

# 湿污环境下绝缘子 LSR 和 RTV 涂层的性能对比

贾志东<sup>1</sup>, 叶蔚安<sup>1</sup>, 陈 灿<sup>1</sup>, 李 智<sup>1</sup>, 叶 宁<sup>2</sup>

(1. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 深圳市森日有机硅材料科技有限公司, 深圳 518112)

**摘 要:** 满足 DL/T 627—2012 标准的室温硫化硅橡胶 (room temperature vulcanized, RTV) 防污闪涂料在以广东为代表的高湿、多雨环境使用后出现了起皮和脱落的问题, 为了提高绝缘子在湿污环境中的耐污性能, 需要采用机械性能更优异的涂层。本文提出使用液体硅橡胶 (liquid silicone rubber, LSR) 涂层作为悬式绝缘子的防污闪涂层, 通过憎水性迁移试验、污耐受试验、吸水吸湿试验、透水试验和压汞法, 分别对比了 LSR 和 RTV 涂层在憎水迁移性、耐污性能、吸水吸湿特性、透水特性, 孔隙率和孔径分布等方面的差异, 并采用水煮试验加划圈法的方法研究了湿污环境中涂层的长效附着力。研究表明: LSR 涂层的憎水迁移性弱于 RTV 涂层, 但仍然可以大幅降低泄漏电流幅值, 提高绝缘子的耐污性能; LSR 涂层的吸水率和吸湿率均低于 RTV 涂层, 透水速率略高于 RTV 涂层, 而这种差异是由涂层孔隙特征和成分差异所导致的; LSR 涂层在水煮试验中能够保持更长时间的附着效果, 长效附着力更好。因此, 在湿污环境中可以尝试使用具有更好适用性的 LSR 涂层作为 RTV 涂层的替代选择。

**关键词:** 湿污环境; LSR 涂层; 憎水迁移性; 吸水吸湿; 附着力

## Comparison on the Characteristics of Insulator LSR and RTV Coating in Polluted and Wet Environment

JIA Zhidong<sup>1</sup>, YE Wei'an<sup>1</sup>, CHEN Can<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1</sup>, YE Ning<sup>2</sup>

(1. Graduate School of Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. Shenzhen Square Silicone Materials Co., Ltd., Shenzhen 518112, China)

**Abstract:** RTV coating which has met the requirements of DL/T 627—2012 usually suffers from color peeling and shedding when it is operated in humid and rainy environment like Guangdong province. In order to improve the anti-pollution property of insulator in polluted and wet environment, a coating with better mechanical properties need to be adopted. Therefore, we adopted a LSR coating as an anti-pollution flashover coating of insulator. We compared the differences of the hydrophobicity transfer property, pollution withstanding property, water and moisture absorption property, water permeation property, porosity, and pore size distribution between LSR and RTV coatings by hydrophobicity transfer tests, pollution withstanding tests, water and moisture absorption tests, water permeation tests and the mercury intrusion method. Moreover, a water boiling method and circle method were combined to compare their long-term adhesive forces. Through the tests above, the following conclusions can be drawn. The LSR coating is found to have weaker hydrophobicity transfer property than the RTV coating, but it also can significantly decrease the leakage current of insulator and then improve its contamination withstanding property. The LSR coating has much lower water absorptivity and moisture absorptivity than the RTV coating, while its water permeation rate is slightly faster than the RTV coating, which is caused by the differences of pore characteristics and composition of coating. The LSR coating can keep longer adhesion in water boiling test, proving it has better long-term adhesive force than the RTV coating. Therefore, the LSR coating which has better adaptation to polluted and wet environments can be used as an alternative to the RTV coating in such environments.

**Key words:** polluted and wet environment; LSR coating; hydrophobicity transfer; water and moisture absorptivity; adhesive force

## 0 引言

室温硫化硅橡胶 (RTV) 防污闪涂料由于其优

异的憎水性和憎水迁移性, 在我国电力系统中已经得到了广泛的应用并取得了良好的防污闪效果<sup>[1]</sup>。

尽管 RTV 防污闪涂料能够满足 DL/T 627—2012《绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料》<sup>[2]</sup>的要求, 但是在以广东为代表的高湿、多雨环境中使用后, 却

基金资助项目: 国家自然科学基金(51477806)。  
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51477806).

出现了脱落和起皮等问题<sup>[3-4]</sup>, 严重影响了涂料的使用效果。

国内外的研究<sup>[3-7]</sup>主要集中在分析高湿、多雨环境中 RTV 涂层劣化的表现及其原因。高湿、多雨环境中 RTV 劣化的主要表现是其附着力被破坏, 其原因可以归结为硅橡胶材料在长期运行中吸水和吸湿, 以及在有水附着时的水的渗透<sup>[5-7]</sup>。采用水浸泡试验<sup>[5]</sup>对 RTV 涂层的长效附着力进行研究发现, 水会透过 RTV 涂层到达涂层与绝缘子的交界面, 降低偶联剂的粘接效果, 进而引起涂层附着力下降。当水溶液中存在酸、碱和盐时, 附着力下降的速度更快。在有水浸泡或高湿环境中, 水及水溶液渗入到硅橡胶中, 还会引起硅橡胶材料体积电阻率、相对介电常数和介质损耗角正切值等电气性能变化<sup>[6]</sup>。目前的行业标准 DL/T 627-2012<sup>[2]</sup>没有充分考虑到水和湿气对于 RTV 涂层的作用, 也没有考虑涂层的长效附着力, 导致满足标准的涂层在高湿、多雨的环境中运行会存在脱落、起皮等问题。

在湿污环境下, 绝缘子表面污秽度高, 加上硅橡胶材料表面容易积污<sup>[8]</sup>, 染污绝缘子局部涂层的脱落会引起泄漏电流的增加和污闪电压的下降, 降低涂层的防污闪效果<sup>[7]</sup>。目前, 在湿污环境中还没有 RTV 防污闪涂层的有效替代方案, 使用中的 RTV 涂层也没有在北方地区效果好<sup>[4]</sup>。

国内外的研究对 RTV 劣化的表现和原因进行了较深入的分析, 但是未能提出有效的解决方案。本文基于国内外的研究基础, 尝试采用一种新的绝缘子涂层替代原有 RTV 涂层, 以提高绝缘子在湿污环境中的运行性能。作为硅橡胶产品的一种, 液体硅橡胶 (LSR) 采用了不添加氢氧化铝 (ATH) 填料的交联体系, 具有更好的机械性能和电气性能<sup>[9]</sup>, 本文采用了附着力更优异的 LSR 涂层作为绝缘子防污闪涂层, 并对 LSR 和 RTV 涂层的憎水迁移性、耐污性能、吸水吸湿性、透水性、孔隙特征和附着力进行了对比研究。

## 1 液体硅橡胶涂层基本特性

LSR 涂层用的原料是加成型的 LSR<sup>[9]</sup>, 以含乙烯基的聚硅氧烷为基础聚合物, 以含硅氢键的聚硅氧烷为交联剂, 以白炭黑为补强剂, 在含铂催化剂的作用下硫化成型。加成型 LSR 在成型过程中没有副产物生成, 因此可以采用注射、喷涂和刷涂等多种工艺成型。在外绝缘领域, LSR 目前广泛用于制

作绝缘护套<sup>[10]</sup>, 而将 LSR 涂层用于绝缘子防污闪还是新的应用方法, LSR 涂层于绝缘子后涂层表面平整光滑, 无堆积和缺损等现象, 涂覆效果良好, 涂覆 LSR 后的绝缘子如图 1 所示。

相比 RTV 涂层, LSR 涂层不需要添加 ATH 也具有较好的耐漏电起痕效果<sup>[11]</sup>, LSR 中无机填料少, 机械性能也会相应提高, 涂层硫化后性能可以达到热硫化混炼硅橡胶的水平<sup>[9]</sup>, 其力学性能和电气性能高于 DL/T 627—2012<sup>[2]</sup>对 RTV 涂层的性能要求, 根据该标准要求测量的部分参数如表 1 所示。

## 2 试验样品与试验方法介绍

### 2.1 试验样品准备

试验使用 LSR 和 RTV 两种涂料制备涂层, 其中 LSR 涂料是 A 厂家新研发的产品, RTV 防污闪涂料是国内 B 厂家生产的产品。两种涂料分别制备成涂层试片和涂层玻璃试片, 方法如下:

1) 涂层试片: 在聚四氟乙烯模具中倒入涂料, 待样品完全固化之后形成厚度分别约为 1.0、1.5、2.0 和 3 mm 的涂层, 并用裁刀切成直径分别为 30 mm 和 100 mm 的圆形试片待用。

2) 涂层玻璃试片: 在 120 mm×50 mm×5 mm 和 100 mm×50 mm×2 mm 两种规格的玻璃片上分别涂覆厚度约为 0.3 mm 的 RTV 和 LSR 涂层, 待涂层完全固化之后待用。



图 1 带 LSR 涂层的玻璃绝缘子

Fig.1 Glass insulator with LSR coating

表 1 LSR 涂层和 RTV 涂层的基本性能

Table 1 Fundamental properties of LSR and RTV coating

性能参数	数值	
	LSR 涂层	RTV 涂层
拉伸强度/MPa	6.7	3.0
撕裂强度/(kN·m <sup>-1</sup> )	10.8	9.1
平均静态接触角/(°)	109.1	114.9
邵氏硬度 (Shore A)	42	37
耐漏电起痕等级	1A3.5	1A2.5
相对介电常数	2.90	2.96

带涂层的绝缘子样品通过刷涂的方式制备, 在 FC70/146 型玻璃绝缘子表面均匀涂覆厚度约为 0.3 mm 的涂层, 涂层完全固化之后待用。

## 2.2 试验方法

采用宏观和微观两个层面的分析方法对比两种涂层的差异, 宏观性能主要关注水和湿气对涂层的影响, 以憎水迁移性、泄漏电流、吸水吸湿量、透水透湿速率、附着力的变化来反映这种影响; 微观层面通过测量样品孔径分布和孔隙率来解释样品在有水和湿气环境中的变化。

### 1) 憎水性的测量

用静态接触角法测量样品的憎水性, 测试设备为德国 Dataphysics 公司的 OCA20 型接触角测试仪。测试时采用 5  $\mu\text{L}$  的液滴, 待水滴滴下样品表面之后 40 s 之后测量样品的静态接触角。

### 2) 泄漏电流的测量

将染污的绝缘子放进雾室中, 由加湿器加湿使绝缘子受潮。试验接线如图 2 所示, 在低压回路中串联 THLC-1 型泄漏电流的采集装置, 电流量程为 0.5 mA~5 A, 采样频率为 1~5 kHz 可调, 采集软件可以自动分析出每 1 min 的最大电流值。

### 3) 吸水率和吸湿率的测量

将直径为 30 mm, 厚度为 2 mm 的涂层试片分别浸入去离子水中并放在由饱和盐溶液和恒温箱形成的不同恒温恒湿环境中, 以单位质量的变化率  $\omega$  来表征样品的吸水和吸湿率, 计算式为

$$\omega = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $m_t$  为吸水或吸湿后样品的质量, g;  $m_0$  为样品初始的质量, g。

### 4) 透水速率的测量

设计如图 3 所示的透水速率测量装置。使用石英玻璃杯盛装去离子水, 用室温胶和密封蜡来封住试片和杯口。用干燥剂来维持环境相对湿度在 1% 以下, 试片两侧的水压会使水渗透过试片。

实验过程中通过测量石英玻璃杯和试片密封装置组成装置的总质量变化来间接测量透过试片水的质量  $\Delta m$ , 以质量变化率  $\theta$  表征透水的速率, 计算式为

$$\Delta m = |m_{st} - m_{s0}| \quad (2)$$

$$\theta = \frac{|m_{st} - m_{s0}|}{t} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $m_{st}$  为石英玻璃杯和试片密封装置透水后的总质量;  $m_{s0}$  为装置的初始总质量。

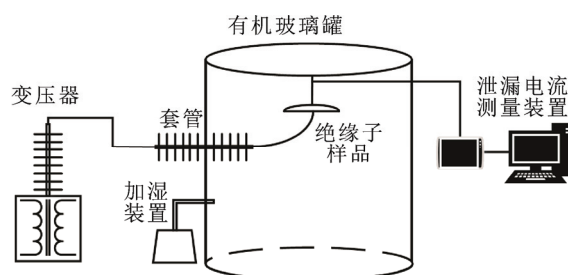


图2 泄漏电流测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of leakage current measurement

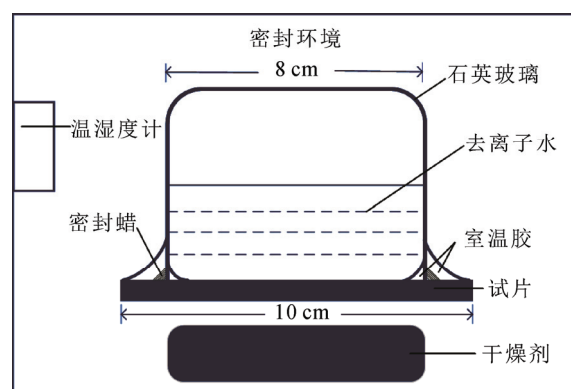


图3 透水速率装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of water permeation rate measurement device

### 5) 附着力的测试

涂层附着力测试使用的样品是 100 mm×50 mm×2 mm 的涂层玻璃试片, 将涂层完全固化后的样品投入水浴锅进行恒温水煮。

测试参照 GB 1720—1979 《漆膜附着力测定法》, 使用附着力测定仪在涂层表面划圆滚线, 根据圆滚线的附着形态对涂层附着力进行判定<sup>[12]</sup>。

### 6) 硅橡胶孔隙率的测量

采用压汞法测量样品孔径分布和孔隙率<sup>[13]</sup>, 使用的设备为美国麦克 9510 压汞测试仪, 测试的压强范围为 13.1~61 000.0 psia(1 psia=6.8 948 kPa)。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 涂层憎水迁移性对比

作为有机硅涂层, LSR 具有良好的憎水性, 并且其憎水性的丧失、恢复和迁移特性都能满足 DL/T 627—2012 的要求<sup>[2]</sup>。有机硅涂层的憎水迁移性受环境温度、湿度、气压和污秽等因素的影响<sup>[14-16]</sup>, 考虑其在湿污环境中的适应性, 试验采用恒定湿度和污秽度, 并且用迁移速度比较慢的工业原料高岭土来研究其憎水迁移性<sup>[17]</sup>, 重点研究不同湿度对于

两种涂层憎水迁移性的影响。

在 LSR 和 RTV 的涂层玻璃试片表面均匀涂覆盐密为  $0.1 \text{ mg/cm}^2$  的 NaCl 和灰密为  $1.0 \text{ mg/cm}^2$  的高岭土, 然后将样品放在由饱和盐溶液和恒温箱形成的恒温恒湿环境中, 其中温度恒定为  $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度 (relative humidity, RH) 用符号  $H_r$  表示, 误差为  $\pm 3\%$ 。分别测量不同湿度下 280 h 样品表面的静态接触角, 直到静态接触角基本稳定, 测试结果如图 4 所示。

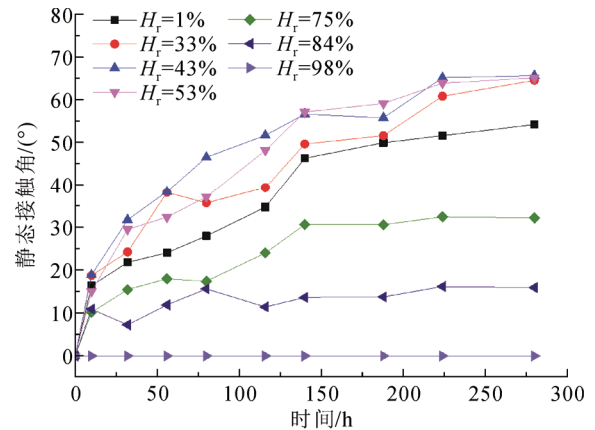
对比两种涂层的憎水迁移性发现, RTV 涂层的憎水性迁移速度比 LSR 涂层更快, 除了相对湿度为 75%、84% 和 98% 的三组, 其他相对湿度下 RTV 涂层中的水分经过 48 h 的迁移, 涂层憎水性基本都达到饱和。而 LSR 涂层迁移过程缓慢, 经过超过 200 h 才能迁移达到饱和。对比两种涂层的饱和和静态接触角随相对湿度的变化 (图 4) 发现, 在相对湿度小于 58% 的环境中, RTV 饱和静态接触角约为  $90^\circ$ , 而 LSR 涂层的饱和静态接触角约为  $60^\circ$ 。在高湿环境下, 两种涂层的饱和和静态接触角随湿度增加迅速下降, 静态接触角的差别逐渐缩小, 如图 5 所示。

### 3.2 涂层耐污性能对比

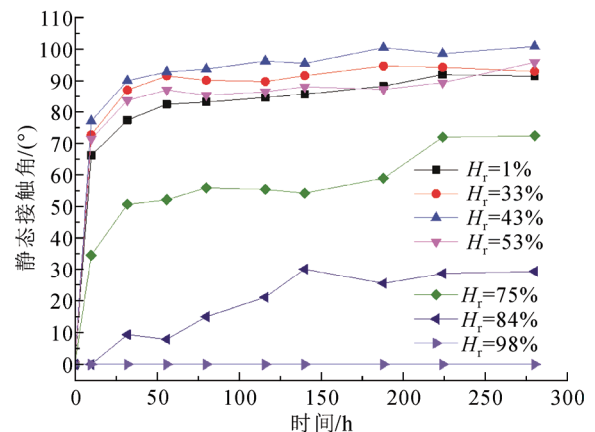
研究表明, 涂覆硅橡胶涂层后, 绝缘子的表面电阻和污闪电压具有正相关关系<sup>[18]</sup>, 因此绝缘子的泄漏电流在对硅橡胶涂层防污闪性能的表现上具有重要的参考意义<sup>[19]</sup>。通过观测泄漏电流也可以在恒定的电压下对染污绝缘子的状态进行长时间的在线监测, 表征其耐污性能, 因此本文用染污绝缘子受潮之后的泄漏电流来分析其耐污性能。

将无涂层和涂覆了两种涂层的绝缘子样品均匀刷涂盐密为  $0.1 \text{ mg/cm}^2$  的 NaCl 和灰密为  $1.0 \text{ mg/cm}^2$  的高岭土之后, 放置于开放环境中迁移了 96 h 后进行试验。将干燥绝缘子放入雾室中, 在绝缘子钢脚处加  $10.8 \text{ kV}$  的电压, 然后采集泄漏电流, 用软件分别记录每分钟内泄漏电流的最大值, 测试时间为 1 h, 得到泄漏电流的变化如图 6 所示。

结果表明, 在 1 h 的受潮时间内, 随着绝缘子受潮时间增加, 泄漏电流会先增大, 然后略有减小, 最后进入稳定状态, 泄漏电流不会再有剧烈变化。稳定状态下, LSR 的每分钟最大泄漏电流在  $8\sim 20 \text{ mA}$  间, RTV 的每分钟最大泄漏电流为  $5 \text{ mA}$  左右, 无涂层玻璃绝缘子的每分钟最大泄漏电流在  $200\sim 400 \text{ mA}$  之间, 并伴有强烈的放电。涂覆 LSR 和 RTV 涂层能够有效减小绝缘子受潮后的泄漏电流, 两者



(a) LSR涂层在不同湿度环境中的憎水迁移性对比



(b) RTV涂层在不同湿度环境中的憎水迁移性对比

图4 LSR和RTV涂层在不同湿度中的憎水迁移性

Fig.4 Hydrophobicity transfer properties of LSR and RTV coating under different relative humidity

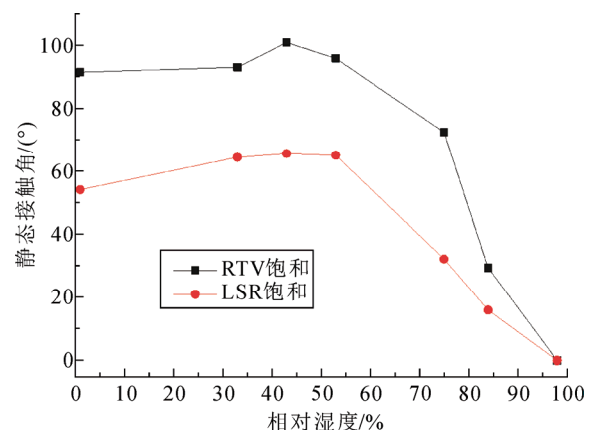


图5 LSR和RTV涂层的饱和静态接触角

Fig.5 Saturate static contact angle of LSR and RTV coating

相比 RTV 的抑制效果比 LSR 更好。在染污及受潮状态下, 憎水性的涂层能够抑制成片水膜的形成, 进而能够更好地抑制污秽引起的绝缘子表面放电, 提高绝缘子耐污效果, 起到一定的防污闪作用。

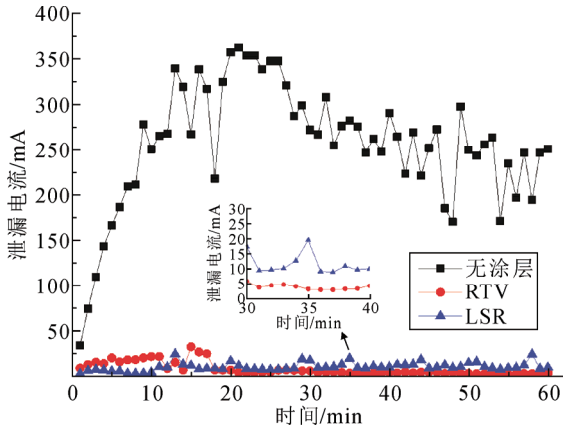


图 6 受潮时绝缘子的泄漏电流

Fig.6 Leakage current of insulator samples in wet condition

### 3.3 涂层吸水和吸湿特性对比

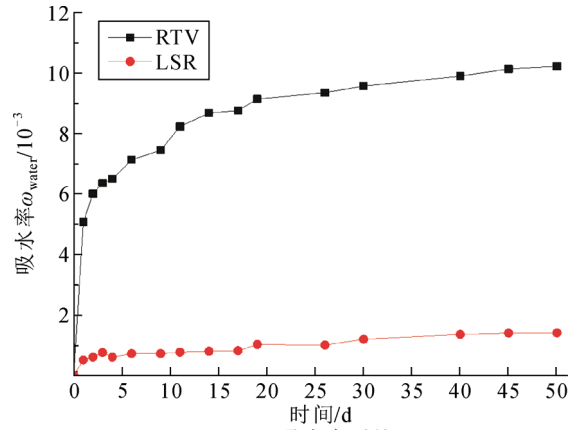
硅橡胶在湿污环境中运行时, 会吸收表面的水溶液和空气中的水蒸气(湿气) [6], 硅橡胶吸收了水、水溶液和湿气之后体积电阻率、介电常数等电气性能都会劣化。因此在湿污环境中运行的涂层需要重视水和湿气对于涂层性能的影响, 而吸水和吸湿率的研究是至关重要的。

将直径为 30 mm, 厚度为 2 mm 的新制涂层试片烘干之后分别浸泡在去离子水和相对湿度为 33%、53%、75%和 98%的环境中, 测量试片吸水率  $\omega_{\text{water}}$  和吸湿率  $\omega_{\text{moisture}}$  随时间的变化。当测量 5 d 内  $\omega_{\text{water}}$  和  $\omega_{\text{moisture}}$  的变化  $< 1 \times 10^{-4}$  认为吸水和吸湿基本达到饱和, 涂层吸水率随时间的变化和饱和吸湿率随湿度的变化分别如图 7(a)和 7(b)所示。

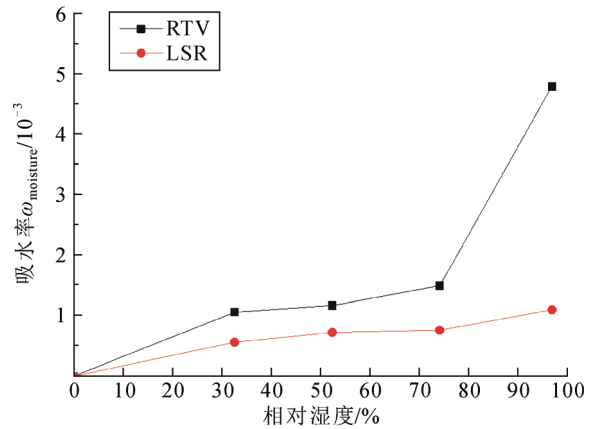
对比发现, RTV 涂层吸水约 50 d 达到饱和, 饱和吸水率为  $0.0102$ , 而 LSR 涂层吸水约 40 d 达到饱和, 饱和吸水率为  $1.4 \times 10^{-3}$ , LSR 涂层的吸水率和吸水速率都低于 RTV 涂层。对比在不同湿度环境下的饱和吸湿率发现, LSR 涂层的饱和吸湿率也低于 RTV 涂层, 且饱和吸湿率的差异随着湿度的增加而增加。

为了解释吸水和吸湿率的差异, 用压汞法分别对两种硅橡胶涂层的孔径分布和孔隙率进行了测量, 测试的压力范围为 13.1~61 000.00 psia。测得新制的 LSR 涂层孔隙率为 12.1%, 新制的 RTV 涂层孔隙率为 11.1%, 孔径分布如图 8 所示, 纵轴表示单位质量样品中直径为  $D$  的孔洞的总体积。

LSR 涂层的孔隙率高于 RTV 涂层, 说明两种涂层的吸水率和吸湿率差异主要决定因素不是孔隙数目, 而是涂层的配方差异。



(a) 吸水率对比



(b) 饱和吸湿率对比

图 7 LSR 和 RTV 涂层吸水、吸湿率

Fig.7 Water and moisture absorptivity of LSR and RTV coating

### 3.4 涂层透水特性对比

硅橡胶涂层依靠偶联剂实现与瓷、玻璃等无机材料的粘接, 水透过硅橡胶涂层之后会导致涂层附着效果下降, 进而引起起皮和脱落。在湿污环境中, 水在硅橡胶中渗透时也会将酸、碱和盐带入涂层和绝缘子的交界面, 加速涂层附着效果的劣化。

用 2.2 节中的测量装置和式(2), 以涂层中透过水的质量反映涂层的透水能力, 得到 2 mm 厚涂层的透水质量  $\Delta m_{\text{water}}$  随时间变化情况, 如图 9 所示。拟合曲线的相关性  $R^2$  均大于 0.99, 拟合度较好。

在涂层两侧水压恒定的情况下, 涂层透水的质量与时间呈线性关系, 即透水的速率保持恒定。硅橡胶透水的速率和涂层厚度相关 [6], 绝缘子涂层的厚度一般在 0.3~0.5 mm, 由于该厚度下的涂层试片难以开展试验, 故采用厚度为 1~3 mm 的涂层试片进行涂层透水速率与厚度关系的研究。对厚度为 1~3 mm 的涂层进行透水质量的测量, 并根据式(3)计算透水速率  $\theta$ , 并对  $\theta$  进行拟合得到透水速率随厚

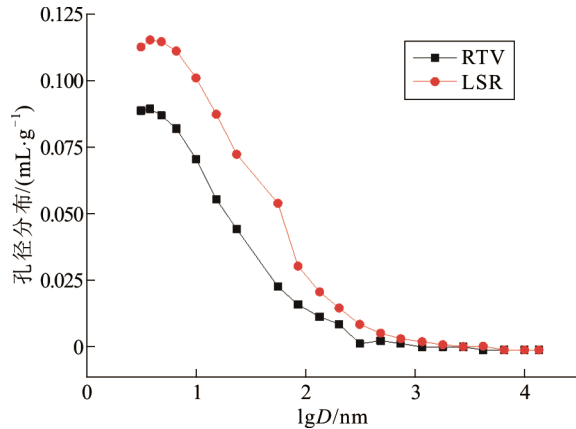


图8 LSR 和 RTV 涂层的孔径分布

Fig.8 Pore size distribution of LSR and RTV coating

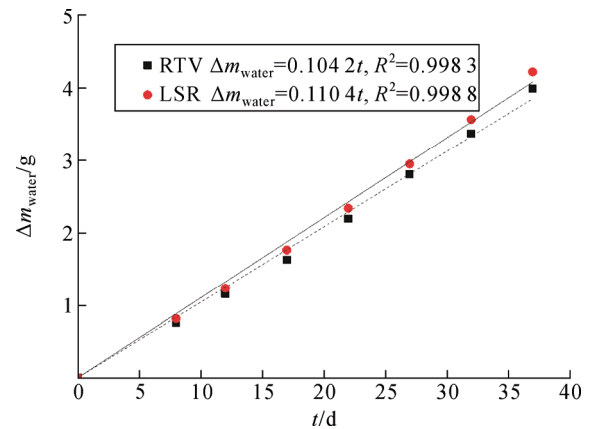


图9 厚度 2 mm 的 LSR 和 RTV 涂层透水速率

Fig.9 Water permeation rate of 2 mm LSR and RTV coating

度的变化, 如图 10 所示。

拟合得到涂层透水速率与厚度为反比例关系, 当涂层厚度小于 3 mm 时, LSR 涂层的透水速率大于 RTV 涂层, 随着厚度的增加, 两种涂层之间透水速率的差异减小。由于绝缘子涂层一般为 0.3~0.5 mm, 所以在绝缘子上, 涂覆成型的 LSR 涂层的透水速率会略大于 RTV 涂层。根据 3.3 节中压汞法的测量结果, LSR 涂层的孔隙率略大于 RTV 涂层, 因此是由孔隙率的差异导致 LSR 涂层透水速率略高于 RTV 涂层。

### 3.5 涂层长效附着力对比

涂层附着力是涂层能否紧密粘接在绝缘子表面的指标, 现行标准 DL/T 627—2012 中对涂层的附着力要求是划圈法不小于 2 级, 剪切强度法检测 RTV-I 型不小于 0.8 MPa, RTV-II 型不小于 3.0 MPa<sup>[2]</sup>, 但是满足该条件的涂层在高湿、多雨环境中运行依然存在问题。从时效性考虑, 标准中所提的附着力是固化后的附着力, 没有考虑到在运行环境中附着力的下降问题, 因此对于新制的涂层需要以更加严酷的试验方法对涂层的粘接进行考验。

参考 IEEE 1523—2002 中推荐的水煮法<sup>[20]</sup>, 本文采用恒温水煮的方法加速破坏玻璃试片上涂层的粘接, 并用划圈法对附着力进行判定<sup>[12]</sup>, 以此来对比涂层的长效附着力。

设定恒温水浴锅的温度分别为 50 °C 和 70 °C, 用高于运行环境的温度来加速水在涂层中的渗透和偶联剂的失效, 以模拟湿污环境中涂层长时间运行后的附着力破坏现象。在两种温度的条件下, 附着力变化的情况如图 11 所示。

两种涂层之间附着力的差异明显。在 50 °C 和

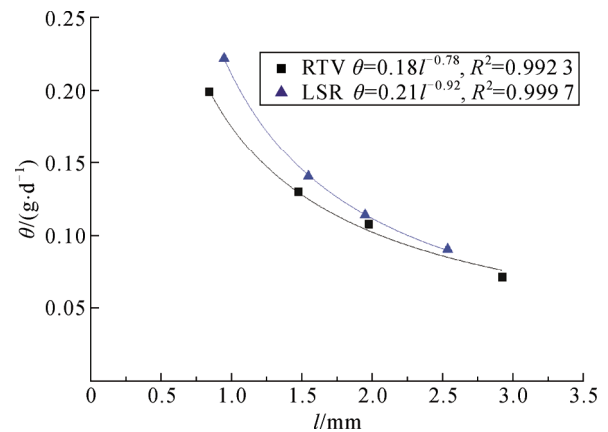


图 10 涂层的透水速率与厚度的拟合结果

Fig.10 Fitting Result of water permeation rate and coating thickness

70 °C 两种水温中, 经过 24 h 的水煮, RTV 涂层在不同温度下附着力都已经达到 6 级或 7 级, 可以基本认为丧失附着力。而经过相同的 24 h 水煮, LSR 附着力保持良好, 甚至经过 6 d 的水煮, LSR 附着力仍保持 2 级。可见在相同的湿污环境中运行, LSR 涂层良好的附着力有助其更长效的运行。

## 4 分析与讨论

根据小分子 (low molecular weight, LMW) 迁移理论<sup>[21-22]</sup>, 硅橡胶材料有存在未交联的小分子硅氧烷, 这种游离态的小分子迁移能力强, 容易迁移到涂层表面并附着在污秽上, 污秽会获得憎水性。涂层的憎水迁移性与涂层交联体系中 LMW 的含量相关<sup>[23]</sup>。由于 RTV 交联度低, 涂层内存在大量游离态 LMW, 因此 RTV 涂层的憎水迁移性比较好; 而 LSR 涂层经过高温固化后, 交联度高, 体系中游

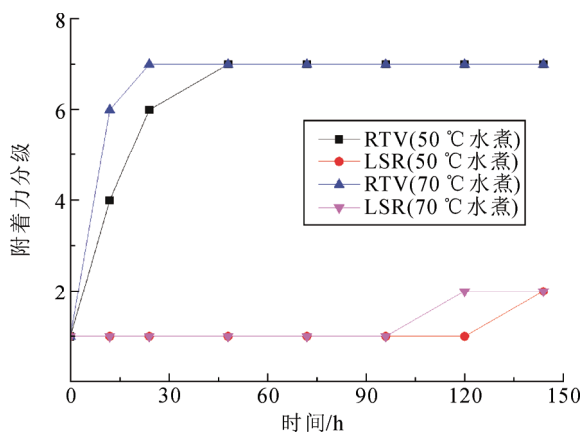


图 11 LSR 和 RTV 涂层的附着力

Fig.11 Adhesive force of LSR and RTV coating

离态 LMW 少, 因此憎水迁移性弱于 RTV 涂层。

对比 LSR 和 RTV 主要成分的差异, 除了使用的硅氧烷不同之外, RTV 中还含有比较多的 ATH 填料, 用于提高耐漏电起痕性能。ATH 在经过表面改性处理时, 呈现强亲水性, 表面容易吸附水或湿气<sup>[6]</sup>。因此, RTV 涂层中使用的亲水性填料导致其吸水率和吸湿率明显高于 LSR, 亲水性填料对于涂层吸水及吸湿率的影响大于两种涂层孔隙率差别的影响。

水煮试验利用高温水加速对界面附着力的破坏, 以验证涂层粘接效果, IEEE 1523-2002 中使用此方法测试 RTV 的附着性<sup>[20]</sup>, 在复合绝缘子界面粘接效果的考核中也推荐了类似的方法<sup>[24]</sup>。LSR 涂层和 RTV 涂层使用的分别是针对加成型硅橡胶和缩合型硅橡胶的两种硅烷偶联剂, LSR 涂层所使用的硅烷偶联剂水解速率更慢, 所以在高湿度的环境中, LSR 涂层能够保持更长时间的附着效果。

目前在行业标准 DL/T 627—2012 中对于涂层附着力的要求针对的是新制涂层<sup>[2]</sup>, 但是在湿污环境中运行涂层除了考虑固化之后的附着性外, 还需要考虑长期运行后涂层吸水、吸湿和在有雨水附着时的透水性, 以研究涂层运行之后性能的变化以及水所引起的偶联剂粘接效果下降的问题, 即涂层的长效附着性。因此, 在高湿环境及湿污环境中运行的涂层, 需要考虑将涂层吸水率、吸湿率、透水速率及其长效附着性作为涂层在该环境中适应性的评价指标。

通过对 LSR 涂层性能的研究, 本文认为同样满足 DL/T 627—2012 对 RTV 的标准要求下<sup>[2]</sup>, LSR 涂层在湿污环境中, 由于较低的吸水、吸湿率和较

好的长效附着性, 有利于其保持更稳定的电气性能和更长的运行时间, 可在湿污环境中尝试使用 LSR 涂层作为 RTV 涂层的替代选择。

## 5 结论

1) LSR 涂层和 RTV 涂层都具有憎水迁移性, 由于 LSR 交联度高, 其憎水迁移性比 RTV 涂层弱, 但在饱和和受潮条件下, LSR 涂层也能有效减小表面的泄漏电流。

2) 虽然两种涂层孔隙率和孔径分布接近, 但是 RTV 中亲水性填料增加了涂层的吸湿和吸水能力, 使得在不同的湿度及水浸泡的环境中, LSR 涂层饱和吸湿率和吸水率明显低于 RTV 涂层。

3) 在相同的压力环境下, LSR 涂层的透水速率略高于 RTV 涂层, 且透水速率与涂层厚度呈反比例函数关系。

4) 采用恒温水煮法对比涂层长效附着性, LSR 涂层长效附着性比 RTV 涂层更好, 能在湿污环境中保持更长时间的附着效果, 可以尝试在湿污环境中使用该涂层。

## 参考文献 References

- [1] 宿志一, 李庆峰. 我国电网防污闪措施的回顾和总结[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 124-130.  
SU Zhiyi, LI Qingfeng. Historical review and summary on measures against pollution flashover occurred in power grids in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 124-130.
- [2] 绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料: DL/T 627—2012[S], 2012. Room temperature vulcanized silicon rubber anti-pollution coating for insulators: DL/T 627—2012[S], 2012.
- [3] 贾志东, 李 桐, 陈 灿, 等. 广东地区室温硫化硅橡胶防污闪涂料的运行特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1963-1969.  
JIA Zhidong, LI Tong, CHEN Can, et al. Operation characteristics of RTV antipollution flashover coatings in Guangdong region[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1963-1969.
- [4] 陆 海. 干、湿气候下 RTV 的劣化特性及修复技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.  
LU Hai. The aging characteristic study on RTV in dry/wet climate and the research of repaired techniques of RTV coated insulators[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2014.
- [5] 方茂欢. 防污闪涂料受水影响特性及失效原因研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
FANG Maohuan. Study on properties influenced by water and failure cause of RTV coating[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2016.
- [6] 王 仲. 复合绝缘子硅橡胶吸水性和透水性及其影响机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
WANG Zhong. Researches on water absorptivity and permeability of composite insulator silicone rubber and its influence mechanisms[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [7] 贾志东, 陆 海, 胡亚荣, 等. 高湿气候下 RTV 防污闪涂料的运

- 行特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2291-2297.
- JIA Zhidong, LU Hai, HU Yarong, et al. Analysis of operating performance of RTV coating used in areas with humid climate[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2291-2297.
- [8] 张星海, 李亚伟, 白欢, 等. 四川部分变电站涂覆 RTV 绝缘子的自然积污成分及其对闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2922-2928.
- ZHANG Xinghai, LI Yawei, BAI Huan, et al. Natural pollution component for RTV-coated insulator in some substation of Sichuan province and its effect on flashover characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2922-2928.
- [9] 黄文润. 液体硅橡胶[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2009: 279-285.
- HUANG Wenrun. Liquid silicone rubber[M]. Chengdu, China: Sichuan Science and Technology Press, 2009: 279-285.
- [10] 贾志东, 曾智阳, 陈灿, 等. 特殊污秽条件下复合绝缘材料的性能[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 885-892.
- JIA Zhidong, ZENG Zhiyang, CHEN Can, et al. Properties of composite insulating materials under special contamination[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 885-892.
- [11] 张利萍, 杨化彪, 杨思广, 等. 加成型硅橡胶耐漏电起痕性能的影响因素探讨[J]. 化工新型材料, 2014, 42(6): 112-115.
- ZHANG Liping, YANG Huabiao, YANG Siguang, et al. Investigation of the influence factors on current leakage tracking resistance of addition type silicone rubber[J]. New Chemical Materials, 2014, 42(6): 112-115.
- [12] 漆膜附着力学测定法: GB/T 1720—1979[S], 1979.
- Method of test for adhesion of paint films: GB/T 1720—1979[S], 1979.
- [13] 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度第 1 部分: 压汞法: GB/T 21650.1—2008[S], 2008.
- Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption-part 1: mercury porosimetry: GB/T 21650.1—2008[S], 2008.
- [14] JIA Zhidong, GAO Haifeng, GUAN Zhicheng, et al. Study on hydrophobicity transfer of RTV coatings based on a modification of absorption and cohesion theory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(6): 1317-1324.
- [15] 贾志东, 杨朝翔, 王希林, 等. 基于憎水迁移性测试的复合绝缘子老化特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1907-1914.
- JIA Zhidong, YANG Zhaoxiang, WANG Xilin, et al. Aging characteristics of composite insulators based on hydrophobicity transfer test[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1907-1914.
- [16] 关志成, 牛康, 王黎明, 等. 环境湿度对硅橡胶材料憎水迁移性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 2030-2036.
- GUAN Zhicheng, NIU Kang, WANG Liming, et al. Influence of ambient humidity on hydrophobicity transfer of silicone rubber material[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 2030-2036.
- [17] 戴罕奇, 梅红伟, 王希林, 等. HTV 硅橡胶用不同高岭土污染后的憎水迁移性对比[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1030-1037.
- DAI Hanqi, MEI Hongwei, WANG Xilin, et al. Hydrophobicity transfer feature comparison for HTV silicone rubber polluted by different kaolin[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1030-1037.
- [18] YAMADA K, HAYASHI A, SAKA C, et al. Improvement of contamination flashover voltage performance of cylindrical porcelain insulators[C]//IEEE Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, Canada: IEEE, 2008:69-72.
- [19] 黄道春, 熊紫腾, 阮江军, 等. 污秽中  $\text{CaSO}_4$  质量分数对瓷绝缘子串泄漏电流特性的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1644-1650.
- HUANG Daochun, XIONG Ziteng, RUAN Jiangjun, et al. Influence of  $\text{CaSO}_4$  mass fraction in contamination on the leakage current characteristics of porcelain insulator string[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5): 1644-1650.
- [20] Guide for the application, maintenance, and evaluation of room temperature vulcanizing(RTV) Silicone Rubber Coatings for Outdoor Ceramic Insulators: IEEE 1523-2002[S], 2002.
- [21] 高海峰. 硅橡胶憎水迁移机理及其表面染污放电的研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- GAO Haifeng. Hydrophobicity transfer mechanism of silicone rubber and discharges along its hydrophobic polluted surface[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2007.
- [22] HOMMA H, KUROYAGI T, IZUMI K, et al. Diffusion of low molecular weight siloxane from bulk to surface[J] IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(3): 370-375.
- [23] 鲁志伟, 杨秀媛. 硅橡胶憎水迁移机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 51-55, 73.
- LU Zhiwei, YANG Xiuyuan. A study on hydrophobicity transfer of silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 51-55, 73.
- [24]  $\pm 500$  kV 及以上电压等级直流棒形悬式复合绝缘子技术条件: DL/T 810—2012[S], 2012.
- Technical specification for long rod composite insulators with a nominal voltage of  $\pm 500$  kV DC and above: DL/T 810—2012[S], 2012.



JIA Zhidong

Ph.D., Professor

Corresponding author

贾志东(通信作者)

1966—, 男, 教授, 博导

主要从事高电压外绝缘及电工新技术等方面的研究, 包括外绝缘防污闪技术、绝缘子覆冰问题、大型电机主绝缘老化等

E-mail: jiazd@sz.tsinghua.edu.cn



YIE Wei'an

叶蔚安

1991—, 男, 硕士

主要从事高电压外绝缘防污闪技术的研究

E-mail: vinceyeweian@163.com

收稿日期 2018-01-05 修回日期 2018-08-10

编辑 曹昭君 余洋洋