基苯	硅油			聚异丁烯(电容器用)	三氯联苯
			甲基硅油	苯甲基硅油	乙基硅油		
1	相对密度 20 ℃	0.862 7～0.864 7	0.930～0.975①	1.01～1.08①	0.95～1.06	0.86	1.370②
2	折光率 n_D^{20}	1.480～1.495	1.390～1.410①	1.460～1.495①	—	—	1.627 2
3	运动黏度(m^2/s)20 ℃	6.5～8.5	9～1 050①	100～200①	8～550	13 820	—
	50 ℃	3.0～4.0	—	—	—	97(100 ℃)	—
	恩氏黏度(°E)90 ℃	—	—	—	—	—	1.145
4	闪点(开口)(℃)	125～133②	155～300	280～300	110～250	165～175	173
5	凝固点(℃)	−69～−65	−65～−50	−45～−40	<−60	−10	−23
6	酸值(mgKOH/g)	0.004～0.008			<0.01	0.3	0.002 5
	115 ℃96 h 老化后	0.004～0.008					
7	电阻率(Ω·cm)常态		$>10^{14}$	$>10^{14}$	$>2.5\times10^{13}$	10^{17}	
	100 ℃				$>1.0\times10^{13}$	10^{14}(125 ℃)	8×10^{12}
8	介质损耗角正切　常态		$<3.0\times10^{-4}$	$<3.0\times10^{-4}$	$<3.0\times10^{-4}$	$(1\sim9)\times10^{-5}$	
	100 ℃	$5\times10^{-4}\sim1\times10^{-3}$			$<8.0\times10^{-4}$	10^{-4}(125 ℃)	$3\times10^{-3}\sim8\times10^{-3}$(90 ℃)
	115 ℃90 h 老化后	$7\times10^{-4}\sim1\times10^{-3}$					
9	相对介电系数　常态		>2.6	2.6～2.8	2.35～2.65	2.15～2.3	5.6
	125 ℃				—	2.0～2.1	5.0(89 ℃)
10	击穿强度(kV/cm)	240	150～180	>180	150～180		59.3③

注：① 25 ℃时测得；② 闭口法；③ 在 60 ℃测得。

第四节　植物绝缘油

电工材料中用到的植物油主要是蓖麻油。蓖麻油的主要成分是蓖麻酸甘油酯，它的相对介电系数较大，无毒，不易燃，耐电弧，击穿时无碳粒；但锡对蓖麻油的热老化有明显的催化作用，它的相对介电系数和介质损耗角正切值随频率的变化很大，且黏度大，难于精制，仅用于标准电容器绝缘。电容器用蓖麻油的性能见表 18－3。

表 18－3　电容器用蓖麻油的性能

序号	性能名称	数值
1	相对密度	0.950～0.970

续表

序号	性 能 名 称	数 值
2	折光率 n_D^{20}	1.477 0～1.478 0
3	恩氏黏度(°E)50 ℃	17.0～17.5
4	凝固点(℃)	−17～−15
5	酸值(mgKOH/g)	1.5
6	皂化值(mgKOH/g)	176～186
7	碘值	82～88
8	电阻率(Ω·cm) 20 ℃ 50 ℃	 10^{13} 10^{11}～10^{12}
9	介质损耗角正切(50 Hz) 20 ℃ 100 ℃	 5×10^{-3} 5×10^{-2}
10	相对介电系数(50 Hz) 20 ℃ 100 ℃	 4.2 3.5
11	击穿强度(kV/cm)(50 Hz)	200

第五节 油的维护与净化

一、油的维护

绝缘油在贮存、运输和运行过程中，会被污染和老化，必须随时进行监督与维护，并采取防止老化的措施，以保证电工设备的安全运行，延长检修周期。

防止油老化一般可采取：加强散热以降低油温；用氮或薄膜使油与空气隔绝；添加抗氧化剂；防止日光照射；采用热虹吸过滤器，使油连续再生等措施。

必须经常对油的性能进行检查与测定。运行中油不符合标准时，则需对油进行净化和再生。运行中变压器油的质量标准见表 18-4。

表 18-4 运行中变压器油的质量标准

序号	名 称	技 术 要 求
1	水溶性酸 pH	≥4.2
2	酸值(mgKOH/g)	≤0.1

续表

序号	名　称	技 术 要 求
3	闪点(℃)	比新油标准不低于 5 ℃ 比前次测量值不低于 5 ℃
4	击穿强度(kV)	≥20(对 15 kV 以下变压器) ≥30(对 20～35 kV 变压器)
5	介质损耗角正切(70 ℃)	≤0.02
6	羰基(mg/g)	≤0.28
7	界面张力(N/cm)	$\geqslant 15\times10^{-5}$

注:① 变压器油用作户外开关油时,应增加凝固点试验,其凝固点不可高于当地最低气温;
② 发现闪点下降时,应分析油气组成,以查明原因。

二、油的净化

绝缘油常用的净化方法有:

(1) 压力过滤法:用框式过滤机过滤,除去油中水分和机械杂质。

(2) 真空喷雾法:对于运行中的油,采用移动式真空净化系统,可以有效地清除油中水分、杂质以及低分子酸、油泥和不稳定的饱和烃类,使油恢复到新油水平,最后加入 2,6 -二叔丁基对甲酚,使油有较长时期的稳定性。

(3) 电净化:将污油流经强直流电场(电压为 10～40 kV 或 50 kV 以上),使油中的水分、纤维、树脂、油脂等物质被强行电离,并被静电电场所吸附;如用高压交流电场净化,对除去油中水分和盐类物质效果较好。

(4) 白土再生法:在油的老化程度不太严重时,利用白土的优良吸附性能,除去油中杂质和水分,能取得较好的再生效果;硫酸—白土再生法适用范围较广,不论油的老化程度如何,用后效果都是好的;硫酸—白土—水洗再生法适用于老化程度较严重,且油中游离酸和苛性钠较多的情况,在水洗后再用白土处理一次,以清除残余水分。

(5) 硅胶—活性氧化铝再生法:当油轻微老化时,用它的吸附原理对油进行再生;如老化程度较严重,可将硅胶和活性氧化铝与硫酸配合使用。

第十九章　绝缘纸品

绝缘纸和其他绝缘材料相比，其主要特点为价格便宜、物理性能、代学性能、电气性能、耐老化等综合性能良好。

一般把标重小于 225 g/m² 的称为纸，而把标重大于 225 g/m² 的称为纸板。

表 19-1　绝缘纸与纸板的分类

分　　类			
植物纤维绝缘纸与纸板	绝缘纸	电缆纸	低压电缆纸
			高压电缆纸
			超高压电缆纸
		电容器纸	A 型、B 型和低损耗纸
		卷缠用绝缘纸	变压器纸
			电话纸
			卷缠纸
		浸渍纸	硫酸盐木浆纸
			亚硫酸盐木浆纸
			棉浆纸
		其他电器用纸	云母带纸
			皱纹绝缘纸
			电解电容器纸
	电绝缘纸板	电绝缘纸板	
		成形绝缘件	
	钢纸	硬钢纸板、管、棒	
		软钢纸板	
合成纤维绝缘纸及玻璃纤维绝缘纸	聚芳酰胺纤维纸		
	聚矾酰胺纤维纸		
	噁二唑纤维纸		
	聚酯纤维纸		
	玻璃纤维纸		

第一节　绝　缘　纸

绝缘纸主要有植物纤维纸和合成纤维纸两类。植物纤维纸按用途可分为电缆纸、电话纸、电容器纸和卷绕纸。合成纤维纸按纤维类别可分为聚酯纤维纸、聚酰胺纤维纸、聚砜酰胺纤维纸和噁二唑纤维纸，后三种为耐高温合成纤维纸。

一、电缆纸

电缆纸包括低压电缆纸(通称电缆纸)、高压电缆纸和绝缘皱纹纸。低压电缆纸主要用作 35 kV 及以下的电力电缆、控制电缆和通信电缆的绝缘，其性能见表 19－2。

表 19－2　电缆纸的性能

性　能		低压电缆纸			高压电缆纸			
		DLZ－08	DLZ－12	DLZ－17	GDL－045	GDL－075	GDL－125	GDL－175
厚度(mm)		0.08	0.12	0.17	0.045	0.075	0.012 5	0.175
紧度(g/cm³)		0.7～0.82	0.7～0.86	0.7～0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
透气度(ml/min)		19～25	18～25	20～25	0.7～25	1～25	8～20	12～20
横向撕裂度(N)		0.6	1.2	2.1	0.2～0.3	0.6～0.7	1.5～1.9	2.4～2.9
抗张力(N)	纵向	≥88	156～176	216～274	52～63	88～98	137～152	172～216
	横向	≥44	68～78	≥107	22～28	41～49	64～74	2.3～3
伸长率(%)	纵向	≥4.5	2～2.2	2～2.1	2.3～3	2.3～3	2.3～3	2.3～3
	横向	≥2.0	6～7.2	6～7	7～8	7～10	7～9	7～9
耐折度(次数)	常态	≥1 000	2 000～3 000	2 000～3 000	1 300～1 800	1 500～2 300	2 500	3 000
	热态	—	—	—	1 040～1 700	1 200～1 600	2 000	2 400
介质损耗角正切(×10⁻³)	干纸	—	—	—	1～2.3	1.3～2.3	1.4～2.3	1.5～2.3
	油纸	—	—	—	3	3	3	3
水抽出物电导率(Ω·cm×10⁻⁵)		—	—	—	0.9～2.5	0.9～2.5	0.9～2.5	0.9～2.5
水分(%)		6～9	6～9	6～9	6～9	6～9	6～9	6～9
水抽出物 pH		7～9.5	7～9.5	7～9.5	6.5～8	6.5～8	6.5～8	6.5～8

二、电话纸

电话纸主要用于通信电缆的绝缘，也可作为云母箔的补强材料用于电机绝缘，其性能见表 19－3。

表 19－3　电话纸的性能

序　号	性　能　名　称	DH－50	DH－75
1	厚度(mm)	$0.05^{+0.004}_{-0.003}$	0.075±0.004
2	紧度(g/cm³)	0.70～0.82	0.74～0.82
3	抗张力(N)　纵向 横向	55～61 24～25	72～91 30～39
4	伸长率(%)　纵向 横向	2.0～2.7 4.0～8.4	2.0～2.8 4.0～9.8
5	耐折度　往复次数	＞500	＞500
6	扭曲度　转数，纵向	＞10	＞10
7	水抽出液 pH	7～8	7～8
8	灰分(%)	＜1	＜1
9	水分(%)	5～8	5～8

三、电容器纸

电容器纸的特点是紧度大、纸薄而偏差小。按使用要求分为 A 类和 B 类，A 类用于电子纸路电容器，B 类用于电力电容器，都是用作极间介质。B 类中 BD 型纸在 60～120 ℃时的介质损耗角正切值较低，应用它可提高电力电容器的运行温度。电容器纸的性能见表 19－4。

表 19-4　电容器纸的性能

类别	型号	厚度 (μm)	紧度 (g/cm³)	透气度 (ml/min)	纵向裂断长 (m)	水分 (%)	灰分 (%)	水抽出物酸度(%)	交流击穿电压(V)	介质损耗角正切(60 ℃)
A类	A-Ⅱ	4 ± 0.5	1.2±0.05	0.4～10	8 000～10 000	4～10	0.19～0.35	0～0.007	220～280	0.001 4～0.002
		$5^{+0.4}_{-0.5}$	1.2±0.05	0.5～15	8 500～9 600	4～10	0.25～0.35	＜0.007	250～350	0.001 5～0.002
		$6^{+0.4}_{-0.5}$	1.2±0.05	0.4～8	8 500～10 000	4～10	0.20～0.35	＜0.007	270～330	0.001 5～0.002
			1.2±0.05	0.2～5	8 000～9 500	4～10	0.20～0.35	＜0.007	280～450	0.001 6～0.002
		$7^{+0.4}_{-0.5}$	1.2±0.05	0.3～3	8 000～9 200	4～10	0.13～0.35	0.001～0.007	310～470	0.001 6～0.002
			1.2±0.05	0.3～3	7 500～97 000	4～10	0.16～0.35	0.000 7～0.007	350～550	0.001 7～0.002
		$8^{+0.4}_{-0.5}$	1.2±0.05	0.5～3	7 000～9 200	4～10	0.22～0.35	0.000 4～0.007	380～550	0.001 6～0.002
B类	B-Ⅰ型	10±0.7	1.0±0.05	0.5～7	7 000～9 600	4～10	0.22～0.35	＜0.007	300～450	0.001 5～0.001 7
		12±1.0	1.0±0.05	0.1～5	7 000～9 300	4～10	0.20～0.35	0.000 7～0.007	325～470	＜0.001 7
		15±1.0	1.0±0.05	0.3～5	7 000～8 700	4～10	0.24～0.35	0.001 8～0.007	350～500	＜0.001 7
	B-Ⅱ型	$8^{+0.4}_{-0.5}$	1.2～0.05	0.9～3	8 000～9 400	4～10	0.22～0.35①	0.003～0.007	310～430	0.001 6～0.002
		10±0.6	1.2～0.05	0.5～3	7 500～10 000	4～10	0.19～0.35	0.001 2～0.007	350～450	＜0.002 0
		12±0.7	1.2～0.05	0.7～3	7 000～9 500	4～10	0.20～0.35①	0.002 5～0.007	380～670	＜0.002 0
		15±1.0	1.2～0.05	0.2～2	7 000～8 500		0.22～0.35	0.007	430～600	0.001 8～0.002
B类	BD-Ⅰ型	10±0.7		1.0±0.05	＞7 000	4～10	＜0.35	＜0.007	＞300	＜0.001 4
		12±1.0		1.0±0.05	7 000～8 700	4～10	0.22～0.35①	0.002 5～0.007	325～540	＜0.001 2～0.001 4
		15±1.0		1.0±0.05	＞7 000	4～10	＜0.35	＜0.007	＞350	＜0.001 4
	BD-Ⅱ型	$8^{+0.5}_{-0.4}$	1.2±0.05	＜3	8 000	4～10	＜0.35	＜0.007	＞310	＜0.002
		10±0.6	1.2±0.05	0.6～3	7 500～8 400	4～10	0.17～0.35①	0.000 7～0.007	350～500	＜0.002
		12±0.7	1.2±0.05	＜2	＞7 000	4～10	＜0.35	＜0.007	＞380	＜0.002
		15±0.8	1.2±0.05	＜2	＞7 000	4～10	＜0.35	＜0.007	＞430	＜0.002
	BD-0型	15±0.8	$0.8^{-0.05}_{-0.04}$	1～5	7 000～8 000	4～10	0.17～0.350①	0.005 3～0.007	380～490	＜0.001 1

注：① 试验方法按 GB463。

四、卷绕纸

卷绕纸主要用于制造绝缘管、绝缘筒，也用于包缠电器、无线电的零部件。它的性能见表 19－5。

表 19－5　卷绕纸的性能

序　号	性　能　名　称	数　　值
1	厚度(mm)	纵向 $^{+0.004}_{-0.003}$ 横向 $^{+0.003}_{-0.002}$
2	紧度(g/cm³)	0.72～0.85
3	抗张力(N)　纵向 横向	45～83 27～44
4	纵向耐折度　往复次数	＞320
5	吸水高度(mm/5 min)	4～10
6	水分(%)	5～9
7	灰分(%)	0.4～1.0
8	水抽出物 pH	7.0～8.5
9	击穿强度(kV/mm)	8～10

五、聚酯纤维纸

聚酯纤维纸一般与聚酯薄膜制成复合品，用于 B 级电机槽绝缘，它的性能见表 19－6。

表 19－6　聚酯纤维纸的性能

序　号	性　能　名　称	数　　值
1	厚度(mm)	0.08±0.02
2	定量(g/m²)	28～32
3	密度(g/cm³)	0.35～0.40
4	抗张力(N)　纵向 横向	12～18 12～18
5	伸长率(%)　纵向 横向	15～40 15～40
6	收缩率(%)　纵向 横向	1.0～3.5 1.0～3.5

六、耐高温合成纤维纸

耐高温合成纤维纸有聚酰胺纤维纸、聚砜酰胺纤维纸和噁二唑纤维纸。它们常与聚酯薄膜、聚酰亚胺薄膜组合成复合制品，主要用于F级和H级绝缘电机的槽绝缘和导线的换位绝缘，它们的性能见表19-7。

表19-7　耐高温合成纤维纸

序号	性能名称	芳香族聚酰胺纤维纸(轧光)	芳香族聚砜酰胺纤维纸(轧光)	噁二唑纤维纸①(轧光)
1	厚度(mm)	0.08～0.09	0.15±0.015	0.16±0.01
2	密度(g/cm^3)	0.9±0.02	0.92	1.03
3	定量(g/m^2)	70～80	158.4	169
4	抗张力(N)　纵向	＞40	96	107.4
	横向	＞20	74.2	76.6
5	收缩率(%)　270 ℃，10 min	＜2②	＜2	1
	290 ℃，3 h		＜2	＜1
6	延伸率(%)　纵横向	＞5	—	—
7	抗撕强度(N)　纵向	＞1.5	—	—
8	体积电阻率(Ω·cm)常态	1×10^{15}	2.6×10^{16}	2.2×10^{15}
	180 ℃	—	7.8×10^{14}	2.3×10^{14}
	受潮48 h后	1×10^{11}	8.2×10^{13}	1.8×10^{14}
	浸水24 h后	—	$\leqslant10^{8}$	$\leqslant10^{8}$
9	表面电阻率(Ω)　常态	—	2.0×10^{13}	4.9×10^{13}
	受潮48 h后	—	5.6×10^{11}	8.8×10^{11}
10	击穿强度(kV/mm)　常态	14	22	20
	在变压器油中	—	34	27
	弯折后	12	10	—
	180 ℃	14	19.6	16
	浸水24 h后	—	5.3	2.1
	受潮48 h后	—	18	14

注：① 系噁二唑短切纤维与聚砜酰胺沉析纤维混合抄成的纸。②在260 ℃、1 h后测得。

七、金属化纸和半导体纸

金属化纸由电缆纸或电话纸与金属膜黏合，或在电容器纸上真空喷涂一层金属而成；半导体纸由渗有炭黑的纸浆抄纸而成。金属化电缆纸、金属化电话纸和

半导体纸用作电力电缆、通信电缆、橡皮绝缘船用电缆等的屏蔽层；金属化电容器纸用作直流电容器极板和极间绝缘。

八、复合纸

复合纸(PPLP)是以聚丙烯薄膜，木浆纤维纸为基材，以聚丙烯树脂挤出料为黏合剂，经挤压复合而成。复合兼有纤维纸的浸渍特性和薄膜的电气、力学性能的优点，是高压充油电缆的新型绝缘材料。复合纸的性能见表 12－8。

表 12－8　复合纸的性能

性　　能	复合纸(PPLP－125)	
	协议指标	实测值
厚度(μm)	$125\pm^{10}_{5}$	130
密度(g/cm^3)	0.90±0.05	0.92
抗拉强度(kN/m)　纵向 横向	＞6.5 ＞2.6	7.0 4.5
伸长率(%)　纵向 横向	＞2.0 ＞5.0	3.1 7.2
剥离强度(kN/m)纵向	＞52	63.6
灰分①(%)	≤0.2	0.19
铁的质量分数($\times10^{-4}$)	≤50	35.6
钠的质量分数(%)	≤15	11.6
水抽液氯的质量分数(%)	≤40	8.2
水抽液电导率(μs/cm)	≤20	19.5
介电常数，DDB 中	≤2.8	2.79
油浸纸的 tan δ，85 ℃(%)	≤0.1	0.106
介电强度(kV/cm)	≥100	138
冲击介电强度(kV/mm)	≥160	179～186
静摩擦系数 μ	＜0.8	＜0.8

注：① 指质量分数。

第二节　绝缘纸板

绝缘纸板由木质纤维或掺有棉纤维的混合纸浆经抄纸、轧光制成。掺有棉纤维的纸板抗张强度和吸油量较高，可用作空气中和不高于 90 ℃的变压器油中的绝缘材料和结构保护材料。绝缘纸板分为 50/50 型和 100/00 型两种型号。

一、50/50 型纸板

50/50 型纸板的组成是木质纤维和棉纤维各占一半，它有良好的抗弯曲性和耐热性，适用于电机、电器的绝缘和结构保护材料，以及耐震绝缘零部件等。

二、100/00 型纸板

100/00 型纸板不掺棉纤维，有薄型和厚型两种。薄型纸板通称青壳纸或黄壳纸，与聚酯薄膜制成复合制品，用作 E 级绝缘电机的槽绝缘，也可用作绕线间隔绝缘保护层；厚型可制作某些绝缘零件和用作保护层。

绝缘纸板的性能见表 19－8。

表 19－8　绝缘纸板的性能

序号	性能名称		50/50	100/00
1	紧度(g/cm^3)			
	厚度 0.1～0.4 mm		—	1.15～1.2
	厚度 0.1～0.5 mm		1.20～1.25	—
	厚度 0.5 mm 及以上		—	1.00～1.15
2	抗张强度(N/cm^2)			
	厚度 0.1～0.5 mm，	纵向	12 000～16 000	9 000～14 000
		横向	3 500～4 000	3 500～4 000
	经往复弯折 100 次后，		7 200～9 000	6 750～8 000
	纵向 厚度 0.8 及 0.8 mm 以上，纵向		—	7 000～8 000
	横向		—	3 800～5 000
3	收缩率(%)，厚度 2.0～3.0 mm			
	经干燥后	纵向	—	1～10
		横向	—	1～2.5
4	灰分(%)		0.5～1.5	0.5～1.1
5	水分(%)		6～10	6～10
6	击穿强度①(kV/mm)			
	厚度 0.1～0.4 mm		＞13	11～15
	厚度 0.5 mm		＞12	42～50
	厚度 0.8 mm		—	39～50

续表

序号	性能名称	50/50	100/00
	厚度 1.0 mm	—	36～50
	厚度 1.5 mm	—	32～45
	厚度 2.0 mm	—	29～35
	厚度 2.5 mm	—	24～30
	厚度 3.0 mm	—	22～27
	纵向弯折一次后，厚度 0.1～0.4 mm	9～14	8～14

注：① 厚度 0.1～0.4 mm 纸板干燥后测量；厚度 0.5～3.0 mm 纸板经真空干燥、浸变压器油后测量。

第三节 钢 纸 品

钢纸品有硬钢纸板、钢纸管和玻璃钢复合钢纸管。

一、硬钢纸板

硬钢纸板通称反白板，由无胶的棉纤维厚纸经氯化锌处理后用水漂洗、再经热压而成。它的组织紧密，有良好的机械加工性，适于作小型低压电机的槽楔和其他绝缘零件。硬钢纸板的性能见表 19－9。

表 19－9 硬钢纸板的性能

序号	性能名称	一号	二号
1	紧度(g/cm^3)		
	厚度 0.5～0.9 mm	1.1～1.18	1.05～1.29
	厚度 1.0～6.0 mm	1.2～1.36	1.10～1.34
	厚度 7.0～30.0 mm	＞1.1	＞1.1
2	抗张强度(N/cm^2)		
	纵向，厚度 0.5～0.9 mm	6 500～9 900	5 500～8 500
	厚度 1.0～3.0 mm	7 000～10 400	5 500～9 600
	厚度 3.5～5.0 mm	＞6 500	＞5 000
	厚度 6.0～30.0 mm	＞5 000	＞4 500
	横向，厚度 0.5～0.9 mm	4 500＞5 400	3 500～5 700
	厚度 1.0～3.0 mm	4 500～6 500	3 500～5 600
	厚度 3.5～5.0 mm	＞4 000	＞3 000
	厚度 6～30.0 mm	＞3 000	＞3 000
3	胶合系数(g/cm)	160～570	160～600
4	吸水率(%)在 20 ℃±1 ℃水中浸 24 h		
	厚度 0.5～0.9 mm	62～65	50～65

续表

序号	性能名称	一号	二号
	厚度 1.0～3.5 mm	48～60	43～65
	厚度 3.6～12.0 mm	＜50	32～60
	厚度 12.1～30.0 mm	＜40	＜60
5	氯化锌含量(%)	0.13～0.15	0.15～0.20
6	灰分(%)	0.4～1.5	0.72～2.5
7	水分(%)	6～10	6～10
8	体积电阻率(Ω·cm)(20 ℃±5 ℃)	$>10^8$	—
9	击穿强度(kV/mm)		
	厚度 0.5～0.9 mm	7.0～10	4.5～14
	厚度 1.0～2.0 mm	5.0～10	3.5～10
	厚度 2.1～12.0 mm	3.5～11	2.0～8

二、钢纸管

钢纸管由氯化锌处理的无胶棉纤维纸经卷绕后用水漂洗而制成。有良好的机械加工性，在 100 ℃下长期工作，其外形及理化性能没有明显变化，吸油性小，灭弧性好，适于作熔断器、避雷器等的管芯和电机用线路套管，它的性能见表 19-10。

表 19-10　钢纸管的性能

序　号	性　能　名　称	数　　值
1	紧度(g/cm^3)	1.3～1.4
2	轴向断面抗张强度(N/cm^2)	3 000～5 700
3	吸水率①(%) 壁厚 2.5～3.5 mm 壁厚 3.6～5.0 mm 壁厚 5.1～10.0 mm	 5～50 17～45 11～40
4	氯化锌含量(%)	0.1～0.15
5	灰分(%)	0.6～1.5
6	水分(%)	6～10
7	壁厚击穿强度(kV/mm) 壁厚 2.5～3.0 mm 壁厚 3.1～5.0 mm 壁厚 5.1～10.0 mm 壁厚 10.1～15 mm	 ＞3.0 ＞2.5 ＞2.0 ＞1.0
8	轴向击穿强度 kV/20 mm	＞25

注：① 在 10 ℃～30 ℃水中浸 24 h。

三、玻璃钢复合钢纸管

玻璃钢复合钢纸管又叫高压消弧管，是用浸有环氧树脂或聚酯树脂的无捻玻璃纤维用湿法缠绕在钢纸管上而制成。它具有很好的灭弧能力和良好的电气性能，机械强度较高，可承受 1 000～2 000 个大气压，耐热、耐潮、耐寒、耐日光照射，可用作 10～110 kV 熔断器和避雷器的消弧管，其性能见表 19－11。

表 19－11　玻璃钢复合钢纸管的性能

序　号	性　能　名　称	数　值
1	相对密度	1.6～1.7
2	吸水率(%)	0.7～0.8
3	马丁氏耐热性(℃)	＞70
4	抗弯强度①(N/cm^2)	16 000～18 500
5	抗压强度(N/cm^2)	9 000～10 000
6	抗剪强度(N/cm^2)	＞800
7	表面电阻率(Ω)	10^{12}～10^{13}
8	体积电阻率(Ω·cm)	10^{12}～10^{13}
9	介质损耗角正切值	＜0.05
10	垂直壁层耐电压(kV)(常态，5 min) 壁厚 2.0 mm 壁厚 2.5 mm 壁厚 3.0 mm 壁厚 4.0 mm 壁厚 5.0 mm 壁厚 6.0 mm 壁厚 7.0 mm	 ＞14 ＞16 ＞18 ＞20 ＞24 ＞28 ＞32
11	表面耐电压②(kV)	＞12

注：① 包括内管和外管；

② 受潮后，电极距离为 30 mm。

第二十章　绝缘纤维制品

电工产品中经常采用纱、带、绳、管等作绝缘材料。制造这类纺织品常用的纤维有棉纤维、无碱玻璃纤维和合成纤维。棉纤维制品易吸潮，耐热性差，使用时通常需经一定的浸渍处理，以提高电气、抗老化和耐潮性能及导热能力。无碱玻璃纤维具有耐热及耐腐蚀性好、吸湿性小、抗张强度高等优点，但较脆、密度大、伸长率小、对皮肤有刺激，易吸附水分、柔软性差等缺点。用合成纤维制成的制品兼有棉及玻璃纤维的优点。

一、棉织品

单股棉纱用于纱包线及电线电缆的绝缘和护层，合股棉纱用于电线电缆的编织护层。

棉布带由棉纱以平纹或斜纹编织而成，未浸漆的斜纹布带和细布带用于线圈整形或浸胶过程中的临时包扎。

棉纤维由于耐热性差、易吸潮，同时为了节约用棉，已逐渐被玻璃纤维和合成纤维制品所代替。

棉布带的技术条件见表 20－1。

表 20－1　棉布带的技术参数

名称	标称宽度(mm)(公差)	额定厚度(mm)	密度(根数)		抗张力(N)	断裂伸长率(%)不小于
			经(带宽度内)	纬(每厘米内)		
斜纹布带	10、12(±0.5)	0.45±0.02	26～32	16	140～170	9
	15(±1.0)	0.45±0.02	40	16	210	9
	20、25、30(±1.5)	0.45±0.02	52～78	16	260～370	9
	35、40、50(±2.0)	0.45±0.02	92～130	43～58	430～580	9
平纹白布带	10、12(±0.5)	0.25±0.02	28～34	19	90～110	8
	15(±1.0)	0.25±0.02	42	19	130	8
	20、25、30(±1.5)	0.25±0.02	54～78	19	160～210	8
	35、40、50(±2.0)	0.25±0.02	90～132	19	2 320～3 220	9
平纹细布带	12(±0.5)	0.22±0.02	40	23	120	5
	16(±1.0)	0.22±0.02	52	23	160	5
	20、25、30(±1.5)	0.22±0.02	64～90	23	190～270	5
	25(±2.0)	0.22±0.02	106	23	310	5

续表

名称	标称宽度(mm)(公差)	额定厚度(mm)	密度(根数)		抗张力(N)	断裂伸长率(%)不小于
			经(带宽度内)	纬(每厘米内)		
平纹薄布带	12(±0.5)	0.18±0.02	44	30	80	5
	16(±1.0)	0.18±0.02	60	30	110	5
	20(±1.5)	0.18±0.02	70	30	130	5

二、玻璃纤维制品

无碱玻璃丝电气性能好，用于玻璃丝包线和安装的绝缘；中碱玻璃丝用于X光电缆和电线电缆的编织护层。

玻璃丝带由玻璃丝编织而成，有预浸漆和不浸漆两种，用于绕包绝缘。

玻璃丝套管系用无碱玻璃丝编织，经高温脱蜡定纹，并浸渍有机硅氧烷而成。它的弹性好、剪口不散，在－60 ℃～＋150 ℃范围内不硬化，可用作绝缘护套，其规格有：

内径：1 mm，1.5 mm，2 mm，2.5 mm　壁厚：0.25 mm

3 mm，3.5 mm，4 mm，5 mm　0.30 mm

6 mm，7 mm，8 mm，9 mm　0.40 mm

玻璃丝及玻璃带的技术条件分别见表20－2及表20－3。

表20－2　玻璃丝的技术条件

分类	牌号	单纤维公称直径(μm)	股数	公制支数(公制号数)①	支数不均率(%)不大于	抗张力(N)不小于	捻度(捻/m)	捻向②
无碱玻璃纤维	无碱纱 4－600/2	4	2	300±30(3.3±0.3)	7	1.5	120±15	S
	无碱纱 4－360/2	4	2	180±20(5.6±0.6)	7	2.5	150±15	S
	无碱纱 5－250/2	5	2	125±10(8.0±0.8)	7	4	120±15	S
	无碱纱 6－160/2	6	2	80±8(12.5±1.3)	7	5	120±15	S
	无碱纱 6－80/2	6	2	40±4(25.0±2.5)	7	10	110±15	S
	无碱纱 6－80/4	6	4	20±2(50.0±5.0)	7	20	110±15	S
	无碱纱 6－80/8	6	8	10±1(100±10)	7	35	110±15	S
	无碱纱 8－40/2	8	2	20±2(50.0±5.0)	7	16	110±15	S
	无碱纱 6－80/1	6	1	80±8(12.5±1.3)	7	4.5	55±10	Z

续表

分类	牌　　号	单纤维公称直径(μm)	股数	公制支数(公制号数)①	支数不均率(%)不大于	抗张力(N)不小于	捻度(捻/m)	捻向②
中碱玻璃纤维	中碱纱 6-75/2	6		37.5±3.8 (26.7±2.7)	7	8	50～120	S
	中碱纱 6-75/4	6		18.8±1.9 (53.3±5.3)	7	15	50～120	S
	中碱纱 8-45/1	8		45±5 (22.2±2.2)	7	5	50～120	Z
	中碱纱 8-45/2	8		22.5±2.2 (44.4±4.4)	7	10	50～120	S
	中碱纱 8-45/3	8		15±2 (66.7±6.7)	7	15	50～120	S
	中碱纱 8-45/4	8		11.3±1.1 (88.9±8.9)	7	20	50～120	S
	中碱纱 8-45/10	8		4.5±0.5 (222±22)	7	50	50～120	S

注：① 1 000 m 玻璃纤维纱的质量的克数称为公制号数。② S 表示右捻，Z 表示左捻。

表 20-3　玻璃带的技术条件

序号	牌　　号	厚度(mm)	原纱支数/股数(公制号数)		单纤维公称直径(μm)	密度(根/cm)		抗张力(N)(10×100 mm²)不小于
			经纱	纬纱		经纱	纬纱	
1	无碱带-60	0.060±0.005	160/2 (12.5)	160/2 (12.5)	6	27±2	22±2	130
2	无碱带-80	0.080±0.010	80/2 (25.0)	160/2 (12.0)	6	27±2	22±2	200
3	无碱带-100	0.100±0.010	80/2 (25.0)	80/2 (25.0)	6	27±2	14±1	200
4	无碱带-170	0.170±0.015	80/4 (50.0)	80/4 (25.0)	6	27±2	15±1	300
5	无碱带-200	0.200±0.020	80/6 (75.0)	80/2 (50.0)	6	20±1	15±1	400
6	无碱带 Q-170	0.170±0.015	40/2 (50.0)	80/2 (25.0)	8(经) 6(纬)	27±2	15±1	300
7	无碱带 Q-200	0.200±0.020	40/3 (75.0)	40/2 (50.0)	8(经) 8(纬)	27±1	15±1	350
8	无碱带 Q-270	0.270±0.030	80/12 (50.0)	80/4 (50.0)	6(经) 6(纬)	17±1	15±1	500

三、合成纤维制品

1. 合成纤维丝

(1) 聚酰胺 6(又称尼龙 6,或称锦纶) 它的抗张强度高,弹性好,耐磨、耐腐蚀、耐霉,防虫蛀,着色性好;但耐光、耐热性较差,易变形。它主要用于安装电线的绕包及编织绝缘,其技术条件见表 20-4。

(2) 聚酯(又称涤纶)纤维丝 它的耐光性和耐热性比聚酰胺好,且耐霉、耐腐蚀(不耐浓碱)、不怕虫蛀,但抗张强度比聚酰胺稍低,密度较大,用于电线电缆绝缘,其技术条件见表 20-5。

表 20-4 锦纶丝的技术条件

序号	性能名称		No. 200(12 孔)	No. 64(39 孔)
1	公制支数		195～205	62～66
2	支数偏差率(%)	不大于	±3	±3
3	断裂长度(km)	不低于	45	50
4	伸长率(%)		22～28	19～25
5	伸长不均率(%)	不大于	8.5	10
6	捻度(捻/m)		200±2	200±2

表 20-5 涤纶丝的技术条件

序号	性能名称		No. 64	No. 73	No. 120
1	支数		64	73	120
2	支数偏差率(%)	不大于	±3	±2	±5
3	扯断力(N/袋)	不小于	0.065	0.50	0.585
4	伸长率(%)	不大于	10	14	8

2. 合成纤维带、合成纤维绳

(1) 合成纤维带 有聚酯纤维和聚酯纤维(经向)与玻璃纤维(纬向)交织带两种。这两种带的耐热性比棉布带高,延伸率比玻璃布带大,用作电机线圈的绑扎。聚酯纤维与玻璃纤维交织带的厚度为 0.15 mm,宽度为 25 mm,抗张力为 34 N,延伸率为 3.5%。

(2) 合成纤维绳 即涤纶护套玻璃丝绳,简称涤玻绳。它的耐热性好,强度大,可用作 B 级绝缘电机线圈端部绑扎,简化工艺,提高可靠性。涤玻绳的规格和性能见表 20-6。

表 20-6　涤玻绳的规格和性能

外套直径 (mm)	面　层		芯　线		每米质量 (g/m)	断裂强度 (N)(绳芯)	伸长率 (%)
	涤纶纱规格	锭×根	无蜡纱规格支×根	根			
10	20 支	40×8	10×50	4	25.8	2 120～3 000	35～41
12	20 支	52×10	10×50	8	41.3	2 800～3 980	40～45
16	20 支	52×15	10×50	8	56.6	2 400～4 000	37～60
22	20 支	52×20	10×50	8	164.7	18 300～24 000	37～43

第二十一章　绝缘浸渍材料

绝缘浸渍材料是以合成树脂(或天然树脂)为基础,能在一定的条件下固化成绝缘膜或绝缘整体的流体绝缘材料。合成树脂具有优良的电气性能、机械性能和耐热性能,原料丰富,制造方便。目前用合成树脂制造的绝缘浸渍材料有绝缘漆、绝缘胶和熔敷绝缘粉等。

第一节　绝　缘　漆

绝缘漆主要是以合成树脂(或天然树脂)为漆基与溶剂、稀释剂、填料、颜料等辅助材料混合而成。绝缘漆按用途可分为浸渍漆、漆包线漆、覆盖漆、硅钢片漆和防电晕漆等几类。

一、浸渍漆

浸渍漆分为有溶剂漆和无溶剂漆两大类,主要用于浸渍电机、电器的线圈和绝缘零件,以填充其间隙和微孔,固化后能在其表面形成连续平整的漆膜,并使线圈结成一个整体,提高绝缘结构的耐潮、导热、击穿强度和机械强度等性能。浸渍漆的基本特点是:黏度低,固体含量高,便于浸透;固化快,干燥性好,黏结力强,有热弹性,固化后能承受电机运转时的离心力;具有较高电气性能,较好耐潮性、耐热性、耐油性和化学稳定性,对导体和其他材料的相容性好。

1. 有溶剂浸渍漆

它具有渗透性好、储存期长、使用方便等特点,但浸渍和烘焙时间长,固化慢,溶剂挥发会造成浪费与污染。它的品种很多,以醇酸类漆和环氧类漆应用最为广泛,常用的品种、组成、特性和用途及其性能分别见表 21-1、表 21-2。

表 21-1　常用有溶剂浸渍漆的品种、组成、特性和用途

名称	型号	主要组成	耐热等级	特性和用途
沥青漆	1010 L30-10	石油沥青、干性植物油、松脂酸盐,溶剂为二甲苯和 200 号溶剂汽油	A	耐潮性好。供浸渍不要求耐油的电机线圈
油改性醇酸漆	1030	亚麻油、桐油、松香改性醇酸树脂,溶剂为 200 号溶剂汽油	B	耐油性和弹性好。供浸渍在油中工作的线圈和绝缘零部件

续表

名称	型号	主要组成	耐热等级	特性和用途
丁基酚醛醇酸漆	1031	蓖麻油改性醇酸树脂、丁醇改性酚醛树脂，溶剂为二甲苯和200号溶剂汽油	B	耐潮性、内干性较好，机械强度较高。供浸渍线圈，可用于湿热地区
三聚氰胺醇酸漆	1032 A30-1	油改性醇酸树脂、丁醇改性三聚氰胺树脂，溶剂为二甲苯和200号溶剂汽油	B	耐潮性、耐油性、内干性较好，机械强度较高，且耐电弧。供浸渍在湿热地区使用的线圈
醇酸玻璃丝包线漆	1230 C34-1	干性植物油改性醇酸树脂	B	耐油性和弹性好，黏结力较强。供浸涂玻璃丝包线
环氧酯漆	1033 H30-2	干性植物油酸、环氧树脂、丁醇改性三聚氰胺树脂，溶剂为二甲苯和丁醇	B	耐潮性、内干性好，机械强度高，黏结力强。可供浸渍用于湿热地区的线圈
环氧醇酸漆	H30-6 8340	酸性醇酸树脂与环氧树脂共聚物、三聚氰胺树脂	B	耐热性、耐潮性较好，机械强度高，黏结力强。可供浸渍用于湿热地区的线圈
聚酯浸渍漆	155 Z30-2	干性植物油改性对苯二甲酸聚酯树脂，溶剂为二甲苯和丁醇	F	耐热性、电气性能较好，黏结力强。供浸渍F级电机、电器线圈
有机硅浸渍漆	1053 W30-1	有机硅树脂，溶剂为二甲苯	H	耐热性和电气性能好，但烘干温度较高。供浸渍H级电机电器线圈和绝缘零部件
低温干燥有机硅漆	9111	有机硅树脂，固化剂，溶剂为甲苯	H	耐热性较1053稍差，但烘干温度低，干燥快。用途同1053
聚酯改性有机硅漆	931 W30-P	聚酯改性有机硅树脂，溶剂为二甲苯	H	黏结力较强，耐潮性和电气性能好，烘干温度较1053低，若加入固化剂可在150 ℃固化。用途同1053
有机硅玻璃丝包线漆	1152	有机硅树脂，溶剂为甲苯或二甲苯	H	漆膜柔软，机械强度高。供浸涂H级玻璃丝包线
聚酰胺酰亚胺浸渍漆	PAI-2	聚酰胺酰亚胺树脂，溶剂为二甲基乙酰胺，稀释剂为二甲苯	H	耐热性优于有机硅漆，电气性能优良，黏结力强，耐辐照性好。供浸渍耐高温或在特殊条件下工作的电机、电器线圈

表 21-2 常用有溶剂浸渍漆的性能

序号	性能名称	沥青漆 1010	油改性醇酸漆 1030	丁基酚醛醇酸漆 1031	三聚氰胺醇酸漆 1032	醇酸玻璃丝包线漆 C34-1	环氧酯漆 1033	环氧醇酸漆 H30-6	聚酯浸渍漆 155	有机硅浸渍漆 1053	低温干燥有机硅漆 9111	聚酯改性有机硅漆 931	有机硅玻璃丝包线漆 1152	聚酰胺酰亚胺浸渍漆 PAI-2
1	黏度(s)(4 号黏度计)20 ℃±1 ℃	30～50	30～60	30～70	30～60	250～310	30～70	20～35	30～60	30～65	20～65	25～70	30～80	50～90
2	固体含量(%)不少于	42	47	47	47	45	47	45	45	50	50	50	55	30
3	渗透性(渗透云母带纸层数)(层)不少于	30	—	30	—	—	30	—	—	—	—	—	—	—
4	干燥时间(h)	5～6 (105 ℃)	1.5～2 (105 ℃)	<2 (120 ℃)	1.5～2 (105 ℃)	<2 (150 ℃)	1～2 (120 ℃)	<1.5 (105 ℃)	1～3 (130 ℃)	1.5～2 (200 ℃)	1/4～1 (105 ℃)	0.5～1 (180 ℃)	1.5～2 (200 ℃)	<1/6 (180 ℃)
5	厚层干透性(h)													
	于温度 120 ℃±2 ℃时,不多于	—	—	16	—	—	16	—	16	—	—	—	—	—
6	酸值(mgKOH/g)	—	6～12	<10	5～10	<12	3～6	<8	5～10	—	—	—	—	—
7	吸水率(%)	0.4～1	—	—	1～2	—	1～1.5	1～1.5	—	—	—	—	—	—
8	耐热性(h),不少于	7 (150 ℃)	48 (150 ℃)	30 (150 ℃)	30 (150 ℃)	30 (150 ℃)	50 (150 ℃)	60 (150 ℃)	50 (180 ℃)	200 (200 ℃)	150 (200 ℃)	75 (200 ℃)	200 (200 ℃)	200 (200 ℃)
9	耐油性(h)													

续表

序号	性能名称	沥青漆 1010	油改性醇酸漆 1030	丁基酚醛醇酸漆 1031	三聚氰胺醇酸漆 1032	醇酸玻璃丝包线漆 C34-1	环氧酯漆 1033	环氧醇酸漆 H30-6	聚酯浸渍漆 155	有机硅浸渍漆 1053	低温干燥有机硅漆 9111	聚酯改性有机硅漆 931	有机硅玻璃丝包线漆 1152	聚酰胺酰亚胺浸渍漆 PAI-2
	于温度 105 ℃±2 ℃变压器油中，不少于	—	24	24	24	—	24	24	24	—	—	—	—	—
10	击穿强度 (kV/mm)													
	常态	55～90	70～90	>70	70～95	>45	70～95	60～95	65～100	65～100	50～100	90～110	65～90	90～110
	热态	25～50 (90 ℃)	—	—	—	—	—	—	35～75 (155 ℃)	30～45 (200 ℃)	25～35 (180 ℃)	30～50 (200 ℃)	30～55 (200 ℃)	80～90 (180 ℃)
	受潮后	—	—	—	—	—	—	—	50～80	40～90	25～95	70～90	40～85	70～90
	浸水后	22～35	30～55	>40	40～55	—	40～60	30～55	—	—	—	—	—	—
11	体积电阻率 (Ω·cm)													
	常态	—	—	$>10^{14}$		—	10^{14}～10^{16}	—	10^{14}～10^{15}	10^{14}～10^{15}	10^{13}～10^{15}	10^{14}～10^{15}	10^{13}～10^{14}	10^{14}～10^{15}
	热态①	—	—	$>10^{11}$ (130 ℃)		—	10^{12}～10^{13} (130 ℃)	—	10^{10}～10^{13}	10^{11}～10^{14}	10^{11}～10^{13}	10^{11}～10^{12}	10^{11}～10^{13}	10^{13}～10^{14}
	受潮后	—	—	—		—	—	—	10^{12}～10^{15}	10^{12}～10^{14}	10^{11}～10^{14}	10^{12}～10^{14}	10^{12}～10^{14}	—
	浸水后			$>10^{12}$			10^{13}～10^{14}	—	—	—	—	—	—	10^{13}～10^{14}

注：① 测试温度除注明外，与击穿强度的测试温度同。

有溶剂浸渍漆一般采用多次浸渍、烘焙和逐步升温的工艺，以避免由于溶剂挥发过快而形成漆膜针孔或气泡，影响产品性能和寿命；烘焙温度与漆的工作温度相同，或高出 20 ℃左右；若用真空压力浸渍，可缩短烘焙时间和提高绝缘结构性能。

溶剂的选择，主要是综合考虑其溶解能力、挥发速度、毒性大小及对导线和其他材料的相容性。溶剂漆常用的溶剂的品种、物理常数和用途见表 21－3。稀释剂的溶解能力较差，常与溶剂混合使用，以降低成本和减小挥发物的毒性。

表 21－3　常用溶剂的物理常数及用途

名称	分子量	沸点(℃)	闪点(闭口法)(℃)	适用范围
溶剂汽油 煤　油 松节油	— — 136	120～200 160～285 150～170	33 71～73 30	油性漆、沥青漆、醇酸漆等
苯 甲　苯 二甲苯	78.05 92.13 106.08	80.1 110.6 135～145	－11 4 29.5	沥青漆、聚酯漆、聚氨酯漆、醇酸漆、环氧树脂漆和有机硅漆等
丙　酮 环己酮	58.05 98	56.2 156.7	9 47	环氧树脂漆、醇酸漆等
乙　醇	46.07	78.3	14	酚醛漆、环氧树脂漆等
丁　醇	74.12	117.8	35	聚酯漆、聚氨酯漆、环氧树脂漆、有机硅漆等
甲　酚	108	190～210	—	聚酯漆、聚氨酯漆等
糠　醛	96.08	161.8	60(开口法)	聚乙烯醇缩醛漆
乙二醇乙醚 二甲基甲酰胺 二甲基乙酰胺	90.12 73 87	135.1 154～156 164～167	40 — —	聚酰亚胺漆

2. 无溶剂浸渍漆

无溶剂浸渍漆是由合成树脂、固化剂和活性稀释剂等组成的，其特点是固化快，黏度随温度变化大，流动性和浸透性好，绝缘整体性好，固化过程挥发物少，应用它可提高绝缘结构的导热性能和耐潮性能，降低材料消耗，改善劳动条件，缩短生产周期。常用的无溶剂浸渍漆主要有环氧型、聚酯型或环氧聚酯型。与聚酯型相比，环氧型黏结力好、收缩率小，漆膜的电气机械性能、耐潮性和耐霉性均较好，但漆的贮存稳定性和漆膜韧性不及聚酯型；环氧聚酯型漆的性能则介于两者之间。常用的无溶剂浸渍漆的品种、组成、用途及其性能分别见表 21－4、表 21－5。

表 21－4　常用无溶剂浸渍漆的品种、组成、特性和用途

名　称	主要组成	耐热等级	特性和用途
环氧无溶剂漆 110	6101 环氧树脂、桐油酸酐、松节油酸酐、苯乙烯	B	黏度低，击穿强度高，贮存稳定性好。可用于沉浸小型低压电机、电器线圈
环氧无溶剂漆 672－1	672 环氧树脂、桐油酸酐、苄基二甲胺	B	挥发物少，固化快，体积电阻高。适用于滴浸小型电机、电器线圈
环氧无溶剂漆 9102	618 或 6101 环氧树脂、桐油酸酐、70 酸酐、903 或 901 固化剂、环氧丙烷丁基醚	B	挥发物少，固化较快。可用于滴浸小型低压电机、电器线圈
环氧无溶剂漆 111	6101 环氧树脂、桐油酸酐、松节油酸酐、苯乙烯、二甲基咪唑乙酸盐	B	黏度低，固化快，击穿强度高。可用于滴浸小型低压电机、电器线圈
环氧无溶剂漆 H30－5	苯基苯酚环氧树脂、桐油酸酐、二甲基咪唑	B	特性用途与 111 相同
环氧无溶剂漆 594 型	618 环氧树脂、594 固化剂、环氧丙烷丁基醚	B	黏度低，体积电阻高，贮存稳定性好。可用于整浸中型高压电机、电器线圈
环氧无溶剂漆 9101	618 环氧树脂、901 固化剂、环氧丙烷丁基醚	B	黏度低，固化较快，体积电阻高，贮存稳定性好。可用于整浸中型高压电机、电器线圈
环氧聚酯无溶剂漆 1034	618 环氧树脂、甲基丙烯酸聚酯、不饱和聚酯、正钛酸丁酯、过氧化二苯甲酰、萘酸钴、苯乙烯	B	挥发物较少，固化快，耐霉性较差。用于滴浸小型低压电机、电器线圈
聚丁二烯环氧聚酯无溶剂漆	聚丁二烯环氧树脂、甲基丙烯酸聚酯、不饱和聚酯、邻苯二甲酸二丙烯酯、过氧化二苯甲酰、萘酸钴、对苯二酚	B	黏度较低，挥发物较少，固化较快，贮存稳定性好，耐热性较 1034 高。用于沉浸小型低压电机、电器线圈
环氧聚酯酚醛无溶剂漆 5152－2	6101 环氧树脂、丁醇改性甲酚甲醛树脂、不饱和聚酯、桐油酸酐、过氧化二苯甲酰、苯乙烯、对苯二酚	B	黏度低，击穿强度高，贮存稳定性好。用于沉浸小型低压电机、电器线圈
环氧聚酯无溶剂漆 EIU	不饱和聚酯亚胺树脂、618 和 6101 环氧酯、桐油酸酐、过氧化二苯甲酰、苯乙烯、对苯二酚	F	黏度低，挥发物较少，击穿强度高，贮存稳定性好。用于沉浸小型 F 级电机、电器线圈
不饱和聚酯无溶剂漆 319－2	二甲苯树脂、改性间苯二甲酸不饱和聚酯、苯乙烯、过氧化二异丙苯	F	黏度较低，电气性能较好，贮存稳定性好。可用于沉浸小型 F 级电机、电器线圈

表 21－5　常用无溶剂浸渍漆的性能

性能名称	环氧无溶剂漆							环氧聚酯无溶剂漆 1034	聚丁二烯环氧聚酯无溶剂漆	环氧聚酯酚醛无溶剂漆 5152－2	环氧聚酯无溶剂漆 EIU	不饱和聚酯无溶剂漆 319－2
	110	672－1	9102	111	H30－5	594 型	9101					
黏度(s)(4 号黏度计)	30～70 (20 ℃)	150 (25 ℃)	110～240 (20 ℃)	30～60 (20 ℃)	85～100 (25 ℃)	19～25 (60 ℃)	40～65 (20 ℃)	120～240 (20 ℃)	50～70 (25 ℃)	15～30 (25 ℃)	20～50 (25 ℃)	30～60 (25 ℃)
胶化时间(min)	—	3～4② (130 ℃)	14～17③ (130 ℃)	8～12 (120 ℃)	15～20 (130 ℃)	5～10② (200 ℃)	30～60④ (140 ℃)	6～12⑤ (120 ℃)	10～20 (140 ℃)	—	—	180③ (155 ℃)
贮存稳定性(月)	4					12	6	24	6	3	3	6
(h)		30	24	30	72							
击穿强度⑤(kV/mm)												
常态	70～85	18～25	—	70～90	80～95	＞40	20～30	20～35	25～35	70～95	70～120	20～30
热态	—	—	—	—	—	—	—	15～25 (120 ℃)	—	—	＞30 (155 ℃)	—
浸水后	40～60	—	—	40～80	40～70	—	20～30	18～25	20～30	45～75	40～90	—
体积电阻率⑥(Ω·cm)												
常态	10^{14}～10^{15}	＞10^{16}	10^{13}～10^{15}	10^{14}～10^{15}	＞10^{14}	＞10^{16}	10^{16}～10^{17}	10^{13}～10^{14}	10^{14}～10^{15}	10^{15}～10^{16}	＞10^{15}	

续表

性能名称	环氧无溶剂漆							环氧聚酯无溶剂漆 1034	聚丁二烯环氧聚酯无溶剂漆	环氧聚酯酚醛无溶剂漆 5152-2	环氧聚酯无溶剂漆 EIU	不饱和聚酯无溶剂漆 319-2
	110	672-1	9102	111	H30-5	594 型	9101					
热态	—	$>10^{11}$ (130 ℃)	$10^{11}\sim10^{12}$ (120 ℃)	—	—	$10^{12}\sim10^{13}$ (130 ℃)	$10^{13}\sim10^{15}$ (130 ℃)	$10^{13}\sim10^{14}$ $10^{10}\sim10^{11}$ (120 ℃)	$10^{10}\sim10^{11}$ (120 ℃)	—	$10^{10}\sim10^{11}$ (155 ℃)	$10^{10}\sim10^{11}$ (155 ℃)
浸水后	$10^{12}\sim10^{15}$	$10^{14}\sim10^{15}$	—	$10^{12}\sim10^{14}$	$>10^{13}$	—	$>10^{15}$	$10^{12}\sim10^{13}$	$10^{11}\sim10^{12}$	$10^{12}\sim10^{14}$	$10^{14}\sim10^{15}$	$10^{14}\sim10^{15}$
介质损耗角正切⑥ 50 Hz												
常态	—	—	—	—	—	0.025～0.01	0.027～0.02	—	—	—	0.03	—
热态	—	—	—	—	—	0.015～0.03	0.01～0.05	—	—	—	—	—

注：① 1 号粘度计；
② 圆孔法；
③ 铝盒法；
④ 试管法；
⑤ 热板法；
⑥ 电气性能测试试样，110、111、5152-2、H30-5 与 EIU 等为漆膜，余为漆饼。

无溶剂浸渍漆可采用沉浸、整浸和滴浸等方法浸渍。不同的浸渍工艺，对无溶剂漆的特性要求有不同的侧重点。沉浸法要求漆的贮存期长、固化快，以减少漆在滴干和烘焙过程中的流失量。整浸法是以电机绕组嵌好线后整台定子进行真空压力浸渍和旋转烘焙、固化，减少了绕组在嵌线时受损，多用于中型高压电机整体浸渍，绝缘整体性好，可提高绝缘结构的导热、耐潮和电气性能。整浸法要求漆的贮存期长、挥发物少、电气性能好，尤其是介质损耗角正切值要小。滴浸法适用于批量生产的微型和小型电机绕组浸渍，浸渍处理的周期短，漆的流失量小，填充能力强，绝缘整体性好，设备紧凑灵活，适宜组织自动化生产。滴浸法要求漆固化快，挥发物少。为满足这三种工艺要求，可采用潜伏性固化剂，不仅可获得较快的固化速度，而且能有较长的贮存期。

活性稀释剂是指黏度低且分子中含有活性基因的化合物，常用的有苯乙烯、单环氧化合物和低黏度多环氧化合物等。其中以低黏度多环氧化合物的稀释能力强，挥发性小，使用较广。常用的环氧活性稀释剂的品种、特性见表 21－6。

表 21－6　常用环氧活性稀释剂

名　　称	型号	环氧值(当量/100 g)	特　　性
环氧丙烷苯基醚	690	≥0.5	耐热性尚可，但易引起过敏
环氧丙烷丁基醚	501	0.5～0.65	黏度低，弹性好
环氧丙烷糠基醚	502	0.45～0.55	机械强度高
环氧丙烷异辛基醚	503	0.3～0.4	耐水性、耐腐蚀性好
乙二醇双缩水甘油醚	6508	>0.7	黏度低，挥发性小，柔韧性好
二缩水甘油醚	600	1.15～1.3	耐热性尚可
一缩乙二醇双缩水甘油醚	6509	>0.6	黏度低，挥发性小，柔韧性好
二氧化二戊烯	269	0.9～1	沸点高，黏度低，耐热性好

二、漆包线漆

漆包线漆主要用于导线的涂覆绝缘制成漆包线，用作电机、电器绕组的电磁线。漆包线漆具有良好的涂覆性，漆膜附着力强，柔软而富有耐挠曲性，并有一定的耐磨性和弹性，漆膜表面光滑，有足够的电气性能、耐热性和耐溶剂性，对导体无腐蚀作用。常用的漆包线漆有油性漆、缩醛漆、聚氨酯漆、聚酯漆、环氧漆、聚酯亚胺漆、聚酰胺酰亚胺漆、聚酰亚胺漆和特种漆包线漆等，其品种、特性和用途见表 21－7。

表 21-7　漆包线漆的品种、组成、特性和用途

名　称	主要组成	耐热等级	特性和用途
油性漆	甲酚或二甲酚珐玘树脂、干性植物油、松脂酸盐	A	高频下介质损耗小，耐潮性好，涂线工艺性好，耐溶剂性、耐刮性和耐热性差。适于涂制潮湿环境使用的中、高频电器，仪表或通信仪器等用漆包线
缩醛漆	聚乙烯醇缩甲（乙）醛树脂、甲酚甲醛树脂、三聚氰胺树脂、甲酚封闭二异氰酸酯	E	漆膜耐刮性、耐热冲击性、耐水解性以及耐油性好，可涂制高强度漆包线
耐致冷剂漆	聚乙烯醇缩甲（乙）醛树脂、甲酚甲醛树脂、三聚氰胺树脂、甲酚封闭二异氰酸酯	A	耐致冷剂。适于涂制封闭式冷冻机的电机的漆包线
自黏性漆	漆包线内层为聚酯树脂、缩醛树脂或环氧树脂等，外层为聚乙烯醇缩丁醛树脂	E-B	适于涂制中小型电机、电器、仪表等用漆包线及无支撑线圈用漆包线。此类漆包线嵌线后经热烘即能黏合成一整体，不需浸漆
聚氨酯漆	聚氨基甲酸酯树脂、聚酯树脂、二异氰酸酯	E	高频下介质损耗小，着色性好，有直焊性（漆包线焊接前不需清除漆膜），耐过负载性差。适于涂制要求Q值稳定的中高频小型线圈和电视、仪表用漆包线
无磁性漆	同聚氨酯漆	E	铁含量极低，磁场对它的感应极微。适于涂制精密仪表和精密电器用漆包线
自黏直焊漆	同聚氨酯漆	E	有直焊性，此类漆包线嵌线后经热烘即能黏合成一整体，不需浸漆，但耐过负载性能差。适于涂制微型电机、仪表、无线电元件、无支撑线圈用漆包线
环氧漆	环氧树脂、脲醛树脂	E	漆膜耐酸、耐碱、耐腐蚀、耐油、耐潮、耐水解性好，但弹性、耐刮性以及对含氯绝缘油相容性差。适于涂制油浸变压器、化工电器、潮湿环境工作的电机用漆包线

续表

名　称	主要组成	耐热等级	特性和用途
聚酯漆	对苯二甲酸多元醇聚酯树脂	B	漆膜耐热、耐刮、耐溶剂性较好，耐电压和耐软化击穿性好，但耐碱、耐热冲击性和耐水解性较差，与含氯高聚物如聚氯乙烯、氯丁橡胶等不相容。适于涂制中小型电机、电器、仪表、干式变压器等用漆包线
水溶性聚酯电泳漆	含亲水基团的聚酯树脂，用水作溶剂	B	可一次涂成所需厚度漆膜，性能、用途与聚酯漆相同，可涂制异形线材
水散体聚酯漆	同上	B	同上
聚酯亚胺漆	聚酯亚胺树脂	F	耐热冲击性优于聚酯漆，其他性能与聚酯漆相同。适于涂制F级电机、制冷装置电机、干式变压器、电器、仪表用漆包线
水乳性聚酯亚胺电泳漆	含亲水基团的聚酯亚胺树脂	F	工艺性与水溶性聚酯漆相同，特性、用途与聚酯亚胺漆相同
聚酰胺酰亚胺漆	聚酰胺酰亚胺树脂	H-C	耐热性、耐热冲击性、耐电压和耐软化击穿性好，耐刮和耐化学药品腐蚀性好。与含氯高聚物不相容。适于涂制高温、重负荷电机，密封式电机，制冷设备电机，干式变压器和电器、仪表用漆包线
聚酰亚胺漆	聚酰亚胺树脂	H-C	耐热性、耐热冲击性、耐软化击穿性好，能承受短期过载负荷，耐辐照、耐溶剂及耐化学药品腐蚀性好，但耐碱性差，在含水的密闭系统中容易水解，漆膜受卷挠应力易产生裂纹。适于涂制耐高温电机、干式变压器、密封式继电器及电子元件用漆包线

三、覆盖漆

覆盖漆分为瓷漆和清漆两种。含有填料和颜料的称瓷漆，不含填料和颜料的称清漆。它用于涂覆经浸漆处理的线圈和绝缘零部件，在其表面形成漆膜，作为绝缘保护层，以防止机械损伤和受大气、润滑油、化学药品等的侵蚀，提高表面放电电压。覆盖漆具有干燥快、附着力强、漆膜坚硬、机械强度高以及耐潮、耐油、耐腐蚀等特性。覆盖漆按树脂分类分为醇酸漆、环氧漆和有机硅漆。与醇酸漆相

比，环氧漆具有更好的耐潮性、耐霉性、内干性和附着力强以及漆膜硬度高等优点，广泛用于湿热带地区电机、电器零部件的表面覆盖。有机硅漆耐热性高，可用作H级绝缘电机、电器的覆盖漆。同一树脂的瓷漆比清漆的漆膜硬度大，导热、耐热和耐电弧性好，但其他性能稍差。瓷漆多用于线圈和金属表面涂覆；清漆多用于绝缘零部件表面和电器内表面的涂覆。覆盖漆的干燥方式有晾干和烘干两种。同一树脂的晾干漆较烘干漆的性能差，贮存不稳定，但适用作大型电气设备或不宜烘焙的部件的覆盖漆。

覆盖漆的品种、组成、用途与性能分别见表21-8和表21-9。

表21-8　常用覆盖漆的品种、组成、特性和用途

名　称	型号	主要组成	耐热等级	特性和用途
晾干醇酸漆	1231 C31-1	干性植物油或脂肪酸改性邻苯二甲酸季戊四醇酸树脂、干燥剂	B	晾干或低温干燥，漆膜的弹性、电气性能、耐气候性和耐油性较好。用于覆盖电器或绝缘零部件
晾干醇酸灰瓷漆	1321 C32-9	油改性醇酸树脂、干燥剂、颜料	B	晾干或低温干燥，漆膜硬度较高，耐电弧性和耐油性好。用于覆盖电机、电器线圈及绝缘零部件表面修饰
醇酸灰瓷漆	1320 C32-8	油改性醇酸树脂、颜料	B	烘焙干燥，漆膜坚硬，机械强度高，耐电弧性和耐油性好。用于覆盖电机、电器线圈
晾干环氧酯漆	9120 H31-3	干性植物油酸与环氧酯化物、干燥剂	B	晾干或低温干燥，干燥快，漆膜附着力好，耐潮、耐油和耐气候性好，有弹性。用于覆盖电器或绝缘零部件，可用于湿热地区
环氧酯灰瓷漆	163 H31-4	环氧树脂酯化物、氨基树脂、防霉剂	B	烘焙干燥，漆膜硬度大，耐潮、耐霉、耐油性好。用于覆盖电机、电器线圈，可用于湿热地区
晾干环氧酯灰瓷漆	164 H31-2	环氧树脂酯化物、颜料、干燥剂、防霉剂	B	晾干或低温干燥，漆膜坚硬，耐潮、耐霉、耐油性好，用于覆盖电机、电器线圈及绝缘零部件表面修饰，可用于湿热地区
环氧聚酯铁红瓷漆	6341 H31-7	环氧树脂、酚醛树脂、己二酸聚酯树脂	B	烘焙干燥，漆膜附着力强，耐潮、耐霉、耐油性好，用于覆盖电机、电器线圈，可用于湿热地区

续表

名　称	型号	主要组成	耐热等级	特性和用途
晾干有机硅红瓷漆	167	有机硅树脂、醇酸树脂、颜料	H	晾干或低温干燥，漆膜耐热性高，电气性能好。用于覆盖耐高温电机、电器线圈或绝缘零部件表面修饰
有机硅红瓷漆	1350 W32－3	有机硅树脂、颜料	H	烘焙干燥，漆膜耐热性、电气性能比167好，且硬度大，耐油。用途同晾干有机硅红瓷漆

表21－9　常用覆盖漆的性能

序号	性能名称	晾干醇酸漆1231	晾干醇酸灰瓷漆1321	醇酸灰瓷漆1320	晾干环氧酯漆9120	环氧酯灰瓷漆163	晾干环氧酯灰瓷漆164	晾干有机硅红瓷漆167	有机硅红瓷漆W32－3
1	黏度(4号黏度计)(s)　20℃±1℃	47～80	90～150	90～110	50～70	60～240	120～420	＞40	40～80
2	固体含量(%)不少于	47	—	—	45	55	45	55	60
3	酸值　(mgKOH/g)	10～18	—	—	9～15	—	—	—	—
4	硬度(摆式硬度计)	—	0.15～0.35	0.35～0.65	—	—	—	—	—
5	细度(刮板细度计)(μm)不少于	—	30	30	—	30	30	—	30
6	干燥时间　(h)	10～20 (20℃)	20～24 (20℃)	2～3 (105℃)	＜24(25℃)	＜2(120℃)	＜24(25℃)	＜24(20℃)	＜2(120℃)
7	吸水率　(%)	—	5～8	4～5	—	3～5	＜5	—	—
8	耐热性(h)(150℃±2℃)	＞6	1～5	＞10	＞6	10～20	1～5	＞80	＞80
9	耐油性　(h) 于温度105℃±2℃变压器油中，不少于	24	24	24	24	24	—	—	24
10	耐电弧　(s)	—	4～8	4～8	—	—	—	—	—
11	击穿强度　(kV/mm)								
	常态	70～95	30～40	30～60	30～60	35～45	＞30	＞30	＞40
	热态	45～60 (130℃)	—	—	—	—	—	—	＞16(180℃)
	受潮后	—	—	—	—	—	—	10	—
	浸水后	30～60	8～20	10～30	8～20	10～20	＞10	—	＞16
12	表面电阻率　(Ω)								
	常态	—	$>10^{13}$	$>10^{13}$	—	$>10^{13}$	$>10^{11}$	$>10^{12}$	$>10^{13}$
	热态	—	—	—	—	—	—	—	$>10^{10}$(180℃)
	受潮后	—	—	—	—	—	—	$>10^{10}$	—
	浸水后	—	$>10^{10}$	$>10^{10}$	—	$>10^{11}$	$>10^{9}$	—	$>10^{11}$

四、硅钢片漆

硅钢片漆用于涂覆硅钢片表面，以降低电机、电器等铁心的涡流损耗，增强防

锈和耐腐蚀等能力，涂覆漆后需经高温短时烘干。覆盖漆的特点是：涂层薄、附着力强，漆膜坚硬、光滑、厚度均匀，并有良好的耐油性、耐潮性和电气性能。常用硅钢片漆的品种、组成、用途与性能分别见表 21－10、表 21－11。

表 21－10　常用硅钢片漆的品种、组成、特性和用途

名称	型号	主要组成	耐热等级	特性和用途
油性漆	1611	干性植物油、松脂酸盐	A	在高温(400～500 ℃)下干燥快，漆膜厚度均匀、坚硬、耐油。供涂覆一般用途小型电机、电器用硅钢片
醇酸漆	9161 5364	油改性醇酸树脂、丁醇改性三聚氰胺树脂	B	在 300～350 ℃下干燥快，漆膜有较好的耐热性和耐电弧性。供涂覆一般电机、电器用硅钢片，但不宜涂覆磷酸盐处理硅钢片
环氧酚醛漆	H52－1 E－9 114	环氧树脂、酚醛树脂	F	附着力强，在 200～350 ℃下干燥快，漆膜有较好的耐热性、耐潮性、耐腐蚀性和电气性能。供涂覆大型电机、电器用硅钢片，且适宜涂覆磷酸处理硅钢片和其他硅钢片
有机硅漆	947S W35－1	有机硅树脂	H	漆膜耐热性和电气性能优良。供涂覆高温电机、电器用硅钢片，但不宜涂覆磷酸盐处理硅钢片
聚酰胺酰亚胺漆	PAI－Q	聚酰胺酰亚胺树脂	H	漆的涂覆工艺性和干燥性好，漆膜附着力强、耐热性高、耐溶剂性优越。供涂覆高温电机、电器用各种硅钢片

表 21－11　常用硅钢片漆的性能

序号	性能名称	油性漆 1611	醇酸漆 9161	环氧酚醛漆 H52－1	有机硅漆 947S	聚酰胺酰亚胺漆 PAI－Q
1	黏度(4 号黏度计)(s)25 ℃	70～95 (20 ℃)	50～80	50～80	40～70	30～50
2	固体含量(%)	57	48	35	65	22
3	干燥时间 (min)	11～12 210±2(℃)	2～12 160±2(℃)	15～40 180±2(℃)	～15 200±2(℃)	～10 150±2(℃)
4	耐油性 (h) (浸油温度)	24 105±2(℃)	—	24 155+2(℃)	—	—

续表

序号	性能名称	油性漆 1611	醇酸漆 9161	环氧酚醛漆 H52-1	有机硅漆 947S	聚酰胺酰亚胺漆 PAI-Q
5	耐热性 (h)	—	—	50 (180 ℃)	—	200(200 ℃)
6	击穿强度 (kV/mm) 常态 热态	— —	— —	50～90 —	60～100 25(200 ℃)	80～110 —
7	体积电阻率(Ω·cm) 常态 热态	10^{13}～10^{15}	10^{13}～10^{15}	10^{14}～10^{15} 10^{11}～10^{12} (155 ℃)	10^{14}～10^{15} 10^{12}～10^{13} (200 ℃)	10^{14}～10^{15} —

五、防电晕漆

防电晕漆一般由绝缘清漆和金属导体粉末(如炭黑、石墨、碳化硅等)混合而成,有时还加有填料,它主要作高压线圈防电晕的涂层用。它的电阻率稳定,附着力和耐磨性好,干燥速度快,贮存稳定性好。防电晕漆分为低电阻漆和高电阻漆两类。低电阻防电晕漆用于大型高压电机槽部;高电阻防电晕漆用于大型高压电机线圈的端部。防电晕漆可单独涂在线圈表面,也可涂在石棉带、玻璃布带上,再包扎在线圈外层或涂在玻璃布带上与主绝缘一起成型。

防电晕漆的品种、组成和性能分别见表 21-12、表 21-13。

表 21-12 防电晕漆的品种、组成与特性

名称	型号	主要组成	耐热等级	特性
醇酸防电晕漆	1233 1234	油改性醇酸树脂漆、乙炔黑、立德粉、干燥剂	B	漆膜较坚硬、耐油,可于室温干燥
环氧防电晕漆	1235	环氧树脂漆、炭黑、石墨。使用时加入 651 聚酰胺树脂	B	漆膜附着力强、坚硬,可于室温固化

表 21-13 防电晕漆的性能

性能名称	醇酸防电晕漆		环氧防电晕漆 1235
	1233	1234	
细度(μm)(刮板细度计)不大于	50	50	50
干燥时间(h)20 ℃	6～8	6～8	—
表面电阻率①(Ω)	10^{3}～10^{5}	10^{10}～10^{12}	10^{3}～10^{4}

注:① 表面电阻率允许根据使用要求确定。

第二节　绝　缘　胶

绝缘胶与无溶剂漆相似，一般加有填料，广泛应用于浇注 20 kV 及以下电流互感器、10 kV及以下电压互感器、某些干式变压器、船用变压器、电缆终端和连接盒、密封电子元件和零部件等。它的特点是适形性和整体性好，可提高产品耐潮、导热和电气性能；浇注的工艺装备简单，易于实现自动化生产。绝缘胶可分为电器浇注胶和电缆浇注胶。

一、电器浇注胶

1. 浇注胶用树脂

它所用树脂要求具有黏度小、流动性好、收缩率小、挥发物少、固化快、低压成型性好，并有足够的电气、机械性能和化学稳定性等特性。环氧树脂基本上符合要求，所以环氧浇注胶的应用最为广泛。浇注胶用环氧树脂的理化常数见表 21-14。

表 21-14　浇注胶用环氧树脂的理化性能和特性

环氧树脂型号	环氧值（当量/100 g）（盐酸吡啶法）	挥发物（%）不大于（110 ℃3 h）	熔点（℃）	软化点（℃）（水银法）	有机氯值（当量/100 g）	无机氯值（当量/100 g）	特　性
E-51（618）	0.48～0.54	2	—	—	0.02	0.005	为双酚 A 型环氧树脂，黏度低，黏合力强，使用方便
E-44（6101）	0.41～0.47	1	—	12～20	0.02	0.005	为双酚 A 型环氧树脂，黏度比 618 稍高，其他性能相仿
E-42（634）	0.38～0.45	1	—	21～27	0.02	0.005	为双酚 A 型环氧树脂，黏度比 6101 稍高，收缩率较小，为常用浇注树脂
E-35（637）	0.3～0.4	1	—	20～35	0.02	0.005	为双酚 A 型环氧树脂，黏度比 634 稍高

续表

环氧树脂型号	环氧值(当量/100 g)(盐酸吡啶法)	挥发物(%)不大于(110 ℃3 h)	熔点(℃)	软化点(℃)(水银法)	有机氯值(当量/100 g)	无机氯值(当量/100 g)	特　性
E-37(638)	0.23～0.38	1	—	40～55	0.02	0.005	为双酚A型环氧树脂，黏度比637稍高，但收缩率小
R-122(6207)	—	—	185	—	—	—	为脂环族环氧树脂，耐热性高，固化物热变形温度300 ℃。用适当固化剂配合时黏度低
H-75(6201)	0.61～0.64	—	—	—	—	—	为脂环族环氧树脂，黏度低，工艺性好，可室温固化，热膨胀系数小，耐沸水
W-95(300，400)	1～1.03	—	55	—	—	—	为脂环族环氧树脂，固化物机械强度比双酚A型环氧树脂高50%，延伸性好，耐热性高
V-17(2000)	0.16～0.19	—	—	—	—	—	为环氧化聚丁二烯树脂，耐热性好
A-95(695)	0.9～0.95	—	95～115	—	—	—	为脂环族环氧树脂，固化物交联密度高，马丁耐热达200 ℃，耐电弧性优异

2. 环氧树脂用固化剂

一般要求固化剂的固化温度低、固化物有良好的韧性、耐热性和足够的电气性能、机械性能以及毒性小、操作方便等。常用的固化剂有酸酐类和胺类。其中酸酐类固化剂，特别是液体酸酐性能好、使用方便，应用较广；胺类固化剂毒性大、固化物易开裂，应用较少；硼胺络合物是广泛应用的一种潜伏性固化剂，可延长胶的使用期。常用的酸酐类固化剂和胺类固化剂的理化性能与特性分别见表21-15、表21-16。

表 21－15　常用酸酐类固化剂性能与特征

名称	型号或代号	外观	分子量	熔点(℃)	用量(%)	固化条件		特性
						温度(℃)	时间(h)	
邻苯二甲酸酐	PA	白色或红色粉末	148	128～131	30～45	120 130 150	20～30 2 10	固化物电气性能好，固化时放出热量小，但易升华，固化时间长。可用于大型浇注
顺丁烯二酸酐	MA	白色结晶	98.06	52.8	30～40	100 150	2 24	易升华，刺激性大，固化物电气性能好，但机械性能差
均苯四甲酸二酐	PMDA	白色粉末	218	286	13～21	120 220	3 2	固化物热变形温度高，但固化工艺较复杂，成本高
内次甲基四氢邻苯二甲酸酐	NA	白色结晶	164.6	164～167	60～80	100 260	1 20	固化物耐热性好，但需高温固化，使用困难
四氢化苯二甲酸酐异构体混合物	70	低黏度液体	152	−3～−5	150～100	180	2	使用方便，固化物耐热性好
桐油酸酐	TOA	低黏度液体	—	—	100～200	100 80	5 20	使用方便，成本低，固化物弹性好，但不耐冷冻
环戊二烯顺酐加成物	647	白色或浅黄色固体	137～147	34	60～80	100 150	8 3	使用时需进行预聚合，否则气味大。固化物弹性好

表 21－16　常用胺类固化剂理化性能和特性

名称	型号或代号	外观	分子量	沸点(℃)	熔点(℃)	胺值	用量(%)	固化条件		特性
								温度(℃)	时间(h)	
乙二胺	—	无色液体	60.1	116	8.5	—	6～8	25 80	24 3	室温固化快，但毒性大，固化物性能较差

续表

名　称	型号或代号	外观	分子量	沸点（℃）	熔点（℃）	胺值	用量（%）	固化条件		特　性
								温度（℃）	时间（h）	
间苯二胺	MPD	固体	108.1	284～289	61～63	—	14～16	150	4	固化物耐热性和电气性能好
聚酰胺树脂	H－4650	棕色液体	—	—	—	200±20	30～100	20 140	24 4	无毒，可在室温固化，固化时发热量小，固化物热冲击性好
聚酰胺树脂	651	浅黄色或棕色液体	—	—	—	400±20	30～50	20 140	24 4	无毒，可在室温固化，固化时发热量小，固化物热冲击性好
硼胺络合物	594 595 901	棕色液体	—	240～250	—	200～350	10～25	150	5	是潜伏性固化剂。配胶后胶的贮存期长，固化物耐热性好

3. 常用添加剂

包括常用增塑剂和填充剂等。适量的增塑剂可降低脆性，提高抗弯和冲击强度。常用的增塑剂有聚酯树脂，一般用量为15%～20%。胶中加入填充剂可减少固化物的收缩率，提高导热系数、注形稳定性、耐湿性、耐腐蚀性和机械强度，降低成本。石英粉是较理想的填充剂。

4. 电器浇注胶的配制

浇注胶的配方和固化工艺应根据产品结构、外形尺寸、技术条件和使用环境等而定。浇注一般户内或工作温度不高的电器，可用双酚A型环氧树脂或聚酯树脂；对户外或高温下工作的电器，可用脂环族环氧树脂或用几种环氧树脂混合配胶，并采用酸酐或芳香族胺固化剂固化。

5. 浇注的工艺要求

配制浇注胶时应充分搅拌均匀，尽量消除气泡；固化成型采用分阶段升温，减少胶的流失量，并防止因固化不均产生应力开裂；浇注前模具要预热，浇注后要注意排气并补满胶料；固化和脱模时间应按浇注物的大小和形状复杂程度不同分别规定；脱模后要保温，使之缓缓冷却。

二、电缆浇注胶

常用的电缆浇注胶有松香酯型、沥青型和环氧树脂型三类，其组成、性能和用途见表21－17。

表 21－17　电缆浇注胶的组成、性能和用途

名称(型号)	主要成分	软化点(环球法)(℃)	收缩率(150 ℃→20 ℃)(%)	击穿电压(kV/2.5 mm)	特性和用途
黄电缆胶(1810)	松香或松香甘油酯、机油	40～50	≤8	>45	电气性能较好，抗冻裂性好。适于浇注 10 kV 以上电缆连接盒和终端
黑电缆胶(1811 或 1812)	石油沥青或石油沥青、机油	65～75 或 85～95	≤9	>35	耐潮性较好。适于浇注 10 kV 以下电缆连接盒和终端
环氧电缆胶	环氧树脂、石英粉、聚酰胺树脂	—	—	>82	密封性好，电气、机械性能高。适于浇注户内 10 kV 以下电缆终端。用它浇注的终端结构简单，体积较小

第三节　熔敷绝缘粉

熔敷绝缘粉是由合成树脂、固化剂、填料、增塑剂、颜料等制成的一种粉末状绝缘材料。其特点是：在高于树脂熔点的温度下，它能均匀地涂覆在工件表面，经烘焙后形成厚度均匀、平整光滑、黏结紧密的绝缘涂层。这种涂层导热性好，具有耐潮、耐腐蚀等特性，并可进行切削加工；熔敷工艺简便，效率高，易于实现机械化生产；适用作低压电机的槽绝缘，绕组线圈端部绝缘以及零部件的密封和防腐涂覆材料；由于绝缘层的厚度薄、导热性好、机械强度高，可以提高电机的槽满率、降低电机温升。

熔敷绝缘粉所用树脂主要是环氧树脂和聚酯树脂，常用的品种、组成、特性和用途及其性能分别见表 21－18、表 21－19。

表 21－18　熔敷绝缘粉的品种、组成、特性和用途

名　称	型　号	主　要　组　成	耐热等级	特　性　和　用　途
高温环氧粉末	CZ1530 171	601、604 环氧树脂、聚乙烯醇缩丁醛树脂、石英粉、气相二氧化硅、双氰胺	B	涂层坚硬、光亮，耐潮和耐腐蚀。用于不需弯曲的工件绝缘，中小型电机槽绝缘以及电器零部件表面密封、防腐涂覆

续表

名　称	型　号	主　要　组　成	耐热等级	特　性　和　用　途
高温弹性环氧粉末	CZ1531－1	604环氧树脂、聚乙烯醇缩丁醛树脂、双氰胺	B	涂层柔软性较好。用于需要挠曲的工件绝缘或电机转子铜排绝缘
	CZ1531－2	604环氧树脂、聚乙烯醇缩丁醛树脂、癸二酸二酰肼	B	涂层柔软性较好。用于需要挠曲的工件绝缘或电机转子铜排绝缘。但固化较快
低温环氧粉末	CZ1532 173	601、604环氧树脂、聚乙烯醇缩丁醛树脂、石英粉、二氨基二苯甲烷	B	涂层坚硬，固化温度较低。适用于小型变压器、电阻、电容、线圈等电子元件绝缘涂覆
聚酯粉末	174	对苯二甲酸多元醇聚酯树脂、石英粉、气相二氧化硅	F	涂层薄，弹性好，耐热性较高。适用于微电机槽绝缘或其他绝缘涂覆
聚酯改性弹性环氧粉末	176	604环氧树脂、己二酸聚酯树脂、聚乙烯醇缩丁醛树脂、石英粉、气相二氧化硅、双氰胺	B	涂层弹性好，无冷脆性。用于电机转子铜排或线圈的绝缘涂覆

表21－19　常用熔敷绝缘粉的性能

序号	性　能　名　称	CZ1530	CZ1531－1	CZ1531－2	CZ1532	174	176
1	颜色	白	淡黄	淡黄	白	白	白
2	细度(%)　大于80目 小于200目	1～5 5～30	95①	95①	1～5 15～30	>50② 15	>50② 15
3	胶化时间(min) 180 ℃	4～10	2～10	1～6	3～12 (130 ℃)	1.5～2.5 (260 ℃)	3.5～7
4	水平流动性(mm)(180 ℃，10 min)(流动距离)	18.5～21 (5 min)	16.5～19	16.5～19	19～23 (130 ℃)	1.5～2.5 (260 ℃)	3.5～7
5	边角覆盖率　(%)	42～55	—	—	42	42	42
6	抗冲击强度 ($N \cdot cm/cm^2$)	>450	>500	>500	>450	>450	>500
7	耐弯曲性　(角度)	—	115 (20 ℃)	115 (13 ℃)	—	—	—

续表

序号	性　能　名　称	CZ1530	CZ1531－1	CZ1531－2	CZ1532	174	176
8	击穿强度(kV/mm) 常态 浸水 24 h 后 于 10%盐水中	— — 20～30	30～45 25～40 —	30～45 25～40 20～35	— — —	40 35 —	45 35 —
9	体积电阻率(Ω·cm) 常态 浸水 24 h 后	10^{13}～10^{14} 10^{12}～10^{14}	10^{13}～10^{15} 10^{12}～10^{14}	10^{13}～10^{15} 10^{12}～10^{14}	10^{13}～10^{14} 10^{12}～10^{14}	$>10^{13}$ $>10^{12}$	$>10^{13}$ $>10^{12}$
10	表面电阻率(Ω)　常态 浸水 24 h 后	$>10^{13}$ 10^{12}～10^{13}	— —	— —	$>10^{13}$ 10^{12}～10^{13}	$>10^{13}$ $>10^{12}$	$>10^{13}$ $>10^{12}$
11	贮存稳定性(月)25 ℃～30 ℃	12	12	—	6	12	12

注:① 通过 80 孔(孔径 0.197 mm);
② 70～120 目。

第二十二章　浸渍纤维制品

第一节　漆　　布

漆布是以不同的底材浸以相应的绝缘漆，经烘干后制成的。常用的漆布按底材的材质的不同分为漆布、漆绸、玻璃布、漆布箔、玻璃坯布等。漆布的主要性能如表 22－1，其名称、型号、特点与用途如表 22－2。

表 22－1　漆布的电气、机械性能

名　称	标称厚度(mm)	抗　张　力(N)				击穿电压(kV)			体积电阻率(Ω·cm)		
		径向	沿径向45°角	常态	常态弯折后	热态	受潮后	标定延伸率时①	常态	热态	受潮后
油性漆布(2010)	0.15	80～120	45～60	6.0～8.0	3.6～5.0	4.1～7.0	3.6～8.0	>4.2	10^{10}～10^{14}	10^{10}～10^{12}(105℃)	10^{10}～10^{13}
	0.17	100～170	50～90	6.8～8.0	4.2～4.5	5.0～7.6	4.1～7.0	>4.8			
	0.20	100～170	50～90	7.5～8.5	4.6～5.6	5.5～9.0	4.6～8.0	>5.3			
	0.24	100～170	50～90	8.8～10.0	5.3～7.0	6.5～10.0	5.4～7	>6.2			
油性漆布(2012)	0.17	100～170	50～90	>7.7	3.4～4	5.0～7.0	4.7～8.0	>5.4	10^{13}～10^{14}	10^{10}～10^{12}(105℃)	10^{10}～10^{13}
	0.20	100～170	50～90	>8.6	3.6～5	5.9～8.0	5.4～8.0	>6.0			
	0.24	100～170	50～90	>9.8	4.0～7	6.8～9.0	6.0～8.0	>6.9			
油性漆绸(2210)	0.04	30～40	17～40	1.0～2.5	—	—	—	—	10^{13}～10^{14}	10^{10}～10^{12}(105℃)	10^{10}～10^{13}
	0.05	30～40	17～40	1.7～3.5	—	—	—	—			
	0.06	30～40	17～40	3.3～5.0	—	—	—	—			
	0.08	45～90	25～50	4.8～5.5	3.0～5.0	3.0～4.0	2.3～4.0	—			
	0.10	45～90	25～50	5.8～7.0	4.4～6.0	4.3～6.0	3.5～4.2	>4.1			
	0.12	55～100	30～80	7.2～8.0	6.3～7.5	5.2～7.0	4.1～4.5	>5.0			
	0.15	55～100	30～80	8.7～9.5	6.9～8.0	5.8～9.0	4.7～7.0	>6.1			
油性漆绸(2212)	0.08	45～90	25～50	>5	3.2～5.0	3.3～5.0	3.2～4.0	—	10^{13}～10^{14}	10^{10}～10^{12}(105℃)	10^{10}～10^{13}
	0.10	45～90	25～50	>6.6	5.2～6.5	4.8～6.0	4.2～5.5	>4.6			
	0.12	55～100	30～80	>9.1	6.9～8.0	5.5～7.0	4.7～8.0	>6.4			
	0.15	>55	>30	>9.5	>7.7	>7.4	>5.5	>6.6			
油性玻璃漆布(2412)	0.11	100～220	50～120	4.4～6.0	2.4～3.5	2.2～5.0	2.2～3.0	>2.6	10^{12}～10^{14}	10^{9}～10^{11}(105℃)	10^{10}～10^{12}
	0.13	100～220	50～120	5.0～7.5	3.0～4.6	2.8～6.0	2.9～5.0	>3.0			
	0.15	150～320	80～140	5.7～9.0	3.4～6.0	3.2～8.0	3.4～6.0	>3.4			
	0.17	150～320	80～140	6.8～9.0	4.0～6.0	3.8～8.4	3.9～8.0	>4.1			
	0.20	220～350	110～180	7.7～12.0	4.4～9.0	4.2～12.0	4.4～9.0	>4.6			
	0.24	220～350	110～180	>8.6	>4.8	>4.6	>5.1	>5.2			
沥青醇酸玻璃漆布(2430)	0.11	100～220	50～120	5.3～8.0	2.9～4.0	2.9～6.0	2.6～4.0	>3.7	10^{12}～10^{14}	10^{9}～10^{13}(130℃)	10^{10}～10^{12}
	0.13	100～220	60～120	6.1～9.0	3.5～4.5	3.6～7.0	3.4～4.0	>4.3			
	0.15	150～320	80～140	6.6～9.0	4.2～5.5	4.1～7.5	3.8～4.5	>4.6			
	0.17	180～320	90～140	8.0～10.0	5.0～9.0	4.8～8.0	>4.6	>5.6			
	0.20	220～350	110～180	9.0～12.0	7.0～10.0	5.3～8.2	>5.0	>6.9			
	0.24	250～350	130～180	>11.0	>8.8	>6.2	>6.0	>7.7			

续表

名　称	标称厚度(mm)	抗　张　力(N)				击穿电压(kV)			体积电阻率(Ω·cm)		
		径向	沿径向45°角	常态	常态弯折后	热态	受潮后	标定延伸率时①	常态	热态	受潮后
醇酸玻璃漆布(2432)	0.11	100～220	50～120	5.3～9.0	2.9～4.0	2.4～6.0	2.4～5.0	>3.7	10^{12}～10^{14}	10^{9}～10^{10}	10^{10}～10^{11}
	0.13	100～220	60～120	6.1～9.0	3.5～4.5	3.0～6.0	3.1～6.0	>4.3			
	0.15	150～320	80～140	6.6～10.0	4.2～5.0	3.4～6.0	3.5～7.0	>4.6			
	0.17	180～320	90～140	8.0～10.0	5.0～6.0	4.0～6.0	4.2～7.0	>5.6			
	0.20	220～350	110～180	9.0～12.0	7.0～8.0	4.4～6.0	4.6～7.0	>6.9			
	0.24	250～350	130～180	>11.0	>8.8	>5.2	>5.5	>7.7			
醇酸薄玻璃漆布	0.04	>30	—	>3	—	—	—	—	10^{12}～10^{14}	—	—
	0.06	>45	—	>2	—	—	—	—			
	0.08	45～100	—	3.5～6.8	>2.8	—	—	—			
环氧玻璃漆布2433	0.13	80～230	>40	5.5～7.7	3.2～4.0	3.5～4.0	>3.2	—	$>10^{12}$～10^{14}	10^{10}～10^{12}(130 ℃)	10^{10}～10^{14}
	0.15	>120	>60	>6.0	>3.8	>4.0	>3.6	—			
	0.17	>120	>60	>7.8	>4.2	>4.5	>4.2	—			
有机硅玻璃漆布(2450)	0.06	60～92	—	2.9～5.0	—	0.9～1.5	1.0～1.4		10^{14}～10^{16}	10^{11}～10^{12}(180 ℃)	10^{13}～10^{14}
	0.08	60～97	—	3.6～5.2	—	1.5～3.5	2.0～4.0				
	0.11	100～230	—	4.7～8.0	1.8～7.0	2.7～5.0	3.2～6.0	>1.8			
	0.13	100～230	—	5.3～9.0	2.4～8.0	3.2～5.5	3.7～6.0	>2.2			
	0.15	150～270	—	5.8～10.0	3.0～9.0	3.8～6.0	4.2～7.0	>2.6			
	0.17	150～270	—	6.6～10.0	3.5～10.0	4.3～9.0	4.8～7.0	>3.0			
	0.20	220～310	—	7.4～12.0	4.0～10.0	4.7～10.0	5.3～9.0	>3.4			
	0.24	220～310	—	>8.0	>4.4	>5.3	>5.8	>3.8			
硅橡胶玻璃漆布(2550)	0.10	80～90	—	1.5～2.4	>1.0	1.0>1.3②	0.8～1.3	—	10^{12}～10^{14}	—	10^{10}～10^{12}
	0.23	160～250	—	2.0～4.0	>1.4	1.4～4.6	1.8～2.4	—			
聚酰亚胺玻璃漆布(2560)	0.10	>100	—	>2.5	>2.0	>1.5	>1.5	—	10^{14}～10^{15}	10^{12}～10^{14}	10^{13}～10^{14}
	0.15	>120	—	>5.5	>3.8	>3.5	>5.0	—			
	0.17	>160～400	—	6.5～7.0	4.5～6.0	4.0～6.0	5.0～6.0	—			
	0.20	>180	—	>7.0	>6.0	>4.5	>5.0	—			

注：① 各种漆布的标定延伸率(沿径向45°±1°角)如下：油性漆布6%；油性漆绸20%；醇酸玻璃漆布和沥青醇酸玻璃漆布15%；油性玻璃漆布和有机硅玻璃漆布10%。

② 180 ℃±2 ℃处理18 h后。

表22-2　漆布的品种、组成和用途

名　称	型号	组　成		耐热等级	特　性　和　用　途
		底材	绝缘漆		
油性漆布(黄漆布)	2010 2012	白细布	油性漆	A	2010柔软性好，但不耐油。可用于一般电机、电器的衬垫或线圈绝缘。2012耐油性好，可用于有变压器油或汽油气侵蚀的环境中工作的电机、电器的衬垫或线圈绝缘

续表

名　称	型号	组　成		耐热等级	特性和用途
		底材	绝缘漆		
油性漆绸(黄漆绸)	2210 2212	薄绸	油性漆	A	具有较好的电气性能和良好的柔软性。2210适用于电机、电器薄层衬垫或线圈绝缘;2212耐油性好,适用于有变压器油或汽油气侵蚀的环境中工作的电机、电器的薄层衬垫或线圈绝缘
油性玻璃漆布(黄玻璃漆布)	2412	无碱玻璃布	油性漆	E	耐热性较2010、2012漆布好。适用于一般电机、电器的衬垫和线圈绝缘,以及在油中工作的变压器、电器的线圈绝缘
沥青醇酸玻璃漆布	2430	无碱玻璃布	沥青醇酸漆	B	耐潮性较好,但耐苯和耐变压器油性差。适用于一般电机、电器的衬垫和线圈绝缘
醇酸玻璃漆布	2432	无碱玻璃布	醇酸三聚氰胺漆	B	耐油性较好,并具有一定的防霉性。可用作油浸变压器、油断路器等线圈绝缘
醇酸玻璃-聚酯交织漆布	2432-1	玻璃纤维聚酯纤维交织布			
醇酸薄玻璃漆布	—	无碱玻璃布	醇酸三聚氰胺漆	B	具有良好的弹性和韧性,较高的机械性能、电气性能和耐热性,并具有一定的防霉性和耐油性。可代替漆绸作电器线圈绝缘
醇酸薄玻璃-聚酯交织漆布	—	玻璃纤维聚酯纤维交织布			
环氧玻璃漆布	2433	无碱玻璃布	环氧酯漆	B	具有良好的耐化学药品腐蚀性,良好的耐湿热性和较高的机械性能和电气性能。适用于化工电机、电器槽绝缘、衬垫和线圈绝缘
环氧玻璃-聚酯交织漆布	2433-1	玻璃纤维聚酯纤维交织布			
有机硅玻璃漆布	2450	无碱玻璃布	有机硅漆	H	具有较高的耐热性,良好的柔软性,耐霉、耐油和耐寒性好。适用于H级电机、电器的衬垫和线圈绝缘
有机硅薄玻璃漆布	—	无碱玻璃布	有机硅漆	H	具有较高的耐热性,良好的柔软性、耐霉、耐油和耐寒性好。适用于H级特种电器线圈绝缘

续表

名　称	型号	组　成		耐热等级	特性和用途
		底材	绝缘漆		
硅橡胶玻璃漆布	2550	无碱玻璃布	甲基硅橡胶瓷漆	H	具有较高的耐热性，良好的柔软性和耐寒性。适用于特种用途的低压电机端部绝缘和导线绝缘
聚酰亚胺玻璃漆布	2560	无碱玻璃布	聚酰亚胺漆	C	具有很高的耐热性，良好的电气性能，耐溶剂和耐辐照性好，但较脆。适用于工作温度高于 200 ℃ 的电机槽绝缘和端部衬垫绝缘，以及电器线圈和衬垫绝缘
有机硅防电晕玻璃漆布	2650	无碱玻璃布	有机硅防电晕瓷漆	H	具有稳定的低电阻率，耐热性好。适于作高压电机定子线圈防电晕材料

名　称	型号	耐热等级	特性与用途
油性聚酯无纺漆布	2310	A	具有一定的介电性能和力学性能，用于电机、电器的包扎绝缘或衬垫绝缘
沥青醇酸玻璃漆布	2430	B	具有一定的电气绝缘性能和力学性能，适用于电机的包扎绝缘和衬垫绝缘
醇酸玻璃漆布	2432	B	具有一定的介电性能和力学性能，适用于作电机、电器的包扎绝缘或衬垫绝缘，并可在变压器油中使用
环氧醇酸玻璃漆布箔	234	B	具有一定的力学和电气性能，可代替薄型 3240 板，适于作电机、电器的匝间绝缘、衬垫绝缘或绝缘结构零部件
浸渍聚酯纤维非织布	H270	B	质地柔软，包扎服帖，无接头。用于电机、电器中要求较高介电性能的薄层包扎绝缘或衬垫绝缘
固化环氧酚醛上胶玻璃布	9240	B	此漆布是由无碱玻璃布浸以环氧酚醛树脂，经烘焙固化而成，具有一定介电性能，主要用于电机硅钢片间绝缘
聚酯玻璃漆布	2440	F	较高的电气、力学性能，适于作电机、电器的包扎绝缘或衬垫绝缘
间苯二酚环氧浸玻璃坯布	9241	F	具有较高绝缘性能和力学性能，主要用于 300 MW、600 MW 汽轮发电机转子槽衬绝缘

续表

名　称	型号	耐热等级	特性与用途
高强度环氧玻璃坯布	B243	F	适用于工作温度 155 ℃同步电机绕组匝间绝缘
二苯醚衍生物玻璃坯布	2452	H	高的力学、电气性能，适用于作 H 级绝缘
二苯醚上胶玻璃布	H251	H	用作 H 级电机绕组绝缘，匝间绝缘，并可用于卷制层压管和压制其他绝缘件
改性二苯醚玻璃漆布		H	卷制工艺性好，固化温度低，适于作 H 级电机、电器的槽衬，套筒绝缘
改性二苯醚浸胶玻璃布	9242	H	该布是由电工用特种玻璃布浸以改性二苯醚树脂，经烘焙而成。具有卷制工艺性好、固化温度低、节能等特点，用于 H 级变压器套筒绝缘，主绝缘和盖板等
有机硅玻璃漆布	2450	H	软型，具有高的电学和力学以及耐热性能，适于作 H 级电机电器的包扎绝缘
有机硅玻璃漆布	2451	H	硬型，具有高的电气、机械耐热性能，适于作电机、电器的衬垫绝缘
聚酰亚胺玻璃漆布	9250	H	适于作 H 级电机槽绝缘和端部衬垫绝缘，可在 200 ℃下长期使用，在 300 ℃下短期使用。具有优良的介电性能、力学性能，良好的耐潮性、耐辐射性和耐溶剂性
聚胺—酰亚胺玻璃上漆布	D291 H260	H	优异的耐热性、机电性能，适于作电机绕组绝缘、层压管、层压板和其他压制件的坯布

漆布在使用过程中要注意下列几个问题：

(1) 经纬线垂直编织的漆布在使用时可按平行于经纬线或与经线成 45°(±2°)角切成带子。平行剪切的延伸率较小，适宜包绕截面相同、形状规则的线棒、绕组等斜切的延伸率较大，包扎时应紧贴被包物，减少形成褶皱和气囊，但不要用力过大，以免损伤漆布的漆膜。

(2) 玻璃漆布一般应按 45°(±2°)角斜切，以增加延伸率。使用玻璃漆布时严禁 180°折叠，对已包绕好的绝缘件不能敲击，否则会造成机械损伤。

(3) 用漆布组成的绝缘结构，一般要进行浸渍处理。但要注意漆布与所用浸渍漆的相容性。浸渍漆选择不当，在浸渍处理过程中，会发生漆布表面漆膜膨胀或脱落现象。常用浸渍漆漆布的相容性详见表 22－3。

表 22－3　常用浸渍漆与漆布的相容性

浸渍漆 / 漆布	油性漆-石油溶剂	醇酸漆-苯类溶剂	醇酸酚醛漆-苯醇溶剂	醇酸三聚氰胺漆-苯石油溶剂	环氧树脂漆-苯醇溶剂	聚酯漆苯类溶剂	有机硅漆苯类溶剂	二苯醚漆-酮类溶剂	聚酰亚胺漆-强极性溶剂
油性漆布	优	良	良	良	良	0	0	0	0
沥青醇酸玻璃漆布	良	良	良	良	可	可	0	0	0
醇酸玻璃漆布	良	优	优	优	良	良	0	0	0
环氧玻璃漆布	0	良	良	良	优	良	0	0	0
有机硅玻璃漆布	0	0	0	0	0	0	良	可	0
硅橡胶玻璃漆布	0	0	0	0	0	0	可	可	0
聚酰亚胺玻璃漆布	0	0	0	0	0	0	0	0	可

注：相容性顺序是：优、良、可，0 表示不推荐。

第二节　漆　　管

常用的漆管是由不同的纤维管作底材，浸以相应的绝缘漆后，经烘干制成。常用的漆管名称、型号及用途等参见表 22－4。

表 22－4　漆管的名称、型号、组成、特性和用途

名　称	型号	组成		耐热等级	击穿电压(kV)				特性和用途
		底材	绝缘漆		常态	缠绕后	受潮后	热态	
油性漆管	2710	棉纱管	油性漆	A	5～7	2～6	1.5～5	—	具有良好的电气性能和弹性，但耐热性、耐潮性和耐霉性差。可作电机、电器和仪表等设备引出线和连接线绝缘
油性漆玻璃漆管	271	无碱玻璃纱管	油性漆	E	>5	>2	>2.5	—	

续表

名　称	型号	组成		耐热等级	击穿电压(kV)				特性和用途
		底材	绝缘漆		常态	缠绕后	受潮后	热态	
聚氨酯涤纶漆管	—	涤纶纱管	聚氨酯漆	E	3～5	2.5～3	2～4	3～5 (105 ℃)	具有优良的弹性和一定的电气性能和机械性能。适用于电机、电器、仪表等设备的引出线和连接线绝缘
醇酸玻璃漆管	2730	无碱玻璃纱管	醇酸漆	B	5～7	2～6	2.5～5	—	具有良好的电气性能和机械性能，耐油性和耐热性好，但弹性稍差。可代替油性漆管作电机、电器和仪表等设备引出线和连接线绝缘
聚氯乙烯玻璃漆管	2731	无碱玻璃纱管	改性聚氯乙烯树脂	B	5～7	4～6	2.5～4	—	具有优良的弹性和一定的电气性能、机械性能和耐化学性。适于作电机、电器和仪表等设备引出线和连接线绝缘
有机硅玻璃漆管	2750	无碱玻璃纱管	有机硅漆	H	4～7	1.5～4	2～6	—	具有较高的耐热性和耐潮性，良好的电气性能。适于作H级电机、电器等设备的引出线和连接线绝缘
硅橡胶玻璃丝管	2751	无碱玻璃纱管	硅橡胶	H	4～9	—	2～7	3～7 (180 ℃)	具有优良的弹性、耐热性和耐寒性，电气性能和机械性能良好。适用于在—60～180 ℃工作的电机、电器和仪表等设备的引出线和连接线绝缘

第三节　绑　扎　带

绑扎带是以经硅烷处理过的长玻璃纤维经过整纱并浸以热固性树脂制成的半固化带状材料，又称无纬带。绑扎带按所用树脂种类分为聚酯型、环氧型、聚芳

烷基醚酚型和聚胺-酰亚胺型等几类，主要用作绑扎变压器铁芯和代替无磁性合金钢丝和钢带等金属材料绑扎电机转子。绑扎带的性能和应用工艺参数见表22-5。

表22-5　绑扎带的性能和应用工艺参数

项　目　名　称	聚酯绑扎带	环氧绑扎带	聚芳烷基醚酚绑扎带	聚胺-酰亚胺绑扎带
胶含量(%) 其中可熔性树脂占总胶量(%)	27±3 97	25±2 95	27±3 —	30±3 —
挥发物(%)	3±0.5	3±0.5	—	—
环抗张力(N/cm^2) 常态 热态	80 000～110 000 保留60%～65% (130 ℃)	90 000～124 000 保留60%～65% (130 ℃)	— >60 000 (180 ℃)	>60 000 >50 000 (180 ℃)
耐热等级	B	F	H	H
贮存期(月) 常态 5 ℃	3 —	— 1	3 —	1 —
工件预热温度(℃)	80～100	80～100	—	80～100
烘焙固化工艺的温度(℃)/时间(h)	1. 80～90/2 2. 110～120/2 3. 130～140/17～20	1. 80～90/2 2. 110～120/2 3. 130～155/17～20	1. 80～90/2 2. 140/2 3. 160/2 4. 180/15～16	1. 80/2 2. 100～120/4 3. 160/2 4. 180/2 5. 200/2

第二十三章　云母制品

在电工产品中，广泛应用云母及其制品作为绝缘材料。其品种有：天然云母、合成云母及粉云母、云母带、云母板、云母箔、云母玻璃等。

第一节　天然云母

天然云母种类较多，用作电工绝缘材料的有白云母和金云母两种。白云母具有玻璃光泽，一般无色透明；金云母有金属光泽和半金属光泽，常见的有金黄色、棕色或浅绿色等，透明度稍差。白云母和金云母具有良好的电气性能和机械性能，耐热性好，化学稳定性和耐电晕性好。两种云母都可以剥离加工成厚度为0.01～0.03 mm的柔软而富有弹性的薄片。白云母的电气性能比金云母好，但金云母柔软，耐热性能比白云母好。

按用途，云母一般可分为云母薄片（又称薄片云母）、电容器用云母和电子管用云母厚片三类，这三类云母的面积、厚度规格分别见表23－1至表23－3；其级别和用途见表23－4。

表23－1　云母薄片的面积规格

规格编号	面积①（cm^2）	规格编号	面积①（cm^2）
#3	65以上	#6	15～20
#4	50～65	#6 $\frac{1}{2}$	10～15
#4 $\frac{1}{2}$	40～50	#7	6～10
#5	30～40	#8	4～6
#5 $\frac{1}{2}$	20～30		

注：① 指云母片上最大矩形面积。

表23－2　云母薄片的厚度组别

规格编号	组别	厚度（μm）
#3，#4，#4 $\frac{1}{2}$，#5，#5 $\frac{1}{2}$，#6，#6 $\frac{1}{2}$，#7	Ⅰ	10～20
#3，#4，#4 $\frac{1}{2}$，#5，#5 $\frac{1}{2}$，#6，#6 $\frac{1}{2}$，#7	Ⅱ	20～30
#8	Ⅲ	5～35

表 23－3　电容器及电子管用云母片的面积、厚度、规格

规格编号	电容器用云母片		电子管用云母片	
	面积①（cm^2）	厚度②（μm）	直径③（mm）	厚度（mm）
#1	155 以上	（1）20～25 （2）26～35 （3）36～45 （4）46 以上	18	0.2 以上
#2	90～155		20	0.2 以上
#3	65～90		25	0.25 以上
#4	40～65		30	0.25 以上
#5	20～40		50	0.3 以上
#6	10～20		70	0.3 以上
#7	6～10		80	0.3 以上
#8	—		100	0.3 以上
#9	—		119	0.3 以上

注：① 指云母片最大矩形面积。

② 每一规格编号的云母，均有四种厚度规格。

③ 指云母片上有效面积内可冲剪零件的直径。

表 23－4　云母薄片的级别和用途

级　别	磁铁矿、褐铁矿斑点所占面积（%）	用　途
特级	无	用于高压大型电机主绝缘和标准电容器、电子管绝缘
甲级	10	用于电压不高的中型电机主绝缘和一般电器绝缘
乙级	25	用于低压电机、电器绝缘
丙级	50	用于低压电机、电器绝缘

第二节　合成云母

业已生产的合成云母是氟金云母，由于氟金云母无结晶水，纯净度高，其耐热性、抗热冲击性和介电性能均优于天然云母。合成云母与天然云母的比较见表 23－5。

表 23-5　合成云母与天然云母的比较

性能名称	白云母	金云母	合成云母（氟金云母）
化学式	$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	$K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	$KMg_3Al \cdot Si_3O_{10} \cdot F_2$
密度(g/cm^3)	2.65～2.7	2.3～2.8	2.6～2.8
吸潮性(%)	0.02～0.65	0.1～0.77	0～0.16
耐热性(℃)	600～700	800～900	1 100
线胀系数(10^{-6}/℃)（20℃～500℃）	19.8	18.3	19.9
相对介电系数 20℃，50Hz 20℃，10^6Hz	5.4～8.7 5.4～8.7	— 5.6～6.3	6.5 6.5
介质损耗角正切 20℃，50Hz 20℃，10^6Hz	0.0025 0.000 1～0.000 4	— 0.000 3～0.07	0.002～0.004 0.000 1～0.000 3
体积电阻率(Ω·cm)	10^{14}～10^{16}	10^{13}～10^{15}	10^{16}～10^{17}
击穿电压(kV) 厚度为 20μm 厚度为 50μm	4 5	3 4	4.5 7.5
化学稳定性	除氢氟酸外，可耐大多数化学物品	耐酸能力弱，碱的作用很小	较天然云母为好，具有高度的耐油、耐高压和耐高温水性能

第三节　粉　云　母

粉云母即粉云母纸，是利用云母碎料在 750～800 ℃下煅烧后，经酸处理、制浆、抄纸等工序制成的；也有将云母碎料通过高压水粉碎后，经水洗、抄纸制成。由于粉云母纸的厚度均匀、电气性能稳定、成本低，用于电机绝缘，不但节约了稀贵的云母片、提高了云母原料的利用率，而且为设计高压电机的高性能绝缘结构和工艺提供了新型的绝缘材料。

粉云母纸有 501、502、503 和 504 四个型号。其中：501 型、503 型的渗透性好，适于制作云母带和柔软云母板；502 型、504 型的含有微量白明胶，渗透性稍差，但机械强度较高，适于制作硬质云母板。还有一种大鳞片粉云母纸，这种粉云母纸的鳞片较大，机械性能和抗切通性高于一般粉云母纸，适宜制作硬质粉云母

板和少胶、中胶粉云母纸。

合成云母也可制造粉云母纸。

粉云母纸的性能见表 23－6。

表 23－6　粉云母纸的性能

性　能		501 型	502 型	503 型	504 型
厚度	(mm)	0.03～0.08	0.03～0.06	0.03～0.08	0.03～0.06
密度	(g/cm^3)	1.6～1.7	1.6～1.7	1.6～1.7	1.6～1.7
水分	(%)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
灼烧减量	(%)	<1	<1	<1	<1
抗张强度	(N/cm^2)	20～29	20～34	22～35	25～34
击穿强度	(kV/mm)	30～40	25～35	35～45	20～30

第四节　云　母　带

云母带是由胶黏剂黏合云母片或粉云母纸与补强材料经烘干而成。胶黏剂主要有沥青漆、虫胶漆、醇酸漆、环氧树脂漆、有机硅漆和磷酸胺水溶液等；补强材料主要有云母带纸、电话纸、绸和无碱玻璃布。

粉云母带厚度均匀，柔软，环氧粉云母绝缘的电气、机械性能好。使用粉云母带时，应根据其所用胶粘剂的胶化时间确定其成型工艺。当胶黏剂的胶化时间在 200±2 ℃下为 1～3 min 时，成型温度为 160～170 ℃，模压时间为 3～6 h，液压时间为 7～10 h。绝缘厚度增加，成型时间适当延长。

云母带及粉云母带的品种、性能和用途见表 23－7。

表 23－7　云母带及粉云母带的品种、性能与用途

名　称	型　号	耐热等级	性 能 与 用 途
沥青绸云母带	5032	B	适宜作电机绕组包扎绝缘，单面绸及云母纸补强
醇酸纸云母带	5430	B	适宜作一般电机绕组的绝缘，常态下柔软
醇酸绸云母带	5432 S－5438 S－5439	B	适宜作一般电机绕组的绝缘，常态下柔软
醇酸玻璃粉云母带	5434	B	适宜作电机绕组的绝缘，常态下柔软
醇酸玻璃粉云母带	5434－1	B	适宜作电机绕组的绝缘、柔软

续表

名　称	型　号	耐热等级	性能与用途
环氧玻璃粉云母带	5437－1	B	常态下柔软，适宜作大型高压电机的绕组绝缘
环氧玻璃粉云母带	5438－1	B	常态下柔软，固化后具有良好的电气、力学性能，适宜作大型高压电机线棒或绕组绝缘
环氧玻璃粉云母带	J－5438－1 云 438－1	B	电性能比 5438－1 好，其他性能等同
环氧玻璃粉云母带	J－5438－1B 云 439－1 5441－1 Z439－1 D601－1 594	B	硼胺环氧体系，具有良好的力学、电气性能，适宜作高压电机绕组绝缘
环氧玻璃生粉云母带	530	B	常态时柔软，适于汽轮发电机定子槽衬绝缘
环氧非织布玻璃布粉云母带	D608－1	B	柔软性、介质损耗优于 5438－1，综合性能与 5438－1 相同
环氧玻璃聚酯薄膜粉云母带	云 436－1A 云 436－1B 7－007 J－5439－B	B	硼胺环氧体系，常态下柔软，电气性能好，适宜作大中型高压电机绕组绝缘或低压电机电气绝缘
环氧玻璃双面聚酯薄膜粉云母带	云 437－1	B	具有优异的力学、电气性能，适宜作大型高压电机的绕组绝缘
改性聚酯粉云母带	B5040	F	适宜作 F 级电机绕组绝缘和匝间绝缘
环氧玻璃粉云母带	J－5441－1	F	分多胶和中胶两种类型，柔软性好，具有潜固化性，中胶带适用于 F 级 VPI 整体绝缘
环氧玻璃聚酯薄膜粉云母带	J－5439－1	B	常态下柔软，电气性能好，适宜作大中型高压电机绕组绝缘或低压电机电器绝缘，采用桐油酸酐环氧黏合剂
桐马环氧玻璃中胶粉云母带	D607－1	F	适宜作 F 级大中型高压电机 VPI 绝缘。柔软，储存稳定性好，并具有良好的电气、力学和耐氟性能
环氧玻璃聚酯薄膜双粉云母带	云 446－1M	F	适宜作 F 级电机绕组绝缘，其采用双面电工用无碱玻璃布，中间聚酯薄膜补强

续表

名　称	型　号	耐热等级	性能与用途
酚醛环氧玻璃聚酯薄膜粉云母带	云 446－1P B5442－1	F	适宜作 F 级电机绕组的线包绝缘材料，其具有良好的柔软性、耐热性，较高的介电强度和机械强度
酚醛环氧玻璃聚酯薄膜粉云母带	云 446－1B 云 446－1S	F	适宜作 F 级电机绕组绝缘，材质柔软，电性能好
环氧玻璃聚酰亚胺粉云母带	J－5442－1 云－446－1 B－5443－1	F	适宜作 F 级电机、电器绕组绝缘，材质柔软，电性能好
环氧玻璃少胶粉云母带	J5449－1 X5442－1 D609－1	F	适宜下级 VPI 整体浸渍，材质柔软，电气、力学性能好、渗透性好
酚醛环氧少胶单面聚酰亚胺薄脂粉云母带	云 445－1	F	适用于采用 VPI 浸渍工艺的 F 级电机绕组绝缘
二苯醚玻璃粉云母带	5451－1	H	适宜作电机绕组绝缘，具有较高的耐热性
改性二苯醚玻璃粉云母带	551	H	适宜作电机绕组绕包绝缘，其耐热性好，力学、电气性能优良，高温黏合力高，绝缘整体性好，不易受潮，常态时柔软
环氧硼胺玻璃粉云母带	D604－1 5444－1 B5441－Ⅱ 5441－1	F	柔软，储存期长，电气、力学性能优异，适宜作 F 级大中型高压电机定子绕组端部绝缘
酚醛环氧玻璃粉云母带	云 448－1	F	适宜作大型高压电机绕组绝缘，电气、力学性能优异
酚醛环氧玻璃粉云母带	云 449－1 Z449－1	F	适宜作中型高压电机绕组整体浸渍绝缘，柔软性、电气性能和力学性能好
桐马环氧玻璃粉云母带	570 544 5440－1 Z5444－1 9545－1 5441－1 云 444－1	F	适宜作 F 级电机和电器的绕组绝缘，材质柔软，电气、力学性能好
桐马环氧玻璃粉云母带	9545－9	F	适宜作 F 级大中型高压电机主绝缘及电器绕组绝缘。材质柔软、工艺性好，固化后机械强度高，介电性能好

续表

名　称	型　号	耐热等级	性能与用途
改性桐马环氧玻璃粉云母带	B5440－Ⅱ	F	适宜作F级电机、电器绝缘。材质柔软，力学、介电性能好
环氧玻璃(热收缩)薄膜粉云母带	447－1	F	适宜作高压电机的绕组绝缘。其双面分别以电工用无碱玻璃布热收缩薄膜为补强材料，电气、机械强度高
聚二苯醚衍生物玻璃粉云母带	云453－1	H	适宜作H级电机绕组的绕包绝缘，其耐热性好，电气、力学性能优良
有机硅玻璃片云母带	5450	H	柔软、耐热性高，适宜作H级电机绝缘
有机硅玻璃粉云母带	5450－1	H	适宜作高压电机的绕组绝缘，柔软性、电气、力学性能好，耐热性高
有机硅少胶单面玻璃金粉云母带	云460－5	C	适宜作耐火电线电缆的绝缘

第五节　云　母　板

云母板是由胶黏剂黏合云母片(或粉云母纸)与补强材料，经烘焙或烘焙热压而成。根据使用要求，由不同的材料组成，制备具有不同特点的云母板。柔软云母板在室温下柔软，可弯曲；塑型云母板在室温下坚硬，加热变软，可塑制成绝缘件；换向器云母板胶含量少，在室温下坚硬，压缩性小，厚度均匀；衬垫云母板的性能和特性与换向器云母板近似。它们的品种、组成、性能和用途分别见表23－8、表23－9。

表23－8　柔软云母板和塑型云母板的品种、组成、性能和用途

名　称	型号	耐热等级	击穿强度(kV/mm)(常态)				体积电阻率(Ω·cm)		用　途
			厚0.15 mm	厚0.2～0.25mm	厚0.3～0.5mm	厚0.6～1.2mm	常态	受潮48 h后	
醇酸纸柔软云母板	5130	B	15～28	20～30	15～26	—	$>10^{12}$	$>10^{10}$	供作低压交直流电机槽衬和端部层间绝缘
醇酸纸柔软粉云母板	5130－1	B	16～35	18～55	>16	—	—	—	

续表

名　称	型号	耐热等级	击穿强度（kV/mm）（常态）				体积电阻率（Ω·cm）		用　途
			厚0.15 mm	厚0.2～0.25mm	厚0.3～0.5mm	厚0.6～1.2mm	常态	受潮48 h后	
醇酸玻璃柔软云母板	5131	B	16～20	18～25	16～22	—	$>10^{12}$	$>10^{10}$	用于一般电机槽衬和端部层间绝缘
醇酸玻璃柔软粉云母板	5131-1	B	16～25	18～25	16～22	—	—	—	
沥青玻璃柔软云母板	5135	E	16～25	18～25	16～22	—	$>10^{12}$	$>10^{10}$	用于低压电机槽绝缘
环氧纸柔软粉云母板	5136-1	B	>16	>18	>16	—	—	—	用作电机槽绝缘及匝间绝缘
环氧玻璃柔软粉云母板	5137-1	B	>25	>30	>30	—	—	—	用于低压电机槽绝缘和端部层间绝缘或外包绝缘
环氧薄膜玻璃柔软粉云母板	5138-1	B		>35	>35	—	—	—	用于高压电机定子线圈匝间和换位绝缘或其他衬垫绝缘
醇酸柔软云母板	5133	B	25～30	25～32	25～28	—	$>10^{3}$ >	10^{12}	用于高压电机定子线圈匝间和换位绝缘或其他衬垫绝缘
有机硅柔软云母板	5150	H	>20	>25	>20	—	$>10^{12}$ >	10^{10}	用于H级电机槽部或端部层间绝缘
有机硅玻璃柔软云母板	5151	H	16～26	18～28	16～26	—	$>10^{12}$	$>10^{10}$	
有机硅玻璃柔软粉云母板	5151-1	H	>15	>25	>20	—	—	—	
醇酸塑型云母板	5230	B	35～50	35～50	30～40	25～30	$>10^{13}$	$>10^{12}$	用于电机整流子V型环和电机、电器绝缘结构件
虫胶塑型云母板	5231	B	35～47	35～47	30～38	>25	$>10^{13}$	$>10^{12}$	

续表

名　称	型号	耐热等级	击穿强度(kV/mm)(常态)				体积电阻率(Ω·cm)		用　途
			厚0.15mm	厚0.2～0.25mm	厚0.3～0.5mm	厚0.6～1.2mm	常态	受潮48 h后	
醇酸塑型云母板	5235	B	35～50	35～50	30～40	＞25	$>10^{13}$	$>10^{12}$	用于温升较高、转速较快的电机整流子V型环和绝缘结构件
虫胶塑型云母板	5236	B	35～50	35～50	30～40	25～30	$>10^{13}$	$>10^{12}$	
有机硅塑型云母板	5250	H	35～50	35～50	30～40	＞25	$>10^{13}$	$>10^{11}$	用于耐热电机、电器、仪表绝缘结构件

表 23-9 换向器云母板和衬垫云母板的品种、组成、性能和用途

名称	型号	耐热等级	击穿强度(kV/mm)(常态)		体积电阻率(Ω·cm)		收缩率(%)不大于)(压力 6 000 N/cm²)		起层率(%)			主要用途
									试样厚度与面积			
			厚 0.15 mm	厚 0.4～2.0 mm	常态	受潮 48 h 后	20℃±5℃ 160℃±5℃		0.15 mm 20 cm×40 cm	0.4～0.65 mm 20 cm×20 cm 或 20 cm×40 cm①	0.7～1.0 mm 20 cm×40 cm 或 40 cm×40 cm②	
虫胶换向器云母板	5535	B	—	18～35	—	—	9③ 7④	1.4	—	5	10	用于一般直流电机换向器绝缘
虫胶换向器金云母板	5535—2	B	—	>18	—	—	9③ 7④	1.4	—	5	10	用于一般直流电机换向器绝缘
环氧换向器粉云母板	5536-1	B	—	20～40	—	—	9	2.5	—	3	5	用于汽车电机和其他小型直流电机换向器绝缘
磷酸铵换向器金云母板	5560-2	H	—	>18	5×10^{12} ～10^{13}	5×10^{10} ～10^{11}	10	1.0	—	10	10	用于耐高温电机换向器绝缘
醇酸衬垫云母板	5730	B	—	20～40	$>10^{13}$	$>10^{12}$	—	—	—	5	10	用于电机、电器衬垫绝缘
虫胶衬垫云母板	5731	B	—	20～40	$>10^{13}$	$>10^{12}$	—	—	—	5	10	用于电机、电器衬垫绝缘
环氧衬垫粉云母板	5737-1	B	—	20～40	—	—	—	—	—	3	5	用于电机、电器衬垫绝缘

续表

名称	型号	耐热等级	击穿强度(kV/mm)(常态)		体积电阻率(Ω·cm)		收缩率(%)不大于)(压力 6 000 N/cm²)		起层率(%)			主要用途
									试样厚度与面积			
			厚 0.15 mm	厚 0.4～2.0 mm	常态	受潮 48 h 后	20℃±5℃ 160℃±5℃		0.15 mm 20 cm×40 cm	0.4～0.65 mm 20 cm×20 cm 或 20 cm×40 cm①	0.7～1.0 mm 20 cm×40 cm 或 40 cm×40 cm②	
有机硅衬垫云母板	5755	H	30～50	>20	5×10^{12}～10^{13}	5×10^{10}～10^{11}	—	—	5	10	10	用于耐高温电机、电器衬垫绝缘
有机硅衬垫金云母板	5755-2	H	>30	>20	5×10^{12}～10^{13}	5×10^{10}～10^{11}	—	—	5	10	10	用于耐高温电机、电器衬垫绝缘
磷酸铵衬垫金云母板	5760-2	H	—	>10	5×10^{12}～10^{13}	5×10^{10}～10^{11}	—	—	5	10	10	用于耐高温电机、电器衬垫绝缘

注：① 换向器云母板试样尺寸为 20 cm×20 cm；
② 衬垫云母板试样尺寸为 40 cm×40 cm；
③ 板厚 0.65 mm 及以下者；
④ 板厚 0.7 mm 及以上者。

第六节　云　母　箔

云母箔由胶黏剂黏合云母片(或粉云母纸)与单面补强材料,经烘焙或烘焙压制而成。其厚度较薄,在室温下弹性较好,在一定温度下具有可塑性。云母箔的品种、组成、性能及用途见表 23－10。

表 23－10　云母箔的品种、组成、性能及用途

名　称	型　号	耐热等级	标称厚度(mm)	击穿强度(kV/mm)	用　途
醇酸纸云母箔	5830	B	0.15 0.20 0.25 0.30	16～35	用于一般电机、电器卷烘绝缘、磁极绝缘
醇酸纸粉云母箔	5830－1	B	0.17 0.22	25～40	用于一般电机、电器卷烘绝缘、磁极绝缘
虫胶纸云母箔	5831	E～B	0.15 0.20 0.25 0.30	16～35	用于一般电机、电器卷烘绝缘、磁极绝缘
虫胶纸粉云母箔	5831－1	E～B	0.15 0.20 0.25 0.30	25～40	用于一般电机、电器卷烘绝缘、磁极绝缘
虫胶纸金云母箔	5831－2	E－B	0.15 0.20 0.25 0.30	16～30	用于一般电机、电器卷烘绝缘、磁极绝缘
醇酸玻璃云母箔	5832	B	0.15 0.20 0.25 0.30	16～35	用于要求机械强度较高的电机、电器卷烘绝缘,磁极绝缘
虫胶玻璃云母箔	5833	B	0.15 0.20 0.25 0.30	16～35	用于要求机械强度较高的电机、电器卷烘绝缘,磁极绝缘

续表

名　称	型　号	耐热等级	标称厚度(mm)	击穿强度(kV/mm)	用　途
虫胶玻璃金云母箔	5833－2	B	0.15 0.20 0.25 0.30	16～30	用于要求机械强度较高的电机、电器卷烘绝缘，磁极绝缘
环氧玻璃粉云母箔	5836－1	B	0.15 0.20 0.25 0.30	25～50	用于要求机械强度较高的电机、电器卷烘绝缘，磁极绝缘
有机硅玻璃云母箔	5850	H	0.15 0.20 0.25 0.30	16～35	用于H级电机、电器卷烘绝缘，磁极绝缘

第七节　云母玻璃

云母玻璃是由云母粉与低熔点硼铅玻璃粉混合后，经热熔模压成型的硬质板材。耐热性和耐电弧性好，主要用作高压电器的耐弧、耐高温绝缘材料。质地坚硬，一般要采用高速钢或砂轮刃具进行加工。云母玻璃的性能见表23－11。

表23－11　云母玻璃的性能

序号	性能名称	云母玻璃	合成云母玻璃
1	相对密度	2.65～2.8	2.6～3.8
2	抗弯强度(N/cm^2)	7 600～8 600	8 500～10 000
3	耐热性(℃)	300～350	350～650
4	体积电阻率($\Omega \cdot cm$)	10^{13}～10^{16}	10^{15}
5	介质损耗角正切(10^6 Hz)	1.3×10^{-3}～5×10^{-3}	1.3×10^{-3}～2.3×10^{-3}
6	相对介电系数(10^6 Hz)	6.5	6.8～9.8
7	击穿强度(kV/mm)	14～20	13～20

第二十四章　电工用膜带及复合制品

第一节　电 工 薄 膜

电工用薄膜是用各种不同特性的高分子聚合物制成的，可适应不同用途。其共同的特点是：膜薄、柔软、耐潮、电气性能和机械性能好；其厚度范围一般为0.006～0.5 mm。落膜主要用作电机、电器线圈和电线电缆绕包绝缘以及电容器介质。电工常用的合成树脂薄膜主要有以下几种。

1. 聚丙烯薄膜

聚丙烯薄膜比其他薄膜都轻，可拉伸成0.006 mm或更薄的材料，具有较高的电气性能、机械性能和化学稳定性，介质损耗比电容器纸小，击穿场强比纸高近10倍，采用它与电容器纸组合介质的电力电容器比采用纸介质的体积小、质量轻。

2. 聚酯薄膜

聚酯薄膜具有较高的抗张强度、较高的电阻和击穿强度，耐有机溶剂好，但易醇解和水解，耐碱性和耐电晕性差，工作温度为－60～120 ℃。

3. 聚萘酯薄膜

聚萘酯薄膜的耐热性比聚酯薄膜好，弹性模数高，断裂伸长率小，在高温下易水解，但水解速度比聚酯薄膜慢，耐酸、耐碱、耐芳香胺比聚酯薄膜好，耐气候性优良。

4. 聚酰胺薄膜

聚酰胺薄膜耐溶剂好，熔点高，具有一定的电气性能和机械性能；耐变压器油的性能好，在80 ℃的变压器油中浸1 000 h后，薄膜只有轻度的卷曲，但耐潮性稍差。

5. 聚酰亚胺薄膜

聚酰亚胺薄膜具有优异的耐高温和耐深冷性能，可长时间在250 ℃下使用，在400 ℃中可工作数小时，超过800 ℃时则炭化，但不燃烧；在液氦温度下能保持柔软性；能耐所有的有机溶剂和酸，但不耐强碱，也不宜在油中使用；有较好的耐磨、耐电弧、耐高能辐照等特性。

6. 聚四氟乙烯薄膜

聚四氟乙烯薄膜具有很高的耐热性和耐寒性，可在－250～250 ℃下工作，超过300 ℃时性能下降；有优良的电气性能和化学稳定性，但置于某些卤化胺及芳

香族碳氢化合物中有轻微的溶胀现象，碱金属和氟元素在高温下对它有明显的腐蚀作用；介质损耗小，在很宽的温度和频率范围内变化极微；在电弧作用下不炭化；在高温下抗张强度下降幅度较大、延伸率增大，低温时抗张强度上升、延伸率降低。使用时需采用特殊黏合剂黏结。

7. 全氟乙丙烯薄膜

全氟乙丙烯薄膜具有优良的高频特性，介质损耗小，且受温度、频率变化的影响小；吸湿性小；化学稳定性与聚四氟乙烯薄膜相似；机械性能较差，抗张强度比聚四氟乙烯好；在高温高压下能自粘或与其他材料黏结；工作温度为－250～200 ℃。

8. 聚苯乙烯薄膜

聚苯乙烯薄膜是非极性电介质，有良好的电气性能，介质损耗小，而且在很宽的温度和频率范围内变化不大；但耐热性和柔软性差，较脆，抗冲击和抗撕裂强度低。

9. 聚乙烯薄膜

聚乙烯薄膜的机械性能和耐热性较差，长期工作温度为 70 ℃，可用作通信电缆绝缘和电力电缆护层等。

电工常用薄膜的综合性能与用途见表 24－1。

薄膜表面在分切加工过程中，会产生较强的静电场，吸附周围空气中的灰尘，从而导致薄膜的电气性能下降，故在进行薄膜分切加工时工作环境需保持清洁，加工设备应带有静电消除器。

表 24-1　电工常用薄膜的综合性能与用途

名　称	结晶定向程度	耐热等级	厚度 (mm)	密度 (g/cm^3)	收缩率(%)		延伸率(%)		抗张强度 (N/mm^2)		击穿强度 (kV/mm)		体积电阻率 (Ω·cm)		介质损耗角正切		相对介电系数		用　途
					纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	常态	热态	常态	热态	50 Hz	10^6 Hz	50 Hz	10^6 Hz	
聚丙烯薄膜	定向	—	0.006～0.02	0.89～0.92	2 (120℃)	2 (120℃)	30～100	30～100	>100	>140	>150	—	10^{15}～10^{17}	—	0.000 7 (100 ℃)	—	—	2～2.2	可用作电容器介质
聚酯薄膜	定向	E	0.006～0.10	1.38～1.40	<3 (150℃)	<3 (150 ℃)	40～130	40～130	140～180	140～180	>130	100～180 (130 ℃)	10^{16}～10^{17}	—	<0.005	<0.02	3.2±0.2	3.0±0.2	可用作低压电机、电器线圈匝间、端部包扎绝缘，衬垫绝缘，电磁线绕包绝缘，E级电机槽绝缘和电容器介质
聚萘酯薄膜	定向	F	0.02～0.10	1.35～1.40	0.33 (100 ℃)	—	46～66	21～75	140～250	210～250	>210	150 (155 ℃)	10^{16}	—	<0.004	—	2.9	—	可用作 F 级电机槽绝缘、导线绕包绝缘和线圈端部绝缘
芳香族聚酰胺薄膜	不定向	H	0.03～0.06	—	1.08 (200 ℃)	1.05 (200 ℃)	7.1	6.3	88～118	78～108	90～130	87 (180 ℃)	10^{13}～10^{14}	—	—	0.003～0.004	—	3.5～4	可用作 F、H 级电机槽绝缘
聚酰亚胺薄膜	不定向	C	0.03～0.06	1.38～1.41	0.3 (200 ℃)	—	15～30	—	88～118	—	100～130	70～110 (200 ℃)	10^{16}	10^{12} (200 ℃)	0.004～0.01	—	3	—	可用作 H 级电机、微电机槽绝缘，电机、电器绕组和起重电磁铁外包绝缘以及导线绕包绝缘

续表

名称	结晶定向程度	耐热等级	厚度(mm)	密度(g/cm^3)	收缩率(%)		延伸率(%)		抗张强度(N/mm^2)		击穿强度(kV/mm)		体积电阻率(Ω·cm)		介质损耗角正切		相对介电系数		用途
					纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	常态	热态	常态	热态	50 Hz	10^6 Hz	50 Hz	10^6 Hz	
聚四氟乙烯薄膜	定向	C	0.01～0.10	2.1～2.3	—	—	>30	>30	>29	>29	>60(直流)	—	10^{16}～10^{17}	—	—	0.000 2	1.8～2.2	1.8～2.2	可用作工作温度为−60 ℃～250 ℃电容器介质,电器、仪表、无线电装置的层间衬垫绝缘和耐热电磁铁、安装线、耐油电缆、耐热导线绝缘
	半定向	C	0.04～0.12	—	—	—	>50	>50	>15	>15	>15(直流)	—	$>10^{16}$	—	—	—	—	—	
	不定向	C	0.02～0.50	2.1～2.3	—	—	>100	>100	>10	>10	>40(直流)	—	10^{15}～10^{16}	—	—	0.000 2	—	—	
全氟乙丙烯薄膜	不定向	C	0.01～0.50	2.15	—	—	>300	>300	18～20	—	196	—	10^{18}～10^{19}	—	0.000 3	—	2.0(10^3Hz)	2.0	可用作电线、同轴电缆的包覆层和印刷电路板
聚苯乙烯薄膜	定向	Y以下	0.02～0.10	0.93	—	—	2～4	2～4	>49	>49	>110	—	10^{17}	—	—	0.003	—	2.3～2.7	可用作高频电信电缆绝缘和电容器介质
聚乙烯薄膜	不定向	Y以下	0.02～0.20	0.93	—	—	>200	>200	>10	>10	>40	—	10^{17}	—	—	0.000 4	—	2.5	可用作电信电缆绝缘及工作温度不超过70 ℃的电缆绝缘护层

第二节　薄膜复合箔

薄膜复合箔是在薄膜的一面或双面黏合绝缘纸或漆绸等纤维材料组成的复合材料。所粘纤维材料加强了薄膜的机械性能，提高了抗撕强度和表面挺度。薄膜复合箔适合于作中小型电机的槽绝缘及电机、电器的线圈端部和相间绝缘。

薄膜复合箔的品种、组成、性能和用途见表 24－2。

表 24－2　薄膜复合箔的品种、组成、性能和用途

名　称	型号或代号	厚度(mm)	组成	耐热等级	抗张力(N)		击穿电压(kV)				体积电阻率(Ω·cm)			用　途
					纵向	横向	常态	弯折	受潮后	热态	常态	受潮后	热态	
聚酯薄膜绝缘纸复合箔	6520	0.15～0.30	一层聚酯薄膜、一层绝缘纸(青壳纸)	E	177～324	118～294	6.5～12	6～12	4.5～12	—	10^{14}～10^{15}	10^{12}～10^{13}	10^{11}～10^{13}	用于E级电机槽绝缘、端部层间绝缘
聚酯薄膜玻璃漆布复合箔	6530	0.17～0.24	一层聚酯薄膜、一层玻璃漆布	B	245～324	196～294	8～12	6～8	6～10	—	10^{14}～10^{15}	10^{12}～10^{14}	10^{11}～10^{12}	用于B级电机槽绝缘、端部层间绝缘、匝间绝缘和衬垫绝缘。可用于湿热地区
聚酯薄膜聚酯纤维纸复合箔	DMD	0.20～0.25	一层聚酯薄膜、两层聚酯纤维纸	B	177～265	148～216	10～12	9～12	8～12	8～11(130℃)	10^{14}～10^{15}	10^{12}～10^{13}	10^{12}～10^{14}	用于B级电机槽绝缘、端部层间绝缘、匝间绝缘和衬垫绝缘。可用于湿热地区
聚酯薄膜芳香族聚酰胺纤维纸复合箔	NMN	0.25～0.30	一层聚酯薄膜、两层芳香族聚酰胺纤维纸	F	＞88	＞69	12～15	＞10	—	＞10(155℃)	—	—	—	用于F级电机槽绝缘、端部层间绝缘、匝间绝缘和衬垫绝缘
聚酰亚胺薄膜芳香族聚酰胺纤维纸复合箔	NHN	0.25～0.30	一层聚酰亚胺薄膜、两层芳香族聚酰胺纤维纸	H	127～275	98～206	7～12	6～11	7～9	—	10^{14}～10^{15}	10^{13}～10^{14}	10^{14}～10^{15}	用于F级电机槽绝缘、端部层间绝缘、匝间绝缘和衬垫绝缘，但适用于H级电机

第三节　粘　　带

电工用粘带有薄膜粘带、织物粘带和无底材粘带三类。

薄膜粘带是在薄膜的一面或两面涂以胶粘剂，经烘焙切带而成。薄膜粘带所用胶粘剂的耐热性一般应与薄膜材料相匹配。

织物粘带是以无碱玻璃布或棉布为底材涂以胶粘剂，经烘焙切带而成。

无底材粘带是由硅橡胶或丁基橡胶和填料、硫化剂等经混炼、挤压而成。

粘带的绝缘工艺性好，使用方便，适用于作电机、电器线圈绝缘和包扎固定以及电线接头的包扎绝缘等。

电工常用粘带的品种、主要性能、特性和用途见表 24－3。

表 24-3　常用粘带的品种、主要性能和用途

名　称	厚度 (mm)	组　成	抗张强度 (N/mm^2) (纵向)	延伸率 (%) (纵向)	永久变形 (%)	击穿强度 (kV/mm)			体积电阻率 ($\Omega \cdot cm$)			表面电阻率(Ω)	介质损耗角正切 (10^6 Hz)	相对介电系数 (10^6 Hz)	特性和用途
						常态	受潮后	热态	常态	受潮后	热态				
聚乙烯薄膜粘带	0.22～0.26	聚乙烯薄膜、橡胶型胶粘剂	121～153	460～480	—	>30	—		10^{13}～10^{16}	—	—	—	0.02～0.03	1.8	有一定的电气性能和机械性能，柔软性好，粘结力较强，但耐热性低(低于Y级)。可用于一般电线接头包扎绝缘
聚乙烯薄膜纸粘带	0.10	聚乙烯薄膜、纸、橡胶型胶粘剂	59	—	—	>10	—	—	—	—	—	—	—	—	包扎服贴，使用方便，可代替黑胶布带作电线接头包扎绝缘
聚氯乙烯薄膜粘带	0.14～0.19	聚氯乙烯薄膜、橡胶型胶粘剂	—	—	—	>10	—	—	—	—	—	—	—		有一定的电气性能和机械性能，较柔软，粘结力强，但耐热性低(低于Y级)。供作电压为500～6 000 V电线接头包扎绝缘
聚酯薄膜粘带	0.055～0.17	聚酯薄膜、橡胶型胶粘剂或聚丙烯酸酯胶粘剂	—	—	—	>100	—	—	—	—	—	—	—	—	耐热性较好，机械强度高。可用作半导体元件密封绝缘和电机线圈绝缘
聚酰亚胺薄膜粘带	0.045～0.07	聚酰亚胺薄膜、聚胺酰亚胺树脂胶粘剂	106～123	25～45	—	190～210	120～150	130～150 (180 ℃)	>10^{15}	>10^{15}	>10^{12} (180 ℃)	—	0.003	2.6～3.2	电气性能和机械性能较高，耐热性优良，但成型温度较高(180～200 ℃)。适于作H级电机线圈绝缘和槽绝缘
聚酰亚胺薄膜粘带	0.05	聚酰亚胺薄膜、F_{46}树脂胶粘剂	88～98	40～50	—	>120	—	80 (180 ℃)	>10^{16}	—	>10^{15} (180 ℃)	10^{14}～10^{15}	0.001	2	同上，但成型温度更高(300 ℃以上)。可用于H级或C级电机、潜油电机线圈绝缘和槽绝缘

续表

名　称	厚度(mm)	组　成	抗张强度(N/mm^2)(纵向)	延伸率(%)(纵向)	永久变形(%)	击穿强度(kV/mm)			体积电阻率(Ω·cm)			表面电阻率(Ω)	介质损耗角正切(10^6 Hz)	相对介电系数(10^6 Hz)	特性和用途
						常态	受潮后	热态	常态	受潮后	热态				
环氧玻璃粘带	0.17	无碱玻璃布、环氧树脂胶粘剂	>118①	—	—	>6②	3.8③	—	$>10^{14}$	$>10^{13}$	$>10^{12}$(130 ℃)	—	—	—	具有较高的电气性能和机械性能。供作变压器铁心绑扎材料，属B级绝缘
有机硅玻璃粘带	0.15	无碱玻璃布、有机硅树脂胶粘剂	>78①	—	—	>0.6②			$>10^{11}$	—	$>10^{12}$④	—	—	—	有较高的耐热性、耐寒性和耐潮性，以及较好的电气性能和机械性能。可用于H级电机、电器线圈绝缘和导线联接绝缘
硅橡胶玻璃粘带	—	无碱玻璃布、硅橡胶胶粘剂	>196①	—	—	3～5②	—	—	10^{13}～10^{14}	10^{12}～10^{13}	—	$>10^{13}$	—	—	有较高的耐热性、耐寒性和耐潮性，以及较好的电气性能和机械性能。可用于H级电机、电器线圈绝缘和导线联接绝缘，柔软件较好
自粘性硅橡胶三角带	—	硅橡胶、填料、硫化剂	5～8	36～50	2.5～10	20～30	—	—	10^{14}～10^{15}	—	—	10^{14}～10^{15}	0.001 4～0.01	>4	具有耐热、耐潮、抗震动、耐化学腐蚀等特性，但抗张强度较低。适用于半叠包法作高压电机线圈绝缘，但需注意胶带保持清洁才能粘牢
自粘性丁基橡胶带	—	丁基橡胶、薄膜隔离材料等	>1.5	>400	—	>20	—	—	$>10^{15}$	—	—	—	0.02	2.5～2.75	有硫化型和非硫化型两种。胶带弹性好。伸缩性大，包扎紧密性好。主要用于电力电缆联接和端头包扎绝缘

注：① 抗张力(N)；② 击穿电压(kV)；③ 弯折后；④ 180 ℃处理 18 h 后。

第二十五章　电工用层压制品

电工用层压制品是由纸或布等作底材，浸(或涂)以不同的胶黏剂，经热压(或卷制)成的层状结构的绝缘材料，主要包括层压板、层压管(筒)和棒、电容套管和其他特种型材。层压制品的性能取决于所用底材和胶粘剂的性质以及成型工艺。一般都具有优良的机电性能和耐热、耐油、耐霉、耐电弧、防电晕等特性。

常用的底材有木纤维纸、棉纤维纸、棉布和无碱玻璃布。木纤维纸浸渍性好，适用于压制层压纸板、层压棒和卷制层压纸管(筒)和电容套管芯等；棉纤维纸适用于压制冷冲剪板；无碱玻璃布耐高温，电气性能、机械性能和化学稳定性都好，但浸渍性差、黏结力差，经表面处理后可提高其黏结强度与抗剪切性能，适用于做B级、F级及H级绝缘层压制品的底材；棉布层压制品的黏合强度高，耐磨和易于机械加工，但耐热性、电气性能和机械性能不如玻璃布层压制品，电气性能和高频性能不如纸层压制品。

常用的胶粘剂有酚醛树脂、三聚氰胺树脂、环氧酚醛树脂、有机硅树脂、聚二苯醚树脂和聚酰亚胺树脂等。层压制品对耐热等级与机械、电气和耐电弧等性能要求的不同，选用的胶粘剂和胶含量也不同。环氧酚醛树脂制成的玻璃布层压制品具有优良的电气性能和机械性能，热变形温度较高；有机硅树脂和二苯醚树脂制成的玻璃布层压制品具有很高的热态机械性能、电气性能和热变形温度。

常用的成型工艺有层压、卷制和模压三种。

第一节　层　压　板

层压板包括层压纸板、层压布板、层压玻璃布板和其他特种层压板(如敷铜箔板和防电晕层压板等)四类，其品种、组成、特性和用途见表25-1；各类层压板的性能分别见表25-2至表25-5。

表 25-1　层压板的品种、组成、特性和用途

名　称	型号	组　成		耐热等级	特性和用途
		底材	胶粘剂		
酚醛层压纸板	3020	浸渍纸	甲酚甲醛树脂	E	电气性能较好，耐油性好。适于做电工设备中的绝缘结构件，并可在变压器油中使用
	3021	浸渍纸	苯酚或甲酚甲醛树脂	E	机械强度高，耐油性好。适于做电工设备中的绝缘结构件，并可在变压器油中使用
	3022	浸渍纸	甲酚甲醛树脂	E	有较高的耐潮性。适于做高湿度条件下工作的电工设备中的绝缘结构件
	3023	浸渍纸	甲酚甲醛树脂	E	介质损耗低。适于做无线电、电话和高频设备中的绝缘结构件
	—	漂白棉纤维纸	合成橡胶改性酚醛树脂	E	外观好，具有良好的冷冲剪性能。适于作无线电和其他电器设备的冷冲剪绝缘结构件
酚醛层压布板	3025	棉布	苯酚甲醛树脂	E	机械强度高。适于做电器设备中的绝缘结构件，并可在变压器油中使用
	3027	棉布	苯酚甲醛树脂和甲酚甲醛树脂	E	电气性能好，吸水性小。适于做高频无线电装置中的绝缘结构件
酚醛层压玻璃布板	3230	无碱玻璃布	苯酚甲醛树脂	B	机械性能、耐水和耐热性比层压纸、布板好，但黏合强度低。适于做电工设备中的绝缘结构件，并可在变压器油中使用
苯胺酚醛层压玻璃布板	3231	沃兰处理玻璃布	苯胺酚醛树脂	B	电气性能和机械性能比酚醛玻璃布板的好，黏合强度与棉布板相近。可代替棉布板用作电机、电器中的绝缘结构件
环氧酚醛层压玻璃布板	3240	无碱玻璃布	环氧酚醛树脂	F	具有很高的机械强度，电气性能好，耐热性和耐水性较好，浸水后的电气性能较稳定。适于作要求高机械强度、高介电性能以及耐水性好的电机、电器绝缘结构件，并可在变压器油中使用

续表

名　称	型号	组　成		耐热等级	特性和用途
		底材	胶粘剂		
有机硅环氧层压玻璃布板	3250	沃兰处理玻璃布	有机硅环氧树脂	H	电气性能和耐热性好，机械强度较高。供作耐热和湿热地区H级电机、电器绝缘结构件
有机硅层压玻璃布板	3251	沃兰处理玻璃布	有机硅树脂	H	耐热性好，电气性能和机械性能与3230相近，并耐化学药品腐蚀，耐辐照。可用作H级电机电器绝缘结构件
聚二苯醚层压玻璃布板	—	沃兰处理玻璃布	聚二苯醚树脂	H	具有优良的耐热性和机械性能，耐辐照，耐腐蚀，能熄灭电弧。适于作H级电机、电器绝缘结构件
聚胺酰亚胺层压玻璃布板	—	无碱玻璃布	聚胺酰亚胺树脂	H	具有良好的机械性能，电气性能和耐热、耐辐照性。适于作H级电机、电器绝缘结构件
聚酰亚胺层压玻璃布板	—	无碱玻璃布	聚酰亚胺树脂	C	具有很好的耐热性，耐辐照。用作H级电机、电器绝缘结构件
酚醛纸敷铜箔板	3420（双面） 3421（单面）	棉纤维纸	酚醛树脂	E	具有高的抗剥强度，较好的机械性能、电气性能和机械加工性。适于作无线电、电子设备和其他设备中的印刷电路板
环氧酚醛玻璃布敷铜箔板	3440（双面） 3441（单面）	无碱玻璃布	环氧酚醛树脂	F	具有较高的抗剥强度和机械强度，电气性能和耐水性好。用于制造工作温度较高的无线电、电子设备及其他设备中的印刷电路板
防电晕环氧玻璃布板		无碱玻璃布	加有导电材料的环氧酚醛树脂	F	具有较稳定的低电阻。适于作高压电机槽部的防电晕材料

表25－2　酚醛层压纸板的性能

序号	性　能　名　称	3020	3021	3022	3023
1	相对密度	1.3～1.45	1.3～1.45	1.3～1.45	1.3～1.45
2	吸水率(%)	1～10	1.2～12	—	—
3	热稳定性(℃)				
	板厚20 mm以下	125	115	125	—
	板厚20 mm以上	100	90	100	—
4	抗弯强度(N/cm^2)	10 000～19 500	12 000～21 700	12 000～17 900	—
5	抗张强度(N/cm^2)	8 000～15 500	10 000～18 600	8 000～16 800	8 000～15 500
6	黏合力(N)	＞3 800	＞3 200	＞3 600	—

续表

序号	性能名称	3020	3021	3022	3023
7	抗冲击强度(N·cm/cm²)	120～350	150～400	120～350	—
8	表面电阻率(Ω)				
	常态	—	—	$>10^{11}$	10^{11}～10^{12}
	浸水后	—	—	—	10^{9}～10^{10}
	浸盐水后	—	—	10^{8}～10^{11}	—
9	体积电阻率(Ω·cm)				
	常态	—	—	—	10^{12}～10^{13}
	浸水后	—	—	—	10^{9}～10^{10}
10	平行层向绝缘电阻(Ω)				
	常态	$>10^{10}$	$>10^{9}$	$>10^{10}$	$>10^{11}$
	受潮后	$>10^{8}$	$>10^{7}$	—	—
	浸盐水后	—	—	10^{7}～10^{9}	$>10^{8}$
11	介质损耗角正切(10^{6} Hz)				(浸水后)
	常态	—	—	—	<0.035
	浸水后	—	—	—	<0.06
12	垂直层向耐电压①(kV/mm)(在变压器油中耐电压5 min)				
	20 ℃±5 ℃				
	厚1 mm以下	25	16	17	33②
	厚1.1～2 mm	22	15	16	27②
	厚2.1～3 mm;3 mm以上一面经加工至3 mm	19	13	14	25②
	90 ℃±5 ℃				
	厚0.5～1 mm	12	—	—	—
	厚1.1～2 mm	11	—	—	—
	厚2.1～3 mm;3 mm以上一面经加工至3 mm				
13	平行层向耐电压(kV)(在变压器油中耐电压5 min)				
	20 ℃±5 ℃	16	14	14	—
	90 ℃±2 ℃	8	—	—	—

注:① 表中垂直层向耐电压的耐压值应按实际厚度与指标换算;
② 系击穿强度值。

表 25-3　酚醛层压布板的性能

序号	性能名称	3025	3027
1	相对密度	1.3～1.42	1.3～1.42
2	吸水率(%)	—	1.5～8
3	马丁氏耐热性(℃)不低于	125	135
4	抗弯强度(N/cm^2)	11 000～16 400	9 000～17 300
5	抗张强度(N/cm^2)	7 000～12 400	6 000～11 400
6	黏合力(N)	>5 500	>5 500
7	抗冲击强度($N \cdot cm/cm^2$)	250～550	200～500
8	表面电阻率(Ω)		
	常态	—	$>10^{11}$
	受潮后	—	10^8～10^9
9	体积电阻率(Ω·cm)		
	常态	—	10^{10}～10^{11}
	受潮后	—	10^8～10^9
10	平行层向绝缘电阻(Ω)		
	板厚 10 mm 及以上		
	常态	—	$>10^{10}$
	受潮后	—	10^7～10^9
11	垂直层向击穿强度(kV/mm)		
	板厚 10 mm 以下,(在 90 ℃±2 ℃的变压器油中试验)		
	板厚 0.5～1 mm	4	8
	板厚 1.1～2 mm	3	6
	板厚 2.1～3 mm 和板厚 3 mm 以上经一面加工	2	5
12	平行层向击穿电压(kV)		
	(在 90 ℃±2 ℃的变压器油中试验)	—	10

表 25－4　敷铜箔层压板的性能①

序号	性能名称	酚醛纸敷铜箔板 3420（双面）、3421（单面）	环氧酚醛玻璃布敷铜箔板 3430（双面）、3441（单面）
1	相对密度	1.30～1.45	1.70～1.90
2	抗弯强度(N/cm^2)	10 000	30 000
3	黏合面的表面电阻率(Ω)		
	常态时	10^9～13^{13}	$>10^{12}$
	受潮后	10^8	10^{10}～10^{12}（浸水后）
4	平行层向绝缘电阻(Ω)		
	常态时	$>10^9$	$>10^{10}$
	受潮后	$>10^8$	$>10^8$（浸水后）
5	介质损耗角正切(10^6 Hz)		
	常态时	0.04	0.03
	受潮后	0.06	0.04（浸水后）
6	表面击穿电压(kV)		
	常态时	1.5	2.0
	受潮后	1.2	1.5（浸水后）
7	耐浸焊性（焊锡温度℃）/（浸泡时间 s）	240±2/10 不起泡、开裂、分层	260±2/20 不起泡、开裂、分层
8	铜箔对基板的抗剥力(N)		
	常态时	12	15
	不同条件下连续处理后	10②	12③
	浸焊后	10	12

注：① 表中第 1～6 项为基板性能。

② 试样在 85 ℃±2 ℃下保持 8 h，在 40 ℃±2 ℃及相对湿度 95%±3%的环境下保持 24 h，在－55 ℃±5 ℃下保持 6 h 后，应无起泡、分层，再测其抗剥力。

③ 试样在 125 ℃±2 ℃下保持 8 h，在 40 ℃±2 ℃的蒸馏水中 24 h，在－55 ℃±5 ℃下保持 24 h，55 ℃±5 ℃下保持 6 h 后应无起泡、分层，再测其抗剥力。

表 25－5　层压玻璃布板的性能

序号	性能名称	酚醛玻璃布板 3230	苯胺酚醛玻璃布板 3231	环氧酚醛玻璃布板 3240	有机硅环氧玻璃布板 3250	有机硅玻璃布板 3251	聚二苯醚玻璃布板	聚酰亚胺玻璃布板	聚胺酰亚胺玻璃布板
1	相对密度	—	—	1.7～1.9	—	—	1.6～1.8	1.7	—
2	吸水率(%)	0.2～1	＜0.5	—	0.05～1	0.2～1	＜0.5	—	＜0.2
3	马丁氏耐热性(℃)	—	150～200	200～230	＞250	225～260	＞250	—	＞300
4	热稳定性(℃)	—	—	—	＞200	＞220	—	—	
5	抗弯强度(N/cm^2)	11 000～23 400	＞25 000	40 000(纵) 30 000(横)	20 000～31 000	11 000～20 400	＞30 000	18 000～39 000	＞38 000(常态)、 ＞18 000(250 ℃)
6	抗张强度(N/cm^2)	10 000～21 100	20 000～24 800	35 000(纵) 25 000(横)	17 000～22 000	10 000～25 000	＞20 000	—	30 000
7	黏合力(N)	1 300～2 900	2 500～4 400	＞5 800	2 000～2 600	1 000～1 900	＞2 500	—	＞3 500
8	抗冲击强度($N \cdot cm/cm^2$)	50～140	100～200	1 500(纵) 1 000(横)	800～2 300	500～2 400	＞1 500	—	＞1 800
9	抗压强度(N/cm^2)	—	—	—	35 000～42 000	—	—	—	—
10	表面电阻率(Ω)　常态	10^{11}～10^{12}	10^{12}～10^{13}	10^{13}～10^{14}	10^{13}～10^{14}	10^{12}～10^{15}	＞10^{13}	10^{13}～10^{14}	＞10^{13}
	180 ℃±2 ℃	—	—	—	10^{11}～10^{12}	10^{11}～10^{12}	＞10^{11}	10^{10}～10^{13} (250 ℃)	10^{10}～10^{13} (250 ℃)
	受潮后	10^{10}～10^{11}	10^{10}～10^{11} (浸水后)	10^{11}～10^{12} (浸水后)	10^{11}～10^{12}	10^{10}～10^{11}	＞10^{11}	＞10^{11}	—
11	体积电阻率(Ω·cm) 常态	10^{10}～10^{11}	10^{12}～10^{13}	10^{13}～10^{14}	10^{13}～10^{15}	10^{12}～10^{14}	＞10^{13}	＞10^{14}	＞10^{14}
	180 ℃±2 ℃	—	—	—	10^{10}～10^{11}	10^{11}～10^{12}	＞10^{11}	10^{11}～10^{13} (250 ℃)	＞10^{11} (250 ℃)
	受潮后	10^{9}～10^{10}	10^{10}～10^{12} (浸水后)	10^{11}～10^{12} (浸水后)	10^{11}～10^{12}	10^{10}～10^{11}	＞10^{11}	＞10^{10}	—
12	平行层向绝缘电阻(Ω) 板厚 10 mm 及以上								
	常态	＞10^{9}	10^{9}～10^{11}	10^{10}～10^{11}	—	—	—	—	—
	浸水后	10^{8}～10^{9} (受潮后)	10^{7}～10^{8}	＞108	—	—	—	—	—

续表

序号	性能名称	酚醛玻璃布板 3230	苯胺酚醛玻璃布板 3231	环氧酚醛玻璃布板 3240	有机硅环氧玻璃布板 3250	有机硅玻璃布板 3251	聚二苯醚玻璃布板	聚酰亚胺玻璃布板	聚胺酰亚胺玻璃布板
13	介质损耗角正切　常态	—	—	0.03～0.05	0.02～0.04	—	<0.03	0.01(10^6 Hz)	<0.05
	180 ℃±2 ℃	—	—	—	<0.12	<0.05	<0.1	—	<0.05(10^6 Hz)
	受潮后	—	—	—	<0.3	—	<0.2	—	—
14	相对介电系数(10^6 Hz)	—	—	—	—	—	—	3.5	—
15	垂直板层冲击强度(kV/mm)不小于								
	板厚 10 mm 以下(在 90 ℃±2 ℃变压器油中)								
	板厚 0.5～1 mm	14	22	22	—	—	—	—	—
	板厚 1.1～2 mm	12	20	20	—	—	—	—	—
	板厚 2.1～3 mm 及 3 mm以上经一面加工	10	18	18	—	—	—	—	—
	板厚 2 mm 以下(空气中)				18	10	18	30	20
	常态	—	—	—	12	—	12	10(250 ℃)	15(250 ℃)
	180 ℃±5 ℃	—	—	—	12	—	12	15	—
	受潮后	—	—	—	—	8	—	—	—
	板厚 2 mm 以上至 10 mm，加工到 2 mm±0.1 mm(空气中)	—	—						
16	平行板层击穿电压(kV)								
	板厚 10 mm 及以上(在 90 ℃±20 ℃的变压器油中试验，电极间中心距离为 15 mm)	10～32	>30	30～45①	—	10～40②	—	—	—

注：① 板厚 6 mm 以上。② 在空气中试验。

第二节　层　压　管

层压管的品种、组成、特性和用途见表 25－6。层压管的性能见表 25－7。

表 25－6　层压管的品种、组成、特性和用途

名　称	型号	组　成		耐热等级	特　性　和　用　途
		底材	胶粘剂		
酚醛纸管	3520	卷绕纸	苯酚甲醛树脂	E	电气性能好，适于作电机、电器绝缘结构件。可在变压器油中使用
	3522	卷绕纸	苯酚甲醛树脂	E	电气性能好，介质损耗较小。适于作无线电和电信装置中的绝缘结构件
	2523	卷绕纸	苯酚甲醛树脂	E	具有良好的机械加工性。适于作电机、电器的绝缘结构件，可在变压器油中使用
酚醛布管	3526	煮炼布	苯酚甲醛树脂	E	具有较高的机械强度和一定的电气性能。适于作电机、电器绝缘结构件，可在变压器油中使用
环氧酚醛玻璃布管	3640	无碱玻璃布	环氧酚醛树脂	B－F	具有高的电气性能和机械性能，耐潮性和耐热性较好。适于作电机、电器绝缘结构件，可在高电场强度、潮湿环境或变压器油中使用
有机硅玻璃布管	3650	无碱玻璃布	改性有机硅树脂	H	具有高的耐热性，耐潮性好。适于作 H 级电机、电器绝缘结构件

表 25－7　层压管的性能

序号	性能名称		酚醛纸管				酚醛布管	环氧酚醛玻璃布管	有机硅玻璃布管
			3520		3522	3523	3526	3640	3650
			内径 15mm 以下	内径 16 mm 以上					
1	相对密度	不小于	1.0	1.1	1.05	1.1	1.05	1.4	1.3
2	吸水率(%)				3～12		<4		
3	热稳定性(℃)	不低于	105(12 h)	105	—	105	130(4 小时)	—	200
4	耐油性(℃)(变压器油中经 4 h)		—	—	—	—	>130	—	—
5	抗弯强度(N/cm^2)		—	8 000～12 800	>80 000	—	8 000～12 200④	8 000～31 500	—
6	抗压强度(N/cm^2)		—	4 000～9 400	>5 000	—	4 500～14 300④	7 000～20 300	—
7	抗剪强度(N/cm^2)		—	—	—	—	—	1 500～2 700	—
8	表面电阻率(Ω) 常态		—	—	$>10^{10}$	—	10^9～10^{12}		$>10^{11}$
	受潮后		—	—	$>10^8$	—	10^7～10^{11}		$>10^{10}$
9	体积电阻率(Ω·cm) 常态		—	—	$>10^{12}$	—	10^9～10^{13}	10^{12}～10^{14}	$>10^{13}$
	受潮后		—	—	$>10^9$	—	10^7～10^{12}	10^{10}～10^{11}(浸水后)	$>10^{10}$
10	平行层向绝缘电(Ω) 常态							$>10^{10}$	
	浸水后							$>10^7$	
	介质损耗角正切 50(Hz) 常态		—	<0.03	<0.05②,<0.04③	—	—	<0.03	<0.035
	受潮后		—	—	<0.08②,<0.06③	—	—	—	<0.1
	180 ℃±2 ℃		—	—	—	—	—	—	<0.3
11	相对介电系数(10^6 Hz)		—	—	9	—	—	—	—

续表

序号	性能名称	酚醛纸管				酚醛布管	环氧酚醛玻璃布管	有机硅玻璃布管
		3520		3522	3523	3526	3640	3650
		内径 15mm 以下	内径 16 mm 以上					
12	垂直壁层耐电压(kV)	11	—	—	—	—	—	—
	(90 ℃±2 ℃变压器油中试验 5 min)不小于	—	16	—	16	—	12	—
	壁厚 1.0 mm	22	20	—	20	—	14	10
	壁厚 1.5 mm	—	22	—	22	—	16	—
	壁厚 2.0 mm	27	24	—	24	—	18	15
	壁厚 2.5 mm	34 ①	28	—	28	—	20	18 ⑤
	壁厚 3.0 mm	38	32	—	32	—	24	20
	壁厚 4.0 mm	39	36	—	36	—	28	22
	壁厚 5.0 mm	43	40	—	40	—	32	24
	壁厚 6.0 mm	48	44	—	44	—	36	26
	壁厚 7.0 mm	—	48	—	48	—	40	
	壁厚 8.0 mm			—				
13	壁厚 9.0 mm							
	平行于壁层耐电压(kV)　不小于	—	25	—	25	—	25	
	(壁厚 10 mm 及以上;90 ℃±2 ℃变压器油	—	12	—	12	—	12	—
14	中试验 5 min)							—
15	表面耐电压(kV)受潮后　不小于							
	垂直壁层击穿强度(kV/mm)							
	(在变压器油中)　不小于	—		6	—	3.5	—	—
	20 ℃±5 ℃	—	—	—	—	2	—	—
	90 ℃±5 ℃							

注:① 垂直于壁层耐电压在 20 ℃±5 ℃变压器油中试验 5 min。

② 壁厚 1.5 及小于 1.5 mm 者,在 10^6 Hz 测量。

③ 壁厚大于 1.5 mm 者在 10^6 Hz 测量。

④ 系内径为 50 mm 及小于 50 mm 者。

⑤ 常态下进行 1 min。

第三节　电容套管芯

套管芯是以绝缘卷缠纸为基材，浸涂合成树脂的上胶纸，卷制时按图纸规定的直径加入涂胶铝箔作为电极，烘焙热处理后加工到图纸规定的尺寸而成。套管芯表面浸涂防潮耐油绝缘漆。套管芯实质上是一组以胶纸为电介质，以铝箔为电极的串联电容器，接入高压电场中起均压作用。高压套管35 kV以下多用纯瓷和充油套管，35 kV及以上多用胶纸套管芯。随着全封闭电器的发展，充气套管和浇注树脂套管正在发展。高压套管的分类见表25－8。

表25－8　高压套管的分类

分类特征		类　别	说　明
主绝缘结构	电容式	胶　纸	以胶纸作为主绝缘材料并在内部设置若干电极以均匀电场分布的套管
		油　纸	以油浸纸作为主绝缘材料并在内部设置若干电极以均匀电场分布的套管
		浇注树脂	以浇注树脂作为主绝缘材料并在内部设置若干电极以均匀电场分布的套管
		气体或绝缘液体	以气体或绝缘液体作为主绝缘材料并在内部设置若干电极以均匀电场分布的套管
		复合式	兼有电容部分和非电容部分的充气、充液或充树脂套管
	非电容式	气体绝缘	瓷套内部充六氟化硫(SF_6)等压缩气体做主绝缘的套管
		液体绝缘	瓷套内部充绝缘油作为主绝缘的套管
		浇注树脂绝缘	仅以树脂(或兼以空气)作内外绝缘的套管
		纯　瓷	仅以电瓷(或兼以空气)作内外绝缘的套管

第四节　覆铜箔板

覆铜箔板有硬质板和柔性板两大类品种。硬质板是指由上胶的底材与铜箔叠合后，热压成型的印刷电路基板。柔性板是由上胶的薄膜与铜箔复合制成的柔性印刷电路基板。覆铜箔酚醛纸板有热冲型和冷冲型两种，热冲型有CPFCP01、CPFCP03、CPFCP05F、CPFCP07F四种产品，冷冲型有CPFCP02、CPFCP03、CPFCP06F、CPFCP08F四种产品。其中，CPFCP05F～CPFCP08F是属于自熄型，耐燃性好。环氧板具有较高的电气性能、力学性能，耐热性高于酚醛纸板。各种覆铜箔板广泛用作电气、电子设备的印刷电路板，各种覆铜箔板的性能见表25－9。

表 25－9　各种覆铜箔板的性能

性　　能	酚醛覆铜箔板					环氧覆铜箔板		
	CPFCP 01～02	CPFCP 03～04	CPFCP 05F～06F	CPFCP 07F～08F	P－112 (FR－2)	CEPCP 21～22F	CEPCP 31～32F	P－124 (FR－4)
铜箔电阻(MΩ,最大值)								
152 g/m²	≤3.5	≤3.5	≤3.5	≤3.5	—	≤3.5	≤3.5	—
305 g/m²	≤1.75	≤1.75	≤1.75	≤1.75	—	≤1.75	≤1.75	—
表面电阻(MΩ,最小值)								
常态	>10 000	>10 000	>10 000	>1 000	>10 000	>20 000	>50 000	>10 000
100 ℃	>100	>100	>100	>30	>1 000	>1 000	>1 000(125℃)	>1 000
相对介电常数(1 MHz,不小于)	<5.5	—	<5.5	<5.5	<5	<5	<5	<5.5
损耗角正切(1 MHz,不大于)	<0.05	—	<0.05	<0.07	<0.04	<0.05	<0.035	<0.030
拉脱强度(N,最小值)	≥50	≥50	≥50	≥50	—	≥60	≥60	—
剥离强度(N/mm,最小值)								
105 热冲击后、100 ℃干热后	≥1.0	≥1.0	≥1.0	≥1.0	>1.2	>1.2	—	>1.6
205 热冲击后、125 ℃干热后	—	—	—	—	—	—	>1.1* >1.4**	—
暴露于氯乙烯蒸气后 152 g/m²	≥1.0	≥1.0	≥1.0	≥1.0	—	>1.2	≥1.1	—
305 g/m²	≥1.0	≥1.0	≥1.0	≥1.0	—	≥1.2	≥1.4	—
模拟电镀条件处理后 152 g/m²	≥0.6	—	≥0.6	≥0.6	—	≥0.8	≥0.9	—
305 g/m²	≥0.1	—	≥0.6	≥0.6	—	≥0.8	≥0.11	—
可焊性(s)					>10***			>20***
润湿试验后								
1 板厚<1.6 mm 铜箔 152 g/m²	>2	—	—	>2		>2	>2	
2 板厚 ≥1.6 mm 铜箔 305 g/m²	>3	—	—	>3		>3	>3	
半润湿试验后	5^{+1}_{0}	—	—	5^{+1}_{0}		5^{+1}_{0}	5^{+1}_{0}	

* 铜箔为 152 g/m²。　** 铜箔为 305 g/m²。　*** 在 260 ℃时的可焊性。

第五节 层 压 棒

层压棒的组成、性能和用途见表 25－10。

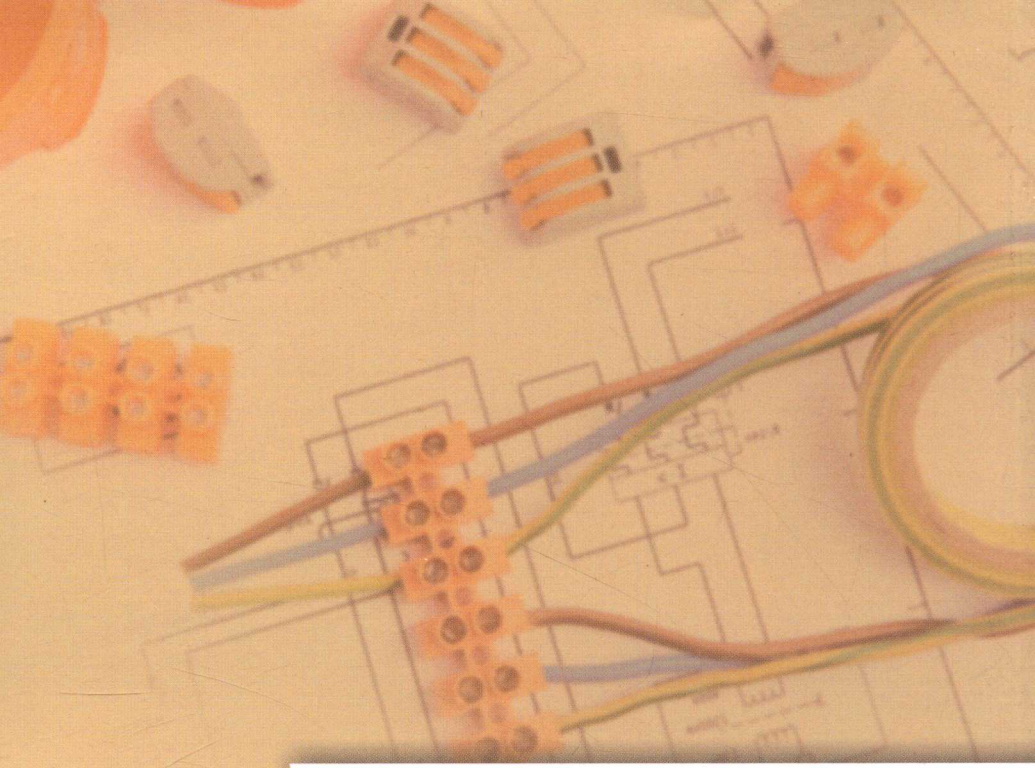
表 25－10 层压棒的组成、性能和用途

名 称	耐热等级	相对密度	吸水率(%)	耐油性①(℃)	抗弯强度(N/cm^2)	抗张强度(N/cm^2)	平行层向绝缘电阻(Ω)		平行层向击穿电压(kV)(在变压器油中)		性能和用途
							常态	浸水后	20 ℃±5 ℃	90 ℃±2 ℃	
酚醛纸棒 3720	E	1.25	—	105	10 000～25 000	7 000～16 000	$>10^{10}$②	—	8～22③	—	具有一定的电气性能和机械性能。适于作电机、电器及其他电工设备中的绝缘结构件，并可在变压器油中使用
酚醛布棒 3721	E	1.25	<10.0	—	12 000～18 000	8 000～17 000	$>10^{8}$	—	10～40	—	具有较好的电气性能和机械性能。适于作电机、电器及其他电工设备的绝缘结构件，并可在变压器油中使用
环氧酚醛玻璃布棒 3840	B、F	1.75～2.00	—	—	35 000～56 000	20 000～42 000	10^{10}～10^{12}	10^{7}～10^{10}	—	15～30	具有良好的电气性能和机械性能。适于作电机、电器及其他电工设备中的绝缘结构件，可在湿热地区或变压器油中使用

注：① 在变压器油中 4 h；
② 系内电阻率，单位为 Ω·cm；
③ 电极间距为10 mm。

参 考 文 献

1 《电工实用手册》编委会组织编写. 电工实用手册. 北京：化学工业出版社，2014
2 谢秀颖. 实用电工工具与电工材料速查手册. 北京：机械工业出版社，2012
3 邱立功. 实用电工材料手册. 上海：上海科学技术出版社，2010
4 万英. 电工手册. 北京：中国电力出版社，2013
5 曾正明. 电工材料速查手册. 北京：机械工业出版社，2006
6 方大千，方亚敏. 实用电工材料速查手册. 北京：化学工业出版社，2013
7 林丛. 常用电线电缆选用手册. 北京：化学工业出版社，2011



责任编辑：叶兆恺

POINT 圆点文化
封面设计 王艳

上架建议：电工实用技术

ISBN 978-7-5337-7487-5

定价：59.00元