

等离子体硅沉积对 XLPE/SIR 界面放电的影响研究

燕一博¹, 夏国巍¹, 段祺君², 骆立衡¹, 尹国华¹, 谢庆¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 北京智慧能源研究院, 北京 102209)

摘要: 电缆接头的交联聚乙烯(XLPE)与硅橡胶(SIR)界面发生放电是导致电缆故障的主要原因之一。为改善这一现象, 本文对 XLPE 样片表面进行不同时间等离子体硅沉积处理, 并对其进行微观形貌测试和界面放电实验。结果表明: 等离子体硅沉积技术能有效提高 XLPE/SIR 界面的耐压性能。随着等离子体硅沉积处理时间的增加, XLPE 样片表面粗糙度先减小后增大, 其变化趋势与 XLPE/SIR 界面的起始放电电压、击穿电压和升压幅值的变化趋势相同, 与表面电阻率的变化趋势相反。其中, 处理时间为 3 min 的 XLPE 样片具有最小的表面粗糙度($R_a=41.8$ nm)和最大的表面电阻率($857 \times 10^{12} \Omega$)。在该处理时间下, XLPE/SIR 界面的实际接触面积最大、界面的微孔隙数量最少、击穿电压提升幅度最大, 其中击穿电压相对于未处理 XLPE/SIR 界面提升了 66.7%。

关键词: 等离子体硅沉积; 交联聚乙烯; 硅橡胶; 界面放电; 表面粗糙度

Effect of plasma silicon deposition on XLPE/SIR interface discharge

YAN Yibo¹, XIA Guowei¹, DUAN Qijun², LUO Liheng¹, YIN Guohua¹, XIE Qing¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Beijing Smart Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Interfacial discharge between XLPE and SIR in cable joints is one of the main causes of cable failure. In order to improve this phenomenon, the XLPE sample surface was treated by plasma silicon deposition with different time, and the micro-morphology and interface discharge tests were carried out. The results show that the plasma silicon deposition technology can effectively improve the voltage resistance of XLPE/SIR interface. With the increase of plasma silicon deposition treatment time, the surface roughness of XLPE sample decreases at first and then increases, and its change trend is the same as that of the initial discharge voltage, breakdown voltage, and voltage increase amplitude of XLPE/SIR interface, and is opposite to that of the surface resistivity. The XLPE sample after 3 min of plasma silicon deposition has the smallest surface roughness ($R_a=41.8$ nm) and the largest surface resistivity ($857 \times 10^{12} \Omega$). Under this treatment time, the XLPE/SIR interface has the largest actual contact area, the fewest micro-pores, and the largest increase in breakdown voltage. Among them, the breakdown voltage increases by 66.7% compared with the untreated XLPE/SIR interface.

Key words: plasma silicon deposition; crosslinked polyethylene; silicone rubber; interfacial discharge; surface roughness

0 引言

高压电缆由于其良好的绝缘性能和可靠性, 已广泛应用于输电领域。然而受生产工艺和运输条件限制, 单根电缆的长度无法满足输电需求, 导致安装时需通过接头连接多段电缆。电缆接头内部容易产生电荷积聚, 这增加了绝缘故障发生风险的概率^[1-4]。电缆接头处主绝缘交联聚乙烯(XLPE)和

增强绝缘硅橡胶(SIR)间由于材料性能存在差异^[5-6], 在两种材料界面处容易积累空间电荷, 从而导致电场畸变并发生放电事故^[7-9]。据统计, 电缆接头处的界面放电是导致电缆故障的主要原因之一^[10], 因此改善 XLPE/SIR 复合界面的局部放电现象至关重要。

为了改善 XLPE/SIR 复合界面处局部放电的情况, 研究人员进行了大量探索。研究表明, XLPE/SIR 界面的特性取决于很多方面, 比如表面粗糙度、电缆接头密封性、温度和运行环境等^[11-14]。张世泽

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277147); 北京市自然科学基金资助项目(3222057); 中国博士后科学基金资助项目(2023M741322)。

等^[15]采用激光剥离技术来降低XLPE电缆表面的粗糙度,提高了电缆绝缘层的界面绝缘性能。古亮^[16]采用不同类型的砂纸对聚乙烯(PE)进行打磨,发现PE表面粗糙度越高,PE/SIR界面的起始放电电压越小。邹林等^[17]通过施加一定的界面压强模拟电缆附件中的界面压强,研究不同界面压强和不同表面粗糙度的PE对PE/SIR界面局部放电特性的影响,结果表明PE表面越粗糙,局部放电起始电压越小;随着界面压强的增大,PE/SIR界面的局部放电起始电压增大,局部放电量逐渐减小,总放电次数也减小。柳松等^[18]测量分析了XLPE/SIR界面涂覆两种不同硅脂,在不同粗糙度的交流及冲击电压下的击穿特性,结果表明XLPE/SIR界面的光滑程度越高,界面的击穿电压值越大。尽管上述技术取得了显著成效,但由于存在处理周期长、操作复杂以及设备成本高等问题,大规模应用于工业生产中仍面临挑战。等离子体技术因操作方便、设备简单、效率高和环境友好等特点,近几年来成为了材料改性领域的研究热点^[19-20];而硅沉积技术具备提供低温沉积、高质量薄膜、快速沉积速率、薄膜均匀性、环境友好、广泛的应用范围和可控性强等优点,成为等离子体技术的常用方法之一。C D SEOK等^[21]研究发现,等离子体硅沉积梯度改性可使环氧树脂(EP)不同区域的表面电导率实现梯度分布,改性后的样品表面变得更加光滑。

本文采用等离子体硅沉积技术对XLPE表面进行改性处理,并调控XLPE表面粗糙度和表面电阻率。在XLPE表面分别进行不同时间的等离子体硅沉积,并测试XLPE表面的微观形貌以及XLPE/SIR界面的起始放电电压、击穿电压和最大放电量,研究等离子体硅沉积处理时间(简称等离子体处理时间)对XLPE/SIR界面放电的影响。

1 实验

1.1 XLPE样片的制备

先将热压成型机(型号为XLB-D,青岛锦九洲橡胶机械有限公司)的温度设置为170℃,然后将铺上XLPE颗粒的模具平放在热压成型机的下板中央进行预热,等热压成型机的温度升至170℃后再保持10 min,此时XLPE颗粒已经融化。保持温度为170℃,按照5 MPa/5 min+10 MPa/5 min+15 MPa/5 min的程序进行热压,最终制得XLPE样片。

1.2 等离子体硅沉积XLPE样片

应用图1所示的实验平台进行等离子体硅沉积实验。首先将制备好的XLPE样片放置在真空干燥箱中干燥12 h;然后取出干燥后的XLPE样片置于DBD反应釜正中心,盖上石英玻璃并调节放电电极。设置水浴加热锅温度为70℃,将盛放TEOS的洗气瓶放入水浴加热锅加热5 min后打开两路Ar气,通过质量流量计将直接通入反应釜的一路Ar气流速设置为2.5 mL/s,与洗气瓶相连的一路Ar气流速设置为0.4 mL/s。先将混合气体通入反应釜1 min,之后排出反应釜内的空气。设置电源电压为7 kV,电源频率为60 kHz,然后对XLPE样片进行不同时间的等离子体硅沉积。

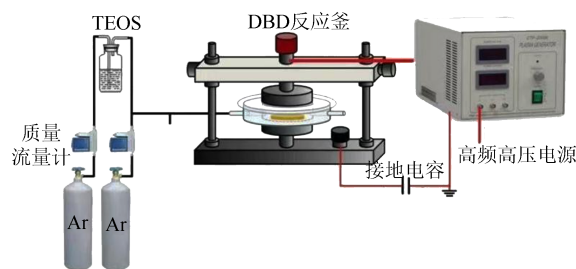


图1 等离子体硅沉积实验平台

Fig.1 Plasma silicon deposition experiment platform

1.3 XLPE/SIR界面耐压试验

实验中电缆接头的模型从上到下由有机玻璃上盖板、XLPE样片、铜电极、SIR样片、有机玻璃下盖板和螺母组成。将铜电极置于XLPE和SIR两个样片的中间位置,并保证两个铜电极的尖端距离为1 cm。

按照图2所示的电路图搭建好整个实验放电回路,在打开开关之前检查整条电路的通断情况。打开调压器和变压器开关后,缓慢按下升压按钮进行升压,当听到试样平板产生强烈的电晕声时,立刻降低加压的速度,通过分压器记录此时的起始放电电压并通过采集卡对局放信号进行采集和分析。当加压至整个XLPE/SIR界面处发生击穿时,记录试样的击穿电压。发生击穿后迅速按下降压键将电压降至0,然后关闭调压器开关。

1.4 XLPE表面电荷消散速率测试

基于等温表面电流衰减(isothermal surface potential decay, ISPD)法对不同试样进行表面电荷消散速率测试,表面电荷消散实验平台如图3所示。首先开启静电电位计,打开电脑上的数据采集软

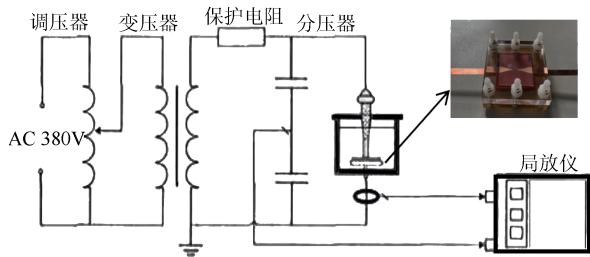


图2 实验放电电路图

Fig.2 Experimental discharge circuit diagram

件,利用针电极施加7 kV 直流电压对XLPE 样片表面进行1 min 电晕充电。将有源电容探头置于样片上方2 mm 处,用静电探头对准XLPE 样片的充电位置并将数据采集软件上的采集频率设置为10 Hz,采集30 min 内XLPE 样片的表面电位数据。采样完成后关闭采集软件和静电探头,并更换新样片重复上述步骤。将实验数据用程序进行归一化处理得到试样的表面电位衰减曲线,最后根据处理后的数据计算出所有样片的陷阱能级分布曲线。

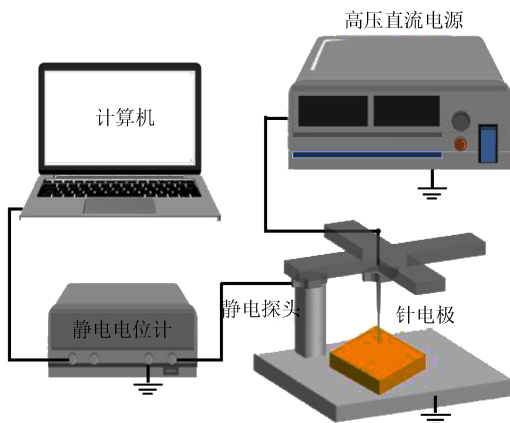


图3 表面电荷消散实验平台

Fig.3 Surface charge dissipation experiment platform

2 实验结果

2.1 局部放电测试结果

随着等离子体处理时间存在差异的增加,不同XLPE/SIR 界面放电情况。将XLPE/SIR 试样放在局部放电电路进行放电实验,利用采集卡记录处理时间为0、1、2、3、4、5 min 的等离子体改性XLPE/SIR 界面的起始放电电压和击穿电压,测试结果如表1所示,每种试样取5组结果的平均值进行记录。

从表1可以看出,随着等离子体处理时间的增加,XLPE/SIR 界面的起始放电电压、击穿电压和升压幅值(击穿电压与起始放电电压的差值)都呈现出先增大后减小的趋势。升压幅值越大,XLPE/SIR

界面耐受的电压范围越大。其中处理时间为3 min 的XLPE/SIR 界面起始放电电压、击穿电压和升压幅值均达到最大,其击穿电压相对于未处理XLPE/SIR 界面提升了66.7%,达到最大的提升效果,从而能够有效地减少界面放电次数。

表1 不同处理时间XLPE/SIR 界面的局部放电测试结果
Table 1 Partial discharge test results of XLPE/SIR interface with different processing time

处理时间/min	kV		
	起始放电电压	击穿电压	升压幅值
0	5.7	9.6	3.9
1	6.5	10.6	4.1
2	6.7	13.5	6.8
3	7.6	16.0	8.4
4	7.2	15.2	8.0
5	6.8	13.8	7.0

为了验证研究XLPE/SIR 界面的最大放电量和放电次数,进一步测试了样片的PRPT 谱图,结果如图4所示。谱图的纵坐标代表电量,谱图上的小点个数代表放电次数。从图4可以看出,XLPE/SIR 界面的最大电量随等离子体处理时间的增加呈

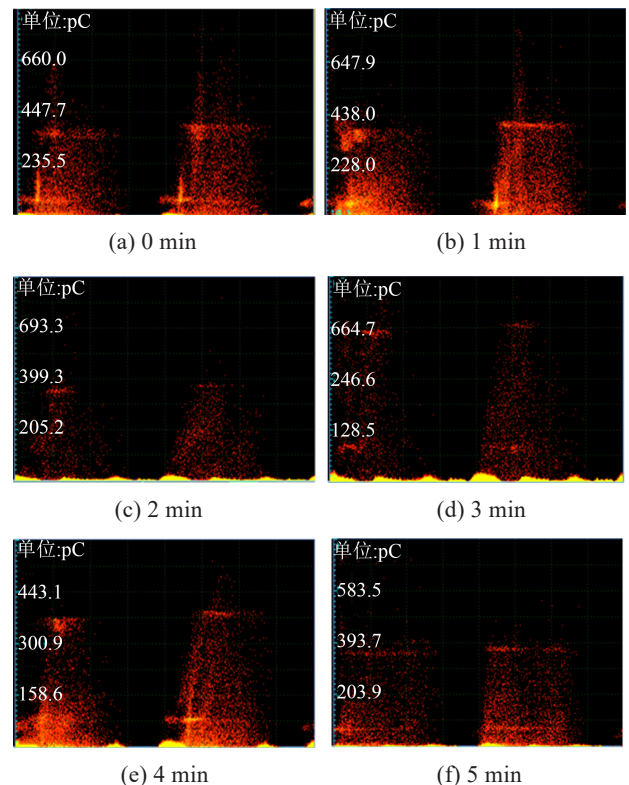


图4 不同处理时间XLPE/SIR 界面的PRPT 谱图

Fig.4 PRPT spectra of XLPE/SIR interface with different processing time

现出先减小后增大的趋势。未处理的XLPE/SIR界面最大放电量达到660.0 pC,而经过3 min处理后的XLPE/SIR界面的最大放电量减小至364.7 pC。处理时间为2 min和3 min的XLPE/SIR界面放电次数远小于其他处理时间的XLPE/SIR界面放电次数。

2.2 XLPE样片表面SEM测试

为了更好地观察等离子体硅沉积技术对XLPE样片表面的影响,对不同等离子体处理时间的XLPE样片表面进行SEM测试,结果如图5所示。

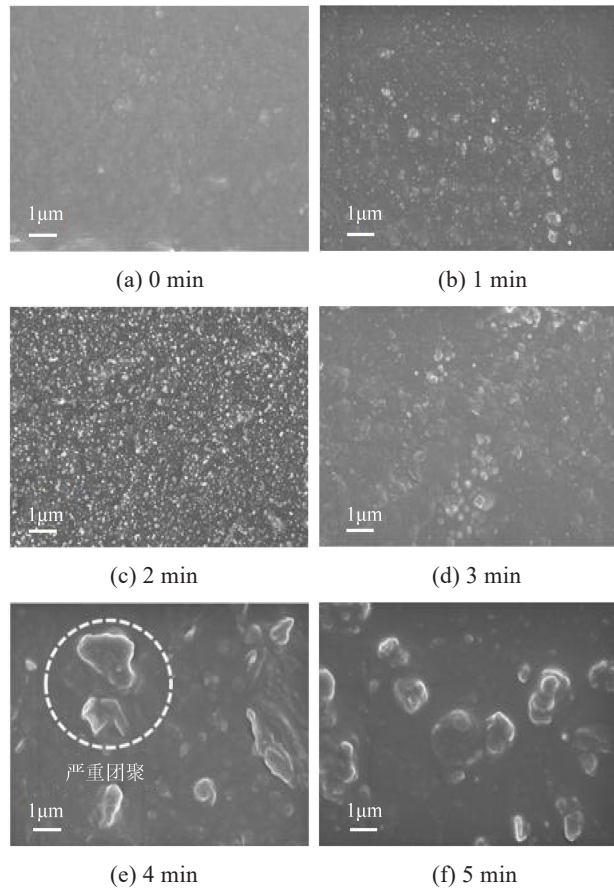


图5 不同处理时间XLPE样片的SEM图像

Fig.5 SEM images of XLPE samples with different processing time

从图5可以看出,未处理的XLPE样片表面有少量颗粒物分布,表面整体比较光滑。处理时间为1 min和2 min的XLPE样片表面出现了大量颗粒物。随着处理时间的增加,XLPE样片表面的颗粒物发生团聚并聚集成大的颗粒物,其中处理时间为5 min的XLPE样片表面团聚现象最严重。

图6为不同等离子体处理时间XLPE样片的EDS图像,其中紫色部分为Si元素。从图6可以看出,处理时间为3 min的XLPE样片表面Si元素分布

最均匀,随着处理时间增加,紫色部分开始聚集,样片表面沉积的硅氧薄膜面积越来越大。

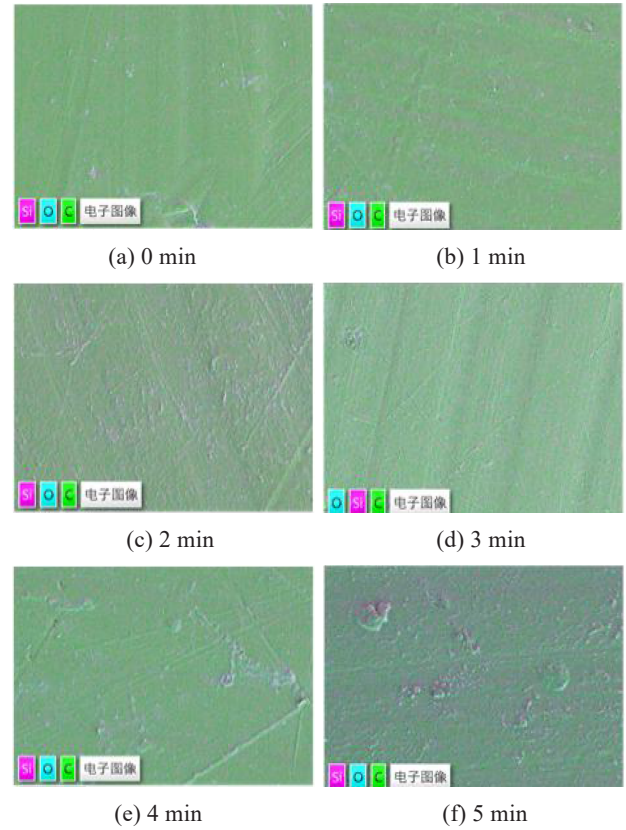


图6 不同处理时间XLPE样片的EDS图像

Fig.6 EDS images of XLPE samples with different processing time

表2为XLPE样片表面相对元素含量随等离子体处理时间的变化规律。从表2可以看出,随着等离子体处理时间的增加,XLPE样片表面元素的相对含量也发生显著变化。其中,C元素的相对含量逐渐降低,Si和O元素的相对含量不断升高。分析认为,这是因为在进行等离子体硅沉积处理时,TEOS在高压等离子体作用下,生成了大量的Si-O-Si官能团,最终形成薄膜沉积在XLPE样片表面。

表2 不同处理时间XLPE样片表面主要元素的相对含量
Table 2 The relative content of main elements on XLPE sample surface with different processing time

处理时间/min	C	O	Si	%
0	88.9	6.6	4.5	
1	84.7	8.6	6.7	
2	75.7	13.8	10.4	
3	70.6	16.0	13.4	
4	65.2	17.2	17.6	
5	50.9	20.7	28.4	

2.3 XLPE 表面电荷消散和陷阱分布特性

不同等离子体处理时间的 XLPE 表面电位衰减曲线如图 7 所示。

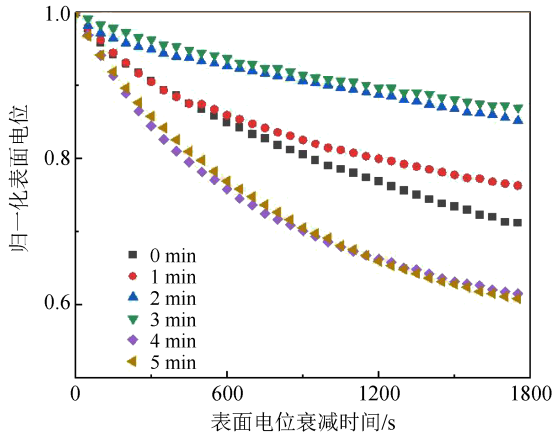


图 7 不同处理时间 XLPE 样片的表面电位衰减图

Fig.7 Surface potential decay diagrams of XLPE samples with different processing time

从图 7 可以看出, 未经过等离子体处理的 XLPE 表面电荷消散速率相对较快, 在衰减时间为 1 800 s 时的表面电位为其初始电位的 60%。随着等离子体处理时间的增加, 在处理时间为 1~3 min 时, XLPE 样片表面电荷的消散速率开始逐渐下降, 处理时间为 3 min 的 XLPE 样片表面电荷消散速率达到最小, 在衰减时间为 1 800 s 时其表面电位衰减到初始电位的 88%。在处理时间为 3~5 min 时, XLPE 样片表面电荷的消散速率开始急剧上升, 处理时间为 5 min 的 XLPE 样片表面电荷消散速率最大。

不同等离子体处理时间的 XLPE 样片表面陷阱分布曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出, 随着等离子体处理时间的增加, XLPE 样片表面深陷阱能级密度先增大后减小, 且改性后一部分样片出现了浅陷阱。从处理时间上来看, 处理时间为 0~3 min 的 XLPE 样片表面陷阱能级深度稍微上升; 但处理时间为 3~5 min 的 XLPE 样片表面浅陷阱开始逐渐上升且深陷阱密度开始逐渐下降, 部分深陷阱转变成了浅陷阱, 这是因为等离子体处理引入的能量和活性粒子改变了样片表面的化学结构, 导致深陷阱能级及被破坏或重组, 形成更多浅陷阱。其中处理时间为 5 min 的 XLPE 样片表面的深陷阱密度最小, 浅陷阱密度最大。

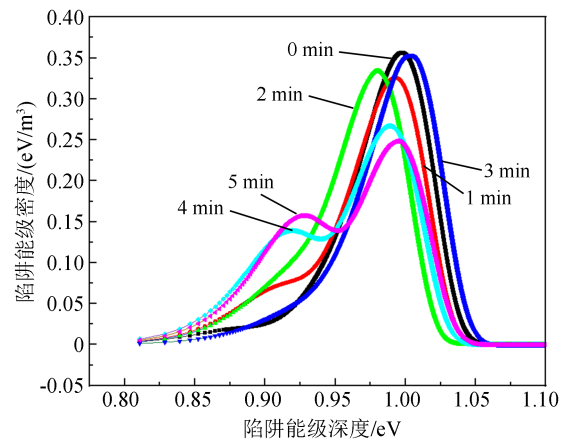


图 8 不同处理时间 XLPE 样片的陷阱分布曲线

Fig.8 Trap distribution curves of XLPE samples with different processing time

3 分析与讨论

3.1 XLPE 样片表面粗糙度测试

为了分析等离子体处理时间对 XLPE 样片表面粗糙度的影响, 对不同处理时间的 XLPE 样片表面粗糙度进行测试, 结果如图 9 所示。从图 9 可以看出, 随着等离子体处理时间的增加, XLPE 样片表面

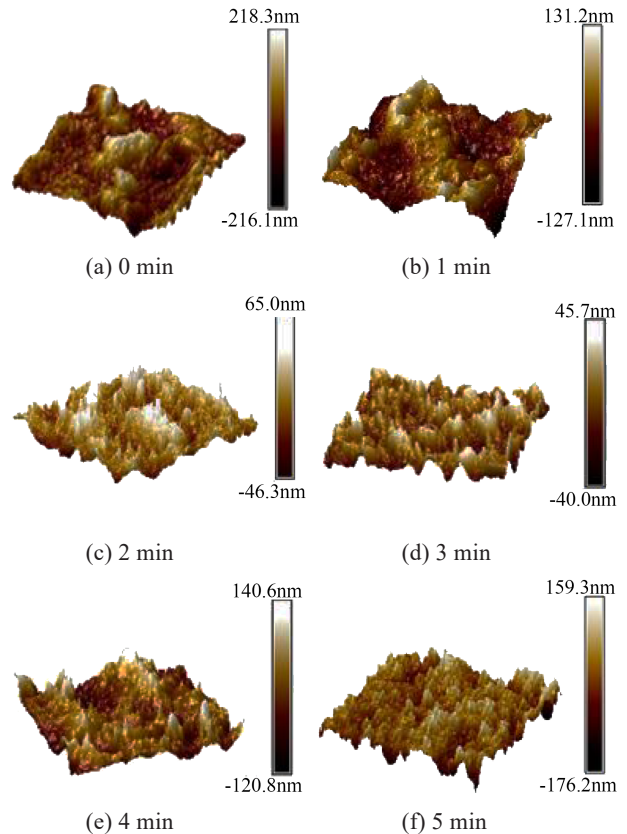


图 9 不同处理时间 XLPE 样片的 AFM 图像

Fig.9 AFM mages of XLPE samples with different processing time

的粗糙度呈现先减小后增大的趋势。等离子体硅沉积技术通过在 XLPE 表面镀上一层薄膜来改变其表面粗糙度, XLPE 表面新形成的薄膜能够覆盖 XLPE 表面原有的缺陷。为了能够表征 XLPE 表面的粗糙度, 计算了不同等离子处理时间 XLPE 样片的表面粗糙度 R_a , 结果如图 10 所示。从图 10 可以看出, XLPE 样片的表面粗糙度 R_a 随着等离子体处理时间的增加先减小后增大, R_a 的变化范围为 41.8 ~ 78.9 nm。 R_a 在处理时间为 0~3 min 时一直呈现减小的趋势, 其中处理时间为 3 min 的 XLPE 样片表面粗糙度 R_a 最小 (41.8 nm); 处理时间为 3~5 min 时, XLPE 样片的表面粗糙度 R_a 开始上升。虽然等离子体硅沉积能在 XLPE 表面镀上一层薄膜掩盖其表面原有的缺陷, 但是随着等离子体处理时间的增加, 沉积在 XLPE 表面的薄膜也变得越来越不均匀, 反而会促进 XLPE/SIR 界面放电。

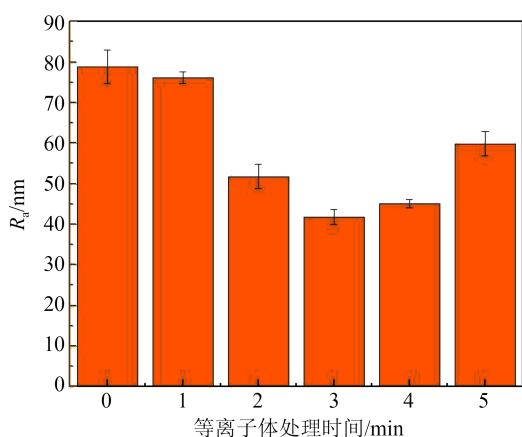


图 10 不同处理时间 XLPE 样片的表面粗糙度
Fig.10 Surface roughness of XLPE samples with different processing time

XLPE/SIR 界面处存在的微孔隙增强了电荷运输, 容易导致界面放电^[22]。XLPE 和 SIR 的实际接触面积远小于 XLPE 样片的真实面积, 这是因为 XLPE/SIR 界面之间存在大量的微孔隙, XLPE 和 SIR 的实际接触面积和界面的形貌密切相关, 界面形貌又与界面粗糙度密切相关。随着 XLPE 样片表面粗糙度的降低, XLPE/SIR 界面处的微孔隙数量减少, 使得 XLPE/SIR 界面的实际接触面积增大, 起始放电电压和击穿电压也随之增大。

3.2 XLPE 样片表面电阻率测试

为了进一步研究等离子体硅沉积技术对 XLPE/SIR 界面耐压性能的影响机理, 对不同处理时间的

XLPE 样片进行表面电阻率测试, 结果如图 11 所示。从图 11 可以看出, 未处理的 XLPE 样片表面电阻率为 $758 \times 10^{12} \Omega$, 随着等离子体处理时间的增加, XLPE 样片的表面电阻率呈现先增大后减小的趋势。其中处理时间为 3 min 的 XLPE 样片表面电阻率最大, 达到 $857 \times 10^{12} \Omega$, 处理时间为 5 min 的 XLPE 样片表面电阻率减小至 $799 \times 10^{12} \Omega$ 。

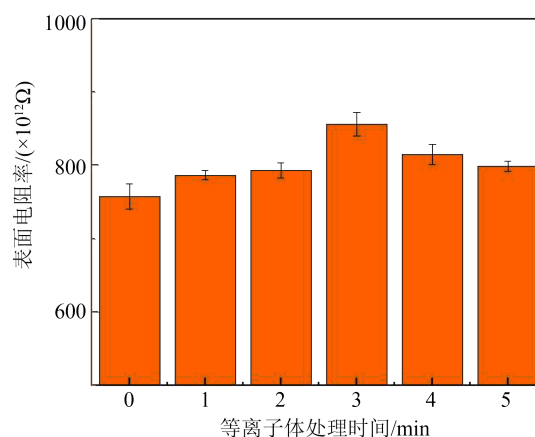


图 11 不同处理时间 XLPE 样片的表面电阻率
Fig.11 Surface resistivity of XLPE samples with different processing time

XLPE 样片表面电阻率的变化趋势与表面粗糙度的变化趋势呈负相关, 这是由于 XLPE 样片表面比较粗糙, 表面缺陷较多, 粗糙的表面会吸收更多的空气和水蒸气, 导致表面变得潮湿, 从而降低了 XLPE 样片的表面电阻率。

4 结论

(1) 等离子体硅沉积处理技术能在 XLPE 样片表面沉积一层薄膜, 改变 XLPE 样片表面的元素含量、表面粗糙度、陷阱分布和表面电阻率。

(2) 随着等离子体处理时间的增加, XLPE/SIR 界面的起始放电电压、击穿电压和升压幅值均呈先升高后下降的趋势; XLPE 样片表面粗糙度的变化趋势为先减小后增大。其中处理时间为 3 min 的 XLPE 样片表面粗糙度最小, 表面电阻率最大, XLPE/SIR 界面的击穿电压相对于未处理的 XLPE/SIR 界面提升了 66.7%, 达到最大的提升效果。

(3) 等离子体硅沉积处理技术降低了 XLPE 表面粗糙度并增大了其表面电阻率, 使 XLPE/SIR 界面的实际接触面积变大、界面的微孔隙数量减少, 从而抑制电荷在界面微孔隙处产生积聚, 最终抑制了 XLPE/SIR 界面放电。

参考文献 References

- [1] 谢庆,张采芹,闫纪源,等. 不均匀直流电场下绝缘材料表面电荷积聚与消散特性[J]. 电工技术学报,2019,34(4):817-830.
XIE Q, ZHANG C Q, YAN J Y, et al. Study on accumulation and dissipation of surface charges of insulating materials under uneven DC field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(4):817-830.
- [2] 但京民,李文清,崔戎舰,等. 油纸及XLPE绝缘高压直流电缆的电场分布特性研究[J]. 绝缘材料,2024,57(7):84-93.
DAN J M, LI W Q, CUI R J, et al. Study on electric field distribution characteristics of oil-paper and cross-linked insulated HVDC cables[J]. Insulating Materials,2024,57(7):84-93.
- [3] 王新,金洪,杨敏,等. 直流电压下热老化对表面划伤交联聚乙烯电缆局部放电特性的影响[J]. 绝缘材料,2024,57(7):76-83.
WANG X, JIN Y, YANG M, et al. Effect of thermal ageing on partial discharge characteristics of surface-scratched crosslinked polyethylene cables at DC voltage[J]. Insulating Materials,2024,57(7):76-83.
- [4] 路志建,常江,白晓斌,等. 电力电缆铝芯线与铜连接管的电磁焊接条件研究[J]. 电工技术学报,2023,38(20):5620-5633.
LU Z J, CHANG J, BAI X B, et al. Study on electromagnetic welding conditions of aluminum core wire and copper connection tube of power cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(20):5620-5633.
- [5] CHEN P, HUANG J M, DONG Y X, et al. Dialdehyde polyethylene glycol cross-linked poly(vinyl alcohol) membranes with enhanced CO₂/N₂ separation performance[J]. Journal of Applied Polymer Science,2024,141(16):e55266.
- [6] ZHU L W, ZHU L L, HOU K. Effect of radical scavenger on electrical tree in cross-linked polyethylene with large harmonic superimposed DC voltage[J]. High Voltage,2022,8(4):739-748.
- [7] DU B X, ZHU X H, GU L, et al. Effect of surface smoothness on tracking Mechanism in xlpe-si-rubber Interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(1):176-181.
- [8] 欧阳本红,黄凯文,赵鹏,等. 电力电缆聚丙烯材料的研究进展[J]. 绝缘材料,2022,55(8):6-15.
OUYANG B H, HUANG K W, ZHAO P, et al. Research progress of polypropylene materials for power cables[J]. Insulating Materials,2022,55(8):6-15.
- [9] YILMAZ S S, UZUNER H, AYTAC A. Use of antibacterial effective food packaging of crosslinked polyvinyl alcohol/sodium caseinate/silver nanoparticle composite films[J]. Polymer Composites,2023,44(8):4480-4494
- [10] 段玉兵,韩明明,王兆琛,等. 不同热老化温度下高压电缆绝缘特性及失效机理[J]. 电工技术学报,2024,39(1):45-54.
DUAN Y B, HAN M M, WANG Z C, et al. Insulation characteristics and failure mechanism of high voltage cables at different thermal aging temperatures[J]. Transactions of China Electro-
- technical Society,2024,39(1):45-54.
- [11] SHAN B L, DU C Q, CHENG J H, et al. Residual life prediction of XLPE distribution cables based on time-temperature superposition principle by non-destructive BIS measuring on site[J]. Polymers,2022,14(24):5478.
- [12] XU Y, HONG Z, CHENG Z, et al. Improved direct current electrical properties of XLPE modified by graftable antioxidant and crosslinking coagent at a wide temperature range[J]. High Voltage,2023,9(1):94-104.
- [13] 李国倡,王家兴,魏艳慧,等. 高压直流电缆附件XLPE/SIR材料特性及界面电荷积聚对电场分布的影响[J]. 电工技术学报,2021,36(14):3081-3089.
LI G C, WANG J X, WEI Y H, et al. Effect of XLPE/SIR material characteristics and interfacial charge accumulation on electric field distribution of HVDC cable accessories[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(14):3081-3089.
- [14] WANG Y, REN P, WANG Y, et al. Charge transport mechanism of cross-linked polyethylene/silicone rubber composite insulation by energy band theory[J]. High Voltage, 2023, 8(5): 1055-1066.
- [15] 张世泽,陶霁韬,龚慧,等. 高压交联聚乙烯电缆绝缘屏蔽层的激光剥离方法及机制研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(11):4238-4247.
ZHANG S Z, TAO S T, GONG H, et al. Study on laser stripping method and mechanism of high voltage crosslinked polyethylene cable insulation shield[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(11):4238-4247.
- [16] 古亮. 交联聚乙烯-硅橡胶界面电痕破坏现象研究[D]. 天津: 天津大学,2010.
GU L. Study on the electrical trace damage phenomenon of crosslinked polyethylene-silicone rubber interface[J]. Tianjin, Tianjin University,2010.
- [17] 邹林,涂扬,孟永鹏,等. 界面压强和表面粗糙度对聚乙烯与硅橡胶界面的局部放电的影响[J]. 绝缘材料,2014,47(3):94-98,102.
ZOU L, TU Y, MENG Y P, et al. Effects of interface pressure and surface roughness on the partial discharge between polyethylene and silicone rubber[J]. Insulating Materials,2014,47(3):94-98,102.
- [18] 柳松,彭嘉康,王霞,等. 不同涂覆条件对XLPE/SIR界面击穿强度的影响[J]. 绝缘材料,2013,46(5):66-69.
LIU S, PENG J K, WANG X, et al. Effects of Different coating conditions on the breakdown strength of XLPE/silicone rubber interface[J]. Insulating Materials,2013,46(5):66-69.
- [19] XIE Q, DUAN Q J, XIA G W, et al. Effect of liquid diffusion and segregation on GFRP insulation performance in typical hygrothermal environment[J]. Composites Part B-Engineering, 2022,24(4):110152.

- [20] 谢庆,段祺君,邵帅,等. BTO纳米纤维及其等离子体氟化对EP复合材料表面绝缘特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):4051-4063.
- XIE Q, DUAN Q J, SHAO S, et al. Effect of BTO nanofibers and plasma fluorination on the surface insulation properties of EP composites[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(12):4051-4063.
- [21] SEOK C D, YOO R S, LEE I K, et al. Relation between etching profile and voltage-current shape of sintered SiC etching by atmospheric pressure plasma[J]. Plasma Science and Technology,2019,21(4):137-144.
- [22] SHAO T, LIU F, HAI B, et al. Surface modification of epoxy using an atmospheric pressure dielectric barrier discharge to accelerate surface charge dissipation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(3):1557-1565.
-
- 收稿日期:2024-04-20;修回日期:2024-06-08。
- 作者简介:
- 燕一博(2000-),男(汉族),河南商丘人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究;
- 通信作者:谢庆(1979-),男(汉族),四川广元人,教授,博士,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。