

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.015

转轮法试验中线路运行棒形悬式复合绝缘子性能变化规律研究

贾伯岩¹, 刘杰¹, 王建国²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050021; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 转轮法是 IEC 62217—2005 标准中推荐的一种重要的复合绝缘子老化试验方法, 但转轮法试验中运行复合绝缘子相关性能的变化规律尚待深入研究。基于此, 文中通过对 4 支不同运行年限的线路棒形悬式复合绝缘子进行转轮法试验, 监测试验过程中绝缘子表面放电和泄漏电流的变化规律, 并定期取样进行了憎水性和傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 测试分析。结果表明: 绝缘子表面放电程度和泄漏电流幅值呈 3 个阶段式发展; 各阶段绝缘子憎水性能劣化速度和 Si-O-Si 和 Si-CH₃ 集团峰面积减少速度存在差异; 憎水性劣化速度和 Si-O-Si 和 Si-CH₃ 集团峰面积减少速度与绝缘子老化程度呈正比。试验结果为转轮法在复合绝缘子老化评估中的应用提供了参考。

关键词: 转轮法; 复合绝缘子; 表面放电; 泄漏电流; 憎水性能; 傅里叶变换红外光谱分析

Study on Performance Change of Line Operating Long Rod Suspension Composite Insulators During Tracking Wheel Test

JIA Boyan¹, LIU Jie¹, WANG Jianguo²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: As an important aging method of composite insulator, the tracking wheel test is recommended by IEC 62217—2005 document. But it is needed to be further studied that the performances change of on-line composite insulators during the tracking wheel test. In the paper, the tracking wheel test is carried out on four line long rod suspension composite insulators which of different operating life, during which the change of surface discharge and leakage current is monitored, the hydrophobic test and the Fourier transform infrared spectroscopy analysis (FTIR) are tested and analysis. The results descript that there are three development stages of the surface discharge and the leakage current amplitude, during which the speed of the hydrophobic performance degradation and the Si-O-Si and Si-CH₃ group peak area reduce has a difference. There also have a proportional relationship between the speed and the aging degree of composite insulator. The reference of which the tracking wheel test can be applied to evaluate the aging of composite insulator is provided by the experiment result.

Key words: tracking wheel test; composite insulator; surface discharge; leakage current; hydrophobic performance; FTIR

0 引言

复合绝缘子由于其优良的憎水性及憎水迁移性能而被广泛应用在架空输电线路中^[1], 特别是随着特高压电网的全面建设, 复合绝缘子在中国的应

用出现了一个蓬勃的发展时期^[2-3]。但随着复合绝缘子运行时间的增加, 由于硅橡胶材料老化引起的复合绝缘子运行性能下降现象也越来越严重, 严重威胁了电网的安全可靠运行^[4-5], 因此如何评估复合绝缘子的老化状态成为现今迫切需要解决的问题^[6-7]。

复合绝缘子老化评估方法有转轮法和 5 000 h

综合老化试验方法等^[8-10]。转轮法开始研究于大约30年前,但在其后的若干年内一直没有太大进展。近年来,由于5 000 h综合老化试验方法过于复杂和重复性较差等原因,转轮法又被重新提出,并作为一种与5 000 h综合老化试验方法相并列的老化试验方法列入IEC 62217—2005《Polymeric insulators for indoor and outdoor use with a nominal voltage > 1 000 V-General definitions, test methods and acceptance criteria》标准中^[11]。国内对转轮法的研究较少,仅清华大学和武汉大学通过自主研发的转轮法试验系统,研究了试验过程中绝缘子表面放电与泄漏电流的变化规律^[12-14],但未对运行复合绝缘子转轮法试验过程中相关性能变化规律进行研究。文中通过对4支不同运行年限的复合绝缘子进行转轮法试验,监测了试验过程中复合绝缘子的表面放电和泄漏电流的变化规律,并定期取样进行了憎水性和FTIR测试分析,比较了不同老化程度试样各性能变化规律的差异性,为转轮法在复合绝缘子老化评估中的应用提供了参考。

1 转轮法试验试样、方法及装置

1.1 试验试样

试验试样为运行多年后的线路棒形悬式复合绝缘子,通过截取加工制成绝缘子短试样,试样相关参数和结构见表1和图1。

表1 试样相关参数

Table 1 Parameters of the sample

编号	1号	2号	3号	4号
伞型结构	一大二小	一大二小	一大一小	一大一小
运行年限/a	4	10	14	14
污区等级	e	c	d	d

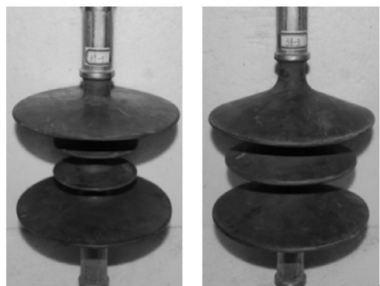


图1 试样典型结构

Fig. 1 Typical structure of the sample

1.2 转轮法试验方法及装置

转轮法试验装置和原理见图2。盐水池电导率为4.0 mS/cm,施加电压梯度35 V/mm,试验共进行了约32 000转。试验前将绝缘子以互差90°方向固定在中间转盘上,工作时每支绝缘子在4个位置依

次各停留40 s,即每支试样在盐水中浸泡40 s,然后旋转到水平位置自然干燥40 s,接着旋转到最高位置加电压40 s,再经过水平位置40 s的休息时间后重新进入盐水池中浸泡,依此循环进行试验,历时约70天。

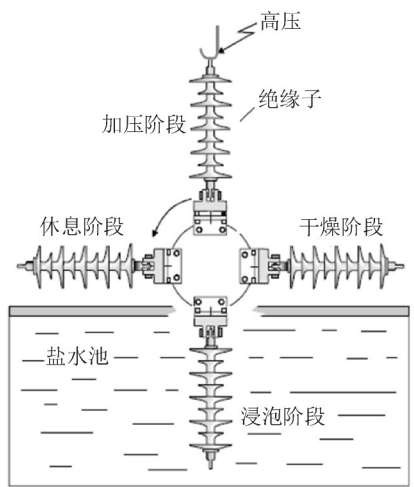
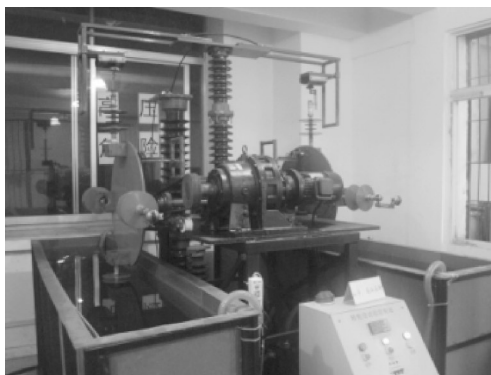


图2 转轮法试验装置和原理图

Fig. 2 Device and schematic diagram tracking wheel test

2 绝缘子表面放电与泄漏电流变化规律

2.1 绝缘子表面放电变化规律

试验不同阶段绝缘子表面典型放电情况见图3,试验各阶段4支试样表面放电程度差别不大。绝缘子加压时,其表面有盐水残留,表面电导性增大,导致其泄漏电流增大,进而在绝缘子表面形成干区,当干区两端所承担达到一定值时,引发局部放电^[15]。试验初期,绝缘子表面憎水性能良好(HC₂-HC₃),盐水在绝缘子表面以孤立水珠的形式存在,干区两端所承担电压水平较低,放电程度较小,主要表现为蓝色电晕放电现象;随着试验时间的增加,绝缘子表面憎水性遭到破坏,干区两端所承担电压增大,出现黄色火花放电;试验后期,绝缘子表面憎水性基本丧失(HC₆-HC₇),且绝缘子表面出现严重积污(见图4),干区两端电压进一步增大,出现刷状放电现象。

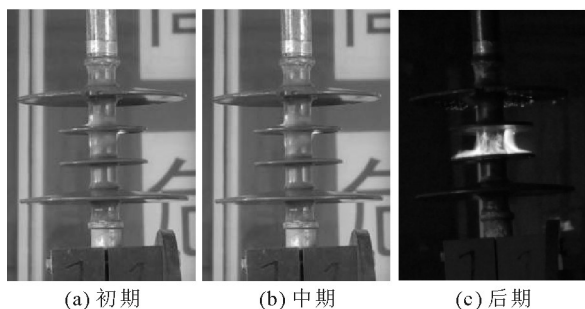


图3 不同试验阶段典型试样表面放电现象

Fig. 3 Surface discharge of the typical sample on different test stage

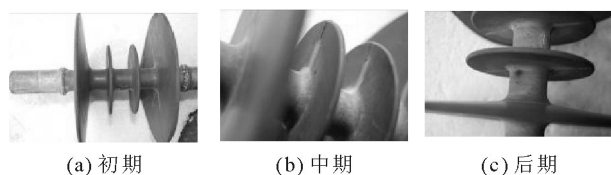


图4 不同试验阶段典型试样表面破坏情况

Fig. 4 Surface damage of the typical sample on different test stage

绝缘子表面干区主要存在于伞裙根部和护套等电流集中区域,因此放电现象主要集中于伞裙根部,且逐渐向伞裙边缘发展。

绝缘子表面破坏情况见图4。初期绝缘子放电主要位置均会出现许多细点状黑色烧蚀痕迹,随着试验进行扩大为烧蚀黑斑直至使绝缘子表面出现大面积黑色烧蚀区域;且随着试验进行在合模缝和伞裙与护套交接区域出现严重积污,试验后期部分复合绝缘子出现发白、粉化和端部烧蚀严重现象。

2.2 绝缘子泄漏电流变化规律

放电过程中泄漏电流波形见图5,从图5可以看出,单次放电过程中复合绝缘子表面泄漏电流的变化分为4个阶段:初始接触阶段(0~2 s)、波形畸变阶段(2~5 s)、剧烈放电阶段(5~15 s)和局部放电阶段(15~40 s)。复合绝缘子在刚接触高压电极时,绝缘子整体湿润,表面未出现干区,此时泄漏电流最大,泄漏电流波形为正弦波;随着加压时间的增加,绝缘子表面水分在泄漏电流的作用下蒸发,部分区域出现干区,引发轻微的局部放电,泄漏电流波形开始出现畸变,呈尖顶波,泄漏电流幅值开始变小;随着绝缘子表面干区的发展,干区处场强进一步加强,出现剧烈电弧放电,泄漏电流幅值变小,波形呈现连续的脉冲峰;最后绝缘子表面出现大面积的干区,放电程度和放电面积逐渐增大。

对应试验过程中绝缘子表面放电程度的阶段性,可以将泄漏电流幅值的发展程度分为3个阶段,第1阶段即在试验开始阶段,绝缘子表面出现淡蓝色电晕及零星的放电现象,此阶段持续时间为几天

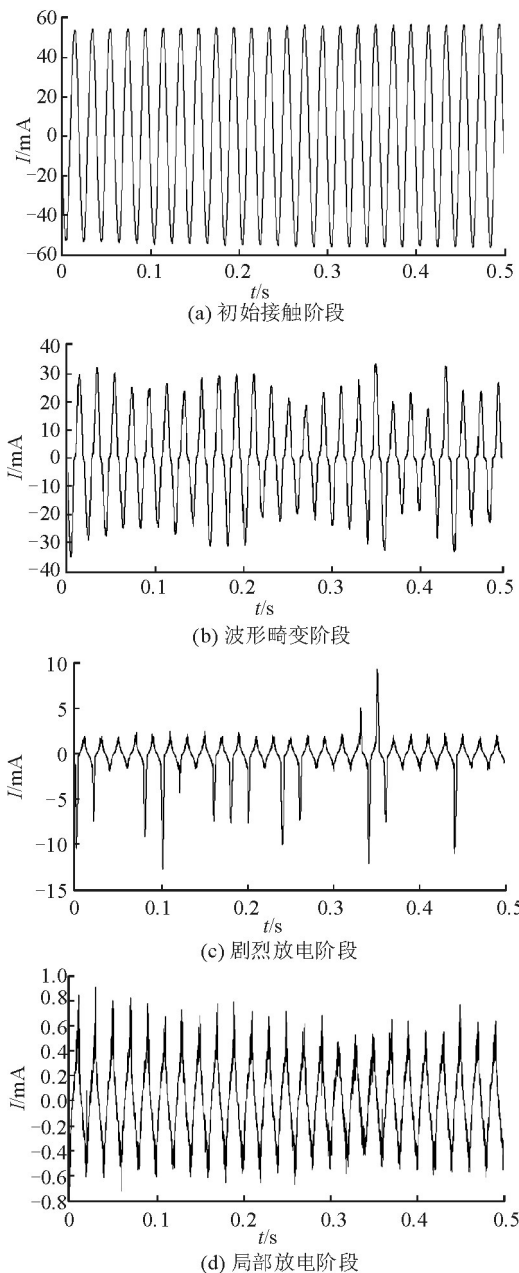


图5 典型泄漏电流波形

Fig. 5 Typical waveforms of LC

左右,泄漏电流幅值通常在1~10 mA左右;第2阶段绝缘子表面出现黄色火花放电,泄漏电流幅值快速增长,而后较为稳定,为40~60 mA范围,此阶段持续时间最长,基本在30~50天左右;第3阶段电弧放电现象频繁,放电出现黄色的粗长伞间电弧,此时电流达到100 mA左右。不同试验阶段泄漏电流波形见图6。

3 憎水性和FTIR测试结果及分析

3.1 憎水性测试结果及分析

试验不同阶段绝缘子憎水性测试结果见表2。随着试验进行,3、4号试样憎水性能首先出现下降,

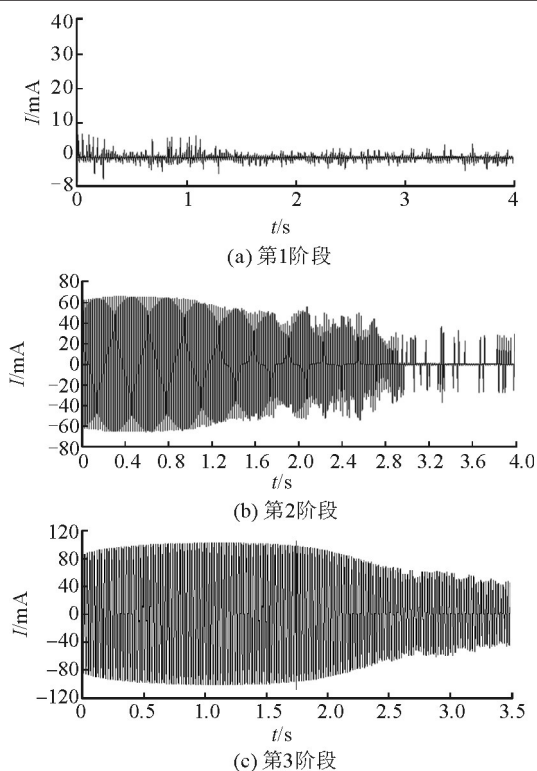


图6 不同试验阶段泄漏电流波形

Fig. 6 LC waveform on different test stage

而1、2号试样在500转以后才出现下降现象;在2 600转时,4支试样仍保持有一定的憎水性能;但随着试验的继续,6 500转时,4支试样憎水性能均达到HC₆级;10 000转时,4号试样憎水性完全丧失;32 000转时,仅1号试样憎水性能为HC₆级,其他试样憎水性完全丧失。

表2 试样憎水性变化情况

Table 2 Hydrophobic change of the sample

转数	复合绝缘子憎水性能			
	1号	2号	3号	4号
0	HC ₃	HC ₃	HC ₂	HC ₃
500	HC ₃	HC ₃	HC ₃	HC ₄
1 500	HC ₄	HC ₄	HC ₄	HC ₄
2 600	HC ₅	HC ₅	HC ₅	HC ₅
3 800	HC ₅	HC ₅	HC ₅	HC ₆
5 000	HC ₅	HC ₆	HC ₆	HC ₆
6 500	HC ₆	HC ₆	HC ₆	HC ₆
8 000	HC ₆	HC ₆	HC ₆	HC ₆
10 000	HC ₆	HC ₆	HC ₆	HC ₇
32 000	HC ₆	HC ₇	HC ₇	HC ₇

根据小分子迁移理论,复合绝缘子表面憎水性能由其表面憎水性物质含量所决定^[16-18]。试验过程中,绝缘子表面局部放电产生的电弧不断破坏其表面的憎水性物质,降低了憎水性物质的含量,但是硅橡胶伞裙内部同样存在憎水性物质通过特定通

道向伞裙表层迁移的过程。老化严重试样(如3、4号试样),硅橡胶伞裙内部憎水性物质的迁移容易遭到电弧的破坏,而老化较轻试样憎水性物质的迁移不宜遭到破坏,进而造成试验过程中老化严重试样硅橡胶伞裙表面憎水性劣化速度明显快于老化较轻试样。

试验结束后,立即对试品进行憎水恢复试验,仅1号试品经144 h后憎水性能恢复到试验前水平,其他试品憎水性经过长时间(1个月)也无法恢复至初始状态,憎水性出现永久性的降低,这是由于试验过程中憎水性物质的迁移遭到破坏所致。

3.2 FTIR 测试结果及分析

在试验不同阶段对绝缘子高压端伞裙边缘取样进行傅里叶红外光谱(FTIR)测试分析,得到复合绝缘子硅橡胶材料主链Si-O-Si、侧链Si-CH₃集团吸收峰面积,通过峰面积可以定量反映绝缘子硅橡胶分子结构破坏情况^[19-22],结果见图7。

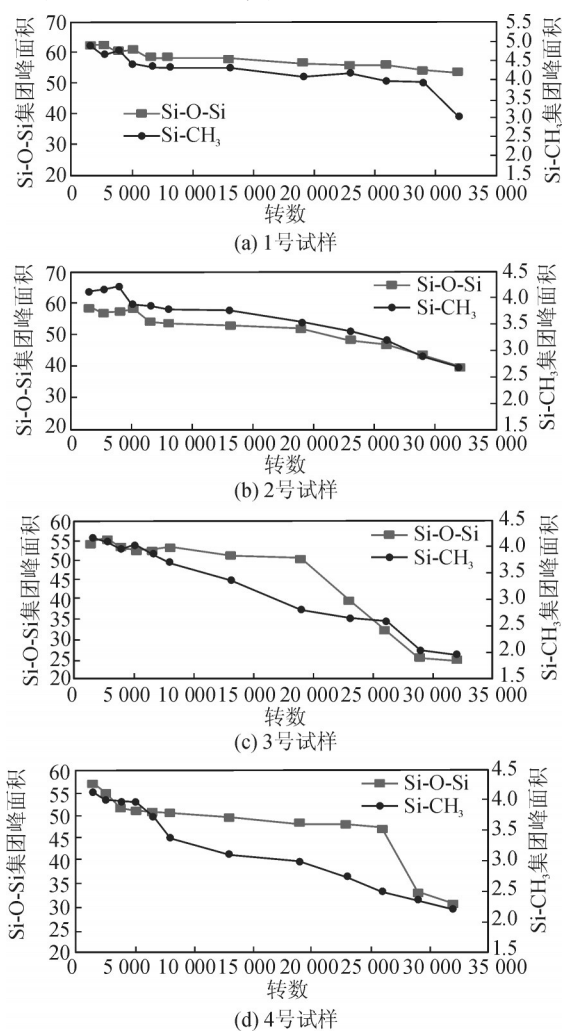


图7 试样分子结构变化情况

Fig. 7 Change of the molecular structure

随着试验时间的延长,放电产生的高温、高速

电子、紫外光等不断破坏硅橡胶分子的主链和侧链,其老化程度不断加深,但是主链和侧链的破坏速度并不恒定,特别是Si-O-Si主链的破坏速度,可以看出,在试验过程中,主链吸收峰面积变化情况可以分为3个阶段:第1个阶段,峰值面积下降速度较快,这时试验转数约为0~5 000转左右;第2个阶段峰值面积会以较恒定速率稳定下降,但下降速度相对较为缓慢,这时试验转数约为5 000~25 000左右;第3个峰值面积会出现快速下降的趋势,这时试验转数为25 000~32 000左右。吸收峰3个阶段的变化规律与泄漏电流和放电3个阶段的变化规律基本一致。

对比1号试样和4号试样,可以看出随着试验进行,1号试样Si-O-Si和Si-CH₃集团含量下降速度相对缓慢,特别是Si-O-Si集团,整个试验过程中变化程度较小,而4号试样,在试验过程中,两集团含量下降速度较快,尤其是Si-CH₃集团含量,呈直线下降。试验初期,4支试样两集团含量相差不大,均保持较高水平,但随着试验进行,本身老化严重的3、4号试样的分子结构破坏速度较快,Si-O-Si和Si-CH₃集团含量下降速度较快;而本身老化较轻的1、2号试样,分子结构破坏速度较慢,Si-O-Si和Si-CH₃集团含量下降速度较慢。这是由于硅橡胶材料本身具有一定的抗老化能力,在运行过程中,其抗老化能力不断遭到破坏,3、4号试样由于老化程度较高,其本身的抗老化能力已遭到破坏,因此在试验过程中表面放电作用下,其老化速度较快,而1号试样仍具有较强的抗老化能力,因此在试验过程中表面放电作用下,其老化速度较为缓慢。

4 结论

通过对4支绝缘子进行转轮法试验,研究了试验过程中试样表面放电和泄漏电流的变化规律,并测试分析了其憎水性能及分子结构变化情况,结果表明:

1)试验过程可以分为3个阶段,各阶段绝缘子表面放电情况、泄漏电流幅值存在差异;各阶段憎水性劣化速度和Si-O-Si和Si-CH₃集团对应峰面积减少速度存在差异。

2)试验过程中绝缘子憎水性能劣化速度以及Si-O-Si和Si-CH₃集团对应峰面积减少速度与其老化程度有关。

3)老化程度较轻试样,如1号试样,试验过程中憎水性下降速度较慢,憎水性恢复速度较快,且试

验过程中Si-O-Si和Si-CH₃集团对应峰面积减少速度较慢。

4)老化程度严重试样,如3、4号试样,试验过程中憎水性下降速度较快,且难以恢复,随着试验进行,Si-O-Si和Si-CH₃集团对应峰面积减少速度较快,尤其是Si-CH₃集团含量以直线速度下降。

参考文献:

- [1] 梁英,郭兴五. 基于FTIR的硅橡胶绝缘材料的老化程度评估[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 62-67.
LIANG Ying, GUO Xingwu. Aging condition assessment of silicone rubber for composite insulators based on FTIR[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 62-67.
- [2] 孙西昌,彭宗仁,党镇平,等. 特高压交流架空线路用复合绝缘子均压特性研究[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 527-530.
SUN Xichang, PENG Zongren, DANG Zhenping, et al. Study on electrical stress grading of composite insulators for UHV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 527-530.
- [3] 黎晓辰,袁超,张富春,等. 超,特高压直流耐张串复合绝缘子运行性能研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 24-28.
LI Xiaochen, YUAN Chao, ZHANG Fuchun, et al. Analysis of operating performance of composite insulators in ± 800 kV and ± 500 kV DC tension strings[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 24-28.
- [4] 印华,吴高林,王勇. 重庆电网500 kV交流复合绝缘子运行特性的试验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 22-25.
YIN Hua, WU Gaolin, WANG Yong. Experimental research on operation characteristics of 500 kV AC composite insulators in Chongqing power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 22-25.
- [5] 贾伯岩. 运行后复合绝缘子的理化分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 914-921.
JIA Boyan. Physics and chemistry analysis on composite insulators after operated[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 914-921.
- [6] 徐征,郭盼,何晓龙,等. 基于核磁共振原理的复合绝缘子老化问题研究[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 21-25.
XU Zheng, GUO Pan, HE Xiaolong, et al. Aging detection of composite insulator with nuclear magnetic resonance theory[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 21-25.
- [7] 申文伟,宋伟,王国利,等. 复合绝缘子HTV硅橡胶材料老化特性的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 1-7.
SHEN Wenwei, SONG Wei, WANG Guoli, et al. Influence of corona discharge on aging characteristics of HTV silicone rubber material[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 1-7.

- [8] MUNCIVI A, SARKAR P, HADDAD A. Tracking wheel test facilities[C]//Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference. Glasgow, UK: IEEE, 2009: 1-5.
- [9] 关志成, 刘瑛岩, 周运翔, 等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yunxiang, et al. Insulators and outdoor insulation of power transmission equipments[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [10] 梁曦东, 张轶博, 殷禹, 等. 复合绝缘子的5 000 h多因素试验及长期性能评价[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2492-2498.
- LIANG Xidong, ZHANG Yibo, YIN Yu, et al. 5 000 h multi-stress test procedure for silicone rubber composite insulators and its applications in long-term performance evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2492-2498.
- [11] 殷禹, 梁曦东, 周远翔, 等. 转轮法试验中硅橡胶合成绝缘子损坏现象的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 68-71.
- YIN Yu, LIANG Xidong, ZHOU Yuanxiang, et al. Analysis on failures of silicon rubber composite insulators in tracking wheel test[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 68-71.
- [12] 殷禹, 梁曦东, 周远翔, 等. 合成绝缘子交流转轮法与斜面法的比较研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 6-8.
- YIN Yu, LIANG Xidong, ZHOU Yuanxiang, et al. Tracking wheel test of composite insulators and comparison with inclined plane test[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 6-8.
- [13] 方春华, 王建国, 胡聪, 等. 转轮法试验中复合绝缘子放电现象及泄漏电流特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 242-246.
- FANG Chunhua, WANG Jianguo, HU Cong, et al. Research on discharge phenomena of composite insulators during tracking wheel test and analysis on leakage current characteristic[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 242-246.
- [14] 刘洋, 王建国, 方春华, 等. 复合绝缘子转轮法老化试验系统设计与开发[J]. 电工文摘, 2012, 48(5): 34-39.
- LIU Yang, WANG Jianguo, FANG Chunhua, et al. Design and development of tracking wheel aging test system of composite insulator[J]. Electrician Abstracts, 2012, 48(5): 34-39.
- [15] 罗明武, 肖代波. 复合绝缘子人工污秽试验方法研究综述[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 120-125.
- LUO Mingwu, XIAO Daibo. Review on artificial pollution test methods of composite insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 120-125.
- [16] 郭慧豪, 彭海江, 文猛, 等. 硅橡胶憎水迁移性和持久性的研究[J]. 有机硅材料, 2013, 27(2): 102-105.
- GUO Huihao, PENG Haijiang, WEN Meng, et al. Study on hydrophobicity transfer and endurance of silicone rubber[J]. Silicone Material, 2013, 27(2): 102-105.
- [17] 鲁志伟, 杨秀媛. 硅橡胶憎水迁移机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 51-55.
- LU Zhiwei, YANG Xiuyuan. A study on hydrophobicity transfer of silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 51-55.
- [18] 戴罕奇, 梅红伟, 王黎明, 等. 憎水迁移过程中的波动性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 971-981.
- DAI Hanqi, MEI Hongwei, WANG Liming, et al. Volatility of hydrophobicity on the polluted surface during hydrophobicity transfer[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 971-981.
- [19] 陈晓春, 郑敏聪, 李建华. 合成绝缘子硅橡胶伞裙材料的老化特性及其红外光谱研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(s1): 57-62.
- CHEN Xiaochun, ZHENG Mincong, LI Jianhua. Aging characteristics of silicone rubber composite insulator sheds studied by infrared spectroscopy[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(s1): 57-62.
- [20] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- WENG Shifu. Fourier transform infrared spectroscopy analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [21] 任海燕, 谭宇翔. 基于傅里叶红外光谱法的复合绝缘子老化程度诊断研究[J]. 电气自动化, 2013(1): 91-94.
- REN Haiyan, TAN Yuxiang. Study on diagnosis of composite insulators' degree of aging based on Fourier transform infrared spectroscopy test method[J]. Electrical Automation, 2013(1): 91-94.
- [22] 谢从珍, 袁超, 胡长猛, 等. ± 800 kV 直流耐张串复合绝缘子伞裙材料的老化特性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 735-741.
- XIE Congzhen, YUAN Chao, HU Changmeng, et al. Aging characteristics of shed materials of composite insulators in ± 800 kV DC tension strings[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 735-741.
- 贾伯岩(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事输变电设备外绝缘相关研究工作。