

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.03.012

运行条件对复合绝缘子红外光谱的影响研究

莫小向¹, 董平平², 高丽娟³

(1. 广西电网有限责任公司河池供电局, 广西 河池 547000; 2. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司, 江苏 宿迁 223800; 3. 国网河北省电力有限公司衡水供电分公司, 河北 衡水 053000)

摘要:长期挂网运行的复合绝缘子往往不可避免地发生老化,造成绝缘子绝缘性能的下降。为研究复合绝缘子在不同运行条件下的老化状态,文中采用傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)分析运行于不同环境、不同电压等级具有不同运行年限的多支复合绝缘子,并对复合绝缘子伞裙典型官能团的变化情况进行研究。研究结果表明:重污区绝缘子表面积污程度相对较重,造成复合绝缘子伞裙表面Si-O-Si键和Si-CH₃键含量相对较低,其老化程度更严重。同时,通过数理统计的方法研究运行于不同电压等级的绝缘子Si-CH₃与Si-O-Si的对应吸收峰面积,结果表明,不同电压等级的复合绝缘子红外光谱吸收峰面积具有分散性,220 kV绝缘子红外光谱基团的吸收峰面积明显小110 kV的绝缘子,但整体上峰面积呈现随运行年限增大而变小的趋势。

关键词:复合绝缘子;老化;傅里叶变换红外光谱

Effects of Operating Condition on FTIR of Composite Insulator

MO Xiaoxiang¹, DONG Pingping², GAO Lijuan³

(1. Hechi Power Supply Branch, State Grid Guangxi Electric Power Supply Co., Ltd., Guangxi Hechi 547000, China;
2. Suqian Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Supply Co., Ltd., Jiangsu Suqian 223800, China;
3. Hengshui Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Hebei Hengshui 053000, China)

Abstract: To investigate aging state of composite insulators under different operating conditions, Fourier transform infrared spectroscopy is employed to analyze the composite insulators with different service time and working in different environment and voltage grade. And the change of the typical functional groups of composite insulator's umbrella skirt is also analyzed. The results show that in heavy pollution area the pollution degree of insulator surface is relatively high, leading to lower contents of Si-O-Si and Si-CH₃ chains on umbrella skirt surface of the composite insulator and higher aging degree. Furthermore, mathematical statistics is adopted to obtain the absorption peak areas of Si-CH₃ and Si-O-Si chains on the insulators corresponding to different voltage grade. It is shown that the absorption peak areas for the composite insulators working at different voltage grade are dispersive, and the absorption peak areas for the 220 kV insulator is obviously smaller than that for the 110 kV insulator. In general, the absorption peak areas get smaller with increasing service time of the composite insulator.

Key words: composite insulators; aging; Fourier transform infrared spectroscopy(FTIR)

0 引言

与玻璃和瓷绝缘子相比,复合绝缘子因其重量轻,机械强度高,憎水性强,耐污闪能力强,免清扫

和少维护等优点,近年来已广泛应用于世界各国输电线路^[1-13]。作为有机绝缘材料,不同于瓷和玻璃等无机材料,有机材料是通过共价键来结合分子中的各元素,键和力比较弱,在受到自然环境因素和放电因素的影响时,构成有机材料的大分子键较容易断

收稿日期:2017-09-04; 修回日期:2017-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(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).

裂,因此不可避免地会发生老化。老化的直接后果是使得复合绝缘子伞裙表面的憎水性能下降,闪络电压降低、耐污闪能力下降,进而影响电力系统的稳定运行,因此复合绝缘子的老化问题一直是研究人员普遍关注的问题,故对现场运行的复合绝缘子的老化状态进行评估分析是输电线路运行部门密切关注的问题^[14-17]。

目前,针对复合绝缘子电特性、物理特性或者化学特性的老化评估方法有的不适于定量分析,有的测试过程复杂,难以分析。例如,用喷水分级法得到的憎水性由于测试结果要靠人眼观察,测试结果易受到人的主观因素影响;扫描电镜(SEM)测试结果不易进行定量分析;热刺激电流(TSC)测试过程比较复杂,对测试样品要求较高,等等。这些测试方法中,傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)具有测试过程简单、样品制备简单和易于分析等优点,在现场复合绝缘子的老化评估中得到广泛应用^[18]。FTIR测试能够通过不同波长所对应的峰值来确定材料中的化学键,通过与未老化试样的FTIR对比可以探测到材料的降解^[14,19-20]。

现阶段对复合绝缘子老化机理的研究主要是在实验室中对复合绝缘子用HTV硅橡胶材料的研究,但是实验室中很难做到对绝缘子运行环境的模拟^[6,18];而对现场绝缘子的研究,多是对典型样品进行分析,对大量现场样品进行分析的较少^[2,3,8,15,21]。针对这种情况,文中从6个在运10万支以上的主流厂家中,抽样选取运行在不同环境、不同电压等级、不同运行年限的多支复合绝缘子进行红外光谱测试,通过数理统计的方法,研究不同运行条件对复合绝缘子红外光谱的影响规律。

1 FTIR 测试原理及方法

傅里叶变换红外光谱仪主要由光源(能发射出稳定、高强度连续波长的红外光)、迈克尔逊干涉仪、试样插入装置、检测器、计算机和记录仪等部分组成,其工作原理见图1。

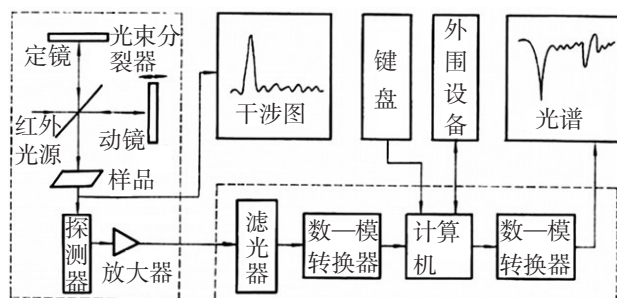


图1 傅里叶变换红外光谱仪的工作原理

Fig. 1 Principle of Fourier transform infrared spectrometer

由红外光源发出的红外辐射经干涉仪后,经调制后得到一束干涉光;该干涉光通过试样后成为带有试样信息的干涉光而被检测器检测到。检测器将干涉光信号变为电信号,由计算机采集,得到带有试样信息的时域干涉图;经过计算机进行傅里叶变换的快速计算,将干涉图转换成以透光率或吸光度为纵坐标,以波数为横坐标的红外光谱图。其中最核心的部件是干涉仪,其主要由两个互成90°角的平面镜(动镜和定镜)和一个分束器组成。分束器具有半透明性质,由光源射来的一束光到达分束器时即被它分为两束,即反射光和透射光,其中50%的光透射到动镜,另外50%的光反射到定镜。透射光和反射光经过动镜和定镜的反射会合在一起成为具有干涉光特性的相干光。

文中红外光谱分析采用 Nicolet Is5 型傅里叶变换红外光谱仪,应用全反射附件,光谱仪见图2。全反射棱镜采用 ZnSe 晶体组成,测量光谱范围 $600 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,分辨率采用 4 cm^{-1} ,每次测量中的扫描次数设置为32次。



图2 傅里叶变换红外光谱仪

Fig. 2 Fourier transform infrared spectrometer

对硅橡胶试品进行红外光谱测试时,应先采集背景的红外光谱,也就是空气和水分的红外光谱,测试时 ZnSn 棱镜上不放置试品,采集得到的背景红外光谱见图3;然后把硅橡胶试品放到 ZnSe 棱镜上,注意保证测试面同棱镜紧密贴合,压紧后采集样本的红外光谱,仪器会自动扣除背景,显示试品的红外光谱,复合绝缘子用硅橡胶试品新品的红外光谱图见图4。图4(a)、(b)可以相互转换,其本质上是一样的。硅橡胶中的主要成分为PDMS,主要由主链 Si-O-Si 结构和侧链 Si-CH₃ 组成,因此反映主链断裂情况的基团有吸收峰波数为 $1\,000 \sim 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 的 Si-O-Si,反映侧链断裂的基团有吸收峰为 $1\,260\text{ cm}^{-1}$ 的 Si-CH₃^[11]。

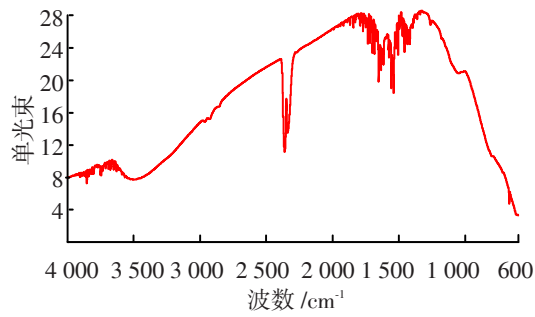
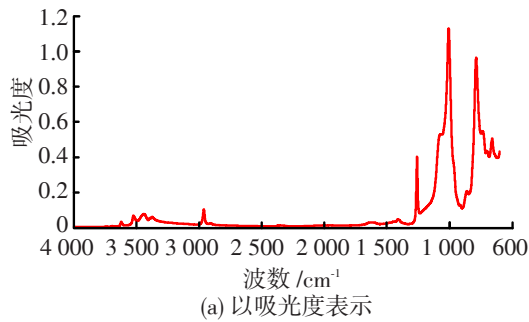
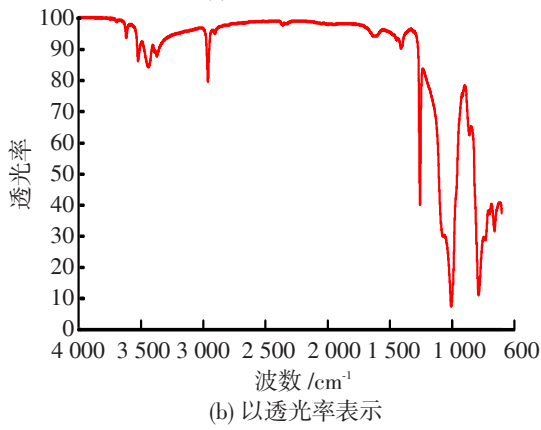


图3 背景红外光谱

Fig. 3 Infrared background



(a) 以吸光度表示



(b) 以透光率表示

图4 典型硅橡胶试品红外光谱图

Fig. 4 Infrared spectra of typical silicone rubber samples

2 不同条件下复合绝缘子的老化特性变化规律

从6个在运10万支以上的主流厂家中,选用110、220、500 kV电压等级,分别为110 kV复合绝缘子27支运行年限4~19年之间,220 kV复合绝缘子28支运行年限3~21年之间,500 kV复合绝缘子6支运行年限6~12年之间。绝缘子参考样品背景信息见表1。

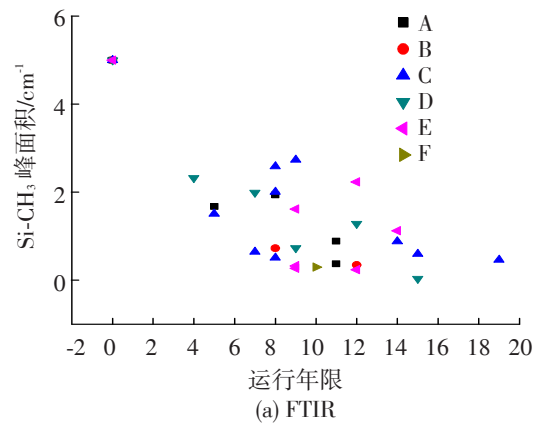
为分析不同运行条件下复合绝缘子硅橡胶伞裙的老化差异,选取了来自不同厂家的110 kV复合绝缘子,分别用A、B、C、D、E表示,其他厂家用F表示。选择对高压端伞裙上表面^[1],考虑不同方位的差异,对高压端伞裙进行四等分,并对各个区域中伞裙上

表面进行切片,得到厚度为1 mm的样本,用4个试品红外光谱的平均值作为表征此绝缘子的红外光谱,由于红外吸收光谱的峰面积受样品因素和仪器的影响比峰高更小一些,因此采用峰面积进行定量分析往往比采用峰高进行定量分析更加准确,分别用Si-CH₃吸收峰面积散点图和喷水分级散点图表示FTIR和憎水性,见图5。

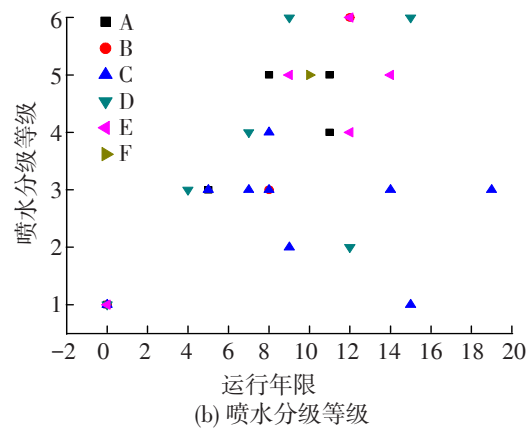
表1 参考样本背景信息

Table 1 Reference sample background information

编号	运行年限	地区	运行环境	补充背景
110-E1-9a	9	保定	平原	
220-E2-10a	10	四川	平坝	
500-E2-9a	9	河北	平原	
110-C9-19a	19	湖北	平地	襄樊襄城区
220-D8-19a	19	山东	沿海	
220-C2-7a	7	四川		
110-C2-7a	7	浙江	平原	



(a) FTIR



(b) 喷水分级等级

图5 不同厂家绝缘子FTIR和憎水性

Fig. 5 FTIR and hydrophobicity of different manufacturers

从图5中可以看出,不同厂家绝缘子FTIR和憎水性之间是有差异的,例如:C厂家红外光谱吸收峰面积较大、喷水分级等级较小(憎水性好);其性能相对较好;D和E厂家红外光谱吸收峰面积较小、喷水

分级等级较高(憎水性差)。试验表明,不同厂家生产的复合绝缘子的红外光谱吸收峰面积存在差异,因而不同厂家生产的绝缘子在相同运行年限时老化程度也不同,为此在研究不同条件下复合绝缘子的老化特性变化规律时,应选取同一厂家生产的复合绝缘子。

2.1 不同运行环境

对运行年限大致相当,而运行环境不同的绝缘子进行分析,研究运行环境对绝缘子老化的影响。对A和C两个厂家的绝缘子进行分析红外光谱分析,红外结果见图6、7。

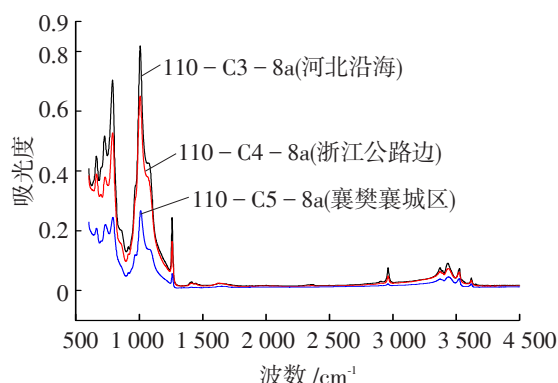


图6 C厂家不同环境下运行8年绝缘子红外光谱

Fig. 6 C manufacturers operating in different environments 8 years of insulator infrared spectroscopy

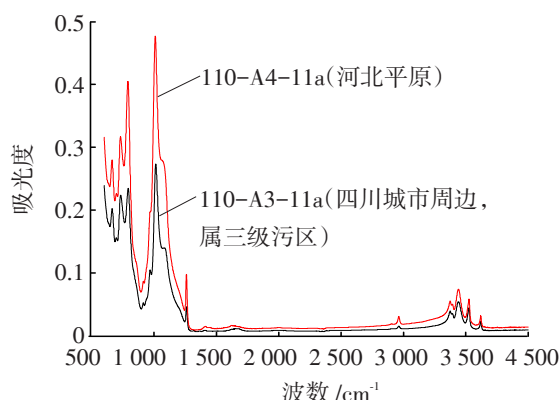


图7 A厂家不同环境下运行11年绝缘子红外光谱

Fig. 7 A manufacturers operating in different environments 11 years of insulator infrared spectroscopy

由图6可见,运行8年的复合绝缘子,虽然都产同一个厂家,但是运行环境不同,红外光谱差别很大:河北沧州沿海地区的绝缘子吸收峰较高,老化较轻,浙江公路边次之,襄樊市区的绝缘子吸收峰最低,老化最严重。图7中在四川城市周边运行的绝缘子吸收峰比在河北平原地区的低,老化较严重。这两组绝缘子都表现出在人类活动频繁的地区,绝缘子老化较重;这可能主要是由人类活动产生大量污秽(工业粉尘等)引起的。

2.2 不同电压等级

PDMS分子中典型化学键的平均键能见表2,从表2中可知, Si-C键键能最小,最容易发生断裂;从这方面分析,产生老化的试品的红外光谱中, Si-CH₃在1260 cm⁻¹处的吸收峰对于老化的反映最敏感,适于对老化较轻的绝缘子进行评估, Si-O键键能较大, Si-O-Si基团对应吸收峰面积较大,测量相对误差较小,适合对老化较重的绝缘子进行评估。由此需要分别研究不同电压等级下的复合绝缘子 Si-CH₃对应吸收峰面积和 Si-O-Si对应吸收峰面积。

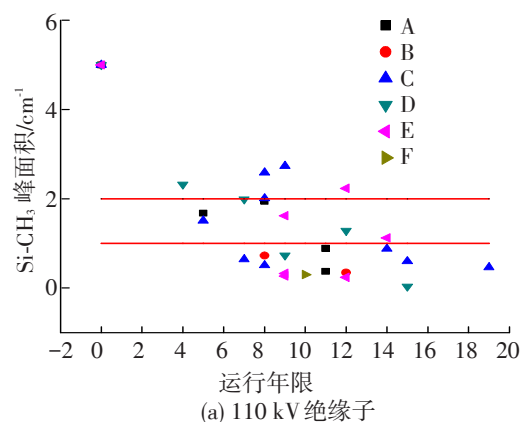
表2 PDMS中典型化学键的平均键能

Table 2 Average bond energy of typical chemical bond in PDMS

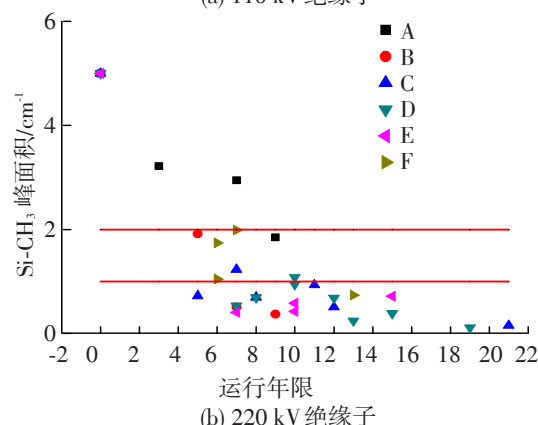
化学键	C-H	Si-C	Si-O	O-H
键能/(kJ·mol ⁻¹)	414	301	447	463

2.2.1 Si-CH₃对应吸收峰面积的统计研究

对110、220 kV绝缘子高压端伞裙做红外光谱测试,计算 Si-CH₃对应吸收峰的峰面积,按照运行年限做峰面积的散点图,结果见图8。图8中用不同的颜色的散点表示不同的厂家,分别以A、B、C、D、E和F代表6类。



(a) 110 kV 绝缘子



(b) 220 kV 绝缘子

图8 不同电压等级绝缘子红外光谱中 Si-CH₃ 对应吸收峰面积

Fig. 8 The corresponding absorption peak area of Si-CH₃ in the infrared spectra of different voltage levels

从图8中可见,同一运行年限下不同电压等级的复合绝缘子红外光谱中Si-CH₃峰面积具有分散性,但整体上看,峰面积呈现随运行年限增大而变小的趋势。并且220 kV绝缘子红外光谱的Si-CH₃峰面积分散性明显小110 kV的绝缘子。

在图8中作出峰面积为2和1的两条直线,可见,220 kV绝缘子的红外光谱中,运行5年以上绝缘子的红外光谱中Si-CH₃吸收峰面积几乎都(只有一个例外)小于2,大于10年的复合绝缘子Si-CH₃都小于1。而对110 kV进行分析,发现有的绝缘子红外光谱中Si-CH₃吸收峰很大,并且整体比220 kV吸收峰大。

2.2.2 Si-O-Si对应吸收峰面积的统计研究

对运行年限大于10年的复合绝缘子进行分析,由于Si-CH₃对应的吸收峰很小,容易受到干扰,故对Si-O-Si对应吸收峰进行分析,见图9。

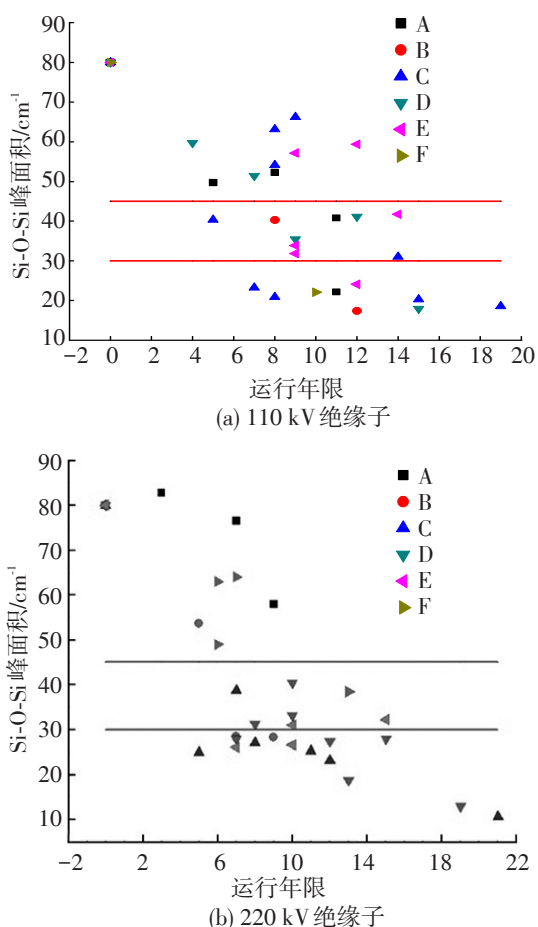


图9 不同电压等级绝缘子红外光谱中Si-O-Si吸收峰面积

Fig. 9 The area of Si-O-Si absorption peak in the infrared spectra of different voltage levels

从图9中可见,虽然相同运行年限的复合绝缘子伞裙红外光谱中Si-O-Si对应的吸收峰存在差

异,但Si-O-Si吸收峰面积整体表现出随运行年限增大而降低的趋势,用吸收峰面积为45和30两条直线对绝缘子进行划分,如图9所示。由图9可见,运行年限大于10年的复合绝缘子Si-O-Si对应吸收峰都小于45,运行15年以上的吸收峰小于30。110 kV复合绝缘子Si-O-Si对应吸收峰面积大于45的绝缘子数量明显多于220 kV绝缘子,试验表明220 kV复合绝缘子红外光谱吸收峰面积比110 kV绝缘子红外光谱吸收峰面积小,老化程度更严重。

3 分析与讨论

硅橡胶中的主要成分为PDMS,硅橡胶主要成分的分子式比较简单:主链由Si-O-Si组成,侧链由甲基基团组成,见图10。所能够形成的基团有限,反映主链断裂情况的官能团(基团)有相应特征峰(吸收峰)波数为1 000~1 100 cm⁻¹的Si-O-Si;反映侧链断裂情况的基团有波数为1 260 cm⁻¹的Si-CH₃,波数为800 cm⁻¹处的Si(CH₃)₂和波数为3 000 cm⁻¹处的C-H,波数为3 200~3 500 cm⁻¹处的OH;硅橡胶化学基团和其特征峰在红外光谱中对应的波数见表3。在绝缘子运行过程中,环境中的紫外线、温度,以及可能存在的绝缘子表面放电等因素都可破坏硅橡胶的分子链结构,相应基团含量减小,对应特征峰发生变化。

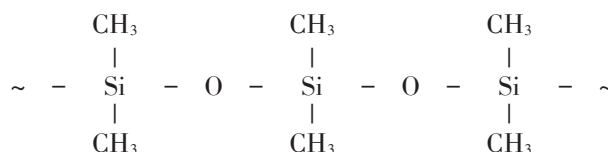


图10 PDMS分子式

Fig. 10 PDMS molecular formula

表3 硅橡胶分子式中化学基团对应特征峰波数

Table 3 Chemical groups in the molecular formula of silicon rubber cm⁻¹

化学基团	特征峰对应波数
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

干燥状态下,绝缘子表面污秽的导电能力较弱,不会对硅橡胶伞裙的性能产生影响。当伞裙表面污秽受潮后,污秽导电能力增强,导致绝缘子表面泄露电流增大,局部干区、湿区形成,引发绝缘子表面放电形成,放电产生的带电粒子和紫外光子轰击硅橡胶伞裙表面,将引发硅橡胶伞裙分子链裂解^[10]。对

硅橡胶试品的红外光谱而言,如果用吸光度表示老化程度,则Si-CH₃基团对应吸收峰的减小程度反映了侧链的断裂程度,而Si-O-Si基团对应吸收峰变化反映了主链的断裂程度。主链、侧链的断裂程度是表征绝缘子老化的重要参量。由图6可知,襄樊市区的绝缘子红外光谱吸收峰最小,说明分子链断裂最严重,老化程度也最严重。这是因为长期运行于襄樊市区的绝缘子表面积污相对较重,受潮后其表面放电将更容易发生,导致伞裙表面SiO-Si链和Si-CH₃链含量下降相对更严重。

从图8、9可以看出,发现有的110 kV绝缘子红外光谱中Si-CH₃吸收峰很大,且整体比220 kV吸收峰大。从整体上看,110 kV复合绝缘子高压端伞裙没有220 kV绝缘子老化严重,这可能是由于220 kV绝缘子高压端电场比110 kV绝缘子高压端电场大造成的,模拟电场见图11。由于高场强区伞裙易遭受放电产生的电子和紫外光子作用,表面放电激发出的带电粒子的能量可以破坏硅橡胶材料分子结构,使硅橡胶发生裂解和氧化,从而导致220 kV绝缘子Si-CH₃对应吸收峰面积低于110 kV绝缘子。所以电场越强老化越严重且Si-CH₃的吸收峰及面积越小。

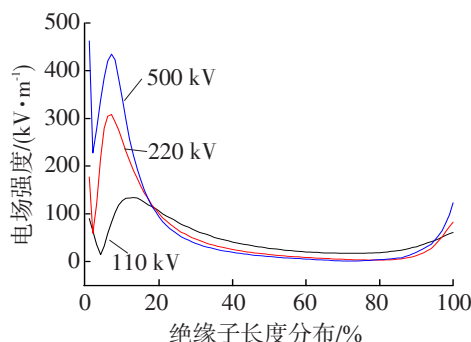


图11 不同电压等级下的绝缘子表面电场

Fig. 11 Surface electric field of insulator under different voltage levels

4 结论

基于FTIR测试技术,通过对不同运行条件下复合绝缘子的老化特性变化规律的研究,得到以下结论:

1)不同厂家生产的复合绝缘子的红外光谱吸收峰面积存在差异,因而不同厂家生产的绝缘子在相同运行年限时老化程度也不同,这有可能与不同厂家的材料配方不同有关。

2)重污区绝缘子表面积污相对较重,受潮后其表面放电将更容易发生,导致伞裙表面Si-O-Si链和Si-CH₃链含量下降相对更严重,绝缘子红外光谱

吸收峰较小,老化较严重。

3)电压等级越高,电场强度越大,绝缘子伞裙易遭受放电产生的电子和紫外光子作用,使得表面放电激发出的带电粒子的能量破坏硅橡胶材料分子结构,导致硅橡胶分子链发生裂解,从而使绝缘子红外光谱的Si-CH₃对应吸收峰面积减小,老化加深。

4)不同厂家、不同运行环境以及不同电压等级都会对复合绝缘子老化产生影响,总体上随着运行年限的增大,FTIR吸收峰变小、憎水性下降。

参考文献:

- [1] 关志成. 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. Insulators and power transmission equipment insulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 燕迎祥. 基于红外光谱和泄漏电流的复合绝缘子表面状况研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
YAN Yingxiang. The study of the composite insulator surface condition based on the infrared spectroscopy and leakage current[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [6] 王永强, 燕迎祥, 何杰. 基于泄漏电流和红外光谱的复合绝缘子憎水性研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2764-2771.
WANG Yongqiang, YAN Yingxiang, HAN Jie. Hydrophobicity of composite insulators based on the leakage current and infrared spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2764-2771.
- [7] 巢亚锋, 王成, 黄福勇, 等. 中国输电线路复合绝缘子运行状况分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 119-124.

- CHAO Yafeng, WANG Cheng, HUANG Fuyong, et al. Assessment on operation state of composite insulators used on Chinese transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 119-124.
- [8] 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, 45(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, 45(5): 16-19.
- [9] 黄成才, 李永刚. 复合绝缘子老化状态评估方法研究综述[J]. 电力建设, 2014(9): 28-34.
- HUANG Chengcai, LI Yonggang. A review of aging evaluation methods for composite insulators[J]. Power Construction, 2014(9): 28-34.
- [10] 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 Fochi, 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.
- [11] 惠华, 王森, 杨博, 等. 复合绝缘子运行状态和老化性能评估方法研究[J]. 陕西电力, 2012(1): 64-66.
- HUI Hua, WANG Sen, YANG Bo, et al. Study on evaluation method of operation state and aging performance of composite insulators[J]. Shaanxi Electric Power, 2012(1): 64-66.
- [12] XIE C, ZHANG Y, WANG J, et al. Research on evaluation method of composite insulators aging[C]//IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials(ICPADM). [S. l.]: IEEE, 2009: 321-324.
- [13] 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. Study on the sheath characteristics of composite insulator with different operation period[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 67-72.
- [14] 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.
- [15] 屠幼萍, 陈聪慧, 佟宇梁, 等. 现场运行复合绝缘子伞裙材料的老化判断方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2522-2527.
- TU Youping, CHEN Conghui, TONG Yuliang, et al. Method for judging the aging of the material of the composite insulator in the field operation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2522-2527.
- [16] 梁英, 靳哲, 刘云鹏, 等. 基于陷阱特性的运行复合绝缘子老化定量评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 189-195.
- LIANG Ying, JIN Zhe, LIU Yunpeng, et al. The quantitative-evaluation on the aging condition of composite insulators based on trap characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 189-195.
- [17] 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. Sampling method for aging state fine-estimation of composite insulators[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 530-535.
- [18] 鲁大勇, 李朝伟, 史敬天, 等. 电晕老化对硅橡胶材料热刺激电流和表面情况影响研究[J]. 高压电器, 2014, 50(8): 93-98.
- LU Dayong, LI Chaowei, SHI Jingtian, et al. Study of the corona aging effect to TSC and SEM of silicone rubber materials[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 93-98.
- [19] 杨晓辉. 基于傅立叶变换红外光谱测试的复合绝缘子老化评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- YANG Xiaohui. Study on aging evaluation method of composite insulator based on FTIR measurement[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [20] ZHANG H, TU Y, LU Y, et al. Study on aging characteristics of silicone rubber insulator sheds using FTIR [C]//Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation(ISEI). [S. l.]: IEEE, 2012: 83-86.
- [21] 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 composite insulators based on TSC test[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 169-174.
- 莫小向(1985—), 男, 工程师, 主要研究方向为高电压与绝缘、化学技术。
- 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。
- 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。