

RTV 硅橡胶防污闪涂层运行情况分析

白 欢¹, 陈洪波¹, 李亚伟¹, 陶云峰², 张先银², 张向伟², 葛 宝², 李红梅²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610000;

2. 成都拓利化工实业有限公司, 成都 610100)

摘要: 综述了近几年国内室温硫化 (RTV) 硅橡胶防污闪涂层在电网中的运行情况, 介绍了 RTV 硅橡胶防污闪涂层的憎水性, 运行中 RTV 硅橡胶防污闪涂层失效的判断依据, 以及失效后如何复涂等。针对四川省地理环境的特殊性, 初步探讨了四川省 RTV 硅橡胶防污闪涂层的运行情况。

关键词: RTV 硅橡胶涂料, 憎水性, 失效, 复涂

中图分类号: TQ333.93 **文献标识码:** A doi:10.11941/j.issn.1009-4369.2015.02.009

作为用于电力系统的主要防污闪措施, 室温硫化 (RTV) 硅橡胶涂料是以 RTV 硅橡胶为基础原料并添加特殊功能助剂和填料的一种新型涂料。其最大优点就是在保证良好的电性能和满足长期户外耐候性的基础上, 还具有独特的憎水性和憎水迁移性, 当涂层表面积污后在自身的作用下使得污秽涂层表面又具有良好的憎水性。这就会导致在雾、露、细雨等气候条件下, 污层表面不会形成连续的水膜, 从而可以有效抑制泄漏电流和局部电弧的产生, 提高绝缘子的防污闪电压, 保证电力系统在此类气候条件下的安全运行。

国外早在 30 多年前就开始对 RTV 硅橡胶涂料进行研究, 美国于 1973 年开始对 RTV 硅橡胶涂料进行挂网试验, 当其在严重污秽条件下运行 12 年后涂层仍保持比较好的憎水性。国内清华大学最早在 20 世纪 80 年代中期开始对 RTV 硅橡胶涂料进行研制, 并于 1986 年在天津电力局挂网运行, 其对绝缘子耐污闪的能力有显著的提升。1990 年河南省和天津开始大范围推广试用, 四川省最近几年也开始大面积使用 RTV 硅橡胶涂料。

虽然初期在电力系统应用 RTV 硅橡胶涂料取得了显著的效果, 成为一种行之有效的预防污闪事故发生的措施; 但是, RTV 硅橡胶涂料毕竟属于有机材料, 在自然条件下运行一段时间后会老化, 再加上自然环境的污染日益严重, 这就对 RTV 硅橡胶涂层提出了新的要求。如何判断评估其已经失效, 失效后又如何进行复涂等等,

只有解决了这些问题才会使 RTV 硅橡胶涂层长期使用, 以确保电力系统的安全运行。因此, 需要进一步对 RTV 硅橡胶涂层的憎水迁移机理、失效判断的可量化标准以及失效后如何清理再复涂进行全面系统的研究。

1 RTV 硅橡胶涂层的憎水性

RTV 硅橡胶涂料以硅橡胶为基础, 而有机硅是除氟碳聚合物之外表面张力最小的物质。根据界面化学理论可知, 与水表面张力差值越大的物质憎水性越好, 因此 RTV 硅橡胶涂料具有优良的憎水性^[1]。在有机硅侧链上的甲基基团和大量的游离态有机硅低聚物对硅橡胶表面水分子的吸引力小于水分子自身的内聚力, 因此水分子在其表面成为分离的小水珠, 容易从其表面滚落而不至于形成水膜。其更关键的特性是憎水迁移性, 如果只具备憎水性而没有憎水迁移性, 在自然环境条件下运行, 尤其是污染严重的地区其涂层很快被尘埃覆盖而丧失憎水性。只有憎水迁移特性才能保证 RTV 硅橡胶涂层在自然条件下长期安全运行。

目前, 国内外关于 RTV 硅橡胶涂料憎水迁移理论普遍认同小分子扩散理论^[2-3], 该理论认

收稿日期: 2014-07-09。

作者简介: 白欢 (1986—), 男, 工程师, 主要从事电力系统外绝缘的研究。电话: 13880146116。

为, RTV 硅橡胶涂料中含有短分子链有机硅, 当涂层被尘埃或灰尘沾污时, 由于小分子物质自由灵活, 易从 RTV 硅橡胶涂层中扩散到表面, 并与涂层表面的污秽物接触而进一步扩散到污秽物表面, 从而使得污秽层也具有较好的憎水性。鲁志伟等人采用二氯甲烷溶剂分别提取 RTV 硅橡胶涂层中的小分子物质和人工污秽层中的小分子物质进行对比检测发现: 两者中的小分子物质分布相近, 充分说明小分子物质进入污秽层而产生新的憎水性^[4]。在没有阳光照射的涂层表面, 其憎水性比受辐射的硅橡胶表面有所降低, 这是由于紫外线的辐射引发产生了 PDMS 低聚物^[5-6]。

但是, 也有实验证明, 增加 RTV 硅橡胶涂料中的小分子物质, 涂层表面的憎水性迁移速度并没有增加, 而减小 RTV 硅橡胶涂料中小分子物质的浓度, 涂层的憎水迁移速度也并未减弱。同时, 如果仅仅是 RTV 硅橡胶涂料中小分子物质起到憎水迁移性的作用, 那么绝缘子表面只是喷涂少量 RTV 硅橡胶涂料, 其使用年限理论上会大大缩短; 但是从实际运行的情况来看, 运行 5 年以上的 RTV 硅橡胶涂层仍然具有良好的憎水性^[7]。因此, 也有人认为 RTV 硅橡胶涂料的憎水性是硅橡胶材料自身具有的特性而与分子的大小没有直接的关系。RTV 硅橡胶涂料分子间的相互作用力小, 侧链憎水基团又导致空间位阻效应, 导致其表面张力低和憎水的特性。硅橡胶材料的玻璃转变温度 (T_g) 约为 -170°C , 室温下处于高弹态, 再加上 Si—O 键键角大、易旋转, 分子链非常柔软, 使得 RTV 硅橡胶涂料整个体系处于剧烈的分子热运动中。分子向界面扩散时受到的反抗力小, 容易向外层扩散进入污秽层, 从而污秽层也具有憎水性^[8]。鉴于以上理论, 污秽层的憎水性就会与涂层表面污秽物的量有很大的关系, 因此当污秽物的量达到某种程度是必须进行清洗后才会保证电网的安全运行。

2 RTV 硅橡胶涂层的失效判断

RTV 硅橡胶涂料属于有机硅橡胶材料, 长期在户外电网暴露使用, RTV 硅橡胶涂层会受

到环境的温湿度、风雨洗刷、紫外线照射、放电烧蚀及酸碱腐蚀等作用; 同时, 随着现代工业的快速发展, 环境污染日益加重还会受到环境污秽区等级、污秽物种类等的影响; 因此, RTV 硅橡胶涂层必然会产生老化和憎水性能下降甚至失去憎水性的问题。当 RTV 硅橡胶涂层性能下降到一定程度后引起污闪的可能性将大大增加, 在潮湿或雨雾等恶劣条件下, 由于憎水性的降低导致污秽物中的电解质在电产中发生电离而产生漏电电流, 严重时导致电弧击穿外绝缘材料发生严重事故。为了保证电网的安全运行, 必须对 RTV 硅橡胶涂层老化进行检测和判断, 这也是目前各电网非常关心的问题^[9-10]。

RTV 硅橡胶涂料的憎水性和憎水迁移性是其防污闪能力的重要技术指标, 直接关系到 RTV 硅橡胶涂层的防污闪性能。憎水迁移越快, RTV 硅橡胶涂层的老化速度也越快^[4,11]。同时, RTV 硅橡胶涂层的外观质量、涂层附着力、积污程度也是判断 RTV 硅橡胶涂层是否可以继续运行的依据。我国绝大多数地区的污秽物主要成分为硫酸钙和硅酸盐, 沿海地区主要污秽物为氯化钠^[12-13]。当 RTV 硅橡胶涂层积污严重, 甚至出现板结时其憎水性会大大降低。

判断涂层是否失效最直接有效的方法是对涂覆的绝缘子做污闪试验, 但是在电网实际运行中此法复杂且可行性很差。鉴于大量的研究结果并从实际操作可行性的角度出发, 目前多数凭借经验来进行判断。首先, 观察 RTV 硅橡胶涂层是否存在起皮、鼓泡、龟裂、脱落、损坏等现象, 若有以上几种现象说明涂料已严重老化, 应立即安排重新复涂; 其次, 采用喷水等级法测试绝缘子上下表面的憎水性等级, 如果涂层的上表面憎水性达不到 HC4 级, 应考虑重新喷涂 RTV 硅橡胶涂料; 再者, 根据电网所在环境的污染程度而定, 如果为重污秽区则要根据积物的程度看是否需要进行清扫或进行重新喷涂^[14]。

3 RTV 硅橡胶涂层的清洗及复涂

当 RTV 硅橡胶涂层在挂网运行一定时期后表面会积污, 积污对涂层的安全运行有多大的影

响,要根据积污的程度和所处的污区等级进行判断。如果在二级或以上的污秽地区且涂层的积污程度不严重,可以继续运行,不需要对绝缘子进行清洗,更不需要重新复涂。如果在三级污秽地区积污程度不是很严重,则考虑进行清洗绝缘子,而不直接进行复涂。如果在四级及以上的污秽地区,积污达到一定程度就要考虑复涂 RTV 硅橡胶涂料。

目前,复涂有两种方法,其一是将原有涂层表面的污秽物清洗掉后直接在其上面涂覆新的 RTV 硅橡胶涂层。这种方法复涂后至今没有发现什么问题,但是有学者开始研究涂覆新涂层与旧涂层之间的界面问题,两者之间是否会产生脱层等。其二就是将旧涂层完全清除掉后再重新涂覆一层新的 RTV 硅橡胶涂层。

RTV 硅橡胶涂层清洗可以采用高压水枪、蒸汽冲洗^[15-17]或者人工用蘸有溶剂的抹布进行擦拭。高压水冲洗是一种简单有效的方法,但是压力较低使被冲洗污秽物很难清洗干净,压力过高可能会导致 RTV 硅橡胶涂层被破坏,因此需要根据积污程度选取合适的压力进行冲洗绝缘子表面。常用的溶剂多数为酒精或者汽油,但是擦拭后在潮湿的环境下恢复憎水性的时间会大大延长。而选用常见的酸碱清洗,其腐蚀性又太强,日常家庭用洗涤剂除污秽能力差且容易产生泡沫,因此均不适用于现场 RTV 硅橡胶涂层绝缘子的清洗。非极性物质能够完全润湿绝缘子表面的污秽物,其表面活性剂中的 C—H 键会与污秽物发生吸附作用,可是表面活性剂要想对污秽物充分起到润湿和铺展效应还必须借助其它助剂来完成。刘凯等人开发了一款新型的绝缘子 RTV 硅橡胶涂层表面污秽物清洗剂,可以有效去除 RTV 硅橡胶涂层表面的污秽物质,同时可以快速恢复涂层的憎水性和憎水迁移特性^[18]。该清洗剂主要由表面活性剂、渗透剂、有机羧酸盐等成分组成,使用时按一定比例稀释后,直接喷淋在绝缘子涂层表面,十多分钟后再用抹布轻轻擦拭即可去除原有的 RTV 硅橡胶涂层,再用清水冲洗干净即可。该清洗剂主要由表面活性剂组成,主要通过渗透、配合、分散、膨胀等机理的

综合作用以清除绝缘子表面 RTV 硅橡胶涂层的污秽,表面活性剂可降低清洗剂的表面张力,增强清洗剂对污秽物的润湿性能,有机羧酸盐具有强大的配位基团,可配合溶解绝缘子污秽中的钙、镁、铁等金属离子。渗透剂有助于清洗剂深入污秽内部,促进有机羧酸盐对污秽的配合溶解,提高清洗效果。王永强等人也开发了一款 RTV 硅橡胶涂层清洗剂,利用润湿和乳化双重作用,从而降低了污秽物的附着力,导致其可以清洗掉硅橡胶表面的污秽物,又因其配方中含有的非极性含氟基团和极性的硅羟基基团,使得清洗过后还能在硅橡胶表面保留一层纳米憎水性膜,达到提升绝缘子表面憎水性的效果,维持整体绝缘水平的功效^[19]。这类具有清洗和维持保护双重作用的清洗剂应是今后领域重点研究的方向。

如果 RTV 硅橡胶涂层老化或者破损严重,则必须进行清理后再重新复涂,化学清除法通常有两种,一是基于溶胀剥离的原理,利用 RTV 硅橡胶材料与绝缘子表面的粘合力远小于硅橡胶材料间的化学键的作用力,用一些清除剂渗透进 RTV 硅橡胶涂层当中,使其发生一定程度溶胀,降低硅橡胶与绝缘子表面的粘合力从而使其剥离。二是利用化学溶解的原理,利用一些特效清洗剂将 RTV 硅橡胶涂层溶解从而使其从绝缘子表面去除。将溶胀或溶解的 RTV 硅橡胶涂层用抹布进行擦洗干净即可涂覆新的 RTV 硅橡胶涂层。

4 四川省 RTV 硅橡胶涂层的运行情况

近几年四川省也开始在电网大面积使用 RTV 硅橡胶涂料,由于四川省地理环境的特殊性,大多数为高山丘陵地区,夜间容易起雾且持续时间长,雨量充沛且很多时候为绵绵细雨,再加上全年风速不大,绝缘子本身的自洁能力相对而言较小,且在绝缘子表面容易生长一些藻类。鉴于以上的特殊性,四川省 RTV 硅橡胶涂层的憎水性和憎水迁移性丧失的速度可能比其它地区要快。因此,随着使用时间的增加 RTV 硅橡胶涂层是否可以继续使用,如何判断其失效,何时进行复涂等影响电网安全运行提出了新的要求。我们调研了四川省几家变电站的情况,结果见表 1。

表1 四川省几家变电站绝缘子表面 RTV 硅橡胶涂层的运行情况

序号	站名	运行时间/年	涂层表面积污情况	地形结构
1	雅安草坝 220 kV 变电站	5	有一定的积污、藻类生长严重	小盆地中央
2	广安代市 220 kV 变电站	8	积污较严重、有藻类生长	靠山
3	德阳 ±500 kV 换流站	4	积污较轻、藻类少有生长	平地
4	500 kV 雅安变电站	3	积污较轻、藻类生长较严重	靠山
5	南充营山 110 kV 变电站	8	积污较严重、藻类生长较严重	小盆地中央

由表1可见，四川省地处盆地，常年多雨，依靠自然条件清除绝缘子表面尘埃的能力较弱，再加上现代工业发展带来的环境污染，以及容易生长藻类。因此，四川省应按照污区分布、环境污染情况对现运行的 RTV 硅橡胶涂层进行归类划分。首先要统计各电站 RTV 硅橡胶涂层表面的憎水性状况，由于上下表面经受的环境侵蚀和积污程度不一样，上表面更容易老化失去憎水性，所以要以上表面的憎水等级作为判断的依据，如果积污较轻憎水等级低于 HC4 级时考虑清洗绝缘子涂层表面，如果积污严重憎水等级低于 HC3 级就应该考虑清洗。复涂则根据运行年限及所处的污区等级考虑重新喷涂 RTV 硅橡胶涂料。其次，涂料自身的质量差异、施工质量差异、不明原因的损害等因素也是影响 RTV 硅橡胶涂层使用寿命的一个重要原因，因此，对外绝缘材料上 RTV 硅橡胶涂层的附着力、涂层表面是否龟裂、起皮等也可以作为涂料失效的一个重要判据。

5 结束语

根据 RTV 硅橡胶涂料的防污闪机理可知，由于 RTV 硅橡胶涂层本身具有户外长期耐候性、优异的电性能、良好的憎水性、迁移性及丧失恢复性等诸多其它高分子材料所不具备的综合特性，在潮湿或者雨雾恶劣气候时，使电力系统的外绝缘材料在日益增加的高污秽环境下的绝缘性不降低，增加了安全运行的可靠性。但通过实际调研发现；凡是外绝缘上的 RTV 硅橡胶涂层外观呈现龟裂起皮，憎水性、憎水迁移性发生较大改变时，均会导致电网系统的防污闪事故发生，因此，上述的指标应当可以作为判断 RTV 硅橡

胶涂层是否可以继续运行或需要进行复涂的主要判断依据。

绝缘子涂层在积污不是很严重的情况下采用高压水枪进行冲洗即可，如 RTV 硅橡胶涂层必须清理掉在先采用特制的表面清洗剂清除污秽物后再用抹布擦拭绝缘子即可复涂，复涂可以在原有的 RTV 硅橡胶涂层上直接复涂，但当外绝缘子材料使用环境中存在有大量强电解质的场合，在判断 RTV 硅橡胶涂层失效后应当采用彻底清除 RTV 硅橡胶涂层表面的电解质污秽物后方可复涂，否则会存在因强电解质带来的外绝缘材料自身绝缘性的降低风险。

四川省在不考虑特殊严重的污秽物地区外(如：生产盐、碱的化工厂周围、严重生长绿球藻)，一般可以根据污区分别进行划分，然后根据上述的 RTV 硅橡胶涂层是否失效的判据进行评估，二级及以上污区 RTV 硅橡胶涂层可以使用10年不进行复涂；三级污区使用8年进行复涂一次，根据实际情况在使用4~5年时进行一次冲洗；四级污区使用5年进行复涂，在运行期间根据积污程度2~3年进行一次清洗。

参考文献

[1] 朱可能,关志成,贾志东. 硅橡胶涂料防污闪技术及其在天津电网中的应用[J]. 中国电力, 2002, 35(5): 57-61.

[2] VLASTOS AE, GUBANSKI SM. Sufacestructural changes of naturally aged silicone and EPDM composite insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 888-900.

[3] GORUR RS, CHERNEY EA, HACKAM R, et al. The electrical performance of polymericinsulating materials

- under accelerated aging in a fog chamber[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1157 – 1164.
- [4] 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.
- [5] GUBANSKI SM, VLASTOS AE. Wettability of naturally aged silicon and EPDM composite insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1527 – 1535.
- [6] SORQVIST T, VLASTOS AE. Outdoor polymeric insulators long-term exposed to HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 1041 – 1048.
- [7] 耿瑞香. 涂料的憎水迁移特性与老化特性分析[J]. 绝缘材料通讯, 1999, 8(3): 16 – 19.
- [8] 关志成, 刘瑛岩, 周远翔, 等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 清华大学出版社: 北京, 2006. 152 – 203.
- [9] 焦广旭, 马月琴, 梁静. 室温硫化硅橡胶涂料的老化及对策[J]. 华北电力技术, 2011, (3): 52 – 54.
- [10] 孙京. 浅析 RTV 硅橡胶涂料在电力系统防污闪工作中的应用 [J]. 天津电力技术, 2007, 27(3): 20 – 24.
- [11] 高海峰, 贾志东, 关志成. 运行多年 RTV 硅橡胶涂料绝缘子表面涂层老化分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 158 – 163.
- [12] 冯斌, 常燕, 刘小玲, 等. 高压绝缘子自然污秽组成的研究[J]. 湖南电力, 2007, 27(1): 9 – 10.
- [13] 任绍梅, 杨东亮. 高压绝缘子自然污秽中阴离子组成的分析[J]. 北京石油化工学院学报, 2009, 17(2): 11 – 14.
- [14] 李恒真, 叶晓君, 刘刚, 等. 广州地区输电线路沿线绝缘子自然污秽化学成分的来源分析[J]. 高压技术, 2011, 37(8): 1937 – 1943.
- [15] 王国刚, 周雄, 李向阳, 等. RTV 防污闪涂层特征与失效评估[C] // 中国材料研究学会. 首届全国涂料科学与技术会议论文集, 2008, 上海, 上海: 复旦大学国家教育部先进涂料工程研究中心, 2008: 46 – 50.
- [16] YOSHIMURA N, KUMAGAI S, NISHIMURA S, et al. Electrical and environmental aging of silicone rubber used in outdoor insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 632 – 650.
- [17] 关志成, 薛家麒, 陈凤吉, 等. RTV 防污闪长效涂料的运行经验和寿命判断[C] // 中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会. 第五届绝缘材料与绝缘技术学术会议论文集, 1993, 桂林, 桂林: 中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会, 1993: 20 – 24.
- [18] 刘凯, 朱天容, 刘庭, 等. 绝缘子污秽成分分析与清洗剂去污机理研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 892 – 898.
- [19] 王永强, 程仲林, 张重远. 关于 SF₆ 气体绝缘组合电器中微水问题的研究 [J]. 电力情报, 2001, (2): 40 – 44.

Discussion on Operating Performance of RTV Silicone Rubber Coating

BAI Huan¹, CHEN Hong-bo¹, LI Ya-wei¹, TAO Yun-feng², GE Bao², LI Hong-mei²

(1. Sichuan Electric Power Corporation and Research Institute, State Grid Corporation of China, Chengdu 610000, Sichuan;

2. Chengdu Taly Chemical Industrial Co., Ltd., Chengdu 610100, Sichuan)

Abstract: This paper reviews the operating performance of room temperature vulcanized (RTV) silicone rubber coatings used in the power system in China. It introduces the hydrophobicity of RTV silicone rubber coatings, the failure of RTV silicone rubber coatings in operation, and re-coating after the rubber's failure. According to the specialty of the geographical environment in Sichuan, the operation of RTV silicone rubber coatings is discussed.

Keywords: RTV silicone rubber coating, hydrophobicity, aging, re-coating

RTV 硅橡胶防污闪涂层运行情况分析

作者：[白欢](#)，[陈洪波](#)，[李亚伟](#)，[陶云峰](#)，[张先银](#)，[张向伟](#)，[葛宝](#)，[李红梅](#)
作者单位：[白欢, 陈洪波, 李亚伟 \(国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都, 610000\)](#)，[陶云峰, 张先银, 张向伟, 葛宝, 李红梅 \(成都拓利化工实业有限公司, 成都, 610100\)](#)
刊名：[有机硅材料](#)[ISTIC](#)
英文刊名：[Silicone Material](#)
年，卷(期)：2015 (2)

引用本文格式：[白欢. 陈洪波. 李亚伟. 陶云峰. 张先银. 张向伟. 葛宝. 李红梅 RTV 硅橡胶防污闪涂层运行情况分析\[期刊论文\]-有机硅材料 2015 \(2\)](#)