

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.028

# 电力外绝缘用硅橡胶清洗修复剂制备及性能研究

高嵩<sup>1</sup>, 高超<sup>2</sup>, 司南<sup>3</sup>, 石金彪<sup>4</sup>, 赵悦菊<sup>4</sup>, 王黎明<sup>5</sup>

1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;
2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;
3. 国网黑龙江省电力有限公司鹤岗供电公司, 黑龙江 鹤岗 154100;
4. 北京国电富通科技发展有限责任公司, 北京 100070;
5. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518000)

**摘要:**硅橡胶广泛应用于电力行业的复合绝缘子和防污闪涂料,然而长时间工况运行后,容易发生老化粉化、污秽沉积,降低表面憎水性。目前电网中有上亿支硅橡胶绝缘子服役多年,研究能够清除表面污秽,修复硅橡胶老化层的新型清洗剂迫在眉睫。文中探究不同非离子表面活性剂含量和修复剂含量对清洗效率和憎水性的影响。实验表明非离子表面活性剂含量在3%时,洗净率最高达到95%。而修复剂含量为11%时,憎水性最好,其憎水迁移性最佳可以达到HC1级。通过扫描电镜分析,发现清洗后硅橡胶表面微孔和裂缝消失,表面平整,表明该清洗剂具有去除粉化层和污秽,修复老化绝缘子的效果。这为继续研发硅橡胶清洗修复剂,延长绝缘子服役期限提供一定的理论和实践基础。

**关键词:**硅橡胶复合绝缘子;防污闪;非离子表面活性剂;清洗修复剂;憎水性;硅橡胶老化

**中图分类号:**TM211

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)06-0239-05

## 0 引言

随着社会经济的发展和工业化进程的加快,人们对电力系统变电站安全运行的要求越来越高。工业化进程加速带来的是污染物种类多样化和污染程度变高,污秽对电力系统安全运行的影响越明显。据不完全统计,目前电网污闪是造成电量损失的主要因素之一。自1987年6月以来,仅华东电网线路发生闪络的数目达26条,跳闸近百次。防污闪工作是一项持久且非常重要的工程,污闪问题的解决与否直接关系到电网供电系统可靠性能否提高<sup>[1-4]</sup>。

目前电网通过使用硅橡胶复合绝缘子或者在瓷绝缘表面和支柱上涂覆室温硫化硅橡胶防污闪涂料,有效提高了电网的绝缘等级,减少了污闪事故的发生<sup>[5-10]</sup>。在高电压环境下,耐脏污性能好的硅橡胶绝缘子也会积累污秽,因此定期清洗绝缘子变得越来越重要<sup>[11-15]</sup>。不同地区的绝缘子污秽不同,南方和沿海地区以NaCl为主,北方以CaSO<sub>4</sub>为主,随着大气污染加剧,污秽中还掺杂着油性物质,使得清洗越来越困难<sup>[16-19]</sup>。用水和溶剂冲洗不能有效清除硅橡胶表面污秽,恢复表面憎水性。目前国内外硅橡胶专用清洗剂产品还处于初始阶段,德

国瓦克产的E10硅乳可用于硅橡胶清洗,但憎水性恢复较差;而北京国电富通生产的硅橡胶清洗修复剂,经过电站试用效果较好,尚处于推广阶段。

绝缘子的清洗维护中,以使用清洗剂清洗为主。绝缘子清洗剂主要成分是助洗剂和表面活性剂<sup>[20-23]</sup>。其中表面活性剂起到将污秽包覆溶解的作用,助洗剂则有绝缘、不易燃、易挥发、绝缘强度高、无毒和无腐蚀性等特点。文中将对绝缘子清洗剂的配比进行探索,分析不同种类的有机溶剂和不同比例的非离子表面活性剂对绝缘子清洗剂效果的影响。添加自制修复剂,研究修复剂对绝缘子的修复功能,并对修复程度进行评估,确定修复剂对绝缘子的影响规律。

## 1 清洗修复剂制备试验

### 1.1 主要原料及设备

**原材料:**高密度复合溶剂(自制,主要含四氯乙烯、二甲苯)、非离子表面活性剂聚乙二醇单十二烷基(工业纯)、修复剂(自制,主要含羟基硅油、乳化剂和硅氧烷偶联剂)、乙醇(分析纯)和35 kV绝缘子样片(根据GB/T 26218.1—2010选择重污秽等级d级、运行5 a的绝缘子)。

**设备:**接触角测试仪(QBZY系列)、电子天平(CP114)、表面张力测试仪(JYW-200B)、真空捏合机。

收稿日期:2022-05-17;修回日期:2022-08-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977118)

### 1.2 清洗修复剂制备

以自制高密度复合溶剂为溶剂,修复剂含量为8%,非离子表面活性剂含量分别为1%,3%,5%,7%,9%,11%,13%,15%,在真空捏合机中搅拌均匀,灌装得到清洗修复剂。

以自制高密度复合溶剂为溶剂,非离子表面活性剂含量为3%,修复剂含量分别为3%,5%,8%,11%,14%,在真空捏合机中搅拌均匀,灌装得到清洗修复剂。

### 1.3 清洗修复剂性能表征

清洗修复剂表面张力采用表面张力仪测试。

清洗修复剂洗净率测试方法为:测量绝缘子样片清洗前质量  $m_1$  和清洗后质量  $m_2$ ;清洗修复剂清洗后用大量溶剂清洗,再用清水冲洗绝缘子,待绝缘子表面无任何溶剂或水,且绝缘子样片重量不发生变化为止,记录质量  $m_3$ 。其中污秽绝缘子样片取自同一片绝缘子。对比实验使用酒精清洗绝缘子。式(1)为洗净率  $X$  的计算公式。

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100\% \quad (1)$$

采用测定接触角的方式来评估清洗修复剂修复效率,使用配制的清洗修复剂处理污秽绝缘子样片。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 非离子表面活性剂对清洗修复剂表面张力和洗净率的影响

配制含有不同非离子表面活性剂含量的清洗剂,测定其表面张力值和洗净率。具体测试结果如图1所示。

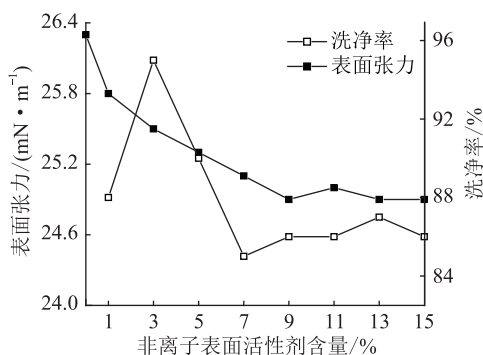


图1 非离子表面活性剂含量与清洗剂表面张力和洗净率关系

Fig.1 Surface tension and cleaning efficiency of cleaning agents containing with different non-ionic surfactant concentrations

从图1中可以看出,非离子表面活性剂含量低于9%时,随着非离子表面活性剂含量的提高,清洗

修复剂的表面张力逐渐降低。

杨氏公式显示了固气界表面张力  $\gamma_{sg}$ 、固液界表面张力  $\gamma_{sl}$ 、液气界表面张力  $\gamma_{lg}$  与接触角  $\theta$  之间的关系,如式(2)所示。

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos \theta \quad (2)$$

当  $\theta$  值大于  $90^\circ$  时,随着表面张力的下降,接触角变小,越容易润湿。加入非离子表面活性剂可以降低清洗修复剂与绝缘子之间的接触角,使得清洗修复剂更容易润湿绝缘子,有助于清洗绝缘子表面的污秽。当非离子表面活性剂含量为9%时,表面张力为24.9 mN/m。当非离子表面活性剂的含量大于9%时,清洗修复剂的表面张力维持在24.9 mN/m,基本不变。说明当非离子表面活性剂含量大于等于9%时,清洗修复剂的表面张力较低,与污秽之间的接触角较小,理论上有利于清洗污秽物。

从图1中的洗净率拟合曲线可见,绝缘子的洗净率随着非离子表面活性剂含量的提高先升高后降低,当非离子表面活性剂含量在3%时,洗净率最大,达到95%。说明加入适量的非离子表面活性剂有助于从绝缘子表面剥离污秽。当继续增加非离子表面活性剂含量时,洗净率不再上升,反而下降。这与表面张力理论上的结果不一致。原因在于当非离子表面活性剂含量超过3%时,绝缘子表面会残留少量的非离子表面活性剂和清洗修复剂,随着非离子表面活性剂含量增加,残留物的量也在增加,使得洗净率维持在86%左右。较多的非离子表面活性剂残留会降低绝缘子的接触角,不利于绝缘子防污闪。因此,非离子表面活性剂含量在3%时,清洗效果最佳。与酒精清洗的结果相对比,酒精清洗绝缘子的洗净率仅为82%,也验证了加入适量的非离子表面活性剂有助于提高清洗修复剂和绝缘子的润湿性,提高清洗修复剂的洗净率。

### 2.2 非离子表面活性剂对表面接触角的影响

#### 2.2.1 新出厂复合绝缘子表面接触角

取新出厂复合绝缘子测量其接触角,测量结果如表1所示。

表1 新出厂绝缘子表面接触角  
Table 1 Contact angles of new composite insulators surface

位置	表面接触角/( $^\circ$ )				
	1	2	3	4	5
左侧	125.7	123.8	112.7	127.6	129.6
右侧	124.2	121.8	118.6	122.9	126.5
均值	125.0	122.8	115.7	125.3	128.1

根据 DL/T 627—2012 《绝缘子用常温固化硅

橡胶防污闪涂料》和 DL/T 864—2004《标称电压高于 1 000 V 交流架空线路用复合绝缘子使用导则》,标称电压高于 1 000 V 的交流架空线路用绝缘子,其静态接触角  $\theta_{av} \geq 100^\circ$ ,  $\theta_{min} \geq 100^\circ$ , 出厂绝缘子一般为 HC1 级—HC2 级,且 HC3 级的试品不多于 1 个。由表 1 可知,文中新出厂绝缘子表面 5 个接触角的均值为  $123.4^\circ$ ,符合行业标准。

### 2.2.2 清洗前后污秽复合绝缘子表面接触角

对污秽绝缘子取 5 个点,测量其表面接触角,结果如表 2 所示,其接触角明显较出厂绝缘子的接触角低,均值为  $104.9^\circ$ 。可以看出污秽绝缘子的接触角显著变小,极大增加了闪络的可能性,对电网的正常运行构成潜在的威胁。

表 2 污秽绝缘子表面接触角  
Table 2 Contact angles of dirty composite insulator surface

位置	表面接触角/ $(^\circ)$				
	1	2	3	4	5
左侧	108.8	108.2	103.5	102.2	102.6
右侧	109.9	107.5	103.9	100.9	100.8
均值	109.4	107.9	103.7	101.6	101.7

采用含有不同非离子表面活性剂含量的清洗剂清洗污秽绝缘子,并测试清洗后绝缘子接触角。图 2 为清洗后绝缘子接触角值。

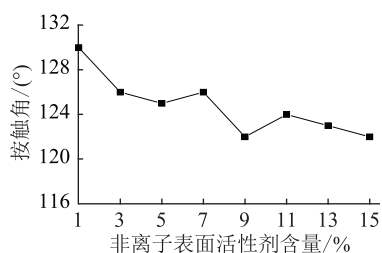


图 2 不同非离子表面活性剂含量清洗后绝缘子接触角

Fig.2 Contact angles of the insulators cleaned using the cleaning agent containing different concentrations of non-ionic surfactants

从图 2 可以看出,清洗修复剂清洗后的绝缘子接触角随着非离子表面活性剂含量的提高有降低的趋势,当非离子表面活性剂含量大于 7% 时,接触角趋于稳定,稳定在  $122^\circ$  左右。在实验中,酒精清洗后接触角为  $103^\circ$ 。所有经清洗剂清洗后的绝缘子接触角均大于污秽绝缘子的接触角,表明清洗修复剂可以有效清洗绝缘子表面污秽,恢复其憎水性。

## 2.3 不同修复剂含量的清洗修复剂对绝缘子憎水性的影响

### 2.3.1 憎水减弱性

用不同修复剂含量的清洗修复剂清洗污秽绝

缘子后进行憎水减弱性测试。根据 DL/T 1474—2015 对样品的憎水减弱性进行测试,每种清洗修复剂取 5 片样片,测试结果见表 3。

表 3 不同修复剂含量的清洗修复剂清洗绝缘子后憎水减弱性测试结果

Table 3 The loss of hydrophobicity of insulators cleaned by clean-repairing agent with different repairing agent contents

修复剂含量/%	憎水减弱性结果				
	1	2	3	4	5
3	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
5	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
8	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
11	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
14	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1

从表 3 可以看出,不同修复剂含量的清洗修复剂对应的绝缘子憎水性差异较小,每种清洗修复剂对应的绝缘子均能达到 HC1 级,具有良好的憎水效果。

### 2.3.2 憎水恢复性

将测试过憎水减弱性的样品,放在实验室标准环境下静置,48 h 后测试样品的憎水性等级,测试结果见表 4。由表 4 可知,各种清洗修复剂对应的绝缘子憎水性差异较小,均可以达到 HC1 级憎水效果。

表 4 不同修复剂含量的清洗修复剂清洗绝缘子后憎水恢复性测试结果

Table 4 The hydrophobic recovery of insulators cleaned by clean-repairing agent with different repairing agent contents

修复剂含量/%	憎水恢复性结果				
	1	2	3	4	5
3	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
5	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
8	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
11	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
14	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1

### 2.3.3 憎水迁移性

用不同修复剂含量的清洗修复剂清洗绝缘子后,按照 DL/T 810—2012 对绝缘子进行涂污,在标准实验环境下放置 96 h 后测试憎水分级,测试结果如表 5 所示。

从表 5 中可以看出,随着修复剂含量的提高憎水迁移性逐渐提高,当修复剂含量达到 11% 时,其憎水性达到 HC1 级,之后再提高修复剂含量,憎水迁移性不再变化。当修复剂含量为 3%,5%,8% 时,



表5 不同修复剂含量的清洗修复剂清洗绝缘子后憎水迁移性测试结果

Table 5 The migration of insulators cleaned by clean-repairing agent with different repairing agent contents

修复剂含量/%	憎水迁移性结果				
	1	2	3	4	5
3	HC2	HC2	HC2	HC3	HC2
5	HC2	HC2	HC1	HC2	HC2
8	HC1	HC1	HC2	HC2	HC1
11	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1
14	HC1	HC1	HC1	HC1	HC1

绝缘子表面憎水性仅为 HC2 或 HC3 级,因此在本项目测试中,修复剂含量为 11%及以上时,其憎水迁移性能最优,可达到 HC1 级。

综合各项憎水性测试结果,不同修复剂含量的清洗修复剂在绝缘子憎水减弱性和憎水恢复性方面的差异较小,但经不同修复剂含量的清洗修复剂处理后的绝缘子均能达到 HC1 级。在憎水迁移性方面,当修复剂含量为 11%及以上时,清洗后绝缘子的迁移性最优,可达到 HC1 值。这是因为只有当修复剂含量达到一定值时,其中含有的小分子憎水性物质才能显著跃迁到污秽层表面,形成憎水膜结构,起到显著的憎水迁移性效果。

配置含有 3%表面活性剂、11%修复剂的清洗修复剂,清洗老化绝缘子,并对清洗前、后绝缘子表面进行电镜表征,如图 3 所示。清洗前,绝缘子表面含有污秽和粉化层,且有很多微孔和裂痕,表面凹凸不平。使用清洗剂后,表面的微孔和裂痕消失,变得平整,表明粉化层和污秽已经去除,并对表面缺陷进行了修复。

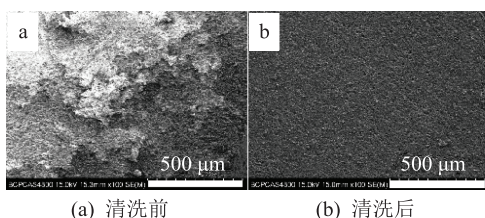


图3 硅橡胶绝缘子表面清洗前、后扫描电子显微镜图  
Fig.3 The SEM imagines of silicone rubber insulators before and after clean

### 3 结语

文中制备了一系列清洗修复剂,从表面张力、接触角、洗净率和修复能力方面对该清洗修复剂进行了测试,并通过扫描电子显微镜对清洗修复前后的绝缘子表面进行了表征。结果表明:添加一定量的非离子表面活性剂有助于降低清洗修复剂的表面张力,提高洗净率;受到清洗剂残留、污秽与清洗

剂不润湿等多种因素的影响,洗净率与非离子表面活性剂的添加量呈现先升高后降低的趋势;清洗后绝缘子的接触角增大,憎水性得到了修复;通过扫描电子显微镜可知,清洗修复剂起到了清除污秽和粉化层、修复微裂缝和微孔的作用,对延长绝缘子服役寿命起到了重要作用。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“输变电设备 RTV 涂层质量检查与老化修复技术研究”(J2019012)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [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] 王旭峰. 高压电气设备绝缘子防污闪治理措施[J]. 电工技术,2019(23):114-115.  
WANG Xufeng. Anti-pollution flashover measures for insulators of high-voltage electrical equipment[J]. Electric Engineering, 2019(23):114-115.
- [3] 孙尚屹. 输电线路防污闪方法研究及应用[J]. 工程技术(引文版),2016,1:138.  
SUN Shangyi. Research and application of anti-pollution flashover methods for transmission lines[J]. Engineering Technology (Citation Edition), 2016, 1:138.
- [4] 黄宵宁,刘锦,杨成顺,等. 典型表面状态下的绝缘子空间电场特性研究[J]. 电力工程技术,2020,39(3):144-150.  
HUANG Xiaoning, LIU Jin, YANG Chengshun, et al. Electric field characteristics of polluted insulator space under typical surface state[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3):144-150.
- [5] 李武峰,范建斌,李鹏,等. 直流绝缘子串污秽闪络特性研究[J]. 电网技术,2006,30(15):21-24.  
LI Wufeng, FAN Jianbin, LI Peng, et al. Contamination flashover performance of DC insulator strings[J]. Power System Technology, 2006, 30(15):21-24.
- [6] 苑吉河,蒋兴良,舒立春,等. 盐/灰密对不同型式绝缘子交流人工污秽闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(6):96-100.  
YUAN Jihe, JIANG Xingliang, SHU Lichun, et al. Influence of salt/non-soluble deposit density on AC artificial pollution flashover performances of various types insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6):96-100.
- [7] 吴光亚,钱之银,肖勇,等. 防污闪技术的现状与发展趋势[J]. 电力设备,2005(3):5-9.  
WU Guangya, QIAN Zhiyin, XIAO Yong, et al. Present situation and development tendency of anti-pollution flashover[J]. Electrical Equipment, 2005(3):5-9.
- [8] 窦如婷,冷祥彪,顾方,等. 室温硫化硅橡胶防污闪涂料的研究现状分析[J]. 化工新型材料,2018,46(5):32-34.

- DOU Ruting, LENG Xiangbiao, GU Fang, et al. Research on the status of RTV anti-pollution flashover coating[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(5):32-34.
- [9] 周军, 杜怡君, 邓禹, 等. 绝缘子用室温硫化硅橡胶(RTV)防污闪涂料质量管控体系研究与实践[J]. 中国标准化, 2019(S1):227-231.
- ZHOU Jun, DU Yijun, DENG Yu, et al. Research and practice of the quality management and control system of room temperature vulcanized (RTV) silicon rubber flashover-proof coatings applied on insulators[J]. China Standardization, 2019(S1):227-231.
- [10] 毕晓甜, 高嵩, 刘洋, 等. 江苏地区不同年限绝缘子 RTV 涂层运行性能分析[J]. 电瓷避雷器, 2020, (5):219-224.
- BI Xiaotian, GAO Song, LIU Yang, et al. Performance analysis of RTV coatings on insulators with different service years in Jiangsu province [J]. Insulators and Surge Arresters, 2020, (5):219-224.
- [11] 刘志强, 井谦, 张长征. 运行后的线路复合绝缘子表面憎水性研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(5):183-188.
- LIU Zhiqiang, JING Qian, ZHANG Changzheng. The study on the hydrophobicity of post-service line composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(5):183-188.
- [12] 朱可能, 关志成, 贾志东. RTV 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.
- ZHU Keneng, GUAN Zhicheng, JIA Zhidong. RTV silicone rubber coating and its application in Tianjin Power System[J]. Electric Power, 2002, 35(5):57-61.
- [13] 魏劲容, 陈子岩. 浅谈室温硫化硅橡胶防污闪涂料在绝缘子上的应用[J]. 电瓷避雷器, 2011(2):10-15.
- WEI Jinrong, CHEN Ziyang. Discuss on anti-pollution flashover coating of RTV in the insulator application[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(2):10-15.
- [14] 彭凯, 马鑫, 吴继岩, 等. 绝缘子清洗过程中变污层参数的动态闪络模型[J]. 电瓷避雷器, 2020, (2):229-235.
- PENG Kai, MA Xin, WU Jiyan, et al. Dynamic flashover model considering variable pollution layer parameters during insulator cleaning[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020, (2):229-235.
- [15] 韦晓星, 徐驰, 卢文浩, 等. 运行多年的液体硅橡胶套管老化特征及修复效果评估[J]. 电瓷避雷器, 2020, (3):197-204.
- WEI Xiaoxing, XU Chi, LU Wenhao, et al. Ageing characteristics and repairing evaluation of long-term operating LSR bushings[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020, (3):197-204.
- [16] 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.
- LIU Kai, ZHU Tianrong, LIU Ting, et al. Chemical composition of high-voltage insulator contamination and detergency mechanism of the electrified detergent for degreasing insulators[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4):892-898.
- [17] 曹宏伟, 张炜婕, 郭洛伽, 等. 退役复合绝缘子污秽成分分析及清洗工艺研究[J]. 应用化工, 2017, 46(12):2403-2407.
- CAO Hongwei, ZHANG Weijie, GUO Mingjia, et al. The composition analysis and cleaning process research for contamination on retired composite insulator surface[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(12):2403-2407.
- [18] 李恒真, 刘刚, 李立涅. 绝缘子表面自然污秽成分分析及其研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16):128-137.
- LI Hengzhen, LIU Gang, LI Licheng. Study status and prospect of natural contamination component on insulator surface[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(16):128-137.
- [19] 吴刘锁, 赵悦菊, 王国刚, 等. 自然环境下积污 RTV 硅橡胶的润湿行为研究[J]. 有机硅材料, 2015, 29(05):353-359.
- WU Liusuo, ZHAO Yueju, WANG Guogang, et al. Study on wettability of the contaminative RTV silicone rubber in natural environment[J]. Silicone Material, 2015, 29(05):353-359.
- [20] 刘建国, 李言涛, 侯保荣. 防锈油脂概述[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(5):372-376.
- LIU Jianguo, LI Yantao, HOU Baorong. Summarization of anti-corrosion grease[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(5):372-376.
- [21] 汤振鹏, 樊亚东, 王建国, 等. 带电清洗剂对绝缘子工频闪络电压的影响[J]. 高压电器, 2017, 53(8):181-186.
- TANG Zhenpeng, FAN Yadong, WANG Jianguo, et al. Influence of live-working washing agents on power frequency flashover voltage of insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8):181-186.
- [22] 邹平, 郑天祺, 冯俊, 等. 支柱绝缘子表面污秽带电清洗剂的制备与清洗特性研究[J]. 广东化工, 2017, 44(1):39-40, 72.
- ZOU Ping, ZHENG Tianqi, FENG Jun, et al. Study on the preparation and cleaning characteristics of the electrified cleaning agent for the surface contamination of the supporting insulator [J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(1):39-40, 72.
- [23] 张涛, 毕睿华, 张云翔, 等. 基于化学清洗剂与气动清洗机的绝缘子带电清扫技术的研究[J]. 四川电力技术, 2015, 38(3):12-14, 22.
- ZHANG Tao, BI Ruihua, ZHANG Yunxiang, et al. Research on live cleaning technology for suspension insulator based on chemical detergent and pneumatic motor[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2015, 38(3):12-14, 22.

#### 作者简介:



高嵩

高嵩(1985),男,博士,高级工程师,从事高电压绝缘外绝缘和电力设备开发工作(E-mail:hvgaosong@qq.com);

高超(1983),男,硕士,高级工程师,从事高电压绝缘外绝缘和电力设备开发工作;

司南(1986),男,学士,高级工程师,从事高电压绝缘外绝缘和电力设备开发工作。

(下转第 251 页)

## Equivalent analysis of contaminations under simulated fog-haze and natural fog-haze

WANG Jianhui<sup>1,2</sup>, ZHAO Yueju<sup>1,2</sup>, TENG Jilin<sup>1,2</sup>, MIAO Wenhua<sup>1,2</sup>, ZHENG Yongli<sup>1,2</sup>, YU Baoqing<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Guodian Futong Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211006, China)

**Abstract:** The uncertainty of haze weather makes it difficult to carry out research on its impact on power equipment. However, whether the research under simulated haze environment is equivalent to that under actual haze weather is related to the guiding value of the research conclusion to the actual work. For this reason, in this paper, the samples are contaminated under simulated haze environment and natural haze environment respectively. By testing the surface contamination layer resistance and leakage current of the contaminated samples under the two environments, the equivalence of the effects of the two environments on insulators is analyzed and discussed. It is found that from the measured data of salt density, ash density and surface pollution layer resistance, the insulators under the two haze environments have an equivalent corresponding relationship, that is, the insulators with pollution accumulation under natural haze for one year are equivalent to those with pollution accumulation under simulated haze for 10-20 days. However, from the perspective of leakage current parameters, composite insulators under the two haze environments are not equivalent, so the conclusion of leakage current under the simulated haze cannot be directly used to guide the actual work.

**Keywords:** fog-haze; equivalence; pollution accumulation; insulator; surface resistance; leakage current

(编辑 刘晓燕)

(上接第 243 页)

## The preparation and performance of silicone rubber clean-repairing agent for power external insulation

GAO Song<sup>1</sup>, GAO Chao<sup>2</sup>, SI Nan<sup>3</sup>, SHI Jinbiao<sup>4</sup>, ZHAO Yueju<sup>4</sup>, WANG Liming<sup>5</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

3. State Grid Hegang Power Supply Company of Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Hegang 154100, China;

4. Beijing Guodian Futong Science and Development Co., Ltd., Beijing 100070, China;

5. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Silicone rubber is widely used in composite insulators and anti-pollution flashover coatings in the power industry. However, after long-term operation, it is prone to aging chalking and dirt deposition, which reduces the surface hydrophobicity. Hundreds of millions of silicone rubber insulators are in service for many years in the power grid, and it is urgent to study a new type of cleaning agent that can remove surface contamination and repair the aging layer of silicone rubber. The effects of different non-ionic surfactant content and repair agent content on cleaning efficiency and hydrophobicity were investigated. Experiments show that when the content of non-ionic surfactant is 3%, the cleaning efficiency is up to 95%. When the content of the repairing agent is 11%, the hydrophobicity is the best, and its hydrophobic migration can reach the HC1 level. Through scanning electron microscopy analysis, it is found that the micropores and cracks on the surface of the silicone rubber disappear after cleaning, and the surface is smooth, indicating that the cleaning agent has the ability of removing the aging layer and contamination, and repairing the aging insulators. This provides a theoretical and practical basis for continuing to develop silicone rubber clean-repairing agents and extending the service life of insulators.

**Keywords:** silicone rubber composite insulator; anti-pollution flashover; non-ionic surfactant; clean-repairing agent; hydrophobicity; silicone rubber aging

(编辑 刘晓燕)