

高压直流挤包绝缘海陆复合电缆 温度场及空间电荷分析

黄烜城¹, 封建宝¹, 吴木木¹, 闫志雨², 张洪亮², 雷志城¹

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 中天科技海缆有限公司, 江苏 南通 226000)

摘要: 高压直流电缆运行过程中会在绝缘层内产生空间电荷, 导致电场畸变, 甚至绝缘击穿。为了研究电缆实际运行中空间电荷的影响, 本研究利用有限元仿真获得了高压直流海陆复合电缆在额定电流、最大稳态电流和短时过载电流情况下的温度场。根据仿真结果, 在空间电荷测试中分别设置 10、20、40℃ 的温度差, 分别模拟 400 kV 高压直流电缆在不同工作条件下的温度场。结果表明: 在额定电流下 XLPE 绝缘层两侧温度差为 8.1℃; 最大稳态电流下 XLPE 绝缘层两侧温度差为 18.7℃; 短时过载 1 h 情况下, XLPE 绝缘层两侧温度差为 61.1℃; 短时过载 36 h 情况下, XLPE 绝缘层两侧温度差为 41.1℃。实验结果显示温度梯度会使 XLPE 阳极低温侧产生异极性电荷积聚, 使电场发生畸变。通过对畸变电场进行校正计算, 发现最大电场畸变率随平均场强呈线性关系。随着温度梯度的增加, 电场畸变率也在增大。在温度梯度 40℃ 和外施场强 50 kV/mm 下, 最大电场畸变率为 1.68。

关键词: 高压直流电缆; 温度场; 空间电荷; 畸变电场

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1009-9239(2022)02-0118-10

DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.02.017

Analysis on Temperature Field and Space Charge of High-voltage DC Extruded Insulated Submarine-land Composite Cable

HUANG Xuancheng¹, FENG Jianbao¹, WU Mumu¹, YAN Zhiyu², ZHANG Hongliang², LEI Zhicheng¹

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. Zhongtian Technology Submarine Cables Co., Ltd., Nantong 226000, China)

Abstract: During the operation of high-voltage DC cables, space charge generates in the insulation layer, it leads to electric field distortion and even insulation breakdown. In order to study the effect of space charge in the actual operation of cable, we obtained the temperature field of high-voltage direct current submarine-land composite cable under the conditions of rated current, maximum steady-state current, and short-term overload current, respectively. According to the simulation results, the temperature difference in the space charge test was set as 10℃, 20℃, and 40℃, respectively, and then the temperature field of 400 kV high-voltage DC cable under different condition was simulated. The results show that the temperature difference between the two sides of XLPE insulation layer is 8.1℃ and 18.7℃ under rated current and the maximum steady-state current, respectively; while the temperature difference is 61.1℃ under the short-term overload for 1 hour; and that is 41.1℃ under short-term overload for 36 hours. The experimental results show that the temperature gradient enhances the accumulation of heteropolar charge at the low temperature side of positive pole of XLPE, which leads to the distortion of electric field. Through the correction computation of the electric field distortion rate, it is found that the maximum electric field distortion rate has a linear relationship with the average electric field strength. With the increase of temperature gradient, the electric field distortion rate also increases. The maximum electric field distortion rate is 1.68 under the temperature gradient of 40℃ with the applied electric field of 50 kV/mm.

Key words: high voltage DC cable; temperature field; space charge; distorted electric field

收稿日期: 2021-04-25 修回日期: 2021-05-30

作者简介: 黄烜城(1983-), 男(汉族), 江苏南京人, 高级工程师, 主要从事高压电气设备、电气性能试验及其事故处理分析的研究。

0 引言

近几年来,随着国民经济的迅速发展,我国对电能的需求也飞速增长,电网规模也日益扩大^[1-2]。我国也逐步开展了针对海上风电、潮汐能等海洋可再生能源的研究^[3-4],而海底电缆作为电能输送的载体,在海洋能源开发领域具有关键作用^[5-6]。鉴于交流输电系统存在一些难以克服的问题,特别是远距离交流输电存在同步运行稳定性的问题,柔性直流输电技术得到了充足的发展^[7-8],尤其是以交联聚乙烯(XLPE)为绝缘材料的直流电缆已经应用到多种电压等级的输电工程中。

众多研究表明,高压直流电缆在运行中会在其绝缘层中产生空间电荷,空间电荷的存在会使绝缘层内部电场发生畸变,甚至使局部场强剧增从而发生绝缘击穿^[9-10]。导体线芯发热会在绝缘层形成一个内高外低的温度梯度^[11]。温度梯度会导致绝缘层的低温侧积聚大量的异极性电荷,使低温侧的电场严重畸变,且温度梯度越大,电场畸变程度越严重,从而大幅提高绝缘层击穿的风险。WANG Y等^[12]利用逐步升压法获取了聚乙烯及其纳米复合材料在温度梯度下的老化寿命指数,发现温度梯度越大,绝缘材料的老化寿命指数越大(电场对绝缘材料电老化的影响程度越强)。因此,温度梯度越大,同等场强下,绝缘材料的电老化速率越快。结合不同温度下的电荷积聚和电场分布,发现温度梯度对绝缘材料内部电荷积聚的影响,也是影响绝缘材料电老化速率的决定性因素。由此可见,电缆中温度梯度的存在不仅能显著影响绝缘材料内部的电场分布,也能从整体上影响材料的长期电老化特性。D FABIANI等^[13]研究表明,对于MV级电缆,温度梯度效应可造成绝缘中的电场发生反转,即在电缆绝缘的外侧出现最大场强,实验中电缆外施平均场强为30 kV/mm,温度差为20℃,电荷的迁移量和注入量升高,且有大量空间电荷积聚在电缆绝缘层表面;在温度梯度下,聚合物绝缘中载流子电导从高温侧到低温侧逐渐降低,载流子积聚于低温侧,致使低温侧场强明显增强,造成绝缘提早失效。WU Kai等^[14]利用低密度聚乙烯(LDPE)片状试样在不同温度梯度下进行了系统的研究,发现LDPE在温度梯度下会在低温侧积聚大量的异极性电荷,且异极性电荷量随着温度梯度的增大而增加,引起的电场畸变也变大。在温度梯度下对电压极性反转的研究发现,对于LDPE,最大场强在电压极性反转前出现

在低温侧,而最大场强在电压反转过程中瞬间出现在高温侧。由于海缆复合电缆陆地段和海底段所处环境条件不同,在相同载流量下电缆内部运行温度范围也不同。而温度场会对绝缘材料老化速率产生显著影响,进而有可能导致海底电缆不同区段老化程度有所不同。因此有必要对海陆复合电缆陆地段和海底段的温度场分布进行详细分析。段佳冰等^[15]比较了IEC 60287:2001热路法和有限元法的误差,得出热路法与有限元法的偏差小于0.3℃。唐科等^[16]利用有限元软件分别仿真了单根电缆和三相电缆的温度场,提出了利用单根电缆温度得到三相电缆温度的方法。刘贺晨等^[17]利用有限元仿真软件建立了160 kV直流海底电缆的暂态温度场模型,对不同应急负荷情况下的电缆温度进行了仿真计算。

但现有的研究只是单一地对海底电缆某一段进行仿真^[3,18-19]。目前没有针对相同运行状态下,单根海陆复合电缆海底段和陆地段温度场的对比分析,没有根据直流海底电缆实际情况下的绝缘两侧温度梯度进行空间电荷分析,也无法获取海底段和陆地段运行过程中由于温度场不同对老化带来的影响。本研究以三峡如东1 000 MW海上柔性直流风电项目为背景,利用有限元分析软件对1 050 MV/400 kV直流挤包绝缘海陆复合电缆进行建模,结合我国江苏如东沿海地区全年气温和海水温度的变化范围,对该电缆的陆地段和海底段温度场进行仿真,得到不同区段在额定电流、最大稳态电流和短时过载电流运行状态下的绝缘两侧温度梯度,并基于仿真所获得的温度梯度设计空间电荷测量实验。在仿真所得绝缘两侧温度梯度基础上,测量直流电缆XLPE绝缘在额定电流、最大稳态电流和短时过载电流下的温度梯度的空间电荷,探讨高压直流电缆3种实际运行条件下温度梯度对XLPE绝缘内部空间电荷积聚和电场畸变的影响。

1 直流海底电缆温度场仿真

1.1 电缆及周围环境模型的建立

本研究以1 050 MW/400 kV直流挤包绝缘海陆复合电缆(DC-HYJQ41-F±400kV 1×1600+4×24B1,中天科技海缆有限公司)为研究对象,其单极性最高容量为550 MW,额定电流为1 370 A。该电缆实际结构可分为8层,如图1所示,参数如表1所示。

本研究采用的海底电缆模型如图2所示,分为3

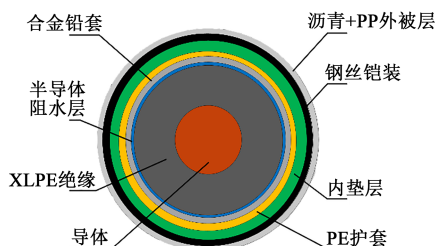


图1 直流挤包绝缘海陆复合电缆结构

Fig.1 Structure of DC extruded insulated sea-land composite cable

表1 海底电缆物理参数

Tab.1 Physical parameters of submarine cable

| 材料 | 导热系数 /(W/(m·K)) | 密度 /(kg/m ³) | 恒压热容 /(J/(kg·K)) | 近似外径 /mm |
|----------|--------------------|-----------------------------|---------------------|-------------|
| 沥青+PP外被层 | 0.22 | 1 900 | 1 500 | 160 |
| 钢丝铠装 | 50 | 7 850 | 484 | 152 |
| 内垫层 | 0.22 | 1 900 | 1 500 | 142 |
| PE护套 | 0.29 | 930 | 2 580 | 128 |
| 合金铅套 | 35.3 | 11 370 | 127.50 | 120 |
| 半导体阻水层 | 0.17 | 930 | 2 580 | 111.7 |
| 绝缘层 | 0.29 | 930 | 2 580 | 107.7 |
| 导体 | 400 | 9 000 | 383.33 | 47.6 |

个部分对海底电缆及其所处环境进行建模,图2中A段为陆地段,B段为入海段,C段为海底段。

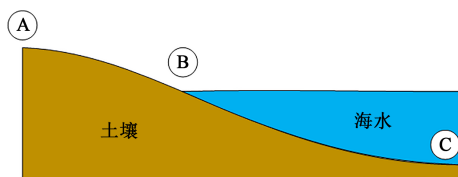


图2 海底电缆敷设环境示意图

Fig.2 Schematic diagram of submarine cable laying environment

陆地段和海底段所建模型如图3所示,根据海底电缆埋深工程施工方案,海底电缆埋在土壤深度约为1.5 m的区域。线芯与模型底端距离为3.0 m,模型两侧土壤设置为无限远域,用以仿真真实的土壤环境。入海段所建模型如图4所示,设海水热容为无限大,海水流速为1.02 m/s。仿真区域分为海底段和陆地段,两段土壤含水量不相同,导致其导热系数有所不同。陆地段土壤的导热系数为1 W/(m·K),海底段土壤的导热系数为1.9 W/(m·K)。

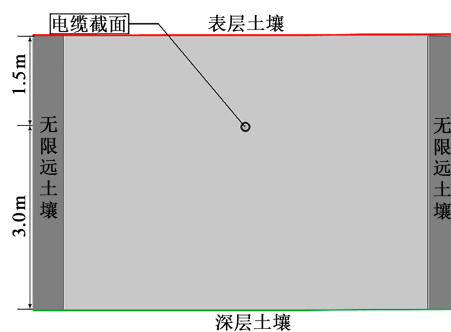


图3 陆地段和海底段电缆有限元仿真模型

Fig.3 Finite element simulation model of cable on land section and submarine section

空气的对流换热系数为6.5 W/(m²·K),海水对流换热系数为200 W/(m²·K)^[15]。由于陆地段和海底段的结构较为简单,采用二维模型进行仿真,而入海段情况较为复杂,采用三维模型进行仿真,如图4所示。

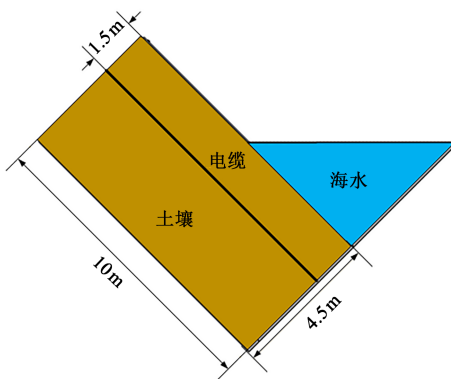


图4 入海段海底电缆模型

Fig.4 Model of submarine cable into the sea

在土壤深层,土壤温度可视为恒定不变,因此仿真模型下边界可视为第一类边界问题,温度值取为17℃。仿真模型左右边界距离电缆足够远,水平方向温差极小,引起的热流密度也非常小,因此可视为第二类边界问题,热流密度值为0。仿真模型的上边界为第三类边界问题,本研究中温度场仿真分为海陆两段,对流换热系数也不同。

1.2 直流海底电缆温度场仿真

首先针对高压直流海陆复合电缆海底段和陆地段在额定载流量、最大稳态运行载流量和短时过载3种情况下分别进行仿真分析。根据电缆实际运行情况,海底电缆额定载流量为1 370 A。仿真中只考虑导体通过电流引起的欧姆损耗,设定导体电阻率(ρ)随温度(T)变化而变化^[20],如式(1)所示。

$$\rho = (0.01724 + (T - 20) \times 0.004) \quad (1)$$

首先模拟了最高环境温度额定电流下海陆段电缆稳定运行时的温度场分布。根据我国东部沿海地区气象统计,空气温度最高可达40℃,海水温度最高为27℃,因此在仿真中以这两个最高温度作为边界条件。

最大稳态载流量可由 IEC 60287:2001 计算得到^[21]。计算得到气温为40℃时陆地段的最大稳态载流量为1 970 A,海底段27℃时的最大稳态载流量为2 377 A。取陆地段最大稳态电流进行温度场仿真,得出电缆各部分温度如表2所示。短时过载电流采用 IEC 60853:1994 进行计算得到^[22]。交联聚乙烯电缆短时过载时线芯温度不超过130℃,时间不超过100 h^[23]。计算得到气温为40℃时陆地段过载36 h的电流为2 750 A,过载1 h的电流为5 310 A;海底段27℃时过载36 h的电流为3 114 A,过载1 h的电流为4 800 A。由以上计算结果可见,在不同条件下海陆复合电缆的电流均是受陆地段的温度条件限制的,因此在后续仿真中均采用陆地段的电流值。

表2 电缆各区域温度值

| Tab.2 Temperature value of each area of the cable | | | |
|---|-----------|-------|-------|
| 项目 | 运行状态 | 陆地段 | 海底段 |
| 导体温度 $T_0/^\circ\text{C}$ | 额定电流 | 57 | 42 |
| | 最大稳态电流 | 90.3 | 65.2 |
| | 过载1 h 电流 | 130.4 | 111.2 |
| | 过载36 h 电流 | 129.5 | 110.6 |
| XLPE 绝缘 内侧温度 $T_1/^\circ\text{C}$ | 额定电流 | 55.9 | 41 |
| | 最大稳态电流 | 87.6 | 62.8 |
| | 过载1 h 电流 | 117.7 | 99.2 |
| | 过载36 h 电流 | 124.7 | 103.2 |
| XLPE 绝缘 外侧温度 $T_2/^\circ\text{C}$ | 额定电流 | 47.8 | 33.4 |
| | 最大稳态电流 | 68.9 | 45.6 |
| | 过载1 h 电流 | 56.6 | 41.7 |
| | 过载36 h 电流 | 83.6 | 63 |
| 绝缘两侧 温度差 $(T_1 - T_2)/^\circ\text{C}$ | 额定电流 | 8.1 | 7.6 |
| | 最大稳态电流 | 18.7 | 17.2 |
| | 过载1 h 电流 | 61.1 | 57.5 |
| | 过载36 h 电流 | 41.1 | 40.2 |

额定电流稳定状态下空气温度为40℃时电缆陆地段和海水温度为27℃时海底段的温度场如图5所示。

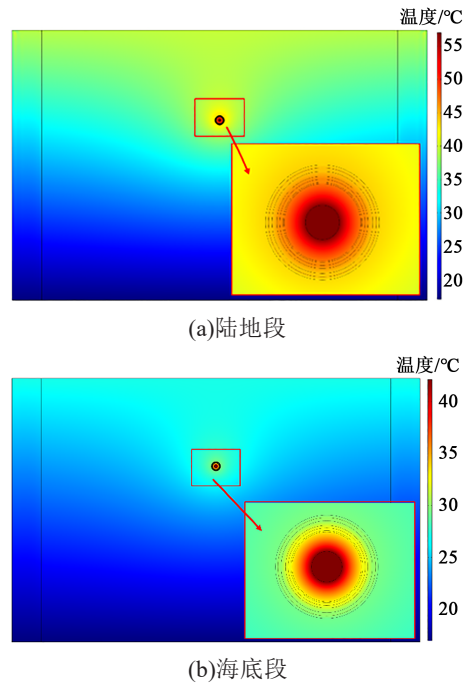


图5 额定电流稳定状态下电缆温度场

Fig.5 The temperature field of the cable under the steady state of the rated current

从图5可以看出,电缆线芯处温度最高,从线芯处由内向外,温度逐渐降低。陆地段和海底段电缆在不同电流下的温度场分布与图5所示相似,只是温度值有所不同。不同电流下计算所得的电缆各部分温度值如表2所示。从表2可以看出,在3种不同运行状态下,海底段电缆各区域温度值均低于陆地段。而短时过载情况下各区域温度值最高,最大稳态电流情况次之,在额定电流情况下电缆各区域温度相对较低。在额定电流情况下,绝缘层两侧温度差最高为8.1℃。最大稳态电流下,XLPE绝缘层两侧温度差最高为18.7℃;短时过载1 h,绝缘层两侧温度差最高为61.1℃;短时过载36 h,绝缘层两侧温度差最高为41.1℃。

入海段电缆在额定电流下的温度场分布如图6所示。从图6可以看到,额定电流1 370 A下,在海陆交界处,电缆不仅在径向方向存在温度梯度,在轴向也存在一定的温度差,入海段绝缘两侧温度差如表3所示。由表3可以看出,无论是额定电流还是短时过载电流下,入海段电缆绝缘两侧温度梯度都介于陆地段和海底段之间。

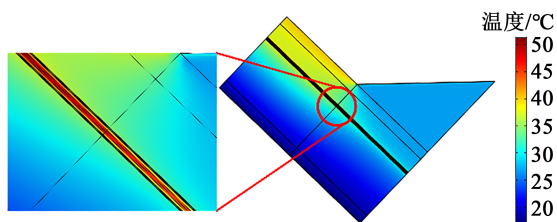


图6 额定电流下入海段温度场分布

Fig.6 Temperature field distribution in the section entering the sea under rated current

表3 电缆各部分绝缘两侧温度差 (单位: °C)

Tab.3 Temperature difference on both sides of the insulation of each part of the cable

| 运行状态 | 陆地段 | 海底段 | 入海段 |
|-----------|------|------|------|
| 额定电流 | 8.1 | 7.6 | 7.85 |
| 最大稳态电流 | 18.7 | 17.2 | 17.9 |
| 过载1 h 电流 | 61.1 | 57.5 | 60 |
| 过载36 h 电流 | 41.1 | 40.2 | 40.6 |

2 温度梯度下交联聚乙烯中空间电荷测量系统

由表3可知,高压直流海陆复合电缆陆地段在额定电流工况下的绝缘两侧温度梯度为8.1°C,最大稳态电流下的绝缘两侧温度梯度为18.7°C,短时过载1 h和36 h下的绝缘两侧温度梯度分别为61.1°C和41.1°C。陆地段的绝缘两侧温度梯度明显高于入海段和海底段,因此取陆地段额定电流温度梯度10°C、最大稳态电流温度梯度20°C和短时过载36 h温度梯度40°C的条件下进行空间电荷的测量,因为实验装置上电极最高温度不能达到90°C,所以无法实现短时过载电流1 h温度梯度60°C的情况。

采用图7所示测试系统对不同温度和温度梯度下试样中的空间电荷进行测量。该系统主要包括PEA电极系统、纳秒脉冲源(10 ns和25 ns)、高压直流发生器、示波器、高/低温恒温循环浴和计算机。样品叠加高压脉冲,电脉冲作用于空间电荷上产生电场力,在此力作用下电荷轻微移动,发出一个声脉冲向两侧传播,当声脉冲传到下电极,与下电极紧贴的压电传感器接收,并由传感器将声信号转换为电信号,再经放大器放大后,由示波器实时采集和保存数据。本研究针对温度梯度影响压力波传播特性的问题进行波形恢复^[24]并对电极介质界面处空间电荷分布进行校正等后期处理。

该电极系统引入油浴恒温循环系统,实现对上

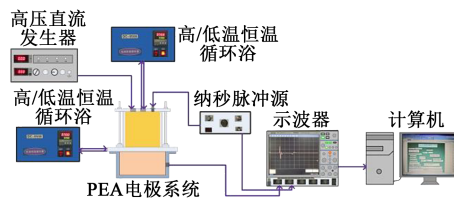


图7 适用于温度梯度下的PEA测量系统装置图

Fig.7 Device diagram of PEA measurement system suitable for temperature gradient

下电极处温度的控制,从而可以测量不同温度及温度梯度下介质中空间电荷特性,如图8所示。其中上电极为直径为10 mm的铝制圆柱体,与油浴循环系统相连,从而可以控制上电极的温度。下电极与油浴循环系统相连,采用中空的铝制平板电极,通过设定循环浴的温度,从而实现温度可控,使上下电极保持不同温度,实现材料在高温以及温度梯度下的测量。

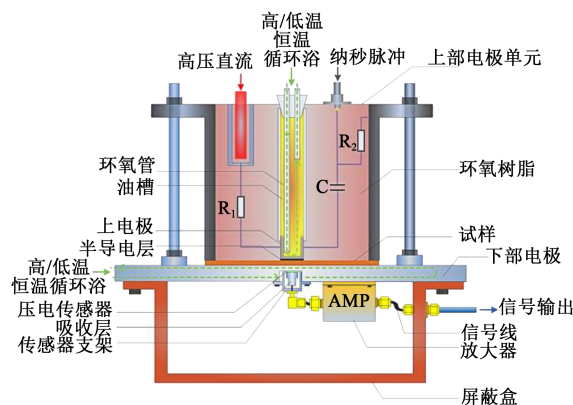


图8 改进后的PEA法空间电荷测量系统

Fig.8 Space charge measurement system of improved PEA method

3 温度梯度下交联聚乙烯中电荷积聚与电场畸变特性

3.1 适用于温度梯度的体-面电荷分离校正方法

图9是XLPE在温度梯度 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 、场强为40 kV/mm、加压20 min时的空间电荷分布。其中PEA测量得到的空间电荷包含两部分信号的叠加:①温度梯度下大量异极性电荷在低温侧阳极附近积聚;②正电极界面处的面电荷在处理过程中通过高通滤波、扩展成一个电荷包。由于极板与介质交界面处的面电荷PEA信号较大,该信号会淹没介质内的体电荷信号,导致无法得到极板附近真实的空间电荷分布。由于正电极左侧没有电荷积聚,其波形近似符合界面电荷高斯分布特征,可以将电极面电荷

还原成在电极两侧对称分布的波形。

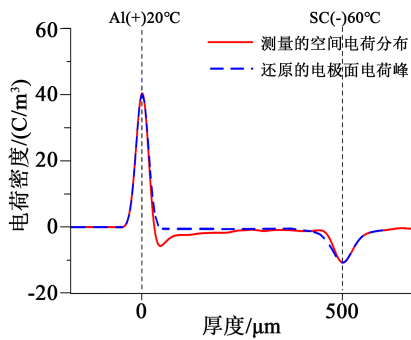


图9 XLPE在 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$,场强为40 kV/mm
加压20 min时空间电荷分布

Fig.9 XLPE space charge distribution when $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ and
the field strength is 40 kV/mm for 20 min

图10是XLPE在温度梯度 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 、场强为40 kV/mm、加压20 min时的体电荷分布。从测量得到的总电荷分布中去掉电极峰电荷,则可以得到实际介质内部的电荷分布。

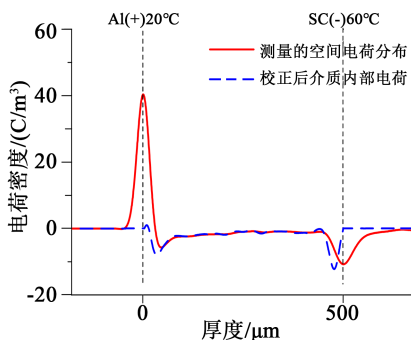


图10 XLPE在 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$,场强为40 kV/mm
加压20 min时体电荷分

Fig.10 XLPE bulk charge distribution when $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ and
field strength is 40 kV/mm for 20 min

从图10可以看出,校正之后介质内部积聚电荷仍是负电荷,说明校正没有影响电荷的分布特性,阳极附近积聚的负电荷最大值变大,并且最大负电荷峰的位置向阳极处移动,这是由于阴极电荷大量迁移到阳极,没有及时抽出形成的,而阴极处附近积聚少量的同极性电荷,这是由电荷的注入引起的。而校正前,无法准确判断阴极处的同极性电荷积聚,试样内部同极性电荷与电极处负电荷峰位置相近,难以区分。而通过本研究所采用的校正方法,可以更加准确地获取两电极附近的电荷分布和积聚量。

图11是XLPE在温度梯度 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 、场强为40

kV/mm、加压20 min时校正前后的电场分布。从图11可以看出,经过波形校正,最大电场强度由原来的62 kV/mm增加到67 kV/mm,阳极处的电场由校正前的40 kV/mm增加到校正后的67 kV/mm,阴极处的电场由校正前的10 kV/mm增加到校正后的20 kV/mm。校正消除了电极和试样界面处的感应电荷,观察到了真实的XLPE试样体电荷分布,因为消除了界面处的感应正电荷,所以校正后阳极畸变电场增大。

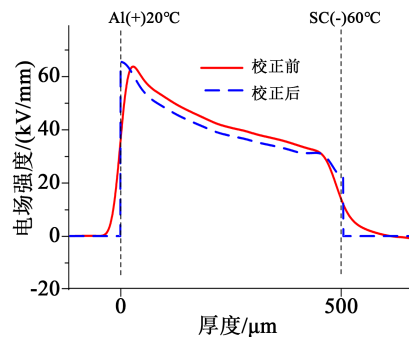


图11 XLPE在 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$,场强为40 kV/mm
加压20 min时XLPE校正前后电场分布

Fig.11 The electric field distribution of XLPE before and
after XLPE correction when $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ and the
strength is 40 kV/mm for 20 min

3.2 温度梯度下XLPE中电荷积聚特性

为了保证实验过程中的温度梯度,制备了厚度为0.5 mm的试样。根据电缆温度场仿真结果,将上下电极温度梯度分别设置为10、20、 40°C ,分别对应于额定电流、最大稳态电流和短时过载36 h电流3种情况。实验中,低温侧电极的温度始终为 20°C ,温度梯度 ΔT 分别为10、20、 40°C 时,高温侧电极的温度分别是30、40、 60°C 。实验中上电极与试样之间有半导体层,半导体层自身热阻会使其承受一定的温度差,因此油浴需要按一定比例设置更高温度。本实验系统受实验条件限制,油浴温度不能超过 100°C ,无法实现试样两侧温度差为 60°C 的设置。XLPE的空间电荷测量,采用逐级升压的加压方式进行加压,即取5 kV为起始电压,25 min为时间步长,以5 kV为电压步长,升压速率为1 kV/s,最高测量电压为25 kV。

图12为不同温度梯度下XLPE在每个电压等级加压25 min时的空间电荷分布。从图12可以看出,对于XLPE,在温度梯度为 10°C 条件下,场强低于30 kV/mm时,材料中没有明显的电荷积聚,而场

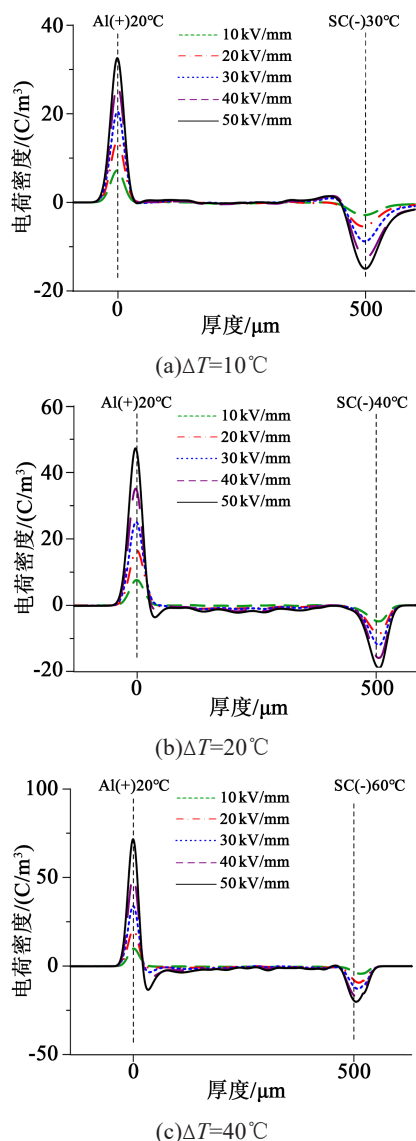


图12 XLPE材料在不同温度梯度下的空间电荷分布
Fig.12 Space charge distribution of XLPE materials under different temperature gradients

强增大到30 kV/mm时,材料的阳极附近出现少量的异极性电荷;在温度梯度为20°C的条件下,场强为20 kV/mm时,材料阳极附近开始出现少量异极性电荷,场强为30 kV/mm时,阳极附近的异极性电荷增加;在温度梯度为40°C的条件下,场强为20 kV/mm时材料阳极附近已经开始出现异极性电荷。随着温度梯度增加,XLPE阳极附近出现异极性电荷的起始电压降低。

按照上述的电荷波形校正方法,将电极处的电荷峰还原,并从所测得的电荷分布中去掉,可以得到材料内部的空间电荷分布,尤其是电极处的同极性电荷会变得更加明显。图13为XLPE在 ΔT 分别

为20°C和40°C时的体电荷分布。从图13可以看出,在 $\Delta T=20^\circ\text{C}$,场强分别为10、20、30 kV/mm时,低温侧为同极性电荷积聚,随着场强的增加,积聚的电荷极性改变为负电荷;而在 $\Delta T=40^\circ\text{C}$,场强为20 kV/mm时,样品两侧开始有大量的负电荷积聚,阴极处的同极性电荷是由电极注入引起的,而阳极处的负电荷是由电子迁移至阳极,没有及时抽出引起的。由于温度梯度的增加,阴极的负电荷注入率和阳极的负电荷抽出率的差异也越来越大,从而导致XLPE阳极处出现异极性电荷的场强由30 kV/mm降低到20 kV/mm。

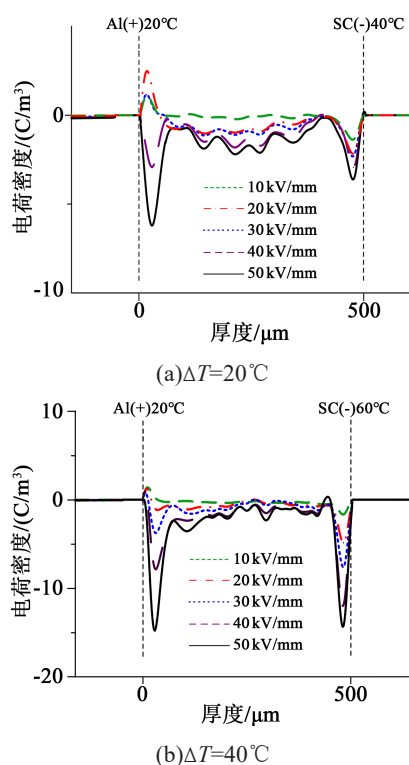


图13 不同场强下XLPE材料的体电荷分布

Fig.13 The bulk charge distribution of XLPE materials under different field strengths

3.3 温度梯度下XLPE中电场畸变特性

根据泊松方程可在空间电荷分布的基础上得到XLPE在不同温度梯度和场强下的电场分布,如图14所示。从图14可见,当场强大于30 kV/mm时,随着温度梯度的增加,场强畸变率增加,从图14可以直观地观察到空间电荷引起的最大畸变场强与外加平均场强呈线性关系。

按照上述校正电场的方法,不同温度梯度下XLPE材料校正后的电场波形如图15所示。从图15可以看出, ΔT 为10°C时,最大畸变场强出现在阴

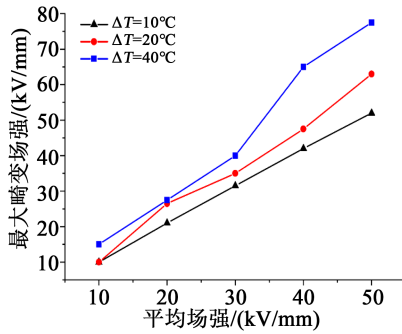


图 14 校正前最大畸变场强与平均场强的关系

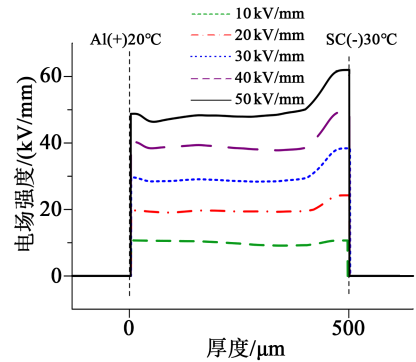
Fig.14 The relationship between the maximum distortion electric field strength and the average electric field strength before correction

极附近; ΔT 为 20°C 和 40°C 时, 最大畸变场强出现在阳极附近。XLPE 材料校正后不同电压下最大畸变场强与外加平均场强的关系如图 16 所示。从图 16 可以看出, 校正后不同温度梯度下的最大场强与外加平均场强仍然是呈线性关系。表 4 为校正后的最大电场畸变率, 从表 4 可以看出, 校正之后的电场畸变率在 $1.07\sim 1.68$, 说明最大场强与外加场强基本呈线性关系。

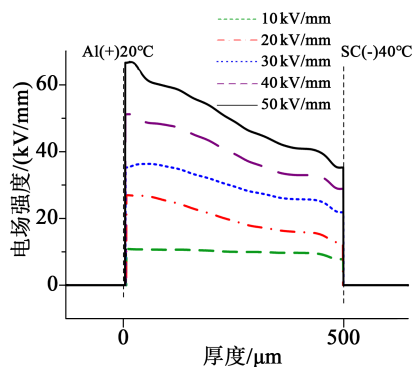
校正后电场畸变率与平均场强的关系如图 17 所示, 从图 17 可以看出, 在温度梯度 ΔT 为 20°C 和 40°C 时, XLPE 阳极附近的异极性电荷积聚导致阳极的场强增大。随着温度梯度的增加, 相同平均场强下的电场畸变率也在增加。 ΔT 为 10°C 和 20°C 时, 电场畸变率随平均电场的增加增势较缓。而在 $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 时的电场畸变率随平均场强的增加而快速增大, 且在场强大于 30 kV/mm 时, 电场畸变率随场强的增长速率也增加。这是由于在温度梯度和外施场强增加的共同作用下, 阳极附近的负电荷积聚量不断增加而导致的, 且异极性电荷积聚量随场强和温度梯度的增大速率也在增加。

由以上 XLPE 在温度梯度和电场作用下的电荷积聚和电场畸变特性可以看出, 温度梯度会使绝缘材料内部电场畸变, 在温度梯度为 40°C 时, 电场畸变率可达到 1.68。电场的畸变会进一步影响绝缘材料的老化速率, 产生更大的累积老化损伤。

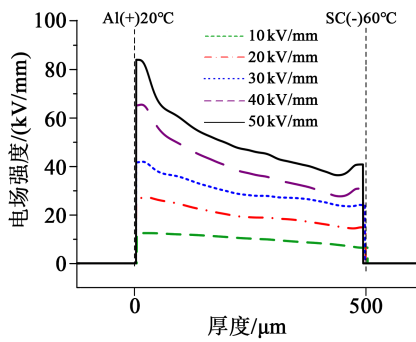
以往研究发现温度梯度下 XLPE 低温侧异极性空间电荷的积聚主要是由以下两个原因造成的: ① 两电极上存在温度差, 会导致两极电荷注入量产生差异, 使高温侧注入的电荷占主导地位, 而占主导地位的电荷在高温侧的注入速率远超过在低温侧的抽出速率, 使其在低温侧难以抽出, 而大量滞留



(a) $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$



(b) $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$



(c) $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$

图 15 校正后 XLPE 材料在不同温度梯度下的电场分布图

Fig.15 The electric field distribution diagram of XLPE material under different temperature gradients after correction

形成异极性电荷; ② 介质内部存在的温度梯度, 会使高温侧电荷迁移率高于低温侧, 一方面会加速高温侧注入的电荷向低温侧迁移, 削弱高温侧同极性电荷的积聚, 另一方面会加剧低温侧电荷输运速率和抽出速率的差距, 促进低温侧积聚更多的异极性电荷^[25]。可以看出, 两电极上的温度差和介质内部的温度梯度都在电荷积聚特性中发挥关键的作用。因此需要指出以下两个问题: ① 本研究中所采用的温度设置为下电极温度恒定, 而上电极温度增加, 形成一定的温度梯度。这样的设置与实际电缆在

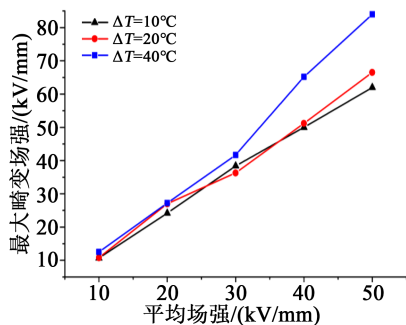


图16 校正后最大电场与平均电场的关系

Fig.16 The relationship between the maximum electric field and the average electric field after correction

表4 校正后的XLPE材料的电场畸变率

Tab.4 Electric field distortion rate of XLPE material after correction

| $\Delta T/^\circ\text{C}$ | 10 kV/mm | 20 kV/mm | 30 kV/mm | 40 kV/mm | 50 kV/mm |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10 | 1.07 | 1.21 | 1.28 | 1.25 | 1.24 |
| 20 | 1.08 | 1.35 | 1.21 | 1.28 | 1.33 |
| 40 | 1.25 | 1.36 | 1.39 | 1.63 | 1.68 |

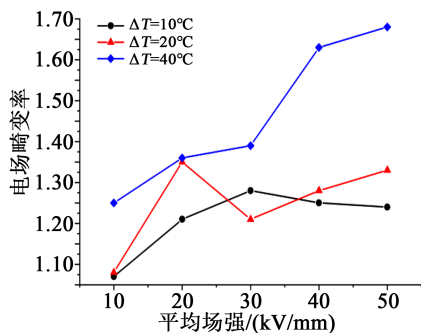


图17 校正后电场畸变率与平均电场的关系

Fig.17 The relationship between the electric field distortion rate and the average electric field after correction

不同电流下的温度场并不相同。而本研究的设置一方面是为了方便获取可对比的规律;另一方面则是受实验条件限制,难以实现高温电极 130°C 的设定,而下电极在温度超过 70°C 时,压电传感器的响应也会发生显著变化,从而影响测量精度。电缆在短时过载36 h在绝缘两侧形成约 40°C 的温度差,其低温侧温度达 83.6°C ,高温侧达 130°C 。这种情况下,两侧电极上的电荷注入与抽出速率以及两者之间的差距都远高于 $20\sim 60^\circ\text{C}$ 的情况。因此有可能会形成更大量的异极性电荷积聚和更严重的电场畸变。从这个角度看,本研究低估了绝缘两侧温度差带来的影响;②本研究采用的XLPE厚度远小于

真实高压电缆的厚度,因此当试样两侧温度差与电缆相同时,在试样上形成的温度梯度将大于电缆绝缘,从而高估温度梯度带来的影响。除此之外,本研究采用的是平板试样,和电缆的同轴结构也有差异,也会对电荷积聚形态和电场畸变有一定影响。因此本研究所得电场畸变率的具体数值不一定适用于真实电缆,但电场畸变率随场强和温度梯度的变化规律应是一致的。真实电缆在不同电流条件下和温度场中的电场畸变仍需要后续实验获取。

4 结论

本研究利用有限元分析软件研究了高压直流挤包海陆复合电缆在不同电流下的温度场特征,计算结果显示在各种电流条件下,海陆复合电缆的最高温度均出现在陆地段,根据仿真结果可以得到在额定电流下XLPE绝缘层温度梯度约为 8.1°C ;最大稳态电流下XLPE绝缘层温度梯度约为 18.7°C ;短时过载1 h情况下XLPE绝缘层温度梯度约为 61.1°C ;短时过载36 h情况下XLPE绝缘层温度梯度约为 41.1°C 。

进一步测量了XLPE试样在不同温度梯度和场强下的电荷积聚和电场畸变特性。实验结果显示随着施加在试样两侧的温度梯度逐渐增大,阳极附近的异极性电荷逐渐增加,阳极处的畸变电场增大。通过从总电荷分布中去掉界面电荷,获取了体电荷分布,进而计算得到了更准确的电场畸变特性。结果显示电场畸变率均随平均电场和温度梯度的增加而增加,且在电场强度高于 30 kV/mm 、温度梯度为 40°C 时,电场畸变率增长速率提高。

参考文献:

- [1] 艾欣,赵璐,王智冬,等.物元分析法及其在电网发展诊断中的应用研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2020,47(3):10-18.
- [2] 方春华,叶小源,杨司齐,等.水分对XLPE电缆中间接头电场和击穿电压的影响[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(2):64-72.
- [3] 刘娜,刘佳明.基于COMSOL的直流海底电缆热效应仿真分析[J].吉林水利,2019(9):6-8,18.
- [4] 闫家铭,毕天姝,胥国毅,等.海上风电经VSC-HVDC并网改进频率控制策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(2):11-19.
- [5] 陈哲,沈海军,李国倡,等.温度对海底电缆半导体屏蔽层电学-热学性能的影响研究[J].绝缘材料,2020,53(11):32-37.
- [6] 肖世杰,胡列翔,周自强,等.交联聚乙烯绝缘海底电缆应用及试验监测技术评述[J].绝缘材料,2018,51(1):1-9.
- [7] 李维康,祝文亲,张翀,等.高压直流电缆用低密度聚乙烯的结构

- 与电气性能分析[J]. 绝缘材料,2020,53(7):74-82.
- [8] 张洪亮,肖晋宇,侯金鸣,等. 提高XLPE高压直流海缆经济性的研究展望[J]. 绝缘材料,2021,54(3):1-9.
- [9] DISSADO L A, FU M, CHEN G, et al. Space charge formation and its modified electric field under applied voltage reversal and temperature gradient in XLPE cable[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,2008,15(3):851-861.
- [10] CHEN X, WANG X, WU K, et al. Effect of voltage reversal on space charge and transient field in LDPE films under temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(1):140-149.
- [11] WU K, LÜ Z, ZHU Q, et al. Space charge formation and conductivity characteristics of PE and oil impregnated paper under a temperature gradient[C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Niigata, Japan: IEEE, 2014.
- [12] WANG Y, LÜ Z, XIA W, et al. Estimating the inverse power law aging exponent for the DC aging of XLPE and its nanocomposites at different temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,23(6):3504-3513.
- [13] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C. HVDC cable design and space charge accumulation. Part 3: Effect of temperature gradient[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(2):5-14.
- [14] WU Kai, CHEN Xi, WANG Xia, et al. Effects of temperature gradient on space charge accumulation at applied voltage reversal in LDPE film[C]//2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Potsdam, Germany: IEEE,2010.
- [15] 段佳冰,尹成群,吕安强,等. 基于IEC 60287和有限元法的高压海底电缆温度场分析方法[J]. 高压电器,2014,50(1):1-6.
- [16] 唐科,文武,阮江军,等. 基于有限元法的单芯电缆温度场仿真研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(9):811-816.
- [17] 刘贺晨,张铭嘉,刘云鹏,等. $\pm 160\text{kV}$ 交联聚乙烯直流海底电缆动态载流特性试验及仿真研究[J]. 电测与仪表,2020,57(14):19-27.
- [18] 崔明,杨宁,敖明,等. 直埋电缆周期性负载流量的计算分析[J]. 电测与仪表,2019,56(20):91-96.
- [19] 甘星. 电力电缆超负荷下温度场模型研究[J]. 电工技术,2019(17):20-21,25.
- [20] 刘云鹏,许自强,陈铮铮,等. $\pm 160\text{kV}$ 直流XLPE海底电缆载流特性仿真及试验[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):130-136.
- [21] International Electrotechnical Commission. Electric cables - Calculation of the current rating - Part 2: Thermal resistance: IEC 60287-2:2001[S]. Geneva: IEC,2001.
- [22] International Electrotechnical Commission. Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables: IEC 60853:1994 [S]. Geneva: IEC,1994.
- [23] 程晓晓,马建伟,尹轶珂,等. 高压XLPE绝缘电力电缆短时过载电流极限研究[J]. 高压电器,2017,53(4):150-155.
- [24] ZHU Q, WU K, WANG H, et al. The study of PEA space charge waveform recovery under temperature gradient[C]//2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna, Italy: IEEE,2013.
- [25] LÜ Z, CAO J, WANG X, et al. Mechanism of space charge formation in cross linked polyethylene (XLPE) under temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(6):3186-3196.