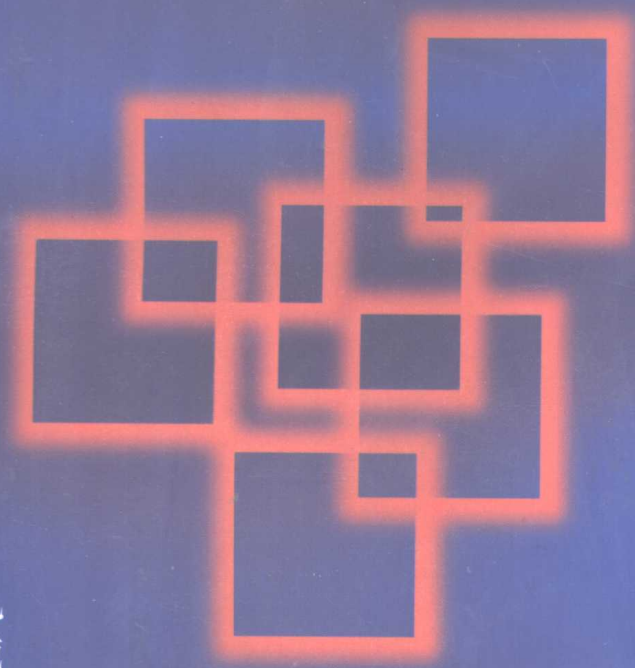


# 电工材料应用手册

《电工材料应用手册》编委会 编



机械工业出版社



电工材料产品的快速发展和提高,使电工材料的选择和应用成为一个重要的问题,为此编写了这本实用性强的工具书。手册中包括导电材料、电工合金材料、磁性材料、电碳制品、半导体材料、绝缘材料、特种电工材料、电线电缆及附件和金具、绝缘子及其材料等共9章。手册全面系统地汇集了我国电工材料产品品种、性能、应用范围及技术,并可帮助用户正确选择和应用电工材料。

本书可供电气工程技术人員、电工材料的供销人員及大专院校相关专业的师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电工材料应用手册/《电工材料应用手册》编委会编.  
—北京:机械工业出版社,1999.2  
ISBN 7-111-06919-6

I.电… II.电… III.电工材料—手册 IV.TM2-62

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第30226号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑:张沪光 王中玉 版式设计:张世琴  
责任校对:姚培新 魏俊云 封面设计:方 芬  
责任印制:路 琳  
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
1999年3月第1版第1次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·72.5印张·2插页·2478千字  
0 001—5 000册  
定价:108.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

# 《电工材料应用手册》编委会

主任委员：曹亚琴

副主任委员：刘伯宁

委员：曹亚琴 刘伯宁 吴炳川 范载云 陈治明  
张志刚 史久熙 沈光汉 周美龙 章思俊

主 编：刘伯宁

副 主 编：吴炳川

|          |     |                |                 |            |
|----------|-----|----------------|-----------------|------------|
| 编 审 人 员： | 第一章 | 导电材料           | 沈建华             | 编          |
|          | 第二章 | 电工合金材料         | 戚 颖 张万胜 沈泮龙     |            |
|          |     |                | 陈秀琴 陈长基 梁少娥     |            |
|          |     |                | 杨志远             | 编 刘伯宁 邵清 审 |
|          | 第三章 | 磁性材料           | 章思俊 詹亚萍 金瑞湘 孙桂琴 | 编          |
|          | 第四章 | 电碳制品           | 吴海兴             | 编 周美龙 审    |
|          | 第五章 | 半导体材料          | 陈治明 俞 萍         | 编 张志刚 审    |
|          | 第六章 | 绝缘材料           | 吴炳川 蒋蕴菊         | 编 曹亚琴 审    |
|          | 第七章 | 特种电工材料         | 王寿泰             | 编          |
|          | 第八章 | 电线电缆及<br>附件和金具 | 王春江             | 编 范载云 审    |
|          | 第九章 | 绝缘子及其材料        | 徐如恬             | 编 沈光汉 审    |

# 前 言

电工材料是功能性基础材料，是电气、电子工业赖以生存和发展的物质基础。新型电工材料的开发与应用，是推动电气产品发展品种、提高性能和扩大应用范围的重要因素，并对保证电气产品高可靠性和达到预期使用寿命具有决定性的作用。电工材料的发展与应用水平已成为衡量一个国家电气工业发展水平的标志。

我国电工材料工业发展很快，现在能生产近 3000 种电工材料产品，其中 200 多种产品已有一定数量的出口，销往 80 多个国家和地区。这标志着我国电工材料已具有相当生产规模和一定出口能力，已成为世界上电工材料的主要生产国和消费国之一。

现在我国采用的电工材料绝大部分都是国产材料，国产电工材料为我国大型发电机组、超高压输变电设备、新型和特种中小型电机和高性能低压电器的发展，电站和大电网的建设、城网改造、铁道电气高速化及航天和军用电气产品的现代化等，起着重要的物质保证作用；有力地促进了电子产品、通信产品和家电产品等新兴产业的崛起；对我国经济建设和加强机电产品出口能力做出了重要的贡献。

电工材料产品的快速发展和提高，使电工材料的选择和应用成为一个极其重要的课题。编写本手册的目的就是为读者提供一部实用性强的工具书。本手册全面系统地汇总归纳了我国电工材料产品品种、性能、应用范围及技术；并展示了我国电工材料的技术水平、成就和当今的国际水平；帮助读者或用户正确选择和应用电工材料，加快新型电工材料的推广应用，不断提高我国电气产品的技术水平和市场竞争力。

本手册包括导电材料、电工合金材料、磁性材料、电碳制品、半导体材料、绝缘材料、特种电工材料、电线电缆及附件和金具、绝缘子及其材料等共 9 章，分别由国内有关权威单位负责编写，是新形势下各单位共同协作的结果。

愿本手册成为广大读者的益友，成为电气工作者选择和使用电工材料的助手，成为电工材料营销工作者的购销指南，成为国外同行了解中国电工材料的桥梁和纽带。

# 目 录

前言

## 第1章 导电材料

|                              |   |
|------------------------------|---|
| 1.1 概述 .....                 | 1 |
| 1.1.1 导电金属的电阻 .....          | 1 |
| 1.1.2 导电合金的强化 .....          | 2 |
| 1.2 导电材料的品种与性能 .....         | 2 |
| 1.2.1 铜 .....                | 2 |
| 1.2.2 铜合金 .....              | 3 |
| 1.2.3 铝 .....                | 4 |
| 1.2.4 铝合金 .....              | 5 |
| 1.2.5 金、银及银合金 .....          | 5 |
| 1.2.6 复合导电金属 .....           | 6 |
| 1.3 导电材料的应用范围及<br>应用技术 ..... | 6 |
| 1.3.1 导电纯金属的主要用途 .....       | 6 |
| 1.3.2 导电铜合金的应用 .....         | 7 |
| 1.3.3 导电铝合金的应用 .....         | 7 |
| 1.3.4 复合导电金属的主要用途 .....      | 7 |

## 第2章 电工合金材料

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 2.1 概述 .....                     | 9  |
| 2.1.1 电工合金分类 .....               | 9  |
| 2.1.2 电工合金行业状况及发展趋势 .....        | 9  |
| 2.2 电触头材料 .....                  | 9  |
| 2.2.1 概况 .....                   | 9  |
| 2.2.2 电触头材料的品种与物理性能 .....        | 10 |
| 2.2.3 电触头材料应用 .....              | 18 |
| 2.2.4 国外电触头材料简介 .....            | 34 |
| 2.3 电热材料 .....                   | 38 |
| 2.3.1 概况 .....                   | 38 |
| 2.3.2 电热合金的品种特性及技术<br>性能参数 ..... | 40 |
| 2.3.3 电热合金的应用 .....              | 43 |
| 2.3.4 由电热合金制成的电热元件 .....         | 54 |
| 2.3.5 非金属电热材料 .....              | 59 |
| 2.3.6 电热合金参数 .....               | 71 |
| 2.4 热双金属材料 .....                 | 84 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 2.4.1 概况 .....                    | 84  |
| 2.4.2 热双金属的性能及品种 .....            | 86  |
| 2.4.3 热双金属的应用 .....               | 121 |
| 2.5 熔体材料 .....                    | 133 |
| 2.5.1 概况 .....                    | 133 |
| 2.5.2 熔体材料的品种、特性及技术<br>性能参数 ..... | 139 |
| 2.5.3 熔体材料的应用 .....               | 143 |
| 2.6 热电偶材料 .....                   | 149 |
| 2.6.1 概况 .....                    | 149 |
| 2.6.2 热电偶材料的品种及性能 .....           | 151 |
| 2.6.3 热电偶材料的应用 .....              | 163 |
| 2.6.4 热电偶用补偿导线 .....              | 165 |
| 2.6.5 热电偶材料的应用技术 .....            | 168 |
| 2.7 电阻材料 .....                    | 171 |
| 2.7.1 概况 .....                    | 171 |
| 2.7.2 调节元件用电阻合金 .....             | 172 |
| 2.7.3 精密仪器仪表用电阻合金 .....           | 179 |
| 2.7.4 应变计用电阻合金 .....              | 187 |
| 2.7.5 薄膜电阻材料 .....                | 190 |
| 2.7.6 厚膜电阻浆料 .....                | 194 |
| 2.7.7 有关电阻材料部分术语 .....            | 204 |
| 2.8 附录 .....                      | 206 |
| 附录A 电工合金材料部分标准目录 .....            | 206 |
| 附录B 电工合金材料生产企业名录 .....            | 206 |
| 参考文献 .....                        | 207 |

## 第3章 磁性材料

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 3.1 概述 .....          | 209 |
| 3.1.1 磁性材料的分类 .....   | 209 |
| 3.1.2 磁性材料行业状况 .....  | 210 |
| 3.1.3 磁性材料的发展动向 ..... | 211 |
| 3.2 磁性材料的品种与性能 .....  | 212 |
| 3.2.1 软磁材料 .....      | 212 |
| 3.2.2 永磁材料 .....      | 228 |
| 3.2.3 磁存储、磁记录材料 ..... | 248 |
| 3.2.4 特殊磁性材料 .....    | 262 |
| 3.3 磁性材料的应用 .....     | 276 |
| 3.3.1 永磁材料的应用 .....   | 276 |

## VIII 目录

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 3.3.2 软磁材料的应用 .....      | 286 |
| 3.3.3 磁存储、磁记录材料的应用 ..... | 289 |
| 3.3.4 其他磁性材料的应用 .....    | 297 |
| 3.4 附录 .....             | 301 |
| 附录 A 永磁材料标准目录 .....      | 301 |
| 附录 B 磁性材料生产企业名录 .....    | 301 |

## 第4章 电碳制品

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 4.1 概述 .....                         | 303 |
| 4.1.1 电碳制品的分类 .....                  | 303 |
| 4.1.2 电碳制品行业状况 .....                 | 304 |
| 4.1.3 电碳制品的发展动向 .....                | 304 |
| 4.2 电碳制品的品种与性能 .....                 | 305 |
| 4.2.1 电机用电刷 .....                    | 305 |
| 4.2.2 碳棒 .....                       | 319 |
| 4.2.3 碳石墨触点 .....                    | 323 |
| 4.2.4 电子管用高纯石墨制品 .....               | 325 |
| 4.2.5 电火花加工用石墨电极 .....               | 325 |
| 4.2.6 碳电阻片柱 .....                    | 326 |
| 4.2.7 送话器用碳砂 .....                   | 328 |
| 4.3 电碳制品的应用范围及<br>应用技术 .....         | 328 |
| 4.3.1 电机用电刷 .....                    | 328 |
| 4.3.2 碳棒的应用范围及应用技术 .....             | 337 |
| 4.3.3 碳石墨触点的应用范围及<br>应用技术 .....      | 341 |
| 4.3.4 电子管用高纯石墨制品的应用<br>范围及应用技术 ..... | 342 |
| 4.3.5 电火花加工用石墨电极的应用<br>范围及应用技术 ..... | 342 |
| 4.3.6 碳电阻片柱的应用范围<br>及应用技术 .....      | 342 |
| 4.3.7 送话器用碳砂的应用范围<br>及应用技术 .....     | 343 |
| 4.4 附录 电碳制品生产企业<br>名录 .....          | 343 |
| 参考文献 .....                           | 344 |

## 第5章 半导体材料

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 5.1 概述 .....              | 345 |
| 5.1.1 半导体材料的种类及应用范围 ..... | 346 |
| 5.1.2 半导体材料行业状况 .....     | 350 |
| 5.2 元素半导体 .....           | 352 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 5.2.1 元素半导体的发展概况 .....             | 352 |
| 5.2.2 表征硅、锗单晶性能的<br>基本参数 .....     | 352 |
| 5.2.3 硅材料的主要品种和规格 .....            | 353 |
| 5.2.4 元素半导体选用注意事项 .....            | 358 |
| 5.3 化合物半导体材料及固熔体 .....             | 362 |
| 5.3.1 化合物半导体材料的主要品种及<br>产品形式 ..... | 363 |
| 5.3.2 化合物半导体材料的性能及应用 .....         | 367 |
| 5.3.3 化合物半导体材料的选用<br>及注意事项 .....   | 372 |
| 5.4 非晶半导体材料 .....                  | 372 |
| 5.4.1 非晶半导体材料的主要品种及<br>产品形成 .....  | 373 |
| 5.4.2 非晶半导体材料的性能及应用 .....          | 373 |
| 5.4.3 非晶半导体材料的选用<br>及注意事项 .....    | 374 |
| 5.5 其他半导体材料 .....                  | 374 |
| 5.5.1 磁性半导体 .....                  | 374 |
| 5.5.2 有机半导体 .....                  | 375 |
| 5.6 半导体材料的质量检测及<br>验收方法 .....      | 375 |
| 5.6.1 晶格缺陷的观察和检测 .....             | 375 |
| 5.6.2 晶向与导电类型的识别与鉴别 .....          | 377 |
| 5.6.3 电阻率测量法 .....                 | 378 |
| 5.6.4 少子寿命测量法 .....                | 380 |
| 5.6.5 其他质检问题 .....                 | 381 |
| 5.7 附录 半导体材料主要<br>生产企业名录 .....     | 382 |
| 参考文献 .....                         | 383 |

## 第6章 绝缘材料

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.1 概述 .....             | 384 |
| 6.1.1 绝缘材料的功能与作用 .....   | 384 |
| 6.1.2 绝缘材料的分类与命名 .....   | 384 |
| 6.1.3 绝缘材料的发展现状与趋势 ..... | 384 |
| 6.1.4 绝缘材料的选择与应用 .....   | 385 |
| 6.2 气体电介质 .....          | 386 |
| 6.2.1 空气 .....           | 386 |
| 6.2.2 氮气 .....           | 387 |
| 6.2.3 六氟化硫 .....         | 388 |
| 6.2.4 混合气体 .....         | 389 |
| 6.2.5 气体电介质应用注意事项 .....  | 390 |
| 6.3 液体电介质 .....          | 393 |

|       |               |     |
|-------|---------------|-----|
| 6.3.1 | 液体电介质的性能要求与意义 | 393 |
| 6.3.2 | 矿物绝缘油         | 394 |
| 6.3.3 | 合成绝缘油         | 395 |
| 6.3.4 | 植物绝缘油         | 396 |
| 6.3.5 | 绝缘油应用注意事项     | 396 |
| 6.4   | 纤维材料与浸渍纤维制品   | 397 |
| 6.4.1 | 绝缘纱、丝         | 397 |
| 6.4.2 | 绝缘布、绸、毡       | 399 |
| 6.4.3 | 绝缘漆布与漆绸       | 403 |
| 6.4.4 | 电工用编织带        | 406 |
| 6.4.5 | 电工用无纬绑扎带      | 407 |
| 6.4.6 | 电工用粘带         | 408 |
| 6.4.7 | 电工用套管与漆管      | 410 |
| 6.4.8 | 电工用热收缩管       | 412 |
| 6.4.9 | 电工用绑扎绳与线      | 414 |
| 6.5   | 绝缘纸与纸板        | 414 |
| 6.5.1 | 植物纤维绝缘纸       | 414 |
| 6.5.2 | 合成纤维绝缘纸       | 422 |
| 6.5.3 | 电工用非织布        | 425 |
| 6.5.4 | 无机纤维绝缘纸       | 426 |
| 6.5.5 | 钢纸板           | 426 |
| 6.5.6 | 绝缘纸板          | 427 |
| 6.6   | 绝缘漆、胶和熔敷粉末    | 430 |
| 6.6.1 | 浸渍漆           | 430 |
| 6.6.2 | 漆包线漆与丝包线漆     | 437 |
| 6.6.3 | 覆盖漆           | 440 |
| 6.6.4 | 硅钢片漆          | 442 |
| 6.6.5 | 防电晕漆          | 444 |
| 6.6.6 | 浇封胶           | 444 |
| 6.6.7 | 绝缘熔敷粉末        | 453 |
| 6.7   | 层压制品          | 454 |
| 6.7.1 | 层压板           | 455 |
| 6.7.2 | 覆铜箔层压板        | 462 |
| 6.7.3 | 层压管           | 470 |
| 6.7.4 | 层压棒           | 471 |
| 6.7.5 | 引拔成型制品        | 471 |
| 6.7.6 | 真空压力浸胶制品      | 473 |
| 6.7.7 | 成型绝缘件         | 473 |
| 6.8   | 电工塑料与橡胶       | 476 |
| 6.8.1 | 热固性塑料         | 476 |
| 6.8.2 | 热塑性塑料         | 486 |
| 6.8.3 | 电线电缆用热塑性塑料    | 486 |
| 6.8.4 | 电工用橡胶         | 486 |
| 6.9   | 云母与云母绝缘制品     | 501 |

|        |                                        |     |
|--------|----------------------------------------|-----|
| 6.9.1  | 片云母                                    | 501 |
| 6.9.2  | 粉云母纸                                   | 502 |
| 6.9.3  | 云母粉                                    | 505 |
| 6.9.4  | 云母带                                    | 505 |
| 6.9.5  | 云母板                                    | 508 |
| 6.9.6  | 云母箔                                    | 514 |
| 6.9.7  | 云母管                                    | 515 |
| 6.9.8  | 云母陶瓷                                   | 515 |
| 6.10   | 电工塑料薄膜与柔软复合材料                          | 516 |
| 6.10.1 | 电工塑料薄膜                                 | 516 |
| 6.10.2 | 柔软复合材料                                 | 522 |
| 6.11   | 附录                                     | 528 |
| 附录 A   | 电气绝缘材料产品分类、命名及型号<br>编制方法 (JB/T2196—96) | 528 |
| 附录 B   | 我国现行绝缘材料国家标准和行业<br>标准目录                | 531 |
| 附录 C   | 国际电工委员会 (IEC) 现行<br>绝缘材料标准目录           | 535 |
| 附录 D   | 绝缘材料重量计算方法<br>及换算表                     | 541 |
| 附录 E   | 绝缘材料企业产品型号<br>及其说明                     | 543 |
| 附录 F   | 绝缘材料生产企业名录                             | 543 |
| 参考文献   |                                        | 545 |

## 第 7 章 特种电工材料

|       |               |     |
|-------|---------------|-----|
| 7.1   | 光电导材料         | 546 |
| 7.1.1 | 硒系光电导材料       | 546 |
| 7.1.2 | 有机光电导材料 (OPC) | 549 |
| 7.1.3 | 无定形硅系列光电导材料   | 557 |
| 7.2   | 铁电、压电和热释电材料   | 560 |
| 7.2.1 | 铁电材料          | 560 |
| 7.2.2 | 压电材料          | 567 |
| 7.2.3 | 热释电材料         | 576 |
| 7.2.4 | 压电和热电高分子材料    | 578 |
| 7.3   | 压敏与 PTC 材料    | 582 |
| 7.3.1 | 压敏陶瓷材料        | 582 |
| 7.3.2 | PTC 材料        | 584 |
| 7.4   | 快离子导体 (固体电解质) | 588 |
| 7.4.1 | 陶瓷快离子导体       | 588 |
| 7.4.2 | 高分子快离子导体      | 597 |
| 7.5   | 抗静电材料         | 600 |
| 7.5.1 | 抗静电剂及其作用机理    | 601 |
| 7.5.2 | 抗静电剂的分类与特征    | 602 |

## X 目录

|                                  |     |                           |      |
|----------------------------------|-----|---------------------------|------|
| 7.5.3 抗静电剂的应用 .....              | 605 | 8.5.14 加热电缆 .....         | 967  |
| 7.5.4 各种抗静电材料和制品 .....           | 606 | 8.5.15 补偿导线 .....         | 968  |
| 参考文献 .....                       | 613 | 8.5.16 特种电缆 .....         | 968  |
| <b>第8章 电线电缆及其附件<br/>和金具</b>      |     | 8.6 通信电缆 .....            | 969  |
| 8.1 概述 .....                     | 614 | 8.6.1 概况 .....            | 969  |
| 8.1.1 电线电缆的分类 .....              | 614 | 8.6.2 通信电缆的分类和适用范围 .....  | 969  |
| 8.1.2 电线电缆的基本特性 .....            | 614 | 8.6.3 通信电缆的选用和敷设 .....    | 1016 |
| 8.1.3 电线电缆的发展趋势 .....            | 614 | 8.7 通信光缆 .....            | 1017 |
| 8.2 裸电线 .....                    | 615 | 8.7.1 光纤概况 .....          | 1017 |
| 8.2.1 概况 .....                   | 615 | 8.7.2 光纤的分类 .....         | 1018 |
| 8.2.2 圆单线 .....                  | 615 | 8.7.3 光纤的特性 .....         | 1018 |
| 8.2.3 电线电缆铜、铝导电线芯 .....          | 629 | 8.7.4 光缆的结构 .....         | 1020 |
| 8.2.4 裸绞线 .....                  | 633 | 8.7.5 光缆的分类 .....         | 1021 |
| 8.2.5 软接线 .....                  | 643 | 8.7.6 光缆的主要品种、型号和用途 ..... | 1022 |
| 8.2.6 型线及型材 .....                | 651 | 8.7.7 光缆的光学和传输特性 .....    | 1023 |
| 8.2.7 架空导线的选用和安装维护<br>注意事项 ..... | 670 | 8.7.8 光缆的力学性能 .....       | 1024 |
| 8.3 绕组线 .....                    | 673 | 8.7.9 光缆的环境特性 .....       | 1024 |
| 8.3.1 概况 .....                   | 673 | 8.7.10 光缆的选用和敷设 .....     | 1024 |
| 8.3.2 漆包线 .....                  | 676 | 8.8 电线电缆附件和金具 .....       | 1025 |
| 8.3.3 绕包线 .....                  | 709 | 8.8.1 电力金具 .....          | 1025 |
| 8.3.4 无机绝缘绕组线 .....              | 753 | 8.8.2 电力电缆附件和金具 .....     | 1072 |
| 8.3.5 特种绕组线 .....                | 755 | 8.8.3 通信电缆和通信光缆的附件 .....  | 1094 |
| 8.3.6 绕组线的选用和注意事项 .....          | 759 | <b>第9章 绝缘子及其材料</b>        |      |
| 8.4 电力电缆 .....                   | 761 | 9.1 概述 .....              | 1096 |
| 8.4.1 概况 .....                   | 761 | 9.1.1 绝缘子材料的种类和主要特性 ..... | 1096 |
| 8.4.2 电力电缆的品种、型号、结构<br>和性能 ..... | 761 | 9.1.2 绝缘子材料行业概况 .....     | 1096 |
| 8.5 电气装备用电线电缆 .....              | 796 | 9.1.3 绝缘子材料的发展动向 .....    | 1097 |
| 8.5.1 概况 .....                   | 796 | 9.2 瓷绝缘子材料 .....          | 1097 |
| 8.5.2 固定敷设配电电线电缆 .....           | 798 | 9.2.1 瓷材料的种类和性能 .....     | 1097 |
| 8.5.3 通用供电软电线电缆 .....            | 803 | 9.2.2 决定瓷材料性能的因素 .....    | 1101 |
| 8.5.4 信号及控制电缆 .....              | 812 | 9.2.3 釉 .....             | 1104 |
| 8.5.5 仪器仪表、电子设备连接线 .....         | 819 | 9.3 直流瓷材料 .....           | 1105 |
| 8.5.6 电机绕组引接软电缆和软线 .....         | 831 | 9.3.1 直流瓷绝缘子使用的特殊性 .....  | 1105 |
| 8.5.7 公路车辆用电线电缆 .....            | 835 | 9.3.2 直流瓷材料的组成与特点 .....   | 1106 |
| 8.5.8 铁路机车车辆用电线电缆 .....          | 837 | 9.3.3 直流瓷材料的性能 .....      | 1106 |
| 8.5.9 船用电缆 .....                 | 842 | 9.4 瓷材料的应用 .....          | 1107 |
| 8.5.10 航空、航天用电线电缆 .....          | 903 | 9.4.1 瓷材料的选用 .....        | 1107 |
| 8.5.11 石油测井和开采电缆 .....           | 951 | 9.4.2 高压绝缘子瓷件的尺寸偏差 .....  | 1108 |
| 8.5.12 矿用电缆 .....                | 958 | 9.4.3 低压绝缘子瓷件的尺寸偏差 .....  | 1109 |
| 8.5.13 直流高压软电缆 .....             | 965 | 9.4.4 瓷件设计和制造中的几个原则 ..... | 1110 |
|                                  |     | 9.5 绝缘子的种类、用途和性能 .....    | 1110 |
|                                  |     | 9.5.1 高压线路绝缘子 .....       | 1110 |
|                                  |     | 9.5.2 高压支柱绝缘子 .....       | 1114 |

|                        |      |                                  |      |
|------------------------|------|----------------------------------|------|
| 9.5.3 高压电器瓷套 .....     | 1117 | 9.7.6 有机复合绝缘子使用注意事项 .....        | 1134 |
| 9.5.4 高压套管 .....       | 1118 | 9.8 电器设备用陶瓷材料 .....              | 1134 |
| 9.5.5 低压线路绝缘子 .....    | 1127 | 9.8.1 滑石瓷材料 .....                | 1134 |
| 9.5.6 电气化铁道用绝缘子 .....  | 1128 | 9.8.2 高铝瓷材料 .....                | 1135 |
| 9.5.7 绝缘子试验 .....      | 1128 | 9.8.3 灭弧罩陶瓷材料 .....              | 1137 |
| 9.6 玻璃绝缘子及其材料 .....    | 1131 | 9.8.4 电除尘器陶瓷材料 .....             | 1139 |
| 9.6.1 玻璃的钢化 .....      | 1131 | 9.8.5 高压高介陶瓷电容器材料 .....          | 1140 |
| 9.6.2 玻璃的组成与性能 .....   | 1131 | 9.8.6 陶瓷线性电阻 .....               | 1142 |
| 9.6.3 钢化玻璃绝缘子性能 .....  | 1132 | 9.9 附录 .....                     | 1143 |
| 9.7 有机复合绝缘子及其材料 .....  | 1132 | 附录 A  引用标准目录 .....               | 1143 |
| 9.7.1 有机复合绝缘子的特点 ..... | 1132 | 附录 B  国内绝缘子生产企业名录及<br>主要产品 ..... | 1144 |
| 9.7.2 芯棒材料 .....       | 1133 | 附录 C  国外主要绝缘子生产企业及<br>主要产品 ..... | 1146 |
| 9.7.3 伞裙材料 .....       | 1133 | 参考文献 .....                       | 1147 |
| 9.7.4 粘接层（界面体）材料 ..... | 1134 |                                  |      |
| 9.7.5 有机复合绝缘子性能 .....  | 1134 |                                  |      |

# 第 1 章 导 电 材 料

## 1.1 概述

用作导电材料的金属应具有高的导电性、足够的机械强度、不易氧化、不易腐蚀、容易加工和焊接等特性,还要考虑资源情况。铜、铝及其合金是最常用的导电金属,某些特殊场合,也采用贵金属等其他金

属。导电纯金属的主要特性见表 1-1。

铜是最早广泛应用的导电材料,具有良好的导电性和力学性能。铝的电导率约为铜的 62%,密度为铜的 33%。铝的比强度(强度与密度之比),比铜高约 30%。电阻相同时,铝截面积为铜截面积的 168%,而铝的重量只有铜的 54%。

表 1-1 导电纯金属的主要特性

| 名称 | 符号 | 密度<br>(20°C)/g·cm <sup>-3</sup> | 熔点<br>/°C | 抗拉强度<br>/N·mm <sup>-2</sup> | 电阻率 (20°C)<br>/Ω·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> | 电导率 <sup>①</sup> (20°C)<br>/% IACS | 电阻温度系数 (20°C)<br>/10 <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup> |
|----|----|---------------------------------|-----------|-----------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 银  | Ag | 10.5                            | 960.5     | 147                         | 0.0162                                            | 106                                | 3.80                                                 |
| 铜  | Cu | 8.89                            | 1083      | 196                         | 0.0172                                            | 100                                | 3.93                                                 |
| 金  | Au | 19.3                            | 1063      | 98                          | 0.0240                                            | 71.6                               | 3.40                                                 |
| 铝  | Al | 2.7                             | 660       | 78                          | 0.0282                                            | 61.0                               | 4.87                                                 |
| 钠  | Na | 0.97                            | 97.8      | —                           | 0.0460                                            | 37.4                               | 5.40                                                 |
| 钨  | W  | 19.3                            | 3370      | 1079                        | 0.0548                                            | 31.4                               | 4.50                                                 |
| 钼  | Mo | 10.2                            | 2600      | 882                         | 0.0558                                            | 30.8                               | 3.30                                                 |
| 锌  | Zn | 7.14                            | 419.4     | 147                         | 0.0610                                            | 28.2                               | 3.70                                                 |
| 镍  | Ni | 8.9                             | 1452      | 392                         | 0.0690                                            | 24.9                               | 6.00                                                 |
| 铁  | Fe | 7.86                            | 1535      | 245                         | 0.100                                             | 17.2                               | 5.00                                                 |
| 铂  | Pt | 21.45                           | 1755      | 147                         | 0.105                                             | 16.4                               | 3.00                                                 |
| 锡  | Sn | 7.35                            | 232       | 24.5                        | 0.114                                             | 15.1                               | 4.20                                                 |
| 铅  | Pb | 11.37                           | 327.5     | 15.7                        | 0.219                                             | 7.9                                | 3.90                                                 |
| 汞  | Hg | 13.55                           | —38.9     | —                           | 0.958                                             | 1.8                                | 0.89                                                 |

① 1913 年国际电工委员会规定,退火工业纯铜在 20°C 时的电阻率等于 0.017241Ω·mm<sup>2</sup>/m,以 100% IACS 表示。IACS 即指国际退火工业纯铜标准。

现代科学技术的发展要求某些导电材料不但具有良好的导电性,且兼有高的强度、硬度和耐热、耐蚀、耐磨等综合特性。因此,不同用途的导电铜合金、铝合金和复合金属导体随之迅速发展。

导电合金的导电性能低于相应纯金属,而强度及耐热等性能却显著提高。

通过一定的复合工艺,将两种或两种以上的不同金属制成的复合导体,有许多独特的优点:高强度、高硬度、高弹性,好的耐磨、耐热、耐蚀和导热性,特殊的磁性和热胀系数等。

### 1.1.1 导电金属的电阻

电阻是衡量金属导电能力的重要指标和设计选用导电金属的主要参数。金属的电阻常以电阻率  $\rho$  (Ω·mm<sup>2</sup>/m) 表示

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

式中  $R$  ——导体电阻 (Ω);  
 $S$  ——导体截面 (mm<sup>2</sup>);  
 $L$  ——导体长度 (m)。

在交流情况下,导体中产生交变磁场,电流不是

均匀地分布在整个导体截面上。愈接近表面，电流密度愈大，这就是集肤效应。为减小集肤效应的影响，可减小单线直径及采用绞线或空心线等结构。频率较高时，表面可镀覆高导电金属银等材料。

影响电阻的主要因素是：

1. 温度 金属的电阻随温度升高而增大。一般情况下，电阻与温度呈如下线性关系：

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0(T - T_0)}$$

式中  $R$  ——温度  $T$  时的电阻；

$R_0$  ——温度  $T_0$  时的电阻；

$\alpha$  ——电阻温度系数。

2. 合金元素及杂质 合金元素及杂质会导致金属晶格畸变，电阻增加。其影响程度，分如下三种情况：

1) 对基体金属的影响。与元素或杂质的含量〔摩尔分数(%)〕及其同基体金属的价电子差数有关。

2) 元素或杂质与基体金属的原子半径之差愈大，晶格畸变及电阻增加愈大。

3) 元素或杂质在基体金属中形成固溶体时，电阻显著增加；形成两相混合物时，电阻的变化为一直线。

3. 冷变形 纯金属由冷变形引起的电阻增加，一般不超过4%，合金稍高。

4. 热处理 金属冷变形引起强度和硬度增加，导电性及塑性降低。退火可恢复其性能。退火温度过高或加热时间过长，金属力学性能变坏，但电阻变化不显著。

1.1.2 导电合金的强化

导电合金的强化，用以提高强度和耐热等性能，

尽可能保持高的导电性。常用方法有如下三种：

1. 固溶强化 合金元素均匀地溶解在基体金属中形成置换固溶体时，合金保持基体金属的晶格。因溶质和溶剂金属原子半径不同，造成晶格畸变，金属的硬度、强度和电阻升高，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大，电导率随之降低。

2. 时效强化 用淬火和时效以提高合金强度。其效果与时效过程中析出的强化相性质、数量和分布状态有关。强化相数量一定，强化相质点的弥散度愈大，合金的强化程度也愈大。固溶处理后进行强烈的冷变形，则时效强化的效果更大。

3. 弥散强化 弥散强化的质点是在制造过程中加入的金属氧化物微粒或极细的纤维。氧化物在高温下不溶解于基体金属，因而这类合金具有更好的耐热性，接近熔点时，仍有相当高的强度。机械混合的氧化物含量不高，对基体金属晶格畸变影响小，因此具有较好的导电性。

1.2 导电材料的品种与性能

1.2.1 铜

铜具有高的导电性和导热性，足够的机械强度，良好的耐蚀性，无低温脆性，易于压力加工，便于焊接，是最广泛应用的导电材料。

电线电缆及导电零件一般选用含铜量（质量分数）大于99.90%的工业纯铜。无氧铜用于电真空器件、电子仪器的零件，耐高温导体、超导线的复合基体和微细线等。无磁性高纯铜漆包线用于高精密电器仪表的动圈。导电用铜的品种、成分见表1-2，主要性能参数见表1-3。

表 1-2 导电用铜的品种和成分

| 组别     | 牌 号 | 代号 | 化学成分（质量分数）（%） |       |    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |          |
|--------|-----|----|---------------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----------|
|        |     |    | Cu+Ag<br>≥    | 杂 质 ≤ |    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |          |
|        |     |    |               | P     | Ag | Bi    | Sb    | As    | Fe    | Ni    | Pb    | Sn    | S     | Zn    | O    | 杂质<br>总和 |
| 纯<br>铜 | 一号铜 | T1 | 99.95         | 0.001 | —  | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.005 | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 0.005 | 0.005 | 0.02 | 0.05     |
|        | 二号铜 | T2 | 99.90         | —     | —  | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.002 | 0.005 | 0.005 | 0.06 | 0.1      |
|        | 三号铜 | T3 | 99.70         | —     | —  | 0.002 | 0.005 | 0.01  | 0.05  | 0.2   | 0.01  | 0.05  | 0.01  |       | 0.1  | 0.3      |

(续)

| 组别   | 牌 号    | 代 号                | 化学成分 (质量分数) (%) |                 |           |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          |
|------|--------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|      |        |                    | 杂 质 ≤           |                 |           |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          |
|      |        |                    | Cu+Ag<br>≥      | P               | Ag        | Bi    | Sb    | As    | Fe    | Ni    | Pb    | Sn    | S     | Zn    | O     | 杂质<br>总和 |
| 无氧铜  | 一号无氧铜  | TU1                | 99.97           | 0.002           |           | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.004 | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.03     |
|      | 二号无氧铜  | TU2                | 99.95           | 0.002           |           | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.004 | 0.002 | 0.004 | 0.002 | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.05     |
| 磷脱氧铜 | 一号脱氧铜  | TP1                | 99.90           | 0.005~<br>0.012 |           | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.01  | 0.005 | 0.005 | 0.002 | 0.005 | 0.005 | 0.01  | 0.1      |
|      | 二号脱氧铜  | TP2                | 99.85           | 0.013~<br>0.050 |           | 0.002 | 0.002 | 0.005 | 0.05  | 0.01  | 0.005 | 0.01  | 0.005 |       | 0.01  | 0.15     |
| 银铜   | 0.1 银铜 | T <sub>Ag0.1</sub> | Cu99.5          |                 | 0.06~0.12 | 0.002 | 0.005 | 0.01  | 0.05  | 0.2   | 0.01  | 0.05  |       |       | 0.1   | 0.3      |

表 1-3 导电用铜的主要性能

|                 |                                                      |            |
|-----------------|------------------------------------------------------|------------|
| 熔点              | /°C                                                  | 1084.5     |
| 密度(20°C)        | /g·cm <sup>-3</sup>                                  | 8.89       |
| 比热容(20°C)       | /J·(kg·K) <sup>-1</sup>                              | 385        |
| 比能              | /J·kg <sup>-1</sup>                                  | 212000     |
| 热导率(20°C)       | /W(m·K) <sup>-1</sup>                                | 386        |
| 线膨胀系数(20~100°C) | /10 <sup>-6</sup> ·K <sup>-1</sup>                   | 16.6       |
| 电阻率(20°C)       | /10 <sup>-2</sup> Ω·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> | 软态 1.7241  |
|                 |                                                      | 硬态 1.777   |
|                 |                                                      |            |
| 电阻温度系数(20°C)    | /10 <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>                  | 软态 3.93    |
|                 |                                                      | 硬态 3.81    |
|                 |                                                      |            |
| 弹性模量(20°C)      | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 112770     |
| 屈服强度            | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 软态 59~79   |
|                 |                                                      | 硬态 294~372 |
| 抗拉强度            | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 软态 196~235 |
|                 |                                                      | 硬态 343~441 |
| 疲劳极限            | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 软态 56~69   |
|                 |                                                      | 硬态 108~118 |
| 蠕变极限            | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 20°C 68    |
|                 |                                                      | 200°C 49   |
|                 |                                                      | 400°C 14   |
| 伸长率             | (%)                                                  | 软态 30~50   |
|                 |                                                      | 硬态 >0.5    |
| 硬度              | (HV)                                                 | 软态 <48     |
|                 |                                                      | 硬态 90~136  |

室温干燥空气中，铜几乎不氧化；温度达 100°C 时，表面生成黑色氧化铜膜；高于 300°C 时，生成红色氧化亚铜膜；600°C 以上时，则强烈氧化，接触电阻增加，严重时导致连接处局部烧熔。铜与硫化物生成的深绿色保护膜能降低腐蚀速度。在含有大量二氧

化硫、硫化氢、硝酸、氨和氯等气体的场合，铜会强烈腐蚀，氯气影响尤为严重。

1.2.2 铜合金

铜合金广泛用于接触导线、换向器、集电环、刀开关、导电嘴等。选用时，应考虑实际运行及长期使用所具备的综合特性，且易于加工。

1. 银铜 银铜强度高、抗蠕变、耐磨、耐腐蚀。含银量随用途而异，直流电机换向器用换向片及电线，一般含银（质量分数）0.06%~0.25%；集电环等导电零件，含银（质量分数）5%~20%。

2. 镉铜 镉铜具有良好导电、导热、耐磨及抗蚀性。冷变形后硬度可达 HV140，但在 250°C 以上明显软化。用作焊接铝或铝合金的电焊机电极时，应加强冷却，以提高使用寿命，镉污染环境。

3. 铈铜 铈铜生产工艺及使用特性类似银铜，可予替代，以节约银。

4. 锆铜 锆铜软化温度高达 500°C，能经受 800°C 的高温封接。

5. 铬铜 铬铜具有好的导电、导热性，用作电阻焊电极，能在 450~475°C 的温度下安全工作。

6. 铬锆铜 铬锆铜是用于焊接低碳钢的最佳电极合金之一，热处理后，能提高常温及高温下的力学性能。

7. 铍铜 铍铜具有高强度、高硬度、弹性滞后小、弹性稳定性好、耐蚀、耐磨、耐疲劳、无撞击火花、无磁性等特点。铍在铜中有极强的时效强化效果。铍的氧化物和氟化物剧毒，大气中的微量粉尘即能使人患铍肺炎。

8. 镍硅铜 含有镍、硅、铬的镍硅铜，国产的称为 841 合金，美国的称为 Ampcoloy940 合金。经热处理等加工，可获近似铍铜的特性，仅高温硬度稍低。

9. 钛铜 钛铜具有很好的力学性能，但含钛（质量分数）大于 5% 者，虽力学性能更好，压力加工却困难。

10. 镍钛铜 含有镍、钛及少量铬及稀土等元素，经适当热处理，高温下具有优良力学物理性能。价格便宜，可替代铍铜，以避免由铍带来的环境污染。

11. 铁磷铜 铁铜易偏析。含铁及少量磷、镁的铁铜合金，有较好的力学物理性能和焊接性能，焊接性能随含铁量（质量分数）的增加而变差。

12. 镍磷铜 镍磷铜经冷加工变形及热处理可提高使用性能。一般用作制作导电弹簧、接线柱、接线夹、高强度导电零件。

13. 铝硅铜 铝硅铜的抗氧化性类似于 1Cr18Ni9 不锈钢，价格比白铜、青铜便宜，可替代锡青铜用作弹性材料，可用于密封及热交换器中。

14. 氧化铝铜 氧化铝铜所含金属氧化物粒子可提高其热稳定性。抗软化温度接近铜的熔点，为最理想的高温导电材料之一。

1.2.3 铝

铝的密度低，易于压力加工，有良好的导电、导热和耐蚀性，对光和热的反射率大，无低温脆性，机械强度低于铜，但比强度大，且资源丰富，是广泛使用的导电材料。

电线电缆导体用铝，铝含量（质量分数）必须大于 99.5%。重熔用电工铝锭、重熔用铝稀土合金锭、重熔用铝锭（普铝锭）的化学成分，见表 1-4、表 1-5、表 1-6 的规定。

铝在室温下生成致密而坚固的氧化膜，能阻止铝的进一步氧化及腐蚀。气候潮湿，且含有大量二氧化硫、酸、碱等气体，铝因表面的电解液而引起电化学腐蚀。铝表面沉积大量尘埃及非金属夹杂物，易引起腐蚀。导电用铝的主要性能见表 1-7。

表 1-4 重熔用电工铝锭化学成分

| 牌 号      | 化 学 成 分 （质量分数）（%） |       |      |       |                  |      |
|----------|-------------------|-------|------|-------|------------------|------|
|          | Al≥               | 杂 质 ≤ |      |       |                  |      |
|          |                   | Si    | Fe   | Cu    | V + Cr + Mn + Ti | 总和   |
| Al99.70E | 99.70             | 0.08  | 0.20 | 0.005 | 0.01             | 0.30 |
| Al99.65E | 99.65             | 0.10  | 0.25 | 0.01  | 0.01             | 0.35 |

表 1-5 重熔用铝稀土合金锭化学成分

| 牌 号        | 化 学 成 分 （质量分数）（%） |       |      |       |      |    |
|------------|-------------------|-------|------|-------|------|----|
|            | 稀土总量<br>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         | 0.13  | 0.16 | 0.010 | 0.30 | 余量 |

表 1-6 普铝锭化学成分

| 级 别 | 牌 号    | 化 学 成 分 （质量分数）（%） |       |      |         |       |      |
|-----|--------|-------------------|-------|------|---------|-------|------|
|     |        | Al≥               | 杂 质 ≤ |      |         |       |      |
|     |        |                   | Fe    | Si   | Fe + Si | Cu    | 总和   |
| 特一级 | Al99.7 | 99.7              | 0.16  | 0.13 | 0.26    | 0.010 | 0.30 |
| 特二级 | Al99.6 | 99.6              | 0.25  | 0.18 | 0.36    | 0.010 | 0.40 |
| 一级  | Al99.5 | 99.5              | 0.30  | 0.25 | 0.45    | 0.015 | 0.50 |

表 1-7 导电用铝的主要性能

|                   |                                                      |       |         |
|-------------------|------------------------------------------------------|-------|---------|
| 熔点                | / °C                                                 |       | 658     |
| 密度(20°C)          | /g·cm <sup>-3</sup>                                  |       | 2.703   |
| 比热容(20°C)         | /J·(kg·K) <sup>-1</sup>                              |       | 921     |
| 比能                | /J·kg                                                |       | 389000  |
| 热导率(20°C)         | /W·(m·K) <sup>-1</sup>                               |       | 218     |
| 线膨胀系数(20~100°C)   | /10 <sup>-6</sup> ·K <sup>-1</sup>                   |       | 23      |
| 电阻率(20°C)         | /10 <sup>-2</sup> Ω·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> | 软态    | 2.80    |
|                   |                                                      | 硬态    | 2.8264  |
| 电阻温度系数(20°C)      | /10 <sup>-3</sup> ·°C <sup>-1</sup>                  | 软态    | 4.07    |
|                   |                                                      | 硬态    | 4.03    |
| 弹性模量(20°C)        | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 硬态    | 67000   |
| 屈服强度              | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 软态    | 30~40   |
| 抗拉强度              | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 软态    | 70~95   |
|                   |                                                      | 半硬态   | 95~125  |
|                   |                                                      | 硬态    | 160~200 |
| 疲劳极限              | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 硬态    | 60      |
| 蠕变极限 <sup>①</sup> | /N·mm <sup>-2</sup>                                  | 20°C  | 50      |
|                   |                                                      | 150°C | 24      |
|                   |                                                      | 250°C | 10      |
| 伸长率               | (%)                                                  | 软态    | 20~40   |

① 99.5% Al 软线, 1000h 的断裂韧度。

在熔点以下,铝的电阻和温度近似线性关系。冷变形的铝材退火后电阻率得以恢复。铝的使用工作温度:长期的,不宜超过 90℃;短时的,不宜超过 120℃。

1.2.4 铝合金

铝合金经强化,提高强度和耐热性,电导率降低

很少。耐热铝合金及高强度耐热铝合金架空线,有利于大容量和远距的电力输送。导电铝合金的品种、主要特征及性能见表 1-8。

1. 铝镁硅合金 铝镁硅合金抗拉强度在 300N/mm<sup>2</sup> 以上,电导率高于 53% IACS,耐蚀性较好,焊接工艺要求较高,普遍使用于架空导线。

表 1-8 导电铝合金的品种、特征及性能

| 类 别                   | 名 称  | 状态 | 抗拉强度<br>/N·mm <sup>-2</sup>            | 伸长率<br>(%) | 屈服强度<br>/N·mm <sup>-2</sup> | 电 导 率<br>/% IACS | 主要特征及用途                     |
|-----------------------|------|----|----------------------------------------|------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| 热处理型                  | 铝镁硅  | 硬  | 300~360                                | 4          |                             | 53               | 高强度,用于架空线                   |
| 非<br>热<br>处<br>理<br>型 | 铝镁   | 硬  | 230~260                                | 2          |                             | 53~56            | 中强度,用于架空线和接触线,软线也可用于电线电缆的线芯 |
|                       | 铝镁铁  | 软  | 115~120                                | 15         | 52                          | 58~60            | 电线电缆线芯和电磁线                  |
|                       | 铝镁铁铜 | 软  | 115~130                                | 15         | 52                          | 58~60            |                             |
|                       | 铝镁硅铁 | 软  | 115                                    | 17         | 50                          | 53               |                             |
|                       | 铝锆   | 硬  | 180~190                                | 2          |                             | 58~60            | 耐热,用于架空线和汇流排                |
|                       | 铝铁   | 软  | 90                                     | 30         |                             | 61               | 强度略高于铝,须连铸连轧工艺生产,使用范围同铝     |
|                       | 铝硅   | 硬  | 260~330<br>( $\phi 25\sim 50$<br>微米细线) | 0.5~1.5    |                             | 50~53            | 加工性好,可控制特细线,用于电子工业连接线       |
|                       | 铝稀土  | 硬  | 160~200                                |            |                             | 61               | 普铝中加入少量稀土,以满足电工铝性能要求        |

2. 铝镁合金 铝镁合金是普遍使用的中强度铝合金。硬态的适于用作架空导线,软态的适于用作电线电缆线芯等。

3. 铝锆合金 铝锆合金耐热性显著提高,其长期工作温度为 150℃;短时为 180~200℃,比铝高 50~70℃。

4. 铝铁合金 铝中加铁,采用连铸连轧工艺,机械强度稍有提高;如再加入少量钴,可进一步提高耐热性、抗拉强度和屈服强度。

5. 铝硅合金 在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,易拉制成细线,以代替微细金丝。

6. 铝稀土 含硅量(质量分数)高于 0.08% 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,可改变一定要用低硅铝生产的局面,含硅量(质量分数)0.09%~0.13%,稀土优化成本最低。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。

1.2.5 金、银及银合金

1. 金 金的导电性仅次于银、铜,且有优良的化学、物理和力学性能,在大气中不氧化,抗有机污染,在氧同时作用下溶于王水、氯水、溴水以及氰酸盐,加工性极好,称之柔性金属。熔融时形成稳定的球形,能承受树脂封装的应力。金丝是微电子工业的重要导电材料。用键合机完成键合,是生产半导体集成电路及电路的最后工序。微电子工业要求采用键合金丝是因为:

1)机械强度能适应高速键合需要,具有一定的抗拉破断力,伸长率波动范围小。

2)与半导体器件芯片之间及引线框架之间有足够

的结合强度。

3)能满足高速键合的长度要求。

2. 银 银及银合金是电器开关的重要触头材料。银的优良导电、导热性居金属之首。接触电阻低而稳定,抗高温氧化,加工性能好,溶于硝酸、浓硫酸、王水和氰化物,与氢氟酸不起反应。稳定的硫化银使银变黑。气态卤素的氢卤化合物对银起激烈反应。导电银胶和银基导电浆料是重要的导电材料。导电银胶由银粉、树脂及溶剂混合而成,用于导电粘结及涂层,涂于被粘元器件,由于银粉固化接触而导电。固化条件相同时,树脂(包括溶剂)最佳含量(质量分数)为 35%~40%。在树脂能承受的温度下,固化温度愈高,导电性愈好;固化温度相同,固化时间愈长,导电性愈好。银基导电浆料由银或银合金微粒、玻璃料及树脂等构成,分高温银浆、中温银浆、银钎浆料及铂银浆料等。

1.2.6 复合导电金属

复合导电金属有有线、棒、带、板、片、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,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。复合导电金属的品种及特性见表 1-9。

表 1-9 复合导电金属品种及特性

| 分类    | 品 种    | 特 性                                                                         |
|-------|--------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 高 导 电 | 铜包铝线和排 | 电导率比铝高,连接与铜一样方便。硬态抗拉强度达 210N/mm <sup>2</sup> ,工作温度不能高于 250℃。废品处理困难          |
|       | 银覆铝    | 电导率高、接触性好                                                                   |
| 高 强 度 | 铝包钢线   | 抗拉强度高达 900~1300N/mm <sup>2</sup> ,电导率为 20%~40% IACS,伸长率 ≥1.5%,耐蚀性好          |
|       | 钢铝接触线  | 耐磨。截面积为 85mm <sup>2</sup> 时,拉断力>30150N;截面积为 100mm <sup>2</sup> 时,拉断力>40000N |
|       | 铜包钢线和排 | 抗拉强度高达 650~1500N/mm <sup>2</sup> ;电导率为 30%~40% IACS;伸长率 ≥1%;耐蚀性好            |
|       | 镀锡铜包钢线 | 强度高、耐蚀、焊接性好                                                                 |

(续)

| 分类    | 品 种        | 特 性                              |
|-------|------------|----------------------------------|
| 高 弹 性 | 铜覆铍铜       | 弹性及导电性好                          |
|       | 弹簧钢覆铜      | 高弹性、高导电、耐高温腐蚀                    |
|       | 铝覆铁        | 抗高温氧化性好                          |
| 耐 高 温 | 铝黄铜覆铜      | 电导率可达 80% IACS,抗高温氧化性好           |
|       | 镍包铜        | 根据不同镍层厚度,电导率可高达 89% IACS;抗高温氧化性好 |
|       | 镍包银        | 同镍包铜。电导率为 85%~91% IACS           |
|       | 耐热合金包银     | 抗高温氧化性好,电导率高                     |
| 耐 腐 蚀 | 不锈钢覆铜      | 好的耐蚀性、导热性和成型性;电导率为 73% IACS      |
|       | 银包(或镀银)铜线  | 易焊接;好的导电性、抗氧化性和接触性               |
|       | 镀银铜包钢线     | 抗拉强度高,抗氧化性好                      |
|       | 镀锡铜线,镀锡铜包钢 | 耐蚀及焊接性好                          |
| 其 他   | 铁镍钴合金包铜    | 导电、导热性好;热膨胀系数与玻璃的相近              |

1.3 导电材料的应用范围及应用技术

1.3.1 导电纯金属的主要用途

导电纯金属的主要用途见表 1-10。

表 1-10 导电纯金属的主要用途

| 名称 | 主 要 用 途                           |
|----|-----------------------------------|
| 银  | 航空导线、耐高温导线、射频电缆等的导体和镀层,瓷电容器极板导电浆等 |
| 铜  | 各种电线电缆用导体,母线和载流零件,超导应用等           |
| 金  | 电子材料等特殊用途                         |

(续)

| 名称 | 主 要 用 途                        |
|----|--------------------------------|
| 铝  | 电线电缆用导体, 电缆护层、屏蔽层、载流零件等        |
| 钠  | 有可能用作实用的液态导体                   |
| 钨  | 超高温导体, 电焊机电极, 电子管灯丝及电极, 电光源灯丝等 |
| 钼  | 超高温导体, 电焊机电极, 电子管栅极丝及支架等       |
| 锌  | 导体护层及干电池阴极等                    |
| 镍  | 高温导体保护层, 高温特殊导体, 电子管阳极和阴极等     |
| 铁  | 在输送功率不大的线路上用作广播线, 电话线和爆破线等     |
| 铂  | 精密电表及电子仪器的零件等                  |
| 锡  | 导体保护层, 焊料和熔丝等                  |
| 铅  | 熔丝、蓄电池极板和电缆护层等                 |
| 汞  | 汞弧整流器、高压汞灯和水银开关等               |

### 1.3.2 导电铜合金的应用

1. 用于电动机、发电机的换向器片和集电环。其性能要求是: 电导率大于  $49.3\text{mS/m}$ , 抗拉强度大于  $294\text{N/mm}^2$ , 伸长率大于  $2\%$ , 硬度大于  $90\text{HV}$ , 接触性好, 耐磨性高, 软化温度超过工作温度。一般选用银铜、稀土铜、镉铜、锆铜和铬锆铜等。

硬铜通常用到  $80^\circ\text{C}$ , 高于  $150^\circ\text{C}$  即开始软化。稀土铜、银铜和镉铜适于用作  $250^\circ\text{C}$  以下的电机换向器片。锆铜 (Zr 的质量分数为  $0.2\% \sim 0.4\%$ ) 适于用作  $350^\circ\text{C}$  以下的电机换向器片。铬锆铜适于作  $350 \sim 500^\circ\text{C}$  的高功率电机换向器片。

2. 用于电焊机电极、电极支承座、电极臂及导电集电环。

电极传导必要的焊接电流, 传递必要的焊接压力。电极支承座和电极臂要求较高的电导率和强度, 导电集电环要求高的电导率和耐磨性。多种多样的被焊接材料, 主要特性:

- 1) 比焊接材料更高的导电性和导热性;
- 2) 强度高, 尤其是高温硬度高;

3) 不与焊接材料发生合金化和粘着;

4) 抗氧化性好, 使用中不生成氧化皮。

以保证良好焊接质量为前提, 应着重提高电极使用寿命:

1) 铝、镁熔点低, 易粘着, 要求电极材料抗软化温度高, 电导率大于  $49.3\text{mS/m}$ 。此类轻合金的焊接, 散热快, 须短时间通入大电流。

2) 低碳钢等的焊接, 电极材料的电导率应大于  $43.5\text{mS/m}$ 。

3) 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, 电导率大于  $23.2\text{mS/m}$ 。

为此, 选用铜合金作电极, 有如下四种情况:

1) 对于铝、镁轻合金及铜合金的焊接, 可选用银铜、镉铜、锆铜和弥散硬化铜电极;

2) 对于低碳钢、镍合金和低合金钢的焊接, 可选用锆铜、银铬铜、铬铜、铬镉铜、铬铝镁铜和铬锆铜等电极;

3) 对于不锈钢和耐热合金的焊接, 可选用高导电铍铜、钴硅铜、镍钛铜和铬钛锡铜电极;

4) 对于铂 (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, 可选用钨、钼、铜钨合金、弥散强化铜和复合电极 (铬铜镶钨或弥散强化铜)。

3. 用于特殊电缆、架空导线、通信线和接触线等, 一般可选用银铜、稀土铜、镉铜、铬镉铜、锆铜、复合金属导体。使用时, 最高允许温升不应超过选用材料的软化温度, 要求高的电导率和强度。随用途而异, 如对电缆, 要求可挠性好, 易于连接; 对架空导线, 须耐振动、耐蚀、耐疲劳; 对接触线, 须耐磨。

4. 用于各种电器、通信设备和电子管用换向开关, 弹簧和连接器等, 要求极高的强度、硬度和弹性极限, 且耐磨、耐蚀、耐疲劳。一般选用铍铜、钛铜、锡磷青铜等。

### 1.3.3 导电铝合金的应用

导电铝合金的主要用途见表 1-8。

### 1.3.4 复合导电金属的主要用途

复合导电金属的主要用途见表 1-11。

表 1-11 复合导电金属的主要用途

| 分类          | 品 种                    | 主 要 用 途                                                               |
|-------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 高<br>强<br>度 | 铝包钢线                   | 输配电线, 载波避雷线, 通信线及大跨越架空导线                                              |
|             | 钢铝接触线                  | 接触线 (即电车线)                                                            |
|             | 铜包钢线<br>铜包钢排<br>镀锡铜包钢线 | 高频通信线, 大跨越及特殊地区架空导线; 排可作小型电机换向器片、直流电机电刷弹簧、配电装置中的汇流排、刀开关的栏条等           |
|             | 铝覆铁                    | 电子管阳极                                                                 |
| 耐<br>高<br>温 | 铝黄铜覆铜                  | 高温大电流导体, 如电炉配用电汇流排                                                    |
|             | 镍包铜                    | 400~650°C 的高温导线                                                       |
|             | 镍包银                    | 400~650°C 的高温导线; 镍层的质量分数为 10% 时, 可用于 400°C; 镍层的质量分数为 20% 时, 可用于 650°C |
|             | 耐热合金包银                 | 650~800°C 的高温导线                                                       |

(续)

| 分类          | 品 种             | 主 要 用 途                                  |
|-------------|-----------------|------------------------------------------|
| 高<br>导<br>电 | 铜包铝线,<br>铜包铝排   | 高频通信线, 高频屏蔽配电线, 电视电缆, 电磁线; 排可做电机换向器片导电排等 |
|             | 银复铝             | 航空导线, 波导管                                |
| 耐<br>腐<br>蚀 | 不锈钢覆铜           | 大功率真空管用零件                                |
|             | 银包 (或镀银)<br>铜线  | 高温导线线芯及线圈, 雷达电缆用编织导体                     |
|             | 镀银铜包钢线          | 射频电缆及高温导线线芯                              |
| 高<br>弹<br>性 | 镀锡铜线及镀<br>锡铜包钢线 | 橡皮绝缘电线电缆, 仪器仪表连接线, 编织线和软接线等              |
|             | 铜覆铍铜,<br>弹簧钢覆铜  | 导电弹簧                                     |
| 其<br>他      | 铁镍钴合金包钢         | 与玻璃密封的导电导热材料                             |