

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

张 巍¹, 韩圣斌¹, 李秀峰¹, 刘正第¹, 魏 凯²

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 山东七星电气科技发展有限公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 为了研究热老化条件下高压电缆终端接头内涂覆硅脂对交联聚乙烯绝缘/硅橡胶绝缘复合界面多物理场分布的影响, 采用 COMSOL Multiphysics 软件建立了 110 kV 电缆终端接头电-热-力多物理场模型, 仿真分析了热老化下涂覆硅脂前后复合界面电场、温度场以及应力场的分布。结果表明: 界面涂覆硅脂后, 增加了界面的密封性, 使界面电场畸变程度减小, 界面温升略微下降, 但界面应力呈现不均匀分布。老化后, 硅脂对硅橡胶的溶胀造成硅橡胶相对介电常数升高, 界面电荷密度增大, 电场强度进一步增大。温度升高加剧了硅脂对硅橡胶的渗透, 使硅橡胶材料热导率降低, 界面温度较老化前升高。老化后, 涂覆硅脂的硅橡胶弹性模量大幅降低, 界面应力进一步减小。

关键词: 电缆终端接头; 电-热-力; 硅脂; 绝缘老化

中图分类号: TM247 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.06.012

Effect of coating silicone grease on electrical-thermal-mechanical field at interface of 110 kV cable terminal joint under thermal ageing

ZHANG Wei¹, HAN Shengbin¹, LI Xiufeng¹, LIU Zhengdi¹, WEI Kai²

(1. College of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Seven Star Electric Technology Development Co., Ltd., Zibo 255000, China)

Abstract: In order to study the effect of coating silicone grease on the distribution of multiple physical fields at the crosslinked polyethylene/silicone rubber composite interface under thermal ageing, the electrical-thermal-mechanical multiphysics field model of 110 kV cable terminal joints was established using COMSOL Multiphysics software. The distribution of electric field, temperature field, and stress field at the composite interface before and after coating silicone under thermal ageing was simulated. The results show that after coating with silicone grease, the sealing degree of the interface increases, which decreases the distortion degree of the electric field and leads to the slight decrease of the temperature rise of the interface, but the stress of the interface distributes unevenly. After ageing, the swelling of silicone grease on silicone rubber increases the relative dielectric constant of silicone rubber, and the interfacial charge density, and causes the electric field strength increase further. The increase of temperature promotes the penetration of silicone grease to silicone rubber, which decreases the thermal conductivity of silicone rubber and make the interface temperature higher than that before ageing. Under thermal ageing, the elastic modulus of the silicone rubber coating with silicone grease decreases significantly and the interfacial stress decreases further.

Key words: cable termination joints; electrical-thermal-mechanical; silicone grease; insulation ageing

0 引言

电缆附件在电力输配电系统中扮演着衔接、过渡等重要角色, 是保证电力系统正常运行不可或缺的重要组成部分。电缆附件包含电缆中间接头和电缆终端接头, 由于其内部使用多层固体介质绝缘

结构^[1-2], 实际运行过程中在电、热、力和环境因素的共同作用下, 电缆本体交联聚乙烯(XLPE)绝缘和附件硅橡胶(SR)绝缘逐渐发生老化^[3], 导致复合界面处的电气、力学等性能下降, 影响电缆的可靠运行。

目前, 国内外学者针对电缆终端 XLPE 和 SR 复合界面的电场、温度场以及力学特性展开了大量研究。咎海斌等^[4]分析了高压电缆终端接头在绝缘层

基金项目: 淄博市张店区校城融合发展计划项目(2021JSCG0009)。

和应力锥界面出现气泡和水珠缺陷时的电场分布特性,结果表明复合绝缘界面出现气泡和水珠时会使界面电场发生畸变,严重时可导致绝缘层发生局部放电。谢晨等^[9]通过改变应力锥处绝缘部分和导电部分的分配比例以及金属应力曲率,采用电流-温度-电压仿真法对电缆终端电场进行优化,提高了电缆终端的可靠性。孟春玲等^[6]基于弹性力学理论和试验,建立 110 kV 预制式电缆终端接头界面压力的仿真模型,发现界面压力与应力锥弹性模量呈正相关。王磊等^[7]建立了电缆接头沿电缆方向的纵向剖面模型,研究电缆接头温度场分布,通过对模型施加相应的热载荷,发现电缆接头温度与导体间的接触压力成反比,与电缆导电线芯中的电流成正比。

硅橡胶预制式电缆附件在实际运行时,为了增加电缆本体与附件界面处的密封度^[8-9],通常会在界面处涂覆一层硅脂^[10]。而在电缆附件的长期运行过程中,硅脂会逐渐渗入硅橡胶中引起溶胀^[11],导致硅橡胶的体积电阻率下降。文献[12-13]表明涂覆硅脂的 XLPE/SR 界面会出现显著的空间电荷特性变化,并且硅橡胶的力学性能也会发生劣化。而对电缆本体 XLPE 绝缘层和接头内硅橡胶绝缘界面涂覆硅脂发生老化后,电缆终端接头界面处电场、温度场以及界面应力的影响报道较少。

本文使用 COMSOL Multiphysics 软件,建立 110 kV 电缆终端接头仿真模型,研究涂覆硅脂老化前后对电缆终端接头 XLPE/SR 复合界面电场、温度场、界面应力分布的影响规律。

1 实验

1.1 试样制备

XLPE 试样制备:选用南京中超新材料股份有限公司生产的 XLPE 绝缘料,使用平板硫化机在 175℃、15 MPa 的条件下压制成若干个厚度约为 1 mm 的试片。

SR 试样制备:选用山东七星电气科技发展有限公司提供的 SR 生胶,使用平板硫化机在 135℃、15 MPa 的条件下模压 12 min,冷却 3 min 后取出,制得若干个厚度为 1 mm 的试样。

1.2 热老化实验

在制备好的交联聚乙烯试样表面均匀涂覆一层硅脂,然后将硅橡胶试样平铺在涂覆硅脂后的交联聚乙烯试样表面上,用质量为 10 kg 的铁板施加压力,并将其放入 135℃ 热老化箱中加速老化 168 h。

1.3 测试方法

1.3.1 相对介电常数

采用固体绝缘材料电容量及介损测量装置(QS87型,上海杨高电器有限公司)对各试样的介电常数进行测试。实验电压为 1 kV,试样直径为 50 mm,厚度为 1 mm。

1.3.2 体积电导率

采用三电极系统(高阻计为 ZC36 型,上海第六电表厂有限公司),在 23℃ 下测量各试样的体积电阻率(其倒数为体积电导率)。实验电压为 1 kV,试样直径为 50 mm,厚度为 1 mm。

1.3.3 导热系数

采用激光闪射导热仪(LFA 467 HyperFlash 型,德国耐驰公司)分别测量涂覆硅脂老化前后 XLPE 和 SR 的导热系数,测量电压为 250 V,脉冲宽度为 400 ns。

1.3.4 弹性模量

使用冲压机按照 GB/T 1040—2018 和 GB/T 528—2009 分别将交联聚乙烯和硅橡胶试样裁剪成 5 型哑铃状试样和 II 型哑铃状试样。采用万能试验机(UTM2103 型,深圳三思纵横公司)按照上述标准分别对 XLPE 和 SR 试样的弹性模量进行测定,XLPE 和 SR 的拉伸速度分别设定为 250 mm/min 和 500 mm/min。每组试样各测 5 次,并求取平均值作为测试结果。试样的弹性模量计算公式为式(1)。

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

式(1)中: E 为聚合物的弹性模量; $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\varepsilon$ 分别为拉伸时的应力值和应变值。

1.3.5 表面粗糙度

采用原子力显微镜(WY-6800-AFM 型,微仪光电(天津)有限公司)对 XLPE 材料表面粗糙度进行观测。在接触模式下扫描范围是 10 μm ×10 μm ,垂直分辨率为 0.03 nm,水平分辨率为 0.2 nm,扫描点为 512×512。

各试样的体积电导率、相对介电常数、导热系数、弹性模量测试数据列于表 1 中。XLPE 试样表面粗糙度参数如表 2 所示。

2 仿真建模

2.1 电缆终端结构及参数

本文使用 YJLW03-1×800 mm² 型 110 kV 电压等级 XLPE 绝缘电缆作为研究对象,尺寸参数如表 3 所示。为了下文计算方便,将电缆终端结构图简化,其剖视图如图 1 所示。表 4 为电力电缆仿真参数^[14]。

表1 材料仿真参数

材料	相对介电常数	体积电导率/(S/m)	导热系数/(W/(m·K))	弹性模量/MPa	
XLPE	未涂覆老化前	2.15	3.92×10^{-15}	0.30	1.08×10^2
	未涂覆老化后	2.35	1.11×10^{-14}	0.31	0.97×10^2
	涂覆老化前	2.11	3.58×10^{-15}	0.31	1.04×10^2
	涂覆老化后	2.34	1.09×10^{-14}	0.32	0.95×10^2
	未涂覆老化前	2.93	1.57×10^{-15}	0.26	1.35
	未涂覆老化后	3.13	2.72×10^{-14}	0.23	0.87
SR	涂覆老化前	2.85	1.11×10^{-15}	0.27	1.01
	涂覆老化后	3.21	4.86×10^{-14}	0.22	0.76

表2 XLPE 表面粗糙度参数
Tab.2 Surface roughness parameters of XLPE

参数	表面轮廓高度的平均值 $W/\mu\text{m}$	表面轮廓高度的均方根 $S_w/\mu\text{m}$	表面轮廓宽度的平均值 $A/\mu\text{m}$	表面轮廓宽度的均方根 $S_a/\mu\text{m}$	表面轮廓基本单元高度的平均值 $R/\mu\text{m}$
数值	4.08	3.88	2.28	6.32	1.02

表3 110 kV 电力电缆结构尺寸参数
Tab.3 Structural dimensional parameters of 110 kV power cables

名称	内直径/mm	外直径/mm	厚度/mm
导电线芯	—	34	—
内屏蔽	34	36.4	1.2
绝缘	36.4	68.4	16
外屏蔽	68.4	70.4	1

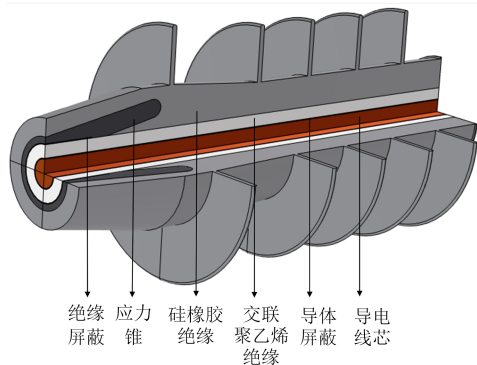


图1 110 kV 电缆终端仿真模型

Fig.1 110 kV cable termination simulation model

2.2 电场仿真

静电场是存在于静止电荷周围、不随时间变化

表4 110 kV 电力电缆仿真参数

参数	铜	交联聚乙烯	硅橡胶	半导电屏蔽
体积电导率/(S/m)	5.99×10^7	$3.92 \times 10^{-15*}$	$1.57 \times 10^{-15*}$	3.00
相对介电常数	1.00×10^4	2.15*	2.93*	1.00×10^2
恒压热容/(J/(kg·K))	3.85×10^2	1.63×10^3	2.00×10^3	1.48×10^3
导热系数/(W/(m·K))	4.00×10^2	0.30*	0.26*	0.29
密度/(g/cm ³)	8.89	0.92	1.12	1.34
弹性模量/MPa	1.26×10^5	$1.08 \times 10^2*$	1.35*	1.14
泊松比	0.34	0.37	0.49	0.49

注:*表示为实测数据。

的电场。工频交流电气设备中,不同电位导体间的电位差随时间的变化比较缓慢,导体间距离远小于相应电磁场的波长,所以在任一瞬间工频交流电气设备中的电场可近似视作为静电场^[15-17],其基本方程为式(2)。

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases} \quad (2)$$

对于各向同性电介质,有式(3)~(4)。

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{\mathbf{E}} \quad (4)$$

式(2)~(4)中: \mathbf{J} 表示电流密度; \mathbf{H} 表示磁场强度; \mathbf{B} 表示磁感应强度; \mathbf{D} 表示电感应强度矢量; \mathbf{E} 表示电场强度; ρ 表示电荷密度; γ 表示电导率; ϵ_0 表示真空介电常数; ϵ_r 表示相对介电常数。

2.3 温度场仿真

温度场控制方程如式(5)所示

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5)$$

式(5)中: C_p 表示恒压热容; ρ 表示材料密度; k 表示导热系数; \mathbf{u} 表示位移; T 表示温度; Q 为热源。

电缆终端产热方式主要考虑导体的焦耳热以及绝缘损耗产热^[18]。

对于单芯电缆,导体产热率如式(6)所示。

$$Q = I^2 R/S \quad (6)$$

式(6)中: Q 为单位时间内单位长度导体产生的热量; I 为通过导体的电流; R 为单位长度导体的交流电阻; S 为导电线芯的截面积。

绝缘损耗产热功率如式(7)所示。

$$P = U^2 \omega C \tan \delta \quad (7)$$

式(7)中: U 表示施加在电介质的电压; P 表示绝缘损耗发热功率; C 表示电介质电容; ω 表示角频率; $\tan \delta$ 表示介质损耗因数。

2.4 应力场仿真

应力场控制方程如式(8)所示。

$$\begin{cases} \nabla \cdot s + F_v = 0 \\ s = s_0 + C:(\varepsilon_{ic} - \varepsilon_{in} - \varepsilon_{th}) \\ C = C(e, v) \\ \varepsilon_{ic} = (\nabla u + (\nabla u)^T)/2 \\ \varepsilon_{th} = \alpha(T)(T - T_{ref}) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: s 表示应力状态量; F_v 表示连续分布在构件内部各点处的力; s_0 表示应力张量的初始值; ε_{ic} 表示物体内部各点相对于初始状态的变形量; ε_{th} 表示应变阈值; ε_{in} 表示应变张量的初始值; e 表示杨氏模量; v 表示横向应变系数; u 表示物体内部各点相对于参考位置的位移量; α 表示热膨胀系数; T_{ref} 表示应变参考温度。

2.5 边界条件和网格划分

根据高压电缆接头实际运行条件,电场的初始条件为:将电缆线芯导体的电位设置为 64 kV,频率设置为 50 Hz;边界条件为:绝缘屏蔽层与接地部位为 0 电位。温度场的初始条件为:将接头外部环境温度为 293.15 K 即 20°C;边界条件为:将接头与空气接触的屏蔽层的对流换热参数 h 取 5.6 W/(m²·K)^[14]。应力场的初始条件为:电缆附件与主绝缘结合界面的初始面压取 0.25 MPa^[19],远离电缆接头处忽略轴向传热,即该处轴向位移分量为 0;边界条件为:接头表面的约束条件为没有任意位移与外施压力,即设置为自由^[14]。

将模型进行简化网格剖分处理,简化后的示意图如图 2 所示。取值位置以界面应力锥根部处为起点,沿轴向长度 210 mm 绘制界面陷阱能级、电荷密度、电场、温度场以及应力场的分布曲线。

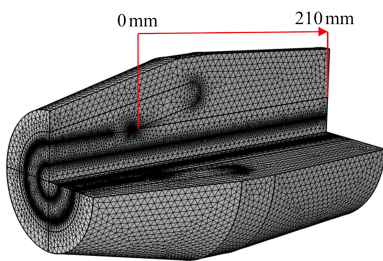


图2 模型网格剖分图

Fig.2 Model mesh profile

3 仿真结果与分析

3.1 气隙空腔涂覆硅脂对 XLPE/SR 界面电-热-力场分布的影响

电缆附件为固-固(XLPE/SR)绝缘结构,固体介质表面并非绝对光滑,其接触界面存在微米级空

腔^[20]。由于空腔中的气隙和固体绝缘介电常数不同,在界面空腔与固体绝缘交界处极易引发电场畸变,导致绝缘劣化。因此,通过涂覆硅脂减小界面空腔尺寸或将其有效填充,提高电缆附件的界面电气性能。

采用表 2 交联聚乙烯表面粗糙度参数和文献[21]中界面接触理论的力学模型,计算轮廓峰值高度的标准偏差(σ)^[22]、空腔的曲率半径(β_m)^[22]、表面密度(η)^[23]、真实界面与参考界面接触面积的比值(A_{re}/A_a)^[24],计算公式如式(9)~(12)所示。将其计算结果代入式(13)中,计算界面空腔的平均直径 d 。

$$\sigma = 0.35 \sqrt{W^2 + S_w^2} \quad (9)$$

$$\beta_m = \frac{A^2 + S_a^2}{16R} \quad (10)$$

$$\eta = 1.2D^2, D = 1/AR \quad (11)$$

$$A_{re}/A_a \approx 3.2 \frac{P_a}{E' \sqrt{\sigma/\beta_m}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} d = 2 \sqrt{\frac{A_a - A_{re}}{n\pi}} \\ n = 1.21\eta A_a \left[\frac{P_a}{(\eta\sigma\beta_m)E' \sqrt{\sigma/\beta_m}} \right]^{0.88} \end{cases} \quad (13)$$

式(9)~(13)中: W 和 S_w 分别是表面轮廓高度的平均值和均方根; A 和 S_a 分别为表面轮廓宽度的平均值和均方根; R 为表面轮廓基本单元高度的平均值; A_{re}/A_a 为真实界面与参考界面接触面积的比值; P_a 为界面的接触压力; E' 为交联聚乙烯和硅橡胶复合弹性模量。

上述计算所得界面空腔参数值如表 5 所示。

表 5 各参数计算值

Tab.5 Estimates of each parameter

参数	$\sigma/\mu\text{m}$	$\beta_m/\mu\text{m}$	$\eta/\mu\text{m}$	$A_{re}/A_a/\%$	$d/\mu\text{m}$
计算值	1.97	2.77	0.23	1.25	130

为探究界面存在气隙空腔涂覆硅脂对 XLPE/SR 界面电-热-力场分布的影响,根据表 5 界面空腔参数值,在 XLPE 和 SR 界面处构建空腔,相邻空腔之间存在连接区,连接距离和空腔直径相同,均为 130 μm ,其示意图以及界面处电场、温度和应力分布曲线取值位置如图 3 所示。涂覆硅脂前、后的界面电场分布以及温度分布曲线如图 4 所示。涂覆硅脂区域的应力分布曲线如图 5 所示。

从图 4(a)可以看出,界面存在空腔时电场强度最高达到 5.98 kV/mm,且畸变严重。而填充硅脂后,界面电场畸变程度下降,场强降低至 3.72 kV/mm。

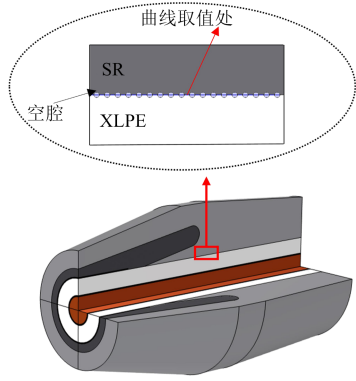
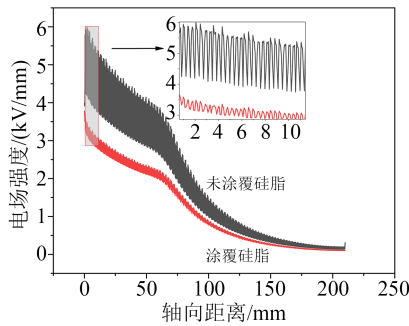
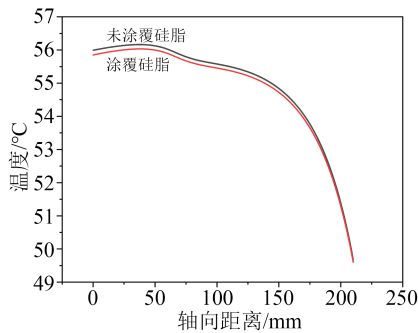


图3 高压电缆接头含气隙空腔示意图
Fig.3 Schematic diagram of air gap cavity in high voltage cable joint



(a) 电场分布曲线



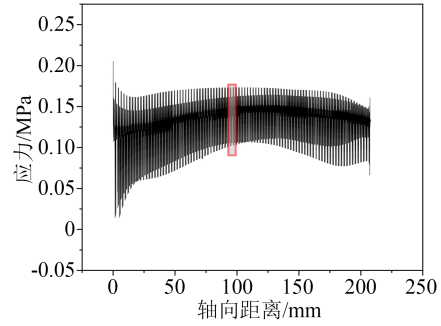
(b) 温度分布曲线

图4 界面空腔涂覆硅脂前、后的界面电场分布以及温度分布曲线

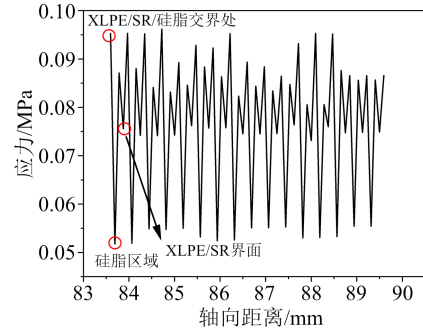
Fig.4 Interfacial electric field and temperature distribution curves before and after interfacial cavity coated with silicone grease

当界面存在微小气隙时,交联聚乙烯与硅橡胶界面无法紧密贴合,形成半实半空的接触形态^[20],在此种形态下,空腔的存在会使界面电场强度发生畸变。而界面涂覆硅脂后,由于硅脂是由聚二甲基硅氧烷与白炭黑混合而成^[25],具有较高的润滑性和密封性,减小了空腔的数量及尺寸,提高了界面的气密性,改善了电场分布。

由图4(b)可知,与未涂覆硅脂相比,在轴向距离小于 175 mm 范围内,空腔填充硅脂后的界面温度



(a) 界面应力分布曲线



(b) 局部放大图

图5 界面空腔涂覆硅脂后的界面应力分布曲线

Fig.5 Interfacial stress distribution curve after interfacial cavity coated with silicone grease

出现略微下降;当轴向距离大于 175 mm,涂覆硅脂前后界面处温度无明显变化。可见,涂覆硅脂对界面处温度影响较小。

从图5(a)可以看出,界面含有空腔时,存在3种界面结合区,分别为XLPE/SR/硅脂交界处、空腔内部区域以及XLPE/SR交界面。不同界面结合区的应力呈现不均匀分布,XLPE/SR/硅脂三者交界处的应力最大,若空腔内部为纯硅脂区域,其应力最小,XLPE/SR界面应力介于两者之间。由于XLPE/SR/硅脂三者形成三层复合界面,XLPE/SR形成双层复合界面,其交界面都会受到安装附件初始面压的影响,复合材料间相互挤压产生的应力存在差异,导致三层复合介质的界面压力比双层复合介质更大。而纯硅脂区域内部未和其他材料形成界面,各部位弹性模量一致,受到挤压程度较小,所以其应力分布均匀且较小。

3.2 硅橡胶涂覆硅脂对电缆终端界面电-热-力场分布的影响

电缆附件在长期运行过程中,硅脂扩散进入硅橡胶内部,破坏硅橡胶与白炭黑之间的物理交联结构和硅橡胶本身的化学交联结构^[26],加速绝缘的老化,会对复合界面的电气强度、温度和应力分布造成影响。为了进一步探究涂覆硅脂对XLPE/SR界面老化特性的影响,对电缆终端复合界面进行电-

热-力场仿真分析。

3.2.1 硅橡胶涂覆硅脂对电缆终端界面电场的影响

高压电缆终端接头界面电场分布不均匀,易发生局部电场畸变,而电场畸变主要受界面电荷分布的影响^[27]。与直流电场下不同,空间电荷在交流电场下的积聚是一个长期过程,这个过程也是绝缘材料的劣化过程^[28]。在这个过程中,电荷不断地注入、抽出,同时带电载流子被电缆绝缘内部存在的陷阱捕获^[29],导致空间电荷积聚。为了研究 XLPE/SR 界面电荷运输机理,通过电荷被捕获概率和载流子迁移率探究界面电荷的迁移过程。

电荷从被捕获的陷阱中脱陷的概率如式(14)所示^[30]。

$$n = B \exp \left(- \left(\frac{E_1}{k_B T} - \frac{e\lambda E(x)}{2k_B T} \right) \right) \quad (14)$$

式(14)中: B 为常数; E_1 为陷阱能级; k_B 为玻尔兹曼常数; T 为温度; e 为电子电荷量; λ 为陷阱间平均距离; $E(x)$ 为外施电场强度; x 指陷阱所处的坐标位置。

载流子的迁移率如式(15)所示^[31]。

$$\mu = \frac{2\lambda v}{E} \exp \left(- \frac{\phi}{k_B T} \right) \sinh \left(\frac{eE\lambda}{2k_B T} \right) \quad (15)$$

式(15)中: v 为声子频率; ϕ 为相邻陷阱间的势垒。

由式(14)可知,电荷的脱陷概率与电场强度成正比,与陷阱能级成反比。因此,电场强度越高,电荷从深能级陷阱脱陷的概率越大。由式(15)可见,相邻陷阱间的势垒越大,载流子的迁移速率越小。应力锥根部处由于自身几何结构的影响,电场强度较大^[32],无论正电荷或负电荷,较易从入陷的陷阱中脱陷,但电荷在电场强度增大方向迁移途径的陷阱能级较深^[33],电荷在深陷阱间跳跃传递时迁移速率缓慢,容易出现积聚现象。由 3.1 节界面电场分布可知,随着轴向距离的增加,电场强度逐渐减小,电荷从陷阱中脱陷的概率有所降低,而电荷沿电场强度减小方向迁移途径的陷阱能级相对较浅^[33],因此,电荷向电场减小方向移动的迁移率大于向电场增大方向移动的迁移率,减小了界面电荷的积累。

在电缆附件运行中,XLPE/SR 界面涂覆硅脂可以有效提高界面的击穿强度^[34],但随着硅脂对硅橡胶的溶胀作用,XLPE/SR 界面的绝缘强度降低^[35]。为了模拟硅橡胶涂覆硅脂对电缆终端 XLPE/SR 界面电场强度的影响,通过改变涂覆硅脂老化前后绝缘材料的相对介电常数和体积电导率来表征界面的电场强度变化^[36]。110 kV 电缆终端电场分布情况如图 6 所示。未涂覆和涂覆硅脂老化前后 XLPE 与

SR 界面电场强度变化曲线如图 7 所示。

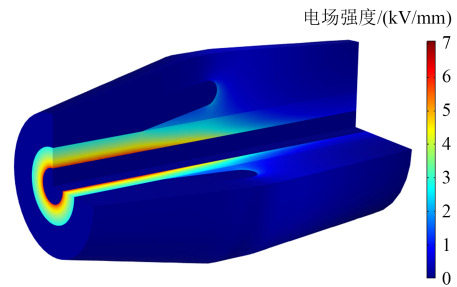


图 6 110 kV 电缆终端电场分布

Fig.6 110 kV cable terminal electric field distribution

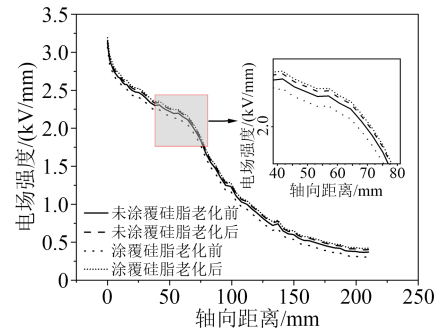


图 7 XLPE 与 SR 界面电场强度变化曲线

Fig.7 Electric field strength change curve at the interface of XLPE and SR

从图 6~7 可以看出,随着轴向距离的增加,XLPE/SR 界面的电场强度呈现“阶梯状”下降分布,第一阶段电场强度下降至 2 kV/mm 左右,而第二阶段电场强度下降较快,降至 0.5 kV/mm 以下。应力锥根部处的高场强加大了此处的深陷阱能级^[33],载流子在此处的迁移速率减慢,会发生电荷积聚现象。另外,交联聚乙烯在长时间交流电压作用下,内部会积聚不随交流相位变化的非交变电荷^[37],此类电荷消散缓慢,在电场作用下非交变电荷向应力锥根部区域迁移^[29],引起界面电荷积聚。因此,另一阶段电场强度下降速率缓慢。而第二阶段,随着界面距离的增加,电场线逐渐稀疏,对电荷的束缚力减小^[14],电荷容易扩散,导致衰减速度较快,电荷积聚密度较小,电场强度相对较低。

从图 7 还可以看出,老化前,涂覆硅脂后的界面电场强度小于未涂覆硅脂时的电场强度。硅脂以 Si-O 键和 CH₃ 基为主,是非极性绝缘膏体,硅脂的涂覆会填充 XLPE/SR 固体界面的微小气隙,形成交联聚乙烯/硅脂/硅橡胶三层微界面,改善了介电常数的非连续性,使电场畸变程度减小。

老化后,未涂覆硅脂的界面电场强度小幅上升,最高达到 2.70 kV/mm。老化过程中,交联聚乙烯和硅橡胶分子链结构发生断裂^[38],生成游离基和

小分子短链,可供极化分子数量增多,相对介电常数增大。若小分子和游离基发生聚集,易形成空间电荷^[3],界面电场强度发生畸变。

涂覆硅脂老化后复合界面上最大电场强度继续增大,高达 3.19 kV/mm。在此条件下,两种材料的相对介电常数和体积电导率会发生变化(如表 1 所示),进而影响界面的电荷密度,其关系表达式如式(16)所示^[39]。

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0(\gamma_1\varepsilon_2 - \gamma_2\varepsilon_1)}{d_1\gamma_2 + d_2\gamma_1}U_0 \quad (16)$$

式(16)中: σ 为界面的电荷密度; ε_0 为真空介电常数; γ_1 、 γ_2 分别为 XLPE 和 SR 的体积电导率; ε_1 、 ε_2 分别为 XLPE 和 SR 的相对介电常数; d_1 、 d_2 分别为 XLPE 和 SR 的厚度; U_0 为两层介质上的电压。

由于硅脂和硅橡胶都属于以硅氧键为主链的聚有机硅氧烷^[19],老化过程中,硅脂不断渗透到硅橡胶中去,引入了大量与硅橡胶主链结构相似的短链,这些短链分子对硅橡胶自由体积的填充使硅橡胶体积增大,发生溶胀^[26],导致硅橡胶单位体积内可极化分子数增多^[40],极化程度增大,硅橡胶的相对介电常数 ε_2 增大。由于硅脂对 XLPE 几乎不发生溶胀^[41],近似认为 XLPE 的厚度 d_1 基本不变,而硅脂对 SR 的溶胀作用会导致硅橡胶体积增大,使其厚度产生变化。当厚度变化小于等于 0.5 mm,界面电荷密度仅增大了 0.85%,硅橡胶的厚度 d_2 变化对界面电荷密度的影响甚微。可见,界面两种材料的相对介电常数和电导率的变化对电荷密度占据主导因素。将表 1 中未涂覆硅脂和涂覆硅脂老化后两种介质的电导率和相对介电常数分别代入式(16),发现涂覆硅脂老化后界面的电荷密度增大了 73.2%,因此涂覆硅脂老化后界面电场强度最大。

3.2.2 硅橡胶涂覆硅脂对电缆终端界面温度的影响

110 kV 电缆终端温度场分布如图 8 所示,未涂覆和涂覆硅脂老化前后 XLPE 与 SR 复合界面温度变化曲线如图 9 所示。

从图 8 可以看出,对于标称截面积为 800 mm² 的 110 kV 交联聚乙烯电缆而言,当达到额定载流量 1 200 A 时,导电线芯运行温度为 75.0℃,温度自导电线芯沿径向距离逐渐降低,符合热传导定律。XLPE/SR 界面温度最高出现在应力锥根部,高达 56.0℃。这是由于应力锥根部处电荷密度较大,电荷积聚使介质电容增大^[4],由式(7)可知,绝缘损耗的发热功率与介质电容成正比,导致此处温度较高。随着轴向距离的增加,电场强度下降较快,电

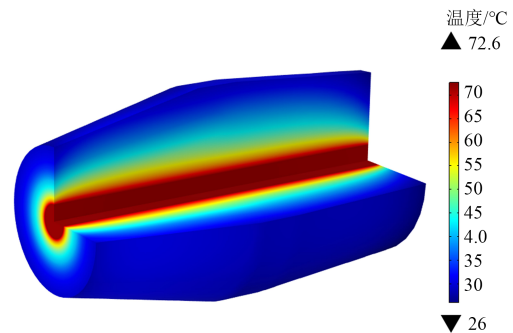


图 8 110 kV 电缆终端温度场分布

Fig.8 110 kV cable termination temperature field distribution

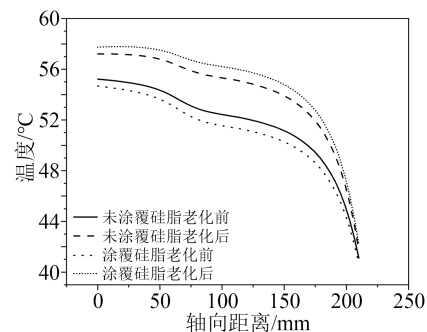


图 9 XLPE 与 SR 界面温度变化曲线

Fig.9 Temperature change curve at the interface of XLPE and SR

荷逐渐扩散,界面温度下降较快。

从图 9 可以看出,在老化前,未涂覆硅脂的 XLPE/SR 界面温度最高为 55.2℃。从径向传热的角度来看,由于 XLPE 与 SR 间的不完全接触或者存在微小的间隙,使界面留有空气层,而空气的导热系数较小,热量在 XLPE 和 SR 界面之间的传导速度相对较慢,温度较高。从轴向传热的角度来看,硅橡胶的热量主要靠“声子”进行传导,即晶体网格或交联网络振动的定向传递^[42]。而硅橡胶材料分子链间空隙较大,空间网络传递振动的能力有限,导热性能受到其掺杂的白炭黑颗粒所形成的附聚体的尺寸影响较大^[43]。白炭黑颗粒间传递振动的效率更高,使介质的整体热扩散能力略微提升,因此,界面轴向温度范围介于 41.1~55.2℃。涂覆硅脂后,界面温度出现略微下降。这是由于此时硅脂充当导热媒介,代替原有的空气层,导热系数变大^[44],径向热量传输更加顺畅,使界面温度出现略微降低。同时,沿轴向方向硅脂填了充空气层,也可有效降低界面热阻^[44],加快轴向方向的传热速率,因此界面温度值较未涂覆硅脂时降低。

老化后,未涂覆硅脂的试样,XLPE/SR 界面温度上升了 2.1℃左右。这与 XLPE 和 SR 导热系数的变化密切相关。由表 1 试样的导热数据可知,相比

于老化前,老化后未涂覆硅脂的试样,交联聚乙烯的导热系数升高 $0.01 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而硅橡胶的导热系数下降了 $0.03 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,热量自XLPE向SR传输效率较低,界面径向传热受阻,温度升高。另外,热老化会对硅橡胶内部交联网络的结构造成一定影响。老化后,硅橡胶Si-O键发生断裂^[45],白炭黑颗粒与硅橡胶基体粘附力逐渐减小,白炭黑颗粒自由度提升,增加了空间网格多方向的振动,硅橡胶内交联网络定向传递效率下降,导热能力降低,界面轴向传热速率缓慢,热量在界面发生滞留,界面温度升高。

涂覆硅脂老化后,界面温度再次升高,最高达到 57.9°C 。一方面,热老化的作用加剧了硅脂对硅橡胶的渗透,硅橡胶体积膨胀,改变了硅橡胶的表面轮廓,导致硅橡胶表面粗糙度增加^[46],材料热导率变小,界面处再次出现空气层,界面径向传热能力降低,温度升高。另一方面,硅脂对硅橡胶的溶胀作用加速了硅橡胶的老化,导致硅橡胶的交联结构破坏严重^[26],白炭黑颗粒与硅橡胶基体的粘附力更弱,降低了硅橡胶交联网络定向传热的连续性,界面轴向传热效率降低,因此界面温度比未涂覆硅脂老化时进一步升高。

3.2.3 硅橡胶涂覆硅脂对电缆终端界面应力的影响

图10为110 kV电缆终端应力分布图。图11为未涂覆和涂覆硅脂老化前后XLPE与SR复合界面的应力变化曲线。从图10~11可以看出,界面应力最大值出现在交联聚乙烯、应力锥和硅橡胶三者交界处,高达 0.198 MPa ,并且随着轴向距离的增加,界面应力呈现先降低后升高的分布规律。从表4可以看出,3种材料的弹性模量存在较大的差异,其形成的交界面受到硅橡胶的预扩张所产生的“抱紧力”的影响^[47],导致界面处相互挤压,从而引起应力集中,导致应力锥根部处界面应力较大。在界面距离 13 mm 处形成XLPE/SR界面,由于此处电场强度较高,使绝缘损耗产热率增大,引起局部热点集中,温度升高,造成分子间热运动速率增大,作用力减弱,从而使XLPE和SR材料弹性模量降低,界面应力显著减小。随着轴向距离的增加,电场强度减小,电荷逐渐消散,使温度下降较快,此时,两种绝缘介质的分子热运动速率减缓,运动阻力升高,分子间作用力增强,导致界面应力随之增大。

老化前,与未涂覆硅脂相比,涂覆硅脂后的界面应力略有减小。虽然交联聚乙烯的弹性模量出现下降(如表1所示),但对界面应力的变化程度极

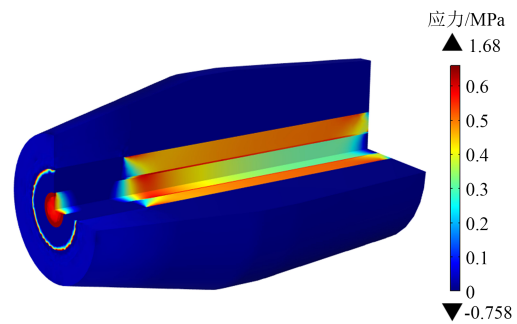


图10 110 kV电缆终端应力分布图

Fig.10 110 kV cable termination stress distribution

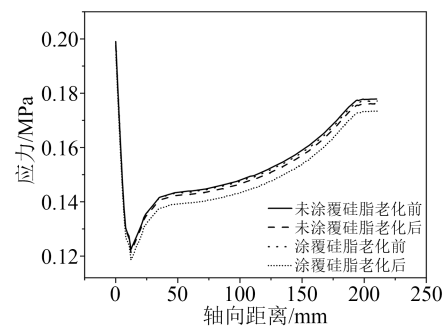


图11 XLPE与SR界面应力分布曲线

Fig.11 Stress distribution curve at the interface of XLPE and SR

小^[48],故可忽略交联聚乙烯弹性模量的变化对界面应力的影响,而硅橡胶试样弹性模量大幅下降,其抵抗形变能力变弱,从而使电缆接头SR与XLPE之间的“抱紧程度”减小,导致界面应力略有减小。另外,由于硅脂分子具有较强的渗透性,能够渗透到XLPE/SR界面的微观孔隙和裂纹中,从而降低了应力集中的程度,使界面应力略有减小。

老化后,未涂覆硅脂试样界面应力减小,而涂覆硅脂试样界面应力进一步减小。根据表1数据可知,老化后,未涂覆硅脂的硅橡胶弹性模量降低了 35.6% ,而涂覆硅脂的硅橡胶弹性模量进一步下降了 43.7% 。由于界面应力与硅橡胶的弹性模量呈正相关^[43],涂覆硅脂老化造成硅橡胶弹性模量的下降,从而导致界面应力明显降低。且老化过程中,硅橡胶发生氧化和裂解反应引起分子链断链,消除了链段运动的阻力^[43],出现应力松弛现象,也进一步导致界面应力下降。随着硅脂对硅橡胶的渗透速率逐渐增大,使硅橡胶体积膨胀,分子间距离增加,分子链的热运动加剧,削弱了分子间作用力,宏观表现为橡胶弹性模量降低,界面应力明显下降。

4 结论

(1)复合界面气隙空腔涂覆硅脂后,使界面电场畸变强度变小,界面温升略微降低。但涂覆硅脂

后存在三种界面结合区,各界面结合区的应力呈现不均匀分布。

(2)涂覆硅脂填充了界面的空隙,使界面电场强度减小。但热老化后,温度升高加速了硅脂对硅橡胶的溶胀,单位体积内引入更多的可极化分子,硅橡胶的相对介电常数增大,使界面积聚更多电荷,界面电场强度增大。

(3)界面涂覆硅脂后,由于硅脂的导热系数较大,使界面热量传输速率较快,界面温度下降。热老化后,硅脂对硅橡胶的渗透速率加快,造成硅橡胶的交联结构被破坏,降低了交联网络传热的连续性,界面温度升高。

(4)局部电场强度增大、温度升高加剧了硅橡胶分子链的热运动,使分子间的作用力减弱,产生应力松弛现象,造成界面应力减小。老化后,涂覆硅脂试样界面应力进一步下降。可见,电缆附件界面涂覆硅脂可以解决界面密封不良的问题,改善了界面电场和温度畸变程度,但在热老化条件下,硅脂对硅橡胶的溶胀作用加速了硅橡胶的老化,导致界面电-热-力场畸变,劣化了界面性能。

参考文献:

- [1] 刘宗喜,张磊,欧阳本红,等.500kV直流电缆接头增强绝缘设计关键参数及其控制研究[J].绝缘材料,2021,54(12):80-86.
- [2] 李巍巍,朱轲,吴驰,等.不同温度下受潮电缆终端头的绝缘状态研究[J].环境技术,2016,34(4):6-10,23.
- [3] 赵健军,李秀峰,许庆重,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.
- [4] 管海斌,李国倡,王景兵,等.动车组车顶高压电缆终端电场仿真及界面缺陷模拟研究[J].绝缘材料,2020,53(3):99-104.
- [5] 谢晨,潘文霞,孙凯,等.基于多物理场的预置式(插拔式)海底电缆终端电场优化研究[J].高压电器,2020,56(1):135-140.
- [6] 孟春玲,徐浩,孙丽莹,等.110kV预制式电缆终端界面压力的研究[J].绝缘材料,2021,54(9):97-102.
- [7] 王磊,刘建国,严浩军,等.基于有限元分析法的电缆中间接头温升仿真研究[J].上海电力学院学报,2014,30(5):428-432.
- [8] SONG M, JIA Z. Calculation and simulation of mechanical pressure of XLPE-SR surface in cable joints[C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China: IEEE,2018:1001-1005.
- [9] 刘昌,惠宝军,傅明利,等.机械应力对硅橡胶高压电缆附件运行可靠性的影响[J].高电压技术,2018,44(2):518-526.
- [10] SPELZHAUSEN S, IONIAN M R, PLATH R. Electrical field-strength dependent space charge and charge decay characteristics at silicone rubber/silicone grease interfaces[C]//2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE,2018:66-69.
- [11] 赵莉华,李彦姝,邱九皓,等.硅脂环境下硅橡胶的吸收特性及其关键电气性能研究[J].电力工程技术,2021,40(5):41-46.
- [12] ZHU B, HU H, JIA Z, et al. Effects of silicone grease on silicone rubber in physical characteristics[C]//2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference. Beijing, China: IEEE,2018:407-410.
- [13] 王霞,朱有玉,张宇巍,等.界面涂敷料对XLPE和SIR复合绝缘界面空间电荷特性的影响[J].高电压技术,2016,42(8):2382-2387.
- [14] 邓繁盛,高娜,李秀峰,等.基于电-热-力场的10 kV电缆终端典型缺陷仿真研究[J].绝缘材料,2023,56(3):100-106.
- [15] 严璋,朱德恒.高电压绝缘技术(第三版)[M].北京:中国电力出版社,2015:5-23.
- [16] 徐吉来,高克利,万保权,等.交流输电线路附近民房上方电场解耦计算方法[J].中国电机工程学报,2023,43(20):8141-8151.
- [17] 张文凯,吴小钊,郑亚利,等.基于静电场分析的固封极柱局部放电研究[J].高电压技术,2015,41(11):3858-3865.
- [18] 梁正波,徐明忠,侯俊平,等.超高压交联电缆户外终端的热状态评价方法[J].高电压技术,2017,43(2):682-688.
- [19] 柳杉,彭嘉康,王霞,等.高压电缆附件界面压力的影响因素分析[J].绝缘材料,2013,46(6):86-89.
- [20] KANTAR E, PANAGIOTOPOULOS D, ILDSTAD E. Factors influencing the tangential AC breakdown strength of solid-solid interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(3):1778-1788.
- [21] HASHEMINEZHAD M, ILDSTAD E. Application of contact analysis on evaluation of breakdown strength and PD inception field strength of solid-solid interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(1):1-7.
- [22] BELGHITH S, MEZLINI S, BELHADJSALAH H, et al. Modeling of contact between rough surfaces using homogenisation technique[J]. Comptes Rendus Mécanique,2010,338(1):48-61.
- [23] NAYAK P R. Random process model of rough surfaces in plastic contact[J]. Wear,1973,26(3):305-333.
- [24] BHUSHAN B. Analysis of the real area of contact between a polymeric magnetic medium and a rigid surface[J]. Journal of Tribology,1984,106(1):26-34.
- [25] 黄文润.硅油及二次加工品[M].北京:化学工业出版社,2004:147-156.
- [26] 潘泽华,任志刚,陈平等.冲击电压作用下溶胀效应对硅橡胶电树枝特性的影响[J].绝缘材料,2023,56(3):77-83.
- [27] LI J, LIANG H C, DU B X, et al. Surface functional graded spacer for compact HVDC gaseous insulated system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(2):664-667.
- [28] 陈广辉,王安妮,何东欣,等.交联聚乙烯绝缘空间电荷研究进展[J].绝缘材料,2012,45(4):27-30.
- [29] 魏明昊,何东欣,高博,等.电热老化对应力锥处空间电荷积聚规律影响与机理研究[J].绝缘材料,2021,54(10):61-65.
- [30] NATH R, PERLMAN M M. Steady-state bulk trap-modulated hopping conduction in doped linear low-density polyethylene[J]. Journal of Applied physics,1989,65(12):4854-4858.
- [31] ROY S L, SEGUR P, TEYSSEDRE G, et al. Description of bipolar charge transport in polyethylene using a fluid model with a constant mobility: model prediction[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2004,37(2):298-309.

- [32] 王雅妮,孙远远,张帅,等.基于分子链位移的HVDC电缆接头界面区域空间电荷分布研究[J].中国电机工程学报,2022,42(10):3854-3864.
- [33] 王伟,何东欣,宋鹏先,等.电热联合老化对电缆附件应力锥处空间电荷积聚特性的影响[J].高电压技术,2019,45(6):1737-1744.
- [34] 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):1633-1642.
- [35] 严智民,杨凯,王诗航,等.硅脂对硅橡胶电树枝劣化特性的影响机制研究[J].中国电机工程学报,2019,39(2):604-611,657.
- [36] 李亚莎,花旭,代亚平,等.外电场下交联聚乙烯电介质材料分子结构变化及其电老化微观机理研究[J].原子与分子物理学报,2019,36(3):413-420.
- [37] 何东欣.交联聚乙烯电缆交流空间电荷与老化特性研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- [38] 吕鸿,马佳炜,杨贤,等.热老化对220kV硅橡胶电缆接头绝缘材料介电性能的影响[J].绝缘材料,2019,52(2):47-51.
- [39] 李彦昭,伍弘,刘世涛,等.覆沙对110kV瓷绝缘子沿面电场和电位分布规律的影响[J].绝缘材料,2023,56(5):88-94.
- [40] 王子康,周凯,朱光亚,等.硅脂溶胀对XLPE-SiR复合界面气隙缺陷局部放电的影响及作用机理[J].高电压技术,2021,47(12):4245-4254.
- [41] 陈诗佳,周凯,李泽瑞,等.硅凝胶改善XLPE/SIR界面绝缘特性的研究[J].绝缘材料,2020,53(5):76-82.
- [42] 王军,胡晓丹,吴新健,等.导热绝缘有机硅复合材料的制备与性能[J].高分子材料科学与工程,2018,34(10):140-145.
- [43] 谢大荣,巫松桢.电工高分子物理[M].西安:西安交通大学出版社,1990.
- [44] GRUJICIC M, ZHAO C L, DUSEL E C. The effect of thermal contact resistance on heat management in the electronic packaging[J]. Applied Surface Science,2005,246(1-3):290-302.
- [45] 王路伽,马晓华,张健文,等.温度陡升下硅橡胶材料电热裂解的反应力场模拟[J].绝缘材料,2023,56(6):59-65.
- [46] LI Z, ZHOU K, MENG P, et al. Morphology evolution and breakdown mechanism of cross-linked polyethylene (XLPE)-silicone rubber (SiR) interface induced by silicone grease diffusion[J]. High Voltage,2022,7(4):802-811.
- [47] 伊德伦,郑莹莹,蒋浩月,等.计及硅橡胶应力松弛的电缆接头界面压力演变仿真研究[J].高电压技术,2024,50(3):1043-1052.
- [48] 包淑珍,邓红雷,韩卓展,等.电缆绝缘层老化对接头界面压力的影响研究[J].电力工程技术,2020,39(5):16-22.

收稿日期:2023-09-27;修回日期:2023-11-08。

作者简介:张巍(1998-),男(汉族),山东威海人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究;通信作者:李秀峰(1974-),女(汉族),山东青岛人,副教授,主要从事电缆料及电缆附件关键问题与技术、纳米复合电介质特性及应用的研究。