


电线电缆技术丛书

# 电缆制造技术基础

主 编 王卫东  
副主编 陈永军 郑先锋

DIANLAN ZHIZAO JISHU JICHU

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



电线电缆技术丛书

# 电缆制造技术基础

主 编 王卫东

副主编 陈永军 郑先锋

机械工业出版社

本书以电线电缆制造技术的基础知识为主线,介绍了电线电缆的发展历史、产品分类及不同类型电缆产品的结构、用途、型号编制和技术标准;电线电缆的相关认证;对电线电缆生产中使用的材料、机械设备、工艺过程、结构计算、过程检验及质量控制分别进行了介绍;还对电缆盘具的使用和选择、包装储运、电缆载流量及电缆选型进行了分析。

本书集多位一线资深技术专家之智,以应用技术为本,以实用、适用原则选择内容、掌握深度,既保留了传统、实用的内容,又拓展了新成果、新技术、新材料、新工艺。内容全面、层次清晰、案例具体、贴近实际、可操作性强。

本书可作为大学相关专业教材使用,亦可供从事电线电缆制造以及电力、通信行业从事电缆运行的工程技术人员和技术工人参考和培训之用。

## 图书在版编目(CIP)数据

电缆制造技术基础/王卫东主编. —北京:机械工业出版社,2017.1  
(电线电缆技术丛书)

ISBN 978-7-111-55956-6

I. ①电… II. ①王… III. ①电缆-质量管理②电缆-质量控制  
IV. ①TM246

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第013115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:林春泉 责任校对:张晓蓉

责任印制:常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2017年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·23.75印张·580千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-55956-6

定价:69.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

# 前 言

“电线电缆技术丛书”的出版，为电线电缆职业教育和行业从业人员的在职学习带来很大帮助。但在电缆生产制造、产品检验、材料选择、技术服务等方面总有一些细枝末节的内容没有被覆盖到，由于这些内容较少，不适合单独编辑成书；或者不够系统，不适合收入丛书的任一分册中，总有遗珠之憾。作者曾在电线电缆生产企业长期从事技术、管理工作，经常会遇到一些问题，虽然不大但却棘手，而后从事电线电缆的教学工作，一直抱有编写一本解决类似问题的实用书籍的想法。

2014年安徽华星电缆集团有限公司委托我对公司员工进行全面的培训，所提要求与我的想法不谋而合。在安徽华星电缆集团有限公司的大力协助下，结合作者对实际工作经验、教学体会的提炼，对电线电缆制造企业的生产、技术、质检、销售等部门经常遇到问题进行了总结，对分散在电气类、机械类、材料类书籍和标准中那些零散、模糊的内容进行了系统的整理，使之清晰明了，便于使用。作者旨在通过这本《电缆制造技术基础》让读者领略电缆制造工业的概貌，同时也将作为“电线电缆技术丛书”的导论。

本书力争做到内容贴近实际，突出实用。例如在电线电缆的发展历史部分，着重讲述了发展史上具有革命性的结构、材料的变革，以期对现实的电缆设计、制造带来启迪；在电缆订货中，绝大多数用户为要求电缆定长、大长度生产，常用的电缆盘装线长度计算公式余量较大，为此介绍了计算更加准确的公式，避免盘具选择不当造成成本增加；电缆生产设备多具有专用性，因此本书对主要电缆设备的特点、生产范围、工艺原理进行了较系统的论述，为设备选择、使用和生产安排提供一定的依据。同时，对近年电线电缆制造中的新技术、新产品及热点问题都进行了论述，在涉及具体产品的内容均采用新的产品标准作为论述依据。

本书是校企联合编写的一本应用型技术书籍，内容实用、篇幅适当，同时又有较大的覆盖面，经过企业培训的实际应用，反映良好，根据培训过程中反映出的共性问题进行了修订。本书王卫东为主编，陈永军、郑先锋为副主编，河南工学院王卫东高级工程师编写了第一、第三、第四和附录并统稿全书，张莹堂副教授编写了第二章，郑先锋教授编写了第五章，赵源高级工程师编写了第六章，安徽华星电缆集团有限公司总工程师/高级工程师陈永军编写了第七章，昆明电缆集团有限公司技术中心主任/高级工程师习有建编写了第八章，河南乐山电缆有限公司总工程师/高级工程师李磊编写了第九章。

多位技术专家对本书的编写提出宝贵意见，我们在编写时也参考和借鉴了许多专家的相关著述，在此向他们一并表示真诚的感谢！

由于本书涉及面广而作者水平所限，书中一定存在不少错误和不当之处，敬请广大读者予以批评指正。

编著者

2016年12月

# 目 录

## 前言

第一章 概述	1	第七节 电缆产品表示方法	40
第一节 裸电线及裸导体制品	1	一、产品命名规则	40
一、裸单线	1	二、型号规格表示规则	40
二、裸绞线	1	三、产品表示方法	43
三、软接线	5	第八节 电线电缆的发展历程	61
四、型线和型材	5	一、电线电缆发展简史	61
第二节 电力电缆	6	二、我国电缆工业的发展	67
一、塑料绝缘电力电缆	7	三、科研与教育	70
二、橡皮绝缘电力电缆	9	第九节 技术标准概述	71
三、油浸纸绝缘电力电缆	9	一、概念	71
四、充油电缆	9	二、标准体制	73
五、架空绝缘电缆	10	三、标准的制定、发布和实施	75
六、直流电缆	11	四、标准的编号	75
七、海底电缆	11	五、国际标准和国外标准	76
八、低温电缆和超导电缆	12	第二章 电线电缆结构及材料	78
第三节 通信电缆	13	第一节 电缆产品的基本结构	78
一、市内通信电缆	13	一、导电线芯	78
二、电信设备用通信电缆	14	二、绝缘	79
三、数字通信用对称电缆	14	三、护层	80
四、高频数据传输电缆	15	四、屏蔽	80
五、射频电缆	17	五、填充结构	81
第四节 光纤光缆	18	六、承力元件	81
一、光纤	18	第二节 金属材料	82
二、光缆的设计原则	20	一、导电性	82
三、光缆的分类	22	二、机械性能	82
四、专用光缆	24	三、热性能	83
第五节 电气装备用电线电缆	25	四、常用金属材料及性能	83
一、通用绝缘电线和软线	26	第三节 高聚物的性能	86
二、橡胶套软电缆	28	一、高聚物的聚集态与加工性	86
三、矿用电线	29	二、电性能	89
四、船用电缆	32	三、耐电性能——击穿场强	91
五、控制、信号电缆	33	四、力学性能	93
第六节 绕组线	35	五、热性能	95
一、漆包线	35	六、耐燃性	96
二、绕包线	37	七、老化性能	98
三、特种绕组线	37	第四节 塑料	99
		四、无机绝缘绕组线	39

一、聚乙烯 (PE) 和交联聚乙烯 (XLPE) .....	99	一、塑料的挤出过程 .....	145
二、聚氯乙烯 (PVC) .....	103	二、实心层挤塑工艺 .....	146
三、氟塑料 .....	108	三、模具选用 .....	148
第五节 橡胶与橡皮 .....	110	四、发泡绝缘挤出 .....	149
一、天然橡胶 (NR) .....	110	五、线芯识别标志 .....	150
二、氯丁橡胶 (CR) .....	111	第五节 交联工艺 .....	151
三、丁苯橡胶 (SBR) .....	112	一、过氧化物交联 .....	151
四、丁腈橡胶 (NBR) .....	112	二、硅烷交联 .....	153
五、乙丙橡胶 (EPR) .....	113	三、辐照交联 .....	155
六、氯化聚乙烯 (CPE) .....	114	第六节 橡胶加工及硫化 .....	155
七、氯磺化聚乙烯 (CSPE) .....	115	一、塑炼 .....	155
八、硅橡胶 (SiR) .....	115	二、混炼 .....	157
九、聚氨酯弹性体 (TPU) .....	117	三、混炼胶的补充加工 .....	159
第六节 橡胶常用配合剂 .....	118	四、挤橡胶工艺 .....	159
一、硫化体系 .....	118	五、硫化工艺 .....	160
二、防护体系 .....	121	第七节 成缆工艺 .....	162
三、软化体系 .....	122	一、成缆过程线芯的变形 .....	162
四、补强填充体系 .....	122	二、成缆工艺 .....	163
五、特殊助剂 .....	123	三、分割导体成缆 .....	164
第七节 包制和填充材料 .....	124	四、配模 .....	165
一、铜带、铜塑复合带 .....	124	五、对绞、星绞与绞缆 .....	165
二、铝/塑复合带 .....	124	第八节 硅橡胶电缆制造 .....	167
三、钢带、钢丝 .....	125	一、硅橡胶配方 .....	167
四、无纺布带 .....	125	二、工艺要点 .....	169
五、防火包带 .....	125	<b>第四章 电缆生产设备</b> .....	170
六、阻水带 .....	127	第一节 电缆生产设备概述 .....	170
七、填充材料 .....	127	一、电缆设备的基本要求 .....	170
<b>第三章 电缆工艺技术</b> .....	129	二、电缆设备的分类 .....	171
第一节 电缆制造工艺特点 .....	129	三、型号规格的表示方法 .....	177
一、电线电缆工艺技术特征 .....	129	第二节 制杆设备 .....	179
二、电缆生产工艺流程 .....	130	一、熔炉 .....	179
第二节 单线制造 .....	132	二、铸锭设备——铸机 .....	181
一、拉线工艺 .....	132	三、轧机 .....	183
二、轧制-拉制工艺 .....	134	四、生产线 .....	185
三、退火原理及工艺 .....	135	第三节 拉线设备 .....	187
四、挤制工艺 .....	137	一、拉线机分类 .....	187
第三节 导体绞制 .....	138	二、拉线机的工作原理 .....	187
一、绞线的形式 .....	138	三、润滑系统 .....	191
二、绞线的工艺参数 .....	139	四、拉线模具 .....	192
三、紧压导体 .....	142	五、辅助设备 .....	193
四、单线在绞合过程的变形 .....	143	第四节 退火设备 .....	195
第四节 挤塑工艺 .....	144	一、连续退火设备 .....	195
		二、非连续退火设备 .....	196

第五节 绞线设备	198	五、包带重叠率的测量	260
一、绞制原理	198	六、结构检查	260
二、笼式绞线机	200	第三节 工序检验	261
三、管式绞线机	204	第四节 成品检验	263
四、束线机	206	一、检验项目	263
第六节 挤塑设备	209	二、例行试验	264
一、塑料挤出机	209	三、绝缘电阻的测量	267
二、辅助设备	217	四、火花试验	268
第七节 交联生产设备	219	<b>第六章 电缆结构的计算</b>	270
一、过氧化物交联设备	219	第一节 导体用量	270
二、硅烷交联设备	223	一、实心圆导体	270
三、辐照交联设备	223	二、绞线	271
第八节 橡皮电缆生产设备	225	第二节 绝缘材料用量	276
一、炼胶设备	225	一、实心导体的绝缘层	276
二、橡胶挤出机组	228	二、圆形绞合线芯的绝缘层	276
三、硫化设备	228	三、半圆形和扇形紧压线芯	278
第九节 成缆设备	231	四、圆形紧压导体	278
一、笼式成缆机	231	第三节 成缆外径、填充及包带	278
二、盘绞式成缆机	232	一、圆形线芯成缆	279
第十节 绕包设备	233	二、扇形线芯成缆	281
一、设备组成	233	三、填充重量	282
二、绕包装置的型式	234	四、包带	283
三、绕包的张力控制	236	五、成缆线芯重量	284
第十一节 收放线装置	237	第四节 护层结构	284
一、收放线装置	237	一、编织和挤包护套	285
二、排线装置	242	二、铠装层和挤包护套	286
第十二节 牵引装置	244	三、对消耗系数的讨论	287
一、轮式牵引	244	<b>第七章 电缆的选型</b>	288
二、履带式牵引	245	第一节 电力电缆的载流量	288
三、轮带式牵引	245	一、电缆最高允许工作温度	288
第十三节 传动和调速系统	246	二、载流量的计算	289
一、机械传动基础	246	三、电缆的短时过载运行	290
二、主传动系统	248	四、电缆的短路电流	291
三、收排线传动系统	252	五、根据输电容容量(或功率)计算传输 电流	291
<b>第五章 电缆质量检验</b>	254	第二节 影响载流量的因素分析	293
第一节 检验的类型及基本概念	254	一、导体方面	293
一、电缆检验的类型	254	二、绝缘方面	294
二、检验原则	255	三、环境温度	295
第二节 外观与结构尺寸检查	256	四、金属层损耗	296
一、外观检查	256	五、媒质热阻	296
二、尺寸测量	256	六、敷设状态	296
三、节距测量	259	第三节 电缆型号规格的选择	298
四、截面积的测定	259		

一、电缆型号的选择 .....	298	三、生产许可证的办理程序 .....	325
二、电缆规格的选择 .....	301	四、发证后的监督管理 .....	331
三、多根电缆并联使用的问题 .....	307	第二节 国家强制性产品认证 .....	332
<b>第八章 电缆盘的选择和使用</b> .....	<b>308</b>	一、强制认证的意义 .....	332
第一节 电缆盘具的类型 .....	308	二、认证范围和标志 .....	332
一、机用盘 .....	308	三、申请步骤 .....	334
二、交货盘 .....	311	第三节 管理体系认证 .....	337
第二节 电缆装盘长度的计算 .....	314	一、ISO 9001 质量管理体系认证 .....	337
一、标准中的装盘长度计算公式 .....	314	二、ISO 14001 环境管理体系认证 .....	344
二、装盘长度的修正 .....	315	三、OHSAS 18001 职业健康安全管理体系认证 .....	347
三、装盘余量 .....	316	<b>附录</b> .....	<b>351</b>
第三节 电缆盘选用及包装要求 .....	317	附录 A 电线电缆的允许载流量 .....	351
一、交货盘的选用 .....	317	附录 B 电线电缆选型的常用口诀 .....	363
二、线盘的检验 .....	318	B-1 根据功率估算负荷电流的口诀 .....	364
三、包装及储运要求 .....	320	B-2 塑料或橡皮绝缘电缆载流量口诀 .....	365
<b>第九章 电线电缆的认证</b> .....	<b>322</b>	附录 C 英美线材规格 .....	366
第一节 工业产品生产许可证 .....	322	<b>参考文献</b> .....	<b>369</b>
一、实施生产许可证制度的意义 .....	322		
二、生产许可证管理范围 .....	323		



# 第一章 概述

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。广泛应用于工业、农业、国防、科研等经济建设和日常生活的方方面面，被称为国民经济的“血管和神经”。电线电缆用途广泛，门类众多，品种繁杂，大约统计有 1200 多个品种，20000 多个规格，是机电行业中品种和门类最多的大类产品。为便于科学研究和统计管理，按电线电缆的性能、用途及结构将其分为裸电线及裸导体制品、电力电缆、通信电缆和光缆、电气装备用电线电缆和绕组线五个大类。本章我们对五个大类及代表性产品的结构、用途、特征、表示方法及发展史进行介绍，徐徐拉开了解电线电缆的序幕。

## 第一节 裸电线及裸导体制品

裸电线及裸导体制品是仅有导体而无绝缘层的电缆产品。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，一般以空气或导线结构外的其他介质作为绝缘。根据结构和用途的不同又分为裸单线、裸绞线、软接线、型线与型材 4 个系列。与其他电线电缆相比具有结构简单、制造方便、施工容易和便于检修等优点。

### 一、裸单线

裸单线是不同材料和尺寸的有色金属单线，按形状可分为圆线、扁线等；按材料可分为铜、铜合金、铝和铝合金，有镀层（镀锡、银、镍）线，双金属线（铝包钢、铜包钢、铜包铝等）等。

此类产品主要作为制造绞线的半成品使用。按照状态的不同，圆单线又分为硬线、软线和半硬线。硬单线有较高的强度，能承受一定的拉力，适合制造架空敷设的绞线，也有少量用于小容量、短距离供电、通信。软单线和半硬单线柔软性好，能经受安装和使用时的弯曲和扭转，常用于电线电缆导体、软接线与编织线的制造。铜、铝扁线主要用于制造电机电器的绕组线和电工装备的连接线。

### 二、裸绞线

裸绞线是本大类产品的主导产品，由于总是架设在电杆上，习惯上称为架空导线。架空导线本身不分电压等级，即从低压、中压到高压乃至超高压原则上都可以用同一系列的导线。但 330kV 以上电压等级输电线路用的导线，对导线外径大小及表面的光洁度有特殊要求，以减少因导线表面局部空气电离形成电晕而产生的线路损耗。在输配电网络中，架空导线占线路总长度的 90% 以上，特别是智能电网建设和西电东送工程实施，为裸绞线打开了广阔的市场。

裸绞线中，通常所用的导体材料除铝、铜以外还有铝合金，增强材料采用镀锌钢、铝包钢、铜包钢、铝合金单线和绞线，不同材料的组合使得用户的选择余地进一步扩大。根据使用材料及结构组成，将裸绞线分为三种。一是以单一金属材料单线绞合而成的简单绞线，如铝绞线、铜绞线、铝合金绞线等；二是组合绞线，以导电线材和增强线材组合绞制而成，如钢芯铝绞线、钢芯铝合金绞线、铝包钢芯铝绞线、铝合金芯铝绞线等；三是特种绞线，由不

同材质、不同外形的线材用特殊的绞合方式绞制而成，如扩径导线、光纤复合架空地线等。

### 1. 常用绞线

铝绞线、铝合金绞线、铜绞线一般用于短距离、小容量线路。增加了增强线材的裸绞线如钢芯铝绞线、铝包钢芯铝绞线等，由于有抗拉元件承受拉力，可以增大杆塔间距以减少投资、延长导线寿命、增强安全性。其中应用最为广泛的是钢芯铝绞线。常用导线的每个导体截面积都有几个派生规格，即配合几种截面积的钢芯线，如 500/35、500/65 等，以适应不同抗拉力要求的线路段选用。常用架空裸导线的结构如图 1-1 所示，型号、规格及适用范围见表 1-1。

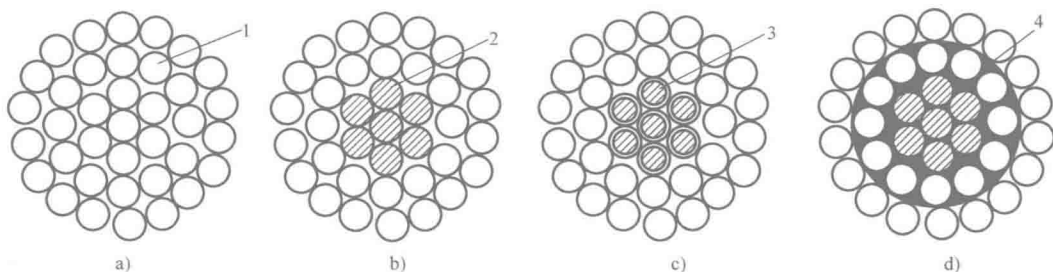


图 1-1 圆线同心绞架空导线

a) 铝（或铝合金）绞线 b) 钢芯铝（或铝合金）绞线 c) 铝包钢芯铝绞线 d) 中防腐钢芯铝绞线  
1—铝（或铝合金）线 2—镀锌钢线 3—铝包钢线 4—防腐油脂

由圆单线绞合而成的同心绞架空导线应用最广，但在长期使用中，也暴露出它的一些缺点，例如导线间隙大，使导线的外径增大，而大直径增大了风载，使作为支撑的杆塔必须加强；各圆形单线间是线接触，导线吸收风振的能力较低；单线间的空隙会积存水和有害物质，容易腐蚀导线，降低导线的使用寿命。

以异形单线代替圆单线绞制而成的型线同心绞架空导线，大大提高了导线的综合性能。常用的型单线有“S”形、“Z”形、梯形等，型单线绞合成圆形后，由于各单线之间的相互挤压支撑作用，提高了绞线的结构稳定性；外径减小，降低了风载；单线间形成面接触，具有良好的抗风振能力；单线间隙减小，减轻了腐蚀，延长了使用寿命；由于导线的外表面光滑，表面电场更加均匀，可减少电晕损耗，而且冰雪也难以附着。型线同心绞架空导线主要结构型式如图 1-2 所示，型号、规格及适用范围见表 1-1。

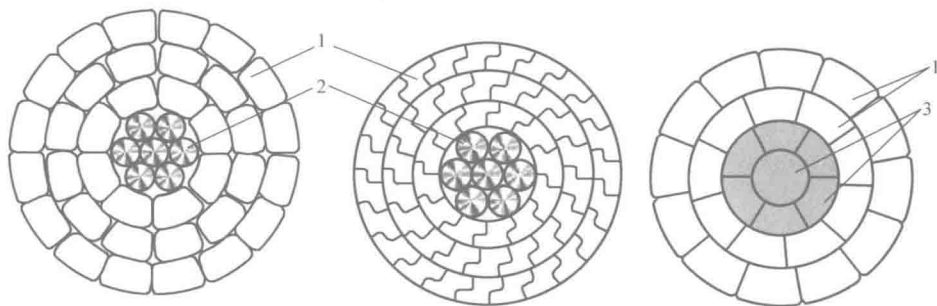


图 1-2 型线同心绞架空导线

1—铝（或铝合金）线 2—镀锌钢（或铝包钢或铝合金）线 3—铝合金线

在钢芯或整个导线间隙填充防腐涂料制成防腐绞线,供海边盐雾、化工厂附近等有腐蚀性气体的恶劣环境使用。以铝包钢线代替镀锌钢线,将原来的铝-锌、铝-钢接触变为铝-铝接触,避免电化学腐蚀的发生,也提高了导线的耐腐蚀能力。

表 1-1 常用架空裸导线的型号、规格及适用范围

品种	型号	规格范围 <sup>①</sup> /mm <sup>2</sup>	技术标准	适用范围	
圆线同心绞架空导线	铝绞线	JL	10~1500	GB/T 1179 —2008 圆线同心绞架空导线	小档距的一般配电线路
	铝合金绞线	JLHA2、JLHA1	20~1450		
	铝合金芯铝绞线	JL/LHA2、JL/LHA1	10~1145		
	钢芯铝绞线	JL/G1A、JL/G1B、JL/G2A、JL/G2B、JL/G3A	16~1250		一般输、配电线路
	钢芯铝合金绞线	JLHA2/G1A、JLHA2/G1B、JLHA2/G3A、JLHA1/G1A、JLHA1/G1B、JLHA1/G3A	18~1300		一般输、配电线路
	铝包钢芯铝绞线	JL/LB1A	15~1235		一般输、配电线路对钢线有严重腐蚀场合
	铝包钢芯铝合金绞线	JLHA2/LB1A、JLHA1/LB1A	15~1420		有腐蚀性气雾场合的一般输、配电线路
	防腐钢芯铝绞线	JL/G1AF、JL/G2AF、JL/G3AF	16~1250		一般场合承力索
	钢绞线	JG1A、JG1B、JG2A、JG3A	30~400		腐蚀性气雾场合承力索
	铝包钢绞线	JLB1A、JLB1B、JLB2	15~600		对铝有严重腐蚀的环境
	硬铜绞线	TJ	10~500		企标
型线同心绞架空导线	成型铝绞线	JLX	100~1000	GB/T 20141 —2006 型线同心绞架空导线	小档距的一般配电线路
	铝芯成型铝绞线	JLX/L	100~1000		
	铝合金芯成型铝绞线	JLX/LHA2、JLX/LHA1	100~1000		
	成型铝合金绞线	JLHA2X、JLHA1X	100~1000		
	钢芯成型铝绞线	JLX/G1A、JLX/G1B、JLX/G2A、JLX/G2B	100~1092		一般输、配电线路
	钢芯成型铝合金绞线	JLHA2X/G1A、JLHA2X/G1B、JLHA2X/G2A、JLHA2X/G2B、JLHA1X/G1A、JLHA1X/G1B、JLHA1X/G2A、JLHA1X/G2B	100~1000		一般输、配电线路,对钢线有严重腐蚀的场合
	铝包钢芯成型铝绞线	JLX/LB	100~1000		
	铝包钢芯成型铝合金绞线	JLHA2X/LB、JLHA1X/LB	100~1000		

① 规格号表示相当于硬铝线(61%IACS的LY9铝线)的导线芯截面积。规格范围仅写导体规格范围。

## 2. 特种绞线

我国地域辽阔,输电线路往往要跨越多气候带和大海拔落差,地理环境复杂多变,能满足特殊条件下使用的架空导线统称特种架空导线。特种架空导线的发展趋势:①在原有路线和杆塔基础上,提高导线传输容量,主要是采取提高导线的长期工作温度或导电率,如软铝导线、倍容量导线等;②满足特殊气候和环境条件下使用,如大跨越使用的高强度碳纤维复合导线,能减小风振影响的自阻尼导线等;③将多种功能集中于一条导线,降低线路造价,如光纤复合架空地线、光纤复合架空相线等。

1) 软铝绞线:软铝绞线的结构与普通钢芯铝绞线完全相同,但其通过特殊加工,将钢

芯的迁移点由  $110^{\circ}\text{C}$  移至  $40\sim 20^{\circ}\text{C}$ ，则导线在工作温度时全部机械荷载将由钢芯承载，铝线只承载电流而不承载机械负荷，弧垂完全取决于钢芯。导线的工作温度不会由于铝线的软化特性而受限制，因此可采用导电率为  $(62.5\% \sim 63\%)$  IACS 的软铝制造，允许的运行温度达  $150^{\circ}\text{C}$ ，比普通钢芯铝绞线高很多，输电时的损耗可比导电率为  $61\%$  IACS 的硬铝减少约  $2.5\% \sim 3\%$ 。

2) 耐热铝合金导线：铝锆合金制成的导线，在高温下强度损失很少，其软化起始温度大于  $200^{\circ}\text{C}$ ，比硬铝线要高出  $100^{\circ}\text{C}$ 。长期工作温度提高到  $150^{\circ}\text{C}$ ，输电载流量比相同规格铝线提高  $60\%$ 。不足之处是导电率稍有下降，线损也随工作温度升高而增大，约增加  $19\%$ 。超耐热铝合金导线允许温度可达  $230^{\circ}\text{C}$ ，载流量提高约 2 倍，被称为倍容量导线，承力元件采用铝包殷钢线，弧垂很小，缺点是价格高昂。

耐热铝合金导线特别适用于增扩容输变电场合，利用原有杆塔、走廊架设，使线路扩容的投资大幅降低；小截面积导线传输大容量电流，因此在线路的瓶颈段、城市或山岳架线走廊狭窄地区使用更能显出优势。

3) 扩径导线：用支撑法或填充法降低导线填充系数，扩大导线外径的一类导线。达到降低导线表面电场强度，减轻甚至避免电晕放电，减小电晕损失和无线电干扰的目的。用于低气压地区以及超高压、特高压输电，也用高压、超高压、特高压变电所的软母线。扩径的方法是采用将某一层或几层铝线根数减少，线间留有较大间隙，从而使导线外径显著增大，此为填充法。支撑法在导线中心采用镀锌软管、螺旋管等进行支撑，做成空心导线，如图 1-3a 所示为填充式扩径导线结构。

4) 自阻尼导线：在铝线与钢芯的层与层间，均留有一定间隙，使导线在受力状态下风激振动时，由于钢芯和各层铝线的固有振动频率不同而相互干扰碰撞，能够自身消耗风激振动的能量，达到阻尼减振效果。特别适合用于南方台风地区、北方大风和沙尘暴地区。为使层与层间形成间隙，一般采用铝型线，其结构形式如图 1-3b 所示。

5) 防冰雪导线：输电线路覆冰引发故障，影响电力系统正常运行事故每年都有发生，防冰雪导线可有效降低甚至消除冰雪带来的危害。按工作原理可将其采用的技术分为防冰和除冰两类。防冰雪是使导线表面难以覆冰，除冰雪技术能自动除或融冰雪。根据这两类技术设计的防冰雪导线主要有涂料防冰式、阻雪环式、带翼状股线、切换电流式、居里合金式等。涂料防冰是在导线表面涂覆具有强增水性能的涂料，降低冰与导线表面的附着力达到减少覆冰的目的。阻雪环式是在导线上夹装由聚碳酸酯制成的塑料环，起到阻滞积雪在导线绞合方向转动，使雪只在迎风侧堆积，当堆积到一定厚度时，在自重或风等自然力的作用下自行脱落。带翼状股线的难积雪导线见图 1-3c 所示，它可使积雪在沿导线弧线向低处滑动时受阻而脱落。

6) 光纤复合架空地线 (OPGW) 和架空相线 (OPPC)：OPGW (Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire) 是通信光缆和架空地线的复合体，既具有普通架空地线的电气和机械物理特性，同时又具有光纤的通信传输特性。起到线路防雷保护和通信的双重作用，节省了光缆的购置和敷设费用。用于  $110\text{kV}$  及以上架空输电线路。

OPGW 的结构主要由光单元和地线组成，光纤提供了通信信号的传输通道，光纤单元可置于中心管中或绞于铝包钢绞线中，结构可采用层绞式、骨架式、中心管式等结构，如图 1-3d 所示 OPGW 采用中心管式光单元结构。地线部分通常为铝包钢线和铝合金线的组合，

钢成分主要提供了机械强度，铝成分则主要承载短路电流。结构设计中除导线强度应满足承受拉力要求外，还要考虑导线蠕变对光纤余长的要求、短路电流造成的导线温升影响等问题。

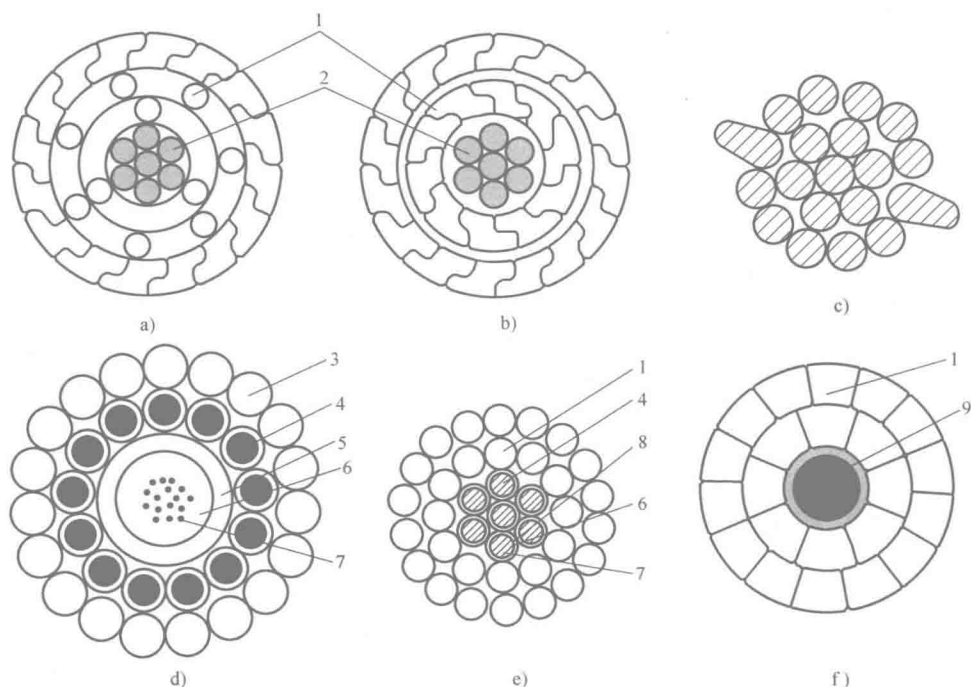


图 1-3 特种导线

- a) 扩径导线 b) 自阻尼导线 c) 抗冰雪导线 d) OPGW e) OPCC f) 碳纤维复合导线  
 1—铝线 2—钢芯 3—铝合金线 4—铝包钢线 5—铝管  
 6—填充石膏 7—光纤 8—不锈钢管 9—碳纤维复合芯

110kV 以下线路只在部分长度上架设地线，为起到与 OPGW 相似的作用，可将光单元与相线复合，形成了具有输电和通信双重功能的光纤复合架空相线（OPPC，Optical Phase Conductor）。OPPC 适用于 10~110kV 架空输配电线路。不锈钢管光纤单元与铝包钢线绞合，构成架空导线的通信和加强芯，外层再绞合铝线起到输电作用，结构如图 1-3e 所示。

7) 高强度复合芯导线：这类产品的代表是碳纤维复合导线、铝基陶瓷纤维芯导线。以高强度、低密度复合材料作为抗拉承力元件，导线重量完全由抗拉元件承受，这样就可选用软铝线作为导电材料，从而使导线具有强度高、电阻低、载流量大、弧垂小、重量轻等优点，可降低线路造价和运行损耗，提高传输容量。典型结构如图 1-3f 所示。

### 三、软接线

这类导线多采用 0.5mm 以下软铜线制造，采用束线、复绞或编织工艺，以保证线材的柔软性。该类导线用量少、用途特殊，主要用于电气装备及电子元器件连接用的软铜绞线；电机的电刷连接线；通信用的架空天线；蓄电池的并联线（俗称辫子线）、接地线和屏蔽网套的编织线，如图 1-4 所示。

### 四、型线和型材

主要包括铜杆、铝杆、电力机车接触线、铜铝母线、铜带、空心铜导线、异形铜排等品

种，下面择要加以介绍。

### 1. 电力机车接触线

随着我国高速铁路建设的飞速发展，电力机车接触线也成为电缆行业的热点。接触线用于电气化铁路、城市轨道交通、矿山等采用电力机车牵引的运输、起重设备。接触线除要求具有良好的导电性和足够的抗拉强度和耐气候腐蚀性外，更主要是耐磨性要好，这直接关系到导线的使用寿命。其主要品种有圆形、双沟型的铜和铜合金接触线、钢铝复合接触线等，如图 1-5 所示。

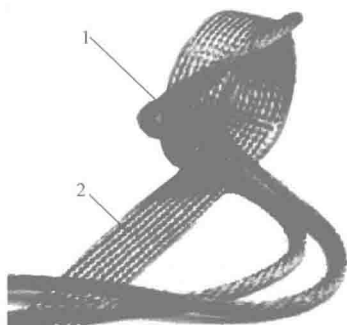


图 1-4 软接线  
1—软铜绞线 2—编织线

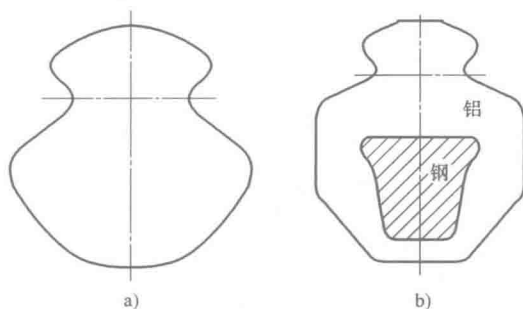


图 1-5 电力机车接触线  
a) 双沟型接触线 b) 内包梯形钢铝接触线

高速、重载、高安全性铁路建设，对接触线提出优良的导电性、抗拉强度和耐磨性要求，纯铜、钢铝复合接触线已不能满足要求，主要使用强度更高的铜银、铜镁、铜锡以及铜铬三元合金接触线。

### 2. 铜母线

作为大电流母线（又称汇流排）用的铜、铝排材，多为扁平状，也有空心矩形和半工字形。用于电厂、变电站及其他工业装备传输大电流用，以及在开关柜中使用。矩形空心导线用于制造水内冷电机、变压器及感应电炉线圈的绕组线。

### 3. 异形排材

异形排材形状多样，如梯形、哑铃形等，主要用于发电机、电动机中换向器的构件，以及各种刀开关的刀头电极等，材质为铜或铜合金。

## 第二节 电力电缆

电力电缆是在电力系统的输配电线路中用以传输和分配大功率电能的电缆产品。其功能与架空导线一样，但结构要复杂得多：导体外包覆有绝缘材料，并有各种护层结构，这就使电缆线路的造价要比架空线路高出很多。但电力电缆能够完成架空线无法完成的任务，两者相比，电力电缆输电具有以下特点：

1) 一般埋设于土壤中或敷设于室内、沟道、隧道中，线间距离小，占用空间少。基本不占用地面空间，节约土地。

2) 受气候条件和周围环境影响小，传输性能稳定，可靠性高。

3) 具有向超高压、大容量发展的有利条件,如低温电缆、超导电缆等。

因此,电力电缆常用于城市的地下电网、发电站和变电站的引出和引入线路、工矿企业的内部供电,以及过江河、跨海峡等的水下输电线。随着国家城镇化建设的加速,城市电网由架空逐步改为地下敷设,市郊、城镇将架空裸线改为架空绝缘电缆。

因其担负的功能决定了电力电缆应具有以下特性:

1) 能够长期承受高电压作用,具有优良的电气绝缘性能。

2) 能传输很大的电流,应具有良好的热老化和散热性能。

3) 能适应各种不同的敷设环境要求,应具有多种结构的护层以保护绝缘和导体。

4) 电力系统和用电设备不同,电缆要有各种电压等级、芯数、截面组合以适应传输容量、相数和电压要求。

电力电缆承受的工作电压,按导体间的额定工频电压( $U$ )大致分为1、3、6、10、15、20、30、35、66、110、220、330、500、750、1000kV等。1kV及以下为低压,3~35kV称为中压,66~330kV称为高压,500kV为超高压,1000kV及以上为特高压。电压等级不同,绝缘材料选用、绝缘厚度、结构设计都有不同要求。如电力电缆主要结构部件为导体、绝缘和护层,为改善电场分布,3kV以上产品应增加屏蔽层,为防止水分对高压电缆的侵害,110kV及以上电缆均有严格的防水措施,如导体间隙填充阻水纱(或带),金属护套和绝缘线芯间绕包阻水带。

电力电缆的芯数为1~5芯。交流电力系统为三相交流电,因此产品主要是3芯。低压电力电缆才采用4芯、5芯电缆,4芯中有3芯是相线芯(又称主线芯),1芯为中性线(供三相电流不平衡时回流用);5芯电缆中则又增加了一根直接接地的接地保护线芯。因低压电网是用户网,经常会有三相分为三个单相的供电方式,每相都需要有中性线,即一芯相线、一芯中性线,这就是2芯电缆的适用场合。低压用电装置与人们直接接触机会很多,特别是民用建筑和家庭用电,为了人身和设备的电气安全,有很多会在2芯电缆基础上增加1根接地线,成为3芯电缆。

按照传输电流的大小(额定电流)应采用不同截面积的导电线芯,为了生产管理和设计选用的规范化,对导电线芯的截面积等级进行了统一规定。

电力电缆是按照绝缘材料来分类的,每种绝缘材料所适用的电压等级范围,取决于该绝缘材料的性能和制造工艺。在1~35kV的中低压领域,早期多使用橡皮绝缘、油浸纸绝缘电缆,后来又发展了结构、制造和敷设更简单的聚氯乙烯绝缘、聚乙烯绝缘和交联聚乙烯绝缘电缆。110kV及以上的高压超高压领域,主要使用充油电缆、聚乙烯绝缘和交联聚乙烯绝缘电缆等。现代电力工业的发展,要求电缆的工作电压越来越高,传输容量日益增大。在500kV及以上的超高压领域,电缆的结构形式有自容式充油电缆、钢管充油电缆、交联聚乙烯绝缘电缆和压缩气体绝缘电缆。为进一步提高传输容量,采用人工冷却方式的低温电缆和超导电缆技术也日益成熟。电力电缆主要品种、工作电压及型号见表1-2。

### 一、塑料绝缘电力电缆

塑料绝缘电缆的发展,以其结构简单、重量轻、敷设方便等优点,很快淘汰了中低电压领域的油浸纸绝缘电缆。在6kV以下的中低压领域,发展较早的是聚氯乙烯绝缘电缆,6kV及以上主要发展了过氧化物交联聚乙烯绝缘电缆。随着硅烷交联技术的成熟,特别是环保风的劲吹,聚氯乙烯绝缘电缆的应用越来越少,在电力电缆领域仅留的0.6/1kV的“领地”

也岌岌可危,在1~500kV这一广阔的电压领域,几乎都成为交联聚乙烯绝缘电缆的市场。聚氯乙烯和聚乙烯只是在电缆护层上还有较多应用。

表 1-2 电力电缆的品种及型号

绝缘类型	电缆名称	电压等级 /kV	允许长期工 作温度/℃	代表型号
塑料绝缘	聚氯乙烯绝缘电缆	1~6	70	VV、VV22、JKV、JKLHV
	聚乙烯绝缘电缆	1~400	70	YV、YV22、JKLY、JKLHY
	交联聚乙烯绝缘电缆	1~750	90	YJV、YJV22、JKLYJ、JKLYJ/Q
橡皮绝缘	天然-丁苯橡皮绝缘电缆	1~6	65	XQ、XV、XLHF
	乙丙橡皮绝缘电缆	1~138	90	EF、EY、EYF
	丁基橡皮绝缘电缆	1~35	80	—
油浸纸绝缘	普通黏性浸渍电缆 统包型	1~35	1~6kV 80	—
	分相铅(铝)包型		10kV 65~70	ZL、ZLQ
	不滴流电缆		20~35kV 60~65	ZLLF、ZQF、ZLQF
	统包型	1~35	1~6kV 80	—
	分相铅(铝)包型		10kV 65~70	ZQD、ZLD
	自容式充油电缆		20~35kV 65	ZLLDF、ZQDF
	钢管充油电缆	110~750	80~85	CYZQ
	钢管压气电缆	110~750	80~85	—
	充气电缆	110~220	80	—
充气电缆	35~110	75	—	
气体绝缘	压缩气体绝缘电缆	220~500	90	—
新型电缆	低温电缆	—	—	—
	超导电缆	—	—	—

作为绝缘材料,聚氯乙烯具有较好的物理机械性能和耐气候性,价格低廉,因此得到大量应用。但其绝缘性能一般,介质损耗和介电常数大,因此只适用于6kV及以下中低压电缆;特别是结构中含有氯原子,虽然赋予良好的阻燃性能,但一旦发生火灾,燃烧过程会产生大量有毒气体和烟雾,而且组成中含铅元素,在提倡绿色环保的今天,其市场日渐萎缩。

聚乙烯具有近乎理想的电性能,介质损耗和介电常数仅是聚氯乙烯的几分之一,适合用作高、中、低压电缆绝缘材料。但聚乙烯物理机械性能差,有冷流性,耐热性也不好。特别是交联技术的发展,聚乙烯已很少用于电力电缆绝缘。交联聚乙烯继承了聚乙烯优异的电性能,通过大分子间的交联,材料由热塑性改性为热固性,提高了物理机械性能,耐热性也大大提高。在不同交联技术支持下,广泛用于低、中、高、超高电压领域,国外已有750kV的交联绝缘特高压电缆面世。

无论是交联聚乙烯还是聚乙烯、聚氯乙烯绝缘电缆,结构都十分相似,包括导体、绝缘、护层及填充,3kV以上产品增加了屏蔽层,塑料绝缘电力电缆的几种典型结构如图1-6所示。

护层结构为:①单一的塑料护套,可敷设在承受机械外力的室内、隧道及沟管内;②钢带铠装加塑料护套,能承受一定的压力,但不能承受大的拉力,适合直埋敷设;③钢丝铠装加塑料护套,能承受一定的压力和较大拉力,适合矿井、水中等敷设环境。



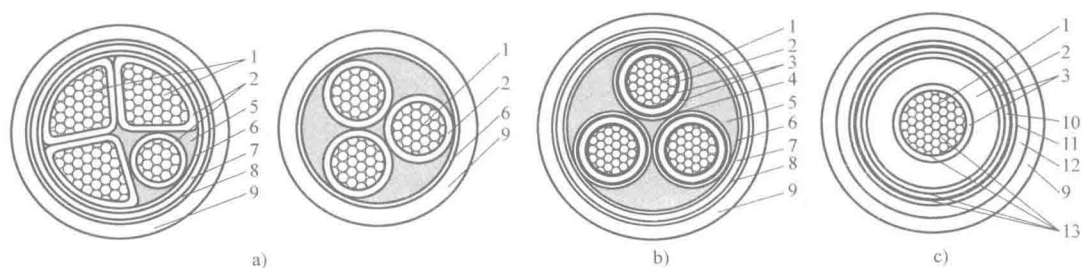


图 1-6 典型塑料绝缘电力电缆结构示意图

a) 1~3kV b) 6~35kV c) 110~220kV

1—导体 2—绝缘 3—半导电屏蔽 4—铜带屏蔽 5—填充 6—包带 7—内衬层  
8—钢带铠装 9—外护套 10—阻水层 11—间隙 12—金属护套 13—阻水纱（或带）

## 二、橡皮绝缘电力电缆

橡皮绝缘电力电缆是历史上最早的电力电缆，因柔软性好，适合安装于弯曲半径小或需要定期变换敷设位置的场合，多用于设备之间的连接线。总体用量较少。

橡皮绝缘主要有乙丙橡胶绝缘，用于 35kV 及以下电压等级；也有采用天然-丁苯胶绝缘，适用电压等级在 6kV 以下。乙丙橡皮绝缘具有电性能优良，特别具有突出的耐电晕性能，另外抗老化性和耐水性均很好，在国外已将其用于 110kV 电压等级。

## 三、油浸纸绝缘电力电缆

油浸纸绝缘电缆是电力电缆的经典结构，在 1990 年以前是我国中低压电力电缆的主导产品，在设计和制造方法上有其独到之处，在这里作一简单介绍，以资借鉴。

其结构特征是在导体上多层绕包绝缘纸带，然后经真空干燥、浸渍绝缘油，为防止油的流失，再挤包金属护套（铝或铅）进行封闭，再在其外增加加强层（如铠装）或外护套而成。

这种电缆的油和纸绝缘结构是互补性的合理组合，电缆电性能、热性能裕度大，使用寿命长（可达 70、80 年）。但工序多、生产周期长、接头复杂、重量大（有金属护套）、工作温度低（油的热胀冷缩和流淌影响）、允许敷设位差低（油的流淌影响）等原因，1960 年以后逐渐被塑料绝缘电缆取代，到 21 世纪已完全停产。

10kV 及以下的多芯电缆常采用扇形导体，多芯共用一个金属护套，称统包结构，如图 1-7a 所示。20~35kV 电缆，若每个绝缘线芯都有单独的金属护套，称为分相铅（铝）包型，如图 1-7b 所示。

统包结构采用相绝缘和带绝缘结合的绝缘结构，带绝缘是在绝缘线芯成缆后统包于几相绝缘线芯外的结构。两相导体间由两层相绝缘承受线电压。一层相绝缘单独承受相电压，厚度就不足，绕包带绝缘可弥补相绝缘厚度的不足，同时也起到成缆扎紧作用。

## 四、充油电缆

充油电缆由油纸电缆发展而来，采用聚丙烯-木纤维复合纸（PPLP）绕包绝缘，浸渍低黏度的高压绝缘油，采用金属内护套（铅、铝或钢管）封闭。该类型电缆实际是纸绝缘金属套充油高压电力电缆。