

第二版

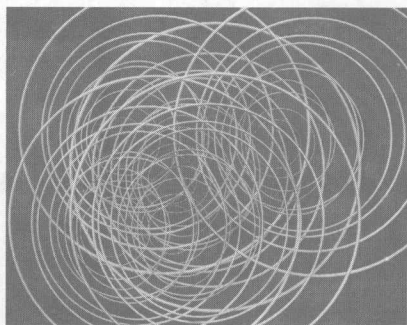
交联聚乙烯 电力电缆 线路

JIAOLIAN JUYIXI
DIANLI DIANLAN
XIANLU

江日洪 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



第二版

JIAOLIAN JUYIXI
DIANLI DIANLAN
XIANLU

交联聚乙烯 电力电缆线路

江日洪 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书对第一版内容进行了修改和完善,并结合我国电力系统建设和城市电网改造工作,介绍了交联聚乙烯(XLPE)电力电缆的特点、选用原则、电气试验标准和方法;电缆线路敷设和附件安装,以及投运后的维护、绝缘监测和电力电缆线路的防雷保护、防火措施;交流高压单芯电缆护套感应电压和环流计算等问题。

本书主要供电力系统和电缆生产厂家技术人员学习使用,也可作为大专院校有关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

交联聚乙烯电力电缆线路/江日洪编. —2版. —北京:中国电力出版社,2009

ISBN 978-7-5083-8288-3

I. 交… II. 江… III. 交联聚乙烯-电力电缆-输配电线路
IV. TM247

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第210578号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997年11月第一版

2009年4月第二版 2009年4月北京第四次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 9.125印张 237千字

印数 7921—10920册 定价 20.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

20 世纪 70 年代以来,我国在交联聚乙烯电力电缆的生产和应用方面得到了迅速地发展。交联聚乙烯电力电缆已基本取代了常规的油纸绝缘电缆,其主要原因是:交联聚乙烯电力电缆质量轻,制造工艺较简单,安装敷设容易,且不受落差限制,可减少施工费用,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。至今,我国已先后研制成功 1, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 35, 66, 110, 220kV 交联聚乙烯电力电缆,并能进行批量生产。加上从国外引进的产品(主要是 220、500kV 级产品),极大地促进了我国的电力系统建设和城网改造工作。2007 年 2 月 3 日由国网武汉高压研究院主办的“全国 500kV 交联电缆应用技术研讨会”在武汉胜利召开,标志着我国第一个城市电网用 500kV 交联电缆系统应用项目取得了突破性进展,并进入实质性实施阶段,使我国成为继日本后,第二个将 500kV 交联电缆系统大规模应用于城市电网的国家。

为满足国内电力部门有关技术人员工作学习的需要,我们根据调研和多年来的教学和科研成果,于 1997 年编写了本书第一版。由于该书内容较为切合读者实际工作的需要,为同行建立起了一个交流的平台。当然,这一成绩和国内有关单位和专家的关心和支持是分不开的,如上海供电局电缆工程公司李霞娟高工,沈阳电缆厂滕维钧高工,广州供电局陈立护工程师以及北京电力公司杨书全高工等,在此再次向他们表示感谢。

鉴于该书出版距今已有 10 年,书中有些内容需参照

GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》和电力电缆生产技术的发展进行修改再版。在此需要说明的是，由于受某些条件的限制，除保留的原始章节外，其余章节均由武汉大学电气工程学院江日洪教授统一修改定稿。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2008年12月于广州

前言

第一章 交联聚乙烯电力电缆概述	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.....	5
第四节 中压交联聚乙烯电力电缆的品种和结构	10
第五节 交联聚乙烯电力电缆及附件的发展	15
思考题	20
第二章 交联聚乙烯电力电缆的选用	21
第一节 交联聚乙烯电力电缆型号和选用原则	21
第二节 交联聚乙烯电力电缆线芯数和截面选择	22
第三节 交联聚乙烯电力电缆热特性和载流量的计算	30
第四节 电力电缆线路允许通过短路电流的计算	39
第五节 交联聚乙烯电力电缆金属屏蔽层截面选择	40
思考题	44
第三章 交联聚乙烯电力电缆的电气试验	45
第一节 交联聚乙烯电力电缆额定电压 U_0/U 的制定 和分类	45
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	49
第三节 交联聚乙烯电力电缆交流耐压试验设备和 试验程序	56
第四节 交联聚乙烯电力电缆线路故障定位方法	63
第五节 交联聚乙烯电力电缆局放测试技术 的现场应用	75

思考题	80
第四章 交联聚乙烯电力电缆敷设与附件选型和安装	81
第一节 交联聚乙烯电力电缆线路的敷设方式与条件	81
第二节 110kV 交联聚乙烯电力电缆的施工工艺	84
第三节 交联聚乙烯电力电缆中间接头的选型和安装	87
第四节 交联聚乙烯电力电缆终端头的选型和安装	97
第五节 110kV 交联聚乙烯电力电缆户外电缆终端 应用现状	101
思考题	105
第五章 交联聚乙烯电力电缆绝缘老化机理 及监测	106
第一节 交联聚乙烯电力电缆绝缘老化机理	106
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	107
第三节 水树老化的判断方法和离线监测	113
第四节 交联聚乙烯电力电缆绝缘在线监测	119
第五节 110/220kV 交联聚乙烯电力电缆 在线监测法的评估	129
思考题	135
第六章 电力电缆线路的过电压保护	136
第一节 电力电缆绝缘冲击电压水平的选择	136
第二节 电力电缆线路的冲击特性长度和绝缘配合	137
第三节 电缆—GIS 系统避雷器保护范围的计算	147
第四节 电力电缆线路上的限流电抗器及过电压保护	155
第五节 220kV 长电缆线路过电压保护计算实例	160
思考题	164
第七章 高压单芯电缆护层过电压保护及金属护套 环流计算	165
第一节 冲击电压作用下的护层过电压	166

第二节	金属护套工频感应电压的计算·····	176
第三节	电缆护层保护的接线方式·····	191
第四节	电缆护层保护器的技术要求及其设计·····	194
第五节	电缆金属护套环流分析及计算实例·····	200
	思考题·····	209
第八章	交联聚乙烯电力电缆线路的防火与阻燃措施·····	210
第一节	国内外电缆火灾事故分析·····	210
第二节	电缆防火阻燃措施现状及存在问题·····	212
第三节	防止电缆着火延燃的措施·····	214
第四节	电缆防火材料的选择和应用·····	219
第五节	配网隧道电缆的防火·····	223
	思考题·····	226
第九章	电力系统中的控制电缆和导引电缆·····	228
第一节	1kV 及以下全塑电缆的正确使用 ·····	228
第二节	电力电缆对同沟敷设导引电缆的影响及防护 措施·····	233
第三节	控制电缆的使用条件、线芯数及截面选择·····	237
第四节	控制电缆的事故分析及保护措施·····	241
	思考题·····	249
附录 A	交联聚乙烯电力电缆结构尺寸及电气 性能 (供参考) ·····	250
附录 B	电缆线路参数的测量方法 ·····	263
附录 C	电力电缆直埋敷设有关系数规定 ·····	275
附录 D	交流系统单芯电缆金属护套正常感应 电压计算·····	278
	参考文献·····	280

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;而随着城市用电量剧增,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,电力电缆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) 黏性浸渍纸绝缘型(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。在各电缆线芯外包有统包绝缘,并置于同一内护套内。

(2) 分相型。分相屏蔽,一般用在10~35kV电缆中,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) 黏性浸渍纸绝缘电缆。该种电缆开发较早,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。该种电缆的缺点是油易滴流,不宜作高落差敷设;允许工作场强较低,不宜在太高电压下使用。

(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;工作寿命较黏性浸渍纸绝缘电缆更长;有较高的绝缘稳定性,但成本较黏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 $\tan\delta$ 小, 绝缘电阻高; 工艺性能好, 易于加工, 耐湿性好, 比重小。但该类电缆抗电晕及耐热性能较差, 受热易变形或开裂, 因而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 $\tan\delta$ 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, 绝缘材料主要是天然橡胶加不同的添加剂组成的各种橡胶。该类电缆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 及以下电压等级的电缆。

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, 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射法, 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, 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。

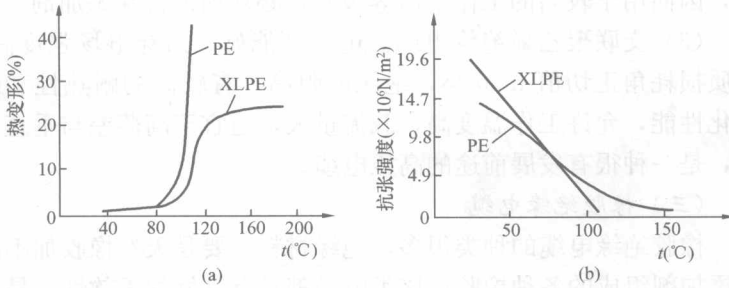


图 1-1 交联聚乙烯电缆热变形、抗张强度与温度的关系

(a) 热变形与温度; (b) 抗张强度与温度

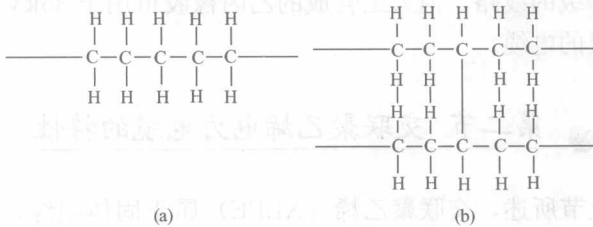


图 1-2 交联聚乙烯电缆分子结构

(a) PE 电缆; (b) XLPE 电缆

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,敷设落差无限,运行可靠,质量轻,安装、维护简单和输电损耗小等优点。由于其耐热性和机械性能好,传输容量大,所以不仅适用于中低压系统,还可以应用到高压和超高压系统中。表 1-1 列出了交联聚乙烯与其他绝缘材料的性能对比,也充分地证明了交联聚乙烯是一种优良的绝缘材料。所以交联聚乙烯绝缘电缆不仅能在中低压范围内代替传统的油纸绝缘电缆,而且也能在高压或超高压等级上与自容式充油电缆竞争。

表 1-1 交联聚乙烯与其他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
	介质损耗角正切值 (20℃、50Hz)		0.000 5	0.000 5	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 ²	18	14	18	9.5	—
	伸长率	%	600	700	250	850	—
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。

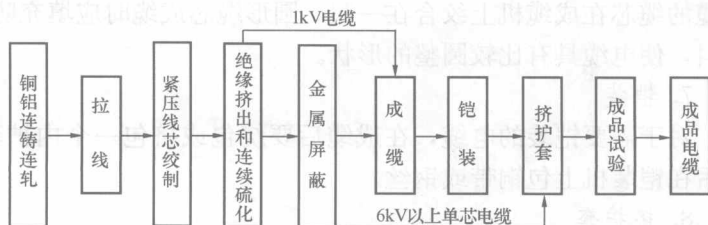


图 1-3 交联聚乙烯电力电缆的生产工艺过程

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,分铜连轧和铝连轧两种。

2. 拉线

对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,再对达到所需直径的铜、铝单线进行退火处理。

3. 紧压线芯绞制

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: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;扇形结构则应先成缆,将三相的三根缆芯绞合在一起,然后加一统包的金属屏蔽,可以是铜带或者铜线。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

无论交联聚乙烯电缆是单芯还是多芯,有铠装还是无铠装,

其外护层都是用塑料挤出机挤包的聚氯乙烯 (PVC) 或聚乙烯 (PE) 护套。

9. 成品试验

电缆在生产过程中的各道工序都有质量控制。制成完整的产品后,需要对产品的结构尺寸、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,其中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。这两种方法都不需施加压力,不需长的硫化管,但这两种方法只适合于薄的绝缘,厚的绝缘交联时易不充分,故只适用于生产薄绝缘的控制电缆和 1kV 交联聚乙烯电缆,用于生产中、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,反应过程中有水 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,但微观下仍是多孔材料。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 所示为各种交联方法。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。

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 ²)	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 ⁵	<20	<0.13	143.8

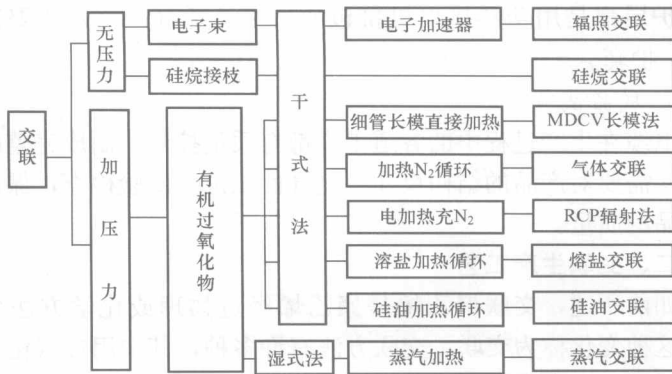


图 1-4 各种交联方法

近 30 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的电压等级中, 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, 电能将管壁加热, 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, 对绝缘进行硫化; 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 3 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; 3 层挤出是导体屏蔽、绝缘和绝缘屏蔽 3 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式挤出在导体屏蔽进入第二个机头时,屏蔽表面可能被摩擦的缺点,利用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,操作难些,更需要注意的是两个绝缘层之间的清洁,要求操作车间环境特别清洁,否则需要两机头中间采取有局部净化防尘措施。通常采用使空气过滤器净化过的空气进入一个防护罩的方法,使防护罩的内部压力大于周围环境,环境空气不与电缆相接触,达到第一层绝缘表面清洁,不受周围环境污染。

3层挤出是导体屏蔽、绝缘和绝缘屏蔽3层所用的材料通过3个挤出机同时挤到1个机头,3种材料在机头内依次挤包到导体上。挤出机头构造很复杂,3种材料分3个层次,机头较大。这种操作方式难度大,对导体屏蔽和绝缘的尺寸控制困难,要求挤出机精度高,操作人员技术水平高。3层同时挤出可以保证导体屏蔽表面光滑,突起小,导体屏蔽、绝缘和绝缘屏蔽3层配合紧密,分界面上光滑、突起少,达到提高电缆电气性能的作用。

3. 具有双盘收放线装置导体储线设备

适应大批量连续生产,既能保证电缆质量又能减少废品,可降低原材料消耗,使电缆成本降低。