

表面状态对硅橡胶电晕老化进程及特性的影响研究

毕茂强, 董 扬, 陈 曦, 江天炎, 潘爱川, 杨俊伟

(重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054)

摘 要: 为探究表面状态对硅橡胶电晕老化进程及特性的影响, 采用多针-板电极对表面清洁和表面覆污的硅橡胶样品进行不同时间的电晕老化试验, 测量老化前后材料表面憎水性和微观结构的变化, 并在人工雾室中完成沿面闪络试验。研究结果表明: 相较于表面清洁的硅橡胶, 在一定程度上, 表面污秽会减弱电晕放电对硅橡胶材料的影响, 随着污秽度的增加, 老化前后静态接触角变化逐渐减小, 电晕放电对硅橡胶表面的破坏性减弱; 硅橡胶的闪络电压随表面污秽度的增大而降低, 并逐渐趋于平稳, 同时老化程度越深, 闪络电压也越低。本文的研究结果可为硅橡胶复合绝缘子设计和防污闪提供参考。

关键词: 硅橡胶; 电晕老化; 闪络; 污秽

中图分类号: TM21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)06-0429-06

引用格式: 毕茂强, 董扬, 陈曦, 等. 表面状态对硅橡胶电晕老化进程和特性的影响研究[J]. 中国材料进展, 2022, 41(6): 429-434.

BI M Q, DONG Y, CHEN X, *et al.* Study on the Effect of Surface State on Corona Aging Process and Characteristics of Silicone Rubber [J]. Materials China, 2022, 41(6): 429-434.

Study on the Effect of Surface State on Corona Aging Process and Characteristics of Silicone Rubber

BI Maoqiang, DONG Yang, CHEN Xi, JIANG Tianyan, PAN Aichuan, YANG Junwei
(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In order to explore the effects of surface condition on the corona aging process and characteristics of silicone rubber, this paper uses a multi-needle-plate electrode to conduct corona aging tests for different time on silicone rubber samples with clean and soiled surfaces, measures changes in the hydrophobicity and microstructure of the material surface before and after aging, and tests the surface flashover voltage in the artificial fog chamber. The research results show that: compared with silicone rubber with clean surface, to a certain extent, surface contamination will weaken the impact of corona discharge on silicone rubber surface, with the increase of pollution degree, the change of static contact angle after aging gradually decreases, and the destructive effect from corona discharge on the surface of silicone rubber weakens; the flashover voltage of silicone rubber decreases with the increase of pollution degree and gradually stabilizes, at the same time, the deeper the aging degree, the lower the flashover voltage. The results of this paper may provide a reference for the design and anti-pollution flashover of silicone rubber composite insulators.

Key words: silicone rubber; corona aging; flashover; pollution

1 前 言

复合绝缘子因其特有的憎水性和憎水恢复特性而被广泛用于电力系统^[1-4], 但复合绝缘子长期工作在户外, 其表面会随着运行时间的增加而积污严重, 在相对湿度

较高的环境中容易发生闪络事故。在城市工业区、沿海地区等, 由于经济的快速发展导致大气环境恶化, 使得雾水中富含 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 等离子, 雾水电导率能够达到 $2000 \sim 3000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 左右^[5-8], 且雾的持续时间较长, 不仅给绝缘子表面带来更多的导电物质, 同时润湿可溶污秽物, 进一步降低绝缘子的电气性能, 使绝缘子在较低湿度下就能发生闪络事故, 造成严重的经济损失。

复合绝缘子在面临积污问题的同时, 还将面临多因素的老化^[9]。由于安装不当等原因, 电晕或电弧放电产生的带电粒子长时间撞击在复合绝缘子表面, 使复合绝

收稿日期: 2020-06-15 修回日期: 2020-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51607019)

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.1674-3962.202006015

缘子表面的化学结构被破坏, 导致其憎水性降低, 从而在表面形成导电水膜, 导致闪络事故的发生, 威胁电网的安全运行^[10-13]。

随着复合绝缘子在电力系统中的大量应用, 其可靠性愈受到关注。目前, 国内外学者对硅橡胶复合绝缘子进行了大量的研究, 姚刚等选取不同材料的硅橡胶进行电晕放电老化试验, 分析了电晕放电对硅橡胶材料老化特性的影响^[14]。梁英等研究了污秽度、老化时间及环境湿度对电晕老化硅橡胶憎水性及闪络电压的影响规律, 同时还对硅橡胶材料的表面电荷进行研究, 探究表面电荷对电晕老化硅橡胶闪络电压的影响^[15, 16]。张志劲等在人工雾室对制作复合绝缘子的硅橡胶材料进行带电盐雾老化, 研究了不同电压等级、老化时长、雾水电导率对硅橡胶材料闪络特性的影响规律^[17]。蒋兴良等采用人工污秽试验方法, 研究了在不同电导率盐雾环境下覆污绝缘子的雾闪特性^[18]。王黎明等通过模拟雾霾环境研究了支柱绝缘子在雾霾环境中的闪络特性^[19]。李鹏等研究了复合绝缘子的干、湿闪电压, 结果表明, 复合绝缘子的干闪电压不受其憎水性的影响, 污秽能够明显降低复合绝缘子的电气性能^[20]。虽然学者们对硅橡胶的电晕老化特性、复合绝缘子的闪络特性等进行了较多研究, 但老化方式、老化环境的不同, 尤其是老化过程中臭氧浓度的差异, 都会给试验结果带来的一定的偏差。在沿海地区和部分城市工业区, 复合绝缘子将受到电晕老化、污秽以及盐雾的共同作用。

根据以上问题, 本文人工模拟具有一定空气流速的高湿度环境, 采用多针-板结构电极对清洁和覆污的硅橡胶进行电晕老化试验, 获取不同老化状态的硅橡胶样品, 探究表面污秽状态对硅橡胶老化进程的影响。并将老化后的样品放在人工雾室中进行沿面闪络试验, 获取不同老化状态下硅橡胶样品闪络电压的变化规律。

2 实验

2.1 实验材料

本文以某复合绝缘子厂试制的硅橡胶片为样品, 其主要成分(质量分数)为甲基乙基硅橡胶(35%~40%)、 SiO_2 (5%~10%)、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ (45%~50%)和硅油(1%~2%), 样品尺寸为 $115\text{ mm} \times 115\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。对清洁硅橡胶片和3组不同盐密覆污的硅橡胶样品分别进行24和100 h的电晕老化试验(表1), 用NaCl模拟导电物质, 模拟盐密(salt deposit density, SDD)为0.05, 0.10, 0.15 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 用硅藻土模拟不溶物, 盐灰质量比为1:6。

2.2 实验装置

电晕老化装置主要由电极、老化环境箱、水箱、空气

压缩机以及高压设备构成, 如图1所示。其中电极多为针-板结构, 针电极上31根细小钢针呈圆盘形分布^[21], 板电极为一个直径为100 mm的圆形铜板, 针板间距离为12 mm; 环境控制箱为一个直径和高度分别为350 mm和400 mm的有机玻璃罐。采用空压机压缩空气并将其通入盛有蒸馏水的密闭水箱, 再用导管将水箱中气体导入老化环境箱中, 并用湿度传感器测量老化环境箱中的相对湿度变化。

表1 电晕老化试验条件

Table 1 Test conditions of corona aging test

| No. | Salt deposit density/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$) | Aging time/h |
|-----|---|--------------|
| 1 | 0 | 24 |
| 2 | 0.05 | 24 |
| 3 | 0.10 | 24 |
| 4 | 0.15 | 24 |
| 5 | 0 | 100 |
| 6 | 0.05 | 100 |
| 7 | 0.10 | 100 |
| 8 | 0.15 | 100 |

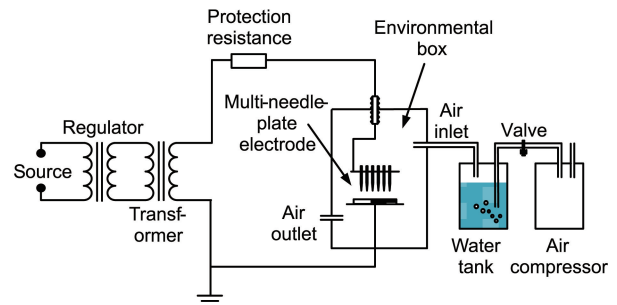


图1 电晕老化试验装置结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of corona aging test equipment

闪络试验在 $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 1.25\text{ m}$ 的人工雾室中进行, 将型号为NHSB-10 kVA/50 kV的实验变压器作为实验电源。试验装置结构和闪络电极结构分别如图2和图3

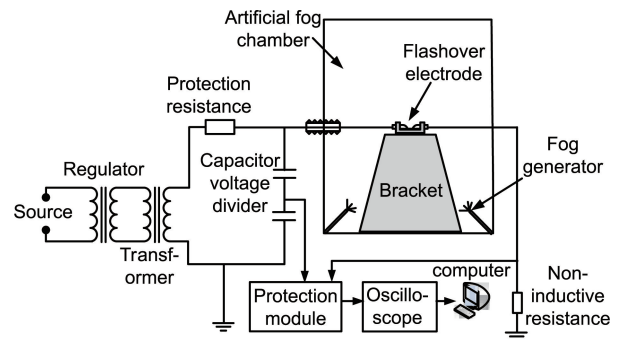


图2 闪络试验装置结构示意图

Fig. 2 Structure schematic of flashover test equipment

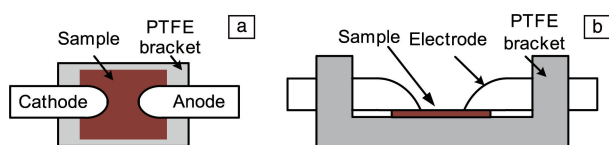


图3 指形闪络电极结构示意图: (a)俯视图, (b)侧视图

Fig. 3 Structure schematic of finger flashover electrode: (a) top view, (b) side view

所示, 其中闪络电极为指形电极, 电极半径为 6 mm, 正负两极间可调距离为 0~30 mm, 本文试验采用的放电距离为 10 mm。

2.3 实验方法

(1) 样品预处理

试验前, 首先用无水乙醇清洁硅橡胶表面, 然后放在相对干燥 ($RH < 40\%$) 的无尘环境中静置 24 h 以上。用洁净的纱布反复擦拭样品表面使其憎水性减弱至喷水分级法的 HC4 等级左右, 之后按照固体涂层法^[22]进行覆污。待样品表面污秽完全干燥后, 再进行电晕老化试验。

(2) 电晕老化试验

打开空压机将高湿度气体通入环境控制箱, 控制空气流速为 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 待箱中相对湿度大于 95% 时, 将硅橡胶样品放置于铜板电极上, 开始电晕老化试验, 缓慢对针电极施加 10 kV 交流电压, 老化时间分别为 0, 24, 100 h。整个试验过程中, 环境控制箱中的温度保持在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

(3) 憎水性测试

用光学接触角测试仪 (ZJ-6900) 测量老化前后样品表面的静态接触角。将水滴滴在硅橡胶材料的表面, 相机精确采集水滴图像并自动拟合计算出样品与水滴的静态接触角, 经过多次测量后取其均值。

(4) 样品表面形貌观测

切取样品针电极正下方老化区域并进行喷金 50 s 处理, 使用 ZEISS SIGMA HD 场发射扫描电镜观测样品表面微观形貌。

(5) 沿面闪络试验

取出老化后的样品, 并将样品老化区域切割成 4 片, 每片规格为 $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 依次放入人工雾室进行沿面闪络试验。雾由超声波雾发生器生成, 其粒径大小为 $80 \sim 120 \mu\text{m}$ 。当样品表面布满由雾水产生的水滴时, 开始对样品缓慢匀速加压至闪络, 对每片样品进行 4 次闪络, 每次间隔 5 min。由于闪络试验得到的闪络电压具有一定的分散性, 为保证试验数据的准确性和合理性, 将试验结果的平均值 U_f 作为样品的闪络电压值, 同时计算试验结果的标准偏差 σ ^[17]。

3 结果及分析

3.1 硅橡胶表面形态分析

样品经过不同时间的电晕放电后的外观形貌如图 4 所示, 可以看出, 电晕放电使样品在针尖正下方出现圆形扩散状老化区域, 该区域随老化时长增加而增大。当硅橡胶表面的污秽度较小时, 电晕老化后的表面形貌变化越明显。电晕放电产生的高能粒子撞击样品表面使原本附着在表面的污秽由针尖正下方周围扩散, 对表面污秽有一定的吹散作用。随着污秽度的增加, 部分高能粒子直接撞击在污秽上, 使得样品表面在一定时间上受到的电晕放电的影响较小, 当老化时间较短时, 样品表面老化痕迹不明显。

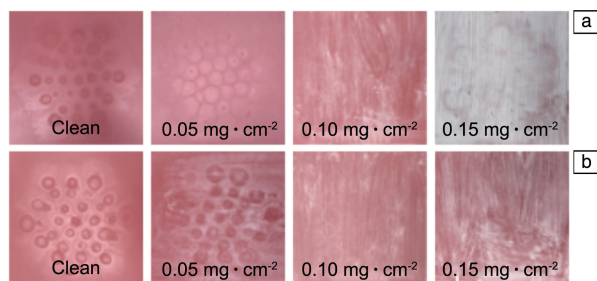


图4 样品电晕老化后的表面形貌: (a) 老化 24 h, (b) 老化 100 h

Fig. 4 Surface morphologies of samples after corona aging: (a) aging for 24 h, (b) aging for 100 h

进一步对样品老化后的表面形貌进行 SEM 观测, 结果如图 5 和图 6 所示。清洁样品经过 24 h 电晕老化, 表面出现裂纹, 其宽度在 $2.5 \mu\text{m}$ 左右; 随着污秽度的增加, 裂纹数量逐渐减少, 宽度也逐渐减小, 当盐密为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, 样品表面几乎被污秽物覆盖。当老化时长为 100 h 时, 清洁样品由于放电产生的裂纹宽度增加到 $3.2 \mu\text{m}$ 左右, 相较于覆污的样品, 其电晕放电产生的裂纹更大。由此可见, 当老化时长一定时, 污秽度越高, 电晕老化对硅橡胶的影响越弱, 污秽在一定程度上减弱了电晕放电对硅橡胶的影响。

3.2 硅橡胶憎水性分析

电晕老化结束后测量硅橡胶样品的静态接触角, 如图 7 所示, 可以看出, 不同老化状态的硅橡胶表面水滴呈现不同程度的静态接触角。未老化时的清洁样品的静态接触角为 110° , 老化 24 h 后, 清洁样品的静态接触角下降到 73.3° , 3 种覆污样品的静态接触角分别为 75.1° 、 78.6° 、 80.7° ; 当老化时长为 100 h 时, 清洁样品静态接触角仅有 55.0° , 随着表面污秽度的增加, 覆污样品的静态接触角分别为 60.0° 、 67.0° 、 70.7° 。硅橡胶样品的静态接触角随老化时长的增加而降低, 相同老化时间下,

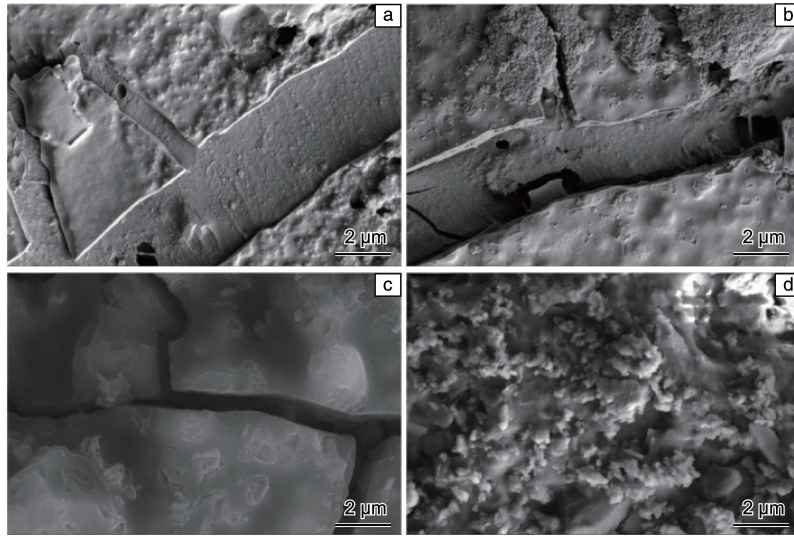


图 5 不同污秽度样品电晕老化 24 h 的表面 SEM 照片: (a) 清洁, (b~d) 盐密分别为 0.05, 0.10, 0.15 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$
 Fig. 5 Surface SEM images of samples with different pollution degrees after corona aging for 24 h: (a) clean, (b~d) salt deposit density is 0.05, 0.10, 0.15 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, respectively

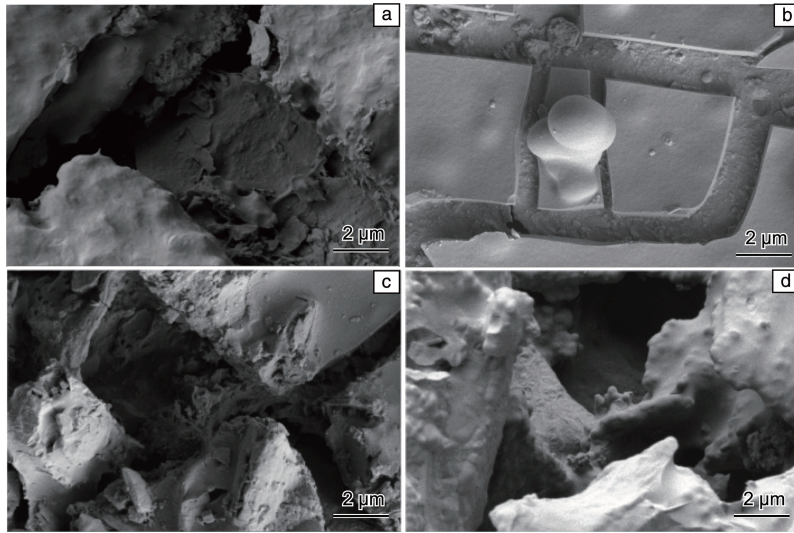


图 6 不同污秽度样品电晕老化 100 h 的表面 SEM 照片: (a) 清洁, (b~d) 盐密分别为 0.05, 0.10, 0.15 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$
 Fig. 6 Surface SEM images of samples with different pollution degrees after corona aging for 100 h: (a) clean, (b~d) salt deposit density is 0.05, 0.10, 0.15 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$, respectively

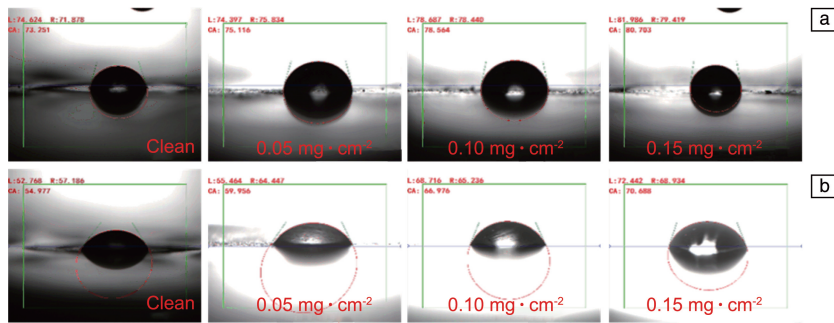


图 7 不同污秽度的硅橡胶样品电晕老化 24 h (a) 和 100 h (b) 后的静态接触角
 Fig. 7 Static contact angle of silicone rubber samples with different pollution degrees after corona aging for 24 h (a) and 100 h (b)

随着污秽度的增加而增加。污秽度越高，静态接触角降低幅度小，电晕放电对样品的憎水性影响越小，这与表面形貌的变化趋势相吻合。这说明硅橡胶表面污秽度将影响硅橡胶表面的电晕老化进程和老化状态，污秽度越高，样品表面受到电晕放电的影响越小。

3.3 硅橡胶表面闪络特性分析

将老化后的样品放在雾室中进行闪络试验，其闪络

电压均值和标准偏差如表2所示，标准偏差均小于9%。将闪络电压的试验结果对SDD的变化作图，结果如图8所示。从图8可知，未老化的清洁硅橡胶样品的闪络电压均值最高，当样品老化时长为100 h时，覆污盐密为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的样品的闪络电压均值最低，两者相差3.7 kV。

表2 老化后样品在雾中的闪络电压均值和标准偏差

Table 2 Mean value and standard deviation of flashover voltage of aged silicone rubber in fog

| Aging time/h | Salt deposit density /($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$) | | 0 | | 0.05 | | 0.10 | | 0.15 | |
|--------------|---|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | U_f/kV | $\sigma/\%$ | U_f/kV | $\sigma/\%$ | U_f/kV | $\sigma/\%$ | U_f/kV | $\sigma/\%$ | U_f/kV | $\sigma/\%$ |
| 0 | 9.2 | 5.0 | 6.5 | 7.9 | 6.0 | 6.0 | 5.9 | 5.3 | | |
| 24 | 7.7 | 3.4 | 6.1 | 8.2 | 5.8 | 5.5 | 5.7 | 6.3 | | |
| 100 | 6.9 | 7.3 | 5.9 | 6.3 | 5.6 | 5.4 | 5.5 | 7.5 | | |

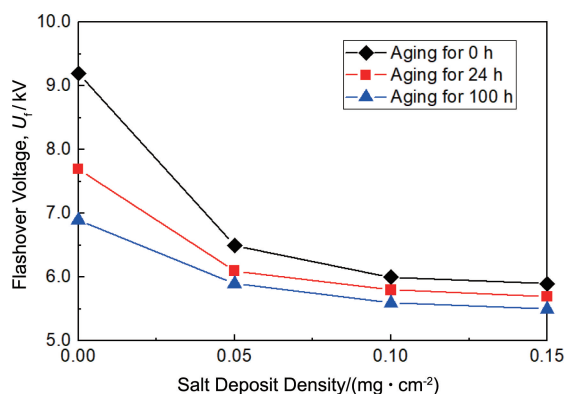


图8 盐密(salt deposit density, SDD)对硅橡胶样品闪络电压的影响
Fig. 8 The influence of SDD on the flashover voltage of silicone rubber samples

随着覆污盐密的增大，经相同时间老化的硅橡胶样品的闪络电压降低，且降低的趋势逐渐变小，并且老化时间越长，这种趋势越明显，说明当污秽含量较高时，老化时长对闪络电压的影响程度越来越小。同时，还可以看出污秽度由0到 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的变化引起的闪络电压的变化较大，是因为污秽湿润后，样品表面带有大量离子，样品表面电导率大幅升高，使得闪络电压迅速下降。再次增加表面污秽度，虽然也引起闪络电压降低但是降低幅度不大。在电晕老化过程电晕放电产生的高能粒子碰撞硅橡胶材料表面造成破坏，而材料表面覆污后会在表面形成一层污秽薄膜，在一定程度上可以减轻粒子的碰撞，所以受破坏程度比起清洁状态的硅橡胶的略轻，憎水性也更好，有利于闪络电压的提高；但随着污秽的增加，表面的导电物质相应增多，在一定程度上又

将降低材料表面的闪络电压，所以在二者共同作用下，闪络电压下降的趋势变缓。

4 结 论

本文完成了对不同表面状态条件下硅橡胶样品的电晕老化试验，对样品进行了SEM观测、憎水性测试以及闪络电压测试，得到以下结论：

(1)在表面覆污状态下，电晕放电产生的高能粒子将首先冲击硅橡胶样品表面的污秽，从而减轻了电晕放电对硅橡胶样品本身的影响，延缓了硅橡胶的老化进程。污秽度越高，电晕老化后硅橡胶样品表面由于放电形成的裂纹的宽度越小。

(2)清洁硅橡胶老化后的静态接触角最小，而覆污硅橡胶老化后的静态接触角随污秽度增大而增大，反映了污秽对电晕放电影响的减缓作用。

(3)老化时间一定的情况下，硅橡胶表面污秽度越高，硅橡胶的闪络电压越低，同时污秽度对闪络电压的影响有限。老化时间越长，样品闪络电压越低，闪络电压与表面污秽度有关，污秽度越高，老化时长引起的闪络电压的降幅越小。

参考文献 References

- [1] 梁曦东, 高岩峰, 王家福, 等. 高电压技术[J], 2016, 42(9): 2888-2896.
LIANG X D, GAO Y F, WANG J F, *et al.* High Voltage Engineering [J], 2016, 42(9): 2888-2896.
- [2] XIE C, ZHANG Y, WANG J, *et al.* Microstructure Analysis of AC Corona Aging of Silicone Rubber[C]// Proceedings of IEEE 9th Inter-

- national Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin, China; IEEE, 2009: 481-483.
- [3] FERNANDO M, GUBANSKI S M. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation[J], 2010, 17(2): 326-333.
- [4] 郭旭敏, 郁利超, 刘贺晨. 绝缘材料[J], 2016, 49(7): 31-35.
GUO X M, YU L C, LIU H C. Insulating Materials[J], 2016, 49(7): 31-35.
- [5] 廖一帆, 杨宇轩, 张福增, 等. 电瓷避雷器[J], 2018(5): 191-196.
LIAO Y F, YANG Y X, ZHANG F Z, *et al.* Insulators and Surge Arresters[J], 2018(5): 191-196.
- [6] 孟志高, 蒋兴良, 董冰冰, 等. 电工技术学报[J], 2016, 31(12): 65-71.
MENG Z G, JIANG X L, DONG B B, *et al.* Transactions of China Electrotechnical Society[J], 2016, 31(12): 65-71.
- [7] 李晨. 高湿环境电压作用下硅橡胶材料的理化/闪络特性[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
LI C. Physicochemical and Flashover Properties of Silicone Rubber under High Voltage in High Humidity Environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [8] 郭裕钧, 蒋兴良, 孟志高, 等. 电工技术学报[J], 2017, 32(13): 248-254.
GUO Y J, JIANG X L, MENG Z G, *et al.* Transactions of China Electrotechnical Society[J], 2017, 32(13): 248-254.
- [9] 戴罕奇, 赵晨龙, 梁建瑜, 等. 电工技术学报[J], 2016, 31(10): 102-111.
DAI H Q, ZHAO C L, LIANG J Y, *et al.* Transactions of China Electrotechnical Society[J], 2016, 31(10): 102-111.
- [10] 彭向阳, 林宏升, 王锐, 等. 高压电器[J], 2018, 54(6): 1-8.
PENG X Y, LIN H S, WANG R, *et al.* High Voltage Apparatus[J], 2018, 54(6): 1-8.
- [11] 夏云峰, 宋新明, 何建宗, 等. 电工技术学报[J], 2019, 34(S1): 440-448.
XIA Y F, SONG X M, HE J Z, *et al.* Transactions of China Electrotechnical Society[J], 2019, 34(S1): 440-448.
- [12] 申文伟, 宋伟, 王国利, 等. 高压电器[J], 2013, 49(2): 1-7.
SHEN W W, SONG W, WANG G L, *et al.* High Voltage Apparatus[J], 2013, 49(2): 1-7.
- [13] 晏年平, 房子祎, 万华, 等. 绝缘材料[J], 2017, 50(12): 1-9.
YAN N P, FANG Z Y, WAN H, *et al.* Insulating Materials[J], 2017, 50(12): 1-9.
- [14] 姚刚, 李亚明, 文习山, 等. 高电压技术[J], 2017, 43(9): 2831-2841.
YAO G, LI Y M, WEN X S, *et al.* High Voltage Engineering[J], 2017, 43(9): 2831-2841.
- [15] 梁英, 董平平, 高丽娟. 高电压技术[J], 2018, 44(12): 4083-4089.
LIANG Y, DONG P P, GAO L J. High Voltage Engineering[J], 2018, 44(12): 4083-4089.
- [16] 梁英, 靳哲, 张君成. 中国电机工程学报[J], 2016, 36(22): 6294-6302.
LIANG Y, JIN Z, ZHANG J C. Proceedings of the CSEE[J], 2016, 36(22): 6294-6302.
- [17] 张志劲, 李晨, 梁田, 等. 电网技术[J], 2018, 42(7): 2153-2159.
ZHANG Z J, LI C, LIANG T, *et al.* Power System Technology[J], 2018, 42(7): 2153-2159.
- [18] 梁允, 李哲, 蒋兴良, 等. 高压电器[J], 2017, 53(10): 94-99.
LIANG Y, LI Z, JIANG X L, *et al.* High Voltage Apparatus[J], 2017, 53(10): 94-99.
- [19] 王黎明, 李剑超, 梅红伟, 等. 高电压技术[J], 2019, 45(2): 433-439.
WANG L M, LI J C, MEI H W, *et al.* High Voltage Engineering[J], 2019, 45(2): 433-439.
- [20] 李鹏, 范建斌, 宿志一, 等. 中国电力[J], 2005, 38(4): 50-53.
LI P, FAN J B, SU Z Y, *et al.* Electric Power[J], 2005, 38(4): 50-53.
- [21] MA B, ANDERSSON J, GUBANSKI S M. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation[J], 2010, 17(2): 555-565.
- [22] 中国国家标准化管理委员会. 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验: GB/T 4585-2004/IEC 60507: 1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
China National Standardization Management Committee. Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on AC Systems: GB/T 4585-2004/IEC 60507: 1991[S]. Beijing: China Standards Press, 2004.

(编辑 惠 琼)