

典型区域复合绝缘子的微观特性研究

屠幼萍¹, 梁 栋¹, 王 璁¹, 王梦丹¹, 魏 杰², 高海峰²

(1. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 复合绝缘子作为输电线路中的重要绝缘设备,其老化问题受到相关部门与学者的广泛关注。为了研究不同环境因素对复合绝缘子老化的影响,文中以4个典型区域的现场运行复合绝缘子为研究对象,对复合绝缘子伞裙材料进行了热刺激电流特性(TSC)测试、红外光谱(FTIR)测试与扫描电镜(SEM)测试,并对不同区域复合绝缘子的微观特性进行比较分析。研究结果表明,不同地区试样的微观特性存在一定的差异。浙江地区试样的老化程度与其他地区相比较,可能与其盐雾与湿润的环境有关。青海地区试样的老化程度较轻。黑龙江试样的老化程度位于两者之间。而河南试样虽然表面破坏程度与官能团反应程度较高,但其陷阱电荷量并不高。研究结果有助于合理考虑环境因素对运行复合绝缘子的影响,从而为运行维护提供参考。

关键词: 复合绝缘子; 微观特性; 典型区域; 老化; 热刺激电流

Study on the Microscopic Characteristics of Composite Insulators in the Typical Areas

TU Youping¹, LIANG Dong¹, WANG Cong¹, WANG Mengdan¹, WEI Jie², GAO Haifeng²

(1. Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Composite insulators are important insulation equipment for transmission lines, so their aging problem is concerned by the relevant departments and scholars. In order to study the effect of different environmental factors on the aging of composite insulator, in this paper, composite insulators from four typical areas are chosen to do thermal stimulation current (TSC) test, Fourier Transform Infra-Red (FTIR) spectrum test and Scanning Electron Microscopy (SEM) test, and the differences of the composite insulators from different areas are compared. The results show that there are some differences in the microscopic characteristics of samples from different areas. The aging degree of the samples from Zhejiang is higher than that from other areas, which may be related to the salt spray and wet environment. The aging degree of the samples from Qinghai is relatively mild. The aging degree of the samples from Heilongjiang is between the former two areas. The damage degree of surface and functional groups of samples from Henan is higher, but their charge amounts are relatively small. The results are helpful to consider the influence of environmental factors on the running composite insulators, which can provide reference for operation and maintenance.

Key words: composite insulator; microscopic characteristic; typical area; aging; thermal stimulation current

0 引言

复合绝缘子作为输电线路中的重要绝缘设备,其运行的可靠性一直是相关部门关注的重点^[1-3]。由于复合绝缘子属于聚合物材料,因此其性能在运行过程中会随着外界应力和物理化学的作用而发生老化和劣化,造成伞裙和护套材料粉化、蚀损、破裂,甚至造成芯棒腐蚀断裂^[4-7]。常见的可能加速复

合绝缘子老化的因素有很多,例如紫外辐射、温湿度、电场等^[8-10]。

目前,对于特定地区的复合绝缘子老化状态的研究主要集中在传统的方法。如肉眼观察及老化前后物理、化学结构的分析对比^[11]。评价因子主要包括颜色、硬度、憎水性以及泄漏电流、表面电阻和介电常数等宏观电性能。这些因子大多数对老化过程不够敏感,不利于及时发现有潜在危险的劣化绝缘子。热刺激电流(TSC)技术作为一种空间电荷测试方

法在研究材料微观特性中得到了广泛应用^[12-14]。借助 TSC 技术,有可能通过微观结构把材料的老化与其 TSC 特性联系起来。近年来,TSC 技术用于复合绝缘子老化状态判断的研究已经取得初步成果^[15-18]。此外,红外光谱(FTIR)技术与扫描电镜(SEM)技术也被用于复合绝缘子微观特性测试^[19-22]。

文中以黑龙江、浙江、青海与河南 4 个地区的现场运行复合绝缘子为研究对象,采用电镜扫描(SEM)、红外光谱(FTIR)及热刺激电流(TSC)方法对复合绝缘子伞裙材料进行理化特性测试,并对 4 个地区的试样进行老化特性的对比与分析。

1 典型区域的自然特征

1.1 高寒地区(黑龙江省)

黑龙江省基本地形特征为南北两大山地,东西两大平原,山势缓和,平原广阔。位于中温带和寒温带,属大陆性季风气候,四季分明,在全国是气温最低的省份,最冷月(一月)平均气温为 $-30.9\sim-14.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。夏季普遍高温,平均气温在 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,极端最高气温达 $41.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。全年无霜期多在 $100\sim140$ 天之间。黑龙江省的降水表现出明显的季风性特征。夏季降水充沛,占全年降水量的 60% 左右。冬季干燥少雨,仅占全年降水量的 4% 左右。春季和秋季降水量分别占全年降水量的 13% 和 23% 左右。全省绝大部分地区相对湿度在 70% 以下。

1.2 沿海地区(浙江省)

浙江属亚热带季风气候,季风显著,四季分明,年气温适中,光照较多,雨量丰沛,空气湿润,雨热季节变化同步,气候资源配制多样,气象灾害繁多。年平均气温 $15\sim18\text{ }^{\circ}\text{C}$,1、7月分别为全年气温最低和最高的月份,5、6月为集中降雨期。极端最高气温 $44.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-17.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;全省各地年平均相对湿度较高,都在 $75\%\sim80\%$ 以上。浙江省各地年平均降水量及雨日较多,年降水量在 $1\ 100\sim1\ 800\text{ mm}$,年降雨日数为 $140\sim180$ 天。年平均日照时数 $1\ 710\sim2\ 100\text{ h}$ 。由于水体的调温作用,浙江省雾日数较多,主要集中在11月至来年的3月。

1.3 高海拔地区(青海省)

青海省位于青藏高原东南部,地势高峻,平均海拔 $4\ 000\text{ m}$,最高山峰达 $6\ 860\text{ m}$,最低处 $1\ 600\text{ m}$ 左右,自然环境高寒严酷。青海属于高原大陆性气候,具有气温低、昼夜温差大、降雨少而集中、日照长、太阳辐射强等特点。冬季严寒而漫长,夏季凉爽而短促。各地区气候有明显差异,东部湟水谷地,年平均气温在 $2\sim9\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期为 $100\sim200$ 天,年降雨

量为 $250\sim550\text{ mm}$,主要集中于7~9月。青海地处中纬度地带,太阳辐射强度大,光照时间长,年总辐射量每平方厘米可达 $690.8\sim753.6\text{ kJ}$,直接辐射量占辐射量的 60% 以上,年绝对值超过 418.68 kJ ,仅次于西藏,位居中国第二。青海省气象灾害较多,主要为干旱、冰雹、霜冻、雪灾和大风。

1.4 内陆地区(河南省)

河南属暖温带—亚热带、湿润—半湿润季风气候。一般特点是冬季寒冷雨雪少,春季干旱风沙多,夏季炎热雨丰沛,秋季晴和日照足。全省年平均气温一般在 $12\sim16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,一月 $-3\sim3\text{ }^{\circ}\text{C}$,七月 $24\sim29\text{ }^{\circ}\text{C}$,大体东高西低,南高北低,山地与平原间差异比较明显。气温年较差、日较差均较大,极端最低气温 $-21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;极端最高气温 $44.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。全年无霜期从北往南为 $180\sim240$ 天。年平均降水量约为 $500\sim900\text{ mm}$,南部及西部山地较多。全年降水的 50% 集中在夏季,常有暴雨。

2 试验方案

2.1 试样信息

该次测试的复合绝缘子共12支,按照地区编号A-D,试样信息见表1。

表 1 复合绝缘子试样信息

试样编号	电压等级/kV	运行年限/a	运行地区
A ₁	220	12	黑龙江
A ₂	220	5	黑龙江
A ₅	500	16	黑龙江
B ₁	110	9	浙江
B ₅	110	7	浙江
B ₈	110	14	浙江
C ₁	110	4	青海
C ₁₀	110	11	青海
D ₁	500	15	河南
D ₂	500	15	河南

2.2 试验方法

2.2.1 热刺激电流法

TSC 特性试验可以体现特定条件下电荷的存贮和输运过程,是一种研究绝缘材料老化状态的有效手段。通常注入材料的电子会被不同能级的陷阱捕捉。在环境温度变化时,随着温度的升高,被捕捉的电子获得释放,形成 TSC 特性曲线。由 TSC 特性曲线可以确定陷阱电荷量、陷阱能级等参数,计算见式(1)、(2)。通常硅橡胶材料的老化会使得陷阱电荷量增大,陷阱能级加深^[10]。

$$Q_{\text{TSC}} = \int_{t_0}^{t_1} I(t) dt = \frac{60}{\beta} \int_{T_0}^{T_1} I(T) dT; \quad (1)$$

$$E = \frac{2.47 T_m^2 k}{\Delta T} \quad (2)$$

式(1)、(2)其中: β 为升温速率; T_m 为TSC电流曲线峰值对应的温度; ΔT 是半峰值对应温度的差值。

该次试验极化场强为8 kV/mm,极化温度为50℃,极化时间为20 min,升温速率为3℃/min。

2.2.2 扫描电镜测试

扫描电镜测试原理是通过一束极细的电子束来扫描样品并在样品表面激发出次级电子,由于次级电子的多少与电子束入射角有关,即与样品表面的微观结构有关。

该次测试使用的是JSM6490LV型数字化扫描电子显微镜,其分辨率小于4.0 nm,放大倍数为20~300 000倍,能够对伞裙试样的表面形貌进行精准地观察分析。对伞裙试样表面进行SEM测试采用的放大倍数为200、500、2 000,对表面形貌进行拍照。

2.2.3 红外光谱测试

有机物质经红外线照射后,选择性地吸收其中某些频段,经红外光谱仪记录下的吸收谱带即红外光谱图。

文中红外光谱分析采用美国赛默飞世尔公司的Nicolet Is5型傅里叶变换红外光谱仪,应用全反射附件,测量光谱范围600~4 000 cm^{-1} ,分辨率采用4 cm^{-1} ,每次测量中的扫描次数设置为32次。

3 试验结果

3.1 热刺激电流测试结果

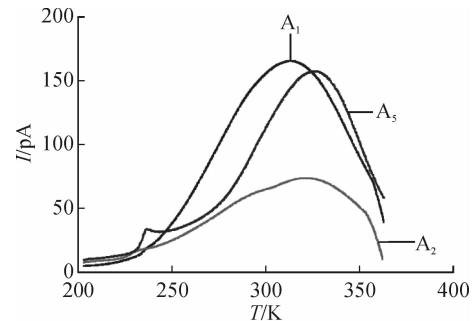
4个区域复合绝缘子的热刺激电流测试结果见图1。为了更加直观地比较不同地区试样的TSC特性差异,按区域做出陷阱电荷量与运行年限的关系,见图2。从图2可见,不同地区的复合绝缘子陷阱电荷量是有差距的,浙江地区试样的陷阱电荷量相对较高,而河南地区试样虽然运行时间较长但其陷阱电荷量相对较小。

3.2 红外光谱测试结果

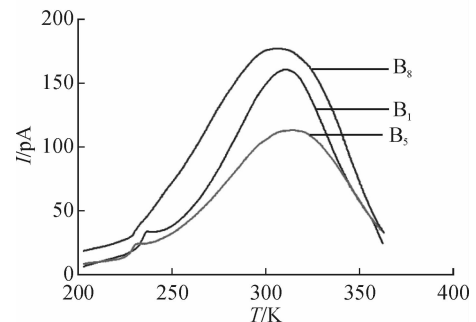
4个区域复合绝缘子的红外光谱测试结果见图3。从图3中可以看出,青海地区试样的主要官能团反应程度最低。黑龙江试样的反应程度与年限有关。而河南与浙江试样主要官能团反应最为严重。

3.3 扫描电镜测试结果

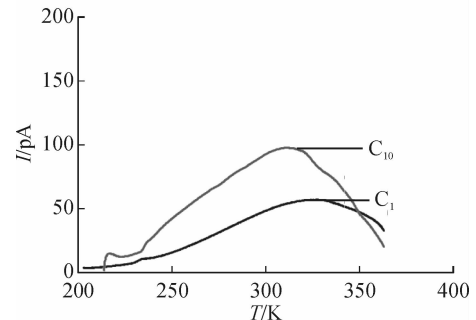
4个区域复合绝缘子的扫描电镜测试结果见图4。从图4中可以看出,青海地区试样表面几乎没有裂纹与孔洞,破坏程度最轻。其次为黑龙江试样。



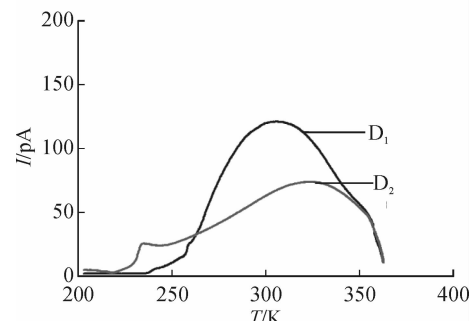
(a)黑龙江地区试样



(b)浙江地区试样



(c)青海地区试样



(d)河南地区试样

图1 不同地区试样的TSC特性

Fig. 1 Results of TSC characteristics of samples from the different areas

河南与浙江试样表面破坏程度最为严重,其中河南试样的主要特征为表面裂纹较多,而浙江试样主要特征为表面有较多的孔洞。SEM试验结果与红外光谱试验结果能够很好的吻合。

3.4 小结

从以上测试结果可以看出,不同地区试样的老化特性差异。首先,浙江地区环境较为湿润,降雨较多,而且沿海盐雾较其他地区较重。这些因素都可

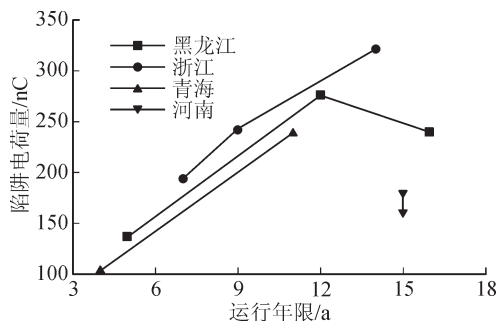


图 2 不同地区试样陷阱电荷量测试结果

Fig. 2 Results of charge amounts of samples in the different areas

能会加速电晕放电, 从而对复合绝缘子造成更严重的破坏。因此浙江复合绝缘子的试样陷阱电荷量与其他地区相比较。青海地区的主要特征为海拔高, 光照辐射强, 而青海复合绝缘子试样的老化程度却相对较低, 说明这些因素对复合绝缘子老化的影响并不严重。黑龙江试样的老化程度位于两者之间。而河南试样虽然表面破坏程度与官能团反应程度较高, 但其陷阱电荷量并不高, 可能与试样的特殊性有关, 也可能是环境的特殊性所致, 还待继续验证。

4 结论

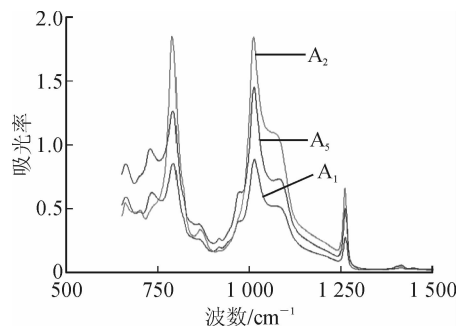
1) 浙江地区试样的陷阱电荷量与其他地区相比较, 而其表面破坏程度与主要官能团的反应程度也较严重, 可能与其盐雾与湿润的环境有关。

2) 青海地区试样的陷阱电荷量较低, 表面破坏程度与主要官能团的反应程度也较轻。说明紫外对复合绝缘子老化的影响并不严重。

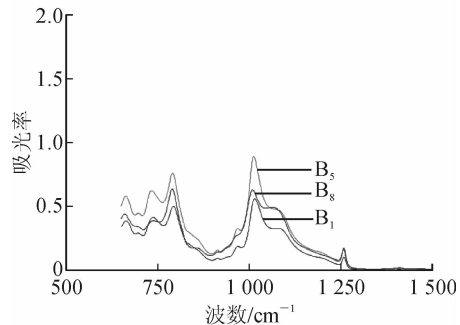
3) 黑龙江试样的老化程度位于两者之间。而河南试样虽然表面破坏程度与官能团反应程度较高, 但其陷阱电荷量并不高。

参考文献:

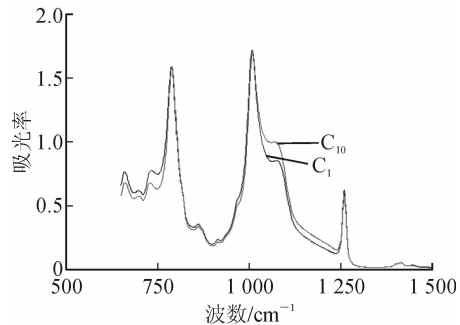
- [1] LIANG X D, WANG S W, FAN J, et al. Development of composite insulators in China[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 586-594.
- [2] 易 辉, 崔江流, 宿志一. 浅谈我国合成绝缘子的应用与展望[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 78-81.
YI Hui, CUI Jiangliu, SU Zhiyi. The application and prospect of composite insulators in China[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 78-81.
- [3] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 1-7.
LIU Zehong. Present situation and prospects of applying composite insulators to UHF transmission lines in China[J].



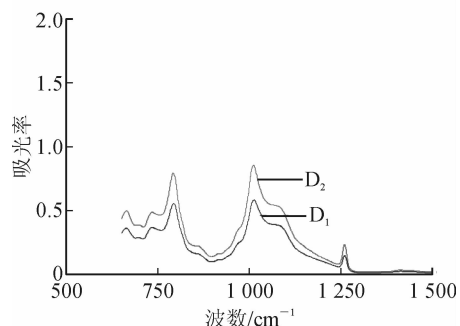
(a) 黑龙江地区试样



(b) 浙江地区试样



(c) 青海地区试样



(d) 河南地区试样

图 3 不同地区试样红外光谱测试结果

Fig. 3 Results of IR spectra of samples in the different areas

Power System Technology, 2006, 30(12): 1-7.

- [4] 宿志一, 陈 刚, 李庆峰, 等. 硅橡胶复合绝缘子伞裙护套的老化及其判据研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 53-57.
SU Zhiyi, CHEN Gang, LI Qingfeng, et al. Study on aging and criterion of sheds and housing of silicon rubber composite insulator[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 53-57.

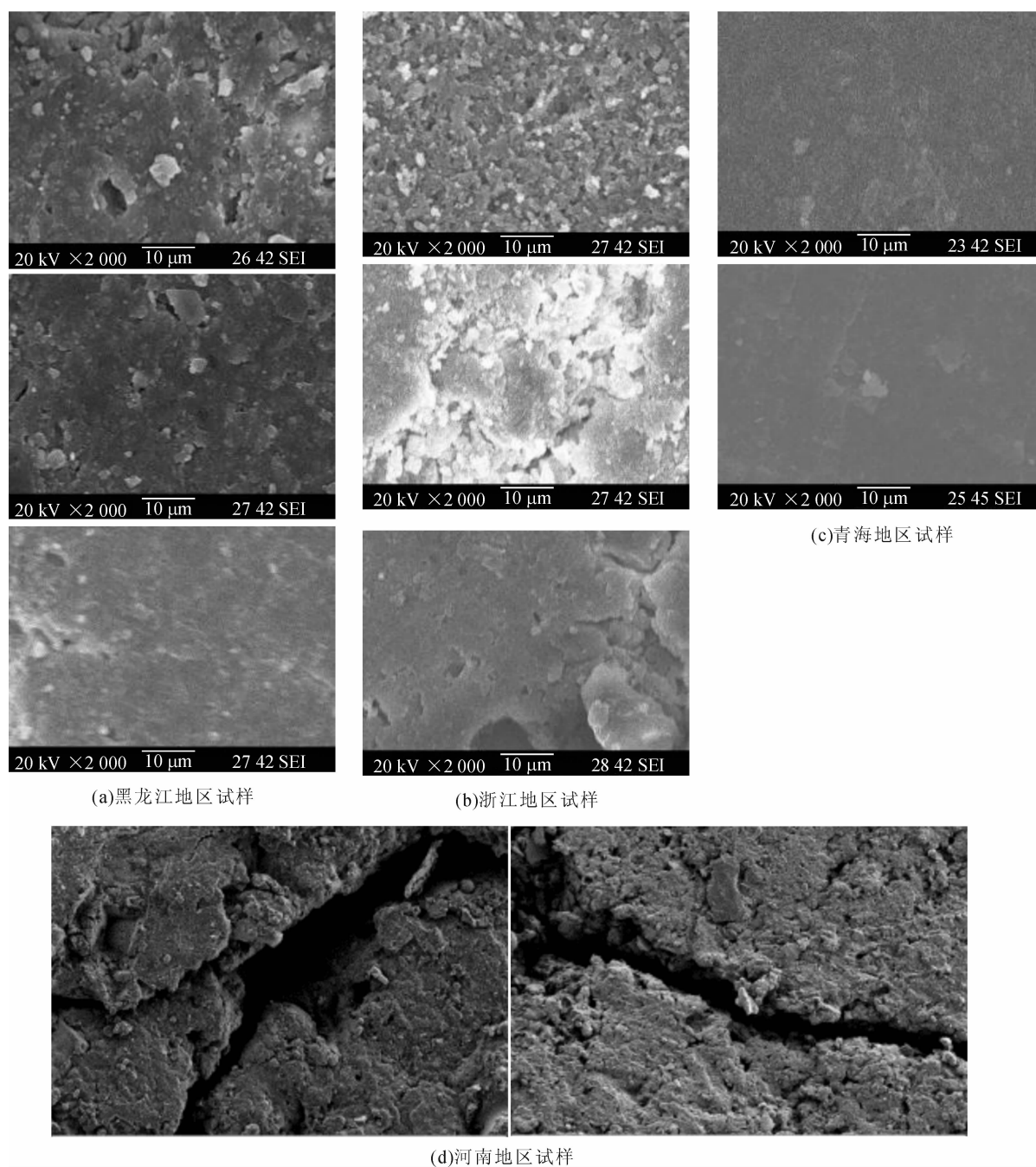


图 4 不同地区试样扫描电镜测试结果

Fig. 4 Results of SEM tests of samples in the different areas

- [5] 贺 博,万 军,金海云,等. 复合绝缘子的老化特征分析[J]. 高压电器,2009,45(1):21-24.
HE Bo, WAN Jun, JIN Haiyun, et al. Aging character analysis of composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 21-24.
- [6] 王建国,方春华,刘 洋,等. 220 kV 复合绝缘子机电性能试验研究[J]. 高压电器,2008,44(4):332-334.
WANG Jianguo, FANG Chunhua, LIU Yang, et al. Experimental study on electrical and mechanical properties of 220 kV composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 332-334.
- [7] 彭银波,李 轩,陈 嘉,等. 不同运行年限复合绝缘子表面护套特性的研究[J]. 高压电器,2012,48(10):67-72.
PENG Yinbo, LI Xuan, CHEN Jia, et al. Surface characteristics of sheath of composite insulators with different service years[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 67-72.
- [8] 石 倩. 不同湿度条件下 HTV 硅橡胶材料的紫外老化特性研究[D]. 保定:华北电力大学,2014.
SHI Qian. Study on the UV aging characteristics of HTV silicone rubber material under different humidity[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [9] 卫李静,王伯时,汪忆新,等. 均压环对复合绝缘子电场

- 分布影响的研究[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 262-264.
- WEI Lijing, WANG Baishi, WANG Yixin, et al. Effects of shielding rings on the electric field distributions of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4): 262-264.
- [10] 刘洋, 周志成, 魏旭, 等. 不同环境因素对硅橡胶憎水性及憎水迁移性的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2454-2459.
- LIU Yang, ZHOU Zhicheng, WEI Xu, et al. Effect of environment factor on hydrophobicity and transfer of hydrophobicity of silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2454-2459.
- [11] 吴经锋, 袁检, 张建荣, 等. 复合绝缘子老化评估方法浅析[J]. 高压电器, 2003, 39(2): 32-33.
- WU Jingfeng, YUAN Jian, ZHANG Jianrong, et al. Analysis on the evaluation method of aging for composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2): 32-33.
- [12] 梁英, 丁立健, 李成榕, 等. 基于热刺激电流的硅橡胶合成复合绝缘子老化诊断方法初探[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 7-12.
- LIANG Ying, DING Lijian, LI Chengrong, et al. Primary research on the diagnosis of aging silicone rubber insulators using thermally stimulation current[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 7-12.
- [13] 屠幼萍, 罗梅馨, 应高峰, 等. 硅橡胶电晕老化热刺激电流特性的正交试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 139-144.
- TU Youping, LUO Meixin, YING Gaofeng, et al. Research on TSC characteristics of corona aging of silicone rubber with orthogonal test method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 139-144.
- [14] 刘洋. 交流复合绝缘子老化性能试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- LIU Yang. Study on aging performance of AC composite insulators[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.
- [15] 梁英, 李成榕, 丁立健, 等. 硅橡胶热刺激电流试验参数的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 87-90.
- LIANG Ying, LI Chengrong, DING Lijian, et al. Characteristics of the experimental parameters of TSC for SIR[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 87-90.
- [16] 刘晓伟, 张雪峰, 刘春翔, 等. 棒形悬式复合绝缘子内部缺陷对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器, 2014(2): 16-20.
- LIU Xiaowei, ZHANG Xuefeng, LIU Chunxiang, et al. Influence of internal defects in rod suspension composite insulator on electric field distribution[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(2): 16-20.
- [17] 龚浩, 田丁, 别士光. 覆冰地区复合绝缘子电场分布研究[J]. 电瓷避雷器, 2015(1): 7-10.
- GONG Hao, TIAN Ding, BIE Shiguang. Study on electric field distribution of composite insulator in icing areas[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(1): 8-10.
- [18] 张辉, 屠幼萍, 佟宇梁, 等. 基于TSC测试的硅橡胶复合绝缘子伞裙材料老化特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 169-174.
- ZHANG Hui, TU Youping, TONG Yuliang, et al. Study on aging characteristics of silicone rubber sheds of composite insulators based on TSC test[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 169-174.
- [19] 杨晓辉. 基于傅里叶变换红外光谱测试的复合绝缘子老化评估方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- YANG Xiaohui. Study on aging evaluation method of composite insulator based on FTIR measurement[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [20] ROWLAND S M, XIONG Y, ROBERTSON J. Surface ageing of HV composite insulators on 400 kV lines[C]//IEEE International Conference on Solid Dielectrics. [S.l.]: IEEE, 2007: 310-313.
- [21] XIONG Y, ROWLAND S M, ROBERTSON J. Surface analysis of asymmetrically aged 400 kV silicone rubber composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 763-770.
- [22] GORUR R S, KARADY G G, JAGOTA A, et al. Aging in silicone rubber for outdoor insulation[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 1992, 7(2): 525-531.
- 屠幼萍(1966—), 女, 教授, 博导, 主要从事高电压绝缘技术、电介质介电特性及过电压保护的研究工作。
- 梁栋(1991—), 男, 硕士, 主要从事高电压绝缘技术方面的研究工作。
- 王聰(1980—), 男, 讲师, 主要从事高电压绝缘技术及过电压保护的研究工作。