

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.08.001

局部破损 RTV 涂层盘型悬式绝缘子的污闪特性研究

伏祥运¹, 曹彬², 崔建胜¹, 孙浩然¹, 梅红伟², 王黎明²

(1. 国网连云港供电公司, 江苏 连云港 222004; 2. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: RTV 涂层长期运行在高温、高湿和强紫外线照射的环境中局部区域涂层会出现粉化甚至脱落现象, 文中针对此现象, 对不同类型局部破损 RTV 涂层盘型悬式绝缘子的污闪特性进行了研究。制作不同类型局部破损 RTV 涂层的玻璃试片, 利用人工污闪试验研究局部破损情况对污闪特性的影响, 并通过盘式悬式绝缘子的人工污闪试验对以上结果进行了验证; 利用有限元软件研究 RTV 涂层局部破损情况对绝缘子表面电场分布的影响。研究结果表明: 绝缘子表面 RTV 涂层局部破损对盘型悬式绝缘子污闪特性有着重要影响, 破损区域沿爬电距离方向距离越长, 对其防污闪性能影响越大; 局部破损发生的位置不同对污闪电压影响大小也不同, 破损位置发生在高压端钢脚附近对污闪电压的影响较小; 局部区域 RTV 涂层的破损会导致其他未破损区域的压降和电场畸变增大, 容易产生电晕放电, 加速劣化未破损区域 RTV 涂层的憎水性及憎水迁移性。

关键词: 绝缘子; RTV 涂层; 局部破损; 污闪特性; 爬电距离

Study on Pollution Flashover Characteristics of RTV Coating Disc Suspension Insulators with Different Local Defects

FU Xiangyun¹, CAO Bin², CUI Jiansheng¹, SUN Haoran¹, MEI Hongwei², WANG Liming²

(1. State Grid Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang, Jiangsu 222004, China;

2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: Under high temperature, high humidity and strong ultraviolet radiation environment, the performances of RTV (room temperature vulcanized silicone rubber) coating caused by pulverization, local defect and uneven hydrophobicity on surfaces of insulator will be deteriorated. In this paper, the effects of anti-pollution flashover of RTV with partial defects were analyzed. The pollution flashover tests of glass samples with RTV coating were designed to research the influence of the pollution flashover voltage and the similar disk suspension insulators are also used to verify the test results. The finite element software was used to analyze the influence of the electric field on the surface of insulator caused by local defects. The test results show that the anti-pollution flash performance will become much worse as the length of partial defect of RTV coating in the direction of creep distance is longer, the influence of pollution flashover voltage is different if the position that the partial defect of RTV coating on the surface of insulator is located in is different and there was no significant decrease in the anti-pollution flash performance if the partial defect appears on the high voltage side. The electric field in other area of RTV coating will enhance, which leads to the corona discharge more likely to appear and damage the hydrophobicity of other RTV coating.

Key words: Insulator; RTV coating; local defect; pollution flashover characteristics; creep distance

0 引言

污秽闪络(简称污闪), 作为外绝缘事故中常见

且较为严重的一个问题, 在输电线路绝缘子上尤为频发, 仍影响电力系统的安全稳定运行^[1-3]。由于室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized silicone

收稿日期: 2018-02-10; 修回日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(51377093)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377093).

rubber, RTV)涂料具有憎水性和憎水迁移性,能使本来具有亲水性表面的瓷或玻璃绝缘子防污性能大幅提高,因而在中国电力系统中得到广泛应用^[4-7]。目前国内外学者对于 RTV 涂料在电力系统中的应用做了大量研究,其关注点基本都在 RTV 涂料本身的性能及运行后的特性^[8-13]。RTV 涂料作为一种有机材料,若长期运行在较为恶劣的环境中,尤其是在高温、高湿、强紫外线照射的条件下,其各项性能会出现不同程度的下降^[14-18]。此时,RTV 涂料绝缘子表面憎水性能会下降,更甚者局部区域会出现一定程度的粉化和脱落现象,从而导致绝缘子表面出现憎水性能的不均匀分布,而这种绝缘子表面憎水性分布不均匀的情况,会对 RTV 涂层的防污闪性能带来多大影响,目前仍不是很清楚^[19-20]。

文中利用平板玻璃三角模型试验研究表面 RTV 涂层局部缺损对污闪性能的影响,并通过实际绝缘子进行验证试验;利用有限元仿真软件对 RTV 涂层平板玻璃三角模型在不均匀憎水性条件下的电流和电场情况进行仿真计算,分析表面 RTV 涂层出现不同局部脱落情况对其运行特性的影响。

1 RTV 涂层平板玻璃三角模型的模拟试验

1.1 试验方法

人工污秽染污试验是验证 RTV 涂层防污闪性

能的有效方法之一。文中采用三角玻璃平板来开展绝缘子的模拟试验,见图 1。针对实际线路中观察到的绝缘子表面 RTV 涂层脱落情况,人工设置几种具有代表性的 RTV 涂层局部破损工况,在饱和受潮环境下进行人工污秽闪络试验研究。

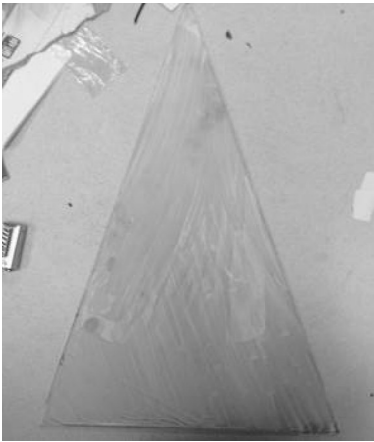


图 1 平板玻璃三角模型
Fig. 1 Flat glass triangle model

人工污秽试验是在温、湿度可控的污秽试验系统中完成的。该系统主要有以下几部分构成:温湿度可控的小雾室、污秽试验电源、泄漏电流监测设备和系统监控软件,其整体结构见图 2。整个试验过程雾室充满能见度不足 1 m 的雾,且温度保持恒定。

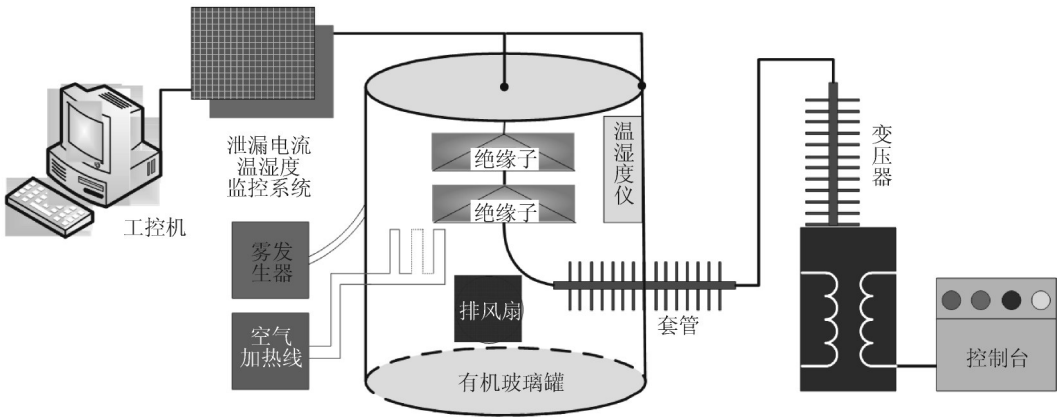


图 2 污秽试验系统的结构图
Fig. 2 Structure diagram of contamination test system

模拟试验方案 1:保持 RTV 涂层破损面积均为总面积的 25%,研究不同破损形状和位置对 RTV 涂层玻璃板污闪特性的影响。利用高岭土模拟污秽中难溶物,灰密 1.0 mg/cm²;利用 NaCl 模拟污秽中可溶盐,盐密 0.1 mg/cm²。涂污后将试样常温下放置 48 h,测量此时 RTV 表面静态接触角均大于 110°,表明涂层憎水性已迁移完毕。采用升压法,每组试验选用 3 片完全相同的玻璃板,每片玻璃板闪络 3 次,

间隔 5 min,取 9 次闪络的平均电压为其闪络电压。试验方法见表 1。

模拟试验方案 2:试片表面 RTV 涂层出现多个破损区域,研究多区域、不同破损形状和位置对 RTV 涂层玻璃板污闪特性的影响。涂污和试验方法跟模拟试验方案 1 相同。试验方法见表 2。

1.2 试验结果分析

从表 1 可以看出,污闪电压的大小与 RTV 涂层

表1 模拟试验1的试验方法
Table 1 Method of simulation test 1

试验方案	示意图	污闪电压/kV
全破损	不涂 RTV	14.0
无破损	全涂 RTV	27.7
贯穿性破损		15.8
高压端破损		21.5
低压端破损		17.8
中压端破损 1		16.8
中压端破损 2		20.8

表2 模拟试验2的试验方法
Table 2 Method of simulation test 2

实验方案	示意图	污闪电压/kV
破损区域为两个圆		19.7
破损区域为2个三角形 形占总面积25%		17.2
破损区域为2个三角形 形占总面积50%		15.5
破损区域有5 cm 隔断		18.1

脱落的面积并无太大关系,而与 RTV 涂层脱落区域的位置以及沿泄漏距离(爬电距离)方向的长度有关。高压端 RTV 涂层缺损对污闪电压影响不大;脱

落区域在泄漏距离上越长,污闪电压越低。
从表2可以看出,污闪电压的大小受多个 RTV 涂层破损区域共同影响。对污闪电压影响最大的是 RTV 涂层破损区域沿泄漏距离(爬电距离)方向的等效长度,其次是破损区域的位置,另外,RTV 涂层破损区域的分布情况对污闪电压也有一定影响。

高压端 RTV 涂层破损对污闪电压影响不大的原因可能是高压端电流密度大并且高压端电场强度大,高电流密度以及高电场强度容易导致高压端形成干区形成并造成局部放电。因此,闪络发生前高压端首先产生局部电弧,此后局部电弧沿绝缘表面发展,而电弧状态与高场强区的表面状态关系不大。所以,高压端的表面状态对闪络电压影响不大。试验结果也很好的验证了这一点。每组试验结束后,拿出试片,发现高压端 RTV 涂层无论是否破损,表面均非常干燥。

2 RTV 涂层实际线路绝缘子的试验

采用 FC70/146 型玻璃绝缘子开展单片绝缘子进行污闪试验,验证文1节 RTV 涂层玻璃试片试验结论。FC70/146 型玻璃绝缘子试样图片见图3。其各项基本参数见表3。

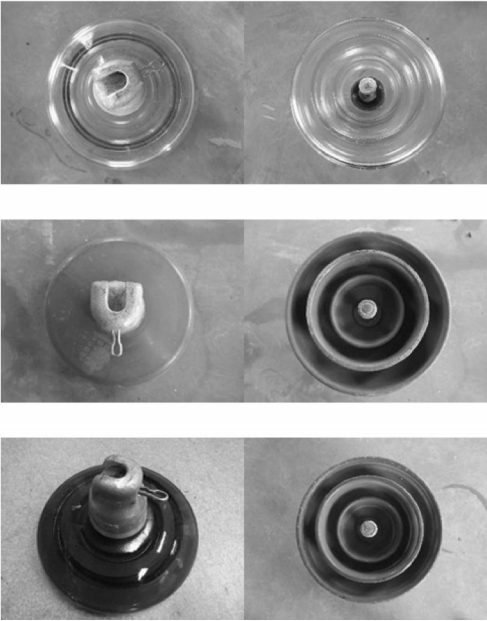


图3 FC70/146 型玻璃绝缘子试样
Fig. 3 The test samples of FC70/146 glass insulator

表3 FC70/146 型玻璃绝缘子的基本参数
Table 3 The basic parameters of FC70/146 glass insulator

结构高度/mm	泄漏距离/mm	上表面积/cm ²	下表面积/cm ²
146	320	566	1 083

FC70/146 型玻璃绝缘子表面喷涂 RTV 涂料,然

后人为制造该绝缘子表面 RTV 涂层不同区域的破损,见图 4。再依然利用氯化钠与高岭土模拟绝缘子表面污秽,其中,绝缘子表面盐密 0.1 mg/cm^2 ,灰密 1.0 mg/cm^2 。涂覆污秽后放置 48 h 以上,RTV 涂层表面憎水迁移完成后进行升压法人工污闪试验。由于绝缘子下表面在雾室中不易受潮,采用喷水法受潮,下表面喷水 6 下,上表面喷水 3 下,放置 10 min 进行第 1 次闪络试验;第 2 次与第 3 次闪络试验间隔 10 min,且不再喷水。每种 RTV 涂层破损情况的绝缘子进行 3 组试验,每组闪络 3 次。

试验结果见表 4。从表 4 中数据分析可得,绝缘子表面 RTV 缺损位置及其沿泄漏距离(爬电距离)方向的长度对闪络电压有着重要影响。

表 4 污闪电压试验结果
Table 4 The test results of flashover voltage

编号	表面状态	上表面	下表面	污闪电压/kV
1	无涂覆			15.9
2	全涂覆			30.5
3	下表面内环 RTV 破损			27.1
4	下表面中环 RTV 破损			25.1
5	下表面外环 RTV 破损			22.7
6	上表面 RTV 破损			20.5
7	下表面 RTV 破损			16.7

比较表 1 中编号为 3、4、5 的试验结果可以看出,若 RTV 缺损位置越靠近钢脚位置(高压端),对污闪电压影响越小。分析原因是因为绝缘子表面泄漏电流分布不均匀,钢脚位置的泄漏电流密度大,因此局部电弧从钢脚位置处产生,导致钢脚位置容易产生干区;产生干区后,污闪电压的大小就不受该区域是否具有憎水性影响了。

另外,比较编号为 1、2、6、7 的试验结果,可以看出,上表面 RTV 涂层整体破损时的闪络电压大于下表面 RTV 涂层整体破损时的闪络电压,下表面 RTV

涂层整体破损时的闪络电压与完全无涂覆 RTV 涂层玻璃绝缘子的闪络电压相比较提高不大。分析原因是因为:①上表面泄漏距离(130 mm)小于下表面泄漏距离(190 mm)。②闪络发生过程中,一般情况局部电弧会从钢脚产生,逐渐发展到上表面。由于此时电弧已经跨接绝缘子下表面相当长度的泄漏距离,大部分电压都加在上表面,虽然上表面处于憎水性环境有利于提高绝缘子表面污秽的剩余电阻,但是此时局部电弧电流较大,电弧发展速度较快,电弧很容易跨接上表面形成闪络。从而,上表面泄漏距离及憎水性状态得不到有效利用。

3 RTV 涂层破损后表面电场情况的仿真研究

利用有限元多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 对不同 RTV 涂层破损情况下的绝缘表面电场分布情况进行计算研究,所有破损情况参考表 1。高压端 RTV 涂层破损时的计算结果见图 4。由于高压端 RTV 破损变为亲水性,饱和受潮后高压端形成连续水膜,而 RTV 涂层存在区域形成若干小水滴,此时电压主要由 RTV 涂层未发生破损的区域承担,因此,会导致 RTV 未破损区域电场较强,且破损交界处电场畸变最为严重,见图 5。从图 5 可知,此处电场畸变严重,极易产生局部水珠电晕放电,污闪试验过程中也观察到了水珠放电的现象。

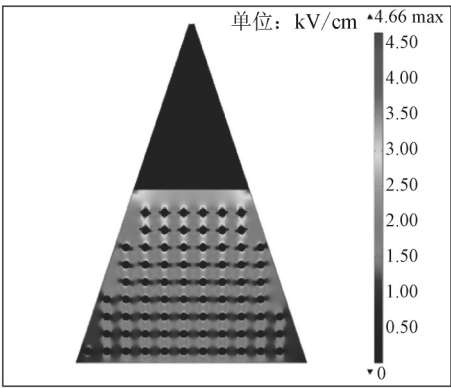


图 4 高压端 RTV 涂层破损的电场分布情况
Fig. 4 Electric field distribution on the surface of insulation

不同 RTV 涂层破损情况下的绝缘表面电场情况的计算结果见表 5。从表 5 可知:①绝缘子表面 RTV 的破损会导致电场畸变,导致绝缘表面更易出现局部放电,尤其是 RTV 涂层破损区域的边沿。②RTV 沿泄漏距离方向缺损越长,电场畸变越大,越容易发生局部放电。③RTV 涂层表面的放电,会加速 RTV 涂层的老化和憎水性丧失,降低其使用寿命。

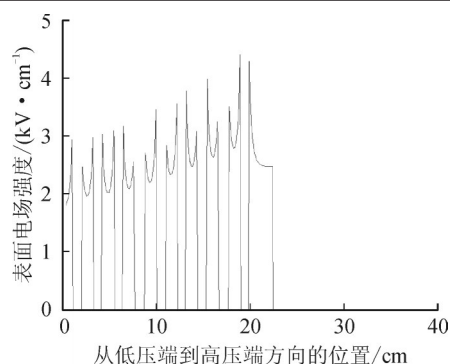


图5 高压端RTV涂层破损的电场分布情况(沿泄漏距离)

Fig. 5 Electric field distribution along the creep direction

表5 沿泄漏距离方向上电场的最大值

Table 5 The maximum electric field along the creep direction

表面状态	电场最大值/(kV·cm ⁻¹)
全破损	2.7
无破损	3.2
贯穿性破损	0.2
高压端破损	4.5
低压端破损	3.4
中压端破损1(短轴)	3.5
中压端破损2(长轴)	3.7

5 结论

1)绝缘子表面RTV涂层破损区域沿泄漏(爬电)距离方向等效长度越长,对其污闪性能的下降越严重,沿泄漏(爬电)距离方向的贯通性RTV涂层破损情况对其污闪性能下降影响最严重。

2)绝缘子表面RTV涂层局部破损区域发生位置不同对其污闪性能的影响程度也不同,局部破损区域发生在高压端钢脚附近的情况影响程度较小。

3)绝缘子表面RTV涂层局部破损现象会改变其沿面电场的分布,导致其他未破损区域的电压降和电场增大;在大雾、毛毛雨等湿润天气,未破损区域的边沿容易产生电晕放电,加速RTV涂层的老化和憎水性丧失,减少其应用寿命。

参考文献:

[1] 关志成,刘瑛岩,周远翔,等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006:182-259.
GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang, et al. Insulators and outdoor insulation of power transmission equipments[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 182-259.

[2] 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.

[3] 梁志豪. 绝缘子污闪的形成机理及预防措施[J]. 广东电力,2013,26(6):87-92.
LIANG Zhihao, Formation mechanism of insulator pollution flashover and preventive measures[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(6):87-92.

[4] 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):61-65.
ZHU Keneng, GUAN Zhicheng, JIA Zhidong. RTV silicone rubber coating and its application in tianjin power system[J], Electric Power, 2002, 35(5): 61-65.

[5] 王永强,律方成,刘孝义. 新型RTV涂料防污闪性能的实验研究[J]. 高压电器,2004,40(6): 457-458.
WANG Yongqiang, LYU Fangcheng, LIU Xiaoyi. Experimental study on new type rtv coating's capability to prevent contamination[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(6): 457-458.

[6] 陈智巧. 绝缘子防污闪涂料的研制[D]. 长沙:湖南大学,2008.
CHEN Zhiqiao. Development of anti-pollution flashover coating for insulators[D]. Changsha:Hunan University, 2008.

[7] 张恩超,李旭,苏玉婷,等,RTV防污闪涂料在西安电网的应用研究[J]. 陕西电力,2012,40(2): 50-51.
ZHANG Enchao, LI Xu, SU Yuting, et al, Application of RTV coatings in Xi'an power grid[J]. Shannxi Electric Power, 2012, 40(2): 50-51.

[8] 贾志东,胡亚荣,关志成,等. 半导体涂层绝缘子的污闪特性[J]. 电网技术,2015,39(9): 2633-2639.
JIA Zhidong, HU Yarong, GUAN Zhicheng, et al. AC pollution flashover performance of insulator strings partially treated with semiconductive RTV coating[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2633-2639.

[9] 黄青丹,尤金伟,宋浩永,等. 不同类型RTV憎水性及闪络特性分析[J]. 电力建设,2015,36(5):45-51.
HUANG Qingdan, YOU Jingwei, SONG Haoyong, et al, Hydrophobicity and flashover characteristics analysis of various types of RTV[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 45-51.

[10] 王博,田禄,闫振华,等. RTV涂料复涂技术关键问题研究[J]. 陕西电力,2015,43(8): 17-21.
WANG Bo, TIAN Lu, YAN Zhenhua, et al. Study on several key problems in RTV recoating technology[J]. Shannxi Electric Power, 2015, 43(8): 17-21.

[11] 白欢,陈洪波,李亚伟,等. RTV硅橡胶防污闪涂层运行情况分析[J]. 有机硅材料,2015,29(2): 116-120.
BAI Huan, CHEN Hongbo, LI Yawei, et al. Discussion on operating performance of RTV silicone rubber coating[J]. Silicone Material, 2015, 29(2):116-120.

[12] 卢明,胡扬宇,周德波. 基胶与填料对RTV硅橡胶防污

- 闪涂层憎水迁移性的影响[J]. 有机硅材料, 2015, 29(2): 79-83.
- LU Ming, HU Yangyu, ZHOU Debo. Effects of base rubber and fillers on hydrophobic-migration of RTV silicone rubber anti-fouling flashover coatings[J]. Silicone Material, 2015, 29(2): 79-83.
- [13] 黄峻峰, 齐卫东, 张 鹏. RTV 涂料长期运行后性能分析及复涂方法的研究[J]. 陕西电力, 2007, 35(4): 43-46.
- HUANG Junfeng, QI Weidong, ZHANG Peng. Research on performance analysis and recoating method of RTV coating after long-term running[J]. Shanxi Electric Power, 2007, 35(4) 43-46.
- [14] 徐志钮, 律方成, 刘云鹏, 等. 室温硫化与高温硫化硅橡胶在交流电晕下憎水特性的比较[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1916-1923.
- XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LIU Yunpeng, et al. Influence of AC corona on HTV and RTV hydrophobicity loss and recover[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1916-1923.
- [15] 孟 岩, 石海珍, 杨继红, 等. 绝缘子表面 RTV 憎水性与其放电的紫外成像结果关系研究[J]. 环境技术, 2016(1): 5-8.
- MENG Yan, SHI Haizhen, YANG Jihong, et al. Study on the relationship between the hydrophobicity of RTV on insulator surface and the UV imaging results of the discharge[J]. Environment Engineering, 2016(1): 5-8.
- [16] 李 桐. 广东地区使用的 RTV 防污闪涂料老化特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- LI Tong. Study on the aging characteristics of RTV coating used in Guangdong area[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [17] 高海峰, 贾志东, 关志成. 运行多年 RTV 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.
- GAO Haifeng, JIA Zhidong, GUAN Zhicheng. Aging study on RTV coating covered on insulators and energized for many years[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 158-163.
- [18] 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.
- [19] 吴明雷, 邹 淮, 王永福, 等. 不均匀憎水性对线路绝缘子防污效果的影响[J]. 环境技术, 2014(5): 5-9.
- WU Minglei, ZHOU Huai, WANG Yongfu, et al. Effect of uneven hydrophobicity on anti - pollution flashover performance of line insulators[J]. Environment Testing, 2014(5): 5-9.
- [20] 李 桐. RTV 涂层表面憎水分布对其防污闪性能的影响[J]. 宁夏电力, 2015(2): 31-36.
- LI Tong. Influence of the hydrophobic distribution of RTV on its pollution flashover resistance performance[J]. Ningxia Electric Power, 2015(2): 31-36.
- 伏祥运(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事输电线路运维和电网调度运行分析方面的研究工作。