

电线电缆技术丛书

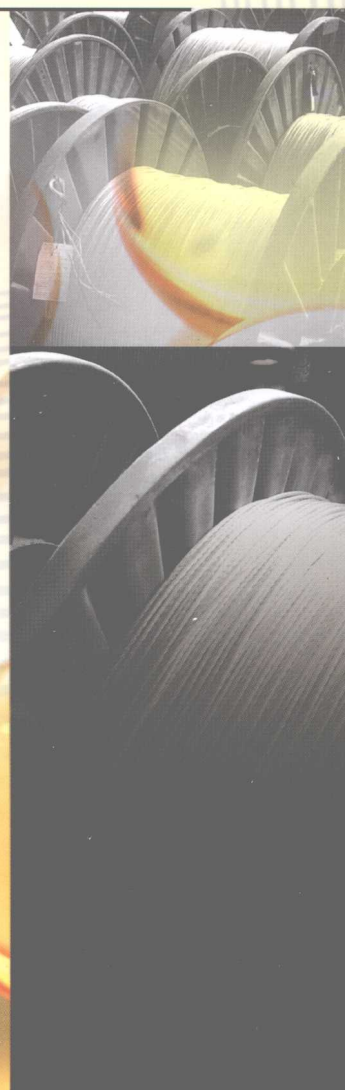
电线电缆材料

——结构·性能·应用

郭红霞 主编

DIANXIAN DIANLAN CAILIAO
JIEGOU XINGNENG YINGYONG

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电线电缆技术丛书

电线电缆材料 ——结构·性能·应用

郭红霞 主编



机械工业出版社

本书以材料的结构—性能—应用为主线,系统地介绍了金属材料、高分子材料、复合材料等电线电缆行业使用较多的各种材料。以通俗简洁的语言深入浅出地介绍了结构及其使用环境和性能的关系,是一本综合性、应用性较强的书籍。全书共分5部分。第一部分是金属材料,首先介绍了金属和合金的微观结构,然后阐述了金属宏观性能与微观结构的关系以及影响因素,最后介绍了以铜铝为主等金属材料的性能、特点及应用。第二部分是高分子材料,介绍了高分子的结构和高聚物聚集态结构,以及高分子复合材料结构;阐述了高聚物电性能等宏观性能与微观结构的关系以及影响因素;分别介绍了电线电缆中常用的塑料和橡胶的结构性能特点与应用;最后简单阐述了高分子合金的基本理论,并介绍了电线电缆中常用的共混物和热塑性弹性体。第三部分是复合材料,介绍玻璃纤维、碳纤维和芳纶纤维以及环氧树脂的制造、结构和性能。第四部分是光纤光缆材料;第五部分是气体、液体电介质。

本书可供从事电线电缆制造的有关工程技术人员、管理人员和实际操作人员阅读参考;也可供大中专院校相关专业作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

电线电缆材料:结构·性能·应用/郭红霞主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 3

(电线电缆技术丛书)

ISBN 978-7-111-37877-8

I. ①电… II. ①郭… III. ①电线—电缆 IV. ①TM246

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第057513号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:张沪光

版式设计:霍永明 责任校对:张薇

封面设计:鞠杨 责任印制:张楠

北京振兴源印务有限公司印刷

2012年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·437千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-37877-8

定价:46.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

前 言

材料是人类社会进步的物质基础，是人类文明程度的象征。社会的发展始终与材料密切相关。石器时代、青铜时代、铁器时代等就是以材料来划分人类社会发展进程的。现代高科技发展更是紧密地依赖材料的发展。材料、能源、信息和生物技术已是现代科技的四大支柱。

电线电缆材料对电线电缆行业的发展有着十分重要的意义。塑料在电缆中的使用，不仅使电缆的生产过程大大简化，而且使电缆敷设简便易行；碳纤维复合材料制造的复合铝绞电缆，与传统的钢芯铝绞电缆相比，可以提高电力传输容量一倍以上，同时可以减少 8% 线路损耗和减少 20% 的杆塔数。石英玻璃纤维的出现使光纤通信获得了飞速发展。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，电线电缆的使用条件更为复杂，因此，对材料提出了更高、更苛刻的要求。熟悉各种材料的物理、化学性质，理解各种材料微观结构、化学组成与其性能的关系，了解材料在各种外界条件作用下，其物理化学性能的变化规律，这样才能在电线电缆结构设计中合理地选择材料，确定良好的加工工艺，制备出符合各种环境下使用的电线电缆产品。

本书作者从事电缆材料的教学和研究十余年，对如何进行材料的理论教学有比较深刻的体会，本书是对多年工作的总结。电线电缆材料一方面发展迅速，涉及的材料种类繁多，另一方面又要在较少篇幅内构筑起微观结构与宏观性质的联系，因此，在编写中除了力求本书的科学性、系统性外，还特别注意了其简明性、实践性，同时努力反映电线电缆材料领域的新成就和发展趋势。

本书由河南机电高等专科学校郭红霞主编，张开拓（河南机电高等专科学校）、穆培振（河南新太行电源有限公司）、梁蕊（河南师范大学）、郭鑫（中国移动通信集团河南有限公司）参与了部分章节的编写工作。编写过程得到了河南机电高等专科学校电缆教研室和多家电缆厂的帮助，在此向他们曾经给予的热情帮助表示衷心的感谢！

作者在本书编写过程中参考和借鉴了不少专家的相关著述，在此向他们表示真诚的感谢！作者在书末的参考文献做了一一列举，但难免有遗漏之处，敬请谅解。

本书涉及内容广泛，加之作者专业水平有限，其中难免有许多不妥或错误之处，敬请读者批评指正。

作者

2011 年 12 月

目 录

前言	
绪论	1
第1章 金属的结构	4
1.1 固体金属的结构	4
1.1.1 金属键	4
1.1.2 固体金属的空间结构	5
1.1.3 晶体中原子间的作用规律	7
1.1.4 晶体的缺陷	8
1.2 合金的结构	14
1.2.1 固溶体	14
1.2.2 中间相	17
第2章 金属的性能	18
2.1 导电性	18
2.1.1 金属导电的机理	18
2.1.2 影响金属导电性的因素	20
2.2 超导电性	21
2.2.1 超导电现象	21
2.2.2 超导体的主要特征	21
2.2.3 超导电性的BCS理论	23
2.2.4 超导材料和超导电缆的发展	24
2.3 热性能	26
2.3.1 比热容	26
2.3.2 摩尔热容(C_m)	27
2.3.3 导热性	28
2.3.4 热膨胀	29
2.3.5 热电性	31
2.4 磁性	32
2.4.1 磁化现象和磁性的基本量	32
2.4.2 物质的抗磁性	33
2.4.3 顺磁性	34
2.4.4 铁磁性	35
2.5 力学性能	36
2.5.1 金属的变形	36
2.5.2 机械强度	37
2.5.3 弹性	38
2.5.4 塑性	40
2.5.5 耐冲击性(韧性)	42
2.5.6 疲劳	43
2.5.7 蠕变性	43
2.5.8 硬度	44
2.6 耐蚀性	45
2.6.1 化学腐蚀	45
2.6.2 电化学腐蚀	46
2.6.3 影响腐蚀的因素	47
2.6.4 金属的防腐蚀	48
第3章 电线电缆用金属材料	49
3.1 铜及铜的合金	50
3.1.1 铜的结构和基本特性	50
3.1.2 影响铜性能的因素	52
3.1.3 铜合金	55
3.1.4 铜包金属线、铜基双金属线	56
3.1.5 铜箔、铜带	57
3.2 铝及铝合金	57
3.2.1 铝的结构及基本特性	57
3.2.2 影响铝性能的因素	59
3.2.3 铝合金	62
3.2.4 铝双金属线	63
3.2.5 铝套、铝带、铝塑复合带	63
3.3 铅与铅合金和铁与钢	64
3.3.1 铅及铅合金	64
3.3.2 铁	66
3.3.3 钢管、钢带、钢丝	66
3.4 电线电缆用其他金属材料	67
3.4.1 银	67
3.4.2 金	68
3.4.3 镍	68
3.4.4 锌	69
3.4.5 锡	69
第4章 高聚物的结构	70
4.1 高分子的结构	71
4.1.1 高分子链的化学结构	71
4.1.2 高分子链的柔顺性	74
4.1.3 高分子链的链端	75
4.1.4 高聚物的相对分子质量和分布	76

4.2 高聚物固体的结构	76	5.6.2 牛顿流体与非牛顿流体	150
4.2.1 无定形态高聚物的结构	76	5.6.3 聚合物的流动态和流动机理	152
4.2.2 晶态的结构模型	77	5.6.4 影响流动温度 T_f 的因素	153
4.2.3 高聚物结晶体的形态	79	5.6.5 高聚物熔体流动的假塑性	154
4.2.4 高聚物的结晶过程及影响因素	82	5.6.6 影响聚合物熔体流动的主要 因素	155
4.2.5 结晶对高聚物性能的影响	85	5.6.7 聚合物熔体流动中的弹性效应	159
4.2.6 高聚物多组分混合体系的结构	86	5.7 耐老化性能	162
4.3 固体内高分子的运动	87	5.7.1 老化的特征及原因	162
4.3.1 高聚物分子的运动特点	88	5.7.2 老化机理	163
4.3.2 无定形态聚合物的分子运动	89	5.7.3 耐臭氧性	164
4.3.3 结晶态高聚物的分子运动	91	5.7.4 耐光性	165
第5章 高聚物的性能	92	5.7.5 耐辐射性	165
5.1 力学性能	92	5.7.6 高分子材料的老化试验方法	166
5.1.1 高弹性	92	第6章 塑料	171
5.1.2 黏弹性	97	6.1 聚乙烯 (PE)	171
5.1.3 机械强度	100	6.1.1 聚乙烯的合成及品种	171
5.1.4 耐磨性	106	6.1.2 聚乙烯树脂的结构	172
5.2 耐热性	107	6.1.3 聚乙烯树脂的性能	173
5.2.1 耐热性的表征	107	6.1.4 聚乙烯塑料中常用的助剂	176
5.2.2 高温下材料耐热变形能力	108	6.1.5 电线电缆用聚乙烯塑料	177
5.2.3 高温下耐热氧化能力	110	6.1.6 交联聚乙烯 (XLPE)	179
5.2.4 提高聚合物耐热性的途径	111	6.1.7 乙烯共聚物	181
5.2.5 耐寒性	112	6.2 聚氯乙烯 (PVC)	182
5.2.6 热膨胀	113	6.2.1 聚氯乙烯树脂的种类	182
5.3 耐燃性	113	6.2.2 聚氯乙烯树脂的结构	183
5.3.1 高聚物的燃烧	114	6.2.3 聚氯乙烯树脂的性能	183
5.3.2 高聚物的燃烧特性	114	6.2.4 聚氯乙烯助剂	185
5.3.3 燃烧特性与分子结构的关系	116	6.2.5 聚氯乙烯塑料在电缆中的应用	189
5.3.4 提高聚合物耐燃性的途径	117	6.3 其他电线电缆用塑料	190
5.4 电学性能	118	6.3.1 氟塑料	190
5.4.1 高聚物的极化及介电常数	118	6.3.2 聚丙烯 (PP)	193
5.4.2 介质损耗	123	6.3.3 聚酰胺 (PA)	193
5.4.3 导电性	127	6.3.4 聚对苯二甲酸酯	195
5.4.4 耐电性	133	第7章 橡胶与橡皮	197
5.4.5 静电现象	141	7.1 橡胶	198
5.5 耐油耐湿性	142	7.1.1 天然橡胶 (NR)	199
5.5.1 无定形态高聚物的溶解性	142	7.1.2 氯丁橡胶 (CR)	201
5.5.2 晶态高聚物的溶解性	143	7.1.3 丁苯橡胶 (SBR)	203
5.5.3 高聚物的溶解热力学	143	7.1.4 丁腈橡胶 (NBR)	205
5.5.4 耐油性	144	7.1.5 丁基橡胶 (IIR)	206
5.5.5 耐湿性	145	7.1.6 乙丙橡胶	207
5.6 熔体性能	148	7.1.7 氯化聚乙烯 (CPE)	209
5.6.1 流体的流动性	149		

7.1.8 氯磺化聚乙烯 (CSPE 或 CSM)	210	9.2 碳纤维	248
7.1.9 氯醚橡胶	211	9.2.1 碳纤维的制造原理	249
7.1.10 硅橡胶 (MQ 或 SiR)	212	9.2.2 碳纤维的结构	250
7.1.11 氟橡胶 (FPM)	215	9.2.3 碳纤维的性能	251
7.2 橡胶配合剂	216	9.2.4 碳纤维在电缆中的应用	252
7.2.1 硫化剂	218	9.3 芳纶纤维	254
7.2.2 促进剂	219	9.3.1 芳纶纤维的结构	255
7.2.3 活化剂	219	9.3.2 芳纶纤维的性能	256
7.2.4 阻焦剂	220	9.4 环氧树脂	256
7.2.5 防老剂	220	9.4.1 环氧树脂的结构	256
7.2.6 软化剂	220	9.4.2 环氧树脂的固化剂	257
7.2.7 补强剂	220	9.4.3 环氧树脂的增韧剂	258
7.2.8 填充剂	222	9.4.4 其他添加剂	258
7.3 橡胶的配方设计	223	第 10 章 光纤光缆材料	259
7.3.1 配方的基本要求	223	10.1 概述	259
7.3.2 配方设计的原则	224	10.1.1 光在介质中的传播	260
7.3.3 配方的设计步骤	224	10.1.2 光纤的损耗	261
7.3.4 配方的表示方法	224	10.1.3 光缆结构	262
7.3.5 配方设计举例	225	10.1.4 光缆生产工艺简介	262
第 8 章 聚合物合金	227	10.2 光纤及光纤被覆材料	262
8.1 聚合物合金的基本理论	227	10.2.1 光纤材料	262
8.1.1 聚合物合金的分类	227	10.2.2 光纤被覆材料	264
8.1.2 聚合物间的相容性	229	10.3 填充阻水材料	266
8.2 聚合物的共混改性	231	10.3.1 填充油膏	266
8.2.1 天然橡胶-丁苯橡胶共混	231	10.3.2 吸水膨胀材料	267
8.2.2 软质聚氯乙烯 (PVC) 的高分子增塑	232	10.3.3 热溶胶	268
8.2.3 聚乙烯 (PE) 的共混改性	233	10.4 光缆用加强件材料	269
8.3 热塑性弹性体	234	第 11 章 气体电介质和液体电介质	270
8.3.1 热塑性弹性体的基本特性	234	11.1 气体电介质	270
8.3.2 热塑性弹性体的分类	235	11.1.1 气体作为电缆绝缘材料的要求	270
8.3.3 聚合型热塑性弹性体	235	11.1.2 气体电介质的一般特性	270
8.3.4 共混型热塑性弹性体	239	11.1.3 常用气体电介质	271
第 9 章 树脂基纤维增强复合材料	245	11.2 液体电介质	271
9.1 玻璃纤维	245	11.2.1 矿物油	272
9.1.1 玻璃纤维的分类	245	11.2.2 合成油	274
9.1.2 玻璃纤维的结构和化学组成	246	参考文献	276
9.1.3 玻璃纤维的性能	247		

绪 论

电线电缆是用于传输电能、传递信息和实现电磁转化的电工类线材产品。一般将直径较小、结构简单的电线电缆称为电线，而将直径较大、结构复杂的电线电缆称为电缆，两者没有严格区别，有些依习惯而定。电线电缆产品的品种是非常繁多的，目前已有一千多个品种，按其产品的性能、结构、工艺的相近性与相似性，结合产品的使用特点大致可以分为以下五类：

1) 裸电线与裸导电制品

裸电线与裸导电制品是指有导体而无绝缘的电线电缆产品，用于电力传输，电气、通信以及电气装备的元件。与其他电线电缆产品相比，具有结构简单、制造方便、施工容易和便于检修等优点。这类产品使用的材料是金属及其合金。

2) 绕组线（电磁线）

绕组线是指以绕组形式在磁场中切割磁力线产生感应电流，或通过电流产生磁场的电线制品，用于电动机、变压器以及电气装备中的线圈。它主要有漆包线和绕包线。这类产品除使用金属外，还使用各种绝缘漆、绝缘薄膜、绝缘纤维等材料。

3) 电力电缆

电力电缆是在电力系统中的主干线上，用以传输和分配大功率电能的电线电缆产品，用于电力输配线路，使用电压都比较高，一般都在1kV及以上。这是一类最具代表性的产品，其结构一般有导电线芯、绝缘层、护层以及屏蔽层和填料共五部分组成，如图0-1所示。这类产品对绝缘材料要求很高，特别是35kV以上的超高压电缆。

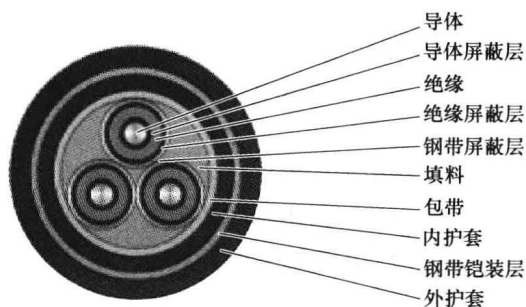


图0-1 三芯电缆结构示意图

4) 通信电缆和光缆

通信电缆和光缆是指传输电话、电报、电视、广播、传真、数据和其他信息的电线电缆产品。通信电缆又分为对称通信电缆和同轴通信电缆。产品要求电线电缆以极快速率，准确、清晰地将各种信息传输至接收方，因此要求采用电导率很高的导体材料、绝缘电阻高而且介电常数很小的绝缘材料，以及屏蔽性能高的材料。

光缆是以光导纤维作为光波传导介质进行信息传输的电缆产品，如图0-2所示。具有传输衰减小、传输频带宽、不受电磁场干扰、保密性好，并且产品重量轻、外径小等特点。因此，光缆一经诞生就得到迅速发展。

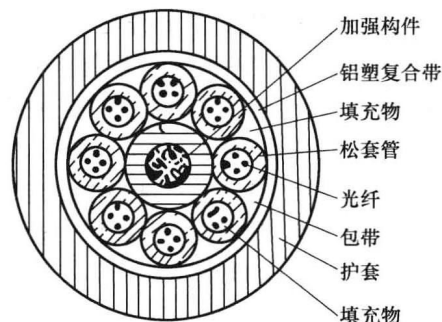


图0-2 层绞式光缆结构

5) 电气装备用电线电缆

电气装备用电线电缆包括从电力系统的配电点把电能直接输送到用电设备、器具作为连接线路的电线电缆,以及电气装备内部的计测、信号控制系统中各种通用或专用的电线电缆。它是使用范围最广、品种系列最多、工艺技术门类最复杂的一类产品。按产品用途它可分为八类,包括低压配电电线电缆、信号及控制电缆、仪器和设备连接线、交通运输工具电线电缆、地质资源勘探和开采电线电缆、直流高压电缆、加热电缆以及特种电线电缆等。这类电线电缆由于使用的领域复杂,对护层材料的要求各不相同,诸如耐热、耐燃、耐油、耐腐蚀,耐磨、柔软等,因此使用的材料品种繁多,性能各异。

电线电缆在国民经济中发挥着非常重要的作用,在电力系统、信息传输中发挥决定性的作用,电机、电信、电子工业的发展都受其较大的影响。在现代的生产、国防、科学研究和日常生活中,电线电缆是不可须臾缺少的重要产品。电线电缆在国民经济中所起的作用就像人体中血管和神经的作用一样。

电线电缆的发展并不是孤立的,它首先决定于电能应用的多样性和广泛性,以及电机、电信、电子工业的发展。

1. 电线电缆发展和电线电缆材料的作用

电线电缆的使用随电的产生就出现了,在1880年爱迪生在纽约首先制造并使用了电缆。1887年在上海用硫化橡胶作绝缘铅包作护层的电缆,用于上海租界的照明,这是我国最早使用电缆。1932年意大利米兰安装第一根220kV充油电缆,在1969年法国安装使用第一根225kV聚乙烯电线电缆。目前发达国家正在研究1000kV交联聚乙烯电缆。我国20世纪30年代才开始生产电线电缆,主要是600V以下的橡皮绝缘电缆;50年代开始生产油浸纸绝缘电缆;60年代生产充油电线电缆,1968年生产出220kV充油电缆,70年代达330kV;60年代开始聚氯乙烯与聚乙烯绝缘电缆的研制,早期生产不稳定,至80年代开始生产110kV交联聚乙烯电缆。

从电线电缆的发展历史可见,电线电缆产品每一次升级换代,都与电线电缆使用的材料密切相关。由于要适用不同的需要,电线电缆自然应具有各种广泛、优异而稳定的使用性能。而电线电缆的使用寿命和性能取决于电线电缆结构的合理性和先进性,材料使用的合理性,以及工艺先进完善性。从电线电缆技术发展看,材料的合理性和正确使用是关键因素。电线电缆正向高压、高频、环保、耐高温、阻燃等特殊功能发展,这就要求不断采用性能优异的新材料。由于市场经济,也要求使用的材料来源广泛、价格低廉。要根据电线电缆的用途和性能要求,不断地发现、改进和使用性能好的材料。这就要求深入了解电线电缆材料在各种因素作用下结构和性能的变化规律,以便在结构设计中合理地使用材料,在生产过程中制定合适的工艺。

2. 电线电缆材料的分类

电线电缆品种繁多,性能各异,一种材料在电线电缆中往往起多种作用。为了便于选用和研究,应对电线电缆材料进行必要的分类:

1) 按用途分类:可分为导电材料、绝缘材料、护层材料。这种分类具有专业特点,便于电线电缆结构设计,选择电线电缆材料。

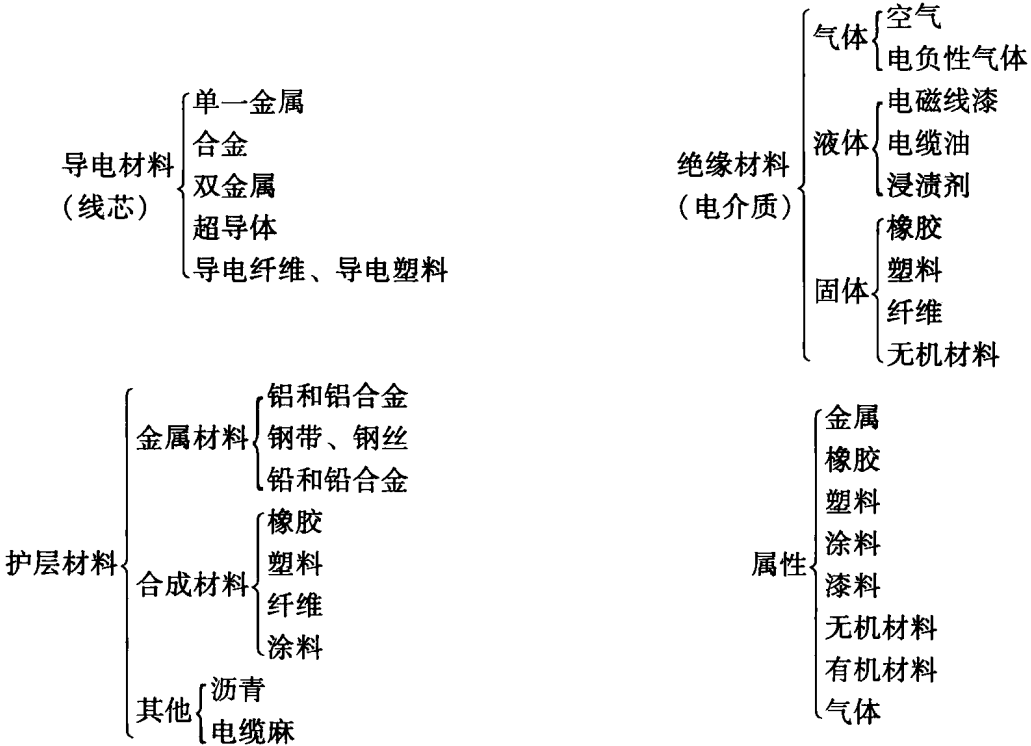
2) 按性态分类:可分为气态、液态、固态材料。

3) 按组成形式分类:可分为单一材料、组合(复合)材料如合金、铝塑。

4) 按来源分类:可分为天然、合成、人造材料。这种分类便于材料的研究和开发。

5) 按属性分类:可分为金属、塑料、橡胶等。这种分类有利于研究材料的特点和结

构，便于开发和采用新材料。



3. 电线电缆材料的基本要求

在电线电缆中，材料用途不同，要求也不同。

导电线芯：要求较高的电导率，这是最基本的前提，在满足这个条件下，并要求有足够的机械强度和化学稳定性，不易氧化，同时便于加工和焊接。

绝缘层：要求优异电绝缘性能。材料的电性能一般用绝缘电阻 R 、介电常数 ϵ_r 、介质损耗角正切 $\text{tg}\delta$ 和耐电强度 E_0 来表示。不同使用领域，电线电缆绝缘材料对这四大参数要求也各有侧重。

例如：高压电缆： E_0 高、 $\text{tg}\delta$ 小

高频电缆： ϵ_r 小

一般电线： R 大

此外，对材料的力学性能、化学性能、耐老化性能和电老化性能以及特殊性能（如耐燃、耐热、耐油、耐湿）也会有要求。

护层：护层作用是保护和防止绝缘材料免受各种外界因素（机械作用、物理、化学、光、电、湿、微生物）的影响，确保电线电缆使用。护层材料要有耐受各种环境因素作用的能力，也就是它的稳定性能，如金属材料的耐腐蚀性，塑料的耐环境应力开裂的性能和耐老化性能。

在选择材料时，不管是导电还是其他材料，都有一个共同点，就是要考虑其工艺性（加工性）及材料的经济性。因此，选择材料的基本原则如下：

- ① 性能满足要求；
- ② 加工性能良好；
- ③ 材料的经济性。

第 1 章 金属的结构

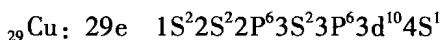
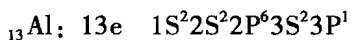
在元素周期表中，金属元素占三分之二。金属最主要特性是具有良好的导电性和导热性。而正是由于有这两种特性，使它成为最宝贵的电线电缆材料，时至今日，仍无任何其他材料取代金属作为电缆的导电线芯。另外，在电线电缆中，金属除作为导电线芯材料使用外，也作为护层材料使用。实践证明，为了保证电线电缆的性能和寿命，必须深入地研究金属的结构和性能。

金属材料的开发和性能的改进，都对电线电缆的技术发展产生重大影响，如超导体的发现，一旦投入使用，对电线电缆产品将产生重大的影响。

对金属材料研究主要从两个方面入手：一是开发和采用新型的电线电缆材料，如超导体；二是研究和改进金属性能，如无氧铜、单晶铜及合金。综合两方面的研究，重点都集中在金属结构和性能上。

金属及合金的性能，受许多方面的影响，是一个十分复杂的问题，但长期的实践和探索表明，决定金属和合金的基本性能是它的微观结构，即内部的结构和组织状态。因此，必须首先了解它的微观结构。

金属微观结构包括原子结构和分子结构。金属原子的结构同其他元素原子结构大体相同，是由带正电荷的原子核和带负电荷并围绕其原子核运动的电子组成。原子内的电子是按能级排布的。例如：



在原子中，最有意义的是最外层电子，它决定金属的主要性能，作为一个共同的规律，金属元素位于周期表左侧，最外层的电子都比较少，一般只有 1、2、3，且电负性小，对最外层电子吸引力小，外层电子容易脱离原子核的吸引成为自由电子。金属许多性能都与自由电子有关。

1.1 固体金属的结构

1.1.1 金属键

一般情况下，金属是处于固体的。金属原子之间相互结合成固体时，彼此相互影响，各金属原子的外层电子易脱离原子核的吸引成为正离子，正离子按照一定规律排列起来，在平衡位置上振动，而外层的价电子成为自由电子，在各离子间自由运动，为整个金属所共有，形成所谓的电子气，这些带负电的自由电子与带正电荷的金属离子之间产生相互吸引力，自由电子形成的电子气像粘合剂一样，将金属正离子或原子吸引在一起，金属的这种结合方式称为金属键。形象地说，自由电子像可流动的粘合剂一样，将金属原子或离子粘合在一起（见图 1-1）。

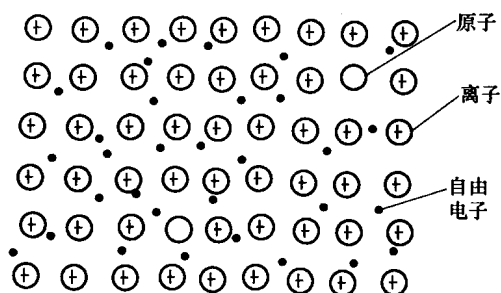


图 1-1 金属键模型

自由电子的这种金属结构决定了固体金属的共同特性——导电性、导热性、金属光泽性及延展性。

金属的自由电子在外加电场的作用下，定向移动可以形成电流，因此金属具有导电性。由于金属原子和离子不是静止的，是在其平衡位置上不断振动的，这种振动对电子的定向移动有阻碍作用，加上金属正离子对电子的吸引作用，故金属有电阻。温度升高，金属离子振动加剧，电子定向运动受到更大的阻碍，所以温度升高，金属的电阻增加。

金属的自由电子可以吸收可见光，然后又把大部分的光反射出来，因此金属不透明，且有金属光泽。

金属一端受热后，通过自由电子的高速运动，将能量迅速“输送”到冷的一端（金属离子与自由电子不断碰撞而交换能量），故金属有导热性。

由于自由电子不属于某一特定原子所有，在外力作用下，金属离子的位置发生相对位移后，不破坏金属键，从而显示金属特有的延展性。

1.1.2 固体金属的空间结构

金属晶体是由于金属原子靠共用自由电子结合在一起的。在电子的胶合作用下，金属原子尽可能以最紧密的堆积形成晶体。

为了研究问题的方便，把金属晶体中的金属原子简单地看成一个点，很多点排列组合起来就组成所谓的点阵，点与点连接起来就构成格子，称为晶格，而那些点就称为结点。从晶格中可以清楚地显示晶体中微粒（如金属原子）的排列规律。

在金属晶体中，原子有规则地排列。在空间排列上，有周期的重复性，各金属原子或离子的排列顺序和距离，呈现出周期性。这一周期性是由几个金属原子规则排列构成的小单元连续不断重复的结果，因此只要研究一个小单元就可了解整个晶体的结构。

由于晶格只是不断重复这种顺序的排列，因此只需要从中抽出一个最小的基本单元，就可以了解整个晶格，这个抽出来的最小基本单元称为晶胞。晶胞通常是一个很小的六面体，因为晶胞能在空间重复堆砌，这个六面体有一定的对称性。晶胞各边的尺寸与夹角称为晶格常数。

显然，晶胞在三维空间重复堆砌就形成晶格，晶胞是包括晶格所有信息的最小重复单元。

按照金属晶胞的不同类型，金属晶格典型结构有体心立方、面心立方、密排六方三种，

如图 1-2 ~ 图 1-5 所示。其基本参数见表 1-1。

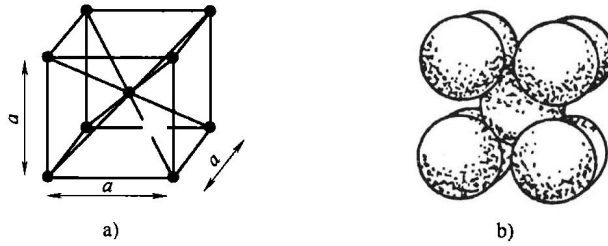


图 1-2 体心立方结构

a) 体心立方晶格 (质点模型) b) 体心立方点阵 (钢球模型)

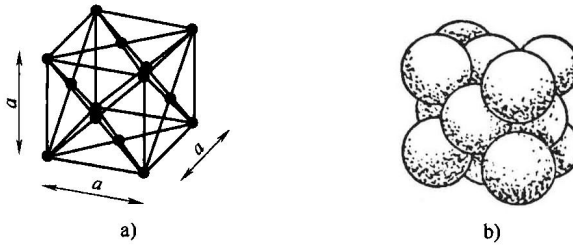


图 1-3 面心立方结构

a) 面心立方晶格 (质点模型) b) 面心立方点阵 (钢球模型)

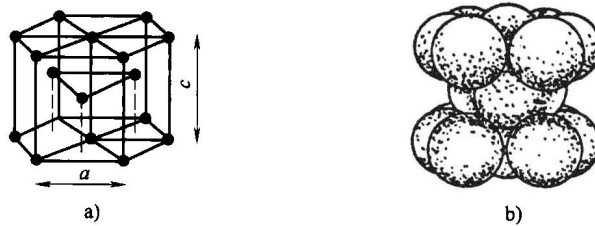


图 1-4 密排六方结构

a) 密排六方晶格 (质点模型) b) 密排六方点阵 (钢球模型)

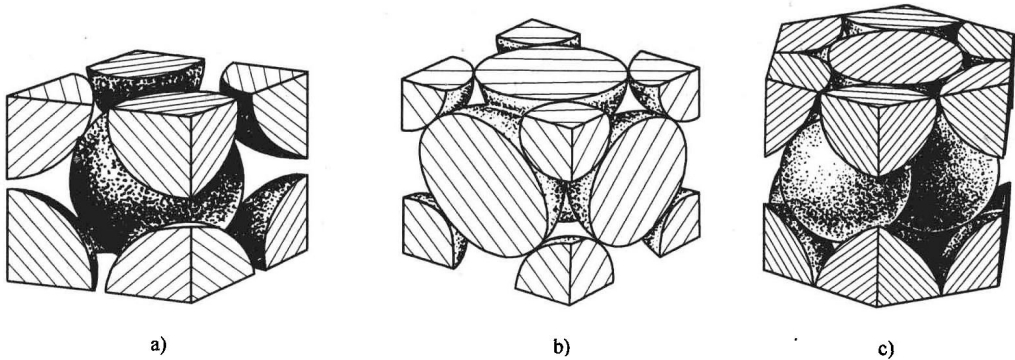


图 1-5 晶胞中原子数示意图

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方点阵

表 1-1 金属晶体结构类型的基本参数

晶格类型	一个晶胞中的原子数	配位数 ^①	原子间最近的距离	致密度	例 子
体心立方	$\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$	8+6	$\frac{\sqrt{3}}{2}a$	0.68	Li、Na、K、Mo、W、Cr、 α -Fe、 δ -Fe
面心立方	$\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$	12	$\frac{\sqrt{2}}{2}a$	0.74	Cu、Al、Ag、Au、 γ -Fe、 Pb、Ni
密排六方	$\frac{1}{6} \times 12 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6$	12	a	0.74	Mg、Zn、Co、Cd、Ti、La

① 配位数：晶体结构中，与任一原子最近并相邻且距离相等的原子数。

金属的晶体结构和晶格常数决定了晶体的基本类型，一般来讲，作为良导体的金属都是面心立方。

当已知一个金属在一定温度下的晶格常数，便可以利用下列公式计算其密度：

$$\rho = \frac{\frac{n}{N}M}{V} = \frac{nM}{NV}$$

式中 M ——金属的原子量；

V ——晶胞的体积；

n ——每一个晶胞所包含的原子数；

N ——每克原子金属所具有的原子数 ($N = 6.0228 \times 10^{23}$)。

表 1-2 电线电缆常用的几种金属的晶格常数

金 属	晶 格 类 型	晶 格 常 数/nm		原 子 距 离/nm	原 子 半 径/nm
		a	c		
铜	面心立方点阵	0.365		0.256	0.128
铝	面心立方点阵	0.405		0.286	0.143
铅	面心立方点阵			0.35	0.175
金	面心立方点阵	0.408		0.288	0.144
银	面心立方点阵	0.409		0.289	0.145
镍	面心立方点阵	0.352		0.249	0.124
锌	密排六方点阵	0.266	0.495	0.266	0.133
镉	密排六方点阵	0.298	0.562	0.298	0.149
γ -铁	面心立方点阵	0.365 (916℃)		0.258 (916℃)	0.129 (916℃)
α -铁	密排六方点阵	0.287		0.248	0.124

注：除注明温度外，其余均为室温。

1.1.3 晶体中原子间的作用规律

金属晶体中的原子之间通过金属键结合成具有一定几何尺寸、结构稳定的晶体，是由于原子间存在着作用力，即金属键，这种作用力本质上也是静电力，只是要遵守量子论原则。但两原子之间的作用力是随两原子之间的距离变化的，图 1-6 表示原子间相互作用力 f ，随原子距离 r 变化的规律。

从图可知，当 $r=r_0$ 吸引与排斥相等，而处于平衡状态。当两原子间距离小于 r_0 原子相互靠近时，排斥力急剧增加。

当 $r=r_m$ 时，吸引力最大，超过此值，原子间作用力减小，金属结构被破坏。

必须指出，上面的分析是一种在 $T=0\text{K}$ 时理想状态，若 $T\neq 0$ 时，就复杂得多。

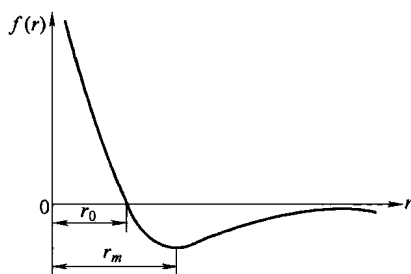


图 1-6 原子间的相互作用

1.1.4 晶体的缺陷

在实际的晶体中，原子的排列不可能是完整的理想状态，而是或多或少地存在偏离理想结构的区域。缺陷的产生与晶体的生成条件（晶体凝固）、晶体中原子的热运动（固态相变）、晶体的再加工（如冷拉）及辐射有关。

晶体的缺陷对金属的许多性能有极其重要的影响，特别是对塑性变形，断裂强度等起决定作用。

在晶体中，缺陷并不是静止的、稳定不变的存在着，而是随各种条件的改变，不断地变动，可以产生、发展、运动和相互作用，有时还会合并消失。

晶体的缺陷按几何形状可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三种形式。

1. 点缺陷

在晶体中，位于点阵上的原子并非静止不动的，而是以其平衡位置为中心，作高频率的热运动。在一定温度时，原子热振动的平均能量是一定的。但是各个原子的能量并不完全相等，振动的能量经常变化，称其为能量起伏。在任一瞬间，晶体中总有些原子具有很高的振动能量，足以克服周围原子对它的束缚作用，可以脱离其原来的平衡位置而迁移到别处，结果在原来的位置上就出现了空结点，称为空位。

离开平衡位置的原子可以有两个去处，即迁移到晶体的表面，也可以迁移到晶体点阵的间隙，晶体内就多了一个原子，称为填隙原子；空位、填隙原子就是点缺陷，如图 1-7 所示。此外，晶体中的杂质原子也是一种点缺陷。

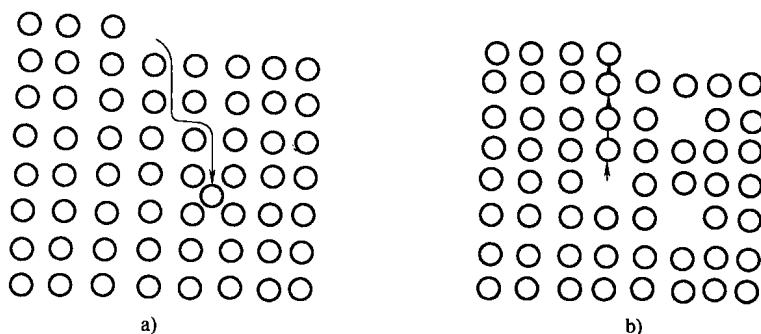


图 1-7 晶体中的点缺陷

a) 填隙原子 b) 空位

显然，空位形成比填隙原子要容易得多，也就是说填隙原子的形成能比空位的形成能

高, 因此在同一温度下, 空位浓度远多于填隙原子, 同时温度越高, 原子热运动加剧, 原子离开平衡位置的可能性增加, 空位也就越多。

空位的存在, 使周围原子失去了一个近邻原子而影响原子间作用力的平衡, 因而周围的原子都要向空位方向稍作些调整, 造成点阵局部的弹性畸变, 同样填隙原子所处的点阵也会发生畸变, 而且畸变更大。

晶体中空位和填隙原子不是固定不变的, 而且处于不断运动变化之中。由于原子的能量分布不均, 当空位周围的原子因热振动获得足够的能量, 就可能迁移至该空位 (见图 1-8)。空位可以通过迁移聚集, 也可以消失在晶界和晶体的表面。

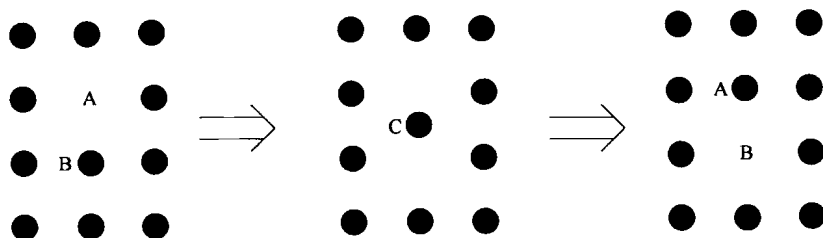


图 1-8 空位从 A 迁移到 B 示意图

高温淬火、冷加工、高能粒子辐射等都可能造成点缺陷。

例如, 高温淬火: 在高温时, 空位的浓度很高, 如果缓慢冷却下来, 多余的空位将在冷却过程中, 因热运动而消失在晶体的表面、晶界、位错处。如果金属从高温态急剧冷却 (例如淬火) 下来, 高温时的空位大部分保留到低温时, 使晶体空位数远远超过该温度下应有的空位数, 淬火空位不但对金属电阻率有影响, 而且还可以提高金属的屈服强度。

点缺陷对金属的物理性能和力学性能都有一定影响, 点缺陷引起电阻增加。这是由于晶体中存在点缺陷时对传导电子产生附加的电子散射, 使电阻增加。点缺陷存在还使晶体体积膨胀, 密度减少。实际上, 一个空位缺陷, 体积膨胀大约 0.5 个原子体积。一个填隙原子, 体积膨胀多达 1~2 个原子体积。

2. 线缺陷

位错在晶体中呈连续的线状分布, 称之为线缺陷。它表征在晶体中, 有一列或数列原子发生了有规律的错排现象。位错的多少用位错密度 ρ 来表示:

$$\rho = \frac{L}{V}$$

式中 L ——晶体内所含的位错线的总长度 (cm);

V ——晶体的体积 (cm^3)。

经过充分退火的金属晶体中, 位错密度为 $10^6 \sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$, 而经过强烈冷却变形的金属, 位错密度可增加至 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。

最常见的位错是刃型位错和螺型位错, 如图 1-9 所示。

1) 刃型位错

晶体内有一个原子平面在晶体内部中断, 其断裂处的边沿就是刃型位错。由于位错周围原子的畸变, 中断剩余的这部分原子面犹如插入的刀刃一样, 因而称为刃型位错, 如图 1-9b 和图 1-10 所示。

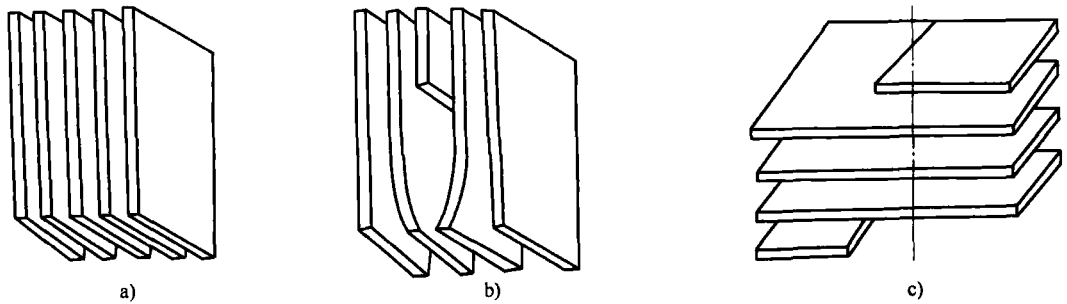


图 1-9 晶体中原子平面示意图

a) 完整晶体 b) 有刃型位错晶体 c) 有螺型位错晶体

刃型位错在晶体塑性变形中有重要作用。晶体受到的应力超过弹性极限后，将产生永久变形。金属之所以能压成片，或拉成丝就是这个原因。晶体的这种变形可以用晶面的滑移来解释。实验证明，当晶体受到弯曲或被拉长时，晶体各部分沿着晶面发生了相对位移即发生了滑移。当外力取消后，形变不恢复而产生永久变形。所以，塑性是由晶面的滑移产生的。因为滑移往往沿晶面发生，并且沿一定的晶向滑动，这些晶面称为滑移面，使晶面产生滑移的最小应力称为临界切应力。

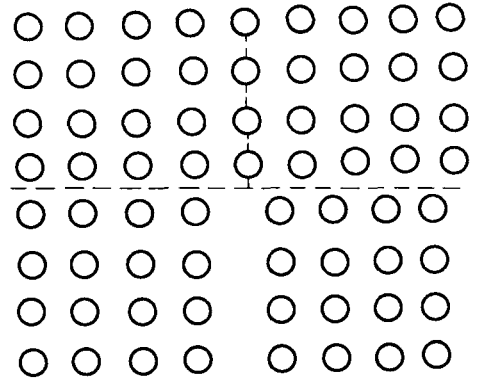


图 1-10 刃型位错的原子排列 (垂直于位错线的原子平面)

在切应力的作用下，如果滑移是上半部分对下半部分整体滑移，即同时做整体刚性的移动，这样所需的切应力很大，是实验测得的切应力的几千倍甚至几万倍。若滑移是通过位错在切应力作用下，在晶体中逐步地移动来进行的，当它由晶体的一端移至另一端时，只需要其邻近原子作很小距离的弹性偏移就能实现，而晶体的其他部位仍处于正常位置，此时滑移的切应力大为减少。图 1-11 是说明刃型位错的滑移过程。

在切应力的作用下，如果滑移是上半部分对下半部分整体滑移，即同时做整体刚性的移动，这样所需的切应力很大，是实验测得的切应力的几千倍甚至几万倍。若滑移是通过位错在切应力作用下，在晶体中逐步地移动来进行的，当它由晶体的一端移至另一端时，只需要其邻近原子作很小距离的弹性偏移就能实现，而晶体的其他部位仍处于正常位置，此时滑移的切应力大为减少。图 1-11 是说明刃型位错的滑移过程。

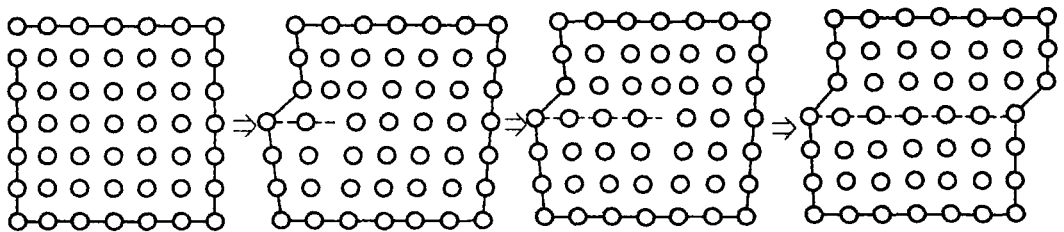


图 1-11 刃型位错的滑移过程

2) 螺型位错

位错另一种形式是螺型位错，如图 1-12 所示。从图 1-12a 可见，如果将晶体沿 ABCD 面局部切开，并使这上下两部分晶体相对移动一个原子间距，然后上下接合起来，这形成螺型位错。图 1-12b 是俯视图，进一步看出 aa' 右边晶体的上层原子与下层原子相对移动了一个