

复合绝缘子污层弱憎水性条件下的表面水滴形态

吴浩哲, 高克利, 周 军, 于昕哲

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要: 研究固体污层法中复合绝缘子表面的弱憎水性污层对高压线设计优化具有重要意义。采用调节污层惰性成分中硅藻土和高岭土的质量比实现对迁移一定时间后污层表面憎水性的微调, 得到经过细分的亲水性及弱憎水性污层。本文观察了不同成分污层表面水滴的形态变化且针对具有不同成分污层的复合绝缘子, 并进行人工污秽试验。利用傅里叶变换红外光谱分析手段实现对迁移前后弱憎水性污层中小分子扩散情况的检测。试验结果表明: 复合绝缘子表面污层呈弱憎水性时, 虽然传统的憎水性表征——喷水分级及静态接触角测量结果同完全亲水性时相似, 但内部出现了明显的憎水性小分子迁移现象。这些小分子出现在污层内部的后果是对水滴渗入污层过程产生抑制作用, 该抑制作用会对水滴在污层表面扩散过程中的形态产生影响。进一步地, 这些影响还将在污闪试验中妨碍盐分的浸出, 使闪络电压升高。

关键词: 人工污秽; 弱憎水性; 小分子; 表面水滴; 闪络

Water Droplet Shape on Surfaces of Composite Insulators with Contamination Under Unobvious Hydrophobic State

WU Haozhe, GAO Keli, ZHOU Jun, YU Xinzhe

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Study on the property of a unobvious hydrophobic contaminated layer on the surface of composite insulators by the solid layer method is of great significance for transmission line designing. The hydrophobicity of the surface of migrated insulators for a certain period of time was adjusted by adjusting the proportion of diatomite and kaolin in the artificial contamination. In this way, contamination under hydrophilic and unobvious hydrophobic conditions were obtained. Changing of the shape of water droplets on the surface under different conditions were observed. Flashover test was carried out on composite insulators with different compositions. The detection of small molecule diffusion in unobvious hydrophobic contamination before and after migration was observed by Fourier transform infrared spectroscopy. The results show that, under unobvious hydrophobic condition, although the traditional hydrophobic characterization - water spray method and static contact angle result are basically the same as the complete hydrophilic condition, low molecule weight migration is observed. The consequence of these low molecule weight in contaminated layer is the inhibition of the infiltration of water droplets into soil, which will affect the shape variation of the water droplets during the surface diffusion process. Furthermore, these effects will also prevent leaching of salts in the flashover test, leading to increase in flashover voltage.

Key words: artificial pollution; unobvious hydrophobicity; low molecule weight; surface water droplet; flashover

0 引言

在高压输电线路中, 相较于传统使用的瓷质绝缘子和玻璃绝缘子, 复合绝缘子具有更优良的憎水性和憎水迁移性^[1-2], 在耐污闪性能上有更出色的表现。因此复合绝缘子在电力系统中得到越来越广泛的应用^[3-5]。由于长期在恶劣的电气及气候条件下运行, 复合绝缘子会出现憎水性下降或迁移性减弱, 导致表面污秽难以获得憎水性的情况^[6-8]。因此, 为保证绝缘裕度, 在输电线路外绝缘设计时, 对复合

绝缘子通常也需要以其表面呈现亲水性条件下的闪络特性作为依据。

在绝缘子污秽试验中, 通常使用硅藻土和高岭土模拟污秽中不溶成分。这两者在复合绝缘子憎水性迁移过程中体现出截然不同的性质。文献[9-10]采用电气试验和扫描电镜、热重分析、傅里叶变换红外光谱分析等理化分析手段, 研究了污秽成分对憎水性迁移过程的影响。灰的成分方面, 由于高岭土微观上呈现致密的片状结构, 而硅藻土较为疏松, 内部存在大量空隙, 有利于憎水性小分子 (low

molecule weight, LMW) 的通过和吸附, 所以硅藻土的憎水迁移性远高于高岭土。

实际情况中, 即使长期运行在极度恶劣的条件下复合绝缘子表面仍会保留一定的憎水性而非达到完全亲水状态^[11-12]。若将亲水性表面的污闪特性作为复合绝缘子的绝缘距离设计依据, 则存在绝缘裕度过大, 导致线路建设成本过高的问题。在特高压电网建设的背景下, 线路电压更高, 要求绝缘子结构高度更长, 输电线路杆塔高度更高。在我国线路建设工程中, 杆塔造价可达工程总造价 30% 左右^[13]。因此在保证安全运行的前提下, 通过设计更合理的绝缘裕度, 适当降低绝缘子结构高度, 从而优化线路杆塔高度, 可以显著减少特高压输电线路的建设成本。

英国学者进行了染污 RTV 平板表面单水滴的升压闪络试验, 研究水滴的静态接触角、闪络电压和迁移时间的关系, 发现水滴静态接触角从亲水性的 0° 到具有微弱憎水性的 30° 过程中, 闪络电压上升了 120%^[14]。华北电力大学针对具有弱憎水性污秽的复合绝缘子进行了污闪试验, 发现分离水珠可以存在于完全湿润的污秽表面, 认为这一现象可以将闪络电压较亲水性情况提高 40%^[15]。清华大学深圳研究院针对绝缘子表面污秽弱憎水性的界定和描述方法进行了一系列研究, 提出了液滴面积法, 将 HC7 憎水等级进行了进一步细分^[13, 16]。

目前针对弱憎水性情况下, 复合绝缘子在污闪试验中所体现出特殊规律的内在机制研究较少。本文用调节灰分中硅藻土和高岭土质量分数的方法, 实现具有不同憎水性污层表面的模拟, 对污层表面水滴形态进行研究。在此基础上, 借助红外光谱分析, 检测污层内 LMW 迁移情况, 分析了 LMW 迁移对水滴渗入污层的影响, 并进一步讨论了这些理化特性同污层弱憎水性条件下复合绝缘子闪络特性的关系。

1 试验样品及方法

试品分为硅橡胶试片和复合绝缘子两类。试片尺寸为 14 cm×14 cm, 用于观察水滴在污层表面的静态接触角及液滴扩散情况。复合绝缘子采用山东泰光电气有限公司生产的 FXBW-210 型交流棒形悬式复合绝缘子, 用于观察不同灰分条件下的闪络特性。其外形见图 1, 伞型参数见表 1。

试验中的涂污方法基于 GB/T4585—2004/IEC

60507:1991 推荐的固体污层法, 污层中可溶成分为纯度 (质量分数) 99.5% 的 NaCl, 盐密为 0.25 mg/cm²。不溶惰性物质为高岭土和硅藻土的混合物, 其中实验采用的高岭土基本特征如表 2 所示, 硅藻土基本特征如表 3 所示。试品统一在温度 25 ℃、湿度 75% 条件下迁移 24 h。通过调整高岭土和硅藻土的质量比, 得到具有不同憎水性的污层。

用静态接触角来表征不同灰层获得憎水性的基本情况, 静态接触角测试采用 SL200D 型接触角仪。在试片不同位置测量静态接触角, 仪器测量精确度为 0.01°, 但在测量中, 污层呈弱憎水性时, 将会出现水滴与污层交界面趋于模糊的情况, 如图 2 所示, 导致实际测量精确度会随憎水性降低而下降, 因此更有必要采用液滴面积法对污层表面憎水性情况进行补充描述。



图 1 FXBW-210 绝缘子外形

Fig.1 Profile of insulator FXBW-210

表 1 FXBW-210 绝缘子伞型参数
Table 1 Parameters of insulator FXBW-210

伞形	结构高度 /mm	盘径 /mm	爬距 /mm	伞间距 /mm	绝缘高度 /mm
一大二小	9 000	222/155/40	29 315	150/40/45	8 630

表 2 高岭土基本特征

Table 2 Parameters of Kaolin

颗粒度/%			化学成分质量分数/%							
$r<0.2$ μm	$r<1$ μm	$r<10$ μm	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	I.L	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
16	45	84	57.82	1.24	28.75	9.40	0.25	0.18	1.67	0.60

注: r 为颗粒粒径。

表 3 硅藻土基本特征

Table 3 Parameters of diatomite

物理特性			化学成分质量分数/%			
颜色	150 目筛余	渗透率	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O
乳白	<6%	0.8 D	90.8	3.7	1.3	0.4

水滴扩散情况的观测参考文献[16]和文献[17]中的液滴面积法,垂直拍摄染污试片表面 $10\ \mu\text{L}$ 水滴在 15min 时间内的扩散过程。分析所得图像中水滴投影区域的大小,可计算出水滴面积。由于弱憎水性下水滴渗入情况的出现,试验所观察到的水滴由本体的铺展部分和水滴湿润污层形成的渲染部分两部分组成。分析中,以铺展部分面积为铺展面积,铺展部分和渲染部分面积二者之和为渲染面积。

闪络试验电压为交流,采用先对染污的绝缘子施加电压、然后用清洁雾进行湿润、持续至闪络或耐受结束的方法。以升降法获取 50% 闪络电压。每种污秽度下通常进行 10 次以上有效试验,并以这 10 次的试验数据来求取给定污秽度下的 50% 闪络电压 $U_{50\%}$, 计算式为:

$$U_{50\%} = \frac{\sum (n_i U_i)}{n} \quad (1)$$

式中: U_i 为试验电压, kV; n_i 为在相同的施加电压水平 U_i 下进行的试验次数; n 为有效试验的次数。

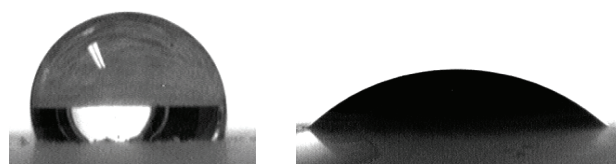
2 试验结果

硅藻土占不同质量分数时测得的静态接触角如图 3 所示。静态接触角随硅藻土质量分数的变化趋势存在一个逐渐增强的过程。从灰分为纯高岭土到硅藻土与高岭土质量比为 1:20 过程中,接触角变化不超过 1° ; 硅藻土与高岭土质量比为 1:10 时,接触角较纯高岭土情况提高 2.4° , 而当二者质量比为 1:4 时,提升幅度达到了 9.5° 。

在水滴扩散试验中,对于不同成分的污秽,水滴面积均可在 15min 内可达最大值。记水滴落到污秽表面 3s 时面积为初始面积,水滴扩散过程中面积最大值为最大面积,分别对渲染面积和铺展面积进行记录,如图 4 所示。

水滴初始面积随硅藻土在污秽中质量分数增加,污秽表面憎水性增强,呈现减小的趋势。硅藻土质量分数从 0 到 20% 范围内,初始铺展面积缩小 10.0%, 初始渲染面积缩小 8.3%。

水滴最大铺展面积表现出同初始面积相似的规律,而最大渲染面积由于水滴渗入污层过程受到灰层成分、表面不均匀性、涂污纹理等各方面因素影响,不确定性强,呈现出越来越大的分散性,无法作为进一步研究的参考依据。最大铺展面积同静态接触角相似,出现随表面憎水性增强,水滴面积对硅藻土质量分数的反映趋于明显的现象。从纯高



(a) 强憎水性情况

(b) 弱憎水性情况

图 2 水滴与污层界面

Fig.2 Interface of droplet and dirty layer

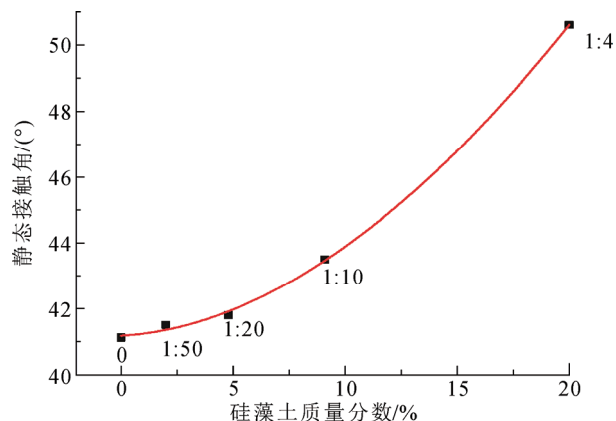


图 3 静态接触角

Fig.3 Static contact angle

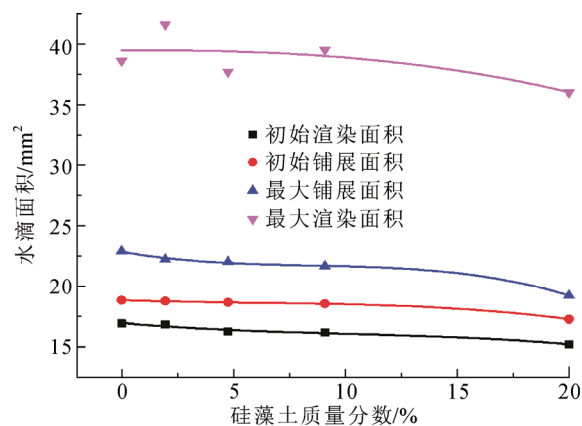


图 4 水滴面积

Fig.4 Water droplet area

岭土到硅藻土与高岭土质量比为 1:10, 最大铺展面积减小 5.4%。硅藻土与高岭土质量比达 1:4 时, 最大铺展面积较纯高岭土情况缩小 16.2%。

闪络电压随硅藻土质量分数提升而升高的过程体现出相当剧烈的变化, 如图 5 所示。纯高岭土到硅藻土与高岭土质量比为 1:10 过程中, 闪络电压呈现相当显著的提升, 幅度达 34.9%。而硅藻土和高岭土质量比由 1:10 变化到 1:1, 闪络电压仅提升

9.4%。灰层中硅藻土与高岭土质量比在 1:10 附近时闪络电压处于拐点。该质量比下的弱憎水性污层交流闪络电压较亲水性表面闪络电压有大幅提升, 而随硅藻土质量分数进一步提升, 闪络电压变化速率趋于平缓。

3 讨论

3.1 水滴扩散过程中面积变化

水滴在灰层表面的扩散过程中, 铺展系数

$$S = -(\gamma_{ls} + \gamma_{gl} - \gamma_{gs}) \quad (2)$$

式中: γ_{ls} 为固液表面张力; γ_{gl} 为气液表面张力; γ_{gs} 为固气表面张力。

而静态接触角 θ 则遵从 Young 方程

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{gs} - \gamma_{ls}}{\gamma_{gl}} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知, 静态接触角和水滴扩散能力描述的物理本质相同, 均为界面张力情况。因此静态接触角同液滴面积变化的试验结果可以互相解释。但对于弱憎水性条件下的实际污层, 液滴面积变化不仅在测量时能够达到更高的准确度, 还能提供关于污层表面细节特征的更多信息。

对水滴铺展面积随时间变化规律进行分析, 定义初始时铺展面积扩张比例为 0, 铺展达最大值时, 扩张比例为 1, 如图 6 所示。可以发现, 随灰分中硅藻土质量比的增加, 液滴铺展到最大面积的速度明显加快, 当硅藻土与高岭土质量比 1:10 时还呈现出水滴铺展面积达到峰值迅速减小情况, 这一变化趋势会随着憎水性的进一步提升而逐渐减弱。极限情况下, 对于硅藻土构成的强憎水性污层, 水滴独立于固体界面, 观察不到铺展和渗入现象, 扩张比例始终保持在 100%。

对以上现象分析如下: 污层表面憎水性越强, 初始液滴越小, 铺展所需水量越小。同时, 憎水性越强, 铺展能力越弱, 本身铺展量越小。两方面共同作用下, 使得达到最大铺展面积所用时间较铺展面积本身呈现出更为明显的变化规律。另一方面, 水滴的铺展过程中, 同时存在水滴扩展和由于蒸发和渗入灰层导致流失两种趋势。显然, 流失效果会随水滴面积增大而增强, 而铺展能力随着水滴的流失而减弱。对于纯高岭土灰层, 铺展能力明显强于流失能力, 体现为水滴不断铺展, 直至达到最大值。而加入硅藻土后, 水滴铺展能力减弱, 可能在较早时刻便达到平衡, 停止扩散。当硅藻土与高岭土质

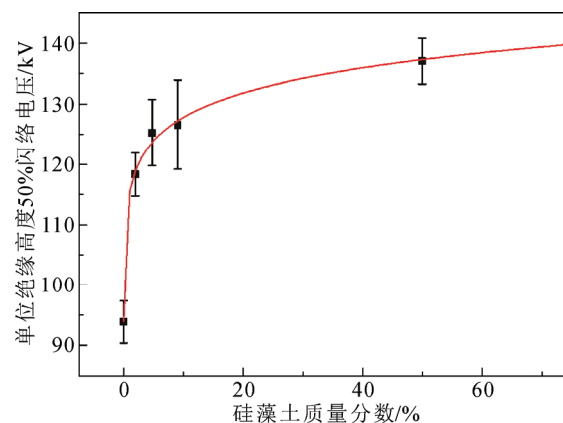


图 5 闪络电压

Fig.5 Flashover voltage

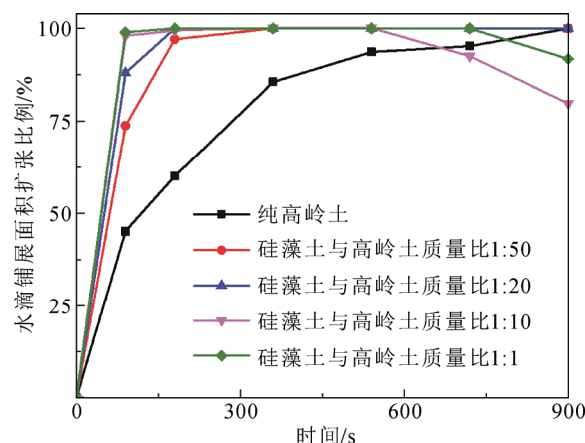


图 6 不同灰分水滴铺展面积随时间变化规律

Fig.6 Droplet area change with time under different contamination component

量比达到 1:10 时, 水滴铺展能力已较弱, 在铺展面积达到最大值后, 铺展能力随水的流失进一步减弱, 在达到平衡后很快便几乎消失, 水滴在流失作用单方面影响下, 开始缩小。随着硅藻土质量分数进一步增加, 水滴本身表面积减小, 流失能力减弱, 缩小趋势反而得到缓解。

3.2 污层中 LMW 扩散情况

选取硅藻土与高岭土质量比为 1:10 的污秽, 采用傅里叶变换红外光谱分析手段分析迁移前后污层中 LMW 迁移情况如图 7 所示。依据目前的小分子理论, LMW 为二甲基硅油同系物。在判断迁移情况时, 主要观察位于 $1\ 260\ \text{cm}^{-1}$ 处 Si—Me 的振动和 $2\ 962\ \text{cm}^{-1}$ 处甲基中 C—H 振动形成的特征峰。对比迁移前后的红外光谱, 可明显发现迁移后这两个特征峰的出现。这说明尽管此时污层表面没有获得明显的憎水性, 污层内部已经出现相当程度的 LMW 迁移情况。

在试验所用灰分中, 疏松多孔的硅藻土在致密的高岭土内为 LMW 的迁移提供了通道。在憎水性迁移过程中(考虑短时间内近似稳态情况), 依据 Fick 定律:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4)$$

式中: J 为扩散通量; c 为扩散物质质量浓度; D 为扩散系数。LMW 在通道中扩散通量的同浓度梯度呈正比。硅藻土在污秽中所占质量分数越高, 通道越多, 相同数量 LMW 扩散到污层表面或通道外污秽部分所需的浓度梯度越小, 因而体现出越强的憎水性迁移能力。

对于污秽试验中用高岭土模拟的亲水性情况, 通道少, LMW 迁移缓慢, 在一般试验周期内, 仅有很少量 LMW 从硅橡胶表面迁移出来。而对于硅藻土模拟的强憎水性情况, LMW 则快速迁移, 很快达到新的平衡态, 即 LMW 在污层内部和表面充分分布。因此, 在研究复合绝缘子表面污层憎水性问题时, 污层内部 LMW 的分布状况较少被关注。对于弱憎水性污层, 其表面 LMW 极少, 近似亲水性, 此时, 污层内部的 LMW 影响将变得不可忽略。

3.3 污层内 LMW 对水滴渗入及闪络电压的影响

污层内部的 LMW 会对水滴的渗入造成影响。对于亲水性污秽, 水滴通过毛细孔渗入污层中, 如图 8(a)所示。由于 LMW 未扩散到毛细孔周围污层中, 亲水性毛细管壁导致管内的水柱呈凹液面。此时, 依据 Young-Laplace 方程

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R_1} \quad (5)$$

式中: ΔP 为附加压力; γ 为表面张力; R_1 为液面曲率半径。凹液面的曲率半径取负值, 因此液面附加压力指向污层内部, 对水滴的进一步渗入起促进作用。

而对于 LMW 充分扩散到污层中的情况, 污秽内部的毛细管壁呈现出较表面更强的憎水性, 且越渗入污层内部, 憎水性越强, 导致水滴渗入毛细管后, 液面呈现凸液面。此时液面曲率半径为正值, 附加压力指向污层外部, 阻碍水滴的进一步渗入。

污层内部 LMW 对水滴渗入的阻碍进一步解释了弱憎水性污层在水滴扩散试验中所体现出的水滴铺展面积很快达到峰值、而后迅速开始收缩的现象。一方面, 相较于亲水性情况, 污层弱憎水性时, 水滴渗入趋势弱, 因此铺展速度较快。另一方面, 由

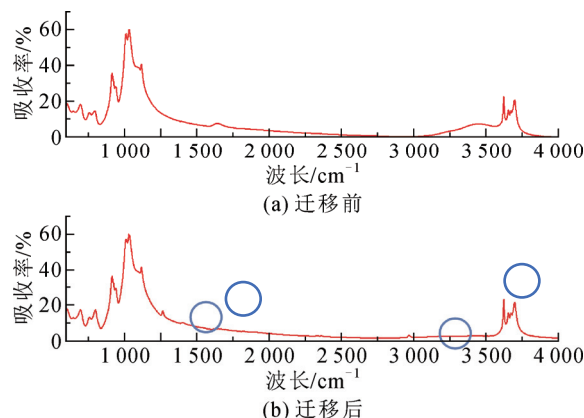


图7 迁移前后污层的红外图谱(弱憎水性情况)

Fig.7 Infrared spectra of contamination before and after migration (unobvious hydrophobic state)

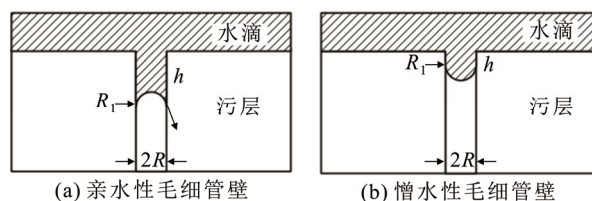


图8 水滴通过毛细孔渗入污秽内部情况

Fig.8 Water droplet penetrate through capillary

于渗入毛细管中的水分很少, 表面水分蒸发后, 便很快呈现出铺展面积收缩的现象。

LMW 对水滴渗入过程的阻碍还将影响到闪络特性。弱憎水性污层的水滴浸润较亲水性情况更为困难, 其结果是污层中的盐分也更难渗出。同时, 污层中盐分的憎水性小分子可能包覆在可溶性成分表面, 进一步阻碍盐分迁移。因此, 本研究中弱憎水性污层内部, LMW 通过提升毛细孔的憎水性和改变表面张力方向, 使得污层表面的水滴难以浸润至污层内部, 降低了污层中实际可溶解的有效盐含量, 起到了与憎水性表面相似的效果, 对污闪电压的提升有促进作用。

4 结论

1) 采用控制人工污秽中硅藻土和高岭土质量比的方式, 实现对污秽表面憎水性的微调。所得污层表面的静态接触角和水滴铺展面积最大值均呈现出由纯高岭土到硅藻土与高岭土质量比 1:10 范围内变化不明显, 随硅藻土质量分数进一步提升, 变化幅度趋于显著的规律。

2) 具有不同憎水性污层的复合绝缘子闪络试

验结果表明, 闪络电压的提升集中在纯高岭土到硅藻土与高岭土质量比 1:10 范围内, 在物理憎水性指标差异不大的前提下, 闪络电压提升幅度达 34.9%。

3) 采用红外傅里叶光谱分析研究弱憎水性污层中 LMW 迁移情况, 确认了弱憎水性污层内部存在相当数量 LMW 的事实。

4) 分析污层内部 LMW 对阻碍水滴渗入的机制, 得出弱憎水性污层中 LMW 的分布影响表面水滴形态变化的结论。

参考文献 References

- [1] 关志成, 王绍武, 梁曦东, 等. 我国电力系统绝缘子污闪事故及其对策[J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 36-39.
GUAN Zhicheng, WANG Shaowu, LIANG Xidong, et al. Application and prospect of polymeric outdoor insulation in China[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(6): 36-39.
- [2] 关志成, 陈 原, 梁曦东, 等. 硅橡胶合成绝缘子染污放电机理的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(5): 16-19.
GUAN Zhicheng, CHEN Yuan, LIANG Xidong, et al. Flashover mechanism of silicone rubber composite insulators[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1999, 39(5): 16-19.
- [3] 宿志一, 范建斌. 复合绝缘子用于高压及特高压直流输电线路的可靠性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 16-23.
SU Zhiyi, FAN Jianbin. Research on reliability of composite insulators used in EHV and UHV DC transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 16-23.
- [4] HALL J F. History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(1): 376-385.
- [5] 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.
- [6] ROWLAND S M, XIONG Y, ROBERTSON J, et al. Aging of silicone rubber composite insulators on 400kV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 130-136.
- [7] 于昕哲, 张乔根, 杨晓磊, 等. 表面憎水性不均匀分布时复合绝缘子污闪特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3892-3899.
YU Xinzhe, ZHANG Qiaogen, YANG Xiaolei, et al. Pollution flashover characteristic of composite insulator with non-uniform hydrophobicity distribution on surfaces[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3892-3899.
- [8] TOKORO T, HACKAM R. Loss and recovery of hydrophobicity and surface energy of HTV silicone rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1088-1097.
- [9] 关志成, 牛 康, 彭功茂, 等. 硅藻土特性对复合绝缘子人工污秽试验的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2383-2388.
GUAN Zhicheng, NIU Kang, PENG Gongmao, et al. Influence of Kieselguhr characteristics on artificial pollution test of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2383-2388.
- [10] 戴罕奇, 梅红伟, 王希林, 等. HTV 硅橡胶用不同高岭土染污后的憎水迁移特性对比[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.
- [11] GORUR R S, SCHNEIDER H M, CARTWRIGHT J, et al. Surface resistance measurements on nonceramic insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 801-805.
- [12] FONG F. Operational experience on HVDC and HVAC insulators at Sylmar converter station[C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, USA: IEEE, 2002: 216-219.
- [13] 戴罕奇, 梅红伟, 王黎明, 等. 复合绝缘子弱憎水性状态描述方法 I——静态接触角法的适用性[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 34-47.
DAI Hanqi, MEI Hongwei, WANG Liming, et al. Description method I for unobvious hydrophobic state of composite insulators—usability of contact angle method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 34-47.
- [14] SWIFT D A, SPELLMAN C, HADDAD A. Hydrophobicity transfer from silicone rubber to adhering pollutants and its effect on insulator performance[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(4): 820-829.
- [15] 赵林杰. 硅橡胶复合绝缘子憎水性与污闪特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
ZHAO Linjie. Study on the hydrophobicity and pollution flashover properties of silicone rubber composite insulator [D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2008.
- [16] 戴罕奇, 梅红伟, 王黎明, 等. 复合绝缘子弱憎水性状态描述方法 III——液滴面积法的适用性[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 322-332.
DAI Hanqi, MEI Hongwei, WANG Liming, et al. Description method III—for unobvious hydrophobic state of composite insulators usability of droplet area method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 322-332.
- [17] 李 杰, 周志成, 高 嵩, 等. 憎水性材料表面液滴面积分析方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1518-1526.
LI Jie, ZHOU Zhicheng, GAO Song, et al. Droplet area measurement method for hydrophobic state description[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1518-1526.



WU Haozhe

Corresponding author

吴浩哲(通信作者)

1989—, 男, 硕士

主要从事高电压外绝缘方面研究

E-mail: wuhaozhe89@126.com



GAO Keli

Professor

高克利

1966—, 男, 教授级高工

主要从事高电压技术研究



ZHOU Jun

Professor

周 军

1973—, 男, 教授级高工

主要从事高电压外绝缘方面研究