

177193

TM247  
3163

# 交联聚乙烯电力电缆线路

武汉水利电力大学 江日洪 主编

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书结合我国电网改造和建设工作的需要,着重介绍交联聚乙烯电力电缆的特点、选用原则、电气试验方法和标准以及电缆线路敷线与附件安装,并介绍了电缆线路交接试验和投运后绝缘在线监测、电缆线路行波保护、高压单芯电缆护层过电压及保护、电缆线路防火措施和导引电缆等问题。本书可供电力部门有关技术人员学习,亦可作为大专院校有关专业选修课教材和参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

交联聚乙烯电力电缆线路/江日洪主编. -北京:  
中国电力出版社,1997  
ISBN 7-80125-384-1

Ⅰ. 交… Ⅱ. 江… Ⅲ. 交联聚乙烯-电力电缆-  
输配电线路 N. TM75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 08922 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

鑫正大印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

1997 年 11 月第一版 1997 年 11 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 32 开本 8.625 印张 190 千字  
印数 0001--2920 册 定价 9.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前 言

70年代以来，交联聚乙烯电力电缆在我国得到迅速发展，它已逐步取代常规低中压油纸绝缘电缆，并且这种趋势继续向110kV及以上高压电缆发展。其主要原因是：交联聚乙烯电力电缆重量轻，制造工艺较简单，安装敷设容易，且不受落差限制，可降低安装费用；有良好的电气性能和耐热性能，传输容量大；运行维护方便等。我国自1970年至今已先后研制成功6、10、35、63、110kV交联聚乙烯电力电缆，并能批量生产，加上从国外引进的产品，极大地促进了我国城市电网的建设和改造。

为满足国内电力部门等单位有关技术人员工作学习的需要，我们根据我国实际情况和多年来教学科研工作的体会，编写了本书。本书由武汉水利电力大学江日洪教授主编（编写第一、二、四、五、六、七、八、九章和附录），广州电力工业局陈立护工程师参编（编写第三章）。在本书编写过程中，广州电力工业局电缆管理所提供了很多信息和宝贵资料。为使本书内容更能反映生产实际情况，第一章第三节中关于交联聚乙烯电力电缆的制造工艺和第二章第二节中关于交联聚乙烯电力电缆线芯截面的选择和载流量的计算，分别吸收了沈阳电缆厂滕维钧高工和上海市电力工业局电缆工程处李霞娟高工在1991年沈阳电缆培训班的内部讲义内容，编者对他们的支持深表感谢。北京供电局杨书全高工审阅了全书稿，并提出了宝贵的修改意见，在此也表示深切的感谢。

由于我们水平有限，书中如有不当之处，恳请读者批评指正。

编 者

1996年5月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 交联聚乙烯电力电缆概述</b> .....	1
第一节 电力电缆的分类和特点 .....	1
第二节 交联聚乙烯电力电缆的特性 .....	3
第三节 交联聚乙烯电力电缆的制造工艺 .....	6
第四节 交联聚乙烯电力电缆及附件的发展 .....	13
思考题 .....	18
<b>第二章 交联聚乙烯电力电缆及附件的选用</b> .....	19
第一节 交联聚乙烯电力电缆型号和选用原则 .....	19
第二节 交联聚乙烯电力电缆线芯截面选择和载流量的计算 .....	21
第三节 交联聚乙烯电力电缆金属屏蔽层截面选择 .....	34
第四节 交联聚乙烯电力电缆中间接头的选型 .....	37
思考题 .....	42
<b>第三章 交联聚乙烯电力电缆电气试验</b> .....	43
第一节 交联聚乙烯电力电缆额定电压 $U_0/U$ 的制定依据和分类 .....	43
第二节 交联聚乙烯电力电缆电气试验分类、试验标准和方法 .....	48
第三节 交联聚乙烯电力电缆主绝缘耐压试验方法的探讨 .....	55
第四节 交联聚乙烯电力电缆线路短路故障定位的方法 .....	63
思考题 .....	77
<b>第四章 交联聚乙烯电力电缆敷设与附件安装</b> .....	78

第一节	交联聚乙烯电力电缆线路的敷设方式与条件 .....	78
第二节	110kV 交联聚乙烯电力电缆的施工工艺 .....	81
第三节	交联聚乙烯电力电缆中间接头的安装 .....	85
第四节	交联聚乙烯电力电缆终端头的安装 .....	92
思考题	.....	97
<b>第五章</b>	<b>交联聚乙烯电力电缆绝缘老化机理</b>	
	<b>及监测</b> .....	98
第一节	交联聚乙烯电力电缆绝缘老化机理 .....	98
第二节	交联聚乙烯电力电缆水树的形成和电缆特性的变化 .....	100
第三节	水树老化的判断方法和离线监测 .....	107
第四节	交联聚乙烯电力电缆绝缘在线监测 .....	113
思考题	.....	126
<b>第六章</b>	<b>交联聚乙烯电力电缆线路的行波保护</b> ...	127
第一节	交联聚乙烯电力电缆绝缘冲击电压水平的选择 .....	127
第二节	电缆线路的冲击特性长度和绝缘配合 .....	129
第三节	电缆—GIS 系统避雷器保护范围的计算 .....	138
第四节	交联聚乙烯电力电缆线路上的限流电抗器过电压及保护 .....	147
思考题	.....	154
<b>第七章</b>	<b>高压单芯交联聚乙烯电力电缆护层过电压及保护</b> .....	155
第一节	冲击电压作用下的护层过电压 .....	156
第二节	金属护套工频感应电压的计算 .....	168
第三节	电缆护层保护的接线方式 .....	184
第四节	电缆护层保护器 .....	187
思考题	.....	189
<b>第八章</b>	<b>交联聚乙烯电力电缆线路的防火措施</b> ...	190

第一节	国内外电缆火灾事故分析 .....	190
第二节	电缆防火阻燃措施现状及存在问题 .....	193
第三节	防止电缆着火延燃的措施 .....	195
第四节	电缆防火材料的选择和应用 .....	200
思考题	.....	204
<b>第九章</b>	<b>电力系统中的控制电缆和导引电缆</b> .....	<b>206</b>
第一节	1kV 及以下全塑电缆的正确使用 .....	206
第二节	电力电缆对同沟敷设导引电缆的影响及防护 措施 .....	211
第三节	控制电缆的使用条件、芯线数和截面选择 .....	216
第四节	控制电缆的事故分析及保护措施 .....	221
思考题	.....	229
附录 A	交联聚乙烯电力电缆结构尺寸及电气性能 .....	231
附录 B	电缆线路参数的测量方法 .....	245
附录 C	110~220kV XLPE 电力电缆竣工 试验实例 .....	259
参考文献	.....	268

# 第一章 交联聚乙烯电力 电缆概述

## 第一节 电力电缆的分类和特点

电力电缆经常用作发电厂、变电站以及工矿企业的动力引入或引出线，当需跨越江河、铁路等时也常用它；而随着城市用电剧增，又希望减少线路走廊用地，不少国家还将电力电缆用作城市的输配电线路。电力电缆与架空线路相比，其优点是受外界环境等的影响少、安全可靠、隐蔽、耐用；缺点是电缆结构和生产工艺都比较复杂，成本较高，应用不如架空线那样广泛。然而在某些特殊情况下，它能完成架空线路不易甚至无法完成的任务。

目前电力电缆已应用于交流 500kV 及以下的电压等级。下面对电力电缆的分类和特点作简要介绍。

### 一、电力电缆的种类

电力电缆按绝缘材料性质、结构特征和敷设环境，可分为不同的种类。

#### (一) 按绝缘材料性质分

##### 1. 油纸绝缘

- 1) 粘性浸渍纸绝缘型（统包型、分相屏蔽型）；
- 2) 不滴流浸渍纸绝缘型（统包型、分相屏蔽型）；
- 3) 有油压、油浸渍纸绝缘型（自容式充油电缆和钢管充油电缆）。



## 2. 塑料绝缘

- 1) 聚氯乙烯绝缘型；
- 2) 聚乙烯绝缘型；
- 3) 交联聚乙烯绝缘型。

## 3. 橡胶绝缘

- 1) 天然橡胶绝缘型；
- 2) 乙丙橡胶绝缘型。

### (二) 按结构特征分

(1) 统包型：在各缆线芯外包有统包绝缘，并置于同一护套内。

(2) 分相型：分相屏蔽，一般用在 10~35kV 电缆，有油纸绝缘和塑料绝缘两种。

(3) 扁平型：三芯电缆的外形呈扁平状，一般用于较长的水下和海底电缆。

(4) 自容型：护套内部有压力的电缆，如自容式充油电缆。

### (三) 按敷设环境分

(1) 直埋式：将电缆埋在地中或沟内，并加沙土覆盖。

(2) 沟架式：将电缆敷设在沟内或隧道内的支架上。

(3) 水下敷设：将电缆敷设在湖泊、海洋和河流内。

## 二、各种电力电缆的特点

### (一) 油纸绝缘电缆

(1) 粘性浸渍纸绝缘电缆：该产品开发较早，制造质量比较稳定，具有较长的制造和运行经验，工作寿命长。缺点是油易滴流，不宜作高落差敷设；允许工作场强较低，不宜作太高电压使用。

(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；有较高的绝缘稳定性，但成本较粘性浸渍纸绝缘电缆高。

## （二）塑料绝缘电缆

（1）聚氯乙烯绝缘电缆：工艺性能好，易于加工，化学稳定性高（耐油、耐酸、耐碱和耐腐蚀），非延燃性，生产效率高，价格低廉，敷设维护简单。在低压电缆方面已有取代油浸纸绝缘电缆的趋势。

（2）聚乙烯绝缘电缆：有良好的介电性能，介质损耗角正切值  $\text{tg}\delta$  小，绝缘电阻高；工艺性能好，易于加工，耐湿性好，比重小。但抗电晕及耐热性能较差，受热易变形或开裂。用于较高的工作电压等级时，必须加入特殊添加剂。

（3）交联聚乙烯绝缘电缆：电气性能好，击穿电场强度高，介质损耗角正切值  $\text{tg}\delta$  小，绝缘电阻高。有较高的耐热性和耐老化性能，允许工作温度高，载流量大，适宜于高落差与垂直敷设，是一种很有发展前途的高压电缆。

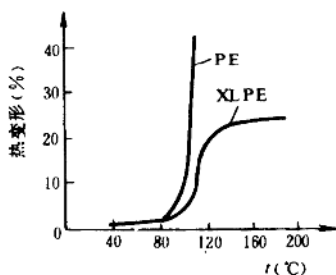
## （三）橡胶绝缘电缆

橡胶绝缘电缆的种类很多，主要是天然橡胶加不同的添加剂组成的各种橡胶，都具有良好的柔软性，易弯曲，在很大的温度范围内具有弹性，有较好的电气性能和化学稳定性，但耐电晕、耐臭氧、耐油性较差，一般适用于 1kV 及以下电压等级的线路，但人工合成的乙丙橡胶可用于 35kV 及以下的电缆。

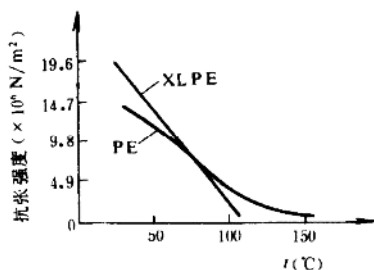
## 第二节 交联聚乙烯电力电缆的特性

如上节所述，交联聚乙烯（XLPE）属于固体绝缘，它是

由聚乙烯 (PE) 加入交联剂挤出成形后, 经过化学或物理方法交联成交联聚乙烯。聚乙烯绝缘虽具有优良的电气性能, 但属于热塑性材料, 即有热可塑性, 当电缆通过较大的电流时,



(a)



(b)

图 1-1 交联电缆热变形、抗张强度与温度的关系

(a) 热变形与温度; (b) 抗张强度与温度

加入少量的有机过氧化物, 常用的是过氧化二异丙苯, 借助于过氧化物受热分解, 产生游离基, 游离基能与聚乙烯中的氢原子结合, 失去氢原子的聚乙烯分子间就联合起来, 变成交联聚乙烯 (如图 1-2 所示)。

交联聚乙烯电缆与油纸电缆相比, 具有结构简单, 制造周期短, 工作温度高, 无油, 敷设高差不限, 运行可靠, 质

绝缘就会熔融变形, 这是由聚乙烯的分子结构所决定的。聚乙烯的分子结构是呈直链状, 而交联聚乙烯是聚乙烯分子间交联形成网状结构, 从而改善了聚乙烯的耐热变形性能、耐老化性能和机械性能 (如图 1-1 所示)。

聚乙烯交联的物理方法是辐照法, 用高能电子射线照射, 去除聚乙烯分子中的氢原子, 使碳—碳链合, 分子间进行交联。这种方法加工性能和经济性都不如化学交联。聚乙烯的化学交联是在聚乙烯中

加入少量的有机过氧化物

量轻,安装、维护简单和输电损耗小等优点。由于耐热性和机械性能好,传输容量大,不仅适用于中低压,而且还可以应用到高压和超高压系统中。表 1-1 列出了交联聚乙烯绝缘与其它绝缘的性能比较,也充分地证明了交联聚乙烯绝缘是一种优良的绝缘材料。所以交联聚乙烯绝缘电缆不仅在中低压范围内能代替传统的油纸绝缘电缆,而且在高压或超高压等级上可与自容式充油电缆相竞争。

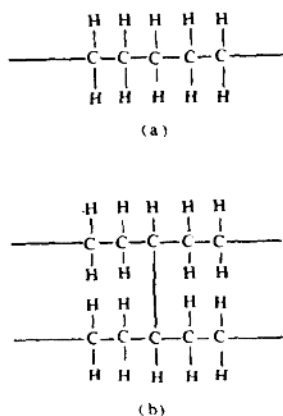


图 1-2 交联电缆分子结构  
(a) PE 电缆; (b) XLPE 电缆

表 1-1 交联聚乙烯绝缘与其它绝缘材料的性能对比

性 能		单 位	交 联 聚 乙 烯	聚 乙 烯	聚 氯 乙 烯	乙 丙 橡 胶	油 浸 纸
电 气 性 能	体积电阻 (20℃)	$\Omega \cdot m$	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{11}$	$10^{13}$	$10^{12}$
	介电常数 (20℃、 50Hz)		2.3	2.3	5.0	3.0	3.5
	介质损耗角正切 (20℃、50Hz)		0.0005	0.0005	0.07	0.003	0.003
	击穿强度	kV/mm	30~70	30~50	—	—	—
耐 热 性 能	导体最大工作温度	℃	90	75	70	85	65
	允许最大短路温度	℃	250	150	135	250	250
机 械 性 能	抗张强度	N/mm <sup>2</sup>	18	14	18	9.5	—
	伸长率	%	600	700	250	850	—

续表

性 能		单 位	交 联 聚 乙 烯	聚 乙 烯	聚 氯 乙 烯	乙 丙 橡 胶	油 浸 纸
耐 老 化 性 能	100℃		优	良	可	优	良
	120℃		优	熔	差	良	可
	150℃		良	熔	—	可	差
其 他 性 能	抗热变形 (150℃)		良	熔	差	优	良
	耐油 (70℃)		良	良	良	差	—
	柔软 (-10℃)		良	差	差	优	—

### 第三节 交联聚乙烯电力 电缆的制造工艺

#### 一、生产工艺过程

交联聚乙烯电力电缆的全部生产工艺过程如图 1-3 所示。现对其生产工艺过程分述如下。

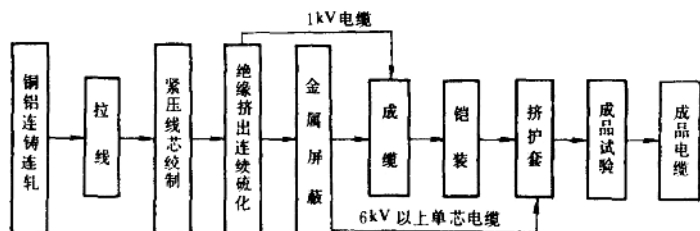


图 1-3 交联聚乙烯电力电缆生产工艺过程

#### 1. 铜铝连铸连轧

进厂的导体材料铝锭和电解铜板需要经过热加工轧制成

一定尺寸，以作为供拉线机进料的杆材。现代化的热轧设备是连铸连轧机，设备分铜连轧和铝连轧两种。

## 2. 拉线

将连铸连轧机生产的圆形铜杆和铝杆进行冷加工——拉丝，利用拉丝机，经过多道拉丝模将杆材拉细，达到所需直径的铜、铝单线、再经退火处理。

## 3. 绞线

利用绞线机将铜、铝单线多股胶合在一起，并利用金属压轮，压制成圆形或扇形的紧压导体。

## 4. 绝缘挤出和连续硫化

利用交联机，在导体上依次挤上导体屏蔽，绝缘层和绝缘屏蔽层连续地在硫化管中交联，并经冷却制造成所需规格的绝缘线芯。

## 5. 金属屏蔽

3kV 以上电压等级的交联聚乙烯电缆都需要具有金属屏蔽。金属屏蔽结构有多种形式，作为分相屏蔽，可利用铜带屏蔽机，将铜带绕包于每一相绝缘线芯上，如果是扇形结构，则应先成缆，将三相的三根缆芯绞合在一起，然后有一统包的金属屏蔽，可以是铜带或者是铜线。单芯电缆一般采用疏绕铜丝屏蔽。

## 6. 成缆

多芯电缆需要绞合在一起，制成一根成品电缆。三芯或四芯电缆的缆芯在成缆机上绞合在一起。圆形缆芯成缆时应填充防水材料，使电缆具有比较圆整的形状。

## 7. 铠装

对于需要铠装的电缆，在成缆后要绕包或挤包一个内护套，然后在铠装机上包铜带或钢丝。

## 8. 挤护套

交联聚乙烯电缆是单芯还是多芯,有铠装还是无铠装,电缆的外护层都是用塑料挤出机挤包聚氯乙烯(PVC)或聚乙烯(PE)护套。

## 9. 成品试验

电缆在生产过程中,各道工序都有质量控制,制成完整的产品后,需要对结构尺寸、电气性能进行试验检查,保证电缆成品的质量。

## 二、交联生产工艺

如前所述,交联聚乙烯是聚乙烯经过物理或化学方法变成的,这种变化称为交联。交联方法有许多种,用过氧化物作为交联剂,在高温高压下进行化学反应的化学交联应用最广。用电子束辐射交联和硅烷交联不需施加压力,前者是靠电子射线去掉聚乙烯中部分氢原子使聚乙烯交联,硅烷交联是靠化学接枝方法使聚乙烯分子之间交联起来,这两种方法都不需加压力,不需长的硫化管,但这两种方法只适合于薄的绝缘,厚的绝缘交联不充分,故只适用于生产薄绝缘的控制电缆和1kV交联聚乙烯电缆,生产中、高压电力电缆则十分困难。

化学交联是利用过氧化物分解产生游离基与聚乙烯中的氢原子结合,这个化学反应需要加热,反应有水 and 气体生成,是一种发泡反应,需要施加压力。在压力作用下,交联聚乙烯里无宏观可见的气泡,但微观交联聚乙烯仍是微观多孔材料。湿式法交联使聚乙烯中水分含量高,微孔尺寸大。干式法交联用氮气和溶盐作为化学反应的压力介质,使用电加热或用硅油、溶盐等加热,图1-4示出了各种交联方法。研究结果表明干式法交联比湿式法交联的电缆性能好,如表1-2所

示。

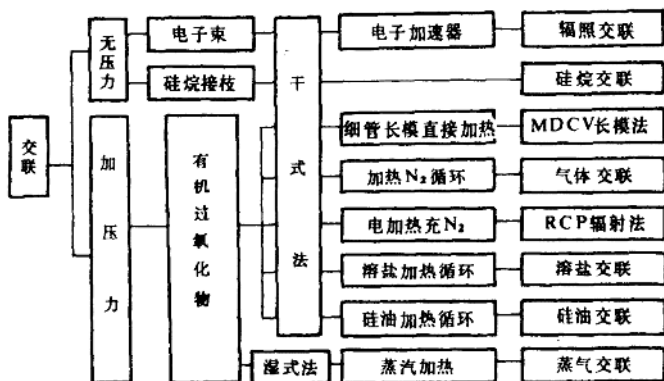


图 1-4 各种交联方法比较

表 1-2 干式法和湿式法交联电缆性能比较

交联方法	微孔数量 (个/mm <sup>2</sup> )	微孔尺寸 (mm)	水分含量 (%)	冲击击穿强度 (kV/mm)
干式法	5.5	<5	<0.01	176.4
湿式法	10 <sup>5</sup>	<20	0.13	143.8

近 20 年来国内外不少专家和学者从事交联聚乙烯电缆击穿机理的研究,普遍认为绝缘中半导体屏蔽突起、杂质、微孔和水分,是水树生成和游离放电的根源,是导致电缆击穿的主要原因,要使交联聚乙烯电缆运行可靠和应用到更高电压等级,交联制造工艺质量必须进一步提高。

### 三、现代生产线技术特点

#### 1. 干式法交联

干式法交联采用电加热,有两种加热方式。① 加热电缆



绕于硫化管外面，电能将壁加热，热量从管壁向管内传导，传导主要是辐射方式，少量是热传导方式，热量传到电缆绝缘上，使绝缘进行硫化；② 利用不锈钢管通过大电流，硫化管外包有绝缘材料，防止热量向外传导，管内充氮气作为绝缘硫化时的加压介质。干式法交联的冷却方式有两种：① 水冷却；② 氮气冷却。氮气冷却效果不如水冷却，但对降低微孔和含水量有好处。

## 2. 多层挤出

多层挤出有两种：① 双层挤出；② 三层挤出。双层挤出可以使导体屏蔽和部分绝缘同时挤出，大部分绝缘和绝缘屏蔽同时挤出；三层挤出是导体屏蔽、绝缘和绝缘屏蔽三层同时挤出。双层挤出多采用1+2式串联型式，即导体屏蔽是单层挤出，另一机头是绝缘和绝缘屏蔽双层同时挤出。这种挤出方式的优点是调整方便，可以检查和控制导体屏蔽尺寸和挤出表面质量。导体屏蔽处于电缆的最大电场强度处，屏蔽表面光滑程度和突起大小对电缆的电气性能影响最大，所以控制和调整屏蔽表面质量是十分重要的，这是1+2式串联挤出的优点。1+2式挤出的缺点是：虽然容易保证导体屏蔽挤出表面光滑，但是不能完全保证导体屏蔽进入第二个机头时表面与机头导管相摩擦，还可能产生新的突起和表面缺陷。双层挤出还有2+2式串联型式，即导体屏蔽和部分绝缘，大部分绝缘和绝缘屏蔽两个双层挤出。这种方式改善了1+2式导体屏蔽进入第二个机头时，屏蔽表面可能被摩擦的缺点，这样受到摩擦的部分绝缘表面保护了屏蔽表面。绝缘分2次挤出，即使第一部分绝缘表面受到摩擦，在挤出第二部分绝缘后，绝缘的二层在硫化过程中又会融为一体，无分界面。这种方式的缺点是导体屏蔽尺寸和表面控制较1+2式复杂些，