

电线电缆技术丛书

电缆工艺技术 原理及应用

王卫东 主编 / 段国权 主审

DIANLAN GONGYI JISHU YUANLI JI YINGYONG



电线电缆技术丛书

电缆工艺技术原理及应用

王卫东 主编 段国权 主审



机械工业出版社

本书共分为10章,前4章主要介绍了铜铝的精炼、制杆、拉线、退火、绞线工序的工艺技术、加工原理、晶体结构变化及理论分析,导体类型和绞线过程中单线的变形;第五、六、七章介绍了绝缘材料和护套的加工;第八章对绝缘线芯成缆、线芯变形进行了分析;第九章对绕包、装铠、编织、金属护套等护层制造技术和工艺进行了介绍;第十章对双金属线、金属的挤压包覆、新型架空导线、矿物绝缘电缆的型式、制造方法、制造工艺进行了介绍。

本书是作者多年从事电缆生产的实际工作经验和教学心得的总结,实用性强,可供电线电缆制造行业工程技术、管理人员和技术工人学习,也可供大专院校相关专业师生学习,还可供电缆检测及应用的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电缆工艺技术原理及应用/王卫东主编. —北京:机械工业出版社, 2011.8

(电线电缆技术丛书)

ISBN 978-7-111-35675-2

I. ①电… II. ①王… III. ①电缆—生产工艺 IV. ①TM246

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第168086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:任鑫

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·463千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-35675-2

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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

电线电缆行业是国民经济一个重要的、基础性的行业,电线电缆产品被誉为国民经济的“血管与神经”,其对国家经济建设和社会发展的重要性可见一斑。近年来,随着我国经济的快速发展,我国电线电缆行业得到迅猛的发展,2010年行业总产值达9300多亿元,从业人员超过72万人。从规模上看,中国已成为世界上第一大电线电缆生产国,在国内,电线电缆行业已成为仅次于汽车的第二大行业。目前,我国经济社会的发展也进入一个继往开来、加速转型、科学发展的关键时期。全面贯彻落实科学发展观、加强自主创新、转变行业经济增长方式、推进行业结构性调整和升级、提升国际竞争能力是电线电缆行业面临的重大任务与挑战。

产业的高速发展与转型升级带来了对技术水平提升、技术人才需求量增加的渴求,为满足高等院校电线电缆技术人才培养的需要,配合行业工程技术人员技术水平提高的要求,我们编写了这本介绍电线电缆工艺技术原理及应用方面的书籍。本书以电线电缆制造工艺流程为顺序,对导电线芯、绝缘、护层等电缆各工序的工艺技术进行了介绍,对提高产品质量的途径进行了探索,同时对所涉及的金属材料晶体结构及塑性加工、高分子材料加工等理论结合制造技术进行了系统的阐述。另外,对铜铝的连续挤压及包覆、矿物绝缘电缆、新型架空导线制造等新工艺、新技术、新产品也进行了介绍。

本书作者有10余年从事电线电缆制造的工作经历,随后又进行了多年的电缆专业教学,本书是对多年实践与理论教学的总结。书中对电缆制造过程中的质量控制重点、有助于工艺技术理解的理论知识、生产实践中难以理解的难点进行了有针对性、有重点地阐述,从而使本书既有较广的知识覆盖面,同时又突出重点和实用性,可供电线电缆制造行业工程技术、管理人员和技术工人学习,也可供大专院校相关专业师生学习,还可供电缆检测及应用的专业技术人员参考。

本书由河南机电高等专科学校副教授王卫东主编,长天电工集团有限公司技术总监段国权高级工程师主审,参与本书编写的还有河北邢台电缆有限责任公司孟广济高级工程师,永进电缆集团有限公司总工程师苑为民,河南机电高等专科学校倪艳荣、张静等。在编写过程中得到了河南机电高等专科学校电缆教研室全体老师的热情帮助,也得到了河北邢台电缆有限责任公司的大力支持。值此成书之际,向他们表示衷心的感谢!

愿本书的出版对我国电线电缆制造技术水平的提升、产品质量的提高尽到微薄之力!由于编者学识疏浅,书中的疏漏和错误在所难免,恳请广大读者批评指正!

作者

2011.7

目 录

前言		
绪论	.....	1
第一章 金属的结晶与塑性变形	.....	6
第一节 金属材料的力学性能	.....	6
第二节 金属的晶体结构	.....	12
第三节 纯金属的结晶	.....	17
第四节 金属的塑性变形	.....	21
第五节 冷塑性变形对金属组织和性能的影响	.....	26
第六节 回复与再结晶	.....	29
第七节 金属的热塑性加工	.....	33
第八节 影响金属塑性和变形抗力的因素	.....	34
第二章 铜铝杆生产	.....	39
第一节 铜的熔炼	.....	39
第二节 铝的熔炼	.....	48
第三节 连续浇铸	.....	55
第四节 连续轧制	.....	61
第五节 上引法生产无氧铜杆	.....	67
第六节 浸涂成型法生产无氧铜杆	.....	69
第三章 拉线与退火	.....	72
第一节 拉线的基本原理	.....	72
第二节 拉线模和拉线润滑	.....	76
第三节 影响拉制力的因素	.....	82
第四节 拉线机及辅助设备	.....	84
第五节 拉线机的工作原理	.....	87
第六节 单模拉线机配模	.....	93
第七节 多模拉线机配模	.....	96
第八节 线材退火	.....	99
第九节 退火工艺	.....	100
第四章 绞线工艺	.....	105
第一节 绞线的意义及分类	.....	105
第二节 绞线的工艺参数	.....	108
第三节 绞线的结构参数	.....	113
第四节 圆形绞线的紧压	.....	117
第五节 异形导电线芯的生产	.....	120
第六节 单线在绞合过程中的变形	.....	126
第五章 挤塑工艺	.....	129
第一节 聚合物的结构与性能	.....	129
第二节 聚合物的流变性质	.....	133
第三节 聚合物成型过程中的物理和化学变化	.....	139
第四节 塑料挤出机组	.....	143
第五节 塑料挤出机	.....	145
第六节 塑料挤出的基本原理	.....	153
第七节 塑料挤出工艺	.....	160
第八节 挤塑模具	.....	165
第六章 交联聚乙烯绝缘制造	.....	170
第一节 聚乙烯过氧化物交联原理	.....	171
第二节 过氧化物交联生产设备	.....	176
第三节 过氧化物交联工艺	.....	181
第四节 硅烷交联聚乙烯绝缘材料的生产	.....	187
第五节 辐照交联反应机理	.....	192
第六节 辐照交联技术	.....	195
第七章 橡皮绝缘护套的加工	.....	200
第一节 生胶塑炼机理	.....	200
第二节 混炼过程分析	.....	204
第三节 炼胶设备	.....	206
第四节 塑炼工艺	.....	211
第五节 橡料的混炼工艺	.....	215
第六节 挤橡工艺	.....	221
第七节 硫化工艺	.....	224
第八节 硫化方法	.....	228
第八章 成缆工艺	.....	231
第一节 成缆设备及工作原理	.....	231
第二节 圆形线芯成缆工艺	.....	236
第三节 异形线芯成缆工艺	.....	238
第九章 护层制造	.....	242
第一节 绕包工艺	.....	242
第二节 铅护套制造	.....	248
第三节 铝护套的制造	.....	252
第四节 装铠工艺	.....	256
第五节 编织工艺	.....	260

第十章 几种新型电缆产品的制造	266	第三节 矿物绝缘电缆的制造	286
第一节 双金属线的制造	266	参考文献	293
第二节 新型架空导线的制造	276		

绪 论

在现代生活中，人类对电线电缆并不陌生，人类足迹所至，无论是在浩瀚的宇宙、波涛汹涌的海洋、探索地球奥秘的地下，还是在喧闹的都市、恬静的乡村都有电线电缆产品的踪影。在一切工业建设、国防科技、科学研究、农业生产以及日常生活中，电力传输、现代通信、电气控制等领域都离不开电线电缆产品。因此，常有人把电线电缆称作国民经济的“血管和神经”，这个比喻形象地说明了电线电缆在现代社会中所起的重要作用。

一、电线电缆产品的应用领域

1. 电力系统

采用各种不同类型、不同电压等级的电线电缆把发电站、变电站、配电站和用电单位连接起来，组成了一个电能的传输和分配网络，即电力系统。在这个系统中输、配、供电各级采用了大量不同电压等级的电线电缆作为电能传输的载体，这包括各级输配电用到的电力电缆、架空输电用到的裸导线、各级用到电设备用的电气装备用电线电缆等。电力系统用电线电缆占到线缆工业总产值的 60% 以上。

2. 信息传输系统

随着现代通信技术的发展，电话、电视、互联网已成为人们获取信息的主要方式，在国防、气象、航空航天等领域信息的传输和交流也需要通信网络来保障，而这个功能强大的通信网络会用到电话电缆、光缆、射频电缆、电子线缆等多种电线电缆产品。并且随着信息技术的发展，信息传输类电线电缆的发展将是电线电缆工业的持续热点。

3. 电工装备、电器仪表内部用线缆

在电力和信息系统中，从系统的源头，经过系统中无数大小节点到用户终端各种电气系统的连接，电器仪表设备内部还会将各种电线电缆产品用于控制、测量等信号的传输；电机、变压器及仪器仪表等内部也要采用电磁线进行电磁能的相互转换……

可见电线电缆是用以传输电能、传递信息和实现电磁能转换的线材产品，广泛应用于国民经济建设的方方面面。

通常我们把这一类产品总称为电线电缆，电线和电缆有没有区别呢？两者的区别只是概念性的相对而言，本质上并无严格的区别。一般的习惯是把没有绝缘层、有绝缘层但结构简单、产品直径小芯数少的产品称为电线，如裸电线、塑料线、橡皮线、电磁线等。把结构较复杂、有坚固密封护套、外径较大的产品称为电缆，如电力电缆、射频电缆、通信电缆、光缆等。另外，就是该类产品的刚出现时的定名，以后就按“约定俗成”的习惯沿用，如橡皮绝缘电线、塑料绝缘电线大量应用的是 6 mm^2 及以下的小线，于是把这一类中 240 mm^2 、 300 mm^2 ，甚至 800 mm^2 的大截面积的产品也称为“电线”；电视机的引入线是外径只有 6 mm 左右的细线，但习惯把这类产品称为“小同轴电缆”。

二、电线电缆的分类

电线电缆用途广、种类多、品种杂。据统计，目前约有 1200 多个品种，20000 多个规格，在机电行业中它是品种和门类最多的大类产品之一。为使技术研究、生产组织、产品销

售和安装使用的便利，按电线电缆的结构、性能及应用将其分为五个大类。

1. 裸电线及裸导体制品

裸电线及裸导体制品是指仅有导体而无绝缘层的电缆产品。其主要用于架空输配电线路和电气设备中的导电元件，使用时，一般以空气（或其他介质）作为绝缘。如架空输、配电线路用的架空导线，以及铜、铝汇流排（母线）和电力机车接触线等。其生产工艺的技术学科是有色金属的熔炼、合金配制、改性以及压力加工，工艺技术主要有轧制、拉制和绞制等。

裸电线及裸导体制品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。根据结构和用途不同又分为裸单线，裸绞线，软接线和编织线，型线与型材四个系列。

2. 电力电缆

电力电缆是指在电力系统的主干线路中用以传输和分配大功率电能的电缆产品。用于电力输配电线路，其特点是传输电流大（从几十安培、几百安培乃至几千安培以上），电压高（可达500kV、1000kV甚至更高），因此它也是高电压绝缘中最具有代表性的产品。

产品的技术性能主要是导体的导电能力（载流量），高电场下的电场均匀性和绝缘稳定可靠性，整体结构的热平衡性（散热能力要与运行中的发热量保持平衡），电动应力承受能力，以及电缆在安装、敷设、运行中机械力的承受能力。在生产工艺中，各个工序都要充分考虑满足上述各项严格要求。因此，该类产品结构复杂，在导体、绝缘层外还有结构复杂的护层结构。一般采用铜或铝做导体，常用绝缘材料有交联聚乙烯、聚氯乙烯、橡皮等，电力电缆可用于地下、室内、隧道内敷设，还可用于江底、海地敷设，具有占地少、安全等特点。

3. 通信电缆及光缆

通信电缆是用于传输电话、电报、电视、广播、传真、数据和其他电信信息的电缆产品，又分为对称通信电缆和同轴通信电缆。

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，具有传输衰减小、传输频带宽，不受电磁场干扰，保密性好的优点，并且产品重量轻、外径小。因此，光缆一经诞生就得到迅速发展。

以往的信息传输系统仅承担电报、电话、电传和电视等业务，因此采用的电线电缆主要是市内电话电缆、长途通信电缆（对称式或同轴式结构）和一般的通信线、通信设备用线等。随着信息传输的数字化、高速化和广域化，特别是宽带网、信息传输网络化的建立和发展，使信息传输系统用电缆和光缆有了超常规的发展。

信息传输用电线电缆的技术学科是电磁波（含光波）的有线传输理论，即要求以极高速率将传输的信息准确、清晰地传递至接收方。因此，要求电线电缆具有电导率很高的导体，并有绝缘电阻高而介电常数很小的绝缘层，同时要求整根电线电缆在长度上结构尺寸具有均匀性、一致性等。对金属导体的电线电缆的屏蔽性能也有很高的要求。

4. 电气装备用电线电缆

电气装备用电线电缆是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、信号控制系统中用到的电线电缆产品。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，品种约占电线电缆总量的

60%。

它包括了用户低压用电线路（如照明线、动力线）用的橡塑绝缘电线、软线，从供电点（开关、插座）到终端用电设备的连接线，终端设备组成之间的连接线（如控制、信息系统用），以及用电设备内部安装用的电线电缆。特别是特殊的工业系统如石油和矿山探测、开采，大型而又各有专门特殊要求的交通运输器具，如汽车、机车、飞机、船舶等用的电线电缆等。

此类产品中除了少部分的产品工作电压较高（如矿用电缆、机车车辆用电缆、医疗设备用直流高压电缆，军工、科技设备用高压直流电缆等）外，绝大多数产品的工作电压不高。但由于用电设备工作环境和使用要求多种多样，因此对各种产品的性能要求比较特殊而且差异很大。总体上来说，产品的柔软性、耐温性、耐候性以及抗各种电磁波干扰的屏蔽性是本产品技术特性的体现。从工艺上来说，除了导体、绝缘、护套材料的多样性要求外，结构的微细化如导体的微细化、薄绝缘化等也是工艺技术上的难点。

5. 电磁线（绕组线）

电磁线又称绕组线，是以绕组的形式在磁场中切割磁力线产生感应电流或通以电流产生磁场，即能实现电磁能相互转换而采用的绝缘电线。其用于各种电机、电器、仪表、变压器以及电极磁场发生器中的绕组线圈。

电磁线包括漆包线、绕包线和特种电磁线。电磁线的技术特性除了导电和绝缘性能外，主要是适应安装的要求，即所属电机、电器、仪表的耐温等级，与周围的材料的化学相容性，安装时的柔软性和耐刮性等。

三、电线电缆的发展历史

电线电缆的历史是随着电在社会中的应用而开始的。最先使用无绝缘的铜线，继之又使用了带绝缘的铜线，为了保护这种电线不受损坏又采用了棉纱、丝绸等保护。电线电缆用于传输电能也用于通信线路，随着电气技术的进步，电线电缆应用到了生产、生活的方方面面。

1. 电线电缆发展简史

电的发现可以追溯到公元前 500 年，当时希腊的泰勒斯就发现摩擦可以生电。到 1729 年，英国人格雷发现“电”可以沿金属线传输，出现了“导体”的概念。1740 年，法国人德扎克里埃规定了导体和绝缘的概念。1744 年，德国人温克勒用裸电线把电火花传输到了远距离点，宣告了电线的诞生。1752 年，美国人弗兰克林发明了避雷针并用电线接地，使电线第一次实用化。1799 年，意大利人伏特发明了电池，获得了持续的电流，为电线电缆的应用打开了大门。

19 世纪初，丹麦的奥斯特、英国的法拉第、美国的亨利等大批欧美物理学家的发现，催生了现代电学、电磁学的基础理论，为以后电力、信息传输奠定了基础。这一时期，人们不断地寻找可用于电线绝缘的材料，期间试用了皮革、丝绸、麻、棉纱等材料。直到 1812 年，俄国人用未经硫化的橡胶包覆在铜线上，制成了第一根有绝缘的电线。以后随着电力工业的发展和电报机的发明，极大地推动了电缆工业的发展。1879 年，爱迪生发明了电灯，制成了黄麻沥青绝缘电力电缆；1887 年，英国的 Farranti 发明了 10kV 油浸纸铅包电力电缆；1891 年，英法两国在英吉利海峡敷设了最早的海底话缆；1895 年，在美国诞生了铝架空线；1924 年，意大利 Pirelli 公司试制成功了低油压充油电缆，这种类型的电缆目前仍是超高压

电缆的主要品种。在这一时期，英、美、德、日相继生产出了油纸绝缘电缆。各类电线电缆的雏形都已诞生，但都是低电压、低频率、近距离、使用天然材料为绝缘，设备与工艺较为简单。一般把1744~1920年称为电线电缆的启蒙阶段。

20世纪20年代以后，电线电缆工业逐渐走向成熟，在此期间产生了分相电缆，导体开始采用精炼铜。1925年塑料开始应用于电缆，使绝缘材料由单纯的天然材料发展到天然与合成材料并举。1927年，美国的Semon发明了聚氯乙烯绝缘电缆，但工业化生产到了20世纪40年代以后。

20世纪40年代以前，制作电线电缆的材料不外乎是一些天然制品。绝缘材料是天然橡胶、油纸、棉纱、丝绸等，护层材料一般是棉纱涂蜡或沥青，在电缆护层上则多用铅，主导产品是以橡皮绝缘为主的布电线系列和以纸绝缘为主的电力电缆系列两大类。控制电缆、通信电缆也是以纸绝缘为主，船用电缆以橡皮绝缘为主。

第二次世界大战期间，电线电缆成为战略物资，所用的原材料极度缺乏。在电缆材料中出现了丁苯、氯丁、丁钠橡胶和聚乙烯、聚氯乙烯等合成材料，使电缆产品发生了重大变革，为传统产品的由简到繁的变化而转为由繁趋简的过渡创造了条件。德国为寻找橡胶的代用品，大力发展聚氯乙烯电缆。20世纪50年代初，欧洲出现了绝缘、护套均为聚氯乙烯的全塑电力电缆。相比于传统的油纸绝缘电缆，全塑电力电缆具有制造工艺简单、使用维护方便、可以直埋敷设、不受落差限制、重量轻、成本低等特点，在中低压领域逐步取代了纸电缆。

20世纪50年代，美国发明了交联聚乙烯，并先后开发了辐照交联、化学交联和硅烷交联法用于交联聚乙烯绝缘的制造。20世纪60年代初，日本开始制造化学交联聚乙烯电力电缆，并得到了快速发展：1962年制成了66kV级，1973年试制了275kV级，2000年500kV级在东京首先安装使用。交联聚乙烯以其优异的性能迅速在低压、中压、高压、超高压领域得到了广泛应用。

2. 我国电缆工业的发展

我国电缆工业起步晚，规模小。1936年国民党政府成立了“电工厂筹委会”负责电缆厂的筹建。随后于1938年在昆明建立了电线电缆厂，并与1939年7月1日正式投产。

1938年5月在沦陷了的沈阳，由日本的古河、藤仓、住友等几个会社合伙建立的“满洲电线株式会社”正式投产。同时在上海、天津也有几家规模很小的电缆生产厂。

1945年8月日本投降后，当时的国民党政府接收了沈阳、上海、天津的日伪电工产业。当时的产品只有裸铜单线、铜绞线、花线、橡皮线、铅包橡皮线、丝包线、橡套软线、军用被覆线等，直至1948年昆明电线厂才生产出6.6kV橡皮绝缘铅包电缆。建国时全国有电线电缆职工2000余人，设备500台，年用导体总量6500吨，生产萧条，处于瘫痪状态。

建国以后，我国电线电缆工业进入了良好的发展时期。沈阳电缆厂的投入生产是我国电缆工业发展的里程碑。1950年，当时的沈阳电缆厂被列为“一五”全国156项重点工程之一，由苏联帮助建设，1954年6月19日正式动工，1956年9月12日国家验收合格正式投入生产。同时，我国自主扩建了上海电缆厂。两厂在当时都是规模大，生产门类齐全，是与当时世界先进水平差距不大的电缆厂。在消化吸收的基础上，又在内地相继建立了郑州电缆厂、西安电缆厂等一大批电线电缆企业，基本满足了我国经济建设的需要。

改革开放后，电线电缆工业迎来了新的春天，通过引进吸收国外的先进技术，使我国电

缆生产技术得到迅速的发展。据统计,目前全国有电缆企业 6000 余家,2008 年导体用铜、铝量分别为 412 万吨、145 万吨,总产值 6904 亿元,成为世界最大的电线电缆生产国。随着电力工业的发展,我国已能生产 1100kV 架空导线、220kV 高压交联聚乙烯绝缘电缆,500kV 超高压交联聚乙烯绝缘电缆也正在试制中。超导电缆研制也处于世界先进水平,2004 年我国自行研制的 35kV、2kA,总长 30m 的高温超导电缆在云南普吉电站并网运行。

四、电线电缆的技术特点

电线电缆是一门综合性很强的产业,由于功用不同、应用场合不同,电缆的结构、材料、工艺也各有不同。总的来看,电线电缆的技术特点可综合如下:

1. 产品性能的综合性

在电线电缆的结构设计、生产、选型时,必须根据产品的用途、使用的要求、敷设环境等综合考虑材料的电性能(包括导电性能、绝缘性能、传输特性等)、机械物理性能、老化性能、材料间的相容性和其他性能(如金属的硬度、蠕变、高分子材料的不延燃性、耐辐射性能等)。这就需要冶金、金属加工、电镀、高分子材料、电介质化学、电气绝缘以及高分子流变学、传热学等方面的综合知识。

2. 产品应用的广泛性

电线电缆包括用于传输电力的电力电缆,传递信息的通信电缆,用于电磁能转换的电磁线,用于控制、信号、航空航天、船舶、汽车、矿山等场合的专用电缆。就电线电缆的应用领域而言,游弋于浩渺太空的各类航空器材、横越大洋洋底连通各大洲的通信干线、繁忙穿梭的汽车火车、给世界带来无尽动力的各类电机电器等,都有电线电缆的伴随。

3. 使用材料的多样性

从某种意义上讲,电缆技术的发展史就是电缆材料的开发应用史。各种新材料的应用促进了电缆技术的发展,按材料属性有金属材料、纤维材料、漆料、涂料、橡胶、塑料、无机材料和气体材料等八大类应用于电线电缆的制造。

4. 生产过程的连续性

电缆的结构是从内到外层层同心的结构,这就决定了电线电缆的生产只能从内到外依次连续进行,各工序之间紧密衔接、不能颠倒。不能像其他机械产品一样进行零部件的装配组合。

5. 设备用途的专用性

由于电缆结构的特殊性,电缆行业的设备不同于机械行业的其他加工设备。结合工艺的特点,电缆设备可以用铸、轧、压、拉、绞、挤、包、涂、镀几个字来概括。

6. 质量要求的严格性

电缆生产的连续性决定了上一工序产品质量必将影响到下一工序,电缆不像其他机械产品一样可以对问题零部件进行拆除更换,一旦出现质量问题,将导致整根电缆的报废或进行截断处理。若是运行中的电缆发生了故障,将会导致大面积的停电或信息传输中断,损失和影响是巨大的。因此,对电缆产品的质量要求丝毫马虎不得。

总之,电线电缆的生产是以材料为基础,设备是关键,工艺是保证的有机综合体。只有通过多方面的努力才能促进电缆技术的不断进步。

第一章 金属的结晶与塑性变形

电缆工业中用到的材料种类繁多，涉及多门基础学科。按照材料类型可分为金属材料和非金属材料，非金属材料主要用于电缆绝缘、护层、填充结构，而电缆的导体、屏蔽以及护层的部分结构会用到铜、铝、铁等金属材料。本章通过对金属材料基本性能、晶体结构、结晶过程及塑性变形的学习，使读者对金属材料的使用性能、工艺性能具有一定的认识，对金属材料的加工、使用起到一定的指导作用。

第一节 金属材料的力学性能

金属材料在加工和使用过程中都要承受不同形式外力的作用，当外力达到或超过某一限度时，金属材料就会发生变形，以至断裂。金属材料在外力作用下所表现的一些性能，称为金属材料的力学性能。

无论何种固体材料，其内部原子之间都存在相互平衡的原子结合力的相互作用。当金属材料受外力作用时，原来的平衡状态被破坏，材料中任何一个小单元与其邻近的各小单元之间就诱发了内力。金属材料在外力作用下引起弹性变形和塑性变形。当载荷性质、环境温度与介质等外在因素改变时，对金属材料力学性能的要求也不同。金属材料的力学性能主要是指强度、刚度、硬度、塑性和韧性等。

一、强度指标

金属材料的强度是金属抵抗永久变形和断裂的能力。把一定尺寸和形状的金属试样（见图 1-1）装夹在试验机上，然后对试样逐渐施加拉伸载荷，直至把试样拉断为止。根据试样在拉伸过程中承受的载荷和产生的变形量之间的关系，可测出该金属的拉伸曲线（见图 1-2）。在拉伸曲线上可以确定以下性能指标。

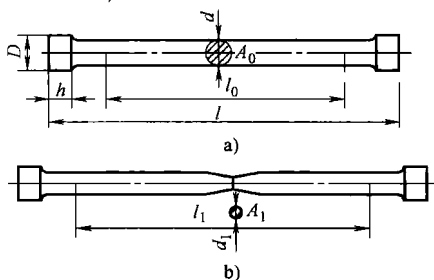


图 1-1 钢的标准拉伸试样
a) 拉断前 b) 拉断后

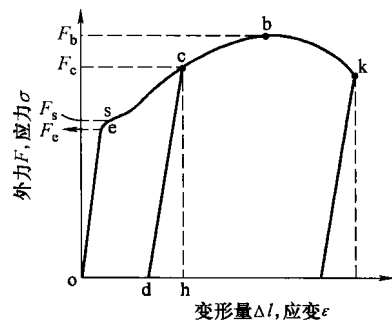


图 1-2 塑性材料的拉伸曲线
($F-\Delta l$ 曲线与 $\sigma-\epsilon$ 曲线形状相似只是坐标不同)

1. 弹性极限

从图 1-2 可以看出，拉伸曲线的 oe 线段是直线，这一部分试棒变形量 Δl 与外力 F 成正比。在 $F < F_e$ 时进行卸载，伸长沿 eo 方向减小，最后伸长消失，试棒恢复到原来尺寸，这种

性质称为材料的弹性，这一阶段的变形称为弹性变形。外力 F_e 是使试棒只产生弹性变形的最大载荷。

无论何种材料，内部原子之间都具有相互平衡的原子力相互作用，以保持其固定的形状。当受到外力时，原来的平衡被破坏，其中任何一个小单元都和邻近的各个小单元之间诱发了新的力（内力），材料单位截面积上的这种力称为应力，用符号 σ 表示。

弹性极限用符号 σ_e 表示，单位为 MPa，即

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0} \quad (1-1)$$

式中 A_0 ——试棒的原始截面积，单位为 mm^2 ；

F_e ——试样 e 点所承受外力，单位为 N。

弹性极限 σ_e 是由试验得到的，其大小受测量精度影响很大，故通常采取规定微量塑性伸长应力 $\sigma_{0.01}$ 为弹性极限。

2. 屈服点

从拉伸曲线上可以看到，当载荷增加至超过 F_e 后，试样必定保留部分不能恢复的残余变形，即塑性变形。在外力达 F_s 时，曲线出现一个小平台。此平台表明不增加载荷试棒仍继续变形，好像材料已经失去抵抗外力能力而屈服了。我们称试棒屈服时的应力为材料的屈服点，以 σ_s 表示，单位为 MPa。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (1-2)$$

式中 F_s ——试样在 s 点所承受外力，单位为 N。

很多金属材料，如大多数合金钢、铜合金以及铝合金的拉伸曲线不出现平台，脆性材料如普通铸铁、镁合金等，甚至断裂之前也不发生塑性变形，因此工程上规定试棒发生某一微量塑性变形（0.2%）时的应力作为该材料的屈服点，称为屈服强度或规定微量塑性伸长应力，并以符号 $\sigma_{0.2}$ 表示。

3. 抗拉强度

当作用力 $F > F_s$ ，例如加载到 c 点，然后进行卸载，则伸长会随载荷的减小而沿 \overline{cd} 方向变化（ $\overline{cd} // \overline{eo}$ ）。卸载后，试样的变形不能完全恢复，会保留残余变形 od，这种残余变形称为塑性变形。

试棒在屈服时，由于塑性变形而产生加工硬化，只有载荷增大，变形才能继续增加，直到增到最大载荷 F_b 。拉伸曲线的这一阶段，试棒沿整个长度均匀伸长。当载荷达到 F_b 后，试棒就在某个薄弱部分形成“缩颈”，如图 1-1b 所示那样。此时不增加载荷试棒也会发生断裂。 F_b 是试棒承受的最大外力，相应的应力即为材料的抗拉强度，以 σ_b 表示，单位为 MPa。它代表了金属材料抵抗大量塑性变形的能力，即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (1-3)$$

式中 F_b ——试样断裂前承受的最大外力，单位为 N。

由上述可知，强度是表征金属材料抵抗过量塑性变形或断裂的物理性能。

4. 疲劳强度

某些机器零件，如轴承、弹簧等在交变载荷长期作用下工作，很多情况是在工作应力峰

值低于弹性极限的情况下突然破坏的。在多次交变载荷作用下的破坏现象称为疲劳。交变载荷可以是大小交变、方向交变，或同时改变大小和方向。

金属材料的疲劳破坏过程，首先是在其薄弱部位，如有应力集中或缺陷（划伤、夹渣、显微裂纹等）处产生微细裂纹。这种裂纹是疲劳源，而且一般出现在零件表面上，形成疲劳扩展区。当此区域达到某一临界尺寸时，零件就在甚至低于弹性极限的应力下突然脆断。最后的脆断区称为最终破断区。

疲劳强度除了决定于材料的成分及其内部组织外，制品的表面状态及形状对其也有很大的影响。表面应力集中（划伤、损伤、腐蚀斑点等）会使疲劳寿命大大减低。提高制品疲劳寿命的方法有：① 设计上减小小应力集中，转接处避免锐角连接，使零件具有较小的表面粗糙度；② 强化表面，如渗碳、渗氮、喷丸、表面滚压等，在零件表面造成残余压应力，抵消一部分拉应力，降低零件表面实际拉应力峰值，从而提高零件的疲劳强度。

二、塑性指标

金属材料在载荷作用下稳定连续地产生不可逆永久变形而不破坏其完整性的能力称为塑性。评定材料塑性的指标常用伸长率和断面收缩率，也有采用扭转或墩粗试验来测定。

1. 伸长率 δ

伸长率可用下式确定：

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 l_0 ——试棒原标距长度，单位为 mm；

l_1 ——拉断后试棒的标距长度（见图 1-1），单位为 mm。

在材料手册中常常可以看到 δ_5 和 δ_{10} 两种符号，它分别表示用 $l_0 = 5d$ 和 $l_0 = 10d$ （ d 为试棒直径）两种不同长度试棒测定的伸长率。 l_1 是试棒的均匀伸长和产生缩颈后伸长的总和。很明显，短试棒中缩颈的伸长量所占的比例大，故同一材料所测得的 δ_5 和 δ_{10} 值是不同的， δ_5 的值较大，而 δ_{10} 值较小，例如钢材的 δ_5 大约为 δ_{10} 的 1.2 倍。所以相同符号的伸长率才能进行相互比较。

2. 断面减缩率 φ

断面减缩率可用下式求得：

$$\varphi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 A_0 ——试棒的原始截面积，单位为 mm^2 ；

A_1 ——试棒拉断后缩颈处的截面积（参见图 1-1），单位为 mm^2 。

断面减缩率不受试棒标距长度的影响，因此能更可靠地反映材料的塑性。

3. 扭转和压缩（或墩粗）试验

扭转试验是对一定长度的试样扭转，以试样扭断时的扭转角度来表示其塑性。

压缩（或墩粗）试验是对一定规格的圆柱形试样进行压缩（或墩粗），以试样出现第一个裂纹时的压下率来表示其塑性的试验方法。

对必须承受强烈变形的材料，塑性指标具有重要的意义。塑性优良的材料冷压成形性好。此外，重要的受力机械零件也要求具有一定塑性，以防止超载时发生断裂。伸长率和断面减缩率也表明材料在静载或缓慢增加的拉伸应力下的韧性。不过在很多情况下，具有高减

缩率的材料可承受高的冲击吸收功。

三、刚度指标

材料在受力时抵抗弹性变形的能力称为刚度，它表示材料弹性变形的难易程度。材料刚度的大小，通常用弹性模量 E 来评价。

材料在弹性范围内，应力 σ 与应变 ε 的关系服从胡克定律，即 $\sigma = E\varepsilon$ 或 $\tau = G\gamma$ 。式中， σ 和 τ 分别为正应力和切应力， ε 和 γ 分别为正应变和切应变。应变为单位长度的变形量，即 $\varepsilon = \Delta l/l$ 。

因之 $E = \sigma/\varepsilon$ 或 $G = \tau/\gamma$ ，相应为弹性模量和切变模量。由图 1-2 可以看出，弹性模量 E 是拉伸曲线上的斜率，即 $\tan\alpha = E$ 。斜率 $\tan\alpha$ 越大，弹性模量 E 也越大，即弹性变形越不容易进行。因此， E 、 G 是表示材料抵抗弹性变形能力和衡量材料“刚度”的指标。弹性模量越大，材料的刚度越大，即具有特定外形尺寸的制品保持其原有形状与尺寸的能力也越大。

在设计机械零件时，要求刚度大的零件，应选用具有高弹性模量的材料。例如镗床的镗杆选用钢铁材料。要求在弹性范围内对能量有很大吸收能力的零件（如仪表弹簧），一般使用软弹簧材料铍青铜、磷青铜制造，应具有极高的弹性极限和低的弹性模量。常用材料的弹性模量如下： $E_{\text{铁}} = 214000 \text{ MPa}$ ， $E_{\text{钢}} = 132400 \text{ MPa}$ ， $E_{\text{铝}} = 72000 \text{ MPa}$ ；切变模量： $G_{\text{铁}} = 84000 \text{ MPa}$ ， $G_{\text{钢}} = 49270 \text{ MPa}$ ， $G_{\text{铝}} = 27000 \text{ MPa}$ 。

四、硬度指标

硬度是材料抵抗局部变形，特别是塑性变形、压痕或划痕的能力。对大多数金属材料，可以从硬度值估算出它的抗拉强度，检验材料或工艺是否合格有时也需用硬度。不同的试验方法在不同条件下测量的硬度值，含义不同，数据也不同，因此一般不能进行相互比较。工业生产中经常采用的硬度试验方法有布氏硬度（HB）、洛氏硬度（HR）和维氏硬度（HV）几种。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验方法是把规定直径的淬火钢球或硬质合金球以一定的试验力压入所测材料表面如图 1-3 所示，保持规定时间后，测量表面压痕直径如图 1-4 所示，然后按式（1-6）计算其硬度。

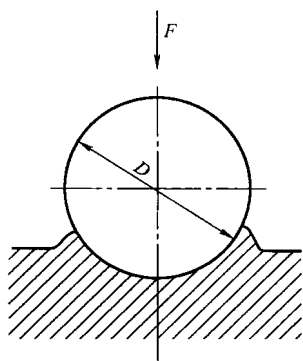


图 1-3 布氏硬度测量示意图

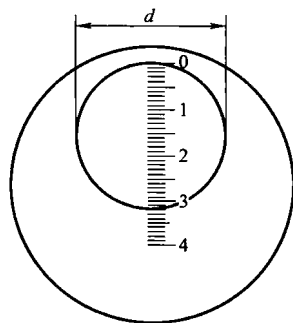


图 1-4 用读数显微镜测量压痕直径

$$\text{HBS (HBW)} = \frac{F}{A} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-6)$$

式中 HBS(HBW) ——S 表示用钢球 (W 表示硬质合金球) 试验时布氏硬度值;

F ——试验力, 单位为 N;

A ——压痕表面积, 单位为 mm^2 ;

D ——球体直径, 单位为 mm;

d ——压痕平均直径, 单位为 mm。

由于金属材料有软有硬, 被测工件有薄有厚, 尺寸有大有小, 因此在进行布氏硬度试验时要求使用不同的试验力和压头直径, 建立 F 和 D 的某种选配关系, 以保证布氏硬度的不变性。

布氏硬度的表示: 符号 HBS 和 HBW 之前用数字标注硬度值, 符号后面依次用数字注明压头直径 (mm)、试验力 (N) 及试验力保持时间 (s) (为 10 ~ 15s 不标注)。例如, 500 HBW5/750, 表示用直径 5 mm 硬质合金球在 7355N 试验力作用下保持 10 ~ 15s, 测得的布氏硬度值为 500。

目前, 布氏硬度主要用于铸铁、非铁金属以及经退火、正火和调质处理的钢材, 电线电缆用铜铝硬度测量常用布氏硬度表示。

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验是目前应用最广的硬度试验方法, 用符号 HR 表示。它是采用直接测量压痕深度来确定硬度值的。实验原理图如图 1-5 所示。用 120° 金刚石圆锥体或直径为 1.588mm ($1/16\text{in}^\ominus$) 的淬火钢球作压头, 先施加初始试验力 F_1 , 压头压入位置为 1, 压入试样表面的深度为 a 。然后再加上主试验力 F_2 , 持续规定时间, 此时总试验力 $F = F_1 + F_2$, 压头压入位置为 2, 压入试样表面的深度为 b 。卸除主试验力 F_2 , 仍保留初试验力 F_1 , 试样弹性变形恢复使压头上升到 3 的位置, 此时压入试样表面的深度为 h 。按式 1-7 计算洛氏硬度。

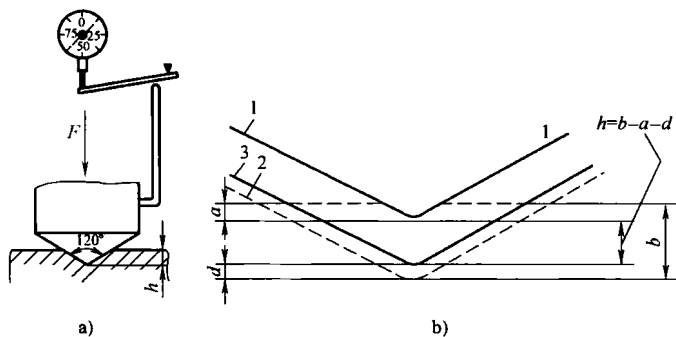


图 1-5 洛氏硬度实验原理图

$$\text{HR} = \frac{K - h}{0.002} \quad (1-7)$$

式中 HR——洛氏硬度值;

K ——常数, 使用金刚石压头时 $K = 0.2$, 使用钢球压头时 $K = 0.26$ 。

为了能用一种硬度计测定从软到硬的材料硬度, 采用不同的压头和总试验力组成几种不同的洛氏硬度标度, 每一个标度用一个字母在洛氏硬度符号 HR 之后加以注明。我国常用

\ominus $1\text{in} = 0.0254\text{m}$, 后同。

HRA、HRB、HRC 三种。洛氏硬度值标注方法为硬度符号前面注明硬度数值，例如 52HRC、70HRA 等。

3. 维氏硬度

维氏硬度可以更准确地测量金属零件的表面硬度或硬度很高的零件，其符号用 HV 表示。维氏硬度试验采用正四棱锥金刚石锥体，试验时在金刚石锥体上施加试验力 F ，在试件表面压出正方形压痕，根据压痕面积求出维氏硬度值。

五、韧性指标

1. 冲击韧度

机械零部件在使用过程中不仅会受到静载荷或变动载荷作用，而且还会受到不同程度的冲击载荷作用。所以在设计和制造受冲击载荷的零件和工具时，必须考虑所用材料的冲击吸收功或冲击韧度。

目前，最常用的冲击试验方法是摆锤式一次冲击试验，其试验原理如图 1-6 所示。先将材料加工成标准试样，然后放在试验机的机架上，试样缺口背向摆锤冲击方向，将具有一定重力 F 的摆锤举至一定高度 H_1 ；使其具有势能 (FH_1)，然后摆锤落下冲击试样；试样断裂后摆锤上摆到 H_2 高度，在忽略摩擦和阻尼等条件下，摆锤冲断试样所做的功，称为冲击吸收功，以 A_k 表示，则有 $A_k = FH_1 - FH_2 = F(H_1 - H_2)$ 。

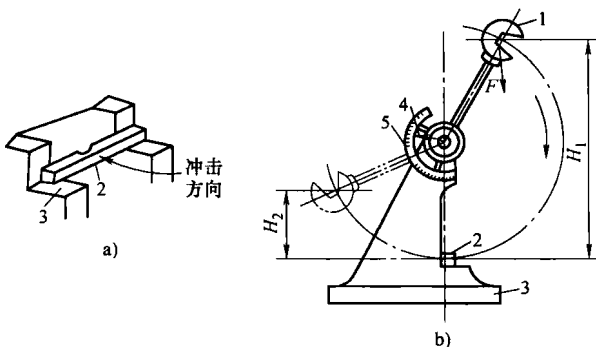


图 1-6 冲击试验原理图

1—摆锤 2—试样 3—机架 4—指针 5—刻度盘

对一般常用钢材来说，所测冲击吸收功 A_k 越大，材料的韧性越好。

2. 断裂韧度

实际应用中的材料组织并非是均匀、各向同性的，组织中有微裂纹，还会有夹杂、气孔等宏观缺陷，这些缺陷可看成是材料中的裂纹。当材料受外力作用时，这些裂纹的尖端附近便出现应力集中，形成一个裂纹尖端的应力场。根据断裂力学对裂纹尖端应力场的分析，裂纹前端附近应力场的强弱主要取决于一个力学参数，即应力强度因子 K_1 ，单位为 $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ 。

$$K_1 = Y\sigma\sqrt{a} \quad (1-8)$$

式中 Y ——与裂纹形状、加载方式及试样尺寸有关的无量纲系数；

σ ——外加拉应力，单位为 MPa；

a ——裂纹长度的一半，单位为 m。

对某一个有裂纹的试样（或机件），在拉伸外力作用下， Y 值是一定的。当外加拉应力逐渐增大，或裂纹逐渐扩展时，裂纹尖端的应力强度因子 K_1 也随之增大。当 K_1 增大到某一临界值时，试样（或机件）中的裂纹会产生突然失稳扩展，导致断裂。这个应力强度因子的临界值称为材料的断裂韧度，用 K_{1c} 表示。

断裂韧度是用来反映材料抵抗裂纹失稳扩展，即抵抗脆性断裂能力的性能指标。当 K_1