

绝缘清洗剂对不同运行年限和人工加速老化复合绝缘子电气性能的影响

吴 田^{1,2}, 王凌志^{1,2}, 杨 东³, 刘鑫源⁴, 赵理赞⁵, 黎 鹏^{1,2*}

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网湖北省电力公司襄阳供电公司, 湖北 襄阳 441000; 4. 国网随州供电公司检修分公司, 湖北 随州 441300; 5. 国网襄阳市襄州区供电公司; 湖北 襄阳 441000)

摘 要:长时间户外运行的复合绝缘子老化后导致防污性能降低, 绝缘清洗的修复措施是恢复其性能的重要手段。为了评估老化复合绝缘子绝缘清洗剂的可行性, 本文采用微观结构、基团变化与电气性能相结合的方法, 研究不同绝缘清洗剂用量以及热老化年限对其绝缘恢复特性的影响。结果表明: 微湿润状态下清洗剂可优化人工加速老化复合绝缘子(运行 3 年)的表面结构, 提升其憎水性和电气性能, 而在完全湿润状态清洗剂作用下因长时间溶胀作用, 复合绝缘子表面的裂纹数量增多且深度加深, 导致其憎水性和电气性能稍微下降。运行 10 年严重老化复合绝缘子在绝缘清洗剂作用下会显露内部老化较轻的基体, 但完全湿润状态下会剥离粉化层并显著暴露深层裂纹, 说明了过度清洗会增加长年限老化绝缘子的运行隐患。随老化时间延长, 微湿润状态下清洗剂对人工加速老化复合绝缘子的改善效果减弱, 完全湿润状态下清洗剂则会加速复合绝缘子的成分流失。

关键词: 绝缘清洗剂; 复合绝缘子; 老化特性; 憎水性; 沿面闪络

Influence of insulating cleaning agents on electrical performance of composite insulators with different operating years and artificial accelerated ageing

WU Tian^{1,2}, WANG Lingzhi^{1,2}, YANG Dong³, LIU Xinyuan⁴, ZHAO Liyun⁵, LI Peng^{1,2*}

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Transmission Line Engineering Technology Research Center, Yichang 443002, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Xiangyang Power Supply Company, Xiangyang 441000, China; 4. State Grid Suizhou Power Supply Company maintenance Branch, Suizhou 441300, China; 5. State Grid Xiangyang Xiangzhou District Power Supply Company, Xiangyang 441100, China)

Abstract: After long-term outdoor operation, composite insulators undergo ageing, resulting in a decrease in their anti-pollution performance. Insulation cleaning as a repair measure is an important means to restore its performance. To assess the feasibility of insulation cleaning agents for ageing composite insulators, this paper used the method combining microstructure, group changes, and electrical performance to study the effects of different insulation cleaning agent amounts and thermal ageing duration on their insulation recovery characteristics. The results show that the cleaning agent in slightly wet state can optimize the surface structure of the artificial accelerated ageing composite insulator (operated for 3 years) and improve its hydrophobicity and electrical performance. However, under the action of the cleaning agent in fully wet state, due to prolonged swelling effect, the number of surface cracks on composite insulators increases and their depth deepens, making their hydrophobicity and electrical performance decrease slightly. Under the action of insulation cleaning agent, the severely aged composite insulators after 10 years of operation will expose the internal matrix with lighter ageing, but under the fully wetting state, the pulverization layer will be peel off and the deep cracks will be exposed significantly, indicating that excessive cleaning will increase the operation hidden danger of long-term aged insulators. With the extension of ageing time, the improvement effect of the cleaning agent in slightly wet state on the artificial accelerated aging composite insulator

sample weakens, while the cleaning agent in fully wet state will accelerate the loss of the components of composite insulator.

Key words: insulation cleaning agent; composite insulator; ageing characteristics; hydrophobicity; surface flashover

0 引言

复合绝缘子作为架空输电线路的核心组件,因其优异的憎水性、耐污闪性能及高机械强度,在电力系统中应用广泛。与传统瓷、玻璃绝缘子相比,硅橡胶基复合绝缘子因其优异的表面憎水迁移特性显著提升了污闪电压,有效适应高海拔、重污秽等复杂环境。然而,随着运行年限增长,复合绝缘子表面会出现粉化、裂纹与憎水性减弱等老化现象,而老化复合绝缘子长期暴露于湿热污秽工况下水分会侵入引起极化损耗,导致其伞裙产生异常高温。高温会改变其化学结构,加速复合绝缘子的热老化^[1-3],导致绝缘子寿命缩短,甚至导致停电等安全事故。

我国绝缘子防污闪运维体系中,伞裙带电清污长期依赖带电水冲洗^[4-6]、带电气吹^[7]及机器清扫^[8-9]等周期性维护手段。上述方法工作量和劳动强度大,过早干预造成人力物力浪费,滞后处理则显著降低污闪预警裕度。其次,传统清洗介质易引发二次隐患,如水冲洗导致局部电场畸变、气吹法清洁深度不足等问题。绝缘清洗剂比带电水冲洗、带电气吹等方法去除力度更强,清洗更为快速^[10]。研究者们对喷洒绝缘清洗剂后复合绝缘子的性能变化展开了研究。在物理性能方面,吴田等^[11-12]发现清洗剂浸润会引发材料溶胀,但溶胀程度随时间增加趋于稳定,且绝缘子的憎水性和力学性能无显著劣化;在电气性能方面,汤振鹏等^[13]证实喷洒绝缘清洗剂后绝缘子的闪络电压在清洁状态下略有提升,在清洗剂挥发后,其闪络电压与干闪络电压相近;在微观结构方面,高嵩等^[14]观察到经绝缘清洗剂清洗后硅橡胶表面裂缝及孔洞消失,平整度显著改善,赵悦菊等^[15]证实专用清洗修复剂能有效清除绝缘子表面的板结污秽并在表面形成疏水修复层,从而促进憎水性恢复。然而,现有研究对不同服役年限及严重老化状态下复合绝缘子清洗后的电气特性及绝缘清洗剂喷洒用量尚不明确。

本文以现场实际运行3年、10年以及人工加速老化的硅橡胶复合绝缘子伞裙为研究对象,首先喷洒实验室自制绝缘清洗剂,然后采用扫描电镜(SEM)观测试样表面形貌变化,测试水接触角

(WCA)来表征喷洒不同含量清洗剂伞裙试样的憎水性,最后结合傅里叶变换红外光谱(FTIR)进一步探究其结构变化,并通过憎水性与沿面闪络、泄漏电流的关系,深入研究不同清洗剂用量以及热老化年限对其绝缘恢复特性的影响。

1 试验

1.1 试样制备

试验采用河南某公司提供的两种典型220 kV不同运行年限的复合绝缘子和1种新制220 kV复合绝缘子作为研究对象。其中运行3年受污程度较轻的为1号复合绝缘子,其表面状况完好,颜色较为鲜艳;运行10年受污严重的为2号复合绝缘子,其表面粉化严重,伞裙发白。1号和2号复合绝缘子外观如图1所示。新制复合绝缘子用于制备人工加速老化试样。每种复合绝缘子取3支,在试验时分别从复合绝缘子高压、中压和低压3段位置的伞裙上截取制备尺寸为40 mm×40 mm×2 mm的正方形试样。试验选取的带电清洗剂主要成分为九氟丁甲醚、三氟乙醇、*N*-甲基吡咯烷,同时还包括表面活性剂、偶联剂、抗电剂等成分。该清洗剂的残留量、工频击穿电压、电阻率、pH值均符合GB/T 25098—2010^[16]的要求。



(a) 1号复合绝缘子

(b) 2号复合绝缘子

图1 两种复合绝缘子外观

Fig.1 Appearance of two types of composite insulators

1.2 测试仪器与方法

首先对试样进行预处理,使用蘸有无水乙醇的无纺布擦拭试样,以去除其表面多余的污物,主要为了探究老化因素对材料性能的影响。随后将试样静置,直至完全干燥,完成预处理。

预处理完成后,将新制复合绝缘子试样放入老

化箱中进行人工加速老化处理。通过不同时长的加速老化,模拟实际环境中受热应力作用的老化复合绝缘子。热老化试验严格参照 GB/T 3512—2014^[17]相关要求执行,试验采用东莞勤卓环测有限公司生产的加热老化箱。

根据阿伦尼乌斯公式,人工加速热老化处理时间与实际运行复合绝缘子自然老化程度的对应关系如式(1)所示。

$$t_1 = A_F \times t_2 \quad (1)$$

式(1)中: t_1 为在自然老化条件时间; t_2 为人工加速热老化时间; A_F 为加速因子。

经过式(1)换算后,热老化处理时间在理论上与实际 25℃、相对湿度 35% 条件下的自然老化时间具有等效的老化程度。加速因子计算如式(2)所示。

$$A_F = \left(\frac{RH_u}{RH_l} \right) \times \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \quad (2)$$

式(2)中: RH_u 为 150℃ 高温处理环境下干燥箱内的相对湿度,取值为 1.7%; RH_l 为正常使用环境下干燥箱内的相对湿度,取值为 35%; T_1 、 T_2 分别为高温测试环境和正常使用环境的温度, T_1 取 150℃, T_2 取 25℃,并需要换算到绝对温度; k 为玻尔兹曼系数,取值为 8.617×10^{-5} eV/K; E_a 为活化能,硅橡胶的活化能一般为 1.14 eV^[18]。

通过式(2)计算得出加速因子为 57.10,表明绝缘子在 150℃ 环境下加速老化处理 6 d 与实际运行自然老化 1 年的老化程度相当。

在人工加速热老化试验中,温度设定为 150℃,分别热老化处理 0、6、12、18 d 后进行取样。每间隔 120 h,需将所有复合绝缘子试样从老化箱中取出,自然冷却 4 h 后,开展性能测试。在试样取出 24 h 后,重新放回老化箱继续热老化试验,且在放回前需确保老化箱温度已升至 150℃。

在开展每项测试前,每组有 1 片硅橡胶试样喷洒至表面完全被绝缘清洗剂覆盖,没有干燥的部分,记为完全湿润状态;另 1 片喷洒完全湿润状态一半量的绝缘清洗剂,记为微湿润状态。待试样表面无液体残留进行后续测试,并以没经过喷洒处理的方形硅橡胶试样作为空白对照。

水接触角参照 GB/T 24622—2009^[19]相关要求采用芬兰 Biolin 公司生产的全自动接触角测量仪进行测量。试样喷洒绝缘清洗剂后,置于温度为 (23 ± 2) ℃、相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 环境下静置 4 h 左右,待

清洗剂自然挥发后进行水接触角测量,在试样的中心区测量 5 次,取其平均值作为该试样的水接触角最终结果。选用日本电子株式会社生产的 JSM-7500F 型扫描电子显微镜(SEM)观测喷洒绝缘清洗剂前后复合绝缘子的表面形貌和微观结构的变化,试样表面需进行喷金处理,放大倍数为 200 倍、500 倍。采用美国 PerkinElmer 公司生产的 Fourier Transform 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)观测硅橡胶复合绝缘子试样表面的官能团含量及化学结构变化,采用 ATR 全反射光谱,分辨率为 4 cm^{-1} ,波数为 $400 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$ ^[20],主要分析试样 Si-O-Si 主链、Si-(CH₃)₂、Si-CH₃ 侧链和 -OH 基团的吸收峰变化。

搭建沿面放电试验平台测量试样的沿面闪络电压和泄漏电流,如图 2 所示。沿面放电试验参照 GB/T 25097—2010^[16]和 GB/T 775.2—2003^[21]相关要求进行测试,将复合绝缘子试样固定于环氧树脂板上,采用均匀升压法,先施加相当于预期闪络电压 75% 的电压,随后以每秒提升 2% 试验电压的速率均匀升压,直至试样发生闪络,同时精确记录此时的闪络电压。为了防止沿面放电形成电痕对测量产生影响,在沿面放电试验中,每个试验条件下均使用 5 个试样分别开展测试,闪络电压的最终取值为 5 个试样闪络电压值的算术平均值且每次测定的测量值与最终闪络电压的偏差不得超过 5%^[22]。

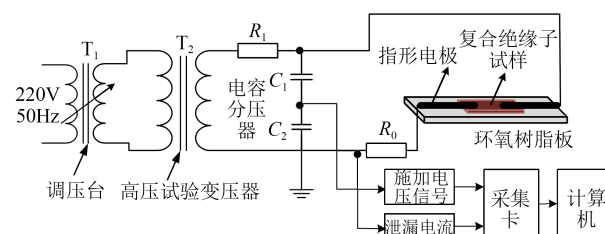


图2 沿面放电试验平台

Fig.2 Surface discharge test platform

2 结果分析

2.1 SEM测试结果分析

在长期户外运行工况下,受多重环境应力的持续作用,高温硫化(HTV)硅橡胶复合绝缘子伞裙材料呈现出显著的表层老化特征^[23]。根据现有研究,老化后的伞裙材料表面通常会形成典型颗粒状形貌特征,并伴随微米级裂纹。这些表面裂纹的开口宽度、纵深长度与材料的老化程度呈现显著正相关性。此外,热老化会加速材料表面微裂纹的生成速率和扩展规模,形成具有树枝状分形特征的裂纹网

络。然而,关于外施绝缘清洗剂是否会引起材料结构的次生劣化,特别是绝缘清洗剂渗透作用对硅橡胶分子链重排及填料界面特性的影响,仍需通过微

观表征来研究。因此本文对两种热老化复合绝缘子表面喷洒不同用量的绝缘清洗剂后进行不同放大倍数的形貌观测,结果如图3所示。

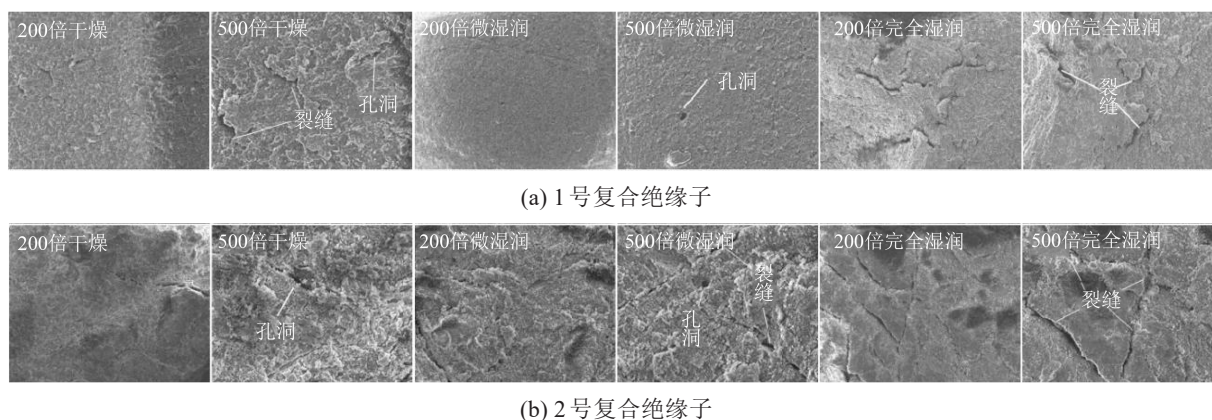


图3 复合绝缘子表面喷洒不同用量绝缘清洗剂后 SEM 图

Fig.3 SEM images of composite insulators surface sprayed with different amounts of insulating cleaning agent

从图3可以看出,对于1号复合绝缘子,干燥状态下表面呈层状堆叠结构;在微湿润状态时,表面平整程度有所改善,仅有细小孔洞存在;在完全湿润状态时,表面裂痕数量和深度又开始增加。对于老化年限较长的2号复合绝缘子,干燥状态下表面粉化层以填料颗粒紧密堆积;在微湿润状态时,填料颗粒堆积度降低,表面生成小孔洞,裂缝也暴露显现出来;在完全湿润状态时,粉化层基本被去除,伞裙材料表面裂痕数量和深度都进一步增加。

SEM测试结果表明,不同运行年限的复合绝缘子伞裙材料表面喷洒不同用量绝缘清洗剂后表面形貌不同,对于1号复合绝缘子,微湿润状态时绝缘清洗剂可以在一定程度上填补老化试样表面的微小裂纹与孔洞,改善其表面平整性与致密性,完全湿润状态时绝缘清洗剂则会破坏表面结构;对于2号复合绝缘子,由于失去表面粉化层的遮蔽作用,绝缘清洗剂用量的增加反而使得材料表面缺陷进一步暴露,这时使用绝缘清洗剂进行清洗不利于复合绝缘子的安全运行。

2.2 水接触角测试结果

硅橡胶复合绝缘子具备出色的耐污闪能力,这得益于硅橡胶外绝缘所拥有的良好憎水性。绝缘清洗剂在恢复绝缘子表面憎水性与憎水迁移性方面发挥着积极作用^[24-26]。然而,经绝缘清洗剂处理后的复合绝缘子,在长时间热老化环境中,其表面憎水性是否会受到影响,目前尚不明确,需展开进一步探索。

为了分析绝缘清洗剂对不同热老化状态硅橡胶伞裙试样表面憎水性的影响,将人工加速老化后的试样喷洒不同用量的绝缘清洗剂并静置恢复 96 h,测得不同硅橡胶试样的水接触角随老化时间的变化规律如图4所示。一般而言,水接触角(θ) $>90^\circ$ 表明该试样表面呈现憎水性,且角度越大憎水性越好; $\theta<90^\circ$ 表明试样表面呈亲水性。从图4可以看出,干燥试样的 θ 随老化时间的增加呈现逐渐减小

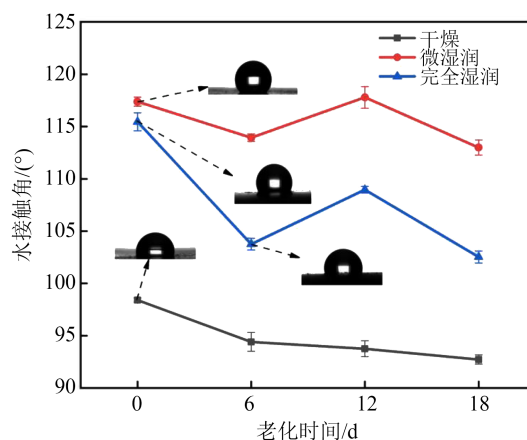


图4 不同硅橡胶伞裙试样的水接触角随老化时间的变化规律

Fig.4 The change law of water contact angles for different silicone rubber umbrella skirt samples with ageing time

的趋势,而经过绝缘清洗剂喷洒的试样 θ 随老化时间的增加呈现先减小后增大再减小的趋势。随热老化时间的增加,虽然干燥试样的憎水性逐渐下降,但平均水接触角都大于 90° ,经过绝缘清洗剂喷

洒的试样,其 θ 在相同老化时间下均高于干燥试样,表明经过绝缘清洗剂喷洒后试样的憎水性得到提升。在干燥状态时,试样的水接触角随热老化时间增加而减小的幅度逐渐减小;在微湿润状态时,试样在老化18 d时的水接触角较未老化时减小了1.93%;而完全湿润状态时,试样在老化18 d时的水接触角较未老化时减小了5.76%。这是由于当试样表面处于干燥状态时,一开始在热应力作用下,大部分硅橡胶伞裙试样表面已经受到不同程度的破坏,随着热老化程度的增加,硅橡胶伞裙剩余未被破坏的面积越来越小,因此憎水性减小幅度逐渐减小。当试样处于微湿润和完全湿润状态时,在老化时间为12 d时,热应力对硅橡胶伞裙试样表面结构的破坏作用较轻,绝缘清洗剂铺展挥发后形成的界面仍然可以维持对外部水分子的排斥作用。微湿润状态下硅橡胶试样在老化时间为12 d时的水接触角最大,这是因为老化初期,热应力使硅橡胶基体中部分化学键断裂,生成了游离的低分子量硅氧烷。同时,清洗剂的渗入起到溶剂携带作用,增加了高分子链间的自由体积,显著降低了低分子量硅氧烷的迁移阻力。在清洗剂挥发过程中,低分子量硅氧烷携带的憎水性 $-\text{CH}_3$ 在试样表面定向排列,维持了界面对水分子的排斥作用。本文使用的绝缘清洗剂有良好的挥发性,在挥发过程中其可在低表面能表面活性剂作用下快速铺展,其中亲水基团吸附于硅橡胶表面,憎水基团定向排列并指向试样外侧,因此将试样喷洒绝缘清洗剂至微湿润状态后,憎水性有所改善;但试样在完全湿润状态时,过量绝缘清洗剂的溶胀作用会进一步破坏老化硅橡胶伞裙试样的内部结构,且残留在老化硅橡胶试样内的清洗剂会阻止硅氧烷小分子迁移到试样表面,因此在完全湿润状态下试样憎水性的改善效果不佳。

尽管在热老化进程中,喷洒绝缘清洗剂的试样存在憎水性恢复的现象,在一定程度上有助于改善材料的憎水性能,但从整体来看,热老化对憎水性造成的负面影响更为显著,导致试样憎水性整体上呈下降趋势。

2.3 FTIR 测试结果

为了进一步分析绝缘清洗剂对不同自然老化状态、不同位置的复合绝缘子伞裙成分变化的影响,分别对两种热老化复合绝缘子的高压、中压、低压端伞裙进行FTIR测试。其中干燥复合绝缘子伞

裙试样的FTIR测试结果如图5所示。复合绝缘子的FTIR图中,波数为 $760\sim 840\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,240\sim 1\,280\text{ cm}^{-1}$ 属于C-H的吸收峰,其在一定程度可反映硅橡胶材料侧链断裂情况;波数为 $1\,000\sim 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 属于Si-O-Si的吸收峰,可反映硅橡胶材料主链断裂情况^[27];波数为 $2\,000\sim 2\,200\text{ cm}^{-1}$ 的两处吸收峰属于硅橡胶内部炔烃;波数为 $3\,300\sim 3\,700\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰属于复合绝缘子内部 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 阻燃剂的-OH,其吸收峰面积可表征复合绝缘子中阻燃剂含量。

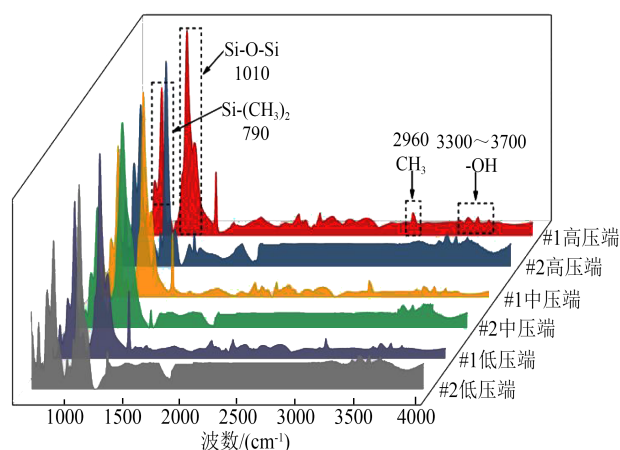


图5 干燥复合绝缘子不同位置伞裙的FTIR测试结果

Fig.5 FTIR test results of umbrella skirt at different position of dry composite insulators

从图5可以看出,对于运行时间较短的1号复合绝缘子,高压端伞裙各基团吸收峰面积大于中压端和低压端,各位置伞裙的红外吸收峰峰值较为接近。这是由于在运行初期,复合绝缘子的老化主要受环境应力影响,高压端靠近导线,承受着高电压和强电场,在一定程度上激发了硅橡胶内部低分子量硅氧烷表面的快速迁移,使得表面含硅特征基团浓度较高,吸收峰面积最大;而低压端位于绝缘子串最上方,电场强度极弱,且更容易受到雨水的自然冲刷而保持表面相对清洁,因此低压端伞裙的老化程度较轻;中压端电场相对较弱,缺乏促使低分子量硅氧烷快速迁移的驱动力,同时又承受着自然环境应力的侵蚀,因此表现老化相对较快,吸收峰面积最小。对于运行时间较长的2号复合绝缘子,低压端伞裙各基团吸收峰面积大于中压端和高压端,各位置伞裙的红外吸收峰峰值相差较大。高压端虽然在初期有低分子量硅氧烷的补充,但在长期运行中持续承受高电压、强电场,不仅静电场吸附污秽严重,且长期伴随的微弱电晕放电和局部电弧

对硅橡胶表面造成了不可逆的破坏,加速了分子链的断裂,吸收峰面积减小,导致高压端老化加剧。

图6为复合绝缘子高压端伞裙喷洒不同含量绝缘清洗剂后的FTIR测试结果,其他位置伞裙试样红外光谱趋势与其类似。

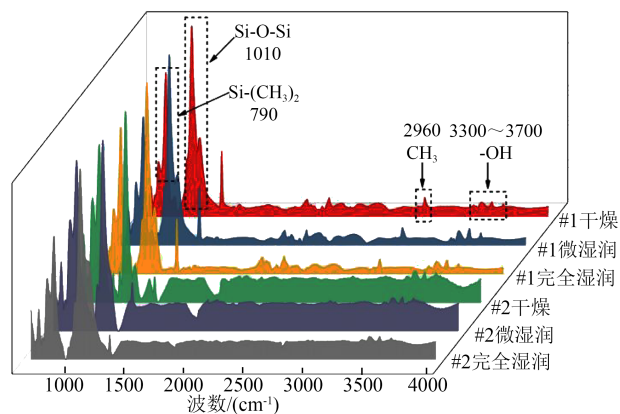


图6 复合绝缘子高压端伞裙喷洒不同含量绝缘清洗剂后的FTIR测试结果

Fig.6 FTIR test results of composite insulators sprayed with different amounts of insulating cleaning agent on the high voltage end umbrella skirt

从图6可以看出,伞裙表面喷洒绝缘清洗剂至微湿润状态时,伞裙试样的红外光谱中 $\text{Si}-(\text{CH}_3)_2$ 、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 、 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 、 $-\text{OH}$ 吸收峰峰值都有所增加。结合SEM观测结果,一方面绝缘清洗剂的脱水缩合反应对老化复合绝缘子伞裙有修补作用,使得被破坏的硅橡胶主链和侧链有所恢复,使得 $\text{Si}-(\text{CH}_3)_2$ 、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 、 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 吸收峰峰值增加^[28];另一方面绝缘清洗剂对复合绝缘子表面粉化层有清除作用,随着阻燃剂严重流失,表面粉化层被逐渐清除,内部老化程度较轻的基体材料得以显露,检测到的 $-\text{OH}$ 含量上升。

经过不同时间热老化处理后,复合绝缘子试样表面结构会发生改变。对经过不同老化时间处理的伞裙试样进行红外光谱测试,结果如图7所示。从图7可以看出,随着老化时间的增加,伞裙试样中 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 吸收峰以及 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 吸收峰的峰值均呈现明显下降趋势。该现象表明,持续的热应力作用会导致硅橡胶表面的高分子主链发生断裂,同时加剧侧链 $-\text{CH}_3$ 的氧化分解,致使材料表面发生氧化降解,有效成分流失,憎水基团减少,表面结构逐渐劣化。

绝缘清洗剂对不同老化程度试样表面的修复机理类似,本文选取老化6 d的试样进行分析。经

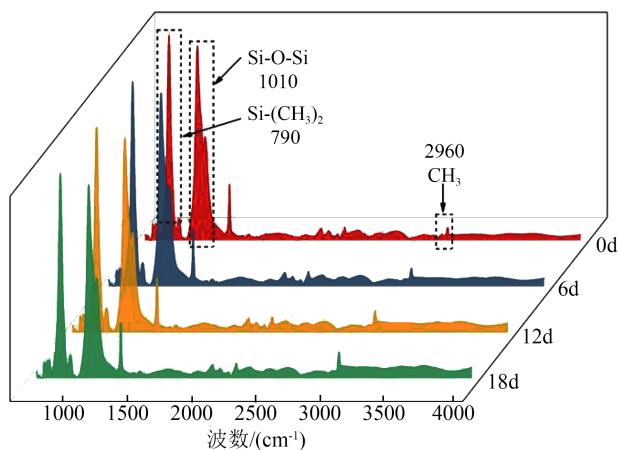


图7 随不同热老化时间处理的伞裙试样FTIR

Fig.7 FTIR of umbrella skirt samples with different thermal ageing time

过6 d热老化处理后,硅橡胶伞裙试样喷洒不同用量绝缘清洗剂后的红外光谱如图8所示。

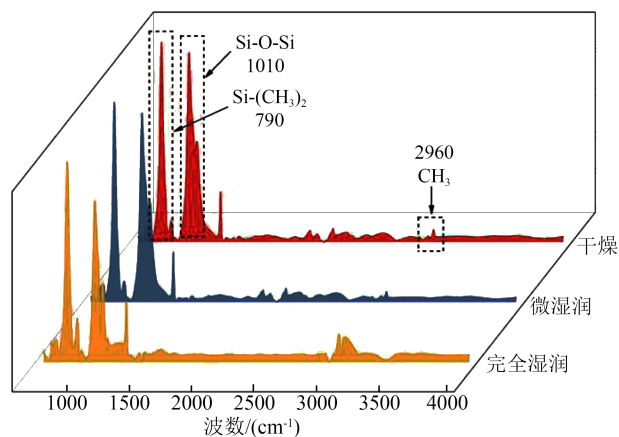


图8 热老化6 d后伞裙试样喷洒不同用量绝缘清洗剂后的FTIR

Fig.8 FTIR of umbrella skirt samples sprayed with different amounts of insulating cleaning agent after thermal ageing for 6 days

从图8可以看出,在微湿润状态时,试样的各官能团吸收峰位置没有改变,并且除了 $\text{C}-\text{H}$ 伸缩振动特征峰强度保持稳定,其他吸收峰的强度均有所上升,说明原本在热应力作用下断裂的硅橡胶主链 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 以及侧链 $\text{Si}-\text{C}$ 有所恢复,这是由于绝缘清洗剂覆盖在硅橡胶伞裙试样的表面阻碍了侧链的氧化断裂反应,同时含有的亲水基团与断裂硅橡胶主链含有的 $\text{Si}-\text{O}$ 键发生脱水缩合反应重新生成了 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ ^[29]。在完全湿润状态时,试样的其他吸收峰强度均降低,仅 $2900\sim 3000\text{ cm}^{-1}$ 处 $\text{C}-\text{H}$ 的伸缩特征吸收峰强度升高,表明绝缘清洗剂用量较高时硅

橡胶伞裙试样表面产生溶胀作用,反而降低了硅橡胶试样交联度,加剧了硅橡胶试样的老化程度。

绝缘清洗剂对不同热老化时间试样的作用效果可通过计算各个状态下试样 $\text{Si}-(\text{CH}_3)_2$ 、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 、 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 官能团吸收峰面积来表征,结果如表 1 所示。

表 1 经过不同时间热老化的硅橡胶试样吸收峰面积
Table 1 The absorption peak area of silicone rubber samples after thermal ageing for different time

状态	老化时间 /d	峰面积/(Abs/cm)		
		760~840 cm^{-1}	1 000~1 100 cm^{-1}	1 240~1 280 cm^{-1}
干燥	0	37.48	46.38	3.48
	6	33.56	42.14	2.99
	12	31.93	39.25	2.40
	18	25.25	32.91	2.31
微湿润	0	44.81	49.68	3.93
	6	39.51	45.79	3.29
	12	35.52	40.38	2.57
	18	26.46	33.56	2.44
完全湿润	0	42.95	47.91	3.76
	6	37.71	44.95	3.13
	12	33.60	37.28	2.37
	18	22.26	27.46	2.11

从表 1 可以看出,试样老化 0、6、12、18 d 后喷洒绝缘清洗剂至微湿润状态时,波数为 760~840 cm^{-1} 的 $\text{Si}-(\text{CH}_3)_2$ 较干燥状态峰面积变化率分别为 19.5%、17.7%、11.2%、4.8%,波数为 1 000~1 100 cm^{-1} 的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 较干燥状态峰面积变化率分别为 7.1%、8.7%、2.9%、2.0%,波数为 1 240~1 280 cm^{-1} 的 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 较干燥状态峰面积变化率分别为 12.9%、10.0%、7.1%、5.6%。由此可以看出,随着老化时间的增加,微湿润状态的绝缘清洗剂对试样表面官能团的修补作用减弱。试样老化 0、6、12、18 d 后喷洒绝缘清洗剂至完全湿润时,波数为 760~840 cm^{-1} 的 $\text{Si}-(\text{CH}_3)_2$ 较干燥试样峰面积变化率分别为 14.6%、12.3%、5.2%、-11.8%,1 000~1 100 cm^{-1} 的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 较干燥试样峰面积变化率分别为 3.2%、6.7%、-5.0%、-16.5%,1 240~1 280 cm^{-1} 的 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 面积变化率分别为 8.0%、4.7%、-1.25%、-8.7%。随着热老化程度的加深,侧链基团 $\text{Si}-(\text{CH}_3)_2$ 、 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 峰面积变化率呈下降趋势,在老化时间为 18 d 时,喷涂绝缘清洗剂试样的各官能团吸收峰面积比未喷涂清洗剂试样反而进一步减小,这是由于绝缘清洗剂的溶胀作用进一步破坏了试样表面。

2.4 电气性能测试结果

将不同老化时间热处理后的硅橡胶试样喷洒不同用量绝缘清洗剂,对其进行沿面闪络电压和泄漏电流测试,结果如图 9 所示。

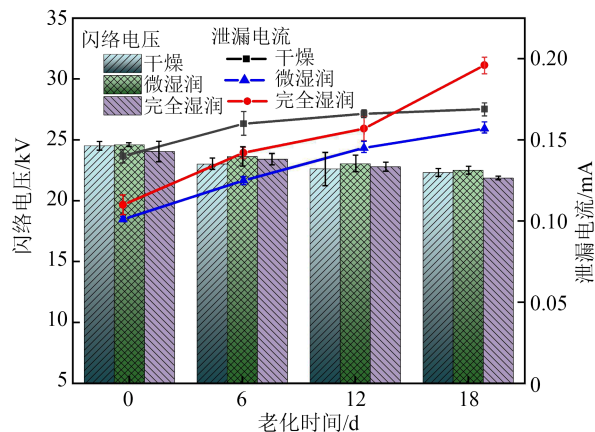


图 9 不同硅橡胶试样的沿面闪络电压和泄漏电流

Fig.9 Surface flashover voltage and leakage current of different silicone rubber samples

从图 9 可以看出,在热老化时间分别为 0、6、12、18 d 时,干燥试样的沿面闪络电压分别为 24.52、23.02、22.62、22.32 kV;喷洒绝缘清洗剂至微湿润状态时,试样的沿面闪络电压分别为 24.61、23.63、23.05、22.42 kV;喷洒绝缘清洗剂至完全润湿状态时,试样的沿面闪络电压分别为 24.05、23.41、22.80、21.87 kV。对于同一热老化程度的硅橡胶试样,微湿润状态下的闪络电压较干燥状态均有一定程度的提升。热老化处理时间越长的试样越容易被溶胀作用破坏^[9],在绝缘清洗剂对试样绝缘性能的改善和抑制两种作用的综合影响下,完全湿润状态试样的闪络电压可能高于也可能低于干燥状态试样,但闪络电压随老化时间的变化趋势与憎水性保持一致。

当热老化时间为 0 d 时,干燥、微湿润和完全湿润状态试样的泄漏电流分别为 0.140、0.101、0.120 mA,微湿润状态试样和完全湿润状态试样的泄漏电流较干燥试样分别下降了 27.8%、14.3%;当热老化时间为 6 d 时,干燥、微湿润和完全湿润状态试样的泄漏电流分别为 0.160、0.125、0.132 mA,微湿润状态试样和完全湿润状态试样的泄漏电流较干燥试样分别下降了 21.8%、17.5%;当热老化时间为 12 d 时,干燥、微湿润和完全湿润状态试样的泄漏电流分别为 0.166、0.145、0.157 mA,微湿润状态试样和完全湿润状态试样的泄漏电流较干燥试样分别下

降了12.6%、5.4%;当热老化时间为18 d时,干燥、微湿润和完全湿润状态试样的泄漏电流分别为0.169、0.157、0.196 mA,微湿润状态试样的泄漏电流较干燥试样下降了7.60%,完全湿润状态试样泄漏电流较干燥试样上升了24.80%。

在老化时间为0~12 d的条件下,两种湿润状态试样的绝缘清洗剂对其泄漏电流都有抑制作用。随着老化时间的增加,绝缘清洗剂对其泄漏电流抑制效果减弱。当老化时间为18 d时,完全湿润状态硅橡胶试样的泄漏电流已经超过了其他两种状态试样。分析认为,在热应力作用下分子间结构被破坏,交联密度下降,使得硅橡胶试样的泄漏电流增大。在相同老化时间下,试样喷洒绝缘清洗剂至完全湿润状态时,绝缘清洗剂对热老化硅橡胶试样的溶胀作用反而会加剧对其内部结构的破坏作用,因此泄漏电流峰值变化幅度进一步增大。

3 结论

本文通过制备自然老化与人工加速老化的复合绝缘子试样,研究了不同绝缘清洗剂用量对其理化特性、憎水性及电气性能的影响,得出主要结论如下:

(1)对于老化程度较轻的1号复合绝缘子伞裙材料,微湿润状态的清洗剂用量可在一定程度上填补表面微小孔洞,改善平整度;对于老化程度较重的2号复合绝缘子伞裙材料,微湿润状态的清洗剂用量能有效去除表面粉化层显露内部基体。但在完全湿润状态下,因过量清洗剂的长时间溶胀作用,两者表面的裂痕数量与深度均会进一步增加,加剧材料表面结构的破坏。不同老化年限的1号和2号复合绝缘子喷洒微湿润状态的绝缘清洗剂用量较为合适。

(2)人工加速老化试样测试结果表明,将绝缘清洗剂喷洒至微湿润状态,能够有效提升老化初期(等效运行3年内)试样的表面憎水性,同时提高沿面闪络电压并抑制泄漏电流。

(3)随着人工加速老化时间的增加,喷洒微湿润状态清洗剂用量的绝缘子试样在物理性能、电气性能、微观结构的改善效果逐渐减弱;而喷洒完全湿润状态清洗剂用量的绝缘子试样物理性能和电气性能在老化时间为0~12 d时改善性能有所减弱,在老化18 d时劣化幅度迅速增大。

参考文献 References

- [1] 关志成,彭功茂,王黎明,等.复合绝缘子的应用及关键技术研究[J].高电压技术,2011,37(3):513-519.
GUAN Zhicheng, PENG Gongmao, WANG Liming, et al. Application and key technical study of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 513-519.
- [2] 孙文健,李亚伟,刘轩东,等.高海拔地区紫外线辐射对复合绝缘子表面憎水性的影响机制[J].电网技术,2018,42(3):996-1002.
SUN Wenjian, LI Yawei, LIU Xuandong, et al. Influence mechanism of UV on surface hydrophobicity of composite insulators in high altitude areas[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 996-1002.
- [3] 邱志敏,康兵,严夏,等.大温差对复合绝缘子硅橡胶老化特性及运行寿命预测研究[J].绝缘材料,2024,57(9):69-79.
QIU Zhimin, KANG Bing, YAN Xia, et al. Study on ageing characteristics and operating life prediction of siliconerubber for composite insulators under large temperature difference[J]. Insulating Materials, 2024, 57(9): 69-79.
- [4] 蔡力,樊亚东,王建国,等.500 kV支柱绝缘子带电水冲洗清洗效率试验研究[J].高电压技术,2017,43(7):2294-2300.
CAI Li, FAN Yadong, WANG Jianguo, et al. Experimental research on hot washing efficiency of 500 kV post insulator[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2294-2300.
- [5] HAO Y, PAN R, ZHANG Y, et al. Influence of water and defects on abnormal temperature rise of composite insulator[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135: 106134.
- [6] 王祖林,王建国,黄松波,等.500 kV输电线路4联污秽绝缘子串带电水冲洗[J].高电压技术,2014,40(12):3688-3694.
WANG Zulin, WANG Jianguo, HUANG Songbo, et al. Hot washing of quadruple polluted insulator string on 500 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3688-3694.
- [7] 毕睿华,张涛,张云翔,等.盘形悬式绝缘子手持式气动清扫装置的设计[J].电瓷避雷器,2015(6):8-11,15.
BI Ruihua, ZHANG Tao, ZHANG Yunxiang, et al. Design of hand-held pneumatic cleaning device for suspension insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(6): 8-11, 15.
- [8] ZENG Z, LIU Q, DUAN R L, et al. Research on live cleaning technology of external insulation of power equipment[C]//2021 5th International Conference on Power and Energy Engineering. Xiamen, China: IEEE, 2021.
- [9] 毕睿华,耿亚明,柴宇,等.500 kV支柱式绝缘子带电清洗依托式绝缘升降支架及双驱除静电清扫刷的研制[J].电瓷避雷器, 2015, 15(5): 6-10.
BI Ruihua, GENG Yaming, CAI Yu, et al. Design of the 500 kV post insulator live cleaning relying insulation elevator and double rid electrostatic cleaning brush[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015, 15(5): 6-10.
- [10] 伊钟毓,杜玮,李海燕,等.动车组复合绝缘子用清洗剂及其性能[J].电镀与涂饰,2021,40(24):1865-1869.
YI Zhongyu, DU Wei, LI Haiyan, et al. Cleaning agent for composite insulator of electric multiple unit and its properties[J]. Electroplating & Finishing, 2021, 40(24): 1865-1869.
- [11] 吴田,葛伟康,何光华,等.新型快挥发电清洗液对支柱复合绝缘子的溶胀效应及改进[J].绝缘材料,2021,54(5):61-65.
WU Tian, GE Weikang, HE Guanghua, et al. Swelling effect and

- improvement of new fast volatile electrified cleaning agent on post composite insulators[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(5): 61-65.
- [12] 吴田,黄帅,黎鹏,等.带电清洗剂对绝缘子用硅橡胶的溶胀效应及其影响研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(4): 80-86.
WU Tian, HUANG Shuai, LI Peng, et al. Study on swelling effect of electrified cleaning agent on silicone rubber used for insulator and its influence[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(4): 80-86.
- [13] 汤振鹏,樊亚东,王建国,等.带电清洗剂对绝缘子工频闪络电压的影响[J]. *高压电器*, 2017, 53(8): 181-186.
TANG Zhenpeng, FAN Yadong, WANG Jianguo, et al. Influence of live-working washing agents on power frequency flash-over voltage of insulator[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(8): 181-186.
- [14] 高嵩,高超,司南,等.电力外绝缘用硅橡胶清洗修复剂制备及性能研究[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(6): 239-243, 251.
GAO Song, GAO Chao, SI Nan, et al. The preparation and performance of silicone rubber clean-repairing agent for power external insulation[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(6): 239-243, 251.
- [15] 赵悦菊,王建辉,卢路,等.硅橡胶清洗修复剂的制备及性能研究[J]. *有机硅材料*, 2019, 33(1): 19-22.
ZHAO Yueju, WANG Jianhui, LU Lu, et al. Preparation and properties of silicone rubber cleaning-repairing agent[J]. *Silicone Material*, 2019, 33(1): 19-22.
- [16] 全国带电作业标准化技术委员会.绝缘体带电清洗剂使用导则:GB/T 25097—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
National Technical Committee 36 on Hot-line Work of Standardization Administration of China. Live washing regulation of insulating live-working washing agent: GB/T 25097—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [17] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会.硫化橡胶或热塑性橡胶热空气加速老化和耐热试验:GB/T 3512—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
National Technical Committee 35 on Rubber & Products of Standardization Administration of China. Rubber, vulcanized or thermoplastic—Accelerated ageing and heat resistance tests—Air-oven method: GB/T 3512—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [18] 徐思奕,曹丹,周城,等.硅橡胶基阻燃输电绝缘子的老化及寿命预测[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(5): 66-71.
XU Siyi, CAO Dan, ZHOU Cheng, et al. Ageing and life prediction of flame-retardant transmission insulators based on silicone rubber[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(5): 66-71.
- [19] 全国绝缘子标准化技术委员会.绝缘子表面湿润性测量导则:GB/T 24622—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
National Technical Committee 80 on Insulators of Standardization Administration of China. Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces: GB/T 24622—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [20] HALLOUM M R, REDDY B S. Investigations on the failure of in-service 400-kV composite insulator[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2023, 30(6): 2769-2778.
- [21] 全国绝缘子标准化技术委员会.绝缘子试验方法 第2部分:电气试验方法:GB/T 775.2—2003[S].北京:中国标准出版社, 2003.
National Technical Committee 80 on Insulators of Standardization Administration of China. Test method for insulators—part 2: Electrical test methods: GB/T 775.2—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [22] SEZAVAR H R, FAHIMA N, HASANZADEH S, et al. Risk assessment of contaminated composite insulators in pre-flashover conditions[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 230: 110256.
- [23] 彭向阳,林宏升,王锐,等.硅橡胶复合绝缘子老化机理及其服役寿命预测研究综述[J]. *高压电器*, 2018, 54(6): 1-8.
PENG Xiangyang, LIN Hongshen, WANG Rui, et al. Review on aging mechanism and service life prediction of silicone rubber composite insulator[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(6): 1-8.
- [24] MARAABA L, AL-SOUFI K, SSENNOGA T, et al. Contamination level monitoring techniques for high-voltage insulators: a review[J]. *Energies*, 2022, 15(20): 7656.
- [25] 刘凯,朱天容,刘庭,等.绝缘子污秽成分分析与清洗剂去污机理研究[J]. *高电压技术*, 2012, 38(4): 892-898.
LIU Kai, ZHU Tianrong, LIU Ting, et al. Chemical composition of high-voltage insulator contamination and detergency mechanism of the electrified detergent for degreasing insulators[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(4): 892-898.
- [26] 叶昊亮,李特,周啸宇,等.复合绝缘子护套发热影响因素及运行性能分析[J]. *绝缘材料*, 2025, 58(5): 132-144.
YE Haoliang, LI Te, ZHOU Xiaoyu, et al. Analysis on heating factors and operating performance of composite insulator sheath [J]. *Insulating Materials*, 2025, 58(5): 132-144.
- [27] ZHOU Z, ZHANG C, ZHANG K, et al. A composite insulator aging level classification method based on fourier transform infrared spectroscopy and deep learning model[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025, 152: 110770.
- [28] GAO Z W, ZHU X C, YANG S J, et al. The FTIR analysis of field aged composite insulators[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1008: 620-623.
- [29] AKBARI M, SHAYEGANI-AKMAL A A. Experimental investigation on the accelerated aging of silicone rubber insulators based on thermal stress[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 149: 109049.
- [30] NING K, LU J, JIANG Z, et al. Aging characteristics and lifespan prediction for composite insulator silicone rubber in a mountainous region environment[J]. *Polymer Testing*, 2023, 122: 108023.

收稿日期:2025-04-26;修回日期:2025-06-18。

作者简介:

吴田(1983—),男(汉族),湖北鄂州人,副教授,博士,主要从事带电作业、高电压与绝缘技术等的工作;

王凌志(2001—),男(汉族),湖北鄂州人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的工作;

通信作者:黎鹏(1989—),男(汉族),湖北咸宁人,副教授,博士,主要从事电工装备电磁多物理场分析、输变电设备外绝缘等的工作。