

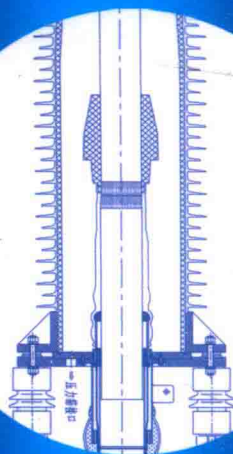
挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书

JIBAO JUEYUAN ZHILIU DIANLI DIANLAN JISHU YU YINGYONG CONGSHU

产品制造与试验分册

主 编 毛庆传

副主编 朱永华 彭向阳



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书

JIBAO JUEYUAN ZHILIU DIANLI DIANLAN JISHU YU YINGYONG CONGSHU

产品制造与试验分册

主 编 毛庆传

副主编 朱永华 彭向阳



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

高压直流电力电缆作为柔性直流输电的关键设备,在输电可靠性方面扮演了重要角色。随着挤包绝缘直流电力电缆的出现,它所具有的体积小、重量轻、可靠性高以及免维护等优点更加凸显。为满足我国电网发展的需要,提升高压直流电力电缆设计制造及工程应用水平,特编写了《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书》。

本书为《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书 产品制造与试验分册》,共分5章,主要内容涵盖了挤包绝缘直流电力电缆综述、高压直流电力电缆材料生产与使用、挤包绝缘高压直流电力电缆制造、挤包绝缘高压直流电力电缆附件制造与挤包绝缘高压直流电力电缆及附件的试验,附录部分介绍了国内几家重要的挤包绝缘高压直流电力电缆与附件的研究试验机构和制造企业。全书主要总结了国内近些年来在交联聚乙烯绝缘高压直流电力电缆及附件的生产制造及检测试验技术领域的最新成果,理论结合实际,实用性较强。

本书可供从事高压直流电力电缆与附件的制造、试验、工程设计与建设的广大技术人员使用,也可供中高等专业院校师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书. 产品制造与试验分册/毛庆传主编. —北京:中国电力出版社,2015.10

ISBN 978-7-5123-6703-6

I. ①挤… II. ①毛… III. ①直流电路-绝缘电缆-生产工艺②直流电路-绝缘电缆-实验 IV. ①TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 064333 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年10月第一版 2015年10月北京第一次印刷

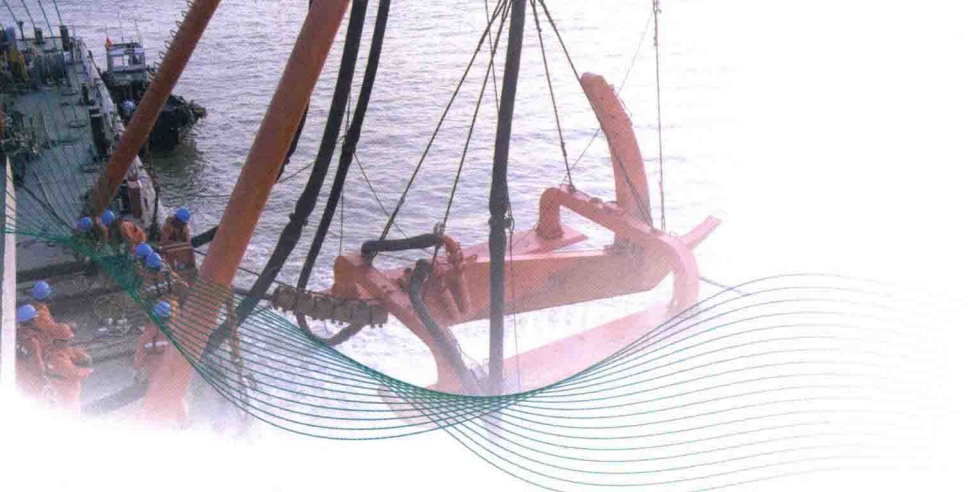
787毫米×1092毫米 开本 6.25印张 136千字

定价 38.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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



《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书》
产品制造与试验分册

编 委 会

主 编 毛庆传

副 主 编 朱永华 彭向阳

参编人员 吴长顺 谢书鸿 徐晓峰 张 荣

胡 明 潘文林 杨娟娟 于达华

张 峰 杨世哲

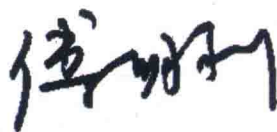
序 言

自 20 世纪 80 年代,塑料挤出绝缘(如交联聚乙烯)交流电力电缆技术得到了快速发展和广泛应用,到目前已有诸多 500kV 的交联聚乙烯绝缘交流电缆投入运行。然而在高压直流电缆中采用相同的绝缘材料时,其技术问题与挑战远远超过交流电缆的情况。

首先在交流应用场合,电场分布由绝缘结构中各处的电容决定,而绝缘材料的电容率(介电常数)在电气工程应用中所处的温度和电场范围几乎是个常数。因此同轴电缆绝缘中的电场分布只是由电缆的几何结构和尺寸决定,出现内高外低的分布,且不受运行负荷和环境的影响。而在直流电缆绝缘中,电场分布取决于结构中的直流电阻分布,也即材料特定位置的电阻率,而绝缘材料的电阻率又是温度和所处场强的函数。在正常运行工况下,由于绝缘材料特定的导热率,在绝缘层中势必形成内高外低的温度分布,这一温度梯度通过材料电阻率影响直流电场分布。这种由温度梯度、电场分布到材料性能再到电场分布的多物理场耦合关系,使得直流电缆绝缘中的电场设计与选取变得异常复杂和困难。其次,伴随聚合物材料优良的绝缘性能而来的矛盾是在直流电压作用下材料中空间电荷的聚集与迁移。绝缘结构中的空间电荷将改变局部电场的分布,极端情况的电场增加可能引起材料局部的加速老化甚至击穿。由于材料中空间电荷的相对稳定特性,使塑料挤出绝缘直流电缆在运用到传统高压直流输电系统的极性反转运行工况时存在更大的风险。另外,相较于交流系统,人们对聚合物材料在直流电压下的绝缘特性、老化特性、绝缘缺陷的产生与发展一直到绝缘失效机理研究十分欠缺,以至于目前在世界范围内依然缺少科学且有效的直流电缆试验考核与评价手段。而作为快速增长的电网资产以及考虑直流电缆未来将大量运用于海底输电和联网,如何保证安全可靠的敷设施工和现场试验,以避免未来巨大的运行维护与检

修成本，也是电网建设与运行管理者必须进行的技术准备。

针对上述塑料挤出绝缘高压直流电缆所面临的技术困难，国内外学术与工程应用界展开了将近 30 年持续且细致的研究，在空间电荷测量与评价、利用高纯净或纳米添加材料抑制空间电荷以及电缆制造工艺控制等技术领域取得了一系列突破性成果。意大利学者 Giovanni Mazzanti 和 Massimo Marzinotto 对上述研究成果进行了系统总结并在 2013 年编辑出版了首部有关挤出绝缘的高压直流电缆专著 *Extruded Cables for High Voltage Direct Current Transmission*。而在一年后的今天，我十分荣幸地被《挤包绝缘直流电力电缆技术与应用丛书》的几位作者邀请阅读该三卷丛书的书稿，欣喜地注意到该书基于介绍国内近年来 $\pm 160\text{kV}$ 和 $\pm 200\text{kV}$ 交联聚乙烯绝缘高压直流电缆研发和柔性直流输电工程应用，系统论述了挤包绝缘高压直流电缆从材料基础性能、空间电荷测量与抑制、电缆本体及附件结构设计、制造工艺和试验直到最后工程应用中的敷设、施工等各环节的技术问题与研究成果。这部及时且内容丰富的中文丛书，可以作为从事高压直流电技术、直流电缆生产和相关技术研究以及工程应用等研究人员与工程师的参考书籍。我也毫无疑问地相信该丛书将为提升我国高压挤出绝缘直流电缆的制造和工程应用水平发挥应有的作用。在此，我不仅要恭喜该部丛书的出版，更要感谢丛书编著者及时且卓有成效的工作。



中央“千人计划”专家
南方电网高级技术专家
2015 年 4 月

前言

在本书中,挤包绝缘直流电力电缆主要指交联聚乙烯绝缘高压直流电缆,该领域的技术研究及产品应用在发达国家取得突破性技术进展还不到20年,在我国也是近10年内开始,尚处于初期阶段。随着市场需求的迅猛发展,特别是以风力发电为代表的电力输送工程建设的快速推进,极大促进了我国电缆及附件的设计制造、试验检测等技术的发展。同时随着高压直流电缆及附件的生产设备和检测试验条件的不断完善,我国完成了南方电网广东南澳±160kV柔性直流输电示范工程和国家电网浙江舟山±200kV多端柔性直流输电示范工程建设所需的电缆与附件的生产、制造及相关的各项试验研究,为工程建设做出了贡献,也为我国建设更高电压等级的±320kV柔性直流输电工程创造了有利条件。目前,国内已有三家电缆制造企业试制的±320kV直流电缆及其配套的附件在国家电线电缆质量监督检验中心通过了型式试验。

为了记录这些研究、制造及试验技术与成果,特编写本书。本书在编写过程中,得到了上海电缆研究所、国家电线电缆质量监督检验中心、广东电网有限责任公司电力科学研究院以及江苏中天科技海缆有限公司、江苏亨通高压电缆有限公司、上海三原电缆附件有限公司、北欧化工公司等科研、检测机构及制造企业的大力支持,特别是上海电缆研究所及国家电线电缆质量监督检验中心提供了研究及试验现场照片,江苏中天科技海缆有限公司、江苏亨通高压电缆有限公司及上海三原电缆附件有限公司提供了大部分的生产装备照片,书中未注明出处的照片均为这些机构和企业提供。在此,对以上单位给予的大力支持表示衷心感谢,同时对为本书编写工作做出贡献的相关人员致以诚挚谢意。

为了体现这些研究及检测机构和制造企业在高压直流电力电缆技术领域中做出的贡献,特在本书附录中介绍这些机构及企业在该技术领域中的能力,供读者参考。

本书主要包括挤包绝缘直流电力电缆综述、高压直流电力电缆材料生产与使用、挤包绝缘高压直流电力电缆制造、挤包绝缘高压直流电力电缆附件制造、挤包绝缘高压直流电力电缆及附件的试验。由于是首次编写挤包绝缘高压直流电缆的专业性技术书籍，经验不足，时间仓促，加之一些技术尚在研究中，难免存在疏漏、不足之处，敬请读者批评指正。

编者

2015年4月

目 录

序 言 前 言

第1章	挤包绝缘直流电力电缆综述	1
1.1	直流电力电缆产品类型	1
1.2	挤包绝缘高压直流电力电缆制造与试验技术概述	4
第2章	高压直流电力电缆材料生产与使用	8
2.1	高压直流绝缘材料的生产	10
2.2	高压直流半导体屏蔽材料的生产	11
2.3	高压直流电力电缆材料的检测	12
2.4	高压直流电力电缆材料的包装与使用	14
第3章	挤包绝缘高压直流电力电缆制造	16
3.1	直流电力电缆制造基本工艺流程简介	16
3.2	导体制造	17
3.3	交联聚乙烯绝缘挤出	21
3.4	金属屏蔽	27
3.5	非金属护套	30
3.6	成缆及光电单元复合工艺	33
3.7	海底电缆的铠装与外被	37
3.8	电缆的储存及运输	39
第4章	挤包绝缘高压直流电力电缆附件制造	44
4.1	直流电力电缆附件的结构设计	44
4.2	直流电力电缆附件主要材料的配方设计	51
4.3	直流电力电缆附件制造工艺	53
第5章	挤包绝缘高压直流电力电缆及附件的试验	56
5.1	试验概要	57

5.2 开发试验 57

5.3 例行试验 59

5.4 抽样试验 62

5.5 型式试验 65

5.6 预鉴定试验 73

5.7 敷设后检查及预防性试验 77

附录 1 挤包绝缘高压直流电力电缆与附件研究试验机构介绍 79

附录 2 挤包绝缘高压直流电力电缆与附件制造企业介绍 81

参考文献..... 87



第1章

挤包绝缘直流电力电缆综述

1.1 直流电力电缆产品类型

1.1.1 直流电力电缆的特点

直流电力电缆具有工作电场强度高、绝缘厚度薄、电缆外径小、重量轻、载流量大、损耗小、没有交变磁场等优点，可以避免交流电缆由于电容电流大而存在的临界长度限制，适用于长距离直流输电系统，尤其是跨越海峡的大长度输电线路。

直流输电线路造价远低于交流输电线路，但其换流站造价比交流变电站高得多。一般认为架空输电线路超过 600~800km、电缆线路超过 40~60km 时，直流输电比交流输电更为经济。高压直流电力电缆常用于海底电缆输电和交流系统同步互连等方面。

直流电缆的结构和交流电缆基本相同，主要是绝缘设计原理差异较大，需考虑空间电荷的抑制及电导率随温度变化对电场的影响等问题，设计依据依然是由电场分布决定。在相同的电缆类型、导体截面和敷设安装条件下，直流电缆比交流电缆具有更大的输电容量、更低的运行损耗，以及更长的允许的线路长度。

1.1.2 直流电力电缆的种类

高压直流电力电缆根据绝缘介质的不同可分为 4 类：黏性浸渍纸绝缘直流电缆、充气直流电缆、充油直流电缆及挤包绝缘直流电缆（也称聚合物绝缘电缆）。

黏性浸渍纸绝缘直流电缆在负荷变化条件下，最大工作电场强度可达 25kV/mm。因为不需要供油，尤其适用于长距离海底敷设。为了避免浸渍剂过分流动，这类电缆不适合大落差敷设。浸渍纸绝缘直流电缆适用于不大于 400kV 直流线路，目前只限安装于水深 500m 以内的水域。

充油直流电缆具有比黏性浸渍纸绝缘直流电缆更高的绝缘性能，允许较高的工作场强和工作温度，最大工作场强约为 45kV/mm，具有较优越的技术性能。自容式充油直流电缆适用于高达 750kV 的直流线路。由于电缆为充油式，因此其可以毫无困难地敷设于水深达 500m 以上的海域。

挤包绝缘直流电缆的绝缘介质通常采用聚乙烯或交联聚乙烯绝缘，通过在绝缘材料中添加无机填料等手段，抑制聚合物绝缘材料中空间电荷的影响及降低绝缘电导对温度的敏感程度。

目前国内外柔性直流输电系统一般采用挤包绝缘直流电缆，运行时不经受直流电压极性反转，绝缘层中的空间电荷积聚影响较轻，耐受直流电压和雷电冲击性能较高，用于柔性直流输电的挤包绝缘直流电缆可以采用较高设计电场强度，从而减小绝缘厚度，减小电缆结构尺寸和重量。

几种直流电力电缆的主要优缺点对比如表 1-1 所示。

表 1-1 几种直流电力电缆的主要优缺点对比

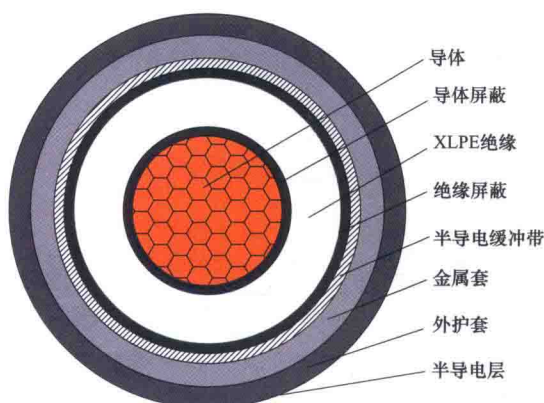
直流电力电缆类型	优点	缺点
黏性浸渍纸绝缘直流电缆	(1) 耐电强度高，介电性能稳定； (2) 热稳定性好； (3) 载流量大； (4) 价格便宜	(1) 不适于高落差敷设； (2) 制造工艺较为复杂； (3) 电缆接头制作技术比较复杂
充气直流电缆	介质强度较高	水深后供气困难，近年来已停止使用
充油直流电缆	(1) 可靠性高； (2) 运行经验丰富	(1) 敷设安装不便； (2) 设有供油系统，运行维护不便，且运行维护费用高； (3) 发生漏油事故后维修困难，易污染海洋环境
挤包绝缘直流电缆 (交联聚乙烯绝缘直流电缆)	(1) 结构简单； (2) 制造周期短； (3) 工作温度高，无油； (4) 敷设落差无限； (5) 运行可靠； (6) 安装、维护简单； (7) 输电损耗小	(1) 挂网运行经验不足； (2) 需考虑空间电荷抑制问题

1.1.3 挤包绝缘直流电力电缆

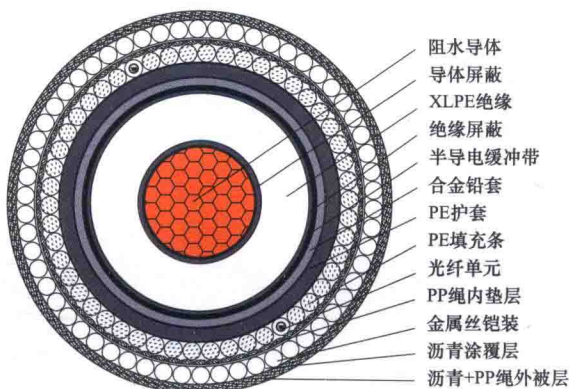
挤包绝缘直流电力电缆的研究始于 20 世纪 50 年代，20 世纪 60 年代生产了 200kV 等级的实验用聚乙烯绝缘直流电缆。在传统直流输电方式下，挤包绝缘直流电缆往往不能通过极性反转试验，使其商业应用受到阻碍。20 世纪 90 年代，一些国外公司发展了轻型直流输电技术，即采用基于可关断器件的电压源换流器（Voltage Source Converter, VSC）和脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）技术代替基于线路整流换流器（Line Commutate Converter, LCC）的电流源换流器的直流输电模式，同时，新型直流电缆用绝缘材料和屏蔽材料、直流电缆附件的成功研发，也为挤包绝缘直流电缆系统在柔性直流输电系统中的成功应用提供了保障。自 2000 年以来，国内外先后研制成功了±80kV、±150kV、±200kV 和±320kV 直流电缆系统，并已投入了应用。

典型的挤包绝缘直流陆地电缆和直流海底电缆的结构和实物如图 1-1 所示。

挤包绝缘直流电缆的结构与挤包绝缘交流电缆相似，但其绝缘长期承受直流电压。在导体结构的设计方面，对于交流电缆而言，大截面（800~2500mm²）导体由于集肤效应的存在一般采用分割导体。与交流电缆不同，直流电缆用于直流的传输，不存在集肤效应，其导体结构一般不需要采用分割导体，而采用圆形绞合或型线绞合导体。目前直流电缆应用较多的是长距离的海底直流电缆，考虑到直流海底电缆的特殊运行环境和导体阻水的性能要求，不采用分割导体将更加有利于导体阻水性能的实现。此外，直流电缆的金属护套和铠装层上不会有感应电压，不存在护套损耗问题，直流电缆的护套结构



(a)



(b)

图 1-1 挤包绝缘直流电缆的结构和实物图

(a) 挤包绝缘直流陆地电缆的结构和实物图；(b) 挤包绝缘直流海底电缆的结构和实物图

主要考虑机械保护和防腐蚀。

挤包绝缘直流海底电缆的敷设环境与直流陆地电缆不同，对结构也有不同的性能要求。除了导体要求良好的水密性和金属套下的水密性能方面以外，为提高其防腐蚀能力和机械强度，直流海底电缆会采用铅护套、较强的覆盖层及混合着沥青的铠装（如粗圆钢丝铠装）等，而直流陆地电缆一般采用皱纹铝护套或金属屏蔽结构，除特殊环境外，一般不用铠装；直流海底电力电缆在电气方面的技术参数和普通电力电缆相同，主要考虑提供电缆敷设时的海底通道状况及海面环境状况。海底电缆由于敷设在海底，水温低且散热好，故其载流量较大；大长度的海底电力电缆还要考虑电缆中间接头技术是否可靠（特别是发生意外损坏或本体故障时）。

挤包绝缘海底直流电力电缆主要敷设于陆岛之间、岛屿之间、跨越江河或港湾，此外还用于从陆上连接钻井平台或钻井平台间的互相连接等。在一般情况下，应用直流海底电缆传输电能往往比用小而孤立的发电站做地区性发电更经济，在近海地区应用优点更多，在岛屿和河流较多的地区应用较广泛。

1.2 挤包绝缘高压直流电力电缆制造与试验技术概述

1.2.1 挤包绝缘高压直流电力电缆制造技术

1.2.1.1 挤包绝缘高压直流电力电缆材料

高压电缆的绝缘为内外导体表面间极高的电势差提供了有效屏障。绝缘必须具有优良的电气性能、耐热性和抗老化性能等特性,绝缘系统做到尽可能的绝对纯净和均质是至关重要的。对于直流电场下的绝缘系统整体而言,必须具备极低的空间电荷积聚、受控的电导率及较高的直流和冲击击穿强度,才能使成品电缆可能具有长时间的使用寿命及可靠运行。

交联聚乙烯(XLPE)是指通过交联工艺,使低密度聚乙烯的长分子链形成三维网状。其交联过程是不可逆的,防止了聚合物在高温下熔融。热塑性聚乙烯在加热到 $80\sim 110^{\circ}\text{C}$ 时会发生软化,并最终熔融,熔点高低取决于其密度。与之相反,交联聚乙烯在相当高的温度下保持稳定,在超过 300°C 时发生分解,而不会融化。

在直流电场下,交联聚乙烯绝缘层由于其内部存在空间电荷积累而导致局部电场畸变,这一现象曾长期限制交联聚乙烯材料在高压直流电缆中的应用。为获得能可靠运行的交联聚乙烯绝缘高压直流电缆,关键是消除绝缘材料中的空间电荷,可以通过偶极子定向极化的无机填料抑制空间电荷,或采用导电无机填料吸附载流子,降低空间电荷。同时,人们发现通过控制交联副产物的含量,可以有效地改善交联聚乙烯绝缘的电导率及空间电荷的积聚。20世纪90年代,各国研究者对此进行了多方的探索,通过不同的方式研发了高压直流聚合物材料,部分材料已成功地应用到高压直流电缆系统。

半导体屏蔽层用作导体和绝缘的屏蔽层,用来均匀绝缘层的电场。这类材料含有特殊工程等级的导电炭黑材料,以使电缆的屏蔽层在运行条件下获得稳定的电导率。在高压直流电缆应用中,经过特殊设计,以非极性高分子和乙炔炭黑为原料的半导体屏蔽层产品极为光滑,为导体和绝缘/屏蔽层提供了平整表面,减小了电应力;同时,与直流绝缘材料配合使用把空间电荷积聚降到最低程度。

1.2.1.2 高压直流电力电缆制造

高压直流电缆的制造过程和工序与一般高压电力电缆基本类似。

高压直流海底电缆通常是大长度电缆,一般每根有几十千米。要制造一根无接头的导体及几十千米无接头的连续电缆必须采用软接头。利用软接头工艺可以将较短的电缆接续成大长度电缆,而接头部分的电缆外径与原来的电缆外径基本相等。我国在制造大长度交流海底电缆的过程中,已采用了这种先进的软接头工艺。此外,在大长度海底电缆制造过程中,半成品和成品都不是绕在电缆盘上的,而是盘绕在一个巨大的电缆舱中。电缆制造完毕后,将电缆从电缆舱中牵出来,经过一系列导轮引到船上并盘绕到托盘上。当船开到目的地,敷设电缆时,将其从船上拖下水,敷设船一面沿电缆线路路径行驶,一面将电缆敷设到海底。

除挤包绝缘高压直流电缆外,常规高压直流输电还采用油浸纸绝缘直流电缆作为系

统的输电线路，油浸纸绝缘直流电缆的应用经验丰富，产品可靠性较高。油浸纸绝缘直流电缆与聚合物绝缘直流电缆结构形式相近，但在绝缘结构、绝缘材料及生产工艺上有较大区别。典型的油浸纸绝缘直流海底电缆生产工艺流程如图 1-2 所示。

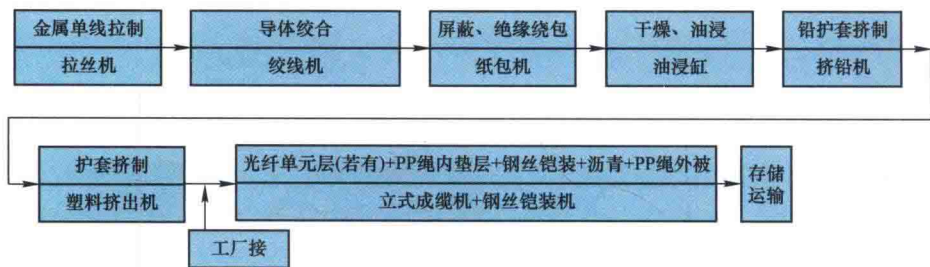


图 1-2 油浸纸绝缘直流海底电缆生产工艺流程

油浸纸绝缘直流电缆存在传输电流小、不适宜海底大落差敷设、漏油不环保等缺陷，而聚合物绝缘直流电缆的电气性能优越，运行温度高，对周围环境不会造成大的影响，逐步成为柔性直流输电工程的主要输电载体。

1.2.1.3 高压直流电缆附件

直流电缆的终端和接头统称为电缆附件。终端安装在电缆线路的末端，起到密封电缆、改善电缆末端电场分布的作用，以方便与其他输变电设备连接。

接头安装在电缆之间，具有一定的绝缘性能和密封性能，用于连通两根及以上电缆。

(1) 直流电缆终端。现有的直流输电线路中使用的大都是敞开式终端，电缆终端在结构上一般由以下几部分组成：内绝缘（改善电缆终端电场分布，通常采用预制式橡胶应力锥）、内外绝缘的隔离层（也称外绝缘，一般由瓷套或复合套管组成）、出线杆（导体引出，可以与架空线或其他电气设备相连）、密封结构、屏蔽罩、固定金具等。

敞开式终端按照所采用的外绝缘套管可以分为两大类：

1) 瓷套管式和复合套管式。瓷套采用高强度的无机材料电瓷制成，具有良好的耐候性、抗漏痕、耐电蚀能力和憎水性能，这种绝缘结构运行经验丰富。然而它的缺点也是显而易见的，笨重、易碎、耐污性差，在污秽条件下易闪络，需要经常清洁；发生故障时，可能发生爆炸，造成人员和设备伤害。

2) 复合套通常采用硅橡胶材料，重量轻，同等额定电压下只有瓷套的 40%，有利于安装施工及装卸运输；具有良好的耐污性、防紫外线及抗老化性；硅橡胶具有憎水性，即使表面污染严重，也可以用水和软性的洗涤剂清洗；发生故障时，降低了人员伤害的可能性。复合套管由于采用有机复合材料，其热老化引起的长期物理性能比瓷套差。

因此，电缆户外终端外绝缘采用瓷套或复合套管各有优缺点。在大城市等人口和设备密集的地区，硅橡胶复合套管的防爆性凸显了重要性；相反，在一些气候条件恶劣的地区，选用瓷套更为合适。

(2) 直流电缆接头。直流电缆接头按照用途可分为工厂（软）接头、整体预制式接头、抢修接头和过渡接头等，本书主要介绍整体预制式接头。

整体预制式接头是高压直流电缆接头的主要品种，具有体积小、安装时间短、产品质量稳定、能在工厂内进行例行试验等优点。整体预制式接头的主要部件是橡胶预制件，电气绝缘结构与交流电缆接头类似，但是绝缘材料不同于交流产品。直流电缆接头的绝

缘材料需经过专门设计，应提高其电气性能、物理性能和老化性能并能，抑制材料内部的空间电荷的积累等；同时应使绝缘材料的电导特性与直流电缆绝缘层的电导特性相匹配，以满足运行需要。橡胶预制件一般为多种规格系列产品，使用时应根据电缆绝缘外径选择合适的产品，使橡胶预制件与电缆绝缘之间为过盈配合，以确保足够的界面压力。

1.2.2 挤包绝缘高压直流电力电缆试验技术

挤包绝缘直流电缆的试验技术与交流电缆相比差异较大。对于挤包绝缘交流电缆，已有成熟的国际标准、各国的国家标准、试验方法和相应评价体系，有多年的运行经验；而在挤包绝缘直流电缆的设计、制造和性能评估方面尚存在许多不确定因素，且仅有十余年的运行经验。目前世界各国大多采用国际大电网提出的挤包绝缘直流电缆试验规范进行相关方面的研究和摸索。除了与挤包绝缘交流电缆有相同的常规检测项目外，还应结合直流电缆的绝缘层在直流下的电场分布特性和直流电缆的运行方式来综合考虑挤包绝缘直流电缆试验的特殊性，从而形成了不同于交流电缆的独特的、不同的评价体系。

1.2.2.1 直流电力电缆的电场分布特性

直流电缆的绝缘层的电场强度与绝缘层的电导密切相关，而绝缘层的电导随温度和电场的变化而显著变化，绝缘层各处的电场强度也会随之变化。此外，在直流电场下，聚合物绝缘内部容易形成空间电荷，将进一步畸变局部电场分布。因此，直流电缆的电场分布相比交流电缆要复杂得多。

如不考虑空间电荷的影响，在稳态条件下，直流电缆的绝缘中的任意一点 r 处的电场强度可表示为

$$E = \frac{U\beta r^{\beta-1}}{(R^\beta - r_c^\beta)} \tag{1-1}$$

式中 U ——电缆绝缘外施电压，kV；
 β ——线芯与护套间温差的函数；
 r ——绝缘任意一点处的半径，mm；
 R ——绝缘层半径，mm；
 r_c ——导体半径，mm。

当电缆空载时，相当于 $\beta=0$ ，直流电缆导体处电场强度最高，即 E 最大；绝缘屏蔽处绝缘层表面 E 最小。

当电缆带负荷时，电缆中 E 与 β 有关：

当 $\beta<1$ 时， E 随 r 增加而减小；

当 $\beta=1$ 时， E 均匀分布，相当于平板电容器；

当 $\beta>1$ 时， E 随 r 增加而增加，最大 E 可能出现在绝缘层表面。

由此，直流电缆绝缘层的电场强度将随运行时实际负荷的变化而变化，在试验设计时应充分考虑绝缘层内电应力的变化与长期可靠运行的关系。同时，聚合物绝缘层因空间电荷的积累效应，其局部电场强度会有所增加，在试验设计时同样要考虑不同电场和温度下的电缆绝缘的电导的变化和空间电荷的分布情况，以验证绝缘各处场强是否超出设计值。

1.2.2.2 直流电力电缆的运行特点

用于传统直流输电（LCC）的直流电缆在运行过程中有时为了改变电能传输方向，需要改变电缆极性。在极性变换的瞬间（几百毫秒），电缆绝缘层中的电场随时间而变化，改变极性输电时的极性叠加会使直流电缆绝缘内部的电场分布发生变化，在绝缘层中产生较高的电场梯度，极易击穿电缆，该类直流电缆在试验设计时应充分考虑极性反转时对电缆电气性能的影响。

此外，在运行过程中，直流电缆不可避免地存在不同极性的雷电过电压和操作过电压的侵袭，极大地影响直流电缆的绝缘水平。与交流电缆不同，直流电缆在试验设计时应考虑实际运行的各种可能性，进行不同极性的雷电冲击叠加运行直流电压及不同极性的操作过电压叠加运行直流电压联合试验的验证工作。

1.2.2.3 直流海底电力电缆的特性与试验

直流海底电缆适用于海底、石油平台等水下环境的敷设，与直流陆地电缆相比，除了具备输送电能的基本性能外，还能承受较大的机械外力作用，如拉力、压力、冲击力等，还应满足海洋水密环境等特殊性能要求，需根据不同工程需求，进行相应模拟试验。

本书第5章中将根据最新国际规范，结合国内研究、生产及工程需求，分别对开发试验、例行试验、抽样试验、型式试验、预鉴定试验以及敷设后检查及预防性试验加以详细介绍。