

雾霾条件下不同配比硅橡胶电晕老化特性

毕茂强¹, 杨忠平^{1†}, 江天炎¹, 胡秀雷¹, 潘爱川², 董扬³

(1. 重庆理工大学 电气与电子工程学院, 重庆 400054;

2. 南瑞电力设计有限公司, 江苏 南京 215200;

3. 国网重庆市电力公司 超高压分公司, 重庆 400039)

摘要:为研究不同配比硅橡胶材料在雾霾条件下的电晕老化特性, 选择了3类不同配比硅橡胶材料, 采用静态接触角、扫描电镜、傅里叶红外光谱等方法对硅橡胶材料进行老化特征测试. 研究表明, 3类不同配比硅橡胶材料在雾霾条件下的电晕老化特性差异较大, 其中硅橡胶主体的质量分数低、氢氧化铝质量分数高的A类材料电晕老化特性相对较优异, 表现为表面微观形貌较好, 附着物也更少, 亲水性基团能够以较快的速度向材料内部迁移, 恢复速率最快. 但此类材料憎水性丧失较为严重, 同时老化后此类材料中的Si—O—Si基团与Si—CH₃基团的特征峰面积相对较大, 主链和侧链保存更加完整, 化学结构破坏最小.

关键词:硅橡胶; 雾霾; 不同配比; 静态接触角; 扫描电镜; 傅里叶红外光谱

中图分类号:TM851

文献标志码:A

Corona Aging Characteristics of Silicone Rubber with Different Proportions under Haze Condition

BI Maoqiang¹, YANG Zhongping^{1†}, JIANG Tianyan¹, HU Xiulei¹, PAN Aichuan², DONG Yang³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. NARI Electric Power Design Co., Ltd., Nanjing 215200, China;

3. State Grid Chongqing Ultra High Voltage Company, Chongqing 400039, China)

Abstract: In order to study the corona aging characteristics of silicone rubber materials with different proportions under haze conditions, three types of silicone rubber materials with different proportions were selected, and the aging characteristics were tested by the static contact angle, scanning electron microscope, and Fourier transform infrared spectrum. The results show that the corona aging characteristics of the three types of silicone rubber materials with different ratios under haze conditions are quite different. Among them, the corona aging characteristics of the A-type materials with low silica gel content and high aluminum hydroxide content is relatively excellent, which are manifested in better surface morphology and fewer attachments. The hydrophilic groups can migrate to the interior of the material at a faster speed, so the recovery rate is the fastest, but the hydrophobicity loss of such materials is relatively serious. At the same time, the characteristic peak areas of the Si—O—Si group and Si—CH₃ group in such materials after aging are relatively large, the main chain and side chain are more complete, and the chemical structure

* 收稿日期:2021-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177129, 51607019), National Natural Science Foundation of China(52177129, 51607019)

作者简介:毕茂强(1984—),男,重庆人,重庆理工大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: beizaimaomi@2020.cqut.edu.cn

damage is the smallest.

Key words: silicone rubber; haze; different compositions; static contact angle; scanning electron microscope; Fourier transform infrared spectrum

硅橡胶复合绝缘子凭借其优异的电气性能,在我国输配电线路中得到了广泛应用^[1-6],目前,我国已有超数百万支复合绝缘子投运到高压和特高压输电线路中^[7-9].复合绝缘子绝缘外套使用的硅橡胶材料是一种有机材料,在雾霾条件下长期受到强电晕放电影响,伞裙表面易出现裂纹、孔洞、沟壑等老化现象,且内部结构被破坏,从而降低其耐污闪性、憎水性等绝缘性能,严重时易发生闪络,导致线路发生故障^[10-12].

针对复合绝缘子硅橡胶伞裙电晕老化问题,国内外学者展开了大量的研究,主要分为:自然环境运行下的电晕老化和人工加速电晕老化^[13-16].人工加速电晕老化相对于自然环境电晕老化需要在较短时间内对样品进行老化处理,且要尽可能模拟出自然环境下运行时的老化过程.人工加速电晕老化多采用平行板或多针-板电极系统^[17],文献[1,18]中采用了多针-板电极装置对试品进行了电晕老化,多针-板电极在硅橡胶电晕老化中总体表现优异.

现阶段实验室中的人工电晕老化主要考虑因素多为老化时间、耐受电压等,对环境因素如雾霾条件,研究相对较少.文献[19]研究了雾霾环境对输配电设备外绝缘的影响,对于人工雾霾模拟,可通过超声波雾化器制造雾,用行星磨磨机研磨硅藻土和硫酸铵模拟粉尘颗粒,然后采用SAG-410粉尘气溶胶发生器将粉尘颗粒以霾的形式喷出,最后将雾和霾在环境箱内混合形成雾霾,实验结果表明,模拟的雾霾环境能满足实验要求,且雾霾条件下间隙击穿电压高于干燥空气,低于纯雾条件.电力系统的输变电外绝缘设备在雾霾天气下运行时,雾水中的无机盐和雾霾颗粒会沉降在外绝缘表面,导致外绝缘电气特性降低,加速材料的老化^[20].

为提升硅橡胶的综合绝缘性能,延长其使用年限,研究人员提出通过改变硅橡胶材料不同配比及配方对硅橡胶材料进行改良.文献[21]选取了Al(OH)₃相对生胶的质量分数分别为90%、110%和130%硅的3种不同橡胶材料,通过静态接触角测试后发现,Al(OH)₃相对生胶的质量分数为90%的硅

橡胶材料在憎水性和恢复特性上表现相对最优.周福文等人^[22]在硅橡胶材料中掺杂了SiO₂纳米粒子,研究发现,当掺杂质量分数为5%的纳米SiO₂粒子时,材料空穴陷阱密度增加,掺杂纳米粒子方法成本较高且处于研究阶段.虽然国内外学者对不同应用场景的硅橡胶材料改性进行了广泛的研究,但针对雾霾环境条件的研究相对较少.

针对上述问题,本文以3类不同配比硅橡胶材料为试验品,在实验室通过环境控制箱、粉尘气溶胶发生器和雾化器等模拟雾霾条件,使用多针-板电极展开电晕老化实验,采用静态接触角、扫描电镜、傅里叶红外光谱等测量方法,分析不同配比硅橡胶材料在雾霾环境下的电晕老化特性.为运行于多雾霾地区的复合绝缘子外护套硅橡胶的设计、维护提供参考.

1 实验样品、装置、步骤及测试方法

1.1 实验样品

本文实验所使用的硅橡胶样品来自某绝缘子厂商,该样品尺寸为:500 mm×500 mm×2 mm(长度×宽度×厚度),根据不同组成成分记为A、B、C 3类,3类硅橡胶材料宏观差异不大,材料表面光滑且存在较小的色差,由A类到C类表面颜色逐步变深.使用手术刀将3类硅橡胶样品剪切成直径为110 mm的圆形实验样品.

3类硅橡胶材料组成成分如表1所示,3类硅橡胶的主体成分为甲基乙烯基硅橡胶,其次是Al(OH)₃和白炭黑,其中还有少量其他成分,主要包括氧化铁、硅油、硫化剂.

表1 3类硅橡胶材料组成成分(质量分数)

Tab.1 Three types of silicone rubber material composition(mass fraction) %

材料	$w_{\text{甲基乙烯基硅橡胶}}$	$w_{\text{Al(OH)}_3}$	$w_{\text{白炭黑}}$	$w_{\text{其他成分}}$
A	35.93	49.14	10.79	4.14
B	39.52	44.47	11.86	4.15
C	43.11	39.80	12.93	4.16

1.2 实验装置

1)电晕老化装置.电晕老化实验原理如图 1 所示,电晕老化装置主要由调压器、变压器、保护电阻、交直流分压器、多针-板电极、测量电阻和示波器组成.其中调压器的输入电压为 220 V,容量为 5 kVA,变压器型号为 NHSB-5 kVA/50 kV,保护电阻阻值为 20 kΩ,测量电阻为 10 Ω 的无感电阻,并联型号为 TBS2000 的数字示波器测试电晕放电信号.

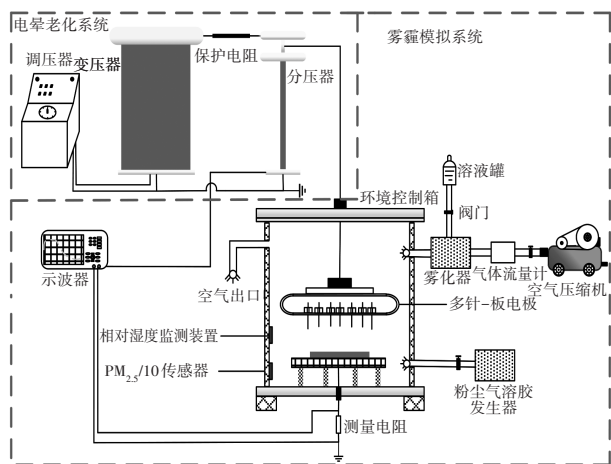


图 1 电晕老化实验原理

Fig.1 Principle of corona aging experiment

本文老化实验采用多针-板电极,板电极由一个直径 100 mm 圆形铜板构成,针电极部分由 36 根不锈钢针沿六边形均匀布置在电极表面,其中不锈钢针的长度为 60 mm,直径 0.8 mm,针尖曲率半径为 30 μm,最外侧相邻两针的距离为 16 mm,内侧针与针之间的距离为 10 mm,且可通过电极边界的支柱调节电极整体与试验品间的距离^[2].

2)雾霾环境模拟装置.雾霾环境模拟主要装置如图 2 所示,包括环境控制箱、雾化器、DDS-11A 电导率测量仪、DG-100 粉尘气溶胶发生器、PM_{2.5}/10 传感器、HC-05B 湿度传感器.环境控制箱的材料为有机玻璃,直径为 350 mm,高度为 400 mm,其顶部和侧面有圆孔,用来导通气体和连接设备.雾水主要通过雾化器产生.通过型号为 DDS-11A 电导率测量仪来调制雾水的电导率,电导率测量仪的测量范围为 30~3 000 μS/cm.霾环境的模拟采用型号为 DG-100 的粉尘气溶胶发生器,产生的粉尘颗粒粒径为 0.1~10 μm,体积流量为 0.3~0.6 m³/h,质量流量为 10~100 mg/h.通过 PM_{2.5}/10 传感器监测环境箱内的颗粒浓度,该传感器采用的是激光散射原理,能测量单位体积空气中的颗粒个数.使用 HC-05B 相对湿度监测装置对箱内的相对湿度进行监测.

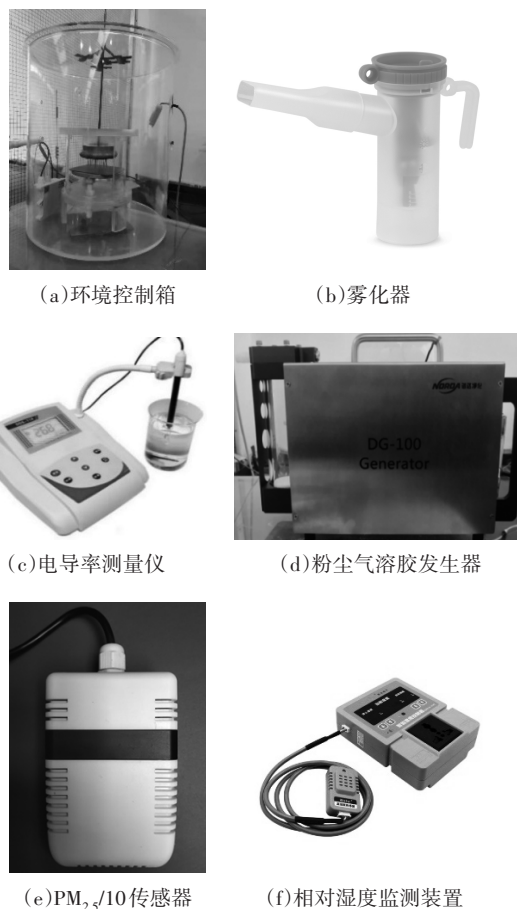


图 2 雾霾环境模拟主要装置

Fig.2 Main devices for haze environment simulation

1.3 实验步骤

1)根据图 1 搭建电晕老化实验平台.使用酒精将硅橡胶样品表面清洗干净,将样品静置在无尘环境内的铜板上 24 h,环境温度控制在(20±5) °C,然后放入针-板电晕老化电极中,针电极与材料之间的放电间隙设置为 10 mm.

2)雾霾成分复杂,其成分包括 0.001~10 μm 固体粉尘颗粒,雾霾中主要含 Ca²⁺、SO₄²⁻、NH₄⁺、NO₃⁻等离子,空气相对湿度为 80%~90% RH^[23-25].本实验中采用电导率为 2000 μS/cm 的 NaCl 盐溶液来模拟空气污染严重地区的雾霾环境.先将雾化的溶液盛放在溶液罐中,再利用自身的重力滴落到雾化器中,经雾化器雾化后由空气压缩机喷入环境箱内,通入空气速率控制在 10 L/min,通入雾化器中的盐溶液速率为 0.2 mL/min,雾通入环境箱过程中由气体流量计控制流速.待箱内相对湿度达到 90% RH 后,进行霾环境的模拟,采用硅藻土来模拟大气中霾的不同成分,由于造成霾环境的主要是粒径较小的颗粒,因此,使用

0.005 mm的筛网分离出硅藻土粉末中较小粒径的颗粒物,再将分离出的硅藻土颗粒装入粉尘气溶胶发生器中,由粉尘气溶胶发生器将团聚的颗粒分散喷出,达到雾状的效果,吹入环境控制箱内的颗粒速率控制为 $13 \mu\text{g}/\text{min}$.此过程中须使用时间继电器控制粉尘气溶胶发生器,每工作15 min停止1 h,多次重复以上操作,以保证环境箱中悬浮气溶胶系统的相对稳定,并通过湿度传感器和颗粒浓度传感器监测模拟环境的参数,将相对湿度控制在80%~90% RH内.

3)恒定电压法较逐步升压法能较好地模拟材料的局部老化过程^[26].待箱内环境保持稳定后,采用恒定电压法对老化电极施加有效值为10 kV的交流电压,并保持100 h,直至老化实验结束,在老化过程中,实时监测电压、电流、温度、湿度和雾霾浓度的变化情况.

4)对老化后样品分别采用静态接触角、扫描电镜、傅里叶红外光谱分析等测试方法进行老化特征测试.

1.4 测试方法

1)憎水性测试.本文采用型号为ZJ-6900的光学接触角测试仪,对老化前、后的硅橡胶样品表面静态接触角进行测试.测量过程中保持硅橡胶材料表面清洁干燥,通过相机精准采集硅橡胶材料表面水滴的图像.选取测量的时间节点分别为老化后0 h、2 h、4 h、6 h、8 h.

2)微观形貌测试.采用ZEISS SIGMA HD场发射扫描电镜对老化前、后的硅橡胶样品表面微观形貌与结构进行分析.为了拍摄过程中成像清晰,须增加拍摄样品表面的导电性,对硅橡胶材料样品切片后进行喷金50 s处理.并将材料表面放大不同倍数,拍摄并观测其表面的微观形貌变化,同时对拍摄区域表面进行EDS面扫描,计算出硅橡胶材料表面元素的质量分数.

3)红外光谱分析.使用NICOLET iS10红外光谱仪测试硅橡胶材料的FTIR谱图,将样品放置于棱镜上压紧后,棱镜中射出光束到材料表面,而后设备根据光学原理在计算机中拟合绘制出样品的红外谱图,根据不同官能团的吸收波数不同,分别判断不同官能团的状态.

2 结果及讨论

2.1 憎水性及恢复特性

为了研究不同配比硅橡胶材料表面的憎水特

性,对雾霾环境下老化前和老化后0 h时的硅橡胶材料进行静态接触角测试,如图3所示. A、B、C 3类材料老化前的静态接触角分别为 110.11° 、 112.71° 和 111.54° ,3类材料的憎水性无明显差异.在雾霾环境下电晕老化100 h后0 h时不同配比的硅橡胶材料表面的憎水性丧失有明显差别, A、B、C 3类材料表面的静态接触角分别降低至 40.33° 、 52.02° 和 61.94° ,对比老化前3类材料的静态接触角分别下降了63.37%、53.85%和44.47%,如表2所示.由此可见,在雾霾环境下,C类硅橡胶材料保持了相对较好的憎水性.

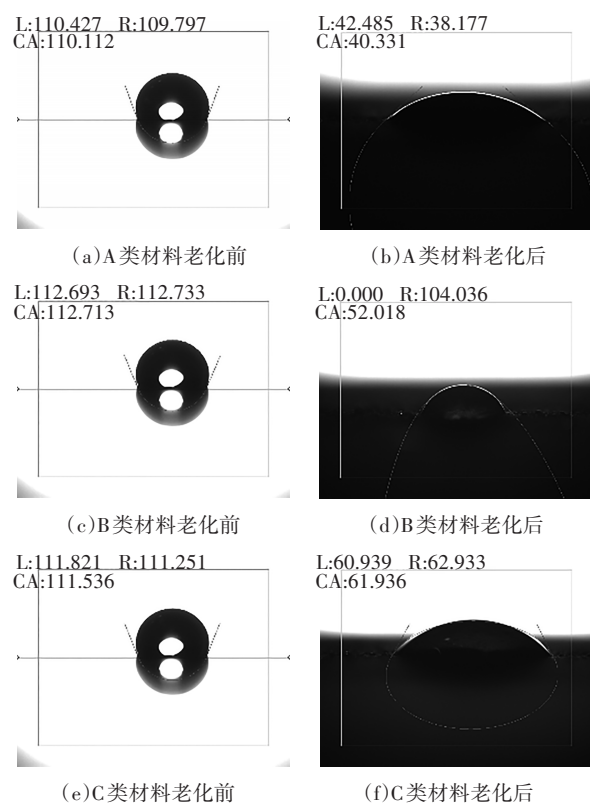


图3 不同材料电晕老化前和老化后0 h时的静态接触角

Fig.3 Static contact angle of different materials before and 0 h after corona aging

表2 不同材料电晕老化前和老化后0 h时静态接触角及变化幅度

Tab.2 Static contact angle and change amplitude of different materials before and 0h after corona aging

材料	老化前静态接触角/ $^\circ$	老化后0 h时静态接触角/ $^\circ$	变化幅度/%
A	110.11	40.33	-63.37
B	112.71	52.02	-53.85
C	111.54	61.94	-44.47

分别对不同配比硅橡胶材料在老化后的 0 h、2 h、4 h、6 h、8 h 进行静态接触角测试. 不同材料电晕老化后静态接触角回复曲线如图 4 所示, 在停止电晕老化后, 3 类材料的表面静态接触角均有一定程度的恢复, 经过 8 h 的恢复, A、B、C 3 类材料静态接触角最终分别恢复至 89.97° 、 90.47° 和 91.43° . 恢复后 3 类材料的静态接触角近乎一致, 都恢复至未老化时值的约 81%. 3 类材料的恢复速率存在着明显的差别, A 类材料恢复速率最快, 平均为 $6.2^\circ/\text{h}$, B 类材料次之, 恢复速率平均为 $4.8^\circ/\text{h}$, C 类材料的恢复速率最慢, 仅为 $3.7^\circ/\text{h}$.

老化前 A、B、C 3 类材料憎水性差异不大, 经电晕老化后 A 类材料憎水性丧失最严重, 由于 A 类材料相比 B 类和 C 类材料 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 质量分数占比最大, 电晕老化过程中内部主链被破坏, 产生了较多的一OH 和—COOH 等亲水性基团, 故其憎水性丧失最严重. 而停止电晕老化后的一段时间, 由于表面能较高, 材料表面亲水性极性基团会向材料内部迁移, 故材料表面能降低, 从而憎水性得以恢复.

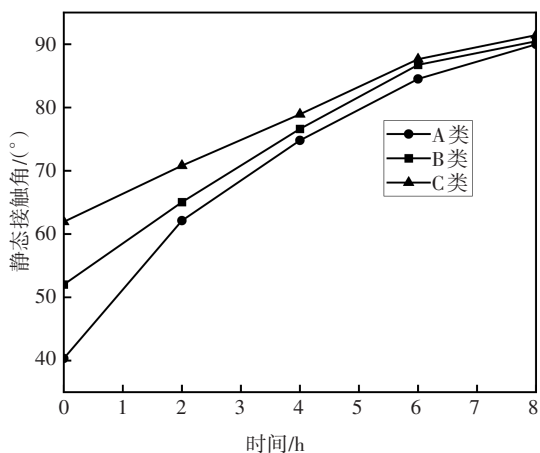


图 4 不同材料电晕老化后静态接触角回复曲线

Fig.4 Static contact angle recovery curves of different materials after corona aging

如图 5 所示, 在电晕老化过程中, 高能电子对材料表面的轰击使得材料表面的憎水性基团损坏, 具体表现为停止老化后材料表面的静态接触角出现大幅降低; 而在雾霾环境下, 电荷会附着到环境中的微小悬浮颗粒物上, 在电场的作用下带着部分悬浮颗粒物与电子一起轰击到材料表面. 在老化过程中, C 类材料表面析出了大量的附着物, 这些附着物在一定程度上阻止后续的电子轰击材料表面, 保护材料表面憎水性基团, 正因如此, C 类材料在电晕老化过

程中保持了相对较好的憎水性. 而在憎水性恢复过程中, C 类材料表面附着物较多, 在一定程度上阻碍了亲水性基团的迁移. 而 A 类材料表面附着物较少, 亲水性基团能够以较快的速度向材料内部迁移, 同时 A 类材料中 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 分子和甲基乙烯基硅橡胶分子具有相对宽泛的移动通道, 因此, 恢复速率相对最快.

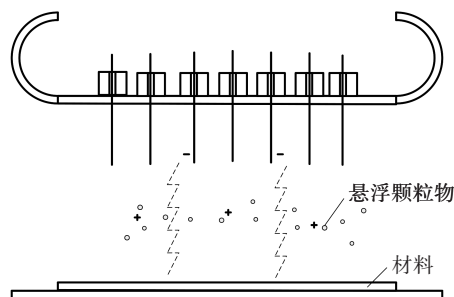


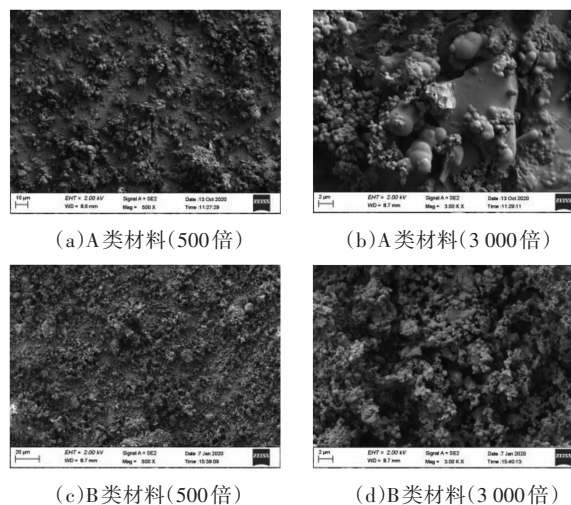
图 5 雾霾环境中电晕老化的放电过程

Fig.5 Discharge process of corona aging in haze environment

2.2 扫描电镜分析

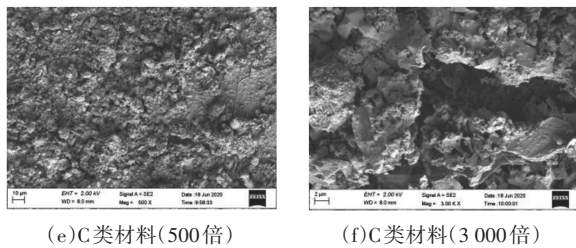
为了深入了解不同配比硅橡胶材料在雾霾环境下电晕老化后的微观结构, 本文采用扫描电镜 (SEM) 将不同材料分别放大 500 倍和 3 000 倍进行分析.

在雾霾环境下, 不同材料电晕老化后表面微观形貌如图 6 所示. 由图 6 可知, 3 类硅橡胶材料的表面均出现明显孔洞与沟壑. A 类材料表面附着物较少, 孔洞数量较少; B 类材料表面附着物较多, 且表面有明显孔洞, 其孔洞宽度约 $2\ \mu\text{m}$; C 类材料表面附着物相对最多, 孔洞与沟壑也相对较多, 孔洞的直径达 $5\ \mu\text{m}$, 同时孔洞深度较深. 由于 A 类材料中硅橡胶主体含量相对最低, 在电晕老化作用下对其表面破坏最小, 故 A 类材料表面形貌最好.



(c) B类材料 (500倍)

(d) B类材料 (3000倍)



(e)C类材料(500倍) (f)C类材料(3 000倍)

图6 不同材料电晕老化后表面微观形貌
(放大500倍和3 000倍)

Fig.6 Surface morphology of different materials after corona aging (magnification 500 and 3 000 times)

不同材料电晕老化前、后表面主要元素质量分数如表3所示.由表3可见,在电晕老化后,A、B、C 3类材料中氧原子质量分数分别上升了11.02%、14.01%和14.42%.雾霾环境下氧元素的变化原因主要有两种,一是材料表面被氧化,外界环境的氧元素结合到材料表面;二是雾霾环境中的 SiO_2 颗粒在电子的作用下附着于材料表面.由于3类材料表面均附着了大量的附着物,因此,雾霾环境下3类材料表面均被氧化,其中A类材料老化后表面被氧化程度较低,C类材料的表面被破坏更严重.

表3 不同材料电晕老化前、后表面主要元素质量分数

Tab.3 Mass fraction of major elements on surface of different materials before and after corona aging %

种类	w_C	w_O	w_{Si}	w_{Al}
A类材料老化前	27.12	46.38	14.34	9.59
A类材料老化后	13.28	57.40	21.95	5.62
变化值	-13.84	11.02	7.61	-3.97
B类材料老化前	28.59	44.47	14.63	9.12
B类材料老化后	10.20	58.48	15.59	11.24
变化值	-18.39	14.01	0.96	2.12
C类材料老化前	29.63	44.66	14.19	8.74
C类材料老化后	12.44	59.08	18.10	8.05
变化值	-17.19	14.42	3.91	-0.69

3类材料表面的碳元素质量分数也都大幅下降,A、B、C 3类材料中碳元素质量分数分别下降了13.84%、18.39%和17.19%.3类材料在雾霾环境下电晕老化过程中,B类与C类材料表面更多的甲基上的碳元素以CO与 CO_2 等形式逸散到空气中,也表明A类硅橡胶材料主体保留更为完整.未老化前Si原子处于交联高分子链中间区域,其侧链由 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 基团

螺旋分布,由于电晕老化使得高分子主链中的 $\text{Si}-\text{O}$ 键发生断裂,且部分硅元素出现在表层,因此,老化后A、B、C 3类材料硅元素质量分数分别增大了7.61%、0.96%和3.91%.老化后由于表面能较高,材料表面亲水性小分子基团会向材料内部迁移,导致A类和C类材料中铝元素质量分数分别下降了3.97%和0.69%,而B类材料表面的小分子基团也会发生迁移,但是B类材料对比A和C类材料碳元素损失最多,硅元素增加最小,3类材料中氧元素质量分数均增大且差异不大,因此,B类材料中铝元素质量分数相对增大.

2.3 傅里叶红外光谱分析

傅里叶红外光谱分析是研究物质分子的重要手段,不同的分子在红外区域有着独特红外吸收光谱.表4给出了典型基团的红外特征峰^[14].

表4 典型基团的红外特征峰

Tab.4 Infrared characteristic peaks of typical groups

特征基团	波数/ cm^{-1}
$\text{Si}(\text{CH}_3)_3$	800 ~ 700
$\text{O}-\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{O}(\text{Si}-\text{O})$	840 ~ 790
$\text{Si}-\text{O}-\text{Si}(\text{Si}-\text{O})$	1 100 ~ 1 000
$\text{Si}-\text{CH}_3(\text{C}-\text{H})$	1 270 ~ 1 255
$\text{CH}_3(\text{C}-\text{H})$	2 960
$\text{O}-\text{H}$	3 700 ~ 3 200

通过测试3类硅橡胶材料在雾霾环境下电晕老化后的红外光谱与各个基团的红外光谱,综合判断电晕老化后不同配比硅橡胶材料内部结构是否发生改变.测试结果分别如图7和图8所示,在1 100 ~ 1 000 cm^{-1} 的波峰处,A类材料的特征峰吸收值最大,C类材料在此处的特征峰吸收值最小,即在雾霾环境下电晕老化100 h后,A类材料表面的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 基团的数量最多;在波数为1 260 cm^{-1} 波峰处,同样是A类材料的特征峰吸收值最大,也表示老化后A类材料表面的 $\text{Si}-\text{CH}_3$ 基团的数量最多;3 600~3 200 cm^{-1} 波段为游离态 $-\text{OH}$ 的吸收波段,在此波段中A类与B类材料的均值较为相近,C类的均值远大于其他两类,也就是说C类材料表面的游离态 $-\text{OH}$ 的数量最多;羧基的吸收波段为1 700~1 600 cm^{-1} ,A类材料在此波段的均值最大,即老化后A类硅橡胶材料表面的羧基数量最多.

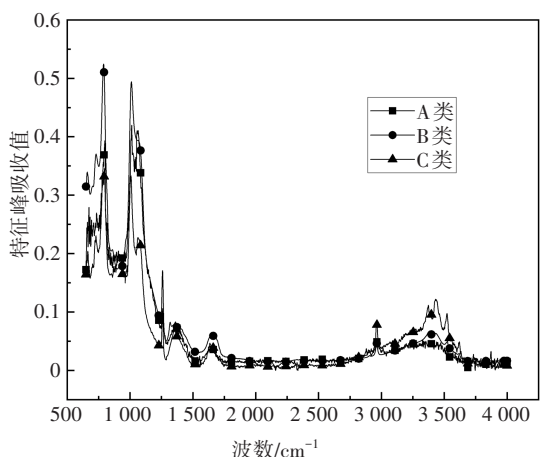


图 7 不同材料电晕老化后的特征峰吸收值

Fig.7 Characteristic peak absorption of different materials after corona aging

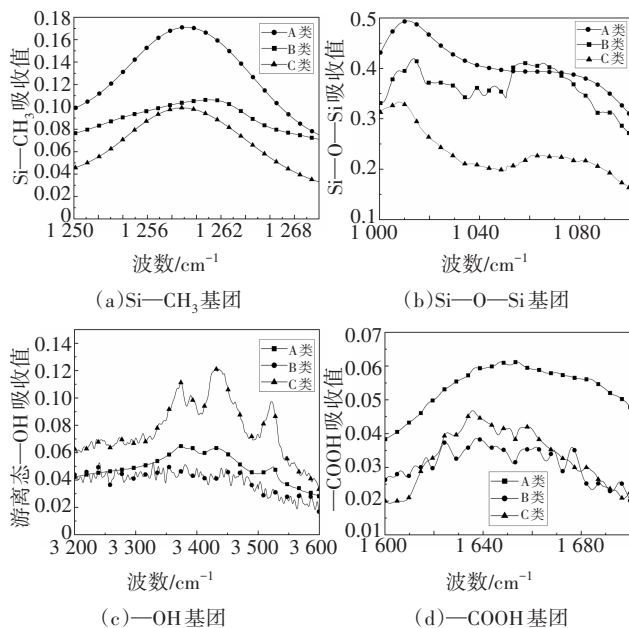


图 8 不同基团红外吸收峰

Fig.8 Infrared absorption peaks of different groups

在电晕老化过程中,由于电子对材料表面的轰击,故材料表面部分基团断裂;在雾霾环境的电晕老化过程中,材料表面部分高分子主链的Si—O—Si键断裂,侧链上的Si—C键与C—H键断裂,与环境中水分子中的一OH与H键结合,一OH的强极性使得硅橡胶内部的大分子发生了脱水缩合反应,产生了水和其他产物^[17],而C类材料中—OH的吸收峰面积远大于A类和B类材料.因此,可以解释C类材料表面对比其余材料表面附着了更多的附着物.红外光谱通过吸收峰在特定波数范围内的吸收峰面积,对特定的基团进行定量分析,吸收峰面积是指吸收光

光谱曲线和基线之间的区域面积,本文在计算峰面积时,选取吸收峰两端的切线作为基线^[27-28].表5给出了不同材料电晕老化后的特征峰面积,从表5可见,老化后A类材料面积远大于其他两类,表面保留了更多的Si—O—Si键,在雾霾环境下电晕老化后A类材料表面的高分子主链保存更为完整,分子链间相对稳定的交联网状结构保留较好.老化后A类材料的Si—CH₃基团的吸收峰面积明显大于另外两类,表示雾霾环境下电晕老化后A类材料分子链侧链断裂数量更少,而侧链上的甲基属于惰性基团与憎水性基团,也表明A类材料的绝缘性能保存最为完好.

表 5 不同材料电晕老化后的特征峰面积

Tab.5 Characteristic peak area after corona aging of different materials

材料	特征峰面积			
	Si—O—Si	Si—CH ₃	—OH	—COOH
A	59.96	5.62	40.87	11.32
B	49.98	3.94	32.40	6.55
C	36.32	3.00	64.06	6.94

3 结论

本文通过对3类不同配比硅橡胶材料在雾霾环境下展开100 h的电晕老化实验,从憎水性、微观形貌、内部结构等3个方面分析不同配比硅橡胶材料在雾霾环境下的电晕老化特性,得到如下结论:

1)在雾霾环境下,经电晕老化后,3类材料表面的憎水性均下降明显,其中硅橡胶主体的质量分数较低、氢氧化铝的质量分数较高的A类材料憎水性丧失较为严重,由于A类材料内具有相对宽泛的移动通道,亲水性基团能够以较快的速度向材料内部迁移,因此恢复速率最快.

2)老化后的3类硅橡胶材料的表面均出现明显孔洞与沟壑.而硅橡胶主体的质量分数越低,氢氧化铝质量分数越高的材料表面形貌相对越好,由于在电晕老化过程中会导致硅橡胶断裂,因此硅橡胶主体含量越低的材料表面附着物会越少.

3)硅橡胶主体的质量分数低、氢氧化铝的质量分数高的硅橡胶材料中Si—O—Si与Si—CH₃基团的特征峰面积相对最大,其表面的分子主链与侧链保留更完整,化学结构破坏最小.

4)硅橡胶材料中3种主要成分的质量分数对其在雾霾环境下电晕老化特性有显著影响,硅橡胶主体的质量分数越高,氢氧化铝的质量分数越低,其电晕老化越严重.

参考文献

- [1] 毕茂强,潘爱川,董扬,等. 高湿度条件下HTV硅橡胶材料电晕老化特性[J]. 中国材料进展,2021,40(1):74-80.
BI M Q, PAN A C, DONG Y, *et al.* Corona aging characteristics of HTV silicone rubber material under high humidity conditions [J]. *Materials China*, 2021, 40(1): 74-80. (In Chinese)
- [2] 毕茂强,潘爱川,杨俊伟,等. 多针-板电极电晕老化装置仿真设计与硅橡胶老化特性研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(2):177-184.
BI M Q, PAN A C, YANG J W, *et al.* Simulation design of multi-needle-plate electrode corona aging device and experimental study on aging characteristics of silicone rubber [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(2): 177-184. (In Chinese)
- [3] 梁曦东,高岩峰,王家福,等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. 高电压技术,2016,42(9):2888-2896.
LIANG X D, GAO Y F, WANG J F, *et al.* Rapid development of silicone rubber composite insulator in China [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(9): 2888-2896. (In Chinese)
- [4] 梁曦东,李少华. 电力系统有机外绝缘的发展与展望[J]. 南方电网技术,2016,10(3):58-65.
LIANG X D, LI S H. Development and prospect of organic outdoor insulation in power system [J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(3): 58-65. (In Chinese)
- [5] 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 Z C, PENG G M, WANG L M, *et al.* Application and key technical study of composite insulators [J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(3): 513-519. (In Chinese)
- [6] 张冠军,赵林,周润东,等. 硅橡胶复合绝缘子老化表征评估研究的现状与进展[J]. 高压电器,2016,52(4):1-15.
ZHANG G J, ZHAO L, ZHOU R D, *et al.* Review on aging characterization and evaluation of silicon rubber composite insulator [J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(4): 1-15. (In Chinese)
- [7] 胡斌,杨引虎. 新材料与器件技术的现状分析与发展趋势研究[J]. 电网与清洁能源,2018,34(2):60-64.
HU B, YANG Y H. Study on the current situation and development trend of new materials and device technology [J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(2): 60-64. (In Chinese)
- [8] 晏年平,房子祎,万华,等. 高温硫化硅橡胶老化状况及表征技术研究进展[J]. 绝缘材料,2017,50(12):1-9.
YAN N P, FANG Z Y, WAN H, *et al.* Research progress in ageing condition and characterization technology of high temperature vulcanized silicone rubber [J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(12): 1-9. (In Chinese)
- [9] 巢亚锋,王成,黄福勇,等. 中国输电线路复合绝缘子运行状况分析[J]. 高压电器,2015,51(8):119-124.
CHAO Y F, WANG C, HUANG F Y, *et al.* Assessment on operation state of composite insulators used on Chinese transmission lines [J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(8): 119-124. (In Chinese)
- [10] 李亚伟,陈洪波,胡钰骁,等. 高海拔地区紫外辐射、电晕放电对复合绝缘子表面形貌及成分的影响[J]. 电瓷避雷器,2020(5):237-241.
LI Y W, CHEN H B, HU Y X, *et al.* Effect of ultraviolet radiation and corona discharge on surface profile and composition of composite insulators in high altitude areas [J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2020(5): 237-241. (In Chinese)
- [11] 胡钰骁,刘轩东,李亚伟,等. 高海拔地区电晕放电对染污复合绝缘子表面憎水性的影响[J]. 电网技术,2019,43(4):1487-1494.
HU Y X, LIU X D, LI Y W, *et al.* Research of influence of corona discharge on surface hydrophobicity of contaminated composite insulators in high altitude areas [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(4): 1487-1494. (In Chinese)
- [12] 张盈利,汪泓,李猛,等. 复合绝缘子沿面电场影响因素分析[J]. 高压电器,2014,50(10):31-36.
ZHANG Y L, WANG F, LI M, *et al.* Analysis on influencing factors of surface electrical field of composite insulator [J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(10): 31-36. (In Chinese)
- [13] 邓桃,杨滴,陶文彪,等. 复合绝缘子粉化伞裙的微观结构与憎水性的关联研究[J]. 电网技术,2016,40(1):328-334.
DENG T, YANG D, TAO W B, *et al.* The relationship between microstructure and hydrophobicity of pulverized composite insulator sheds [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 328-334. (In Chinese)
- [14] 张志劲,张翼,蒋兴良,等. 自然环境不同年限复合绝缘子硅橡胶材料老化特性表征方法研究[J]. 电工技术学报,2020,35(6):1368-1376.
ZHANG Z J, ZHANG Y, JIANG X L, *et al.* Study on aging characterization methods of composite insulators aging in natural environment for different years [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(6): 1368-1376. (In Chinese)
- [15] 周军,方泳皓,邓禹,等. 东南沿海地区复合绝缘子用硅橡胶老化特性研究[J]. 绝缘材料,2020,53(3):14-21.
ZHOU J, FANG Y H, DENG Y, *et al.* Ageing characteristics of silicone rubber for composite insulator in southeast coastal area [J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(3): 14-21. (In Chinese)
- [16] 王霞,朱有玉,张宇巍,等. 界面涂敷料对XLPE和SIR复合绝缘界面空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术,2016,42(8):2382-2387.
WANG X, ZHU Y Y, ZHANG Y W, *et al.* Influence of interfacial coating on charge property of XLPE and SIR composite insulation [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(8): 2382-2387. (In Chinese)

- nese)
- [17] 王霞,王华楠,陈飞鹏,等. 电晕放电加速硅脂劣化对硅橡胶绝缘表面性能的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3977-3985.
WANG X, WANG H N, CHEN F P, *et al.* Effect of corona-discharge-accelerated deterioration of silicone grease on the surface properties of silicone rubber insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3977-3985. (In Chinese)
- [18] 梁英,靳哲,张君成. 硅橡胶电晕老化后的陷阱对其闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2309-2315.
LIANG Y, JIN Z, ZHANG J C. Influence of trap on flashover voltage of silicone rubber after corona aging[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2309-2315. (In Chinese)
- [19] 汤雪松,吴彬,于倩倩,等. 雾霾模拟环境下棒-板间隙交流放电特性研究[J]. 电工技术, 2021(11): 160-164.
TANG X S, WU B, YU Q Q, *et al.* Study on AC discharge characteristics of rod-plate gap in haze simulation environment [J]. Electric Engineering, 2021(11): 160-164. (In Chinese)
- [20] 刘勇,张迪,杜伯学,等. 雾霾环境下微细导电颗粒诱发复合绝缘子沿面放电特征[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 48-53.
LIU Y, ZHANG D, DU B X, *et al.* Surface discharge characteristics induced by fine conductive particles on polymer insulator in fog-haze environment[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 48-53. (In Chinese)
- [21] 杨洪达,李卫国,黄晓义,等. 不同配方硅橡胶憎水性恢复与迁移特性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 94-98.
YANG H D, LI W G, HUANG X Y, *et al.* Hydrophobic recovery and migration characteristics of different formulations of silicone rubber[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(9): 94-98. (In Chinese)
- [22] 周福文,王梦丹,屠幼萍,等. 纳米SiO₂/硅橡胶复合材料的陷阱特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2687-2694.
ZHOU F W, WANG M D, TU Y P, *et al.* Trap characteristics of nano SiO₂/silicone rubber composite[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2687-2694. (In Chinese)
- [23] 李恒真,刘刚,李立涅. 广州地区线路盘式防污型玻璃绝缘子的自然积污规律[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 118-124.
LI H Z, LIU G, LI L C. Natural contamination deposit law of line disc anti-contamination glass insulator in Guangzhou area [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 118-124. (In Chinese)
- [24] 钱之银,肖嵘. 华东电网500kV线路绝缘子人工和自然积污比较[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 705-710.
QIAN Z Y, XIAO R. Comparison between artificial pollution and nature pollution of 500 kV transmission line insulators in East China grid [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 705-710. (In Chinese)
- [25] 孙保强,王黎明,关志成,等. 电压种类及极性对绝缘子积污的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3101-3108.
SUN B Q, WANG L M, GUAN Z C, *et al.* Influence of voltage types and polarity on contamination of insulators [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3101-3108. (In Chinese)
- [26] 杨丽君,廖瑞金,李剑,等. 用逐步升压法和Weibull参数估计油纸绝缘寿命[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 4-6.
YANG L J, LIAO R J, LI J, *et al.* Estimating lifetime of oil-paper insulation under electrical aging conditions using step-stress tests and weibull parameters [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 4-6. (In Chinese)
- [27] 郭鹏,谢凤章,孟建玮,等. 沥青再生过程中新-旧沥青界面混溶行为综述[J]. 材料导报, 2020, 34(13): 13100-13108.
GUO P, XIE F Z, MENG J W, *et al.* Review on the interface blending behavior of virgin asphalt and aged asphalt during asphalt reclaiming [J]. Materials Reports, 2020, 34(13): 13100-13108. (In Chinese)
- [28] BI M Q, YANG J W, CHEN X, *et al.* The research on corona aging silicone rubber materials' NMR characteristics [J]. IEEE Access, 2020, 8: 128407-128415.