

◆ 工厂电气技术丛书

电力电缆的 安装、运行与 故障测寻

修订版

◆ 王润卿

吕庆荣
编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

47
9

工厂电气技术丛书

电力电缆的安装、运行与 故障测寻

修 订 版

王润卿、吕庆荣 编

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电缆的安装、运行与故障测寻/王润卿, 吕庆荣
编. —修订版. —北京: 化学工业出版社, 2001. 5
(工厂电气技术丛书)
ISBN 7-5025-3164-5

I. 电… II. ①王… ②吕… III. ①电力电缆-
安装②电力电缆-电力系统运行③电力电缆-故障检测
IV. TM726. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 07564 号

工厂电气技术丛书
电力电缆的安装、运行与故障测寻
修订版

王润卿 吕庆荣 编
责任编辑: 刘 哲
责任校对: 顾淑云
封面设计: 田彦文

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64918013
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市彩桥印刷厂印刷
三河市延风装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 11 字数 264 千字
1994 年 10 月第 1 版 1994 年 10 月第 1 次印刷
2001 年 6 月第 2 版 2001 年 6 月北京第 2 次印刷
印 数: 3401—7400
ISBN 7-5025-3164-5/TM·17
定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

再 版 前 言

随着国民经济的蓬勃发展，电力的使用迅速增长。由于电缆与架空线相比有着极大的优越性，因此电缆的应用日益广泛。城市电网，特别是工矿企业的高低电压力线路，已普遍实现电缆化。近年来，我国电缆线路的增长十分迅猛，其中以 35kV 及以下电力电缆所占的比例最大。因此，提高电缆安装施工质量和安全运行水平，及时、准确排除电缆故障以迅速恢复供电，已成为各级供电部门一项极其重要的工作。

为满足广大电气工人和技术人员学习和掌握电缆施工、运行和故障测寻技术的需要，我们于 1993 年在广泛参考有关技术资料的基础上，结合自己多年的工作实践，编写出版了这本电缆技术书。书中所编内容既有实际操作的具体方法，又有必要的深入浅出的理论分析，力求能帮助读者提高独立分析与解决电缆技术问题的能力。

本书于 1994 年 10 月出版发行，受到广大电气技术人员和工人的欢迎。这次应化学工业出版社的委托，对原书作了一定的修改，并在附录中收编了电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范、电力电缆运行规程以及电气设备交接试验标准和预防性试验规程中有关电缆线路的内容，供读者学习时查阅。

原四川化工总厂副总工程师张馥根和吉林化学工业公司化肥厂副总工程师邓绍庚曾对本书 1993 年稿进行了全面审阅，提出了宝贵的修改意见，在此再次向他们表示衷心的感谢。

由于我们理论水平有限，实践经验不足，书中难免有缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编 者

2001 年 1 月于大连

目 录

第一章 电缆的用途、种类与特点	1
第一节 电缆的用途与使用情况	1
第二节 电缆的种类与特点	2
一、电缆的种类	2
二、几种不同种类电缆的特点	2
第二章 电缆的结构与材料性能	4
第一节 线芯的材料与结构	4
一、电缆线芯材料	4
二、电缆线芯结构	5
三、电缆线芯的标称截面	6
第二节 绝缘层的材料与绝缘层中电场的分布	6
一、对电缆绝缘层材料的要求	6
二、几种常用的绝缘材料	6
三、电缆绝缘层中电场的分布	8
四、电缆绝缘厚度的确定	10
第三节 护层结构与材料性能	10
一、电缆护层的作用	10
二、几种电缆护层的结构与性能	11
第四节 电缆的典型结构与性能	14
一、浸渍纸绝缘电缆	14
二、充油电缆	17
三、塑料电缆	19
四、橡皮电缆	20
第五节 电缆的型号及应用范围	20
一、电缆的型号	20
二、各种型号电缆的适用范围	22
第三章 电缆的选择与敷设	24
第一节 电缆的选择	24
一、电缆护层的选择	24
二、电缆额定电压的选择	24
三、电缆截面的选择	24
第二节 电缆的敷设方式、适用范围与技术要求	29
一、电缆的敷设方式和基本要求	29
二、直埋敷设	30
三、电缆沟敷设	31

四、电缆隧道敷设	32
五、排管敷设	32
六、架空敷设	33
第三节 电缆的敷设	33
一、电缆敷设前的准备	33
二、现场指挥和敷设电缆注意事项	34
第四章 电缆头施工的基本要求和基本操作工艺	36
第一节 电缆头和对电缆头的基本要求	36
一、电缆头	36
二、对电缆头的基本要求	37
第二节 线芯导体的连接	37
一、线芯导体连接的基本要求	37
二、铜芯导体的锡焊	37
三、铝芯导体的压接	38
四、大截面铝芯电缆的氩弧焊接	40
五、不同材料、不同截面线芯的连接	41
第三节 电缆头电应力的控制和附加绝缘	41
一、终端头电应力的控制	41
二、中间接头电应力的控制	44
三、对绝缘胶和绝缘带的性能要求	45
四、使用沥青绝缘胶应注意的问题	46
五、绕包绝缘带应注意的问题	47
第四节 电缆头的密封处理	48
一、铅包电缆的封铅	48
二、铝包电缆的封铅	49
三、电缆头的橡皮压装密封	50
四、塑料电缆的密封	51
第五节 几个基本操作工艺	51
一、材料的准备	51
二、现场准备	52
三、电缆绝缘检查	52
四、打卡子、剥钢带	52
五、焊接地线	53
六、剖铅（铝）、胀喇叭口、剥统包绝缘和分芯	53
七、包缠线芯绝缘、套绝缘管	55
八、扎尼龙绳	56
九、环氧树脂的配方和使用	56
第五章 10kV 及以下室内电缆终端头的制作	58
第一节 室内干包电缆终端头的制作	58
第二节 室内环氧树脂电缆终端头的制作	59

第三节 室内尼龙电缆终端头的制作	61
第四节 塑料电缆终端头的制作	63
一、制作塑料电缆头常用的包带材料	63
二、制作工艺	64
第五节 热缩型电缆终端头的制作	66
第六章 10kV 及以下室外电缆终端头的制作	69
第一节 鼎足式铸铁电缆终端头的制作	69
第二节 倒挂式铸铁电缆终端头的制作	70
第三节 室外环氧树脂电缆终端头的制作	70
第七章 10kV 及以下电缆中间接头的制作	73
第一节 铅套管电缆中间接头的制作	73
第二节 环氧树脂电缆中间接头的制作	75
第三节 塑料电缆中间接头的制作	76
第四节 热缩型中间接头的制作	78
第八章 35kV 电缆终端头和中间接头的制作	81
第一节 35kV 浸渍纸绝缘电缆终端头的制作	81
第二节 35kV 浸渍纸绝缘电缆中间接头的制作	83
第三节 35kV 交联聚乙烯电缆终端头的制作	84
一、户内无瓷套管终端头的制作	84
二、户外瓷套管终端头的制作	85
第四节 35kV 交联聚乙烯电缆中间接头的制作	86
一、制作工艺	87
二、施工过程中应注意的事项	88
第九章 电缆的试验	89
第一节 电缆的试验项目、周期和标准	89
第二节 绝缘电阻的测量	90
一、测量绝缘电阻的意义和技术要求	90
二、测量方法	91
第三节 泄漏电流试验与直流耐压试验	92
一、试验的意义	92
二、试验方法	93
三、试验结果的分析判断	95
第十章 电缆的运行及维护	97
第一节 电缆的巡查	97
一、巡查周期	97
二、巡查的主要内容	97
三、巡查结果的处理	97
四、几种常见缺陷的处理方法	98
第二节 电缆的维护	99
一、电缆负荷和温度的监视	99

二、外力损伤的防止	100
三、电缆腐蚀的预防	101
第三节 电缆的防火	102
一、电缆火灾事故概况	102
二、电缆的防火处理	103
第十一章 电缆故障的分类及测寻步骤	105
第一节 电缆故障产生的原因及分类	105
一、电缆故障产生的原因	105
二、电缆故障的分类	106
第二节 电缆故障的测寻步骤	106
一、电缆故障性质的确定	106
二、电缆故障的测寻步骤	107
第十二章 电缆故障的测寻	108
第一节 电缆故障点的烧穿	108
一、烧穿的要求及方法	108
二、交流烧穿	108
三、直流烧穿	109
第二节 电缆故障点的粗测	109
一、直流电桥法测量短路和接地故障	110
二、电容电桥法测量断线故障	115
三、脉冲反射法测量电缆故障	116
第三节 电缆故障点的精测（定点）	120
一、电缆敷设路径的探测和电缆的鉴别	120
二、电缆故障点的精测（定点）	122
第四节 低压电缆故障的测寻	125
一、概述	125
二、测寻方法	125
第五节 不同性质故障测寻方法的选择	125
一、高阻类故障的测寻方法	125
二、低阻类故障的测寻方法	126
三、断线故障的测寻方法	126
四、裸露电缆故障的特殊定点方法	126
附录 1 电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范（GB50168—91）	128
附录 2 电气装置安装工程电气设备交接试验标准（GB50150—91）（有关内容摘录）	142
附录 3 电力电缆运行规程（电力工业部 1979 年 8 月颁发）	144
附录 4 电力设备预防性试验规程（DL/T 596—1996）（有关内容摘录）	159
参考文献	165

第一章 电缆的用途、种类与特点

第一节 电缆的用途与使用情况

将一根或数根导线绞合而成的线芯，裹以相应的绝缘层，外面包上密闭包皮（如铅、铝或塑料、橡胶等），这种导线称为电缆。电缆的种类很多，在电力系统中，最常见的电缆有两大类，即电力电缆和控制电缆。用于输送和分配大功率电能的电缆叫电力电缆。本书只讨论电力电缆。

把发电厂发出的电能传送到远方的变电所、配电所及用户的各种用电设备，是通过架空线或电缆来实现的。在大多数情况下，用架空线传送电能比用电缆传送成本低。但随着工业的发展，电缆用量在整个传输线中所占的比例逐年提高。与架空线相比，电缆具有下列优点：

- ① 线间绝缘距离小，占地少，可沿墙或埋地敷设，电缆作地下敷设，不占地面空间，可避免在地面设杆塔和导线，有利市容整齐美观；
- ② 不受外界环境影响，可避免风、雷击、风筝和鸟等造成架空线的短路和接地等故障，供电可靠性高；
- ③ 因有绝缘层，人不可能触及导电体，对人身比较安全；
- ④ 运行简单方便，维护工作量少，运行费用低；
- ⑤ 电缆的电容较大，有利于提高电力系统的功率因数。

因此，在人口稠密的城市和厂房设备拥挤的工厂，为减少占地，多采用电缆；在严重污染地区，为了提高送电的可靠性，多采用电缆；对于跨越江河的输电线路，跨度大，不宜敷设架空线，也多采用电缆；有的从国防工程的需要出发，为避免暴露目标而采用电缆；也有的为建筑美观而采用电缆。总之，电缆已成为近代电力系统不可缺少的组成部分。

图 1-1 是架空线和电缆工作电压发展图。由图可见，在电力工业发展初期，电缆落后于架空线路的发展。随着工业的发展，电缆的工作电压几乎跟上了架空线工作电压的发展。这是因为随着电缆制造技术的进步，提供了制造与输电线路相同电压等级电缆的可能性。

现在世界上工业发达的国家在研究高压输电问题的同时，都在进行相应电压等级电缆的研究与试制工作。

解放前我国曾生产过极少量的 600V 以下的橡皮电缆，主要电缆产品几乎全部依赖进口。解放后，我国电缆工业得到迅速的发展。1951 年开始生产 6kV 电缆，1953 年开始生产 10kV

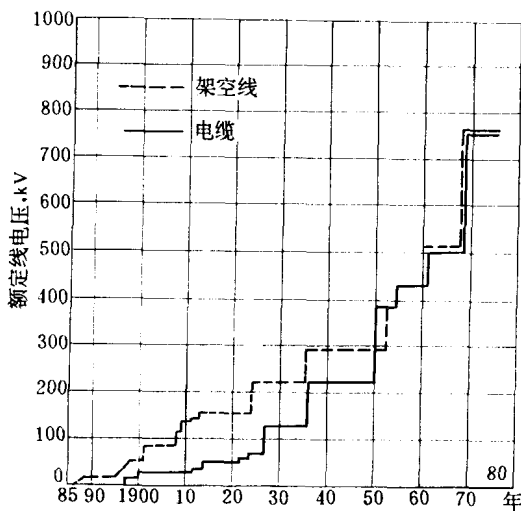


图 1-1 架空线、电缆的工作电压逐年发展图

电缆, 1956 年开始生产 35kV 浸渍纸绝缘电缆, 以后又相继生产了 110、220、330 及 500kV 电压等级电缆。1969 年第一根 220kV 电缆投入运行, 1970 年 330kV 电缆投入运行, 1983 年 500kV 电缆开始试运行。随着电缆制造工业的不断发展, 大量的架空线将逐渐被电缆所代替。

第二节 电缆的种类与特点

一、电缆的种类

电缆可按绝缘材料、结构特征及敷设环境进行分类, 一般分如下几种。

(一) 按绝缘材料分类

(1) 油纸绝缘 粘性浸渍纸绝缘型 (分统包型和分相屏蔽型); 不滴流浸渍纸绝缘型 (分统包型和分相屏蔽型); 有油压、油浸渍纸绝缘型 (分自容式充油电缆和钢管充油电缆); 有气压、粘性浸渍纸绝缘型 (分自容式充气电缆和钢管充气电缆)。

(2) 塑料绝缘 聚氯乙烯绝缘型; 聚乙烯绝缘型; 交联聚乙烯绝缘型。

(3) 橡胶绝缘 天然橡胶绝缘型; 乙丙橡胶绝缘型。

(二) 按结构特征分类

(1) 统包型 在各缆芯外包有统包绝缘, 并置于同一护套内。

(2) 分相型 分相屏蔽, 一般用在 10~35kV 油浸纸绝缘或塑料绝缘。

(3) 钢管型 电缆绝缘外有钢管护套, 分钢管充油、充气电缆和钢管油压式、气压式电缆。

(4) 自容型 护套内部有压力的电缆, 分自容式充油电缆和充气电缆。

(5) 扁平型 三芯电缆的外形是扁平状, 一般用于大长度海底电缆。

(三) 按敷设环境分类

地下直埋、地下管道、水底、矿井、高海拔、高落差等。环境因素一般对护层结构有一些特殊的要求, 有的要求考虑机械保护, 有的要求提高防腐能力, 有的则要求增加柔软度等。

(四) 其他

按电压等级可分为高压电缆和低压电缆, 按芯数可分为单芯电缆和多芯电缆等。通常称 35kV 及以下电压等级的电缆为中低压电缆, 是应用量最大的电缆品种。

二、几种不同种类电缆的特点

(一) 油纸绝缘电缆

1. 粘性浸渍纸绝缘电缆

产品开发较早, 具有成熟的制造和运行经验, 制造质量比较稳定, 工作寿命长, 结构简单, 制造方便; 但油易滴流, 不宜作高落差敷设, 允许的工作场强较低, 不宜作高电压使用。

2. 不滴流浸渍纸绝缘电缆

浸渍剂在工作温度下不滴流, 适宜高落差敷设。工作寿命较粘性浸渍纸绝缘电缆更长, 具有较高的绝缘稳定性, 但成本较粘性浸渍纸绝缘电缆稍高。

(二) 塑料绝缘电缆

1. 聚氯乙烯绝缘电缆

易于制造, 化学稳定性高, 具有非延燃性。安装工艺简单, 维护方便, 价格低廉, 但机

械性能易受温度影响。

2. 聚乙烯绝缘电缆

具有优良的介电性能，但抗电晕和游离放电性能差；工艺性能好，易于加工，但耐热性差，受热易变形，易延燃，易发生应力龟裂。

3. 交联聚乙烯绝缘电缆

有高的电气性能，击穿强度高，绝缘电阻大，介电常数小；有高的耐热性能，允许温升较高，允许载流量大；适宜高落差与垂直敷设。

(三) 橡皮绝缘电缆

柔软性好，易弯曲，在很大的温度范围内具有弹性，适宜作多次拆装的线路；有较强的耐寒性，有较好的电气性能和化学稳定性，但耐电晕、耐臭氧，耐热和耐油性较差。

第二章 电缆的结构与材料性能

电缆的基本结构包括导电线芯、绝缘层和保护层三个部分。线芯的作用是传送电能，它必须有良好的导电性能，以减少电能传输过程中的损耗。绝缘层用来将不同导电线芯以及接地部分彼此绝缘隔离，它必须绝缘性能良好，并具有一定的耐热性能。保护层保护绝缘层免受外界媒质作用，使电缆在运输、贮存、敷设和运行过程中，绝缘层不受外力的损伤和防止水分侵入，它应具有一定的机械强度。

第一节 线芯的材料与结构

一、电缆线芯材料

电缆线芯的作用是传送电流。为减小电缆线芯中的损耗和电压降，电缆线芯一般由具有高电导系数的铜或铝制成。

铜与铝的物理性能如表 2-1 所示。铜作为电缆线芯具有许多技术上的优点，如导电系数大，机械强度高，加工容易，易于压延、拉丝和焊接，同时还耐腐蚀，是最广泛被采用的电缆线芯材料。铝是导电性能仅次于银、铜、金的导电材料，它有丰富的矿产资源，价格较低，因此被广泛采用。

从表 2-1 可看出，铝的机械性能与导电性能均比铜差，但对于固定敷设的电缆来说，一般并不要求导体承受过大的拉力，只要求具有一定的柔软性，方便于制造和安装。在这点上两种导体均能满足要求。

从导电性能看，铜在 20℃ 时电阻系数为 $0.01724\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ ，铝的电阻系数比铜大，为 $0.0263\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ ，是铜的 1.64 倍。欲使同样长度的铜线与铝线具有相同的电阻，铝线的截面是铜线的 1.64 倍，直径是铜线的 $\sqrt{1.64} = 1.28$ 倍。由于铝的密度小，即使截面增大 1.64 倍，但铝线的重量也只有铜线的 1/2。

表 2-1 铜、铝物理性能

物 理 性 能	铜	铝	物 理 性 能	铜	铝
密 度, g/cm^3	8.9	2.7	熔解热, cal/g	50.6	93
抗拉强度, MPa	2.548 ~ 2.744	≥ 0.784	电阻系数 (20℃ 时), $\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$	0.01724	0.0263
熔点, $^{\circ}\text{C}$	1033	658	电阻温度系数, $1/^{\circ}\text{C}$	0.003931	0.00403

注: $1\text{cal} = 4.18\text{J}$

由上述分析可知，由于铝的电阻率比铜大，在同等导电能力时铝线的直径较大，这就增加了电缆绝缘材料与保护层材料的用量。另一方面，铝线质量比铜线轻一半，加上铝线的截面大，散热面积增加，实际上要达到同样的负载能力，铝线截面只需达到铜线的 1.5 倍就可以了，由于这些原因，铝芯电缆有着足够的经济价值。

从安装运行来看，铜比铝性能优越。铜线的连接容易操作，无论是压接、焊接和绑接，均容易满足运行要求。铝线连接则比较困难，接头在运行中也容易因接触电阻增大而发热。

铜对于某些浸渍剂（如矿物油、松香复合浸渍剂等）、硫化橡胶有促进老化的作用。在此情况下，可在铜线表面镀锡，使铜不直接与上述物质接触，以减低老化速度。采用镀锡铜线提高了电缆的质量，也使线芯的焊接更加容易。

二、电缆线芯结构

电缆线芯按其外形可分为圆形、扇形、卵形或椭圆形几种。对于 66kV 及以上的充油或充气电缆，常采用中空圆形线芯，中间空道用作油或绝缘气体的流动通道。为了增加电缆的柔软性和可曲度，较大截面的电缆线芯均由多根较小直径的导线绞合而成。由多根导线绞合的线芯柔软性好，可曲度大。因为单根导线沿某一半径弯曲时，其中心线圆外部分必然伸长，圆内部分必然缩短。如果线芯是由多根导线平行放置组成，因导线之间可以滑动，因此比相同 截面单根导线作相同弯曲时要省力得多。

电缆的可曲性大约与线芯股数的平方根成正比，股数越多，弯曲越易。但电缆的可曲性同时也受到外护层等方面的限制，所以股数过多也徒然增加制造上的困难，而对可曲性仍无济于事。因此，在制造不同标称截面的电缆线芯时，都规定了一定的导线根数，如表 2-2 所示。

为保持线芯结构形状的稳定性和减小线芯弯曲时每根导线的变形，多根导线组成的线芯都应绞合而成。图 2-1 (a)、(b)、(c) 表示一组平行放置的导线，当弯曲后变直时，由于导线的塑性变形，可能在线芯表面产生凸出部分，使电缆绝缘层中电场的分布产生畸变，并损伤电缆绝缘。而在绞合的线芯结构中，如图 2-1 (d)、(e) 所示，线芯中心线内外两部分可以相互移动补偿，弯曲时不会引起导线的塑性变形，因此线芯的柔软性和稳定性大大提高。另外，由多根导线绞合的线芯与大截面的单根线芯不同，弯曲较平滑地分配在该段线芯上，因而弯曲时不容易损坏电缆的绝缘。

表 2-2 各种规格电缆线芯导线根数

导体标称截面 mm ²	圆 形	扇 形
25 ~ 35	1 + 6	6 + 12
50 ~ 70	1 + 6 + 12	6 + 12
95	1 + 6 + 12	9 + 16
120	1 + 6 + 12	9 + 15
150	1 + 6 + 12	7 + 2 + 15 + 21
185	1 + 6 + 12 + 18	7 + 2 + 15 + 21
240	1 + 6 + 12 + 18	7 + 2 + 15 + 21
300 ~ 400	1 + 6 + 12 + 18	—
500 ~ 625	1 + 6 + 12 + 18 + 24	—
800	1 + 6 + 12 + 18 + 24 + 30	—

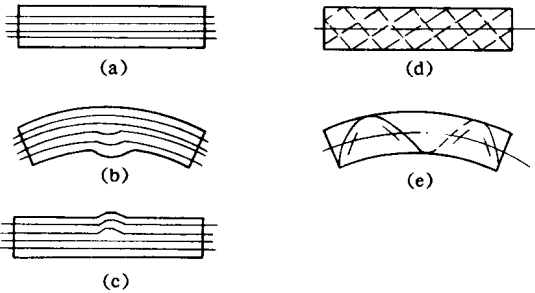


图 2-1 线芯弯曲时变形示意图

- (a) 平行导线弯曲前；(b) 平行导线弯曲后；
(c) 平行导线弯曲后再恢复平直；(d) 绞合线芯弯曲前；
(e) 绞合线芯弯曲后

圆形截面的导线具有稳定性好，表面电场均匀和制造工艺简单的优点，高压电缆的线芯大多为圆形截面，单芯自容式充油电缆的线芯多为中空形圆导体。

对于 10kV 及以下电压等级的电缆，则以成缆后为一圆形为准则。为了缩小电缆外径，以节约原材料，减轻电缆质量，降低制造成本，线芯一般制成扇形。线芯在绞合后还需经过轧轮压紧，使导线间的空隙减少。对于粘性浸渍纸绝缘电缆，压紧的线芯对浸渍剂流动的阻

力增大,改善了绝缘的电气性能。线芯压紧后仍存在一些空隙,所以线芯的实际截面比线芯的轮廓截面为小,通常称这两面积之比为填充系数。

三、电缆线芯的标称截面

为了制造和应用上的方便,电缆线芯的截面有统一的标称等级。电缆标称截面的等级各国的规定不尽相同,我国目前 35kV 及以下电缆线芯截面系列如下 (mm^2):

2.5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500; 625; 800。

工厂企业常用的是 240mm^2 及以下截面的电缆。

第二节 绝缘层的材料与绝缘层中电场的分布

一、对电缆绝缘层材料的要求

电缆中的绝缘层是用来承受电压作用的。电缆的线芯既处于高电位,又有大电流通过,因此,电缆的绝缘层材料必须满足下列要求。

(1) 高的击穿场强与足够的耐受工频、冲击与操作过电压作用的能力 电缆线芯相间和对地距离都很近,电缆的绝缘经常工作在高电场强度之下,绝缘材料如没有足够的电气强度,就不能在高电场下稳定工作。

(2) 介质损耗低 绝缘材料在电压作用下会产生介质损耗,介质损耗太大将引起电缆发热,加速绝缘老化,甚至发生击穿损坏。在高压电缆中,特别是 35kV 及以上电缆,介质损耗是一个极为重要的技术指标。

(3) 耐电晕性能好 电缆绝缘的工作场强很高,绝缘层中不可避免会残存一些气泡,这些气泡在强电场的作用下,很容易被电离而产生局部放电,并伴随产生臭氧腐蚀绝缘。

(4) 化学性质稳定 绝缘材料性能应稳定,不受外界因素影响而变质,使绝缘水平降低,缩短使用寿命。

(5) 耐热性能好 绝缘材料应能在工作温度下长期运行而绝缘性能不变坏。允许的运行温度越高,电缆的允许载流量越大,供电能力越强。

(6) 耐低温 应能在较低的自然温度下进行安装敷设,绝缘不变脆、不损坏。

(7) 加工性能好 具有一定柔软性与机械强度,便于制造与安装。

(8) 价格便宜 绝缘层是电缆的关键部位,绝缘材料的价格对电缆的造价影响很大,价格昂贵,其使用范围就要受到限制。

二、几种常用的绝缘材料

1. 电缆纸

电缆纸的主要成分是纤维素,它具有很高的稳定性,不溶于水、酒精等有机溶剂,同时也不与弱碱及氧化剂等起作用,因此,纯纤维素做成的纸经久耐用。纤维素纸具有毛细管结构,它的浸渍性远大于聚合薄膜,这是聚合物薄膜未能取代纤维素纸的主要原因。

纸具有很大的吸湿性,纸内含水量的大小对纸的电气性能影响很大。电缆纸中含水会大大降低其绝缘电阻和击穿场强,而介质损耗增大。因此,浸渍纸绝缘电缆在浸渍前必须进行干燥,除去纸中的水分。由于水分会渗透到纸的微细孔中,所以干燥过程都是在高度真空中进行。

2. 浸渍剂

浸渍纸绝缘的浸渍剂按其粘度可分两大类,即粘性浸渍剂和高压电缆油。常说的浸渍剂

是指 35kV 及以下浸渍纸绝缘电缆用的，它实际上是光亮油和松香等的混合物，由于现代化学工业的发展，松香将逐步被合成微晶蜡代替。

粘性浸渍剂也有两种。一种叫粘性浸渍剂，用于油浸纸绝缘电缆，在工作温度下浸渍剂是流动的，所以必须限制电缆的敷设落差。另一种是不滴流浸渍剂，用于不滴流电缆，在工作温度下浸渍剂是不流动的，所以电缆不受敷设落差的限制。不滴流浸渍剂在工艺温度时具有良好的流动性，以保证电缆绝缘纸得到充分的浸渍，但在电缆运行温度范围内，它不能流动而成为塑性固体。不滴流浸渍剂的电气性能与粘性浸渍剂大体相同，但它在 80℃ 以下是不流动的塑性体。

高压电缆油要求粘度低，具有良好的流动性，主要用作充油电缆的浸渍剂。

3. 聚氯乙烯

聚氯乙烯是最早、最广泛用于电缆绝缘的塑料材料，可用作 10kV 及以下电缆的绝缘，也可用作电缆的护套。

聚氯乙烯绝缘材料是以聚氯乙烯树脂为基础的多组分混合材料，根据各种电缆的使用要求，在其中配以各种类型的增塑剂、稳定剂、填充剂、着色剂和特种用途的添加剂等配合剂，这些配合剂往往对聚氯乙烯的性能有很大影响。

紫外线、氧气在光热作用下对聚氯乙烯有分解破坏作用，使高分子断链或氧化、老化等。稳定剂的作用就是对热、光、氧化起稳定作用。聚氯乙烯由于大分子本身的极性，分子间的引力很大，致使塑性很差。增塑剂一般是低分子化合物，它可以减小聚氯乙烯分子链之间的引力，提高活动性，使聚氯乙烯富有弹性并易于加工成型。填充剂除了降低塑料成本外，有时还可以起改善塑料某些性能的作用，如电气性能、老化性能、工艺性能等。常用的填充剂有陶土、碳酸钙、滑石粉等。

4. 聚乙烯

根据聚合的方法不同，聚乙烯可分为高压聚乙烯和低压聚乙烯。高压聚乙烯是将乙烯气态单体在 100 ~ 200MPa 压力下加热聚合而成，低压聚乙烯系用催化剂在较低的压力（0.1 ~ 10MPa）下加热聚合而成。高压聚乙烯的密度、软化点均较低压聚乙烯低，硬度也较小。根据分子量的大小可以分成高分子量聚乙烯和低分子量聚乙烯。高分子量聚乙烯具有较好的特性，但加工性能较差。电缆工业主要用高压、低密度、高分子量聚乙烯。

聚乙烯原料来源丰富，价格低廉，电气性能优异，具有较小的介质损失和介电常数。在常温下具有一定的韧性和柔性，不要增塑剂，加工方便。但用作高压电缆绝缘必须注意下列几个问题：

- ① 光热老化、氧老化性能低，耐电晕性能比聚氯乙烯低得多；
- ② 由于分子间吸引力小，所以熔点低，耐热性低，机械强度不高，蠕变大；
- ③ 在某些环境（如雨水或某些有机溶剂的侵蚀）下，即使所受应力比其抗张强度小得多，也会产生裂纹，即容易产生环境应力开裂；
- ④ 容易形成气隙。

为了克服上述缺点，可加入各种相应的添加剂以改善其性能。

5. 交联聚乙烯

聚乙烯具有很多优点，但其缺点是耐热性和机械性能低，蠕变性大，容易产生环境应力开裂等，妨碍了它在电缆工业中的应用。为了克服这些缺点，除采用各种添加剂外，主要途径是采用交联法，用化学或物理方法将聚乙烯的分子结构从直链状变成三度空间的网状结

构,称为交联聚乙烯。交联聚乙烯克服了聚乙烯的缺点,机械、耐热、抗蠕变以及抗环境开裂性能大大提高,同时还保持了聚乙烯的优良性能,因此在电缆工业中得到广泛的应用。目前世界上在 110kV 及以下的电缆中,交联聚乙烯电缆占主导地位,在日本、美国、北欧等发达国家已基本上代替了 110kV 及以下的纸绝缘电缆。

6. 橡皮材料

橡皮是最早用来作电线、电缆的绝缘材料。橡皮在很大的温度范围内具有高弹性,对气体、水具有低的渗透性,化学稳定性高,电气性能优良。橡皮电缆具有良好的弯曲性能。因此,橡皮的价格虽然比浸渍纸高,但它仍然成为目前制造高柔软性电缆的唯一材料。

橡皮是以橡胶为主体,配以各种配合剂,混合制成均一橡胶,再经硫化而制成的弹性材料。由于各种配合剂(硫化剂、填充剂、促进剂、防老化剂等)的作用,橡皮的介电系数和介质损耗均有所增加。随着合成橡胶工业的迅速发展,电缆绝缘也大量使用合成橡胶。合成橡胶不仅在数量上满足了人们对天然橡胶的需求,在性能上也弥补了天然橡胶的不足。用于电缆绝缘的合成橡胶有丁苯橡胶、丁基橡胶和乙丙橡胶等。

三、电缆绝缘层中电场的分布

1. 单芯电缆绝缘层中电场的分布

任何导体在电压的作用下,均会在其周围产生一定的电场,其强度与电压的大小和电极的形式等因素有关。电缆的长度一般比它的直径大得多。在大多数情况下,线芯和绝缘层表面具有均匀电场分布的屏蔽层。因此,单芯或分相屏蔽型圆形线芯电缆的电场均可看作同心圆柱体场。电场的电力线全是径向的,如图 2-2 所示。单芯电缆绝缘层中的最大电场强度 $E_{\max}$ 位于线芯表面上,最小电场强度 $E_{\min}$ 位于绝缘层外表面上,电缆绝缘层中电场强度的分布情况如图 2-3 所示。绝缘层中的平均电场强度与最大电场强度之比称为该绝缘层的利用系数。利用系数愈大,说明电场分布愈均匀,也就是说绝缘材料利用的愈充分。对于均匀电场分布的绝缘结构,如平行电容极板间电场,其绝缘材料利用最充分,它的利用系数等于 1,电缆绝缘层的利用系数均小于 1,绝缘层愈厚,利用系数愈小。

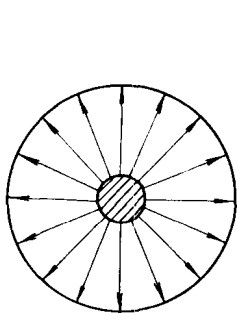


图 2-2 单芯电缆的电力线

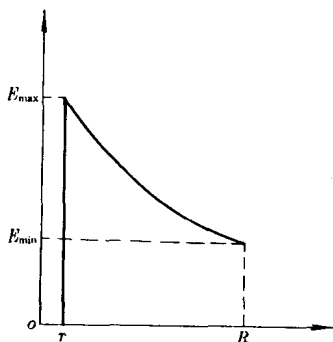


图 2-3 单芯圆形线芯电缆均匀介质中的电场分布

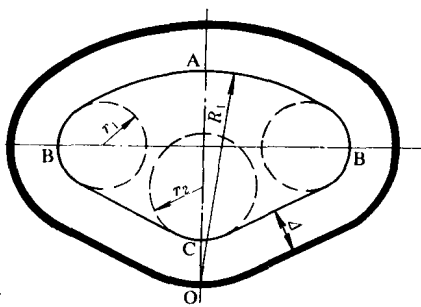


图 2-4 扇形线芯的最大场强点

通过理论分析可知,当导电线芯外径 r 与绝缘层外径 R 之比等于 0.37 时,线芯导体表面的最大电场强度 $E_{\max}$ 最小,当 r 与 R 之比在 0.25~0.5 之间时,导体表面最大电场强度变化不大。所以在制造电缆时,不论其导体截面大小,相同电压等级的电缆均采用相同的绝缘厚度。

扇形或椭圆形单芯电缆的电场分布较为复杂。在电缆绝缘结构的设计中,人们感兴趣的是电缆的最大电场强度。对于扇形线芯,其最大电场强度位于扇形的两端处,即图 2-4 中的 B 点。

电缆绝缘层厚度增加,其绝缘层利用系数就降低,因此,在高压电缆中,常采用分阶绝缘结构使绝缘层中电场分布均匀,以提高电缆绝缘的利用系数。所谓分阶绝缘结构,就是采用多层绝缘,在接近线芯的内层绝缘采用较外层介电系数高的材料,以达到均匀电场的目的。通过理论分析可知,分阶绝缘能使线芯表面电场强度降低,降低程度与 ϵ_1 、 ϵ_2 之差值有关 (ϵ_1 、 ϵ_2 是内外层绝缘材料的介电系数),差值越大,降低越多。同时,绝缘厚度愈大,线芯表面处因分阶而降低的电场强度也愈多。但分阶绝缘也提高了第二层的最大电场强度,如图 2-5 所示。

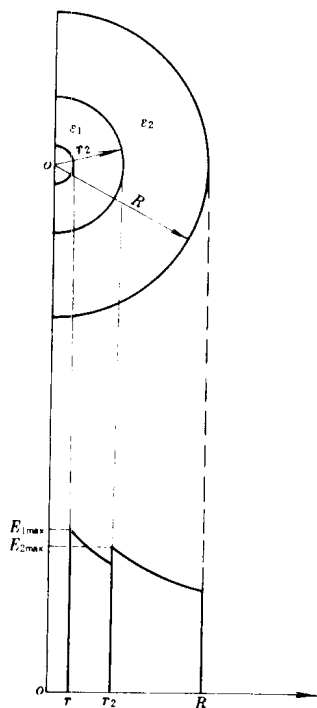


图 2-5 双层分阶绝缘
电场分布 ($\epsilon_1 > \epsilon_2$)

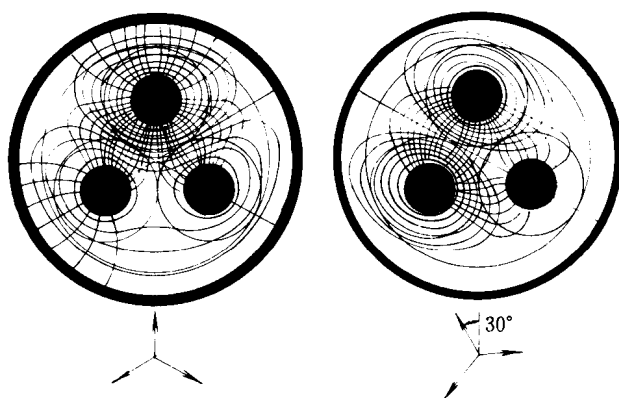


图 2-6 圆形三芯电缆绝缘层中
不同瞬间电场的分布

2. 多芯电缆绝缘层中电场的分布

多芯电缆绝缘层中电场的分布比较复杂,一般用模拟实验方法来确定,在此基础上再近似求最大电场强度。三芯电缆绝缘层中的电场可视为一平面场,外施三相平衡交流电压时,此电场为一随时间变化的旋转电场。图 2-6 就是从一圆形三芯电缆模型测得的结果,它表示两个不同时刻电场的分布,两者相差 30° 。从图中可以清楚地看出,由于三芯电缆电场的互相堆积作用,使电场的分布很不规则。当导体为圆形时,统包型电缆的最大电场强度在线芯中心连接线与线芯表面交点上,其值为:

$$E_{\max} = \frac{U \sqrt{(v+4)/v}}{\sqrt{2r \ln \left[\left(\frac{\sqrt{v+4} + \sqrt{v}}{\sqrt{v+4} - \sqrt{v}} \right) \right]}} \quad \text{kV/cm} \quad (2-1)$$