

典型不溶污秽染污绝缘子在不同环境湿度下的吸水和闪络特性研究

王远东¹, 史文江¹, 杨忠毅^{2,3}, 蒋兴良², 张超¹, 张志劲²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司检修分公司, 内蒙古 通辽 028114;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

3. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:污秽绝缘子在表面湿润达到一定程度时容易发生放电甚至闪络,此现象严重威胁着输电线路的安全稳定运行。本文针对绝缘子表面常见的3种不溶污秽成分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ,分别开展了不同环境湿度下的不溶物吸水试验和绝缘子闪络试验,并对试验结果进行了分析,探究环境湿度对不溶物吸水特性和绝缘子闪络特性的影响。结果表明: SiO_2 的吸水性最好, Al_2O_3 次之, Fe_2O_3 吸水性极弱或无吸水性; SiO_2 和 Al_2O_3 随着环境湿度的增加,吸水速度变快,且饱和吸水量增高;在饱和湿度下, SiO_2 和 Al_2O_3 染污绝缘子的表面污秽容易随着水滴的滴落而流失;绝缘子污闪电压梯度随环境湿度的增大而减小,此种现象在湿度较低的情况下表现得愈加明显。

关键词:绝缘子;不溶污秽;环境湿度;吸水特性;闪络特性

中图分类号:TM216 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)05-0092-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.05.014

Moisture Absorption and Flashover Properties of Insulators Polluted with Typical Non-soluble Contaminates in Various Environment Humidity

WANG Yuandong¹, SHI Wenjiang¹, YANG Zhongyi^{2,3}, JIANG Xingliang², ZHANG Chao¹, ZHANG Zhijin²

(1. Maintenance Branch, State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd., Tongliao 028114,

China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New

Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. School of Electrical and Information

Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Polluted insulators are easy to discharge or even flashover when the surface is wet to a certain extent, which seriously threatens the safety and stability of power grid. In this paper, in view of three kinds of common insoluble contaminants SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , we conducted water absorption tests and insulator flashover tests under different environmental humidity, and the influence of environment humidity on the water absorption and flashover properties of insulators polluted with typical insoluble contaminants were analyzed. The results show that the SiO_2 has the best water absorption property, the Al_2O_3 is followed, and the Fe_2O_3 has extremely weak water absorption property or cannot absorb water absolutely. The moisture absorption rate and saturated moisture content of SiO_2 and Al_2O_3 tend to increase with the increase of environment humidity. In the situation of saturated humidity, the surface contamination of insulators polluted by SiO_2 and Al_2O_3 may be washed away with the dripping process of

收稿日期:2020-07-01 修回日期:2020-08-11

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGMDJX00YJJS1900693)

作者简介:王远东(1969-),男(汉族),内蒙古赤峰人,高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术的研究;通信作者:杨忠毅(1990-),男(汉族),重庆人,讲师,博士,主要从事高电压与绝缘技术的研究。

liquid droplets. The pollution flashover voltage gradient of insulators decreases with the increase of environmental humidity, and this phenomenon is more obvious in low humidity.

Key words: insulator; non-soluble contaminate; environment humidity; water absorption property; flashover property

0 引言

绝缘子是电力系统外绝缘中的重要部件,其工作正常与否直接影响着输电线路的安全稳定运行。近年来,输电线路绝缘子污秽闪络事故时有发生,统计表明,绝缘子污闪事故影响范围广,重合闸成功率低,对电力行业和国民经济造成了较大的经济损失^[1-4]。

不溶污秽成分主要是通过吸水和保水作用对绝缘子电气特性产生影响^[5]。污秽绝缘子在环境饱和湿度时最容易发生闪络事故,然而在一些重污秽地区,非饱和湿度条件下,绝缘子仍然存在着闪络的风险。绝缘子表面不溶污秽成分的吸水特性随环境湿度的变化而存在差异,导致污秽绝缘子在不同环境湿度下的闪络特性也存在差异^[6-8]。

国内外学者针对外绝缘污秽闪络展开了大量研究,也取得了一定成果^[9-10]。然而,现有研究主要着眼于研究饱和湿度条件下绝缘子的电气特性^[11]。有关环境湿度、污层湿润程度、不溶污秽吸水性及其对绝缘子电气性能的影响研究,大多采用硅藻土或高岭土模拟绝缘子表面的不溶污秽,其试验结果随着模拟物质中纯净物含量的不同而存在差异,导致试验结果在实际工程应用中具有一定的局限性^[12]。

本文针对绝缘子表面常见的3种不溶污秽成分 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ,分别开展不同环境湿度下的不溶物吸水试验和绝缘子闪络试验,并对试验结果进行分析,探究环境湿度对不溶物吸水特性和绝缘子闪络特性的影响。

1 试验

1.1 试品与试验装置

试验分为不同环境湿度下的不溶物吸水试验和绝缘子闪络试验两部分。外绝缘污秽试验中,常用硅藻土和高岭土模拟绝缘子表面不溶污秽成分^[13-16]。硅藻土是一种混合物,无固定分子结构,其主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ;高岭土是一种层状硅酸盐矿物,其主要成分为高岭石,化学式为 $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。研究表明,外绝缘不溶污秽由多种物质组成,其吸水特性并非单一物质及固定组

分所能模拟的^[17-19]。

本文采用绝缘子表面不溶污秽成分中含量相对较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为试验对象。在吸水试验中,以玻璃烧杯和XP-70瓷绝缘子为载体,分别研究3种不溶污秽在无水分流失情况下和实际绝缘子运行情况下的吸水特性。在绝缘子闪络试验中,以XP₄-160瓷绝缘子和LXY₄-160玻璃绝缘子为试品,研究在不同环境湿度下,3种常见不溶污秽污染绝缘子的闪络特性及规律。试品绝缘子的技术参数如表1所示,其中 H 为绝缘子的结构高度, L 为绝缘子的泄漏距离, D 为绝缘子盘径。

表1 试品绝缘子的技术参数

Tab. 1 Technical parameters of tested insulator

型号	材质	H/mm	L/mm	D/mm
XP ₄ -160	瓷	155	400	300
LXY ₄ -160	玻璃	146	400	280

试验平台如图1所示。试验在有机玻璃室内进行,其高度为90 cm,直径为80 cm。水雾的产生与控制通过超声波雾发生器实现,并利用风扇使室内湿度分布相对均匀,玻璃室内的相对湿度通过湿度计实时监测。

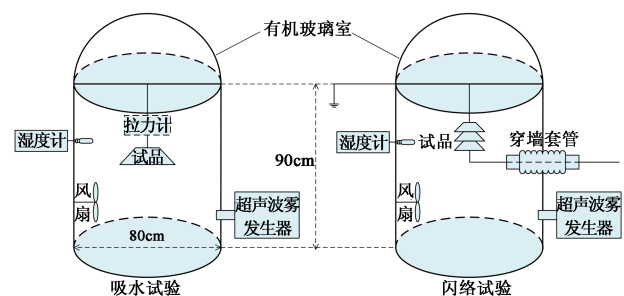


图1 试验平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental platform

1.2 试验流程

试验分为不溶物吸水试验和绝缘子闪络试验两部分,不溶物吸水试验流程如下:

(1)采用电子天平称取 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 各200 g,并将其分别置于干净烧杯中,将载有不溶物的烧杯放入有机玻璃室,测量各不溶污秽成分的吸

水特性。试验中,将环境湿度分别控制为80%、90%、100%,采用量程为1.0 kg、精度为1.0 g的拉力计对试品的增重量(即吸水量)进行实时测量。读数时,需先将烧杯内、外壁所凝结的水珠擦拭干净。

(2)为降低绝缘子表面不溶物吸水试验的误差,采用质量较轻的XP-70绝缘子,分别将 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 均匀涂刷在绝缘子表面,灰密值(NS-DD)固定为 5.0 mg/cm^2 ,环境湿度分别控制为80%、90%、100%,采用量程为10.0 kg、精度为5.0 g的拉力计对试品的增重量(即吸水量)进行实时测量。读数时,需先将绝缘子钢帽和钢脚所凝结的水珠擦拭干净。

环境湿度对绝缘子表面的不溶物吸水作用存在影响,此影响将导致不同环境湿度下绝缘子的闪络特性差异。分别采用 XP_4 -160瓷绝缘子和 LXY_4 -160玻璃绝缘子为试品,测试不同环境湿度下染污绝缘子的闪络特性,具体试验流程如下:

(1)染污方法

试品的染污参照IEC 60507:2013和GB/T 4585—2004所要求的固体层法中的定量涂刷法^[20-21]。其中可溶物用NaCl模拟,不溶物分别用 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 模拟,盐密值(ESDD)和NSDD分别控制为 0.10 mg/cm^2 和 1.00 mg/cm^2 。

(2)环境湿度控制

由于在加压过程中,难以在玻璃室内进行湿度调控,所以环境相对湿度除100%的饱和湿度外,另外采用65%~85%中差距较大的两点作为试验环境湿度,所得环境湿度以闪络过程中的实时观测湿度为准。

(3)加压方法

加压方式采用恒压升降法^[1,3,21]:每次试验时施加电压水平按升降法来改变,电压级差为上一次试验施加电压的5%。即如若试品在某一电压 U_f 下闪络,则降低5%电压进行下一次试验;若试品在 U_f 下通过耐受,则升高5%电压;反复试验直到有效试验次数在10次以上;所谓有效试验是指以与前一次试验结果不同的试验为开始的试验。试品绝缘子的闪络电压 U_f 及其标准偏差 σ 如式(1)所示。

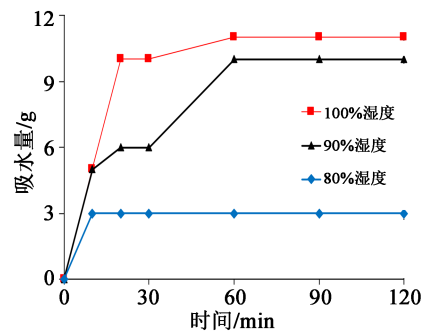
$$\begin{cases} U_f = (\sum(n_i U_{fi})) / N \\ \sigma = \sqrt{(\sum_{i=1}^N (U_{fi} - U_f)^2) / (N - 1) / U_f} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U_f 为绝缘子闪络电压,kV; U_{fi} 为第*i*次有效试验施加的电压,kV; n_i 为施加相同电压 U_{fi} 的次数; N 为有效试验次数; σ 为试验结果的标准偏差。

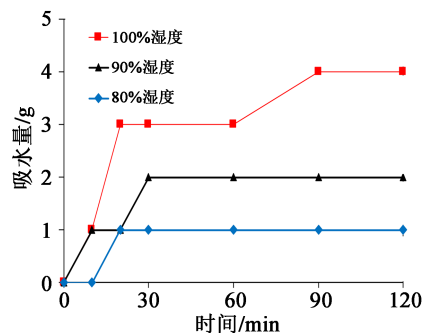
2 结果与讨论

2.1 不同环境湿度下不溶污秽的吸水特性

置于烧杯中的不溶物吸水试验中, SiO_2 和 Al_2O_3 的试验结果如图2所示。 Fe_2O_3 在各湿度条件下的吸水量均在0~2 g内变化,增重量极小,在误差范围内,说明 Fe_2O_3 的吸水性极弱或不具有吸水性,因此,未绘制其吸水量图线。从图2可以看出, SiO_2 和 Al_2O_3 随着环境湿度的增加,吸水速度变快,且所达到的临界值增高; SiO_2 在相对湿度为90%和100%的饱和吸水量比较接近;相同质量的 SiO_2 吸水量明显高于 Al_2O_3 ,说明3种不溶物中 SiO_2 的吸水性最好, Al_2O_3 次之, Fe_2O_3 吸水性极弱或无吸水性。



(a) SiO_2



(b) Al_2O_3

图2 不溶物吸水试验结果

Fig. 2 Water absorption test results of non-soluble constituents

烧杯中的不溶物吸水试验,虽可以反映各不溶物的吸水性强弱及湿度对吸水作用的影响,但由于烧杯口径的限制,使得不溶物与空气的直接接触面积较小,在有限的试验时间内,仅上层物质能够达到有效吸水。另一方面,实际绝缘子表面污秽达到饱和吸水时,将出现水分及污秽物以液滴形式发生流失的现象。因此,本文对绝缘子表面不溶物的吸水性进行了试验研究,得到120 min内的测量结果

如图3所示。

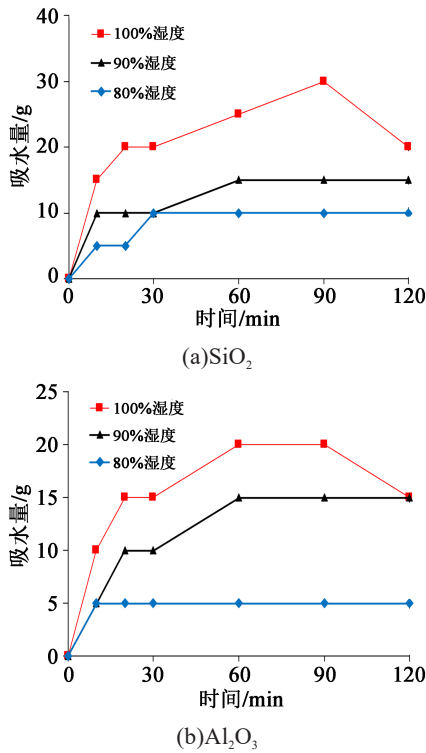


图3 绝缘子表面污秽吸水试验结果
Fig. 3 Water absorption test results of contaminants on insulator surface

与烧杯中的不溶物吸水试验结果相似,绝缘子表面污秽吸水试验中,Fe₂O₃染污的绝缘子在120 min内的增重量在拉力计的5 g精度范围内,难以测量Fe₂O₃染污的绝缘子吸水量的有效数据,因此,未绘制其吸水量图线,此现象也验证了Fe₂O₃的弱吸水性或无吸水性。从图3可以看出,SiO₂和Al₂O₃在绝缘子表面随着环境湿度的增加,吸水速度越快,且所达到的临界值越高。

与不溶物吸水试验不同的是,在环境相对湿度为100%时,SiO₂和Al₂O₃染污的绝缘子在试验90 min后均出现了吸水量下降的情况,试验过程中也观察到了带有不溶物的悬浊液滴沿伞裙边缘滴落的现象,这说明在饱和湿度下,绝缘子表面污秽会随着水滴的滴落而流失,而非饱和湿度条件下,120 min内无此现象发生。

绝缘子表面污秽吸水试验所得吸水量是烧杯中不溶物吸水试验的2~5倍,这是由于XP-70绝缘子表面积为1 590 cm²,是烧杯中不溶物与环境直接接触表面积的数十倍,在表面吸水、水分渗透和不溶物保水的共同作用下,造成了此种差异。

2.2 环境湿度对绝缘子闪络的影响

绝缘子闪络试验中,两种试品绝缘子的型式结构、泄漏距离等参数存在差异,为进行对比分析,本文采用闪络电压梯度对绝缘子污闪特性进行定量表征。闪络电压梯度定义为绝缘子沿面单位泄漏距离所对应的最大耐受电压,如式(2)所示。

$$E_L = U_f / L \quad (2)$$

式(2)中: E_L 为绝缘子的污闪电压梯度,kV/m; U_f 为污秽绝缘子的50%闪络电压,kV; L 为绝缘子串的沿面总泄漏距离,m。

不溶物染污绝缘子在不同环境湿度下的污闪试验结果如图4所示。

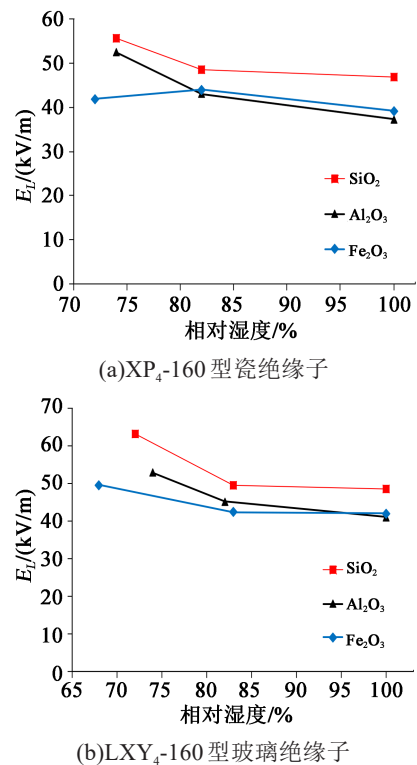


图4 绝缘子在不同环境湿度下的闪络试验结果
Fig. 4 Flashover test results of insulators in various environment humidity

从图4可以看出,在不同湿度下,两种绝缘子在不同不溶污秽成分染污后的污闪电压梯度变化趋势相似,XP₄-160型瓷绝缘子的污闪电压梯度略低于LXY₄-160型玻璃绝缘子。对于SiO₂和Al₂O₃两种吸湿性较强的不溶物而言,其对应的污闪电压梯度随环境湿度的增加呈明显的下降趋势,在环境相对湿度较低时,下降趋势尤为明显;而环境湿度超过80%以后,下降趋势较为平缓。以上试验结果表

明,环境湿度影响绝缘子表面不溶物的吸水量,导致绝缘子污闪电压梯度随环境湿度的增大而减小,在湿度较低的情况下,影响愈加明显。

对于 Fe_2O_3 类具有弱吸水性或无吸水性的不溶物而言,其对应的绝缘子闪络电压梯度随环境湿度的增加也有一定的变化趋势,但趋势不明显;这说明除吸水作用外,在高湿度环境下,水分也会附着于不溶物表面,并渗透于不溶物层间;同时,环境湿度也会对绝缘子放电过程中的电弧产生一定影响,水雾的出现和浓度增加会导致环境空气的整体相对介电常数增加,从而导致高湿度环境下绝缘子的闪络电压梯度较低。

结合不溶物吸水试验和绝缘子闪络试验结果可知,在各环境湿度下, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的吸水能力虽不及 SiO_2 ,但前两种典型不溶污秽对应的绝缘子闪络电压梯度却低于 SiO_2 。绝缘子放电及闪络过程中,不溶污秽不直接参与导电,其主要是通过吸水作用为污层提供溶剂,从而影响绝缘子的闪络特性。在相同环境湿度下,除吸水作用外,不溶物本身的性质也对绝缘子闪络特性产生影响。 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为金属氧化物,属于离子晶体,是由正、负离子通过离子键结合而成,因此当绝缘子表面流经泄漏电流时,其表现出来的理化活性高于 SiO_2 ,在电弧作用下的熔融状态甚至可表现出强电解质特性;而 SiO_2 为非金属氧化物,属原子晶体,其相邻原子之间通过共价键结合而成,且 Si-O 键呈稳定的四面体结构,化学性质稳定,因此在不考虑吸水作用的情况下, SiO_2 对绝缘子闪络特性的影响程度不及 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 。

据统计发现,实际绝缘子表面的不溶污秽成分主要以硅酸盐为主,其中 SiO_2 质量分数约占70%以上,最高可达90%,其次为 Al_2O_3 ,质量分数为5%~20%,其余成分如 Fe_2O_3 等也占有少量比例。因此 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等金属氧化物本身的性质对绝缘子污闪特性的影响大幅降低,实际运行绝缘子闪络过程中,环境湿度及吸水作用仍是不溶物影响绝缘子污闪特性的主要因素。

在闪络过程中,绝缘子周围的局部湿度不是固定的。随着环境相对湿度的增加,绝缘子表面污层湿润到一定程度时,在外施电压的作用下,泄漏电流增加,绝缘子表面出现干燥带,进而形成局部电弧。在同等外施电压下,环境湿度较低时,一方面,污层表面湿润程度不一定能达到局部电弧产生的

临界值;另一方面,局部电弧的发展将导致绝缘子周围的局部湿度大幅降低,绝缘子周围水气补充难以阻止表面污层的进一步烘干,剩余污层电阻持续增加,局部放电难以维持与发展。在高环境湿度下,周围密集水气的补充使得绝缘子表面剩余污层电阻降低,促进了电弧的发展,直至完全闪络。这就使得绝缘子污闪电压梯度随环境湿度的增大而减小,且湿度较低的情况下,此种影响愈加明显。

3 结 论

(1)外绝缘常见3种不溶污秽成分中, SiO_2 的吸水性最好, Al_2O_3 次之, Fe_2O_3 吸水性极弱或无吸水性; SiO_2 和 Al_2O_3 随着环境湿度的增加,吸水速度变快,且饱和吸水量增高; SiO_2 在相对湿度为90%和100%的饱和吸水量比较接近。

(2)在饱和湿度下, SiO_2 和 Al_2O_3 染污绝缘子的表面污秽容易随着水滴的滴落而流失,而非饱和湿度条件下,此现象不易发生。

(3)环境湿度影响绝缘子表面不溶物的吸水量及电弧发展过程中的剩余污层电阻,导致绝缘子污闪电压梯度随环境湿度的增大而减小,且湿度较低的情况下,此种影响程度愈加明显。

参考文献:

- [1] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社,2009.
- [2] 黄青丹,陆国俊,李柳云,等. 广州地区输电线路绝缘子污秽成分分析[J]. 高压电器,2013,49(2):85-91.
- [3] 蒋兴良,杨忠毅,韩兴波,等. 硅橡胶复合绝缘子在不同可溶污秽成分下的闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1): 320-329.
- [4] 黄瑞平,田亮,刘世涛,等. 不同环境条件下特高压直流线路绝缘子长期积污特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(3):60-67.
- [5] 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.
- [6] 杨帅. 污秽物吸湿性对电力设备外绝缘放电的影响[D]. 武汉: 武汉大学,2014.
- [7] 唐铭骏,杨帅,杨翠茹,等. 不溶物吸湿性对绝缘子泄漏电流的影响[J]. 高电压技术,2017,43(12):3964-3972.
- [8] 郭飞,刘世涛,李秀广,等. 宁夏典型环境绝缘子污秽成分分析[J]. 绝缘材料,2017,50(4):61-66.
- [9] ZHANG Z J, ZHANG D D, JIANG X L, et al. Effects of pollution materials on the AC flashover performance of suspension insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(2):1000-1008.
- [10] 张忠. 绝缘子直流污闪特性研究综述[J]. 绝缘材料,2017,50(1): 8-12.

- [11] 刘又超,蒋兴良,张欢,等. 不溶物对绝缘子污闪的影响[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11):3331-3338.
- [12] 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.
- [13] YANG Z Y, JIANG X L, HAN X B, et al. Influence of pollution chemical components on AC flashover performance of various types of insulators[J]. High Voltage,2019,4(3):105-112.
- [14] ZHANG Z J, LIU X H, JIANG X L, et al. Study on AC flashover performance for different types of porcelain and glass insulators with non-uniform pollution[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(3):1691-1698.
- [15] FARMAN M, AHMAD S, ALAM A, et al. Chemical analysis of insulator contaminants and reliability improvement of T&D line for smart operation of grid under chemically polluted environment[C]//International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems. Chennai, India:IET,2011.
- [16] GU C H, LI J T, LI M, et al. Study on contamination deposition characteristics of transmission line insulators[C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China: IEEE,2011.
- [17] 李钊,袁田,邹炜,等. 不溶物在盘形悬式绝缘子污秽试验中的影响研究[J]. 电瓷避雷器,2016(5):106-113.
- [18] 张锐,黄道春,吴光亚,等. 1000 kV 支柱瓷绝缘子自然积污规律试验研究[J]. 高电压技术,2015,41(11):3679-3686.
- [19] 王彬,梁曦东,张轶博,等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J]. 高电压技术,2009,35(9):2322-2328.
- [20] International Electrotechnical Commission. Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on AC systems: IEC 60507-2013[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2013.
- [21] 全国绝缘子标准化技术委员会. 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验:GB/T 4585—2004[S]. 北京:中国标准出版社,2004.