

# 高湿度条件下 HTV 硅橡胶材料电晕老化特性

毕茂强, 潘爱川, 董 扬, 杨俊伟, 江天炎, 陈 曦

(重庆理工大学电气与工程学院, 重庆 400054)

**摘 要:** 复合绝缘子在我国电网中已得到大规模应用, 高湿度条件下运行中的绝缘子两端在强电场条件下极易发生电晕放电, 使绝缘子外套硅橡胶材料劣化, 严重时可能导致绝缘子闪络, 威胁电网的安全运行。以一种复合绝缘子外套用硅橡胶材料为试品, 采用多针-板电极, 在高湿度 (RH>95%) 环境中对其进行 100 h 的电晕老化试验, 并采用静态接触角、扫描电镜 (SEM)、核磁共振 (NMR) 和傅立叶红外光谱 (FTIR) 等方法分析了试品的电晕老化特性。研究表明: 高湿度条件下硅橡胶材料憎水性大幅降低, 静态接触角由 108.45° 下降至 55.47°, 憎水性受到严重破坏; 材料表面出现龟裂, 微观表面出现裂纹、孔洞、沟壑; 老化后材料的横向弛豫时间  $T_2$  出现下降, 内部 H 原子所在化学键与基团发生改变; 部分分子主链断裂, 微观结构发生变化, 形成亲水性的—OH, 绝缘性能降低。该研究结果可为我国西南地区或沿海、多雨和多雾等高湿度地区的复合绝缘子的设计、运行及维护提供一定的参考。

**关键词:** 硅橡胶; 电晕老化; 憎水性; 核磁共振; 高湿度环境

**中图分类号:** TM211 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)01-0074-07

## Corona Aging Characteristics of HTV Silicone Rubber Material Under High Humidity Conditions

BI Maoqiang, PAN Aichuan, DONG Yang, YANG Junwei, JIANG Tianyan, CHEN Xi

(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** Composite insulators have been widely used in China's power grids. Both ends of the insulators operating under high humidity conditions are prone to corona discharge under strong electric field conditions, which will degrade the silicone rubber material of insulator jackets, and cause the insulator to flashover and threaten the safe operation of the power grid in severe cases. In this paper, a composite rubber insulator is used as a test piece, and a multi-needle-plate electrode is used to perform a 100 h corona aging test in a high humidity (RH>95%) environment, and static contact angle, scanning electron microscopy (SEM), nuclear magnetic resonance (NMR) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) are used to analyze the corona aging characteristics of the samples. The results show that the hydrophobicity of the silicone rubber material is greatly reduced under high humidity conditions, the static contact angle is reduced from 108.45° to 55.47°, and the hydrophobicity is seriously damaged. Cracks appear on the surface of the material, cracks, holes and gullies appear on the microscopic surface. The transverse relaxation time  $T_2$  of the material decreases after aging, and the chemical bonds and groups of the internal H atoms change. Some of the molecular main chains break and the microstructure changes, and the hydrophilic —OH is formed, and the electrical properties are reduced. The research results in this paper can provide a certain reference for the design, operation and maintenance of composite insulators in southwestern China or coastal, rainy and foggy areas with high humidity.

**Key words:** silicone rubber; corona aging; hydrophobicity; nuclear magnetic resonance; high humidity environment

## 1 前 言

我国西南地区常年处于高湿度环境, 其环境相对湿度可达 70% 以上<sup>[1]</sup>, 该地区输电线路中的复合绝缘子长期处于高湿度环境下运行, 端部极易发生电晕放电, 导致复合绝缘子外套伞裙发生粉化、龟裂、变色等老化现象<sup>[2-4]</sup>。复合绝缘子外套伞裙的老化导致伞裙憎水性降低、耐污闪能力下降、表面泄漏电流增大, 易发生闪络, 危害输配电线路的安全运行。

收稿日期: 2019-11-15 修回日期: 2019-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51607019); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1709194)

第一作者: 毕茂强, 男, 1984 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: bimaqiang@cqut.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201911024

国内外学者对复合绝缘子外套伞裙硅橡胶材料的老化问题开展了广泛的研究,是多方面因素造成了复合绝缘子硅橡胶材料的老化<sup>[5-7]</sup>,如长期暴露在阳光下的紫外线老化、处于高温环境下的高温老化、输电线路中电晕放电的电晕老化等。而众多因素中,电晕老化带来的影响最为严重,因此,研究人员在实验室使用人工加速电晕老化的方式对硅橡胶材料进行老化处理,在较短的时间内研究硅橡胶材料的电晕老化特性<sup>[8]</sup>。目前,人工加速电晕老化有多种方式,文献[9]使用两块平板电极对材料进行老化处理,该方式老化时间过长、效率较低,因此不被广泛使用;文献[10]使用单针-板电极对材料进行老化处理,针尖属于尖端放电,效率较高,但此方式老化的范围较小;文献[11]使用多针-板电极进行电晕老化,可老化较大范围,方便进行各项测试,从而更广泛地研究复合绝缘子硅橡胶材料的老化状态与特性。现有研究多为在 60% 相对湿度以下环境中硅橡胶老化的研究,而实际情况中多数硅橡胶复合绝缘子在高湿度条件下长期运行。同时,湿度对电晕放电有重要影响,文献[12]中提出交流电晕起始电压随湿度的升高而减小,交流电晕脉冲频率随湿度增加而增加,脉冲放电对硅橡胶材料的劣化作用更加显著;而在高湿度条件下,电晕放电后产生  $O_3$  与  $HNO_3$  的效率增加<sup>[13]</sup>,材料表面呈酸性,将进一步加速硅橡胶的劣化。因此,研究硅橡胶材料在高湿度条件下的电晕老化特性,有利于掌握硅橡胶材料在高湿度条件下的老化机理,为复合绝缘子的运行维护提供参考。

硅橡胶材料老化状态的表征方法一直是国内外研究的热点,目前硅橡胶老化状态与特性的表征方法有:① 静态接触角法,通过精密光学仪器测量硅橡胶材料表面的静态接触角,从而研究其憎水性<sup>[14-16]</sup>;② 扫描电镜 (SEM) 法,通过扫描电镜观察材料表面的微观形貌特征与表面元素能谱,该方法最为直观地表明了材料表面的老化状态,也是较为普遍的材料测试手段;③ 红外光谱

测试法,通过傅里叶红外光谱 (FTIR) 不同波段的特征峰吸收值研究材料内部化学键的构成与微观结构<sup>[17-19]</sup>;④ 空间电荷测试法,通过脉冲电声法 (PEA) 空间电荷测试表征材料表面的陷阱能级,根据陷阱能级判别老化状态。同时也出现了新的研究方法,如核磁共振 (NMR),通过核磁共振测试横向弛豫时间的衰减曲线表征硅橡胶材料的老化状态<sup>[20-22]</sup>,该方法操作简便且测试过程中对材料无损坏。

本文以一种复合绝缘子外套用硅橡胶材料为试品,采用多针-板电极,在高湿度 ( $RH>95\%$ ) 环境中对其进行 100 h 的电晕老化试验,并采用静态接触角、扫描电子显微镜、核磁共振和傅立叶红外光谱等方法分析了试品的电晕老化特性。本文的研究结果可为我国西南地区或沿海、多雨和多雾等高湿度地区的复合绝缘子的设计、运行及维护提供一定的参考。

## 2 试验

### 2.1 试验试品及装置

本试验中试品为某绝缘子厂生产的  $115\text{ mm} \times 115\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  硅橡胶片,其主要成分为质量分数为 35%~40% 的甲基乙烯基硅橡胶、5%~10% 的  $SiO_2$ 、45%~50% 的  $Al(OH)_3$  和 1%~2% 的硅油。

本文主要研究高湿度条件下硅橡胶材料的电晕老化特性,试验平台如图 1 所示。试验中选用空压机将空气进行压缩,输出气压为 0~1 MPa 的空气;采用冷压机去除空气中的微量水分子,输出压力露点为 2~10 °C 的干燥空气;空气流量计控制输出空气的流量为 10 L/min。调压装置与变压器施加 10 kV 的交流电压,升压后经过保护电阻与高压套管作用于多针-板电极上,对放置于板电极上的硅橡胶材料进行电晕老化。其中,环境控制箱是一个直径为 350 mm、高度为 400 mm 的密闭圆柱体,其材料为有机玻璃绝缘材料。

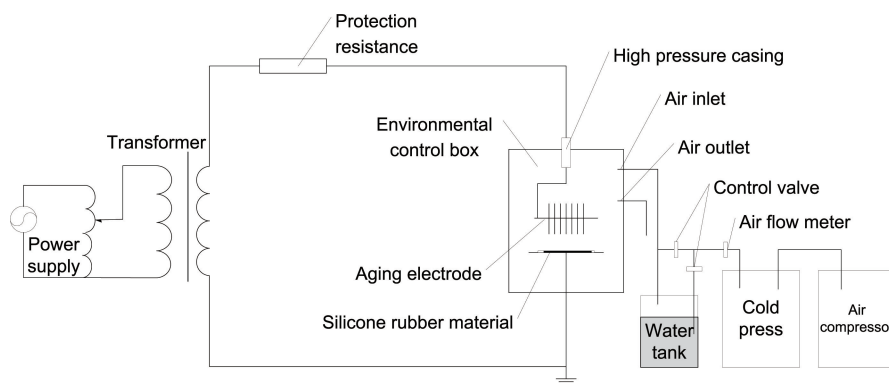


图1 硅橡胶电晕老化试验原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of corona aging test for silicone rubber

## 2.2 试验步骤

(1) 试验前, 用酒精将硅橡胶试品表面清洗干净, 置于环境温度( $20 \pm 5$ ) °C、相对湿度小于 40% 的无尘环境内的铜板上 24 h, 然后放入多针-板老化电极中, 保持放电间隙为 10 mm。

(2) 试验期间保证整套设备处于温度约为 22 °C 的无尘环境中, 打开空压机将空气送入冷压机中, 冷压机对空气进行降温与压缩, 去除空气中的微量水分子, 输出干燥洁净的空气, 在冷压机出气口处使用空气流量计控制输出空气的流量为 10 L/min, 后将干燥空气分为两部分, 一部分干燥空气经控制阀直接经过气管通入环境试验箱中; 另一部分的干燥空气经控制阀通入水箱中增加湿度, 水箱中的水选用电导率小于  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$  的去离子水, 通过控制阀控制两部分气体的比例, 并将其混合通入环境试验箱中, 每隔 5 min 通过环境试验箱中的温湿度传感器观测环境试验箱中的温湿度, 调节控制阀直到相对湿度稳定在 95% 以上后, 持续不断通入该湿度的空气。在环境试验箱上留一个向下的出气口, 保持环境试验箱中气体的流通。

(3) 待环境试验箱中环境湿度稳定后, 对多针-板老化电极持续施加 10 kV 的交流电压 100 h, 老化过程中持续监测环境试验箱中的温湿度变化。

(4) 达到预定的老化时长后, 取出老化后的样品进行测试评估。

## 2.3 测试表征

首先进行静态接触角测试, 每隔 2 h 进行一次, 记录 0~8 h 的静态接触角变化, 观测其恢复特性与憎水性的破坏程度; 对老化的样品进行核磁共振测试, 得到其横向弛豫时间  $T_2$ ; 将主要老化区域切片, 分为两份, 分别进行扫描电镜测试与红外光谱测试。

硅橡胶材料在高湿度环境下电晕老化 100 h 后, 停止施加电压取出硅橡胶材料, 处理后保持材料表面干燥清洁, 将材料放置于干燥密闭的玻璃器皿中, 使用光学接触角测试仪 (ZJ-6900) 对硅橡胶不同区域进行憎水性分析; 采用 ZEISS SIGMA HD 场发射扫描电镜将老化前后的硅橡胶样品表面放大 2000 倍, 观测材料的表面微观形貌, 并扫描其表面元素能谱; 采用重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室研制的低场核磁共振分析系统进行核磁共振测试<sup>[20]</sup>, 该系统由核磁共振谱仪 (Magritek KEA2)、功率放大器 (Tomco)、PC 计算机、单边核磁共振传感器组成, 实物照片如图 2 所示, 所用频率为 6.03 MHz, 试验中采用自旋回讯磁振脉冲序列 (CPMG) 激励, 其参数设置为: 脉冲宽度  $D=4.5 \mu\text{s}$ , 回波时间  $TE=120 \mu\text{s}$ ,  $180^\circ$  脉冲个数为 1000, 重复时间为

1000 ms,  $90^\circ$  脉冲幅值  $A_{90^\circ}$  为 -20 dB,  $180^\circ$  脉冲幅值  $A_{180^\circ}$  为 -14 dB; 采用 NICOLETtS10 红外光谱仪进行红外光谱测试, 测试试样是不同区域尺寸为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的老化样品。

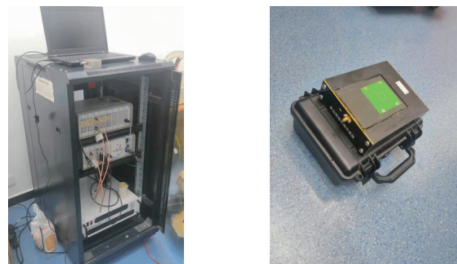


图 2 低场核磁共振分析系统与单边核磁共振传感器

Fig. 2 Low field nuclear magnetic resonance analysis system and single-sided nuclear magnetic resonance sensor

## 3 结果与讨论

### 3.1 憎水性分析

老化结束后硅橡胶材料的表面状态照片如图 3 所示。由图 3 中可知, 电晕老化后, 在多针-板电极正下方的硅橡胶材料表面出现许多圆形老化区域, 老化区域中出现较多细微裂纹, 部分表皮受到破坏, 材料表面变得粗糙, 在不同区域之间硅橡胶表面裂纹数量存在一定的差异, 越靠近中心区域裂纹越多。

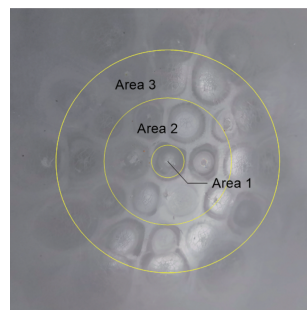


图 3 老化后硅橡胶材料的表面状态

Fig. 3 Surface state of aged silicone rubber material

为进一步分析不同区域间的差异, 对图 3 所示的 3 个老化区域进行静态接触角测试, 结果如图 4 所示。老化结束后, 硅橡胶材料表面的静态接触角明显降低, 区域 1 的静态接触角由  $108.452^\circ$  降至  $55.470^\circ$ , 区域 2 和区域 3 也分别降至  $62.145^\circ$  和  $67.184^\circ$ , 样品表面憎水性严重丧失。

停止电晕老化后, 因硅橡胶材料的憎水性恢复特性, 不同区域静态接触角随时间恢复曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 各个区域的静态接触角也随着恢复时间的增加而逐步增大, 主要恢复时间为前 4 h, 而后恢复速率降低,



最终 3 个区域的静态接触角分别由  $55.470^\circ$ 、 $62.145^\circ$  和  $67.184^\circ$  恢复到  $82.708^\circ$ 、 $89.362^\circ$  和  $91.110^\circ$ ，材料总体的憎水性恢复至初始未老化值的 82.4%，同一样品中不同区域的恢复速率基本一致，材料本身的憎水性受到了较为严重的破坏。而因针电极之间的电场相互作用，处于中心区域的电场最强，电晕放电也最为严重，故硅橡胶材料由外向内憎水性丧失程度逐步加深，但总体趋势保持一致。

为进一步分析高湿度对硅橡胶材料老化特性的影响，还分别测试了在相对湿度为 40% 和 60% 的条件下，老化

100 h 后硅橡胶材料表面的静态接触角，结果如表 1 所示。老化结束后，3 种湿度下材料表面的静态接触角均明显降低，如在区域 1 处，3 种湿度下的静态接触角分别降低至  $60.744^\circ$ 、 $59.083^\circ$  和  $55.470^\circ$ ，每个区域的静态接触角随湿度的增大而减小，这表明随着湿度的增大，电晕老化效果越明显，材料的憎水性丧失越严重。在高湿度条件下老化后的硅橡胶材料表面表现出更好的亲水性，表面电气性能下降，导致高湿度条件下更易发生污闪，威胁电网的安全运行。

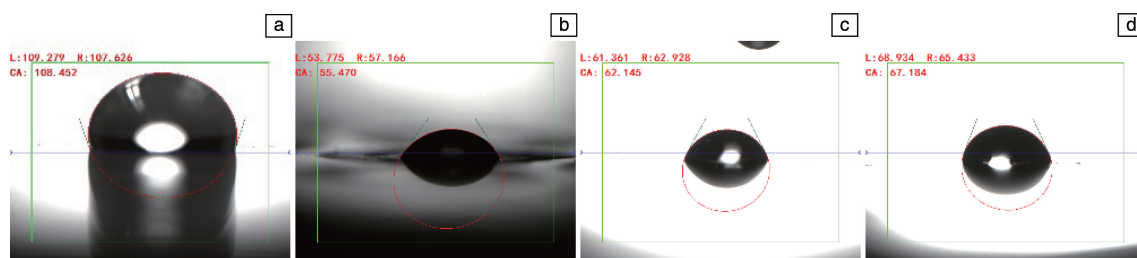


图 4 老化后 0 h 不同区域与未老化区域的静态接触角：(a) 未老化区域，(b) 区域 1，(c) 区域 2，(d) 区域 3

Fig. 4 Static contact angle of different areas and unaged area at 0 h after aging: (a) unaged area, (b) area 1, (c) area 2, (d) area 3

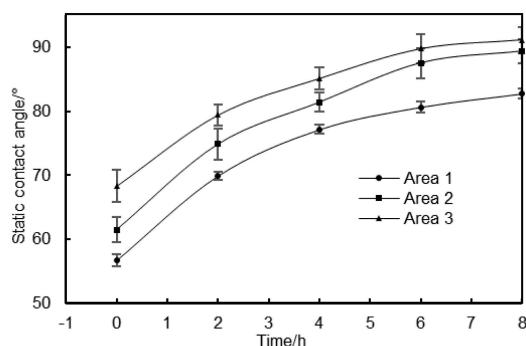


图 5 电量老化停止后不同区域静态接触角随时间恢复的曲线图

Fig. 5 Static contact angle recovery curves with time in different regions after corona aging stops

### 3.2 表面形貌分析

高湿度条件下的电晕放电将导致硅橡胶材料表面形貌的变化，老化前后硅橡胶材料表面的微观形貌 SEM 照

表 1 不同湿度条件下老化后 0 h 不同区域的静态接触角

Table 1 Static contact angles in different areas at 0 h after aging under different humidity conditions

Different humidity	Static contact angle/( $^\circ$ )		
	Area 1	Area 2	Area 3
40%	60.744	71.214	75.345
60%	59.083	67.429	72.699
95%	55.470	62.145	67.184

片如图 6 所示，其表面不同区域不同元素的含量如表 2 所示。由图 6 可知，在电晕老化处理后，硅橡胶的微观形貌受到严重破坏，3 个区域均出现裂纹、孔洞与沟壑，表面粗糙度上升，且裂纹数量由外部(图 6d)向内部逐步增多(图 6b)，裂纹的宽度约为  $6\ \mu\text{m}$ ，同时表面出现部分小颗粒铝粒填充物(即图中的小球颗粒物)，表明由区域 3 向区域 1 老化程度有细微加深的趋势；由表 2 中可

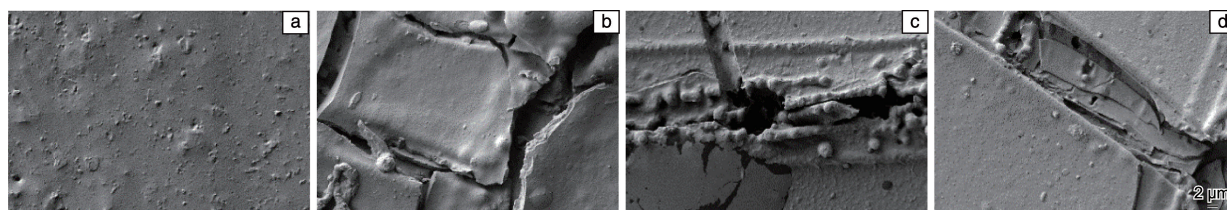


图 6 老化样品不同区域的 SEM 照片：(a) 未老化区域，(b) 区域 1，(c) 区域 2，(d) 区域 3

Fig. 6 SEM images of different areas of aged samples: (a) unaged area, (b) area 1, (c) area 2, (d) area 3

表 2 老化样品表面不同区域的元素含量

Table 2 Element content in different areas on the surface of aged samples

Element	Content/at%			
	Area 1	Area 2	Area 3	Before aging
C	9.69	11.43	12.62	29.43
O	61.29	60.58	57.44	45.02
Si	25.96	24.73	23.06	16.23
Al	3.06	3.26	6.88	9.31

知,未老化区域的氧元素含量为 45.02%(原子百分数),老化后 3 个区域的氧元素含量明显大于未老化区域,同时氧元素含量也由外部向内部逐渐增加,由区域 3 的 57.44% 增加到区域 1 的 61.29%,表明在高湿度条件下区域 1 的氧化程度最为严重,老化程度也最为严重,这与扫描电镜及静态接触角测试所得的结果相吻合。

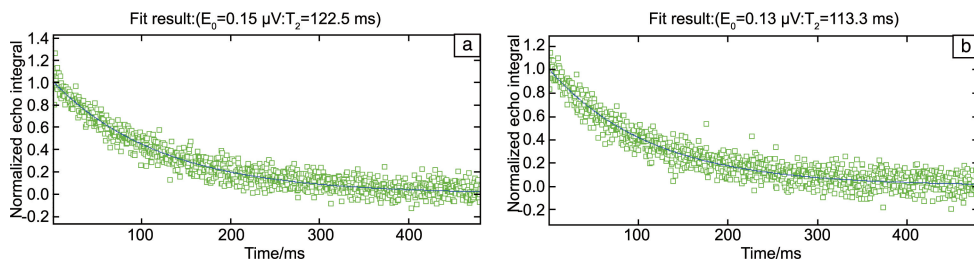


图 7 老化前(a)和老化后(b)区域 2 的核磁共振信号

Fig. 7 NMR signal of area 2 before (a) and after (b) aging

表 3 老化样品表面不同区域横向弛豫时间  $T_2$ Table 3 Transverse relaxation schedule  $T_2$  for different areas of the aged sample surface (ms)

	Area 1	Area 2	Area 3	Average value	Standard deviation
After aging	109	113.3	117.1	113.1	4.1
Before aging	123.7	122.5	124.8	123.7	1.2
Decrease	14.7	9.2	7.7	10.5	3.7

硅橡胶样品表面回波信号幅值与横向弛豫时间的指数关系可按式(1)进行拟合<sup>[20]</sup>:

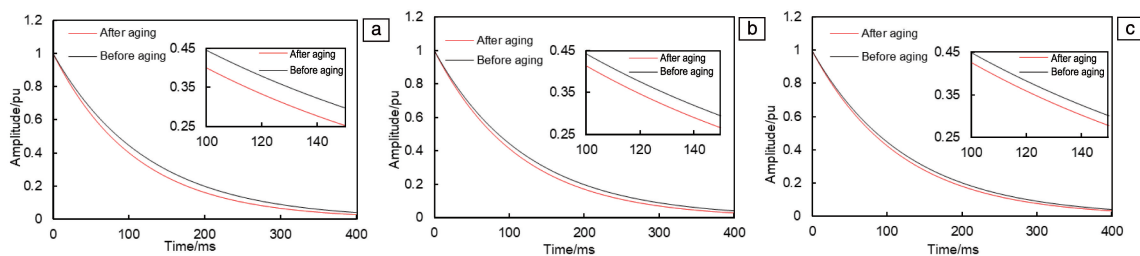
图 8 老化前后不同区域的  $T_2$  衰减曲线: (a) 区域 1, (b) 区域 2, (c) 区域 3

Fig. 8 Attenuation curves of different regions before and after aging: (a) area 1, (b) area 2, (c) area 3

### 3.3 核磁共振分析

核磁共振测试发现,不同硅橡胶片个体的横向弛豫时间  $T_2$  存在差异,测量时选取老化面的不同区域及其对应的背面未老化区域进行测试,得到以时间常数  $T_2$  单指数衰减的回波信号。图 7 为区域 2 老化前后的核磁共振信号拟合图,拟合计算得到相应的横向弛豫时间  $T_2$ 。测试样品各个区域得到的横向弛豫时间  $T_2$  如表 3 所示。

由表 3 中可见,老化后 3 个区域的横向弛豫时间  $T_2$  均有所下降,区域 1 由未老化的 123.7 ms 下降至老化后的 109 ms,降幅为 14.7 ms,且由外区域向内区域的降幅逐步增大,表明其内部结构被改变更多,老化情况更为严重。由标准偏差可见,各区域老化前差异不明显,而老化后各区域的标准偏差变大,各区域  $T_2$  出现明显差异,从侧面表明区域 3 到区域 1 的老化程度呈现逐步加深的趋势。

$$y = Ae^{-t/T_2} \quad (1)$$

式中,  $y$  为 CPMG 回波信号幅值;  $T_2$  为等效横向弛豫时间;  $t = mTE$ ,  $m$  为回波个数,  $TE$  为回波时间。将 3 个不同区域的硅橡胶回波幅值按照式(1)进行单指数拟合,得到的衰减曲线如图 8 所示。根据图 8 可知,老化后样品的  $T_2$  减小,其衰减更快,说明在电晕老化过程中,当高能电子束轰击材料表面时,材料表面的化学结构发生变化,部分 H 原子由初始高键能的结合状态变为低键能结合状态,部分低键能结合态的分子链抗电晕能力减弱,再遇到同等级的电晕时材料表面的分子链更容易断裂,更多的 H 原子变为低键能结合态,如此循环,硅橡胶材

料表面的抗电晕能力大幅降低,绝缘性能下降,而表3中所示  $T_2$  的降幅也随着老化程度的加深而增大,老化程度越深,表面化学结构破坏越严重,  $T_2$  衰减越快。

### 3.4 红外光谱分析

样品的红外光谱测试结果如图9所示。对比老化前后特征峰吸收值的变化,可以看出在部分波段有明显差别,这表明样品表面化学结构发生了改变。在波数为  $1000 \sim 1100 \text{ cm}^{-1}$  处,在其波峰处可见老化区域的特征峰峰值小于未老化区域,即老化后  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  基团的数量比未老化区域少;在波数为  $1260$  和  $2960 \text{ cm}^{-1}$  处,老化区域特征峰吸收值小于未老化的吸收值,即电晕老化后  $\text{Si}-\text{CH}_3$  与  $-\text{CH}_3$  基团数量减少;  $3100 \sim 3400 \text{ cm}^{-1}$  波数为缔结态  $-\text{OH}$  的吸收波数,可以看出电晕老化后材料表面  $-\text{OH}$  数量明显提升;在波数  $1700 \text{ cm}^{-1}$  附近,老化区域的吸收峰值大于未老化的吸收峰值,表明老化后样品表面出现了少量羧基  $-\text{COOH}$ 。

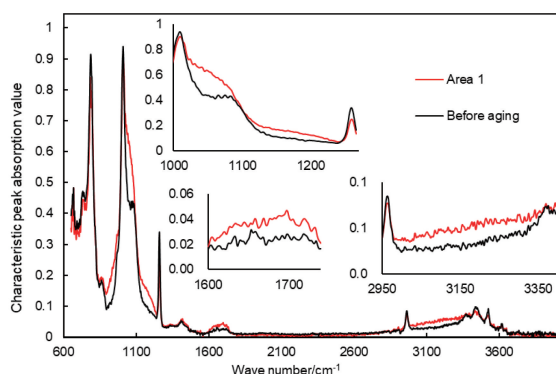


图9 老化前后区域1的红外光谱

Fig. 9 FTIR spectra of area 1 before and after aging

电晕放电的电子能量为  $963 \text{ kJ/mol}$ ,  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  基团中  $\text{Si}-\text{O}$  键键能为  $446 \text{ kJ/mol}$ 、 $\text{Si}-\text{C}$  键键能为  $301 \text{ kJ/mol}$ 、 $-\text{CH}_3$  中的  $\text{C}-\text{H}$  键键能为  $413 \text{ kJ/mol}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  中  $\text{O}-\text{H}$  键键能为  $426 \text{ kJ/mol}$ 、 $\text{C}-\text{O}$  键键能为  $343 \text{ kJ/mol}$ , 综合分析可知,电晕放电的电子能量大于各个键之间的键能,老化过程中高能电子与材料表面的化学键碰撞,破坏了表面部分的化学键,即部分  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  键断裂,完整的高分子链断裂,稳定的交联网状结构遭到破坏,使得材料的绝缘性能下降。电晕放电过程中会产生  $\text{O}_3$ , 导致材料表面易发生氧化,同时电晕放电过程中高能电子束作用于空气中的部分水分子产生了游离态  $-\text{OH}$ , 而后与硅橡胶材料表面的化学键结合,产生部分  $-\text{COOH}$  与缔结态  $-\text{OH}$ , 其中  $-\text{OH}$  属于亲水性基团,导致硅橡胶表面的憎水性下降,而  $-\text{COOH}$  属于酸性基团,会对材料造成破坏,使得材料的绝缘性能下降。而高湿度条件下

空气中所包含的水分子更多,导致在老化过程中产生更多的缔结态  $-\text{OH}$  与  $-\text{COOH}$ , 加重了老化程度,材料的绝缘性能受到更严重的破坏,该测试结果与核磁共振所测得的结果相一致。

## 4 结论

本文通过硅橡胶材料在相对湿度大于  $95\%$ 、流量为  $10 \text{ L/min}$  的环境下进行的  $100 \text{ h}$  电晕老化实验,并结合静态接触角、扫描电镜、核磁共振与红外光谱分析等测试方法研究了硅橡胶材料的老化特性,得出以下结论:

(1) 高湿度环境下硅橡胶材料经电量老化后其表面憎水性严重丧失,静态接触角从  $108.45^\circ$  降低到  $55.47^\circ$ , 降低至老化前的  $51.15\%$ 。经过  $8 \text{ h}$  恢复,样品憎水性由初始值的  $51.15\%$  恢复到  $76.26\%$ , 材料的憎水性受到了破坏。

(2) 高湿度条件下电晕放电破坏了硅橡胶材料的表面微观形貌,平整的表面出现了大量的裂纹、孔洞和沟壑,表面粗糙度增加,且老化后材料表面氧元素含量增大,从老化前的  $45.02\%$  增大至  $59.77\%$  (平均值), 表面发生氧化,硅橡胶材料的绝缘性能下降。

(3) 高湿度条件下经过电晕老化  $100 \text{ h}$  后,核磁共振测试中横向弛豫时间  $T_2$  降低,部分  $\text{H}$  原子由高键能态降为低键能态,硅橡胶材料的化学结构发生改变,抗电晕老化能力降低。

(4) 高湿度条件下电晕放电破坏了材料表面部分的  $\text{Si}-\text{O}$  键,导致材料表面的高分子链断裂,稳定的交联网状结构受到破坏,同时材料表面的  $\text{Si}-\text{C}$ 、 $\text{C}-\text{H}$  键、环境中部分  $\text{H}_2\text{O}$  的  $\text{O}-\text{H}$  键也受到破坏,断裂的化学键在材料表面形成少量酸性的  $-\text{COOH}$  与亲水性的缔结态  $-\text{OH}$ , 因此材料的结构与憎水性受到了破坏,绝缘性能下降,与核磁共振测得的抗电晕老化能力下降相一致。

## 参考文献 References

- [1] 李瀚, 韩琳, 贾志军, 等. 高原山地气象研究[J], 2016, 36(04): 42-47.  
LI H, HAN L, JIA Z J, *et al.* Plateau and Mountain Meteorology Research[J], 2016, 36(04): 42-47.
- [2] 高岩峰, 王家福, 梁曦东, 等. 中国电机工程学报[J], 2016, 36(01): 274-284.  
GAO Y F, WANG J F, LIANG X D, *et al.* Proceedings of the CSEE[J], 2016, 36(01): 274-284.
- [3] 申文伟, 宋伟, 王国利. 高压电器[J], 2013, 49(02): 1-7.  
SHEN W W, SONG W, WANG G L, *et al.* High Voltage Apparatus[J], 2013, 49(02): 1-7.
- [4] 张冠军, 赵林, 周润东, 等. 高压电器[J], 2016, 52(04): 1-15.  
ZHANG G J, ZHAO L, ZHOU R D, *et al.* High Voltage Apparatus

- [J], 2016, 52(04): 1-15.
- [5] 彭向阳, 林宏升, 王锐, 等. 高压电器[J], 2018, 54(06): 1-8+15.  
PENG X Y, LIN H S, WANG R, *et al.* High Voltage Apparatus [J], 2018, 54(06): 1-8+15.
- [6] 屠幼萍, 佟宇梁, 王倩, 等. 高电压技术[J], 2011, 37(04): 841-847.  
TU Y P, TONG Y L, WANG Q, *et al.* High Voltage Engineering [J], 2011, 37(04): 841-847.
- [7] 许竞, 高波, 宋臻杰, 等. 高压电器[J], 2018, 54(02): 103-109.  
XU J, GAO B, SONG Z J, *et al.* High Voltage Apparatus [J], 2018, 54(02): 103-109.
- [8] 董平平, 杨茹, 陈永明, 等. 高压电器[J], 2019, 55(01): 143-148+156.  
DONG P P, YANG R, CHEN Y M, *et al.* High Voltage Apparatus [J], 2019, 55(01): 143-148+156.
- [9] MORENO V M, GORUR R S. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulators [J], 1999, 5(3): 342-350.
- [10] 蓝磊, 王汉良, 文习山, 等. 高电压技术[J], 2012, 38(04): 782-789.  
LAN L, WANG H L, WEN X S, *et al.* High Voltage Engineering [J], 2012, 38(04): 782-789.
- [11] 陈逸昕. 人工电晕老化条件下复合绝缘子材料体积电阻率特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.  
CHEN Y X. Study on the Composite Insulator Material's Volume Resistivity Characteristics under Artificial Coronaaging Condition [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [12] 孟晓波, 惠建峰, 卞星明, 等. 中国电机工程学报[J], 2011, 31(28): 128-135.  
MENG X B, HUI J F, BIAN X M, *et al.* Proceedings of the CSEE [J], 2011, 31(28): 128-135.
- [13] 轩俭勇, 骆仲决, 赵磊, 等. 光谱学与光谱分析[J], 2012, 32(05): 1157-1161.  
XUAN J Y, LUO Z Y, ZHAO L, *et al.* Spectroscopy and Spectral Analysis [J], 2012, 32(05): 1157-1161.
- [14] NAZIR T, PHUNG T. Effect of AC Corona Discharge on Aging of Silicone Rubber Nanocomposites at High Altitude [C]//Proceedings of 2015 Electrical Insulation Conference (EIC). [S.I.]: IEEE, 2015.
- [15] 刘洋, 周志成, 魏旭, 等. 高电压技术[J], 2010, 36(10): 2454-2459.  
LIU Y, ZHOU Z C, WEI X, *et al.* High Voltage Engineering [J], 2010, 36(10): 2454-2459.
- [16] ZHU Y, ZHANG X, FANG J. Influence of Environmental Factor on Hydrophobicity Transfer of Silicone Rubber Used for Outdoor Insulation [C]// Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials. [S.I.]: IEEE, 2017.
- [17] 汪佛池, 律方成, 杨升杰, 等. 电工技术学报[J], 2015, 30(08): 297-303.  
WAN F C, LV F C, YANG S J, *et al.* Transactions of China Electrotechnical Society [J], 2015, 30(08): 297-303.
- [18] 蓝磊, 文习山, 刘辉. 高电压技术[J], 2009, 35(11): 2652-2656.  
LAN L, WEN X S, LIU H. High Voltage Engineering [J], 2009, 35(11): 2652-2656.
- [19] 康文斌, 蒙绍兴, 李世军, 等. 高电压技术[J], 2018, 44(12): 3798-3807.  
KANG W B, MENG S X, LI S J, *et al.* High Voltage Engineering [J], 2018, 44(12): 3798-3807.
- [20] 徐征, 吴嘉敏. 电工技术学报[J], 2016, 31(12): 118-125.  
XU Z, WU J M. Transactions of China Electrotechnical Society [J], 2016, 31(12): 118-125.
- [21] 杨挺, 余登洁, 夏云峰, 等. 重庆大学学报[J], 2017, 40(05): 19-28.  
YANG T, YU D J, XIA Y F, *et al.* Journal of Chongqing University [J], 2017, 40(05): 19-28.
- [22] 徐征, 郭盼, 何晓龙, 等. 高压电器[J], 2012, 48(03): 21-25.  
XU Z, GUO P, HE X L, *et al.* High Voltage Apparatus [J], 2012, 48(03): 21-25.

(编辑 吴锐)