

新型聚丙烯绝缘材料及其与硅橡胶组合用于电缆接头的性能研究

展云鹏¹, 侯 帅¹, 柳 杰¹, 李艳飞², 樊灵孟², 蒋莉梅^{1*}

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663;

2. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘 要:为评估环保型聚丙烯材料在高压电缆附件中的应用潜力,本文系统研究新型聚丙烯绝缘材料与硅橡胶在典型工况下的电气性能,包括电气强度、空间电荷分布及极化电流等,以评估两者的耐压能力、电荷积聚情况以及准稳态极化电流。同时,利用有限元仿真软件建立了 110 kV 电缆接头仿真模型,模拟了接头处电场分布,以探讨聚丙烯/硅橡胶复合绝缘在高压交流电缆接头中的应用表现。结果表明:新型聚丙烯具有优异的电气强度,虽然电气强度随温度升高有所下降,但在 90℃ 下仍保持在 88.80 kV/mm;聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的电气强度主要受硅橡胶影响,但表现出良好的热稳定性,在 30~90℃ 内其电气强度保持在 39.70~47.01 kV/mm。空间电荷测试显示,聚丙烯在 20 kV/mm 下仍具有显著的电荷抑制能力,能有效改善复合界面的电场畸变。基于仿真模型的计算表明,应用该复合绝缘的 110 kV 电缆接头内部电场分布合理,聚丙烯/硅橡胶界面处的最大电场强度仅为 5.7 kV/mm,远低于其电气强度。研究证实新型聚丙烯/硅橡胶复合绝缘结构的可靠性满足高压电缆接头运行要求。

关键词:硅橡胶;聚丙烯;交流击穿;电导电流;空间电荷

Study on properties of new polypropylene insulating material and its combination with silicone rubber for cable joints

ZHAN Yunpeng¹, HOU Shuai¹, LIU Jie¹, LI Yanfei², FAN Lingmeng², JIANG Limei^{1*}

(1. China Southern Power Grid Research Institute, Guangzhou 510663, China;

2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: In order to evaluate the application potential of environmentally friendly polypropylene materials in high-voltage cable accessories, the electrical properties include electric strength, space charge distribution, and polarization current of novel polypropylene insulating material and silicone rubber under typical operating conditions were studied to assess their voltage withstand capability, charge accumulation behavior, quasi-steady-state polarization current. At the same time, a 110 kV cable joint simulation model was established using finite element simulation software to simulate the electric field distribution at the joint, and the application performance of polypropylene/silicone rubber composite insulation in high-voltage AC cable joints was explored. The results show that the novel polypropylene exhibits excellent electric strength, although the electric strength decreases with the increase of temperature, it still remains 88.80 kV/mm at 90℃. The electric strength of the polypropylene/silicone rubber composite insulation is primarily influenced by the silicone rubber, but it exhibits good thermal stability and maintains 39.70–47.01 kV/mm within 30–90℃. Space charge test reveals that the polypropylene still has significant charge suppression ability under 20 kV/mm, which can effectively improve the electric field distortion at the composite interface. Calculation based on simulation model indicates that the internal electric field distribution in the 110 kV cable joint using this composite insulation is reasonable, and the maximum electric field strength at the polypropylene/silicone rubber interface is only 5.7 kV/mm, which is far lower than its electric strength. The research has confirmed that the reliability of the novel polypropylene/silicone rubber composite insulation structure meets the operational requirements of high-voltage cable joints.

Key words: silicone rubber; polypropylene; AC breakdown; conductance current; space charge

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(ZB-KJXM20232461)。

0 引言

电缆接头是电力系统中的关键组成部分,其主

要作用是实现两段电缆之间的过渡和连接。电缆接头通常采用多层复合绝缘结构,其中包括电缆主绝缘材料(XLPE、PP等)和附件绝缘硅橡胶(SR)。然而,主绝缘材料与硅橡胶在电导率、相对介电常数、电气强度等电气性能方面存在显著差异,使得复合绝缘材料内部的电场分布变得复杂。在实际运行工况下,这些差异会导致电场分布不均匀,增加接头处的电场应力,从而影响电缆的长期稳定性。

与电缆本体相比,电缆接头包含多个复合界面,结构复杂,其发生故障的概率较高^[1]。国内外研究表明,电缆接头处的复合界面以及电场应力集中的区域是电力系统中较为薄弱的环节,也是常见的故障发生部位^[2-3]。因此,研究硅橡胶与电缆主绝缘材料之间的电气性能配合,对于提高电力系统的稳定性和安全性具有重要意义。

目前,已有大量研究探讨了硅橡胶的电气和理化性能。例如,秦福宁等^[4]研究了不同服役年限下硅橡胶的电导、介电谱、电气强度等特性,发现随着服役时间的增加,硅橡胶的内部结构发生破坏,热氧化降解使其分子链断裂,从而导致电气性能下降。康文斌等^[5]研究了长期工频叠加谐波电场对硅橡胶的影响,发现硅橡胶的介电常数和介质损耗因数在长期电场作用下增大。王若丞等^[6]对高压电缆接头用硅橡胶进行了加速热老化试验,结果表明,随着老化的进行,硅橡胶的体积电阻率与相对介电常数略有上升,但变化不明显,介质损耗因数降低,断裂伸长率和拉伸强度逐渐下降。此外,关于硅橡胶与电缆主绝缘材料的电气性能配合,张巍等^[7]通过COMSOL仿真软件研究了交联聚乙烯(XLPE)电缆接头的电场、温度场和应力场分布,发现涂敷硅脂可以有效减小交联聚乙烯/硅橡胶绝缘复合界面的电场畸变,但由于引入了第三种介质,可能加速材料的老化。

随着电力传输需求的不断增加,XLPE电缆由于其较低的工作温度上限(长期运行温度一般不超过90℃),逐渐无法满足更高载流量的要求。相比之下,聚丙烯电缆的工作温度可达110℃以上,逐渐成为当前高载流量电缆绝缘材料的研究热点。同时,XLPE是热固性材料,其优良性能是基于交联工艺实现的,在服役结束后难以回收,这与当前的环保要求不符。相比之下,聚丙烯作为一种热塑性材料,在电缆服役后能够回收再利用,成为新型环保

电力电缆材料的理想选择^[8-9]。综上,聚丙烯具备耐高温、电学性能和力学性能优异且无需交联即可满足电缆运行性能要求等优势,展现出很高的应用潜力,成为目前非交联中高压电缆绝缘材料领域的主要研究方向^[10]。

为了评估聚丙烯材料在电缆接头复合结构中的应用价值,本文系统研究新型聚丙烯绝缘材料与硅橡胶在典型工况下的电气性能,包括电气强度、空间电荷行为及电导特性等,对比分析聚丙烯、硅橡胶和聚丙烯/硅橡胶复合绝缘3种试样的关键电气性能,并对采用聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的110 kV交流电缆中间接头电场分布进行有限元仿真计算,研究结果可为新型环保聚丙烯电力电缆接头的设计提供基础理论依据。

1 试验

1.1 试样制备

本文试验对象为硅橡胶材料和基于弹性体增韧技术改性的聚丙烯绝缘材料。硅橡胶材料取自于长园电力技术有限公司的电力电缆附件。聚丙烯绝缘材料的基底材料是燕山石油化工有限公司的8003型聚丙烯,改性材料是陶氏塑料公司的8999型聚烯烃弹性体(POE),POE和聚丙烯的混合质量比为60:40。首先将硅橡胶粒料和聚丙烯粒料置于60℃真空烘箱中干燥24 h,然后将硅橡胶粒料和聚丙烯粒料分别置于220℃和190℃的平板硫化机中,依次在5、10、20 MPa下保持3 min,最后在20 MPa的压力下自然冷却至室温。将得到的片状试样短路放置于真空烘箱中,在60℃下烘干12 h,以释放试样在压片和冷却过程中积聚的静电荷,最后制得尺寸为10 cm×10 cm×200 μm的若干试样。

1.2 测试方法

1.2.1 交流击穿试验

交流电气强度是绝缘材料电气性能最为直观的体现。本文依据GB/T 1408.1—2016进行交流击穿试验^[11]。试验采用球-板电极结构,试样与电极系统均浸没于植物绝缘油中以抑制沿面闪络^[12]。试验过程中,通过油浴控温系统精确控制温度,分别在30、50、70、90℃条件下进行测试。以1 kV/s的速率匀速升压,直至试样击穿。每个温度下重复测试16次,记录击穿电压值,并通过千分测厚仪测量击穿点厚度以计算电气强度。交流击穿试验系统原理图如图1所示。

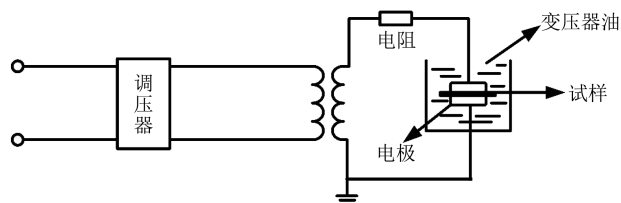


图1 交流击穿试验系统
Fig.1 AC breakdown test system

1.2.2 空间电荷测试

采用脉冲电声 (pulsed electro-acoustic, PEA) 法^[13-14], 依据 IEC 62758:2012 对聚丙烯和硅橡胶试样进行空间电荷分布测试^[15]。其中脉冲电源输出脉冲幅值为 0~2 kV, 脉冲宽度为 5 ns, 重复频率为 50 Hz, 压电传感器为 9 μm 厚的聚偏氟乙烯薄膜。测试时, 采用高压直流电源对试样施加 5、10、15、20 kV/mm 的直流电场, 持续 30 min 后短路 30 min, 随后通过压电传感器及数据采集系统 (示波器、放大器及计算机) 记录信号, 并利用反卷积算法还原空间电荷密度分布。

1.2.3 电导率测试

依据 GB/T 1410—2006^[16], 采用三电极系统 (高压极、地极及保护极) 进行电导率测试。测试时, 试样置于恒温干燥箱中, 分别在 30、50、70、90℃ 下温度稳定后, 施加 1~10 kV 直流电压, 使用高精度 pA 级电流表 (最小量程可以达到 10^{-14} pA) 测量极化电流。每个温度下记录电流随时间的变化曲线, 直至电流趋于稳定值。电导率测量系统原理图如图 2 所示。

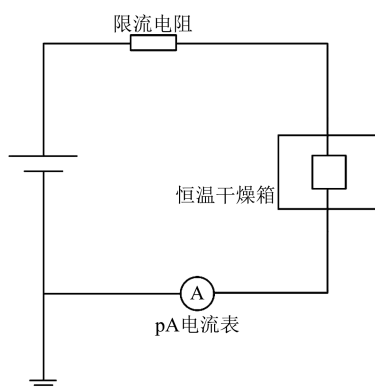


图2 电导率测量系统
Fig.2 Conductivity measurement system

2 结果与讨论

2.1 击穿试验结果

威布尔分布广泛应用于处理机器失效问题, 也经常被用来处理绝缘材料的击穿数据, 其击穿概率

密度函数如式(1)所示^[17], 本研究采用威布尔分布对每个温度下试样的电气强度进行处理。

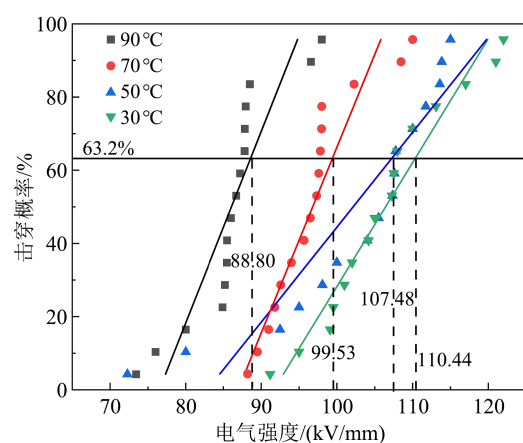
$$P(E) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E}{E_0} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

式(1)中: $P(E)$ 是击穿概率; E 是电气强度; β 是形状参数; E_0 对应于 63.2% 击穿概率的电气强度。

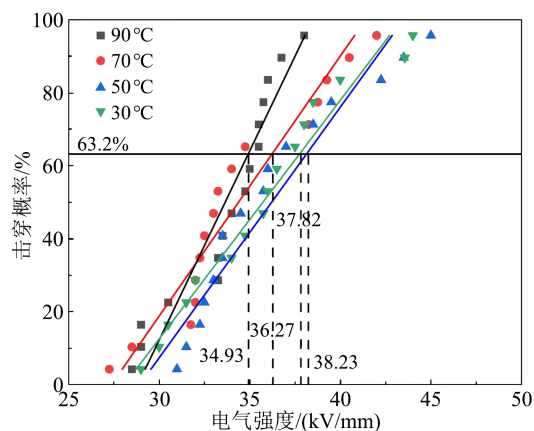
式(1)可以进一步转化为式(2)。

$$\ln(\ln(1 - P)) = \beta(\ln E - \ln E_0) \quad (2)$$

以 E 为横坐标, $P(E)$ 为纵坐标作图即可得到聚丙烯和硅橡胶的电气强度威布尔分布曲线, 如图 3 所示。



(a) 聚丙烯



(b) 硅橡胶

图3 聚丙烯与硅橡胶的电气强度威布尔分布图

Fig.3 Weibull distribution of electric strength of polypropylene and silicone rubber

根据图3可以得到不同温度下聚丙烯和硅橡胶击穿概率为63.2%时的电气强度如图4所示。从图4可以看出, 聚丙烯绝缘材料的电气强度受温度影响明显。在室温(30℃)下, 聚丙烯的电气强度为110.44 kV/mm, 随着温度升高, 其电气强度逐渐下降, 且下降幅度随温度升高而增大。具体来看, 当

温度升高至 50℃ 时,聚丙烯的电气强度下降至 107.48 kV/mm,下降幅度为 2.68%;温度升高至 70℃ 时,电气强度下降至 99.53 kV/mm,下降幅度为 9.88%;温度升高至 90℃ 时,电气强度下降至 88.80 kV/mm,下降幅度为 19.59%。相比之下,硅橡胶的电气强度随温度变化不明显。在 30℃ 时,硅橡胶的电气强度为 37.82 kV/mm,50℃ 时电气强度略微升高,差距不足 1 kV/mm。随着温度升高至 70℃ 和 90℃,电气强度略有下降。整体来看,硅橡胶的电气强度随着温度升高呈现轻微下降趋势,这可能是致密的交联结构和较高的热稳定性使其在高温下保持较为稳定的电气性能。

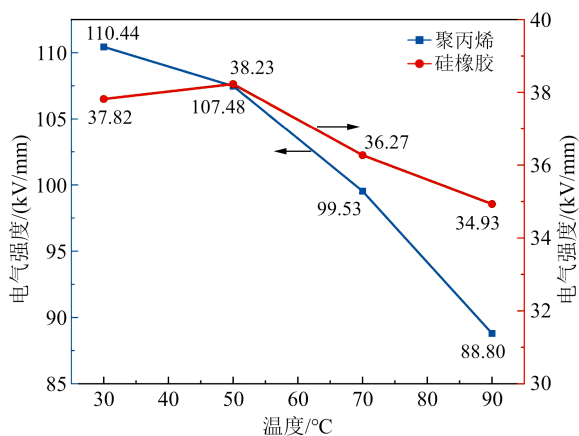


图4 聚丙烯与硅橡胶的电气强度对比图

Fig.4 Electric strength comparison of polypropylene and silicone rubber

为了研究聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的电气性能,本文对聚丙烯/硅橡胶复合绝缘进行了交流击穿测试。首先将硅橡胶试样叠放在聚丙烯试样上,再将两者一起放在压片机里施加 15 MPa 的压力,保持 60 min,直至两者之间没有气泡存在时,认为它们已贴合紧密,然后测试其电气强度,结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,聚丙烯/硅橡胶复合绝缘在不同温度下的特征电气强度接近硅橡胶的电气强度,但明显低于聚丙烯的电气强度,这一结果反映出复合结构中硅橡胶的电气特性对其击穿行为有显著影响。尽管聚丙烯具有很高的电气强度,但其与硅橡胶的界面区域可能存在微观缺陷,导致局部电场集中。同时,硅橡胶的柔性微观结构可能难以完全贴合聚丙烯表面的微观结构,从而在界面处产生空隙即形成绝缘薄弱区,导致复合绝缘的电气强度降低。此外,聚丙烯与硅橡胶绝缘间的介电常数差异可能引发界面极化效应,导致电场畸变^[18]。

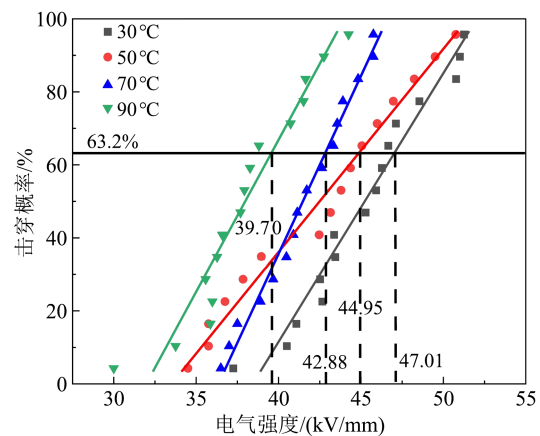


图5 聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的电气强度威布尔分布图

Fig.5 Weibull distributions of electric strength of polypropylene/silicone rubber composite insulation

从图 5 还可以看出,聚丙烯/硅橡胶复合绝缘在 30、50、70、90℃ 下的特征电气强度分别为 47.01、44.95、42.88、39.70 kV/mm。虽然随着温度的升高,复合绝缘的电气强度有所下降,但是总体的下降幅度较小,90℃ 下的电气强度相较于 30℃ 下仅下降了 7.31 kV/mm,表明复合绝缘具有良好的热稳定性,推测可能是复合绝缘中硅橡胶优异的热稳定性在一定程度上缓和了温度对聚丙烯电气性能的负面影响。

2.2 空间电荷测试结果

分别对硅橡胶和聚丙烯进行空间电荷测量,得到测量时间为 900 s 时两者的空间电荷分布如图 6 所示。从图 6 可以看出,聚丙烯与硅橡胶的空间电荷分布特性存在显著差异。聚丙烯在不同场强下的空间电荷注入现象均较为微弱,仅在高场强(20 kV/mm)下出现少量电荷积累;相比之下,硅橡胶在低场强(10 kV/mm)下就已经呈现出电荷注入现象,并在场强为 20 kV/mm 时因电荷剧烈迁移导致空间电荷密度曲线出现显著波动。对比结果表明聚丙烯材料具有一定程度的电荷运动抑制能力,这可能与聚丙烯高度规整的分子链结晶结构有关。张冶文等^[19]比较了聚乙烯与聚丙烯的空间电荷注入特性,指出聚丙烯较高的结晶度导致其内部陷阱数量及陷阱深度增加,从而抑制了电荷的注入及迁移。同时,弹性体增韧改性引入的界面微区可能通过局域化载流子扩散进一步降低电荷积聚风险,从而使聚丙烯展现出一定的电荷抑制能力。

图 7 为聚丙烯/硅橡胶复合绝缘在 5、10、15、20 kV/mm 下测量时间为 600、1 200、1 800 s 时空间电

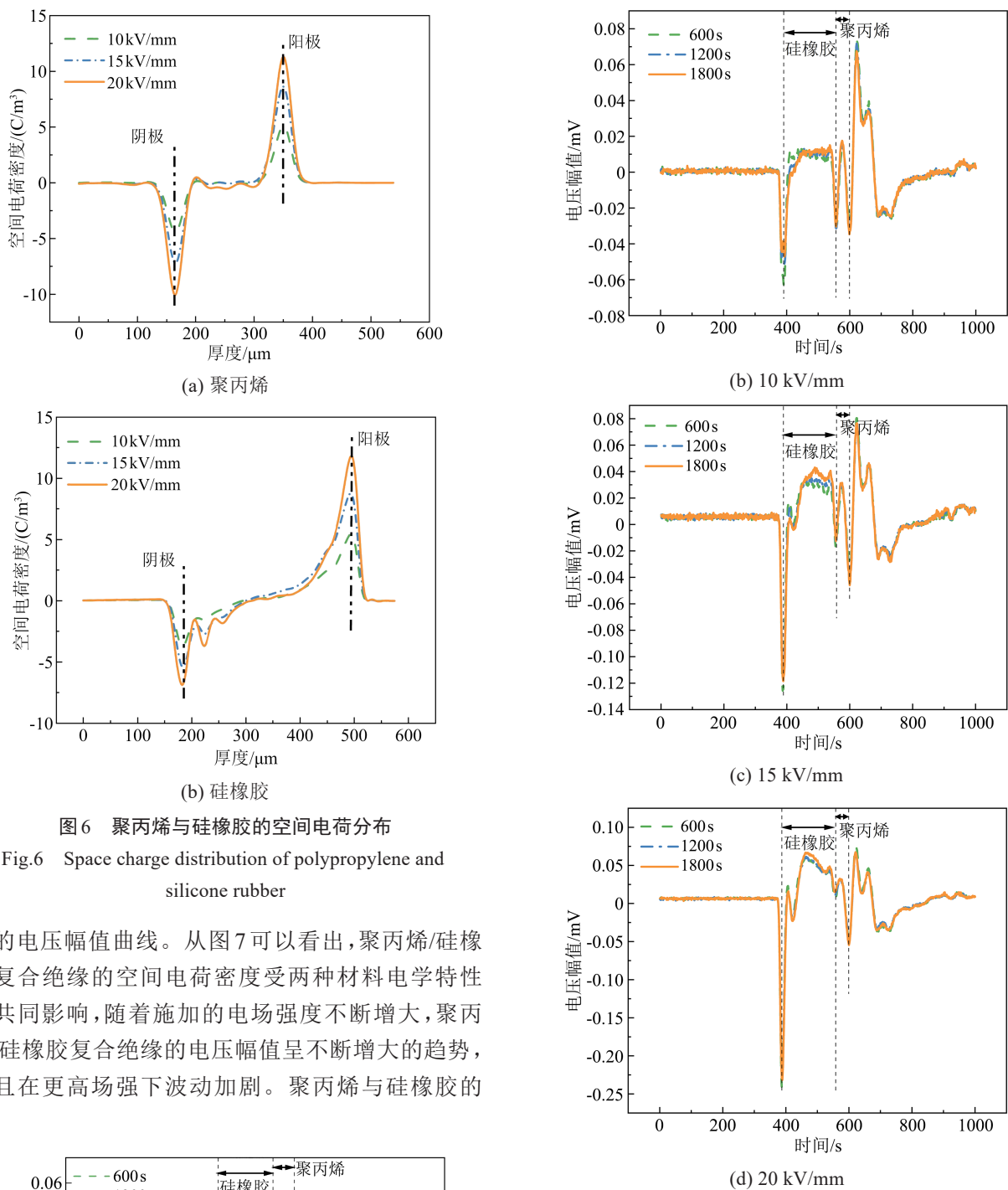


图6 聚丙烯与硅橡胶的空间电荷分布
Fig.6 Space charge distribution of polypropylene and silicone rubber

荷的电压幅值曲线。从图7可以看出,聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的空间电荷密度受两种材料电学特性的共同影响,随着施加的电场强度不断增大,聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的电压幅值呈不断增大的趋势,并且在更高场强下波动加剧。聚丙烯与硅橡胶的

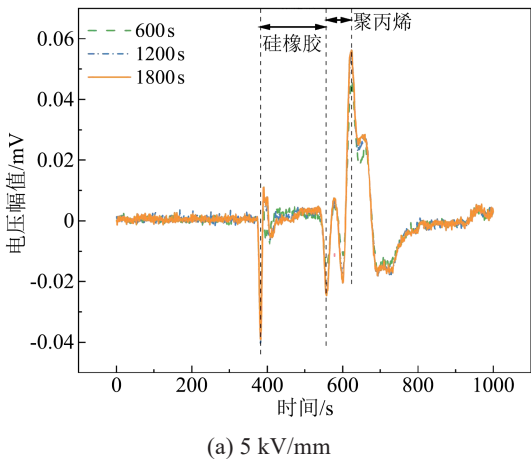


图7 聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的电压幅值曲线
Fig.7 Voltage amplitude curves of polypropylene/silicone rubber composite insulation

介电常数差异可能导致复合界面处产生极化电荷积累,随着电场强度增大,界面极化效应增强,从而导致电压幅值升高。另外,在低场强(5 kV/mm)下,可能电荷注入量较少,迁移速率较低,电压幅值波动较小。随着场强升高至20 kV/mm,硅橡胶中空间

电荷注入量显著增加,其迁移行为可能受界面缺陷和材料非均质性影响,呈现动态不稳定性,从而导致电压幅值波动加剧。

2.3 电导率测试结果

本文所采用的新型改性聚丙烯材料由于结晶度较高,其电导率极低,产生的极化电流信号已接近测试仪器(pA级电流表)的底噪,难以获取稳定的试验曲线。考虑到复合绝缘体系中硅橡胶的电导率较高而且随温度变化显著,因此仅测试了硅橡胶的电导率。

图8为不同温度下硅橡胶材料的极化电流随时间的变化曲线。从图8可以看出,硅橡胶材料的极化电流随着时间的推移迅速下降,并最终趋于稳定。此外,硅橡胶的极化电流受温度影响十分明显,当温度为30℃时,极化电流的最终稳定值为12.11 pA。随着温度的升高,极化电流的稳定值逐渐增大,当温度为90℃时,稳定值为196.89 pA,相比30℃时增大了约15倍。

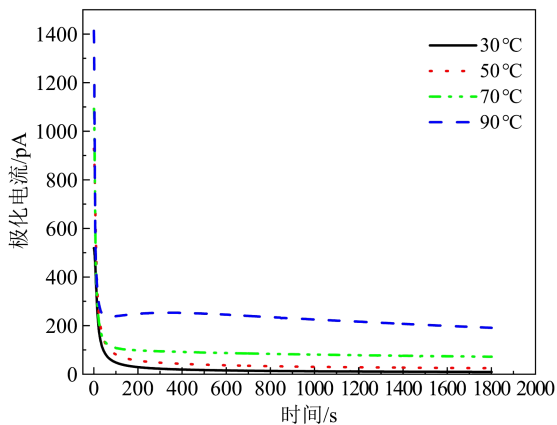


图8 硅橡胶在不同温度下的极化电流曲线
Fig.8 Polarization current curves of silicone rubber under different temperatures

由不同温度下的极化电流可以进一步计算得到不同温度下硅橡胶的电导率,结果如图9所示。

从图9可以看出,硅橡胶在不同温度下的电导率与极化电流的变化趋势相同。在30℃下,硅橡胶的电导率稳定值为 2.44×10^{-14} S/m;50℃下,电导率稳定值为 6.60×10^{-14} S/m,相较于30℃时增大了约1.7倍;70℃下,电导率稳定值为 1.90×10^{-13} S/m,相较于30℃时增大了约6.8倍;90℃下,电导率稳定值为 5.03×10^{-13} S/m,相较于30℃时增大了约19.6倍。试验结果表明,温度越高,硅橡胶的电导率越高,呈非线性上升趋势,符合 Arrhenius 定律^[20]。温度对硅橡

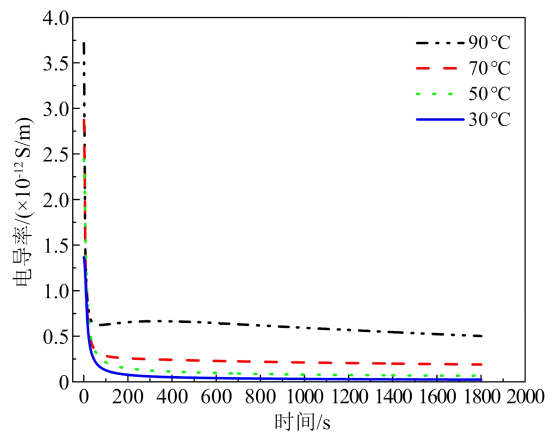
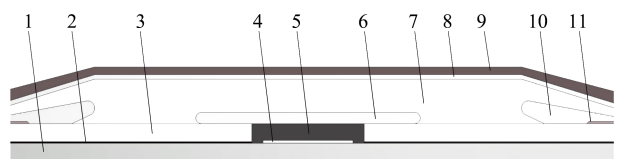


图9 硅橡胶在不同温度下的电导率
Fig.9 The electrical conductivity of silicone rubber under different temperatures

胶产生两方面的作用,一方面是升温产生热扰动,使粒子间隙间的电场发生变化;另一方面是硅橡胶中的基体发生热膨胀,使粒子间的间距增大,从而影响硅橡胶的电导率^[21],同时升温过程中硅橡胶内部的粒子动能增大,电子越过势垒的能力提高,因此硅橡胶的电导率增大。

3 仿真模型及电场分布特性分析

为进一步研究电缆接头中复合绝缘的电场特性,本文对110 kV交流电缆中间接头的电场分布进行了仿真计算。基于现有的110 kV电缆接头结构进行二维对称建模,如图10所示。电缆接头各部分参数如表1所示^[22-23]。



1.电缆铜导体; 2.电缆内半导体层; 3.聚丙烯; 4.压接管;
5.屏蔽罩; 6.屏蔽管; 7.硅橡胶; 8.金属护套; 9.外护套;
10.应力锥; 11.电缆外半导体层

图10 电缆接头COMSOL仿真模型

Fig.10 COMSOL simulation model of cable joint

表1 电缆接头不同部分的材料参数

结构	相对介电常数	电导率/(S/m)
铜	1×10^{-4}	1.75×10^8
硅橡胶	2.73	1.57×10^{-15}
半导体层	100	3
应力锥	30	2
聚丙烯	2.27	1×10^{-18}

在建立电缆接头的COMSOL仿真模型后,针对接头区域的电场分布进行仿真计算与分析,得到接头处的电场分布如图11所示。从图11可以看出,电缆接头处的电场分布存在不均匀性,聚丙烯绝缘材料所承受的电场强度明显高于硅橡胶材料所承受的电场强度,在聚丙烯绝缘内部的电场强度最大值达到10 kV/mm。

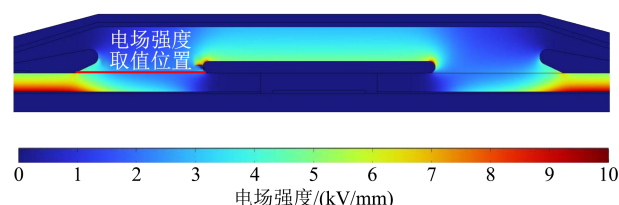


图11 电缆接头电场分布图

Fig.11 Electric field distribution diagram of cable joint

为便于对仿真结果进行分析,在电缆接头模型中聚丙烯与硅橡胶的交界面位置设置二维截线,方向为应力锥根部到屏蔽管端部^[24],同时在图11中标注出电场强度的取值位置。

根据Maxwell-Wagner界面极化理论^[18],当两种介电常数/电导率差异较大的材料接触时,界面处会因电荷积聚引起电场分布不均。空间电荷的存在将畸变绝缘的电场分布,进而导致绝缘的老化甚至击穿^[25]。但是如图11所示,聚丙烯和硅橡胶的界面处并无电场不均或者过大的情况,可能是由于聚丙烯的低电荷注入特性(如图6所示,<20 kV/mm下无显著空间电荷积聚)抑制界面极化电荷的生成,进而可能优化了复合界面的电场分布,提升了电缆接头处绝缘的可靠性。

根据应力锥根部到屏蔽管端部的二维截线得到电缆接头位置的轴向电场曲线,如图12所示。

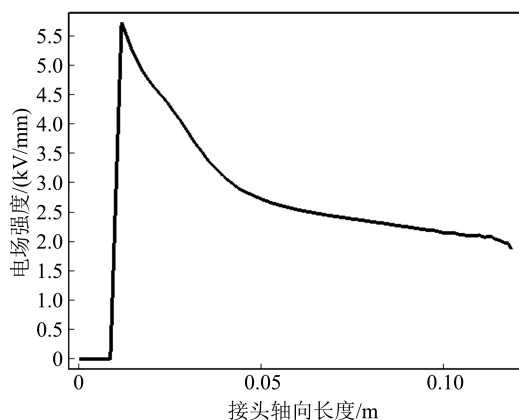


图12 电缆接头电场强度变化

Fig.12 Variation of electric field strength in cable joints

从图12可以看出,聚丙烯与硅橡胶复合界面处的最大电场强度为5.7 kV/mm,远低于新型聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的电气强度,这可能是由于聚丙烯绝缘电介质的低电荷注入特性抑制了聚丙烯与硅橡胶界面处的电荷注入,说明聚丙烯/硅橡胶复合绝缘可以应用于电缆接头,符合电缆设计要求。

4 结论

本文系统研究新型聚丙烯绝缘材料与硅橡胶在典型工况下的电气性能,包括电气强度、空间电荷分布及极化电流等,并对110 kV交流电缆中间接头的电场分布进行仿真计算,主要得到以下结论:

(1)新型聚丙烯材料具备优异的抗击穿性能,在高温(90℃)下依然保持良好的耐压水平,显示出其在高温工况下的可靠性。在不同测试场强下聚丙烯的空间电荷注入现象均不太明显,表明其具有良好的电荷抑制能力。

(2)聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的电气强度主要受硅橡胶影响,但表现出良好的热稳定性,在30~90℃内其电气强度保持在39.70~47.01 kV/mm。

(3)对应用聚丙烯/硅橡胶复合绝缘的110 kV交流电缆中间接头进行仿真计算,结果表明由于聚丙烯具有低电荷注入特性,减少了复合绝缘中电荷在界面区域的积聚,聚丙烯与硅橡胶复合界面处最大电场强度仅为5.7 kV/mm,符合电缆设计的安全要求。

参考文献 References

- [1] 尚康良,曹均正,赵志斌,等.320 kV XLPE 高压直流电缆接头附件仿真分析和结构优化设计[J].中国电机工程学报,2016,36(7):2018-2024.
SAHNG K L, CAO J Z, ZHAO Z B, et al. Simulation analysis and structural optimization design of 320 kV XLPE HVDC cable gland accessories[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 2018-2024.
- [2] 王霞,姚航,吴锴,等.交联聚乙烯与硅橡胶涂抹不同硅脂对其电荷特性的影响[J].高电压技术,2014,40(1):74-79.
WANG X, YAO H, WU K, et al. The effect of cross-linked polyethylene on the charge characteristics of silicone rubber applied with different silicone greases[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 74-79.
- [3] 陈庆国,秦艳军,尚南强,等.温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J].高电压技术,2014,40(9):2619-2626.
CHEN Q G, QIN Y J, SHANG N Q, et al. Analysis of the influence of temperature on the electric field distribution in the intermediate joint of high-voltage DC cable[J]. High Voltage Engi-

- neering,2014,40(9):2619-2626.
- [4] 秦福宁,邵光磊,张忠蕾,等. 电缆中间接头硅橡胶绝缘的理化特性研究[J]. 绝缘材料,2020,53(12):44-49.
- QIN F N, SHAO G L, ZHANG Z L, et al. Study on the physical and chemical properties of silicone rubber insulation of cable intermediate joints[J]. *Insulating Materials*,2020,53(12):44-49.
- [5] 康文斌,蒙绍新,崔浩喆,等. 工频电压叠加谐波作用下硅橡胶绝缘的陷阱和介电特性演变规律[J]. 高电压技术,2019,45(12):3810-3819.
- KANG W B, MENG S X, CUI H Z, et al. Traps and dielectric properties of silicone rubber insulation under the action of power frequency voltage superposition harmonics[J]. *High Voltage Engineering*,2019,45(12):3810-3819.
- [6] 王若丞,贺云逸,康洪玮,等. 电缆接头绝缘用硅橡胶热老化及超声特性[J]. 高电压技术,2021,47(9):3181-3188.
- WANG R C, HE Y Y, KANG H W, et al. Thermal aging and ultrasonic characteristics of silicone rubber for cable gland insulation [J]. *High Voltage Engineering*,2021,47(9):3181-3188.
- [7] 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 W, HAN S B, LI X F, et al. Effect of silicone grease coating under thermal aging on the electrical-thermal-force field at the interface of 110 kV cable termination joints[J]. *Insulating Materials*,2024,57(6):76-85.
- [8] LIU Ziyu, LIU Rongsheng, WANG Huiming, et al. Space charges and initiation of electrical trees[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*,1989,24(1):83-90.
- [9] 何金良,彭琳,周垚. 环保型高压直流电缆绝缘材料研究进展[J]. 高电压技术,2017,43(2):337-343.
- HE J L, PENG L, ZHOU Y. Research progress of environmentally friendly HVDC cable insulation materials[J]. *High Voltage Engineering*,2017,43(2):337-343.
- [10] 侯帅,展云鹏,朱闻博,等. POE增韧聚丙烯基电缆半导电屏蔽材料导电网络的建立及性能[J]. 高电压技术,2023,49(3):1000-1006.
- HOU S, ZHAN Y P, ZHU W B, et al. The formation and properties of conductive network in POE blended polypropylene based semi-conductive shielding material for cable[J]. *High Voltage Engineering*,2023,49(3):1000-1006.
- [11] 全国绝缘材料标准化技术委员会. 绝缘材料电气强度试验方法 第1部分: 工频下试验:GB/T 1408.1—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- National Technical Committee 51 on Insulating Material of Standardization Administration of China. Test methods for electrical strength of insulating materials-part 1: tests at power frequencies: GB/T 1408.1—2016[S]. Beijing:Standards Press of China, 2016.
- [12] 李银格,常柏源,余欣,等. 不同温度及厚度下非交联聚乙烯电缆绝缘材料工频交流击穿表现[J]. 广东电力,2024,37(9):65-71.
- LI Y G, CHANG B Y, YU X, et al. Power frequency AC breakdown performance of non-cross-linked polyethylene cable insulation materials at different temperatures and thicknesses[J]. *Guangdong Electric Power*,2024,37(9):65-71.
- [13] LI J X, ZHANG Y W, QIN X Q, et al. A combined system of piezo-PWP/PEA methods for measuring space charge distribution in solid dielectrics[C]//10th International Symposium on Electrets. Athens, Greece:IEEE,1999:281-284.
- [14] BJURSTRÖM A, EDIN H, HILLBORG H, et al. A review of polyolefin - insulation materials in high voltage transmission: from electronic structures to final products[J]. *Advanced Materials*,2024,36(52):2401464.
- [15] International Electrotechnical Commission. Calibration of space charge measuring equipment based on the pulsed electroacoustic (PEA) measurement method: IEC 62758:2012[S]. Geneva, Switzerland:IEC,2012.
- [16] 全国绝缘材料标准化技术委员会. 固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法:GB/T 1410—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- National Technical Committee 51 on Insulating Material of Standardization Administration of China. Test methods for volume resistivity and surface resistivity of solid insulating materials: GB/T 1410—2006[S]. Beijing:Standards Press of China,2006.
- [17] 朱敏慧,闵道敏,林宋佳,等. 交联聚乙烯绝缘高温直流击穿威布尔分布的厚度效应[J]. 电工技术学报,2024,39(21):6908-6920.
- ZHU M H, MIN D M, LIN S J, et al. The thickness effect of cross-linked polyethylene insulation at high temperature DC breakdown of Weibull distribution[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2024,39(21):6908-6920.
- [18] 朱雨涛,谢恒堃,刘耀南. 聚合物基复合绝缘中的界面极化[J]. 绝缘材料,1995,28(4):1-4.
- ZHU Y T, XIE H K, LIU Y N. Interfacial polarization phenomena in polymer-based composite insulating materials[J]. *Insulating Materials*,1995,28(4):1-4.
- [19] 张治文,赵晖,李宗泽,等. 聚乙烯与聚丙烯中间空间电荷注入特性的比较[J]. 高电压技术,2014,40(9):2613-2618.
- ZHANG Y W, ZHAO H, LI Z Z, et al. Comparison of space charge injection behaviors between polythene and polypropylene [J]. *High Voltage Engineering*,2014,40(9):2613-2618.
- [20] ALAM S, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. Temperature and field induced variations of electric conductivities of HTV silicone rubbers derived from measured currents and surface potential decay characteristics[J]. *Energies*,2020,13(11):2982.
- [21] 黄英,李郁忠,周传友,等. 导电硅橡胶导电性和电热性的研究[J]. 橡胶工业,2002(2):77-82.
- HUANG Y, LI Y Z, ZHOU C Y, et al. Research on conductive and electro-thermal behavior of conductive silicone rubber[J]. *China Rubber Industry*,2002(2):77-82.
- [22] 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 J J, XU Q Z, WANG W C, et al. Effect of insulation ageing on electric field distribution at interface defects in cable intermediate joints[J]. *Insulating Materials*,2021,54(7):67-74.
- [23] 赵明伟,马天祥,李丹,等. 硅橡胶绝缘材料温度及场强依赖特

- 性对 XLPE 绝缘直流电缆预制接头内电场分布的影响[J]. 绝缘材料,2024,57(12):58-65.
- ZHAO M W, MA T X, LI D, et al. Effect of temperature and field strength dependence characteristics of silicone rubber insulating material on electric field distribution in prefabricated joints of XLPE insulated DC cables[J]. Insulating Materials, 2024,57(12):58-65.
- [24] 奚锐,张亚,程明亮,等. 界面气隙缺陷及受潮对 ± 320 kV 直流电缆中间接头电场分布的影响[J]. 绝缘材料,2025,58(1):97-108.
- XI R, ZHANG Y, CHENG M L, et al. Influence of interfacial air gap defects and moisture on electric field distribution in intermediate joint of ± 320 kV DC cables[J]. Insulating Materials, 2025, 58(1):97-108.
- [25] MONTANARI G C. The electrical degradation threshold of polyethylene investigated by space charge and conduction current measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2000,7(3):309-315.
-
- 收稿日期:2025-03-11;修回日期:2025-05-26。
- 作者简介:
- 展云鹏(1994-),男(汉族),辽宁鞍山人,高级工程师,博士,主要从事高压交、直流电缆绝缘技术与先进电工材料应用技术的研究;
- 通信作者:蒋莉梅(2001-),女(汉族),安徽合肥人,工程师,主要从事电缆绝缘材料的介电性能等方面的研究。