

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.016

等离子体修复三元乙丙橡胶电缆附件绝缘表面缺陷研究

张伟¹, 吴强², 高超², 陈杰¹, 谭笑¹, 李陈莹¹, 曹京荣¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 国网江苏省电力有限公司, 南京 210024)

摘要: 为提升电缆附件的运行性能和使用寿命,采用大气压等离子体技术对电缆附件绝缘表面裂纹缺陷进行修复研究。从三元乙丙橡胶绝缘电缆附件取样,在绝缘样品表面模拟裂纹缺陷,采用大气压等离子体射流沉积技术对绝缘表面缺陷开展修复实验,测量等离子体修复前后乙丙橡胶样品的表面化学成分、电阻率、沿面耐压和憎水性,分析不同处理条件对三元乙丙橡胶绝缘缺陷修复效果的影响。同时,对比分析了电晕老化对修复前后绝缘样品表面特性的影响。结果表明:采用六甲基二硅氧烷为前驱物,氩气作为载气时,等离子体修复在绝缘缺陷处沉积了含甲基的硅氧涂层,并有效提高了三元乙丙橡胶绝缘表面缺陷处的电阻率和沿面耐压,同时绝缘表面的憎水性获得提升,等离子体修复效果优于直接涂抹前驱物的修复效果;电晕老化使附件绝缘的电气性能下降,而经等离子体修复后的绝缘样品,其体绝缘性能和沿面绝缘性能在电晕老化后仍高于缺陷样品和完好样品。

关键词: 电缆附件; 三元乙丙橡胶; 缺陷修复; 放电等离子体; 电气性能

Research on Plasma Repair of Insulation Surface Defects in EPDM Cable Accessories

ZHANG Wei¹, WU Qiang², GAO Chao², CHEN Jie¹, TAN Xiao¹, LI Chenying¹, CAO Jingxing¹

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to enhance the operational performance and extend the service life of cable accessories, atmospheric pressure plasma technology is adopted to study the repair the surface crack defects on cable accessory insulation. Samples taken from the accessories of EPDM insulated cables, and the crack defects are simulated on the surface of the insulation samples. Atmospheric pressure plasma jet deposition technology is used to carry out repair experiments on the insulation surface defect. The surface chemical composition, resistivity, flashover voltage and hydrophobicity of EPDM samples are measured before and after plasma repair, and the effects of different treatment conditions on the repair effectiveness of EPDM insulation defects are analyzed. At the same time, the influence of corona aging on the surface characteristics of insulation samples before and after repair is compared and analyzed. The results show that, with hexamethyldisiloxane as the precursor and argon gas as the carrier gas, the plasma repair process deposits a methyl-bearing siloxane coating onto the insulation defects. This treatment effectively increases the resistivity and flashover voltage at the surface defect sites of EPDM insulation, and concurrently improves surface hydrophobicity. Corona aging leads to a deterioration in the electrical properties of the accessory insulation, while the body insulation performance and surface insulation performance of the plasma repaired samples are still superior to those of the defective and intact samples after corona aging.

Key words: cable accessories; EPDM rubber; defect repair; discharge plasma; electrical properties

收稿日期:2026-02-16; 修回日期:2026-04-24

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022009)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(J202209).

0 引言

三元乙丙橡胶(ethylene propylene diene monomer, EPDM)是电缆附件绝缘的主要材料之一,其具有优秀的电气强度、机械性能和耐酸碱性能^[1-3]。电缆附件在电缆线路中起过渡和连接的作用,是电缆线路中的薄弱环节。电缆附件在现场安装时易出现划痕和裂纹等缺陷,此外裂纹也会伴随附件的长期运行而生成^[4-7]。电缆附件绝缘表面的裂纹等缺陷容易引起电场畸变及局部放电,严重时将会发生界面放电甚至绝缘击穿等事故^[8-9]。据统计,电缆附件故障占110 kV电缆事故的85.5%,严重影响电力系统的安全稳定运行。整体更换电缆附件会消耗大量的人力物力,因此小范围的对缺陷进行修复是比较合理的选择。

在绝缘表面涂覆涂料是绝缘表面裂纹缺陷的常见修复手段。董平等^[10]采用持久性防污闪涂料对表面裂化和粉化的高温硫化硅橡胶进行修复,并对涂覆后的硅橡胶进行沿面闪络实验,发现修复涂层破坏了硅橡胶电阻率随温度线性变化的规律,且放电后涂层憎水性明显下降。在附件界面涂覆硅脂可有效提升其沿面耐压强度,但硅脂对硅橡胶具有溶胀作用^[11]。王霞等^[12]对硅橡胶表面涂敷硅脂并开展力学测试,结果表明表面涂覆硅脂的硅橡胶老化后的弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率均比未涂硅脂时低,并指出随着电缆附件的长期运行,溶胀作用会降低界面的绝缘强度。绝缘内部缺陷如电缆的水树和电树老化将导致绝缘电气性能下降。周凯^[13]等利用修复液灌装法修复交联聚乙烯电缆绝缘水树老化,并开展修复前后电缆绝缘的击穿电压和损耗因子测试,发现修复时间越长,老化电缆的恢复效果越好。Gao等^[14]利用自修复材料将电树枝引导向微胶囊处,通过释放微胶囊中的愈合剂实现电树老化区域的修复。

近年来,利用等离子体技术对材料进行表面改性成为研究热点^[15]。等离子体增强化学气相沉积(PECVD)方法常用于在聚合物材料表面生成涂层,可获得具有不同功能的固态薄膜^[16-17]。方志团队^[15]采用等离子体射流技术,用硅烷、水和氩气修复硅橡胶绝缘表面的裂纹缺陷,提升了硅橡胶的电气和机械性能。Karl等^[18]通过PECVD的方法对EPDM材料表面改性,降低了材料表面的摩擦系数,并提高了材料表面的水接触角。Alba-Elias等^[19]以正硅酸乙酯为前驱物,利用等离子体射流的方法制备SiO₂涂层,使材料表面具有更高的耐磨性和更低的摩擦

系数。孔飞等^[20]通过大气压等离子体沉积技术在陶瓷表面沉积TiO₂涂层,改性后陶瓷闪络电压提升了36%,并保持着长期的稳定性。

文中采用六甲基二硅氧烷(hexamethyldisiloxane, HMDSO)为前驱物,通过大气压等离子体射流的方法在EPDM绝缘表面缺陷处沉积介质薄膜对其进行修复,测试修复前后绝缘试样的表面化学成分、电阻率、闪络电压、击穿场强及水接触角,评估等离子体射流沉积的修复效果。对修复前后的绝缘试样开展电晕老化实验,分析等离子体修复绝缘缺陷的耐电晕性能。

1 实验方法

1.1 绝缘试样及实验条件

绝缘样品取自三元乙丙橡胶电缆附件绝缘层,样品尺寸为50 mm×50 mm,厚度约为1 mm,利用手术刀在试样表面制造裂纹缺陷,裂纹长度约10 mm、深度约0.2 mm,并使用无水乙醇对试样表面清洁,然后在干燥箱中静置24 h后备用。

等离子体修复实验采用大气压等离子体射流装置进行,实验原理见图1。等离子体射流反应器采用140 mm长的玻璃管作为阻挡介质,电极采用针—环电极,其中铜针作为高压电极,玻璃管外部的环状电极接地。电源采用高频高压电源,输出电压幅值可达20 kV。等离子体修复实验中,以HMDSO作为反应前驱物,高纯度的氩气作为工作气体和载气,并分为两路流出,两路气体流速分别为10 L/min和1 L/min。对表面有划痕缺陷的绝缘试样分别进行不同时间的等离子体修复,对照样品信息见表1。

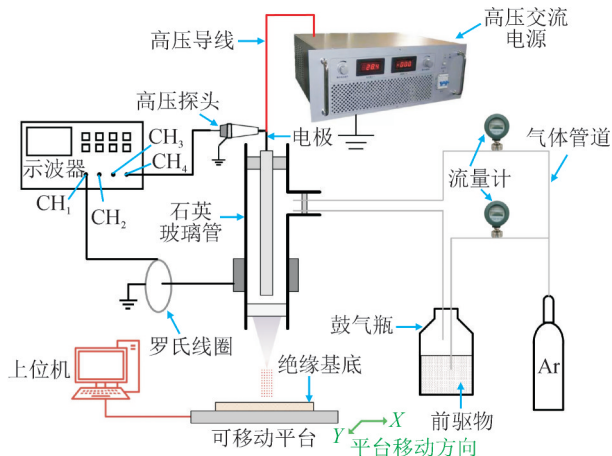


图1 等离子体修复实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of plasma repair experiment

对不同修复条件的EPDM绝缘试样开展电晕老化实验,实验所用放电电极为多针电极。电晕老化时,电极距样品表面约10 mm,电晕放电电压约为

表1 EPDM绝缘试样编号及对照信息

Table 1 Information of EPDM insulation samples

编号	绝缘样品信息
E ₁	表面完好的EPDM绝缘试样
E ₂	表面有划痕,未修复的EPDM试样
E ₃	表面有划痕,等离子体修复2 min的EPDM试样
E ₄	表面有划痕,等离子体修复4 min的EPDM试样
E ₅	表面有划痕,等离子体修复6 min的EPDM试样
E ₆	表面有划痕,直接涂抹前驱物的EPDM试样

12 kV,放电时间1 h,保证不同修复条件的绝缘样品均在相同的电晕放电条件下进行老化实验。

1.2 材料特性测试

通过傅里叶变换红外光谱测试(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)分析EPDM绝缘试样的化学成分。FTIR测试所用设备型号为Nicolet iS50,分辨率 2 cm^{-1} ,扫描波数范围为 $450\sim4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3 电气性能测试

绝缘试样体积电阻率采用三电极法测试,测试设备为Hioki SM-7110,测试电压500 V,每组试样测量10次取平均值,每次测试时间为1 min。绝缘试样闪络电压采用指形电极进行测试,实验过程中电极间距固定为1 cm。实验电源选用工频交流电源,电压上升速率为500 V/s,每组绝缘试样经过10次闪络并取平均值。绝缘试样击穿场强采用球—柱电极进行测试,工频交流电源升压速率为1 kV/s,每组试样进行10次击穿实验并取其平均值。

1.4 憎水性测试

静态接触角法是测量精度较高的一种憎水性测试方法。测试采用JGW-360a接触角测定仪,每次取样 $4\text{ }\mu\text{L}$ 去离子水滴于试样表面,每组测量5次水接触角并求平均值。

2 实验结果与分析

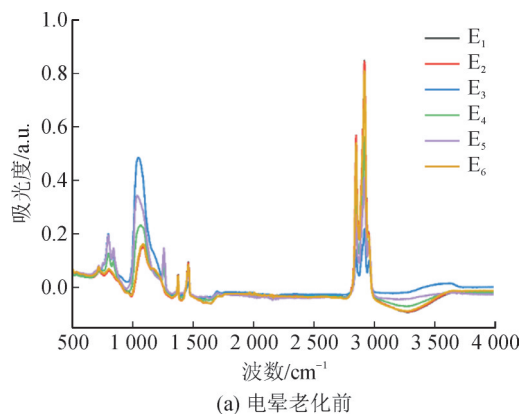
2.1 FTIR测试

傅里叶变换红外光谱可以得到物质所含化学键和官能团的信息,是分析物质组成和结构的有效方法^[21]。EPDM绝缘表面经过以HMDSO作为前驱物的等离子体射流修复后,其绝缘表面FTIR测试结果见图2(a)。波数为 $2\,850$ 、 $2\,920$ 、 $1\,377$ 、 $1\,460\text{ cm}^{-1}$ 处对应EPDM绝缘的基本特征峰,其中 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 对应 $-\text{CH}_2$ 的伸缩振动吸收峰, $1\,377\text{ cm}^{-1}$ 为 $-\text{CH}_3$ 的吸收峰, $1\,460\text{ cm}^{-1}$ 对应 $-\text{CH}_2$ 的变角振动峰。修复前后 $1\,377\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,460\text{ cm}^{-1}$ 两处特征峰强度并未发生明显改变,而 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 对

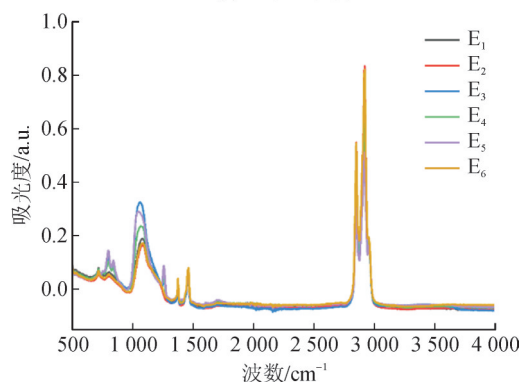
应的特征峰在修复后有不同程度的下降。

除EPDM绝缘典型特征峰外,经等离子体修复的绝缘试样分别在 800 、 842 、 $1\,260\text{ cm}^{-1}$ 处出现新的特征峰,其中 800 cm^{-1} 和 842 cm^{-1} 处吸收峰对应Si-C键, $1\,260\text{ cm}^{-1}$ 处对应Si- CH_3 的特征峰^[4]。在波数为 $1\,000\sim1\,100\text{ cm}^{-1}$ 处的特征峰发生明显上升并偏移,该波段反映了Si-O-Si结构的反对称伸缩振动^[22]。通过FTIR测试结果可以看出,经等离子体修复后的EPDM绝缘试样在其表面引入了含Si的基团,而直接涂抹前驱物的试样表面并未发生结构变化。

电晕老化后EPDM绝缘表面的FTIR测试结果见图2(b)。与电晕老化前相比,EPDM绝缘试样典型特征峰及等离子体修复后新出现的特征峰的位置未发生变化,但新出现的Si-O-Si特征峰、Si-C键和Si- CH_3 的特征峰的峰值发生下降。此外,反映Si-O-Si结构的特征峰峰值下降幅度较大。红外结果表明,电晕老化对EPDM绝缘表面有一定程度的破坏,但其主体绝缘结构依旧保持完整。



(a) 电晕老化前



(b) 电晕老化后

图2 EPDM绝缘试样FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of EPDM insulation samples

2.2 电阻率测试

体积电阻率的测试可较好的分析材料的绝缘特性^[23]。EPDM试样修复及电晕老化前后体积电阻率的变化见图3。EPDM绝缘试样未经电晕老化时,表面具有划痕的试样E₂的体积电阻率相较于完好

试样 E_1 发生了明显的下降,其值约为完好试样的1/5。与试样 E_2 相比,经等离子体修复后的试样体积电阻率均得到了提升,其中等离子体修复4 min的试样 E_4 和修复6 min的试样 E_5 体积电阻率略高于表面完好的试样 E_1 ;表面涂抹HMDSO的试样 E_6 体积电阻率有一定的提升,但提升效果不如经等离子体修复后的试样。

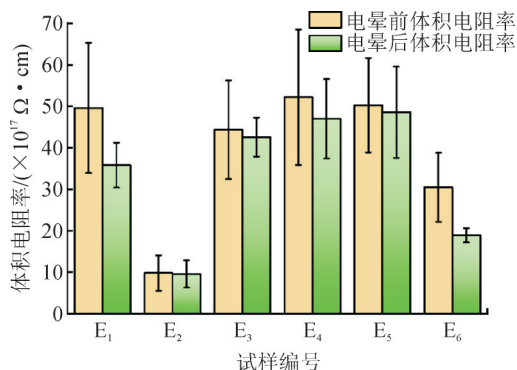


图3 EPDM绝缘试样体积电阻率

Fig. 3 Volume resistivity of EPDM insulation samples

与电晕老化前EPDM试样的体积电阻率相比,电晕老化后EPDM体积电阻率发生不同程度下降。其中完好试样 E_1 和直接涂抹HMDSO的试样 E_6 体积电阻率下降较多,分别下降至未电晕老化的72.2%、61.9%,而经等离子体修复的3个试样体积电阻率仅发生小幅度下降。此外,经等离子体修复的3个试样体积电阻率均高于完好试样 E_1 。从实验结果可以看出,等离子体修复能有效提升绝缘试样的体积电阻率,并对绝缘抗电晕老化有一定的作用,且性能保持稳定。

2.3 闪络电压测试

EPDM试样经修复及电晕老化前后的闪络电压见图4。

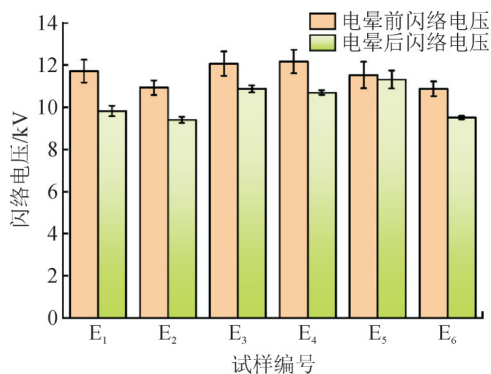


图4 EPDM绝缘试样闪络电压

Fig. 4 Flashover voltage of EPDM insulation samples

EPDM绝缘试样未经电晕老化时,表面具有划痕的试样 E_2 ,闪络电压相较于完好试样 E_1 下降约1 kV。经等离子体修复的试样闪络电压均得到了提升,其中等离子体修复2 min的试样 E_3 和修复

4 min的试样 E_4 的闪络电压略高于表面完好试样,修复6 min的试样 E_5 闪络电压接近完好试样。直接涂抹HMDSO的试样 E_6 闪络电压与试样 E_2 保持一致,闪络电压未得到提升。

电晕老化后EPDM绝缘试样的闪络电压相比于老化前均发生下降。与电晕老化前的闪络电压相比,试样 E_1 的闪络电压从11.7 kV下降至9.5 kV,试样 E_2 闪络电压经电晕老化后下降至9.1 kV,而经等离子体修复的试样 E_3 、 E_4 、 E_5 的闪络电压在电晕老化后均高于10 kV,其中 E_5 试样的闪络电压在电晕老化后下降不明显,仍保持在10.9 kV。而试样 E_6 的闪络电压在电晕老化后仍与试样 E_2 相接近。从实验结果可以看出,等离子体修复能有效提升绝缘试样的闪络电压,经等离子体修复后的试样在电晕老化后闪络电压均高于完好、表面有划痕和直接涂抹HMDSO的试样,等离子体修复对EPDM绝缘抗电晕老化有不错的效果。

2.4 击穿场强测试

击穿场强是评价材料绝缘性能的重要标准^[24]。电晕老化前后EPDM绝缘试样的击穿场强见图5。

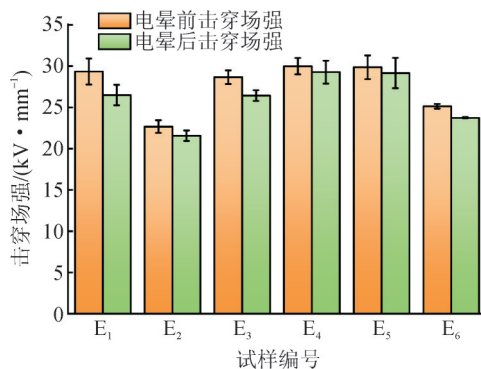


图5 EPDM绝缘试样击穿场强

Fig. 5 Breakdown field strength of EPDM samples

EPDM绝缘试样未经电晕老化时,表面具有划痕缺陷的试样 E_2 击穿场强下降至表面完好试样 E_1 的77%。经等离子体修复后3组绝缘试样击穿场强均得到了提升,其中试样 E_3 、 E_4 击穿场强略高于试样 E_1 。而表面直接涂抹HMDSO的试样 E_6 击穿场强仅高于试样 E_2 ,对击穿场强的提升效果不佳。

电晕老化后,各组EPDM试样击穿场强发生了不同程度的下降。表面有划痕的试样 E_2 相比于完好试样 E_1 击穿场强下降明显,为21.6 kV。经等离子体修复后的试样击穿场强均高于表面完好试样,其中试样 E_4 和试样 E_5 击穿场强均超过29 kV;表面直接涂抹HMDSO的试样 E_6 ,其击穿场强仅略高于表面有划痕的试样 E_2 ,对绝缘试样击穿场强提升的效

果不佳。从结果可以看出,等离子体修复对绝缘试样的击穿场强有较好的提升,同时绝缘试样在电晕后,其击穿场强依旧保持在较高的水准。

2.5 水接触角测试

测量水滴在绝缘表面的静态接触角是评估材料表面憎水性的常用方法^[25]。不同处理条件下绝缘试样憎水性的变化见表2。从测试结果中可以看出,EPDM绝缘试样电晕老化前,试样E₂相比于试样E₁水接触角大幅下降,憎水性变差;经等离子体修复后的试样憎水性均有所提升,其中试样E₂、E₃憎水性接近完好试样;涂抹HMDSO的试样E₆水接触角仅略大于表面有划痕试样。

表2 EPDM绝缘试样水接触角

Table 2 Water contact angle of EPDM insulation samples

编号	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
电晕前水接触角/(°)	111.6	101.2	110.0	110.8	105.6	103.3
电晕后水接触角/(°)	101.0	98.0	98.7	109.3	99.3	98.7

电晕老化后EPDM绝缘试样水接触角发生不同程度下降,经等离子体修复后的试样表面憎水性均强于表面有划痕的试样E₂,其中试样E₄在电晕后憎水性保持较好,憎水性强于表面完好试样E₁。实验结果表明,等离子体修复能有效恢复EPDM缺陷绝缘试样的表面憎水性,同时电晕老化后表面憎水性可保持。

3 讨论

大气压低温等离子体是一种新型的分子活化手段。等离子体表面改性技术是由等离子体中包含的大量高能电子等活性粒子与材料表面发生物理化学反应,进而改变材料的表面特性。前驱物在等离子体作用下发生聚合反应,通过射流可在基底表面迅速冷凝形成聚合物涂层^[16,26]。HMDSO是硅油、硅橡胶合成的重要原料,其单体沉积速度较快,裂解产生的Si-O键可与基体表面紧密结合^[27]。

在放电等离子体修复绝缘表面缺陷时,Ar等离子体射流中包含大量的高能电子和激发态氩原子Ar*,这些活性粒子能量高于HMDSO中主要化学键键能,其中包括Si-O(460 kJ/mol)、Si-C(347 kJ/mol)、C-H(414 kJ/mol),高能电子和激发态氩原子将与前驱物HMDSO发生反应,形成如Si-O-Si、Si-CH₃等基团^[28]。此阶段HMDSO发生的反应见图6^[29-31]。

此外,等离子体射流中包含的高能粒子还将轰击EPDM绝缘基体表面,打开主链C-C键或侧链C-H键,产生大分子自由基,自由基进一步与前驱物反

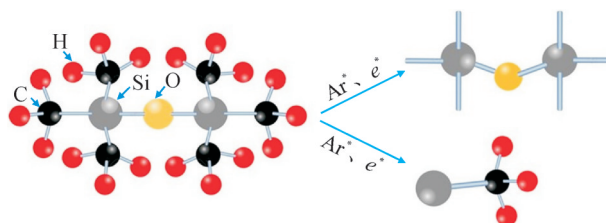


图6 等离子体与HMDSO基本反应

Fig. 6 Basic reactions between plasma and HMDSO

应生成的含Si基团作用,进而生成新的涂层沉积在缺陷处。等离子体射流具有良好的穿透力,可以确保裂缝内壁与低聚物充分反应,因此,低聚物可以通过该方式填充微空隙并修复裂缝,使其表面发生聚合或交联^[8]。FTIR测试结果显示,通过放电等离子体修复后的EPDM表面在波数800、842、1 260 cm⁻¹处出现新的特征峰,分别对应Si-C键和Si-CH₃,同时,等离子体修复后Si-O-Si基团明显增加,表明等离子体修复在EPDM绝缘缺陷表面引入含甲基的硅氧涂层。与EPDM主链C-C键相比,含Si基团键能较高,结构也更为稳定^[32]。此外,Si-CH₃具有非极性特征,提升了三元乙丙橡胶表面的憎水性。

经等离子体修复在绝缘表面沉积的硅氧薄膜覆盖了绝缘表面的物理缺陷,完善了缺陷试样的表面结构,降低局部电场畸变率,绝缘试样的沿面耐压能力得到了提升。等离子体修复后试样体积电阻率均得到明显提升,这与修复过程中在绝缘表面沉积的含Si基团有关,影响了绝缘裂纹处电荷运输的过程。同时沉积的硅氧化物增加了绝缘表面结晶—非结晶界面,可以起到散射电子的作用,并降低了电荷的迁移率^[33],进而提高了绝缘试样的体积电阻率。试样表面裂纹为绝缘的薄弱点,出现裂纹等局部缺陷将导致缺陷处电场分布不均,产生电场畸变,致使绝缘试样在该处发生击穿^[4]。经等离子体修复后,裂纹得到填充,绝缘结构趋于完整,电场畸变减小,绝缘试样击穿场强得到明显提升,且略高于表面完好试样,这与沉积的薄膜具有优异的绝缘性能有关^[34],抑制了电荷从裂纹缺陷处向基体内发生迁移。绝缘试样击穿场强的测试结果与体积电阻率测试结果一致,表明等离子体修复对绝缘试样的电气性能的恢复效果较好。

长期电晕放电将导致材料表面发生劣化产生裂纹,严重时材料表面会出现破损或大直径孔洞^[35]。电晕放电产生的高能粒子会轰击EPDM绝缘表面,使其分子链断裂,破坏三元乙丙橡胶的化学结构。电晕老化后EPDM主特征峰和修复涂层的Si-CH₃、Si-C及Si-O-Si特征峰均不同程度地减弱,表明电晕老化

破坏了EPDM表面结构。电晕老化后Si-CH₃特征峰的下降也导致了材料表面水接触角发生下降,憎水性变差。电晕老化可能在材料表面产生微裂纹等缺陷,破坏修复后EPDM表面新生成的交联结构,导致其体积电阻率和闪络电压相较于电晕前发生一定程度下降。但因修复产生的硅氧涂层结构更加稳定,使得电晕后的EPDM绝缘试样仍能保持较高的电气性能,证明等离子体修复对抗电晕老化有一定效果。

4 结论

文中利用大气压等离子体射流对三元乙丙橡胶绝缘裂纹缺陷进行修复,并对修复前后的三元乙丙橡胶绝缘试样开展了电晕老化实验,测试了修复前后及电晕老化前后试样的表面化学组成、电阻率、闪络电压、击穿场强及憎水性。主要结论如下:

1)基于六甲基二硅氧烷和氩气的大气压等离子体射流在三元乙丙橡胶绝缘表面缺陷处沉积了含甲基的硅氧涂层,完善了缺陷处的分子结构。等离子体修复后,EPDM绝缘的电气性能得到显著回升,沿面耐压强度和体积电阻率高于缺陷试样和完好试样,同时绝缘表面的憎水性获得提升。等离子体修复效果优于直接涂抹前驱物的修复效果。

2)电晕老化显著降低三元乙丙橡胶绝缘的电气性能,电晕老化后,EPDM的体积电阻率和沿面耐压均下降;等离子体修复具有良好的抗电晕老化能力,修复后的EPDM绝缘在电晕老化后仍保持较好的电气性能,其体积电阻率、沿面耐压强度和击穿场强高于电晕老化后的缺陷试样和完好试样。

参考文献:

- [1] 陈杰,吴世林,胡丽斌,等. 退役高压电缆附件绝缘状态及理化性能分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2650-2658.
Chen Jie, Wu Shilin, Hu Libin, et al. Analysis of insulation state and physicochemical property of retired high-voltage cable accessories[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2650-2658.
- [2] 龚渝涵,李俊娜,田君杨,等. 典型变电站沟内线缆 HEMP耦合仿真研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 47-53.
Gong Yuhuan, Li Junna, Tian Junyang, et al. Simulation study on HEMP coupling of cables in the trench of typical substation[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 47-53.
- [3] 贺冬珊,文俊,杨俊,等. 高电缆化率对多馈入直流受端电网稳定性的影响研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(11): 30-37.
He Dongshan, Wen Jun, Yang Jun, et al. Impact of high cableization ratio on stability of multi-infeed DC receiving-end grids[J]. Smart Power, 2025, 53(11): 30-37.
- [4] 胡丽斌,张传升,谭笑,等. 退役电缆附件微观结构与电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 770-780.
Hu Libin, Zhang Chuansheng, Tan Xiao, et al. Research on microstructure and charge characteristics of cable accessories out of service[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 770-780.
- [5] 袁发庭,李昊樾,李胡强,等. 基于SSA-BP和ICEEMDAN-NTEO算法的电缆故障识别及精确定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2026, 41(2): 127-144.
Yuan Fating, Li Haoyue, Li Huqiang, et al. Cable fault identification and precise location method based on SSA-BP and ICEEMDAN - NTEO algorithms[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2026, 41(2): 127-144.
- [6] 王植,王宾. 一种可反映电缆全类型故障的相模变换矩阵[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(6): 42-50.
Wang Zhi, Wang Bin. A phase - mode transformation matrix for reflecting all types of cable faults[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 42-50.
- [7] 蒋浩月,常凯颖,伊德伦,等. 老旧XLPE电缆绝缘状态评估方法及其应用[J]. 电力工程技术, 2026, 45(3): 20-27.
Jiang Haoyue, Chang Kaiying, Yi Delun, et al. Condition assessment method of old XLPE cable insulation and its application [J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45(3): 20-27.
- [8] Zhu Xi, Xu Jingang, Cui Xinglei, et al. Plasma-electrified repair of damaged polymer composites for surface crack healing and insulation recovery[J]. Chemical Engineering Journal, 2022 (449): 137754.
- [9] 邓红雷,李力行,涂画,等. 基于改进TFDR法的核电站仪控电缆断裂缺陷检测[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 177-185.
Deng Honglei, Li Lixing, Tu Hua, et al. Fracture detection of I & C cable in NPP based on improved TFDR method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 43(4): 177-185.
- [10] 董平平,高丽娟,梁英. 硅橡胶复合套管用PRTV修复后表面放电对其憎水性及电性能的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 125-131.
Dong Pingping, Gao Lijuan, Liang Ying. Effect of surface discharge on hydrophobicity and electrical properties of silicone rubber composite bushing after PRTV remediation[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 125-131.
- [11] 王霞,王华楠,陈飞鹏,等. 涂覆硅脂对电缆附件绝缘溶胀机理及影响因素[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3177-3186.
Wang Xia, Wang Huanan, Chen Feipeng, et al. Insulation swelling mechanism and influencing factors of silicone grease coated in cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3177-3186.
- [12] 王霞,姚航,吴锴,等. 交联聚乙烯与硅橡胶界面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 Xia, Yao Hang, Wu Kai, et al. Effect of different coating silicone grease on space charge characteristics at XLPE/SR interface[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 74-79.
- [13] 周凯,赵威,管顺刚,等. 硅氧烷对水树老化后的交联聚乙烯电缆的修复研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 29-35.
Zhou Kai, Zhao Wei, Guan Shungang, et al. Study of siloxane injection technology on XLPE cables for water tree aging[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 29-35.
- [14] Gao Lei, Yang Yang, Xie Jiaye, et al. Autonomous self-healing of electrical degradation in dielectric polymers using in situ electroluminescence[J]. Matter, 2020, 2(2): 451-463.
- [15] 梅丹华, 方志, 邵涛. 大气压低温等离子体特性与应用研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1339-1358.
- Mei Danhua, Fang Zhi, Shao Tao. Recent progress on characteristics and applications of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1339-1358.
- [16] Geng Kuiwei, Chen Ditao, Zhou Quanbin, et al. AlGaIn/GaN MIS-HEMT with PECVD SiN_x, SiON, SiO₂ as gate dielectric and passivation layer[J]. Electronics, 2018, 7(12): 1-10.
- [17] 纪多, 李春阳, 杨旭, 等. 表面接枝电压稳定剂改善三元乙丙橡胶界面绝缘性能[J]. 电工技术学报, 2025, 40(15): 4941-4953.
- Ji Duo, Li Chunyang, Yang Xu, et al. Enhanced interface insulation performance of EPDM by surface grafting of voltage stabilizer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(15): 4941-4953.
- [18] Karl C W, Rahimi W, Kubowicz S, et al. Surface modification of ethylene propylene diene terpolymer rubber by plasma polymerization using organosilicon precursors[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2020, 2(9): 3789-3796.
- [19] Alba-elías F, Ordieres-meré J, González-marcos A. Deposition of thin-films on EPDM substrate with a plasma-polymerized coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(2-3): 234-242.
- [20] Kong Fei, Zhao Mingming, Zhang Cheng, et al. Two-phase-interfaced, graded-permittivity titania electrical insulation by atmospheric pressure plasmas[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(1): 1900-1909.
- [21] 张鹏, 胡攀峰, 陈潇一, 等. 高聚物复合绝缘子憎水性能的研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 97-103.
- Zhang Peng, Hu Panfeng, Chen Xiaoyi, et al. Research on hydrophobicity of polymer composite insulator[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 97-103.
- [22] Amirzada M R, Khan Y, Ehsan M K, et al. Prediction of surface roughness as a function of temperature for SiO₂ thin-film in PECVD process[J]. Micromachines, 2022, 13(2): 314.
- [23] 聂永杰, 赵现平, 李盛涛. XLPE电缆状态监测与绝缘诊断研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1361-1371.
- Nie Yongjie, Zhao Xianping, Li Shengtao. Research progress in condition monitoring and insulation diagnosis of XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1361-1371.
- [24] 赵义焜, 张国强, 郭润睿, 等. 高频变压器用耐高温型匝间绝缘材料的击穿特性[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 657-665.
- Zhao Yikun, Zhang Guoqiang, Guo Runrui, et al. Breakdown characteristics of heat-resistant inter-turn insulation materials in high-frequency transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 657-665.
- [25] Guan Honglu, Chen Xiangrong, Du Hao, et al. Surface potential decay and DC surface flashover characteristics of DBD plasma-treated silicone rubber[J]. Nanotechnology, 2020, 31(42): 424005.
- [26] Yu Weixin, Kong Fei, Dong Pan, et al. Depositing chromium oxide film on alumina ceramics enhances the surface flashover performance in vacuum via PECVD[J]. Surface and Coatings Technology, 2021(405): 126509.
- [27] 王迎, 李淳. 射频等离子体聚合沉积六甲基二硅氧烷[J]. 大连工业大学学报, 2008, 27(1): 76-79.
- Wang Ying, Li Chun. Deposition of hexamethyldisiloxane film by RF plasma polymerization[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2008, 27(1): 76-79.
- [28] 胡多, 任成燕, 章程, 等. 等离子体射流处理对聚全氟乙丙烯薄膜沿面绝缘特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4633-4640.
- Hu Duo, Ren Chengyan, Zhang Cheng, et al. Effect of deposited film on the surface insulation characteristics of FEP material by atmospheric pressure plasma jet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4633-4640.
- [29] 方志, 张波, 周若瑜, 等. HMDSO添加对大气压Ar等离子体射流阵列放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1775-1783.
- Fang Zhi, Zhang Bo, Zhou Ruoyu, et al. Effect of HMDSO addition on discharge characteristics of atmospheric pressure plasma jet array in Argon[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1775-1783.
- [30] Kakiuchi H, Higashida K, Shibata T, et al. High-rate HMDSO-based coatings in open air using atmospheric-pressure plasma jet[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2012, 358(17): 2462-2465.
- [31] Blanchard N E, Hanselmann B, Drost J, et al. Densification and hydration of HMDSO plasma polymers[J]. Plasma Processes and Polymers, 2015, 12(1): 32-41.
- [32] Liang Hucheng, Du Boxue, Li Jin, et al. Effects of non-linear conductivity on charge trapping and de-trapping behaviours in epoxy/SiC composites under DC stress[J]. IET Science Measurement & Technology, 2018, 12(1): 83-89.
- [33] Sjøstødt H, Gubanski S M, Serdyuk Y V. Charging characteristics of EPDM and silicone rubbers deduced from surface potential measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(3): 696-703.
- [34] Bil A S, Alexandrov S E. The effect of the process parameters on the composition and properties of silica-like films deposited by atmospheric pressure PECVD in the system TEOS-He-O₂[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2022, 42(6): 1345-1360.
- [35] 鲁大勇, 李朝伟, 史敬天, 等. 电晕老化对硅橡胶材料热刺激电流和表面情况影响研究[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 93-98.
- Lu Dayong, Li Chaowei, Shi Jingtian, et al. Study of the corona aging effect to TSC and SEM of silicone rubber materials[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 93-98.

张伟(1989—),女,高级工程师,研究方向为电力电缆状态检测与评价技术、电缆运行状态智能诊断(通信作者)(E-mail: zw_xjtu@163.com)。