

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.018

绝缘材料热老化对电缆终端接头典型缺陷处电场畸变的影响

黄博¹, 杨铭远², 聂永杰³, 赵学童², 陈道远³, 李洪伟¹

(1. 云南电网有限责任公司普洱供电局, 云南普洱 665000; 2. 重庆大学电气工程学院, 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044;
3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217)

摘要: 电缆终端接头是电力电缆输电系统的重要组成部分, 为了获得绝缘材料老化对电缆终端接头内部缺陷电场强度分布的影响, 选用国产 10 kV 交联聚乙烯(XLPE)电缆及硅橡胶(SIR)冷缩式电缆终端接头开展研究。首先, 对电缆终端接头内的绝缘材料 XLPE 和 SIR 在 150 °C 条件下进行 16 d 的热老化, 并测试其在老化前后的相对介电常数和电导率。同时, 基于 COMSOL Multiphysics 软件建立了 10 kV 电缆终端接头的三维仿真模型, 根据上述试验结果设置热老化前后的绝缘材料参数, 并利用该模型设置了 3 种典型缺陷, 包括外半导体层错位、主绝缘划痕和尖端金属, 分析了不同位置 and 不同尺寸的缺陷在绝缘材料老化状态下的电场强度分布情况。结果表明, XLPE 和 SIR 在热老化处理后相对介电常数分别从 2.5 和 2.85 提高到 4.4 和 3.21, 且由于绝缘材料的老化, 电缆终端接头的内部电场发生明显畸变, 特别是在 XLPE 和 SIR 界面处电场畸变显著。另外, 热老化后的电缆终端接头在 3 种典型缺陷条件下, 电场畸变率明显提高, 外半导体层错位、主绝缘划痕和尖端金属缺陷处电场强度最大值分别提高到 5.26, 3.5, 16.91 kV/mm, 较未老化状态下提高了 17.41%, 6.38% 和 21.83%。绝缘老化加剧了缺陷处的电场畸变程度, 进一步影响了电缆运行的安全性和可靠性, 增加了电缆发生故障的风险。

关键词: 电缆终端接头; 交联聚乙烯电缆; 硅橡胶; 热老化; 典型缺陷; 仿真计算; 电场强度分布

中图分类号: TM247 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0124-09

Effect of insulating materials thermal aging on electric field distortion of typical defects in cable terminal joints

HUANG Bo¹, YANG Mingyuan², NIE Yongjie³, ZHAO Xuetong², CHEN Daoyuan³, LI Hongwei¹

(1. Puer Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Puer 665000, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract : The cable terminal joint is an essential component of the power cable transmission system. To investigate the effect of insulating material aging on the electric field strength distribution around the internal defects of cable terminal joints, the domestic 10 kV cross-linked polyethylene (XLPE) cable and silicone rubber (SIR) cold-shrinkable cable terminal joint were selected. The XLPE and SIR in the cable terminal joint were firstly thermally aged at 150 °C for 16 days, and their relative permittivity and conductivity were tested before and after the aging process. Additionally, a three-dimension simulation model of the 10 kV cable terminal joint was built using the COMSOL Multiphysics software, and the electrical parameters of XLPE and SIR were set based on the aforementioned test results. Three typical defects, such as misalignment of outer semiconductive layer, XLPE main insulation scratches, and sharp-pointed metal were embedded in the simulation model. The electric field strength distribution of the defects with various size and at different positions was analyzed in the aged insulating materials of cable terminal joint. The results show that the relative permittivity of XLPE and SIR increase from 2.5 and 2.85 to 4.4 and 3.21, respectively, after the thermal aging.

基金项目: 云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20230142), 云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20230147), 国家自然科学基金项目(51877016)

通信作者: 赵学童, 博士后, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压与绝缘技术

收稿日期: 2024-09-26

引用格式: 黄博, 杨铭远, 聂永杰, 等. 绝缘材料热老化对电缆终端接头典型缺陷处电场畸变的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 124-132.

HUANG Bo, YANG Mingyuan, NIE Yongjie, et al. Effect of insulating materials thermal aging on electric field distortion of typical defects in cable terminal joints[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 124-132.

Meanwhile, the electrical field distortion in the cable terminal joints increases with the aged insulating materials, and specifically, the electrical field distortion at the XLPE and SIR interface is significantly enhanced. Under the three typical defect conditions, the electric field distortion inside the cable terminal joints becomes more noticeable after the thermal aging process, with the maximum electric field strength at the sites of misalignment of outer semiconductive layer, XLPE main insulation scratches, and sharp-pointed metal reaches 5.26, 3.5, 16.91 kV/mm, respectively, which increases by 17.41%, 6.38%, and 21.83% compared to the non-aged state. The study demonstrates that insulating aging exacerbates the electric field distortion at defect sites, further influences the safety and reliability of the cable, and increases the risk of the cable faults.

Keywords : cable terminal joint ; cross-linked polyethylene cable ; silicone rubber ; thermal aging ; typical defect ; simulation calculation ; electric field strength distribution

随着电力系统的快速发展,电缆逐渐成为传输电能的主要载体,其运行的安全性和可靠性至关重要。电缆终端接头作为电力电缆系统中的关键部件,用于连接电缆与其他电气设备,并均匀电缆内部倒角处电场^[1]。电缆本体的主绝缘材料通常采用交联聚乙烯(XLPE),电缆终端接头则主要使用硅橡胶(SIR)。然而,这些绝缘材料在长期运行中不可避免地会受到电、热、力等多种因素的影响,逐渐发生老化导致绝缘性能下降,使得电缆本体及终端接头内部电场分布发生变化^[2-3]。此外,电缆终端接头在现场安装过程中由于环境和人为因素等影响,接头内部会出现应力锥错位、主绝缘划痕和金属残留等缺陷,如果接头交界面存在缺陷并投入使用后,会造成缺陷处局部放电,从而加剧绝缘材料的老化,甚至发生绝缘击穿事故^[4-5]。

目前,国内外学者对电缆本体 XLPE 和终端接头 SIR 的绝缘老化机理开展了大量研究。热老化过程中,XLPE 发生热裂解作用,破坏了交联结构,分子链断裂,使得 XLPE 绝缘材料力学性能下降,同时伴随着结晶度的降低,载流子更容易在绝缘材料内部形成击穿通道,宏观表现为电缆的电气性能下降,严重时会造成绝缘击穿引发电力系统故障^[6-7]。SIR 老化的主要原因是侧链 Si—C 键的断裂以及主链间的过度交联反应,导致绝缘材料力学及理化性能下降^[8]。费益军等^[9]和周远翔等^[10]研究了不同热的老化条件对电缆附件局部放电特性及 SIR 内部电树枝引发机制的影响,明确了热老化时间、热老化温度等因素与电缆附件局部放电及 SIR 电树枝生长形态的关联。

同时,现阶段研究开始进一步关注到材料热老化后缺陷对电场畸变后强度变化的影响。孙源文等^[11]研究了老化前后自熔式电缆中间接头界面有无气隙时的电场及温度场分布特性,发现绝缘老化

后,气隙及界面处的电场及温度均有所增加。赵建军等^[12]利用仿真分析了绝缘老化对 XLPE/SIR 界面典型缺陷的电场畸变影响,老化后界面电场畸变显著加剧,同时造成缺陷处电场集中。张瑞祥^[13]研究了热老化条件下不同缺陷类型分别对电场畸变分布的影响规律,其中畸变最为严重的典型缺陷分别为杂质颗粒和水树枝。

上述研究大多只针对于电缆中间接头开展,并且多集中在力学性能和理化性能的变化规律,缺少电缆附件 SIR 与电缆本体 XLPE 绝缘老化的共同作用对不同典型缺陷及其尺寸引发电场畸变的影响研究。笔者基于 COMSOL Multiphysics 软件建立了 10 kV 电缆终端接头仿真模型,设置了金属颗粒、划痕以及应力锥错位 3 种典型缺陷,仿真模拟了绝缘老化状态下电缆终端内部的电场强度分布情况,重点分析了绝缘老化对电缆终端内部缺陷处电场强度分布的影响规律,为保障电力电缆的安全稳定运行提供理论和技术参考。

1 仿真模型建立

1.1 老化试验与参数测量

图 1 为绝缘试样的制备过程,选用国产商用 10 kV XLPE 电缆(YJV62-8.7/15 kV-1×185 mm²)和 10 kV 冷缩式电缆终端接头,采用 J/Q sliver 电缆切片机(YN22161,苏州宇诺仪器有限公司)沿电缆轴向环绕切割制备 XLPE 绝缘片状试样,每片试样的长度和宽度均为 100 mm,厚度为 0.2 mm,同时准备电缆终端接头 SIR 附件绝缘片试样,每片试样的长度和宽度均为 100 mm,厚度为 5 mm。制样完成后,置于蒸馏水中进行超声波清洗,以清除试样表面的污染物。

按照 IEC 60216-6:2006 标准进行加速热老化试验,将方形试样垂直置于热风循环老化箱内,老化温度为 150 °C,老化时间为 16 d,实验完成后取出试

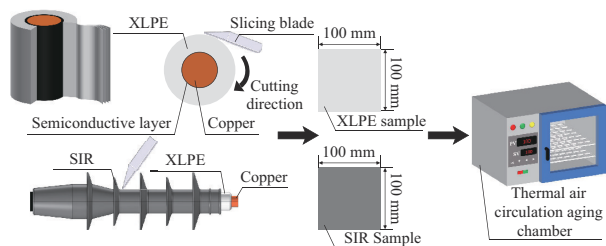


图1 绝缘试样的制备过程

Fig. 1 Preparation process of insulating samples

样置于空气中自然冷却,得到热老化后的绝缘试样。采用德国 Novocontrol 公司的 Concept 80 型宽频介电谱仪对试样的相对介电常数进行表征,测试原理表示方法见式(1)。

$$\varepsilon_r = \frac{C \times h}{\varepsilon_0 \times \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (1)$$

式中: ε_r 为相对介电常数; C 为试样的电容,单位为F; h 为试样的厚度,单位为mm; d 为电极直径, $d=20$ mm; ε_0 为真空介电常数, $\varepsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m。

电阻率(ρ)是绝缘内部电场强度与泄漏电流密度的比值,与电导率($\sigma=1/\rho$)呈倒数关系,使用美国 Keithley 公司 6517B 型高阻计进行体积电阻率的测量,再由上述关系可得试样电导率,相关计算公式见式(2)。

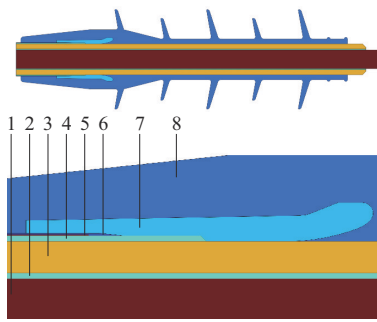
$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I}{U} \frac{4h}{\pi(D+g)^2} \quad (2)$$

式中: σ 为电导率,单位为S/m; ρ 为试样的体积电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$; I 为流过试样的电流,单位为A; U 为试样两端所给定的电压,单位为kV; h 为试样的厚度,单位为mm; D 为被保护电极的直径,单位为mm; g 为保护电极与被保护电极的间隙,单位为mm。

1.2 仿真模型与材料参数

在 COMSOL 有限元软件中建立 XLPE 电力电缆本体与冷缩式电缆终端接头三维仿真模型,XLPE 电缆本体包括铜芯导体、内外半导体层、XLPE 主绝缘、铜屏蔽。冷缩式电缆终端接头包括应力锥和 SIR 附件主绝缘以及用于固定和过渡铜屏蔽的半导体胶带,如图2所示。仿真模型参数设置见表1。

笔者所研究的对象电缆终端接头通常在工频下运行,因此电场设置为频域下求解,频率为 50 Hz。铜芯导体的对地电压为 10 kV,铜屏蔽接地表现为零电位,同时对铜芯导体施加额定电流。电场



1—Copper;2—Inner semiconductive layer;3—XLPE;
4—Outer semiconductive layer;5—Copper shield;
6—Semiconductive tape;7—Stress cone;8—SIR

图2 电缆终端接头结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cable terminal joint structure

表1 电缆终端接头仿真参数^[14-15]

Tab. 1 Simulation parameters of cable terminal joint

Structure	Relative permi- tivity		Conductivity/(S·m ⁻¹)	
	Before aging	After aging	Before aging	After aging
Copper	10 000	—	5.998×10^7	—
Semiconductive layer	10	—	2	—
Copper shield	10 000	—	5.998×10^7	—
XLPE	2.5	4.4	1×10^{-18}	1.11×10^{-14}
SIR	2.85	3.21	3.125×10^{-16}	4.86×10^{-14}
Stress cone	100	—	3	—
Semiconductive tape	30	—	10	—

有限元计算以电流场控制方程为基础^[16],具体见式(3)。

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = Q_{j,\varphi} \\ J = \sigma E + J_e \\ E = -\nabla \varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中: ∇ 为矢量微分算符; J 为电流密度矢量,单位为A/m²; $Q_{j,\varphi}$ 为电流源,单位为A/m³; σ 为电导率,单位为S/m; E 为电场矢量,单位为V/m; J_e 为外部注入电流密度,单位为A/m²; φ 为电势,单位为V。

式(3)中,求解的基本参数为 φ ,电场强度等其他参数根据 φ 求出。

按照 XLPE 电缆及终端接头结构尺寸建立 10 kV 电缆终端接头三维仿真模型如图 3a 所示,XLPE 电缆总长为 315 mm,终端接头长度为 285 mm。有限元分析计算是在剖分网格的基础上进行的,网格划分得越密集,计算结果就越准确,因此本文电缆终端接头三维模型的建立采用物理场控制网格,单元大小设置为超细化,以实现模型在 COMSOL 中的仿真精度和收敛性,有效减小误差,如图 3b 所示。

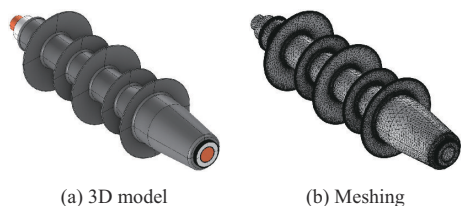


图3 电缆终端接头仿真模型

Fig. 3 Simulation model of cable terminal joint

1.3 典型缺陷设置

在电缆终端接头模型中设置以下3种典型缺陷。

(1)外半导体层错位:安装电缆终端接头时,外半导体层未能被正确地定位和切割,导致外半导体层剩余过长,超出应力锥的覆盖范围,形成错位。本文设计外半导体层伸出应力锥形成的错位缺陷如图4所示,外半导体层断口偏离规范定位点10~40 mm,步长5 mm。

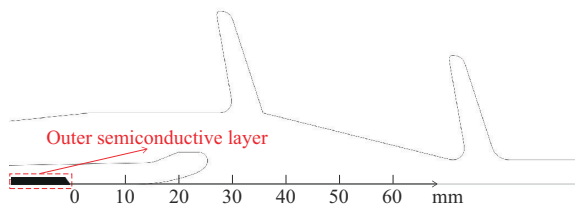


图4 外半导体层错位示意图

Fig. 4 Schematic diagram of misalignment of outer semiconductive layer

(2)主绝缘划痕:开剥XLPE电力电缆的过程中,由于操作不当或工具不合适,会造成电缆的XLPE主绝缘层表面的损伤,导致XLPE绝缘材料的破损,从而在表面上形成气隙。本文设计长方体形状模拟划痕缺陷,如图5所示,长为5 mm,宽为0.3 mm,厚度为0.5~3 mm,步长为0.5 mm,同时,以应力锥根部为原点,气隙位置0~30 mm,步长5 mm。划痕处材料设置为空气,相对介电常数为1,电导率为 1×10^{-20} S/m。

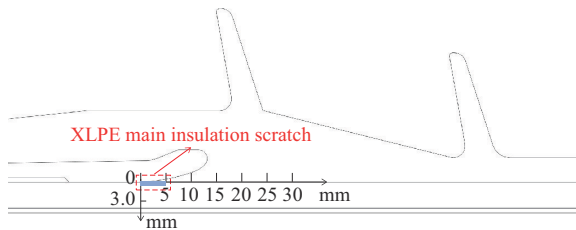


图5 XLPE主绝缘划伤示意图

Fig. 5 Schematic diagram of XLPE main insulation scratch

(3)尖端金属:按照安装工艺需求,铜屏蔽层要进行切割,如果切割不到位或铜碎屑没有清理干净,铜杂质会被电缆终端接头挤压并残留在附件里

面。采用底部半径0.5 mm的圆锥体模拟XLPE电缆绝缘中可能出现的尖端金属颗粒(图6),圆锥体高度设置1~3 mm,步长0.5 mm,同样以应力锥根部为原点,金属位置0~30 mm,步长5 mm。尖端金属颗粒的相对介电常数为10 000,电导率为 5.998×10^7 S/m。

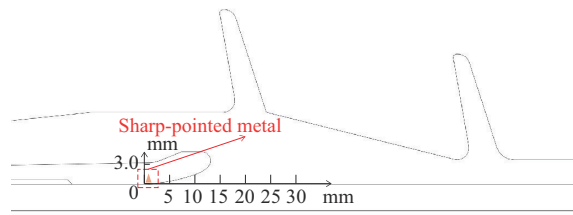


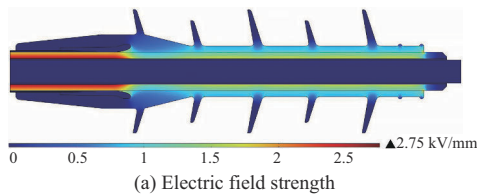
图6 尖端金属示意图

Fig. 6 Schematic diagram of sharp-pointed metal

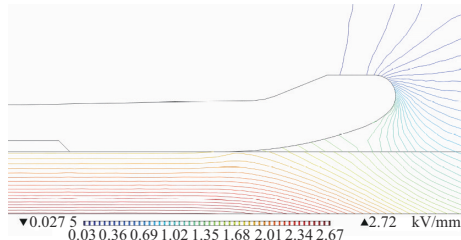
2 仿真结果分析

2.1 无缺陷电场仿真

图7为未老化10 kV电缆终端接头的无缺陷电场强度分布,此时不考虑缺陷的影响,XLPE的相对介电常数设置为2.5,SIR的相对介电常数设置为2.85。由图7可以看出,铜芯导体和应力锥内部的电场强度接近0 kV/mm,这是由于两者相对介电常数大,所承受的场强小。终端接头最大场强为2.75 kV/mm,位于内半导体层与XLPE绝缘交界处,且沿着XLPE径向方向场强下降。同时由于应力锥均匀电场的作用,导致外半导体层倒角处电场强度缓和,但在应力锥根部出现电场线集中现象,如图7b所示,应力锥根部-SIR-XLPE三点交界处电场强度为1.62 kV/mm。材料交界处的电场强度较大是因为不同材料的相对介电常数及电导率不同,如果相差较大将导致材料之间的匹配度不高,因此产生较



(a) Electric field strength



(b) Equipotential line

图7 未老化电缆终端接头无缺陷电场强度及等值线分布图

Fig. 7 Distribution diagram of defect free electric field strength and equipotential line for unaged cable terminal joints

大的场强畸变^[17]。

在交变电场下,电介质的电场分布主要受相对介电常数影响^[18],因此基于1.1所述热老化试验对相对介电常数和电导率的测量结果,热老化处理后XLPE主绝缘材料的相对介电常数由2.5增大到4.4,SIR附件绝缘材料的相对介电常数由2.85提高到3.21。图8为热老化对电缆终端接头电场强度分布的影响,接头伞裙部分的附件主绝缘与XLPE出现电场畸变情况,且由图8b可以看出,应力锥根部电场线更加集中。应力锥根部纵向场强分布如图9a所示(图中 E 为电场强度,下同),在考虑热老化因素的影响后,经过150℃热老化16d后,电场强度最大值仍然出现在内半导体层与XLPE主绝缘的交界处,且与未老化时场强相比并无明显变化。这是由于XLPE主绝缘相对介电常数虽有所提高,但相比导体和半导体材料的相对介电常数仍然小得多,并不会对电缆本体的电场强度分布产生明显影响。

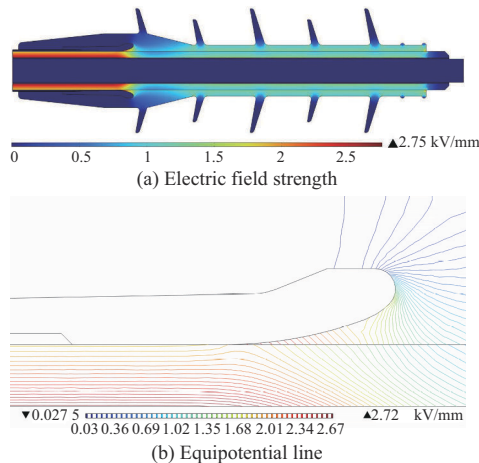
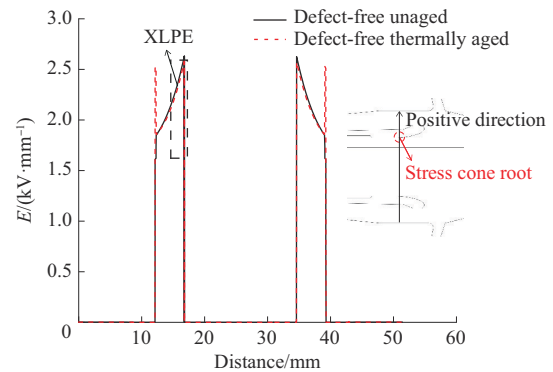


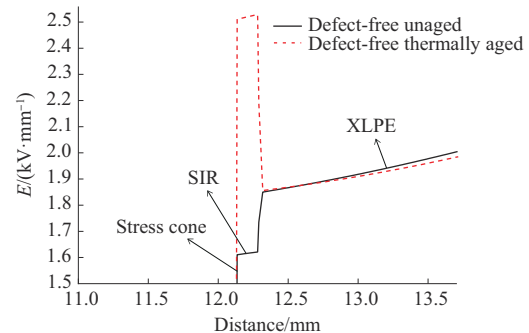
图8 热老化电缆终端接头无缺陷电场强度及等值线分布图

Fig. 8 Distribution diagram of defect free electric field strength and equipotential line for thermal aging cable terminal joints

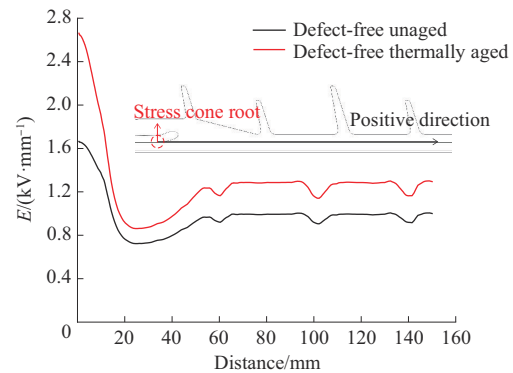
如图9b所示,XLPE-SIR-应力锥三结合点处畸变最为严重,电场强度达到2.62 kV/mm,畸变率为59.7%,这是由于XLPE与SIR相对介电常数和电导率变化程度不同,材料参数之间的差值进一步扩大,导致相邻电场强度畸变增加。同时,图9c展示了XLPE主绝缘与SIR附件绝缘之间的电场强度变化情况,热老化处理后的XLPE-SIR分界面电场强度均高于未老化时场强,尤其在接头伞裙部分,因为XLPE与SIR经过热老化处理后两者相对介电常数相差数值进一步扩大,电场的集中效应在材料的界面处加剧导致场强增加;同时材料电导率增加,在电场中更易于积累电荷,从而导致局部电场强度



(a) Longitudinal electric field strength at root of stress cone



(b) Electric field strength at XLPE-SIR interface



(c) Electric field strength at XLPE-SIR-stress cone triple junction point

图9 热老化前后电缆终端接头无缺陷电场强度变化曲线

Fig. 9 Change curves of defect free electric field strength of cable terminal joints before and after thermal aging

的增加。

2.2 外半导体层错位电场仿真

图10为热老化前后外半导体层典型错位位置仿真结果,电缆终端接头运行过程中外半导体层断口处电场强度集中,因此设计应力锥结构以减缓畸变电场^[19]。但如果应力锥安装不到位,复杂的多层结构使得终端接头内部更容易发生电场畸变,在交流电场的作用下,空间电荷移动时会被绝缘内部存在的陷阱捕获产生积聚,从而导致电场畸变^[20]。从图10可以看出外半导体层错位将导致应力锥作用失效,断口处场强畸变最为严重,且热老化状态下的畸变要大于未老化时的电场强度,极易引起界面

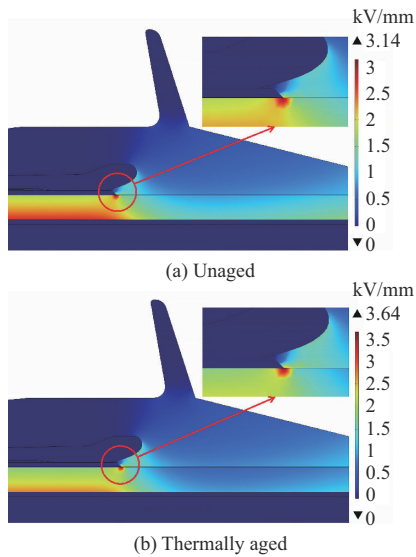


图10 电缆终端接头外半导体层错位电场强度分布图

Fig. 10 Electric field strength distribution diagram of misalignment of outer semiconductive layer of cable terminal joint

局部放电,造成电缆XLPE绝缘层击穿。

图11为热老化前后电缆终端接头外半导体层错位电场强度变化曲线。由图11看出,随着外半导体层伸出距离的增加,断口处场强畸变最大值也随之增加,但在距离30 mm时有所下降,这是由于此时外半导体层断口处位于终端接头伞裙之下,SIR附件主绝缘厚度大于其他位置,电场梯度有所缓和,降低了在断口处的电场强度。热老化条件下错位电场强度畸变最大值为5.26 kV/mm,相较于未老化时电场强度畸变最大值(4.48 kV/mm),升高了约17.41%。由于热老化作用的影响,XLPE与SIR内部发生热裂解和解聚反应,造成分子链断裂和材料内部交联网络的破坏^[21],导致产生了易被极化的游离基和小分子,因此XLPE与SIR的相对介电常数和电导率升高,产生电场强度分布的不均匀性,当

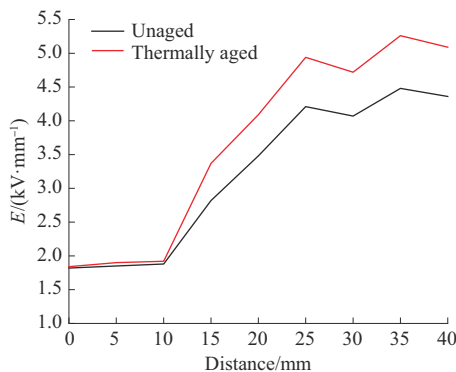


图11 热老化前后电缆终端接头外半导体层错位电场强度变化曲线

Fig. 11 Electric field strength change curves of misalignment of outer semiconductive layer of cable terminal joint before and after thermal aging

游离基和小分子发生积聚现象时,则会形成空间电荷导致周围电场畸变。外半导体层伸出应力锥,电场集中在断口处,形成电场畸变。这种电场集中会加剧局部的电荷捕获现象,尤其是在半导体材料与绝缘材料的交界面处,由于材料差异和界面效应,更容易形成电荷陷阱^[22]。在热老化过程中,XLPE与SIR内部的微观缺陷和陷阱进一步增加,从而捕获更多的电荷,因此热老化状态下断口处场强畸变程度加深。

2.3 主绝缘划痕电场仿真

电缆XLPE绝缘表面存在划痕时缺陷处会留下气隙,降低了XLPE与终端接头SIR附件主绝缘界面的紧密性。图12为XLPE存在气隙时的电场强度分布情况。热老化后,相较于SIR,气隙与XLPE的相对介电常数相差更大,使得电场线在缺陷处更加集中,因此气隙处畸变电场强度高于其他区域。当位于应力锥根部下方时,气隙与XLPE交界的场强畸变值为2.75 kV/mm,热老化处理后此气隙处电场强度最大值增加到3.25 kV/mm,相比未老化时提高了18.2%,而无气隙缺陷的XLPE在未老化情况下此处的场强值仅为1.88 kV/mm,因此带有气隙缺陷时,未老化和热老化电场强度畸变率分别达到了46.3%和72.9%。

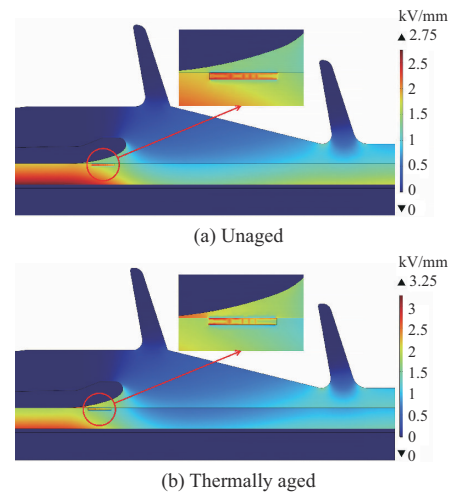


图12 电缆终端接头主绝缘划痕电场强度分布图

Fig. 12 Electric field strength distribution diagram of XLPE main insulation scratch on cable terminal joint

热老化前后电缆终端接头主绝缘划痕电场强度变化曲面如图13所示。从图13可以看出,热老化处理后使得气隙电场强度畸变值普遍增加,未老化时的电场强度为3.29 kV/mm,热老化后达到3.5 kV/mm,相比未老化提高了6.38%。这是由于XLPE

在热老化过程中发生分子链交联与断裂,相对介电常数和电导率都有所提高^[23],与空气的相对介电常数差值增加。电缆终端接头应力锥根部极易积累空间电荷,大量的电荷聚集造成了此处严重的电场畸变,使得应力锥根部成为电场最集中的部位^[24]。随着气隙远离应力锥根部,缺陷处电场畸变程度降低,气隙与应力锥的距离增加,界面电荷的影响逐渐减小导致电场强度下降。气隙尺寸的增加导致缺陷处场强最大值有所增加,也扩大了高场强区域的范围。另外,随着缺陷深度的加大,未老化和热老化状态下的电场强度畸变值差异也逐渐变大。因为当材料中有划痕、空隙或裂缝时,会引起材料在外力作用下应力分布的集中效应。人为损坏、电场应力和电场集中所产生的热量共同作用将加速绝缘层的老化,进一步加剧了电场畸变程度,因此热老化后的场强值增加。当深度逐渐增加时,气隙表面积也随之增大同时距离电缆缆芯更近,从而可以积聚更多的电荷,电场更加集中^[25]。

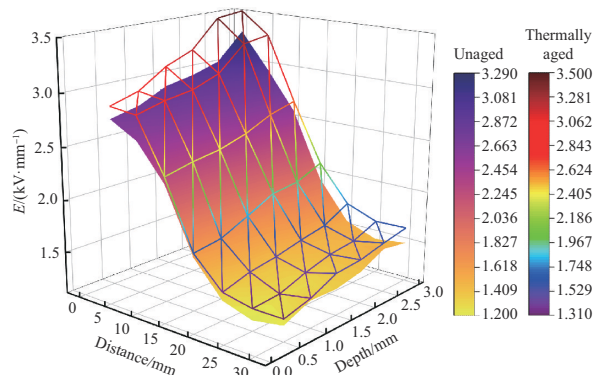


图13 热老化前后电缆终端接头主绝缘划痕电场强度变化曲面
Fig. 13 Electric field intensity change curved surfaces of main insulation scratches on cable terminal joints before and after thermal aging

2.4 尖端金属电场仿真

XLPE-SIR 界面存在尖端金属杂质时,也会对电缆终端接头电场强度分布产生影响。图14和图15为热老化前后不同高度的尖端金属位于应力锥附近和SIR附件主绝缘不同位置时的电场强度分布情况。结果表明,尖端金属杂质附近电场强度发生了畸变,当金属位于应力锥附近时电场强度最大值出现在金属与XLPE的分界面处(如图14a和图15a所示),当金属位于XLPE-SIR绝缘时电场强度最大值出现在金属尖端处(如图14b和图15b所示)。热老化前后电缆终端接头尖端金属电场强度变化曲面如图16所示。随着金属与应力锥根部距离的增加,

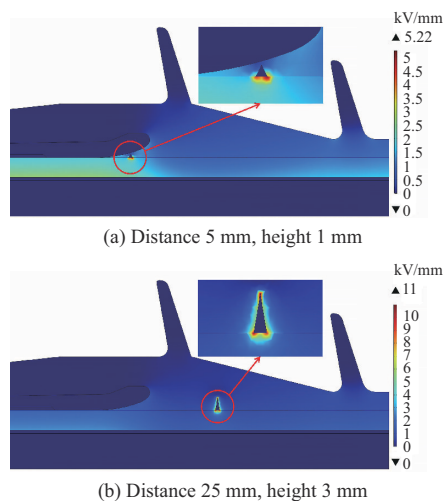


图14 未老化电缆终端接头尖端金属电场强度分布图

Fig. 14 Electric field strength distribution diagram of at sharp-pointed metal of unaged cable terminal joint

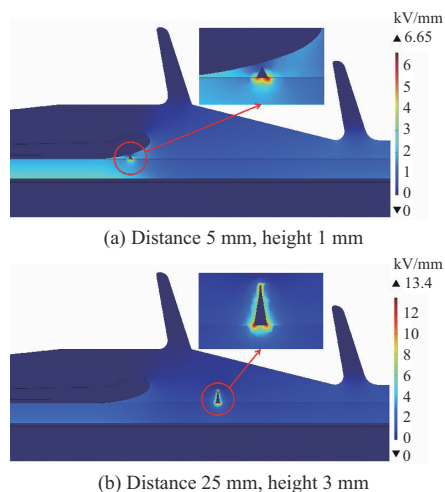


图15 热老化电缆终端接头尖端金属电场强度分布图

Fig. 15 Electric field strength distribution diagram at sharp-pointed metal of thermal aging cable terminal joint

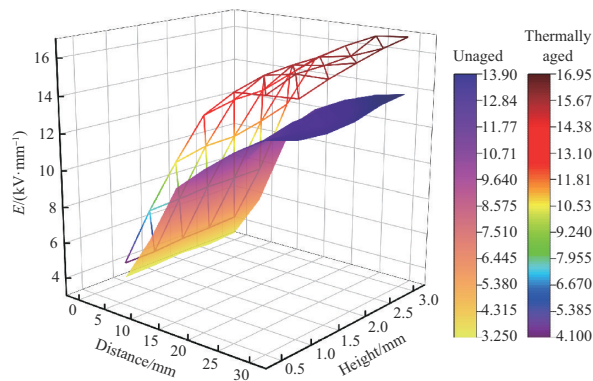


图16 热老化前后电缆终端接头尖端金属电场强度变化曲面

Fig. 16 Electric field strength change curved surfaces at the sharp-pointed metal of cable terminal joint before and after thermal aging

金属附近电场强度幅值不断增加,其中距离应力锥根部30 mm的金属杂质处电场强度变化最大,未老

化时增大至 13.88 kV/mm,是无缺陷场强 0.867 5 kV/mm 的 16 倍。而且随着金属杂质尺寸(高度)的增大,最大场强畸变值有所增加。尤其热老化处理后,距离 30 mm、高度为 3 mm 的尖端金属电场强度达到最大值为 16.91 kV/mm,相比老化前提高 21.83%。热老化处理的电缆终端接头电场强度分布曲面变得更加陡峭,表明电场畸变率提高,尖端放电效应将更加显著。

静电场中的金属导体自由电子会移动以抵消电场作用,达到静电平衡状态后金属内部电场为 0。根据高斯定律可知,金属导体内部没有电场存在,所有的电荷都会分布在金属的表面,且分布方式依赖于曲率。对于尖锐的表面,电场线会更为集中,电荷密度也会更大,当金属变高其表面形状也越尖锐,曲率越大的金属尖端效应更加明显,这将导致大量电荷的累积,从而产生严重的场强畸变^[26]。同时,曲率越大,电场应力越集中,电场应力与机械破坏、局部放电所产生的热量将共同作用加速 XLPE 的老化,从而使缺陷周围的 XLPE 和 SIR 内部交联结构发生降解,进一步扩大缺陷处老化面积,使得此处电场畸变加剧。而且交流电场的作用下会导致场强集中的地方发生电荷注入-抽出现象^[27],电荷的运动碰撞也会使绝缘材料内部分子链发生断裂,降低材料绝缘性能从而引发电树枝现象^[28-29]。因此热老化后的电缆终端接头尖端金属周围的电场强度大幅增加。

3 结论

通过对 XLPE 和 SIR 绝缘材料热老化处理以及对电缆终端接头的仿真分析,揭示了不同位置和尺寸的典型缺陷在绝缘材料老化状态下对电场强度分布的显著影响。具体结论如下。

(1)受热老化影响,XLPE 和 SIR 的相对介电常数和电导率有所提高,改变了电缆终端接头的电场强度分布,特别是在 XLPE 与 SIR 界面处,热老化加剧了电场畸变,最大电场强度出现在应力锥根部。

(2)不同缺陷类型对电场强度分布影响显著,外半导体层错位、主绝缘划痕和尖端金属缺陷使绝缘热老化后的电场强度均有显著提升。尖端金属缺陷电场畸变率最大,其次为外半导体层错位和主绝缘划痕缺陷。

(3)缺陷位置和尺寸对电场畸变的程度产生重要影响,特别是在尖端金属缺陷中,随着缺陷位置远离应力锥和缺陷尺寸增大,电场畸变显著增强,未老化时金属缺陷处的电场强度最大值已经达到 13.88 kV/mm,是无缺陷时的 16 倍。

(4)绝缘老化与缺陷的共同作用使得电场畸变加剧,尤其在缺陷处容易引发局部放电和绝缘击穿,影响电缆系统的安全性和稳定性。

参考文献

- [1] 范在乾,咸日常,冷学冰,等. 35 kV XLPE 电力电缆终端结构参数优化[J]. 绝缘材料,2023,56(11):73-79.
FAN Zaiqian, XIAN Richang, LENG Xuebing, et al. Optimization on structural parameters of 35 kV XLPE power cable terminal[J]. Insulating Materials, 2023, 56(11):73-79.
- [2] 彭琳琳,李博,赵琳琳,等. 高压电缆绝缘老化机理及预防措施研究[J]. 品牌与标准化,2024(2):76-78.
PENG Linlin, LI Bo, ZHAO Linlin, et al. Research on the mechanism and preventive measures of insulation aging in high-voltage cables[J]. Brand & Standardization, 2024(2):76-78.
- [3] LU Daiqiang, HU Ran, ZHAO Yifeng, et al. Investigation on the evolution of discharge behaviors at XLPE-SiR interface of 10 kV cable joints under moisture conditions[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 232. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110383.
- [4] 向洪,何维晨,吴照国,等. 一起电缆终端接头故障仿真分析研究[J]. 电工技术,2021(3):139-140,143.
XIANG Hong, HE Weisheng, WU Zhaoguo, et al. Simulation analysis and research on a cable terminal joint failure[J]. Electric Engineering, 2021(3):139-140,143.
- [5] 徐超,叶婷. 一起 110 kV 电缆终端故障及仿真分析[J]. 电气时代,2022(10):46-49,59.
XU Chao, YE Ting. A case study and simulation analysis of a 110 kV cable terminal fault[J]. Electric Age, 2022(10):46-49,59.
- [6] 赵莉华,杨兰,李巍巍,等. 交联聚乙烯热老化与绝缘性能的关系[J]. 中国电力,2020,53(9):118-124.
ZHAO Lihua, YANG Lan, LI Weiwei, et al. Relationship between thermal aging and insulation properties of XLPE[J]. Electric Power, 2020, 53(9):118-124.
- [7] WANG Can, ZHAO Xuetong, QI Jingqi, et al. Structural changes and very-low-frequency nonlinear dielectric response of XLPE cable insulation under thermal aging[J]. Materials, 2023, 16(12). DOI:10.3390/MA16124388.
- [8] 李成钢,朱孟周,刘建军,等. 110 kV GIS 复合套管硅橡胶老化分析与研究[J]. 绝缘材料,2015,48(6):58-61.
LI Chenggang, ZHU Mengzhou, LIU Jianjun, et al. Ageing analysis and research of silicone rubber composite bushing for 110 kV GIS[J]. Insulating Materials, 2015, 48(6):58-61.
- [9] 费益军,张云霄,周远翔. 硅橡胶热老化特性及其对电缆附件运行可靠性的影响[J]. 电工电能新技术,2014,33(12):30-34.
FEI Yijun, ZHANG Yunxiao, ZHOU Yuanxiang. Thermo characteristics of silicone rubber and its effects on operational reliability of extra-high voltage cable accessories[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(12):30-34.
- [10] 周远翔,张云霄,张旭,等. 热老化时间对硅橡胶电树枝起始特性的影响[J]. 高压技术,2014,40(4):979-986.
ZHOU Yuanxiang, ZHANG Yunxiao, ZHANG Xu, et al. Influence of thermal aging time on electrical tree initiation of silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4):979-986.
- [11] 孙源文,江丽,张卫东,等. 绝缘老化对自熔式电缆中间接头界面电场及温度场分布的影响[J]. 电工技术,2023(9):165-169.

- SUN Yuanwen, JIANG Li, ZHANG Weidong, et al. Effect of insulation aging on the distribution of electric field and temperature field at the interface of self-melting cable intermediate joint[J]. *Electric Engineering*, 2023(9):165–169.
- [12] 赵健军, 许庆重, 王文成, 等. 绝缘老化对电缆中间接头界面缺陷处电场分布的影响[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(7):67–74.
- ZHAO Jianjun, XU Qingzhong, WANG Wencheng, et al. Influence of insulation ageing on electric field distribution at interface defects of cable joints[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(7):67–74.
- [13] 张瑞祥. 考虑热老化条件下典型缺陷对XLPE电缆本体和中间接头电场分布的影响研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2023.
- ZHANG Ruixiang. The influence of typical defects on the electric field distribution of XLPE cable and joint under the thermal aging condition[D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2023.
- [14] 张巍, 韩圣斌, 李秀峰, 等. 热老化下涂覆硅脂对110 kV电缆终端接头界面电-热-力场的影响[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(6):76–85.
- ZHANG Wei, HAN Shengbin, LI Xiufeng, et al. Effect of coating silicone grease on electrical-thermal-mechanical field at interface of 110 kV cable terminal joint under thermal ageing[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(6):76–85.
- [15] 刘泳斌, 高景晖, 钟力生, 等. ± 320 kV直流电缆交联聚乙烯/三元乙丙橡胶附件击穿特性[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(3):72–80.
- LIU Yongbin, GAO Jinghui, ZHONG Lisheng, et al. Breakdown property of ± 320 kV HVDC cable system XLPE/EPDM accessories[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3):72–80.
- [16] 乔镜琪, 赵学童, 夏源, 等. 不同敷设方式下 ± 500 kV高压直流海缆稳态载流量仿真分析[J]. *高电压技术*, 2023, 49(2):597–607.
- QIAO Jingqi, ZHAO Xuotong, XIA Yuan, et al. Simulation analysis of steady-state ampacity of ± 500 kV high-voltage DC submarine cables under different laying methods[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(2):597–607.
- [17] 张瑞祥, 李欢, 张延伟, 等. 热老化对电缆接头中典型缺陷引发的电场畸变的影响[J]. *陕西理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 39(2):14–21.
- ZHANG Ruixiang, LI Huan, ZHANG Yanwei, et al. Effect of thermal aging on electric field distortion induced by typical defects in cable intermediate joints[J]. *Journal of Shaanxi University of Technology(Natural Science Edition)*, 2023, 39(2):14–21.
- [18] 朱梦瑶, 李欢, 张瑞祥. 热老化对XLPE电缆本体中典型缺陷所引发的电场畸变的影响[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2024:1–12 [2024-09-13]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231728>.
- ZHU Mengyao, LI Huan, ZHANG Ruixiang. Influence of thermal aging on electric field distortion caused by typical defects in XLPE cable[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2024:1–12 [2024-09-13]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231728>.
- [19] 祝贺, 何峻旭, 郑亚松, 等. 电缆终端应力锥错位缺陷对界面温度及应力分布的影响[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(1):65–75.
- ZHU He, HE Junxu, ZHENG Yasong, et al. Influence of cable terminal stress cone dislocation defect on interface temperature and stress distribution[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(1):65–75.
- [20] 李玉栋, 张占喜, 肖坤, 等. 热老化前后LDPE/SiO₂纳米复合材料空间电荷积聚分析[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(5):164–169.
- LI Yudong, ZHANG Zhanxi, XIAO Kun, et al. Space charge accumulation behavior of Polyethylene/Silica Nanocomposites before and after thermal aging[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(5):164–169.
- [21] 刘敬华, 欧阳本红, 夏荣, 等. 高压XLPE电力电缆绝缘老化状态评价研究进展[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(6):141–149.
- LIU Jinghua, OUYANG Benhong, XIA Rong, et al. Assessment of the insulation aging state of high voltage XLPE cables[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(6):141–149.
- [22] 王华楠, 王霞, 陈飞鹏, 等. 硅脂溶胀协同电晕老化对硅橡胶性能和XLPE/SR界面电荷特性的影响[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5):1 633–1 642.
- WANG Huanan, WANG Xia, CHEN Feipeng, et al. Effect of silicone grease swelling with corona aging on properties of silicone rubber and interfacial charge characteristics between XLPE and SR[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5):1 633–1 642.
- [23] 黄炳融, 王威望, 李盛涛, 等. 热老化交联聚乙烯绝缘状态评估和介电参数计算的新型电荷表征和分析方法[J]. *电气工程学报*, 2021, 16(2):25–32.
- HUANG Bingrong, WANG Weiwei, LI Shengtao, et al. Study on dynamic charge characteristics of thermal aging XLPE based on direct current integral charge technique[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2021, 16(2):25–32.
- [24] 张瑞敏, 张沛红, 宋淑伟, 等. 界面空间电荷对高压直流电缆终端电场分布的影响[J]. *高电压技术*, 2019, 45(6):1 762–1 766.
- ZHANG Ruimin, ZHANG Peihong, SONG Shuwei, et al. Effect of interfacial space charge on electric field distribution of HVDC cable terminal[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(6):1 762–1 766.
- [25] 陈胤, 黄瑞梅. 基于电-热场耦合的35 kV电缆中间接头气隙缺陷仿真分析[J]. *电气技术*, 2021, 22(10):46–50, 70.
- CHEN Yin, HUANG Ruimei. Simulation analysis of 35 kV cable joint with air gap defect based on electrothermal field coupling[J]. *Electrical Engineering*, 2021, 22(10):46–50, 70.
- [26] 曹雯, 张云娟, 麻焕成, 等. 缺陷对电缆接头复合界面电场分布影响的仿真分析[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(11):31–36.
- CAO Wen, ZHANG Yunjuan, MA Huancheng, et al. Analysis of influences of defects on electric field distribution of composite interface of cable joint[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(11):31–36.
- [27] 周远翔, 刘睿, 张云霄, 等. 硅橡胶电树枝的引发与生长过程[J]. *高电压技术*, 2014, 40(12):3 656–3 664.
- ZHOU Yuanxiang, LIU Rui, ZHANG Yunxiao, et al. Initiation and propagation processes of electrical tree in silicone rubber[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(12):3 656–3 664.
- [28] 秦晨元, 魏福庆, 杨世元, 等. 交联聚乙烯电缆电树老化的研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(7):175–181.
- QIN Chenyuan, WEI Fuqing, YANG Shiyuan, et al. Research progress on electrical tree aging of crosslinked polyethylene cables[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(7):175–181.
- [29] 黄剑平, 陈伟林, 彭向阳, 等. 电老化对XLPE海底电缆绝缘性能影响[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(4):111–118.
- HUANG Jianping, CHEN Yilin, PENG Xiangyang, et al. Effect of electric ageing on insulation performance of crosslinked polyethylene submarine cable[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(4):111–118.