

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.016

基于FTIR的不同运行条件对复合绝缘子老化特性的影响研究

董平平¹, 田毅², 高丽娟³, 高婷⁴

(1. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司, 江苏 宿迁 223800; 2. 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054000; 3. 国网河北省电力有限公司衡水供电分公司, 河北 衡水 053000; 4. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 为研究现场运行复合绝缘子伞裙在不同条件下的老化状态, 利用傅里叶变换红外光谱(fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)和硬度测试方法, 分析同一厂家生产的运行于不同位置不同运行年限的多支复合绝缘子的老化特性, 同时对不同电压等级的复合绝缘子进行电场分布仿真。硬度测试结果表明: 处于高压端部的伞裙其上下表面的硬度都随着电压等级的提高而增加, 而处于绝缘子中部的伞裙, 其表面硬度则随着电压等级的升高而减小。同时发现, 同一电压等级的复合绝缘子随着运行年限的增加, 伞裙上下表面硬度逐渐增加。FTIR测试结果表明: 对于伞裙上表面, Si-O-Si主键吸收峰随着运行年限的增加下降越严重, 而下表面试样并未呈现出明确的规律性。硅橡胶复合绝缘子伞裙所处电场强度越高, FTIR红外光谱Si-O-Si和Si-CH₃官能团对应特征峰下降程度就越大; 对不同相别的复合绝缘子而言, B相伞裙各特征官能团对应的特征峰下降程度最小, 说明B相较A、C两相老化最轻。

关键词: 复合绝缘子; 老化; FTIR; 硬度

Influence of Different Operating Conditions on Aging Characteristics of Composite Insulators Based on FTIR

DONG Pingping¹, TIAN Yi², GAO Lijuan³, GAO Ting⁴

(1. Suqian Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Supply Co., Ltd., Jiangsu Suqian 223800, China; 2. Xingtai Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Hebei Xingtai 054000, China; 3. Hengshui Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Hebei Hengshui 053000, China; 4. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: In order to study the aging condition of composite insulator under different conditions, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and hardness testing method are used to analyze the aging conditions of samples operating different years and in the different positions from the same manufacturer. Meanwhile, the electric field distributions of composite insulators with different voltage levels are simulated. The hardness results show that the hardness of the upper and lower shed surfaces are increased with the voltage level, while the surface hardness of the shed in the middle part decreases with the voltage level. It is found that the hardness of the upper and lower shed surface with the same voltage level increased with the service life. FTIR test shows that the absorption peak of Si-O-Si decreased with the service life, the lower surface sample doesn't show a clear regularity. The FTIR infrared spectrum characteristic peaks of the Si-O-Si and Si-CH₃ functional group decreases with the increase of electric field strength of the silicone rubber composite insulator shed. For the composite insulators with different phases show that the absorption peak of the B-phase shed had the lowest degree of decrease, which indicates that the aging of B phase is the lightest than that of A and C phase.

Key words: composite insulator; aging; FTIR; hardness

收稿日期:2018-06-17; 修回日期:2018-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51207055);河北自然科学基金项目(E2013502213)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51207055), Natural Science Foundation of Hebei Province (E2013502213).

0 引言

复合绝缘子不仅具有重量轻、机械强度高等优点,而且具有极好的耐湿闪和污闪性能,在国内外得到了广泛的应用^[1-6]。作为一种应用较为成功的复合绝缘子外套材料,高温硫化(high temperature vulcanization, HTV)硅橡胶随之受到了广泛的关注^[7]。然而,随着使用年限的增加,复合绝缘子的老化问题逐渐引起人们的重视^[8-9]。针对现场中运行的复合绝缘子来说,其表面的老化为多种因素的综合作用所致,且与绝缘子所处的地理位置、气候条件、运行环境等有直接的关系^[10-12]。

国内外研究者利用现场运行复合绝缘子或实验室模拟硅橡胶老化等手段研究硅橡胶材料的老化特性。文[13]通过对不同部位、运行污区、运行年限复合绝缘子硅橡胶伞裙进行 FTIR 测试分析可知,导线侧伞裙电场较高,杆塔侧伞裙次之,中部伞裙电场最低;且随着运行年限的增加,伞裙表面老化逐渐加重并向内部发展;文[14]对高海拔地区复合绝缘子紫外老化现象进行了研究,结果表明,硅橡胶试样经长时间紫外线辐射后,硅橡胶材料硬度变大,柔顺性降低;文[15]在实验室中通过氙灯辐照老化试验对 HTV 硅橡胶老化不同时间后,对硬度和 FTIR 进行分析,研究表明,经紫外线辐射的硅橡胶材料硬度均变大,且试样的红外光谱 Si-CH₃ 键和 Si-O-Si 键的吸收峰的峰面积均减小。

现阶段对硅橡胶复合绝缘子的老化特性的研究主要是在实验室模拟硅橡胶的老化进行研究,对现场运行复合绝缘子的老化特性研究较少,且对现场复合绝缘子的研究中所选绝缘子大多来自不同生产厂家。文[16]中表明,不同厂家生产的绝缘子由于配方不同而导致老化程度存在差异。同时,大多数研究硅橡胶老化特性的手段主要集中于憎水性、泄漏电流等传统方法^[17-18]。因此,利用傅里叶红外光谱测试和硬度测试等手段,从硅橡胶材料微观化学特性和宏观物理特性出发,研究同一厂家生产的不同运行电压等级、不同运行年限和不同相别对硅橡胶复合绝缘子老化特性的影响规律。对于更好地理解复合绝缘子耐老化机理,科学评估其使用寿命及指导材料配方改进等具有非常重要的理论

意义和实践价值。

1 试样与试验方法

为了考察运行年限、电压等级及不同相别等因素对复合绝缘子用 HTV 硅橡胶材料老化特性的影响,根据文[19]中所确定的取样方案,对大量绝缘子进行了遴选并进行了试样制备,并针对性地进行了硬度和 FTIR 测试分析。

1.1 试样选取

针对现场典型条件下的复合绝缘子,分别切取不同位置的硅橡胶伞裙,对伞裙表面进行区域划分,用切片机对伞裙进行取样,取样结果示意图见图 1。其中所取复合绝缘子的背景信息见表 1。其均为同一厂家的产品,运行年限从 5~19 年不等,运行电压分为 110 和 220 kV。其中,XF_{2-2-shang} 表示标号为 XF₂ 的绝缘子从高压侧数第 2 片伞裙上表面的测试结果;XF_{4-da-5-shang} 表示标号为 XF₄ 的绝缘子从高压侧数第 5 片大伞裙上表面的测试结果,未标注大小均为小伞。

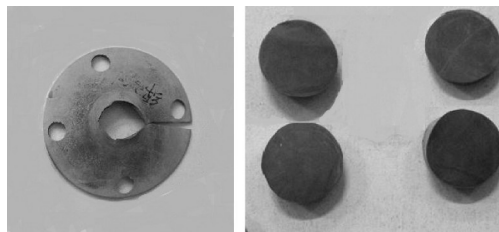


图1 复合绝缘子伞裙取样示意图

Fig. 1 Sketch map of composite insulator umbrella skirt

1.2 试验方法

为清除现场所取试样表面的污秽,对所取圆形试样放入无水乙醇中清洗,再用去离子水冲洗,放入烘干箱中烘干,取出后室温放置 24 h 后备用。按照国标 GB/T 531.1—2008 硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度试验方法,对处理过的圆形试样利用邵氏 A 型硬度计测量其硬度,测量硬度时将硬度计的开关打开,将硬度计尖端对准试品表面待测部位,向下运动使硬度计与试品间压紧,此时显示屏上的数值即为当前的硬度值。由于测量时力度掌握不稳,每次测量测量 3 次取其平均值作为最后的硬度测量值。同时,由于文中需要分析的硅橡胶为不透明物质,因此采用了 ATR-FTIR 技术对老化不同阶段的硅橡胶表面进行反射光谱分析,通过比较分析得到硅橡胶表面官能团的变化情况。FTIR 光谱仪工作

表1 试样信息一览
Table 1 Sample information list

编号	线路名称	杆塔号	相序	运行年限/年	切片取样
XF ₁	110 kV 钱庞线	17	左相	19	2-5-8-10-17-19
XF ₂		17	中相		1-3-5-9-11-17-19
XF ₃		17	右相		1-3-5-11-16-18
XF ₄	110 kV 康陈线	5	左相	8	大:1-3-5-7-9-11 小:1-5-10
XF ₅		5	中相		大:1-3-5-6-9-11 小:1-5-10
XF ₆		5	右相		大:1-3-5-6-9-11 小:1-5-10
XF ₇	220 kV 丹乔线	53	左相	21	1-3-10-17-19-28-36-38
XF ₈		53	右相		1-3-10-17-19-28-35-38
XF ₉	220 kV 丹乔线	49	左相	11	大:1-3-5-7-9-11-13
XF ₁₀		49	中相		大:1-3-5-7-9-11-13
XF ₁₁		49	右相		大:1-3-4-5-7-9-11-13
XF ₁₅	220 kV 乔胡线	52	左相	5	大:1-3-6-9-11-15-18-20
XF ₁₆		52	中相		大:1-3-6-9-11-14-18-20
XF ₁₇		52	右相		大:1-3-6-9-11-14-18-20
jm _{1a}	110 kV 胡满线	58	左相	15	大:1-3-5-7
jm _{1b}		58	中相		大:1-3-5-7
jm _{1c}		58	右相		大:1-3-5-7
jm ₂₁	220 kV 双水线	40	左相	12	大:1-3-9-11-19-21
jm ₂₂		40	中相		大:1-4-10-11-17-19
jm ₂₃		40	右相		大:1-3-9-11-19-21

原理图见图2。采用的分析仪为 Thermo Nicolet AVATAR 360 FT-IR,最高分辨率为 0.125 cm^{-1} 。每次测量中的扫描次数设置为32次。硅橡胶分子式中化学基团对应特征峰波数见表2。

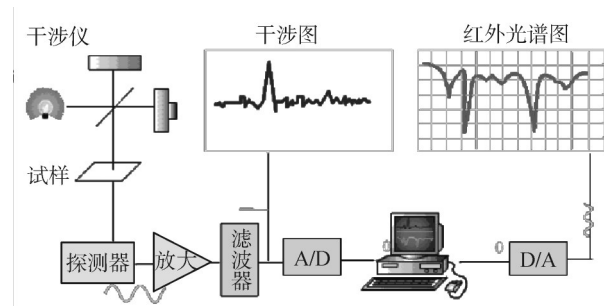


图2 FTIR光谱仪工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of FTIR spectrometer

表2 硅橡胶分子式中化学基团对应特征峰波数

Table 2 Chemical groups in the molecular formula of silicon rubber

化学基团	特征峰对应波数/ cm^{-1}
Si-CH ₃	1 260
Si(CH ₃) ₂	800
C-H	3 000
Si-O-Si	1 000 ~ 1 100
O-H	3 200~3 500

2 试验结果

2.1 硬度试验结果

2.1.1 不同电压等级

110 kV 康陈线(运行8年)、220 kV 丹乔线(运行

11年)和220 kV 乔胡线(运行5年)的绝缘子不同部位伞裙上下表面的硬度测试结果以及110 kV 钱庞线(运行19年)、220 kV 丹乔线(运行21年)的绝缘子上下表面的硬度测试结果见图3。从图3中可以发现,处于高压端部的伞裙其上下表面的硬度都随着电压等级的提高而增加。而处于绝缘子中部的伞裙,其表面硬度则呈现相反的变化趋势,即输电电压等级越高,其硬度值越小。

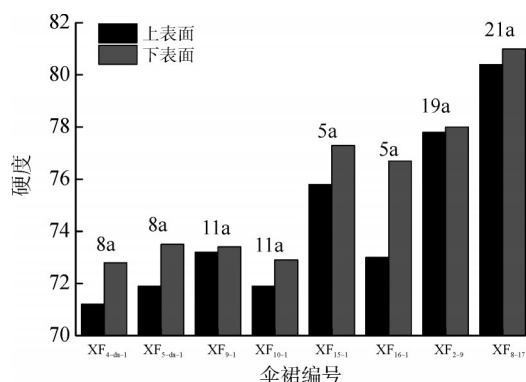


图3 不同电压等级的复合绝缘子不同部位伞裙上下表面的硬度

Fig. 3 The hardness of the upper and lower surfaces of the different parts of the composite insulator

2.1.2 不同运行年限

110 kV 钱庞线运行19年,110 kV 胡满线运行15年,110 kV 康陈线运行8年的绝缘子伞裙(右相上、下表面第1片)的硬度值对比结果见图4。220 kV 丹乔线运行21年,220 kV 双水线运行12年,220 kV 丹乔线运行11年,220 kV 乔胡线运行5年的硬度测试结果见图5。

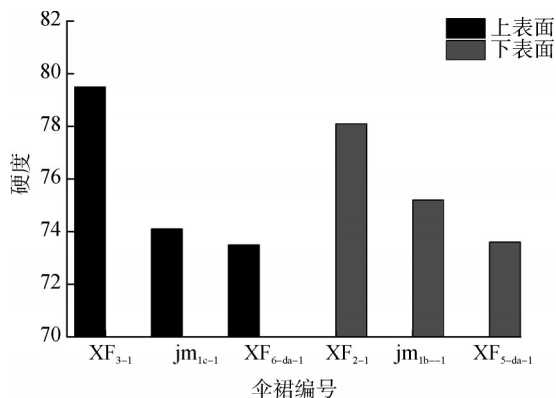


图4 110 kV 线路运行不同年限的绝缘子伞裙上、下表面硬度对比

Fig. 4 Comparison of the hardness of the upper and lower surface of the insulator skirt of the 110 kV line in different years

从图4、5可以看出,一般情况下在同一电压等级运行的复合绝缘子,随着运行年限的增加,其伞

裙上下表面硬度逐步增加。

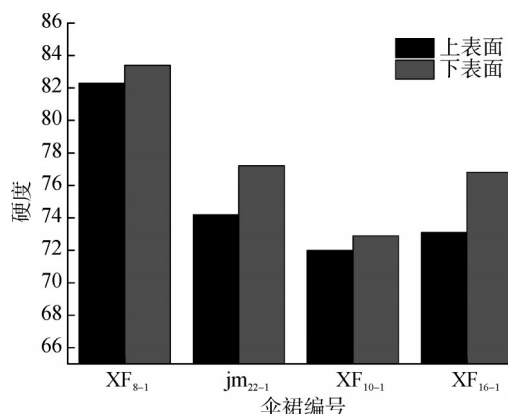


图5 220 kV 线路运行不同年限的绝缘子伞裙上、下表面硬度对比

Fig. 5 Comparison of the hardness of the upper and lower surface of the insulator skirt of the 220 kV line in different years

2.1.3 不同相别

110 kV 胡满线第3、5、7片下表面的三相的硬度测试结果及220 kV 丹乔线第1片上表面的三相伞裙的硬度测试结果见图6。从图6可见,运行于不同相别线路的复合绝缘子,其表面硬度并无呈现出明显规律性。

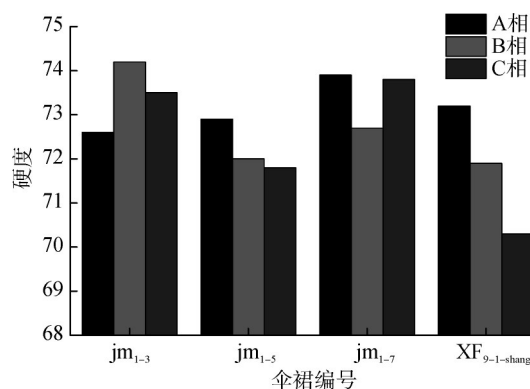


图6 不同相别的伞裙表面硬度对比

Fig. 6 Comparison of the surface hardness of the umbrella skirt

2.2 FTIR 试验结果

2.2.1 不同电压等级

110 kV 康陈线(运行8年)、220 kV 丹乔线(运行11年)和220 kV 乔胡线(运行5年)的绝缘子不同部位伞裙上下表面的FTIR测试结果见图7。110 kV 钱庞线(运行19年)、220 kV 丹乔线(运行21年)的绝缘子上、下表面的FTIR测试结果见图8。为了排除绝缘子形状、长度的影响,均选择相近位置处的伞裙进行比较。

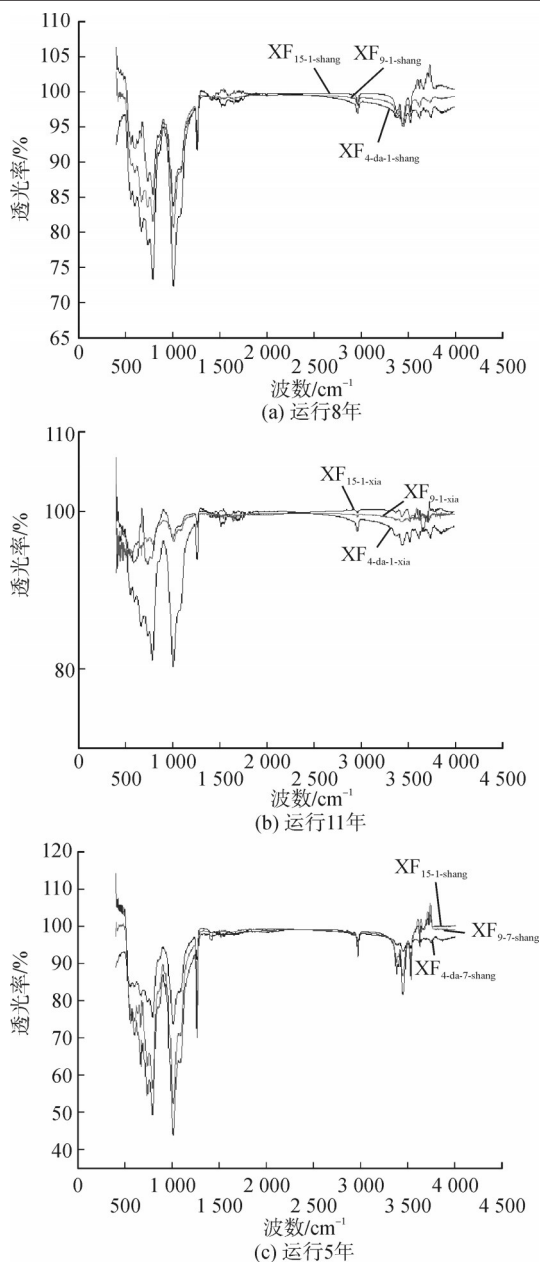


图7 不同电压等级下运行10年左右的绝缘子表面FTIR结果

Fig. 7 FTIR results of insulator surface under different voltage levels for about 10 years

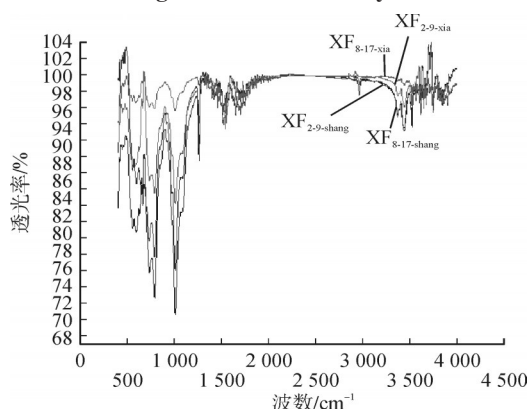


图8 不同电压等级下运行20年左右的绝缘子表面FTIR结果

Fig. 8 FTIR results of insulator surface under different voltage levels for about 20 years

从图7、8中可以发现,在年限相差不大的情况下,对比高压第1片伞裙波数在 $1\,260\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,000\sim 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 对应特征峰值可以发现,220 kV的绝缘子特征峰较110 kV绝缘子下降严重;而110 kV绝缘子中间伞裙硅橡胶侧链和主链对应特征峰值比220 kV绝缘子下降严重。由此说明,高压第1片伞裙,220 kV的绝缘子比110 kV老化情况要严重,正中间处110 kV绝缘子比220 kV的伞裙老化严重。

2.2.2 不同运行年限

110 kV 钱庞线运行19年,110 kV 胡满线运行15年,110 kV 康陈线运行8年的绝缘子伞裙(右相上、下表面第1片)的FTIR对比结果见图9。220 kV 丹乔线运行21年,220 kV 双水线运行12年,220 kV 丹乔线运行11年,220 kV 乔胡线运行5年的FTIR测试结果见图10。

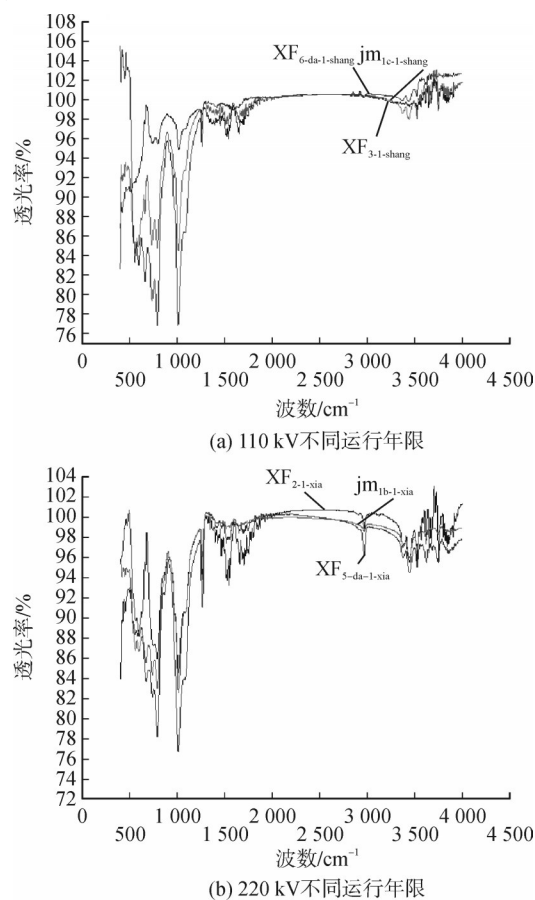


图9 不同运行年限下110 kV线路绝缘子表面FTIR结果

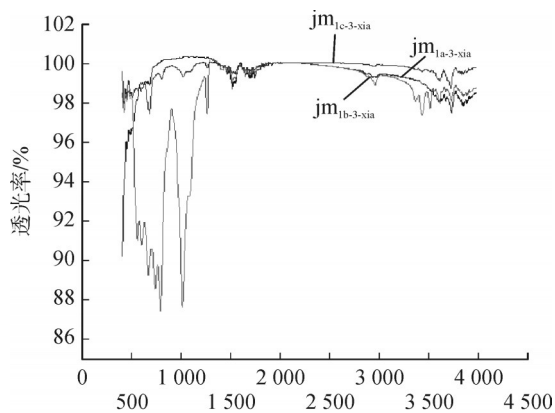
Fig. 9 FTIR results of insulator surface of 110 kV line under different operating years

从图9可以看出,对于伞裙上表面,波数在 $1\,000\sim 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 对应的Si-O-Si主键吸收峰随着运行年限的增加,吸收峰下降越严重,而下表面试样并未呈现出明确的规律性。由此说明,硅橡胶伞裙上表面随着运行年限的增加,老化越严重。从侧面表明进行老化研究时伞裙上表面的试样更具代

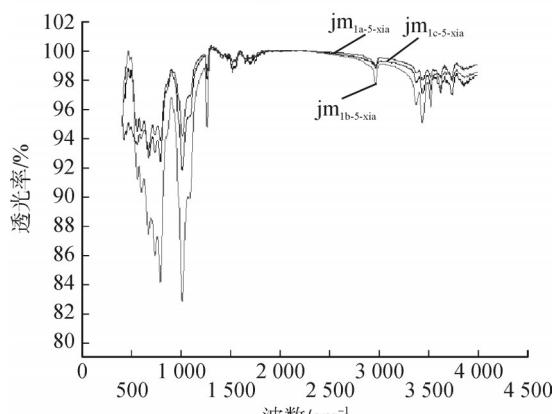
表性。

2.2.3 不同相别

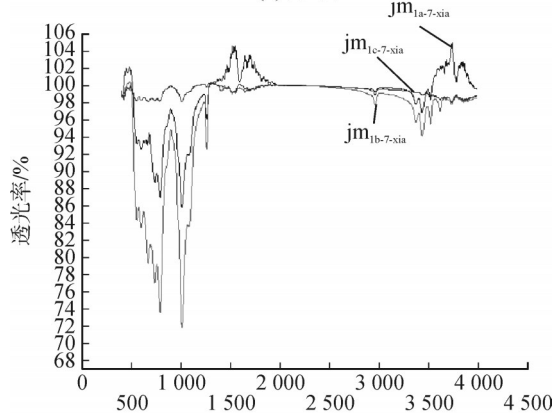
110 kV 胡满线第 3、5、7 片下表面的三相的 FTIR 结果见图 10。220 kV 丹乔线第 1 片上表面的三相 FTIR 测试结果见图 11。



(a) 第1片



(b) 第3片



(c) 第7片

图 10 110 kV 胡满线不同相别绝缘子表面 FTIR 结果

Fig. 10 FTIR results of insulator surfaces on different phases of 110 kV Human line

图 10、图 11 均表明, B 相的各特征峰较 A、C 下降最轻, 说明 110 kV 胡满线和 220 kV 丹乔线的 B 相绝缘子老化最轻。

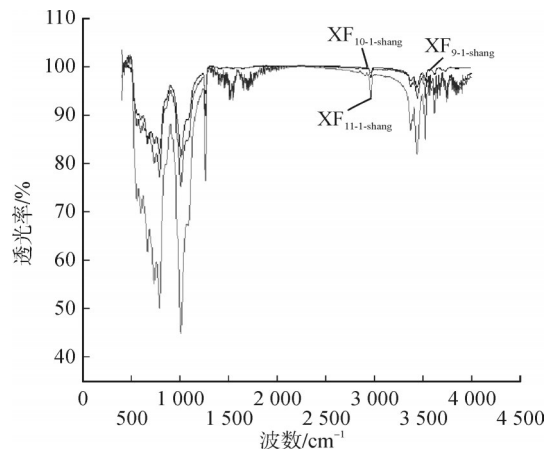


图 11 220 kV 丹乔线不同相别绝缘子表面 FTIR 结果

Fig. 11 220 kV Danqiao line in different phase of insulator surface FTIR results

3 分析与讨论

硅橡胶复合绝缘子挂网运行期间, 由于受到日光照、表面放电、风沙和污秽等恶劣环境因素的影响, 不可避免地发生老化现象。相关研究表明^[20]: 硅橡胶在受到表面放电时, 其产生的带电粒子在撞击硅橡胶表面时将释放高达 963 kJ/mol 能量, 而硅橡胶主链 Si-O-Si 键能在 446 kJ/mol 左右, Si-CH₃ 中 C-H 键能在 413 kJ/mol 左右, 因此硅橡胶中的化学键被打断, 表现在 FTIR 中为对应特征吸收峰的下降。Si-CH₃、Si(CH₃)₂、C-H 处吸收峰的减小程度反映了侧链的断裂程度, 而 Si-O-Si 处吸收峰变化反映了主链的断裂程度。主链、侧链的断裂程度是反映绝缘子老化程度的重要依据。

从图 3 中可以发现, 处于高压端部的伞裙其上下表面的硬度都随着电压等级的提高而增加。而处于绝缘子中部的伞裙, 其表面硬度则呈现相反的变化趋势, 即输电电压等级越高, 其硬度值越小。结合 Ansys 仿真绝缘子表面场强分布结果见图 12、13。由图 12、13 可知, 在高压端和最低压端 220 kV 的绝缘子电场强度大于 110 kV 绝缘子的电场强度; 而在绝缘子中部的大部分地方, 110 kV 线路的绝缘子表面电场强度大于 220 kV 线路。该结果可以从一定程度上解释上述硬度变化规律。同时, 注意到大多数伞裙下表面的硬度测试值均高于上表面。

图 7、8 中均显示, 在年限相差不大的情况下, 电压等级越高的伞裙, 波数在 1 270~1 255 cm⁻¹ 处和 1 100~1 000 cm⁻¹ 处的特征吸收峰降低越多, 说明 Si-CH₃ 和 Si-O-Si 结构被破坏的越严重; 从电场的角度来讲, 电压等级越高, 绝缘子表面承受的最高电场越强也越大, 相应地, 此处发生表面放电的概

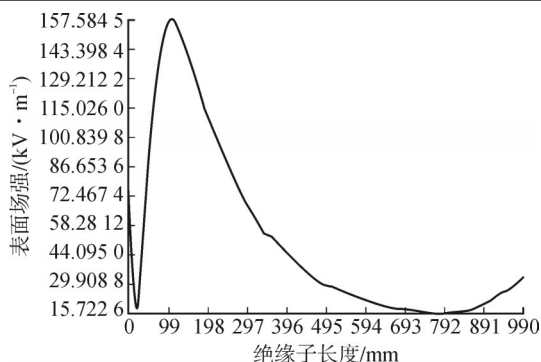


图12 110 kV 胡满线加均压环后某绝缘子表面场强分布

Fig. 12 Distribution of field strength of a insulator after

110 kV Human Line adding equal pressure ring

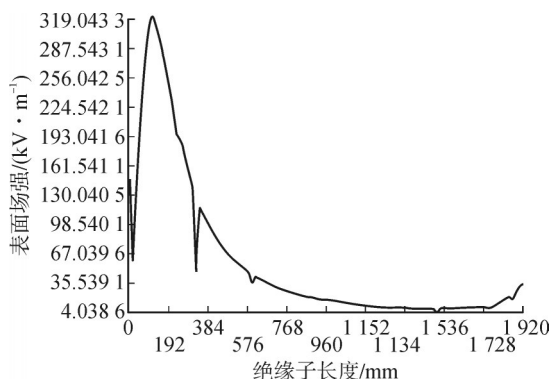


图13 220 kV 双水线某绝缘子表面场强分布

Fig. 13 220 kV Shuangshui line field on the surface of insulator distribution

率增大,带电高能粒子撞击绝缘子表面,容易破坏其表面的化学结构。

从图4、5可以看出,一般情况下在同一电压等级运行的复合绝缘子,随着运行年限的增加,其伞裙上下表面硬度逐步增加。这是因为随着运行年限的增加,硅橡胶 Si-O-Si 主键在紫外辐射等因素下分子之间发生过度交联,柔顺性降低,导致硬度增加。图9可以看出,对于伞裙上表面,运行年限越长,其老化程度越严重,而下表面试样并未呈现出明确的规律性。由此可以推测,随着运行年限的增加,绝缘子的化学结构的变化更为明显,这可作为判断其老化程度的一个指标。绝缘子在现场服役的年限越长,意味着其承受各种应力的时间就越长,且易形成累积效应,材料表面发生变化的几率增大。因此现场监测或巡检时更多地关注于运行年限较长的复合绝缘子。

从硬度测试结果并未发现不同相别对硬度的影响规律。而对110 kV 胡满线和220 kV 丹乔线不同相别的伞裙进行FTIR测试发现,B相硅橡胶伞裙的FTIR红外光谱各特征峰最高,A、C相各特征峰下降较严重,说明此线路B相绝缘子老化情况较轻。

4 结论

文中对同一厂家生产的运行于不同电压等级和不同年限的复合绝缘子进行硬度和FTIR测试,得出以下结论:

1)处于高压端部的伞裙其上下表面的硬度都随着电压等级的提高而增加。而处于绝缘子中部的伞裙,其表面硬度则随着电压等级的升高反而减小。

2)硅橡胶复合绝缘子伞裙所处电场强度越高,FTIR红外光谱 Si-O-Si 和 Si-CH₃ 官能团对应特征峰下降程度就越大,同时硬度也越大。

3)同一电压等级的复合绝缘子随着运行年限的增加,伞裙上下表面硬度逐渐增加;对于伞裙上表面,波数在1 000~1 100 cm⁻¹对应的 Si-O-Si 主键吸收峰随着运行年限的增加,吸收峰下降越严重,而下表面试样并未呈现出明确的规律性。

4)对于文中所选线路复合绝缘子伞裙FTIR红外光谱表明,B相伞裙特征官能团对应的吸收峰下降程度最小,说明B相较A、C两相老化最轻。

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,2006:4-6.
GUAN Zhicheng, Liu Yingyan, Zhou Yuanxiang, et al. Insulation of insulator and power transmission equipment [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006:4-6.
- [2] 李国芳,虞 澜,覃永雄. 复合绝缘子高温硫化硅橡胶紫外辐射研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2015,33(4):20-27.
Li Guofang, Yu Lan, Tan Yongxiong. High temperature vulcanized silicone rubber composite insulator of ultraviolet radiation [J]. Journal of radiation research and radiation technology, 2015,33(4):20-27.
- [3] SAMUEL A, FRANK S, KONSTANTIN O P. Improved silicone rubbers for the use as housing material in composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 209- 211.
- [4] XU Z, ZHANG F, ZHANG H, et al. Investigation of the aging of line composite insulator sheds[C]//2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application, [S.l.]:IEEE, 2012:489-491.
- [5] 崔江流,宿志一,易 辉. 我国硅橡胶复合绝缘子的应用与展望[J]. 中国电力,1999,32(1):38-41.
CUI Jiangliu, SU Zhiyi, YI Hui. The application and its prospect of silicon rubber composite insulators in China[J]. China power, 1999,32(1):38-41.
- [6] 梁曦东. 高电压外绝缘技术的新发展[J]. 绝缘材料通讯,

- 1999(2):16-20.
- LIANG Xidong. New development of outside high voltage insulation technology[J]. *Insulating Materials*, 1999(2):16-20.
- [7] 张予, 吴光亚, 张锐. 高温硫化硅橡胶材料的运行特性及分析[J]. *电瓷避雷器*, 2006(3):18-22.
- ZHANG Yu, WU Guangya, ZHANG Rui. Operating characteristics and analysis of high temperature vulcanized silicone rubber[J]. *Insulators and surge arresters*, 2006(3):18-22.
- [8] 殷禹, 梁曦东, 李庆锋, 等. 复合绝缘子的人工加速老化试验[J]. *电网技术*, 2006, 12:69-74+78.
- YIN Yu, LIANG Xidong, LI Qingfeng, et al. Artificial accelerated ageing test of composite insulators[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(12):69-74.
- [9] GAO H F, JIA Z D, GUAN Z C, et al. Evaluation of electrical insulation properties on aged composite insulators in heavily contaminated areas[C]//*Proceedings of International Symposium on Electrical Insulation*. Toronto, Canada: IEEE, 2006: 197-200.
- [10] 高海峰, 周军, 马仪, 等. 高海拔区线路运行复合绝缘子的电气性能评估[J]. *电网技术*, 2010, 34(10):201-205.
- GAO Haifeng, ZHOU Jun, MA Yi, et al. Electrical performance evaluation of line running composite insulators in high altitude area[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(10):201-205.
- [11] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新, 等. 高海拔现场与人工气候室下绝缘子交流污闪特性的比较[J]. *电网技术*, 2012, 36(2):163-169.
- ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, SUN Caixin, et al. Comparison of AC pollution flashover characteristics of insulators in high altitude and artificial climate chamber[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(2):163-169.
- [12] 赵宇倩. 硅橡胶复合绝缘子在污湿污秽条件下的特性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- ZHAO Yuqian. Analysis of the characteristics of silicone rubber composite insulators under polluted conditions[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [13] 汪佛池, 律方成, 杨升杰, 等. 基于 FTIR 的 110 kV 复合绝缘子硅橡胶伞裙老化性能分析[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(8):297-303.
- WANG Fuchi, LYU Fangcheng, YANG Shengjie, et al. The aging characteristic of silicon rubber sheds of 110 kV composite insulators based on FTIR test[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(8):297-303.
- [14] 赵翻选, 赵书荣, 王联章, 等. 高海拔地区紫外辐射对硅橡胶复合绝缘子老化的影响[J]. *华北电力技术*, 2009, 30(3):10-13.
- ZHAO Hexuan, ZHAO Shurong, WANG Lianzhang, et al. Effect of ultraviolet radiation on aging of silicone rubber composite insulators in high altitude area[J]. *North China Electric Power Technology*, 2009, 30(3):10-13.
- [15] 刘云鹏, 石倩, 梁英. 干燥环境下紫外辐射对硅橡胶老化性能的影响[J]. *高压电器*, 2015, 51(4):129-132.
- LIU Yunpeng, SHI Qian, LIANG Ying. Effect of UV radiation on aging performance of HTV-silicone rubber in dry conditions[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(4):129-132.
- [16] 刘杰. 基于微观性能分析的复合绝缘子老化特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- LIU Jie. Study on aging characteristics of composite insulators based on micro performance analysis [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [17] 贺博, 万军, 张刚, 等. 自然老化硅橡胶材料表面憎水性及耐受特性的研究[J]. *高压电器*, 2009, 46(5):16-19.
- HE Bo, WAN Jun, ZHANG Gang, et al. Study on hydrophobicity and withstand characteristics of natural aging silicone rubber[J]. *High Voltage Apparatus*, 2009, 46(5):16-19.
- [18] 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.
- [19] 梁英, 崔春艳, 易春芳, 等. 复合绝缘子老化状态精细评估中的取样方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(2):530-535.
- LIANG Ying, CUI Chunyan, YI Chunfang, et al. The sampling method for the precise evaluation of aging state of composite insulators[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(2):530-535.
- [20] 王建国, 刘洋, 方春华. 交流电晕对高温硫化硅橡胶性能的影响[J]. *高分子学报*, 2009, 53(4):331-337.
- WANG Jianguo, LIU Yang, FANG Chunhua. Performance influence of high temperature vulcanization silicone rubber by alternating current corona discharge[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2009, 53(4): 331-337.

董平平(1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术。

田毅(1980), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术。

高丽娟(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术。

高婷(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电介质材料介电特性、高电压与绝缘技术。