

复合绝缘子护套发热影响因素及运行性能分析

叶昊亮¹, 李特¹, 周啸宇², 胡琴³, 吴奇文⁴, 陈瑛⁵, 胥晶⁶, 尹芳辉⁷

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310004; 3. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 4. 广州科易光电技术有限公司, 广东 广州 510663; 5. 浙江黑卡电气有限公司, 浙江 杭州 330009; 6. 国网浙江省电力有限公司湖州供电公司, 浙江 湖州 313002; 7. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要:以某 220 kV 运维交流线路中出现较大发热面积的复合绝缘子为样品,通过对发热绝缘子进行工频耐压与红外测试,以及对复合绝缘子的硅橡胶进行理化特性试验,分析不同环境参数对复合绝缘子发热及运行性能的影响。结果表明:护套老化受潮复合绝缘子的异常发热位于高压端部,环境湿度越高、风速越低,其发热范围越大、发热幅值越高。硅橡胶受潮后介电常数、介质损耗均明显增加,发热来源于表层老化护套的介质损耗。发热处护套表层硅橡胶出现明显劣化迹象,护套内部、芯棒均未受到表层发热的影响,绝缘子运行性能未受影响。此外,基于上述结果提出了现场对护套老化受潮发热缺陷的检修建议。

关键词:复合绝缘子;异常温升;护套;运行性能

Analysis on heating factors and operating performance of composite insulator sheath

YE Haoliang¹, LI Te¹, ZHOU Xiaoyu², HU Qin³, WU Qiwen⁴, CHEN Ying⁵, XU Jing⁶, YIN Fanghui⁷

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310004, China;
3. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
4. Guangzhou Keii Optoelectronic Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
5. Zhejiang Heika Electric Co., Ltd., Hangzhou 330009, China;
6. Huzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Huzhou 313002, China;
7. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Composite insulators with a large heating area in a 220 kV operation and maintenance AC line were taken as a sample, the impact of different environmental parameters on the heating and operating performance of the composite insulator was analyzed by conducting power frequency withstand voltage and infrared tests on the heating insulator, as well as physical and chemical property tests on the silicone rubber of the composite insulator. The results show that the abnormal heating of the aged and damp composite insulator sheath is located at the high voltage end. The higher the environmental humidity and the lower the wind speed, the larger the heating range and amplitude. After being dampened, the dielectric constant and dielectric loss of silicone rubber increase significantly, and the heat generation comes from the dielectric loss of the aged sheath on the surface. There are obvious signs of deterioration on the surface silicone rubber of the sheath at the heating point, and the interior of the sheath and the core rod are not affected by the surface heating. The operational performance of the insulator is not affected. In addition, based on the above results, suggestions for on-site maintenance of sheath ageing, moisture, and heat defects were proposed.

Key words: composite insulator; abnormal temperature rise; sheath; operating performance

0 引言

相较于传统陶瓷绝缘子,复合绝缘子具有防污闪、憎水、质量轻等优点,在输电线路中得到了广泛应用^[1]。随着复合绝缘子应用范围增大和运行时间

延长,在运复合绝缘子频繁出现发热现象^[2]。2019—2023年,浙江省累计出现 19 起复合绝缘子发热事件,部分线路出现大量杆塔复合绝缘子发热,且发热均位于绝缘子端部,但在更换解剖后未发现芯棒

异常,上述情况给发热缺陷复合绝缘子检修策略的制定带来困难。

近年来,不少学者对复合绝缘子的发热因素、发热位置、发热幅值、发热对应内部缺陷情况、发热对内部运行影响等方面展开了研究。发热因素方面,文献[3]研究了芯棒酥朽、表面积污放电、护套吸水受潮、阳光不均匀直射等不同因素引起的复合绝缘子发热。文献[4-5]发现初期电蚀损芯棒的温升来源于芯棒的介质损耗及泄漏电流。文献[6-8]分析了污秽、护套老化对绝缘子端部发热的影响,认为老化初期绝缘子护套介质损耗因数升高2~3倍,是端部初期发热的主要原因。

发热位置方面,文献[9]指出绝缘子护套受潮发热区域一般限于端部,发热分布较为均匀。文献[10-11]发现护套受潮或轻度污秽引起的发热局限在绝缘子高压端,且发热幅值随受潮程度降低而减小。文献[3]对高压端护套发热绝缘子进行红外测试,发现集中发热点仅存在一处,位于高压侧金具至第一片伞裙间的护套部位。

发热幅值方面,文献[9]中对不同种类缺陷绝缘子进行耐压试验,发现温升幅值为2~10 K。文献[10]发现解除均压环后,绝缘子发热幅值从3.8 K升至8.5 K,清洗高压端污秽并干燥处理后温升仅为0.1 K。文献[12-13]对不同种类缺陷绝缘子进行红外测试,发现可分别产生0.5 K、1.5~5.5 K、7~8 K的温升。

发热对应内部缺陷情况方面,文献[14]通过解剖发现绝缘子蚀损位置的伞裙-护套界面存在气隙且气隙内部放电痕迹明显,表明界面气隙在高场强作用下引起局部放电,长期作用逐步导致电蚀并伴随发热产生。文献[15]通过外观检查、绝缘子芯棒表面及内部解剖,发现芯棒变黄、起毛,存在酥朽缺陷,芯棒酥朽后产生极化损耗和内部局部放电,导致发热。文献[16]通过非故障绝缘子的带护套水扩散试验、故障绝缘子剖检,得知绝缘子串高压端长期处于强电场中,运行过程中芯棒界面失效造成绝缘子局部发热,长时间热量聚集造成芯棒产生长度为3~6 mm的碳化发展通道。

运行影响方面,文献[16-17]报道了500 kV绝缘子酥朽断裂导致的导线脱串掉线事故。文献[18]表明近10年国网约90%绝缘子酥朽事故分布在东部沿海及南方高温高热环境。文献[19-21]发现复合

绝缘子产生内部缺陷后,需经2~5年才会发生击穿,建议每两年进行一次红外定期检测。日常巡视发现复合绝缘子高压端严重发黑且伴随异常放电声时,需进行红外测温确认。

然而以往研究仍存在两方面不足:一是复合绝缘子受到环境因素影响而发热的定量研究较少;二是研究者的微观分析主要针对芯棒酥朽发热开展,而对护套受潮发热开展的微观试验研究较少^[22-24],因此针对护套受潮发热绝缘子运行性能评估的支撑数据不够充分。

本文针对实际运行某220 kV沿海线路复合绝缘子异常发热问题进行研究,从挂网运行线路中选取4支复合绝缘子作为样本,分别在不同环境参数下对其进行工频耐压与红外测试试验,并对复合绝缘子硅橡胶进行理化特性试验,得到环境参数对复合绝缘子发热及运行性能的影响,进而为复合绝缘子的检修提供参考。

1 试验

1.1 试样的选择

选取4支投运于2015年某220 kV沿海线路的现场护套老化受潮复合绝缘子作为试样,分别编号为I-1、I-2、I-3、I-4,为同一型号,结构高度均为2 240 mm,爬电比距均为28 mm/kV,额定机械破坏负荷均为120 kN。绝缘子伞型为一大一小结构,共29片大伞裙和28片小伞裙。护套老化受潮复合绝缘子试样实物图如图1所示。

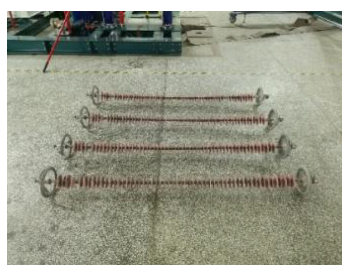


图1 复合绝缘子试样

Fig.1 Composite insulator samples

1.2 工频耐压及红外测试

工频耐压及红外测试均在大型多功能人工气候实验室进行,试验回路见图2。复合绝缘子以置于支柱绝缘子顶部的方式接入。每次选取两根缺陷复合绝缘子进行并联,开展温升试验。

1.2.1 多功能人工气候室

多功能人工气候试验室内径 $\phi=7.8$ m,净空高H

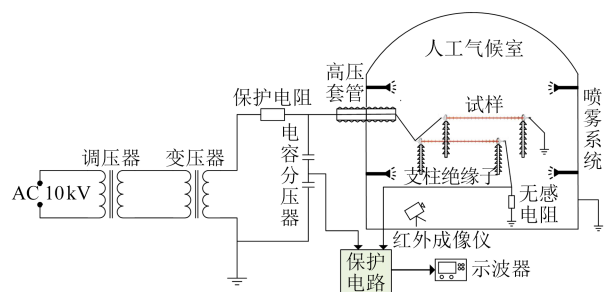


图2 工频耐压及红外测试回路

Fig.2 Circuit for power frequency withstand voltage test and infrared test

=11.6 m。气候室由制冷系统、真空系统、喷雾系统以及风速调节系统4个主要部分组成。室内最低温度可达 $(-45\pm 1)^{\circ}\text{C}$,最低气压可达30 kPa。室内安装有两排喷头(每排7个)进行喷雾,以此调节室内湿度;气候室内吹风装置可模拟风速,调节范围为0~12 m/s。试验电压从气候室中间一侧330 kV穿墙瓷套管引入。

1.2.2 试验电源

试验电源采用YDTW-2000 kVA/500 kV型交流试验变压器,其额定容量为2 000 kVA,额定电流为4 A,输入电压为0~10.5 kV,输出电压为0~500 kV,最大短路电流为75 A,输出电压波形畸变率小于3%,系统局部放电量小于10 pC,系统的短路阻抗小于6%。

1.2.3 测量装置

红外热像仪型号为FLIR T650sc,试验时设置发射率为0.95,测试距离为3 m。

使用HMT334型温湿度变送器测量人工气候室内的温度和湿度,使用得力高精度手持风速仪提前测量热缺陷复合绝缘子发热位置处的风速。

1.2.4 环境湿度控制

保持风速为0,施加运行电压后,调节气候室环境相对湿度(relative humidity, RH)分别至50%、70%、80%和90%,观察绝缘子发热情况。

1.2.5 环境风速控制

保持环境相对湿度为70%,施加运行电压后,使用工业大型风扇和调速器调节热缺陷复合绝缘子发热位置处的风速分别为0、1、2、3 m/s,观察绝缘子发热情况。

1.3 材料特性试验

1.3.1 理化特性测试仪器

采用德国Novocontrol公司的Concept 80型宽

频介电谱分析仪与美国Agilent Technologies公司的Agilent型高频分析仪共同实现硅橡胶试样的频域介电谱测试;采用赛默飞公司的Nicolet iS50型傅里叶红外光谱仪(FTIR)对热缺陷复合绝缘子硅橡胶进行测量;采用瑞士METTLER TOLEDO公司的TGA2型热重分析仪(TGA)对热缺陷复合绝缘子芯棒中的环氧树脂含量进行测定;采用日本电子株式会社的JSM-7800F型场发射扫描电子显微镜(SEM)对热缺陷复合绝缘子的硅橡胶和芯棒试样进行观测。

1.3.2 理化特性试验

①SEM和TGA分析:对I-1和I-2发热处的表层和内层硅橡胶进行测试。②FTIR分析:对I-1~I-4发热处的表层和内层硅橡胶进行测试。③介电特性分析:对I-1~I-4高压端、中部和低压端的伞裙硅橡胶介电参数进行测量;对I-1~I-4高压端的伞裙硅橡胶受潮后的介电参数进行测量,取样示意图见图3。介电性能测试取伞裙处硅橡胶作为试样的主要原因是:复合绝缘子采用整体注射工艺,护套与伞裙所用的硅橡胶材料一致;在运行过程中,护套表面和伞裙表面都承受外部积污、光照、受潮等因素的劣化影响,因此护套表面和伞裙表面硅橡胶劣化状态接近;护套内层和伞裙内层硅橡胶均没有承受外部因素的直接作用,因此护套内层和伞裙内层硅橡胶状态接近;介电常数测试需要获取平整的样品,考虑到伞裙表面可取得更大面积、更为平整的样品,因此取样从伞裙表面进行。

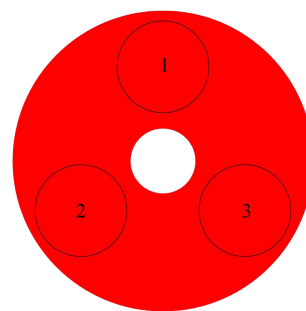


图3 硅橡胶取样示意图

Fig.3 Schematic diagram of silicone rubber sampling

2 复合绝缘子在不同湿度和风速下的温差

2.1 环境湿度影响

不同环境湿度下I-1~I-4温升稳定后的红外热成像见图4。由图4可知,护套老化受潮复合绝缘子发热位置位于高压端,且发热区间较短,发热区间

可视为点状发热。中部和低压端处未出现异常发热现象。当相对湿度为50%时,4支复合绝缘子发热区间均位于高压端金具至第一片大伞群处;当相对湿度提高至90%时,4支复合绝缘子的第一片大伞群至第二片大伞群间也出现了异常发热现象,说明湿度增加会引起护套老化受潮复合绝缘子的发热区间增大。

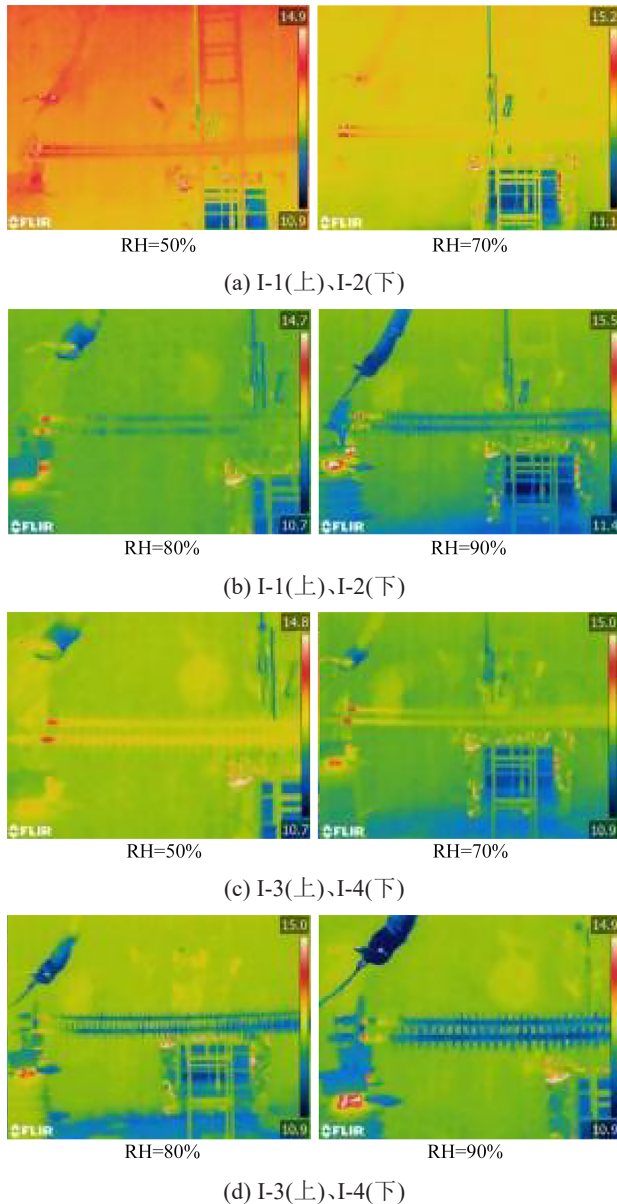


图4 不同湿度下I-1、I-2、I-3、I-4红外热像图

Fig.4 Infrared thermal images of I-1, I-2, I-3, and I-4 under different humidity

不同环境湿度下绝缘子温差计算结果见表1,温差随环境湿度的变化规律见图5。从表1和图5可以看出,护套老化受潮复合绝缘子在相对湿度为50%下的温差均小于1℃,均符合DL/T 664—2016

的要求。随着湿度增加,绝缘子发热情况愈加严重,当相对湿度提高至90%时,I-1、I-3和I-4温差均大于2℃,其中I-3温差最高,达4.3℃。说明随着环境湿度的提高,老化后的硅橡胶易吸收空气中的水分而受潮,导致高压端在电场的作用下极化损耗增加,因此复合绝缘子发热加剧^[23-24]。

表1 不同湿度下复合绝缘子的温差

Table 1 Temperature difference of composite insulators under different humidity

复合绝缘子	温差/℃			
	RH=50%	RH=70%	RH=80%	RH=90%
I-1	0.8	1.5	1.8	2.4
I-2	0.6	1.0	1.5	1.9
I-3	0.9	1.5	2.7	4.3
I-4	0.7	1.4	1.7	2.7

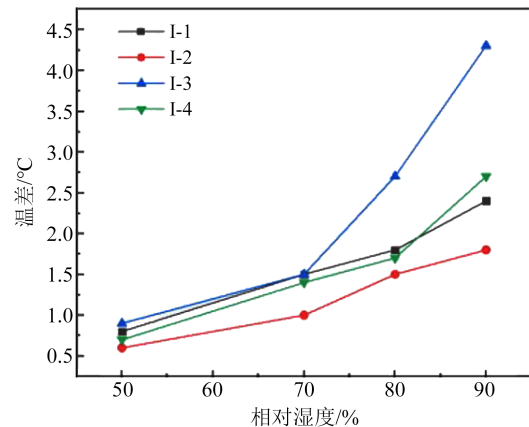


图5 复合绝缘子温差随环境湿度的变化

Fig.5 The variation of temperature difference of composite insulator with environmental humidity

从表1还可以得出,当相对湿度从50%提高至70%时,4支护套老化受潮复合绝缘子的平均温差增加了80.21%,而当相对湿度从70%提高至90%时,平均温差增加了107.4%。由此可说明,高湿度条件对护套老化受潮复合绝缘子的温差影响较大,温差增幅更加明显,对复合绝缘子发热状态有显著影响。这是因为环境湿度较小时,复合绝缘子极化损耗功率减少,温差降低甚至消失;当环境湿度较大时,复合绝缘子受潮后高压端护套极化损耗增大,温差大幅上升,故现场红外巡检应选在晴朗的天气开展,避免湿度的影响造成复合绝缘子发热状态误判。

2.2 风速影响

不同风速下I-1~I-4的红外热像见图6。

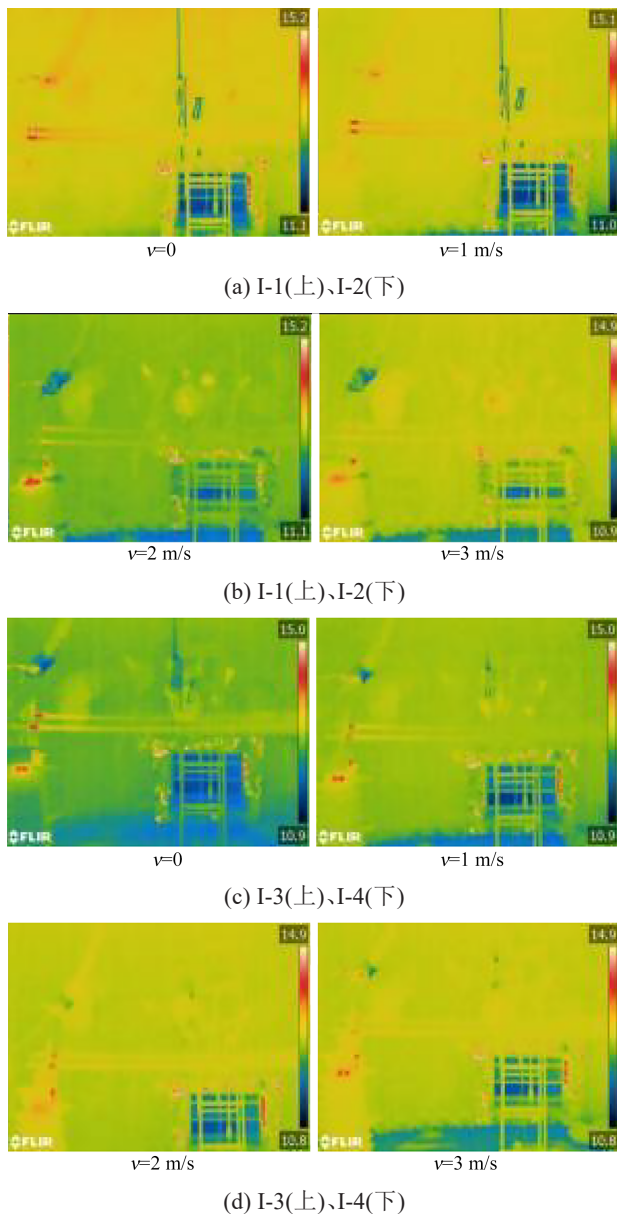


图6 不同风速下I-1、I-2、I-3、I-4红外热像图

Fig. 6 Infrared thermal images of I-1, I-2, I-3, and I-4 under different wind speeds

由图6可知,无风状态时,I-1和I-2的发热区间均为高压端金具至第二片大伞群处;当风速增加至1 m/s时,I-1和I-2的第一片大伞群至第二片大伞群间的发热现象消失。由此说明,随着风速增加,护套老化受潮复合绝缘子的发热区间略有减小。

不同风速下护套老化受潮复合绝缘子的温差计算结果见表2,温差随风速的变化规律见图7。从表2和图7可以看出,当风速从0增加至3 m/s时,I-3复合绝缘子的平均温差从1.5℃降至0.4℃,下降了73.3%。由此可知,护套老化受潮复合绝缘子的温差极易受环境风速影响。当环境风速为3 m/s时,4

支复合绝缘子的温差降至0.5℃及以下,此时根据红外热像仪的测量结果可将其判为绝缘良好状态,无需进行处理;但在无风状态下,4支复合绝缘子的温差均大于1℃,故在有风条件下对复合绝缘子进行测温可能会造成漏检。

表2 不同风速下复合绝缘子的温差

Table 2 Temperature difference of composite insulators under different wind speeds

复合绝缘子	温差/℃			
	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s
I-1	1.5	1.0	0.8	0.5
I-2	1.0	0.6	0.4	0.2
I-3	1.5	1.0	0.7	0.4
I-4	1.4	0.8	0.6	0.5

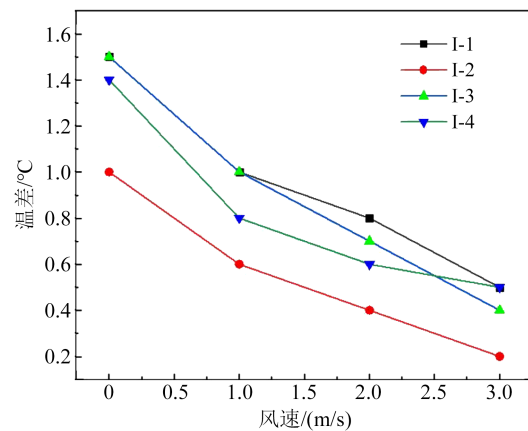


图7 复合绝缘子温差随风速的变化

Fig. 7 The variation of temperature difference of composite insulator with wind speed

由图7可知,随着风速增加,护套老化受潮复合绝缘子的温差逐渐降低。空气与复合绝缘子表面进行对流传热的过程可近似用牛顿冷却定律进行表示,如式(1)所示。

$$Q = qA = Ah(T_w - T_f) \quad (1)$$

式(1)中: Q 为传热功率,指单位时间内通过传热面的热量,单位为W; q 为热流密度,指单位面积上的传热速率,单位为W/m²; A 为传热面积,单位为m²; h 为对流换热系数,单位为W/(m²·K); T_w 为物体表面温度, T_f 为流体温度,单位均为K,其中 $T_w > T_f$ 。

在不考虑辐射换热系数的影响下,假设风力方向垂直于复合绝缘子中轴线,可近似认为对流换热系数 h 与风速 v 呈正相关^[25],如式(2)所示。

$$h = 5.0 + 4.7v \quad (2)$$

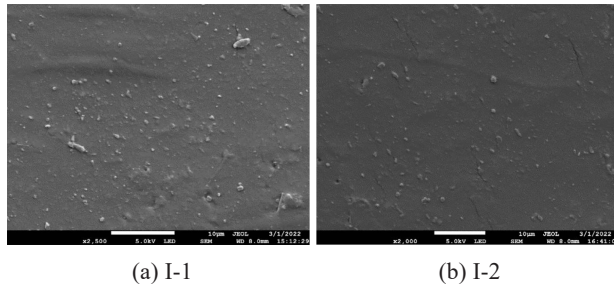
从式(2)可以看出,随着风速的增加,复合绝缘

子护套表面的对流换热系数逐渐增加,则单位时间内空气对流散失的热量增大,因此复合绝缘子温度逐渐降低。

3 复合绝缘子材料特征与发热检修策略

3.1 微观形貌分析

使用场发射扫描电子显微镜对 I-1 和 I-2 发热处内层和表层硅橡胶进行观测,内层硅橡胶试样的 SEM 图像如图 8 所示。由图 8 可知,发热处内层硅橡胶表面结构保持平整,粗糙度较小,未观察到明显的孔洞与裂纹。由于硅橡胶制备时加入了填料颗粒,在微观下观察到表面均匀分布着直径为微米级的颗粒物。由此可推断,护套老化受潮复合绝缘子高压端硅橡胶发热处内层未出现明显的老化现象,说明内层硅橡胶未受发热影响。

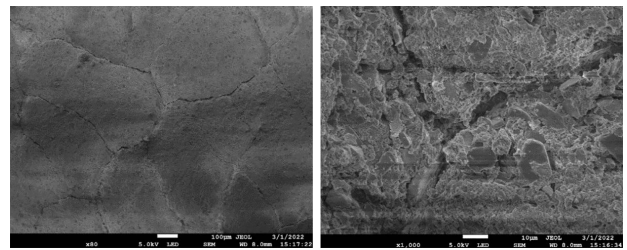


(a) I-1 (b) I-2
图 8 发热处内层硅橡胶 SEM 图像

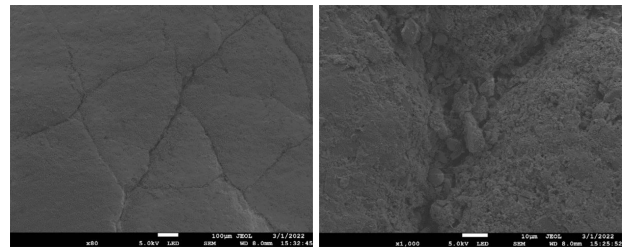
Fig.8 SEM images of inner layer silicone rubber at the heating point

I-1 和 I-2 发热处表层硅橡胶试样的 SEM 图像如图 9 所示。由图 9 可知,对试样放大 80 倍后,可观测到硅橡胶试样表面粗糙且布满裂纹,硅橡胶表面被裂纹分割成了不规则的疏松块状结构。对裂纹处放大 1 000 倍后,可观测到硅橡胶表面裂纹尺寸为微米级,裂纹周围基本未见平整区域,表面布满了聚集成团的颗粒物,甚至呈块状。这是因为 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 阻燃剂及白炭黑填料在劣化过程中会产生无机物颗粒^[26],使硅橡胶表面粗糙度增加,这说明护套老化受潮复合绝缘子硅橡胶样品表层的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 及白炭黑等填料发生了劣化。

放大发热处表层硅橡胶非裂纹区域,如图 10 所示,可观测到硅橡胶试样表面疏松多孔。表面疏松多孔的结构有利于硅橡胶在潮湿的天气吸收空气中的水分,使得硅橡胶受潮后极化损耗增大而导致局部发热。由于护套老化受潮复合绝缘子发热处内层硅橡胶 SEM 图像表面平整,未见明显的孔洞与



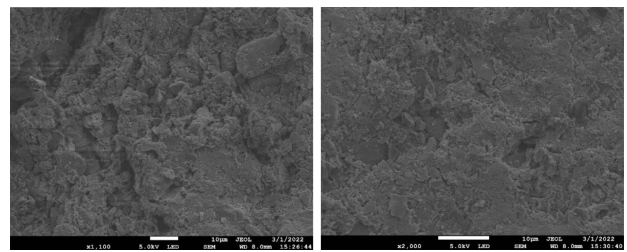
(a) I-1 放大 80 倍 (b) I-1 放大 1 000 倍



(c) I-2 放大 80 倍 (d) I-2 放大 1 000 倍

图 9 发热处表层硅橡胶 SEM 图像

Fig.9 SEM images of surface layer silicone rubber at the heating point



(a) I-1 (b) I-2

图 10 发热处表层硅橡胶的非裂纹区 SEM 图像

Fig.10 SEM images of the non-cracked area of surface layer silicone rubber at the heating point

裂纹,说明复合绝缘子伞套老化主要发生在浅表层。

3.2 化学基团分析

根据 GB/T 6040—2019^[27],对热缺陷复合绝缘子硅橡胶进行傅里叶红外光谱 (FTIR) 分析。高温硫化硅橡胶的主要成分为聚二甲基硅氧烷 (PDMS)、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 阻燃剂及白炭黑添加剂等,其中羟基封端的聚二甲基硅氧烷分子化学式如图 11 所示,其主要特征官能团及对应的吸收峰^[28-29]见表 3。

I-1~I-4 发热处表层和内层硅橡胶 FTIR 结果见

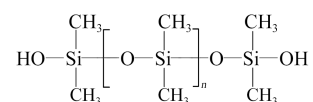


图 11 羟基封端聚二甲基硅氧烷化学结构式

Fig.11 Chemical structural formula of hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane

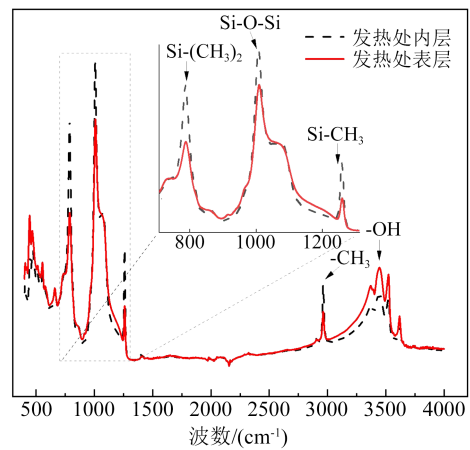
表3 硅橡胶 FTIR 吸收峰位置及其对应官能团

Table 3 FTIR absorption peak positions and corresponding functional groups of silicone rubber

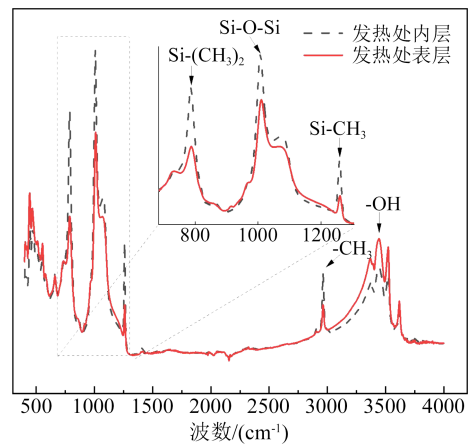
特征官能团	波数/(cm ⁻¹)
O-H	3 700~3 200
CH ₃	2 960
Si-CH ₃	1 270~1 255
Si-O-Si	1 100~1 000
Si-(CH ₃) ₂	840~790

图 12, I-1 发热处内层硅橡胶中的 Si-(CH₃)₂ 基团和 Si-O-Si 基团对应的吸收峰基线和峰面积见图 13, 各官能团吸收峰的峰面积测量结果见表 4。

由表 3 和图 12 可知, 相比于内层硅橡胶, 发热处表层硅橡胶试样未出现新的特征吸收峰, 说明复合绝缘子伞套在老化过程中未生成新的物质。由表 4 可知, 相比于内层硅橡胶, I-1~I-4 发热处表层硅橡胶试样的 Si-O-Si、Si-(CH₃)₂、Si-CH₃ 和 -CH₃ 基团的含量均明显减少, 说明复合绝缘子伞套在老化过程中, 主链 (Si-O-Si) 和侧链 (Si-CH₃ 或 Si-(CH₃)₂)



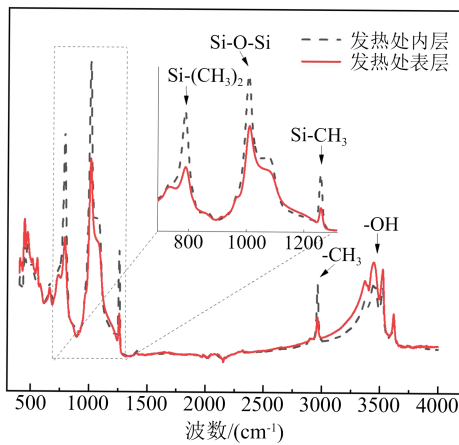
(c) I-3



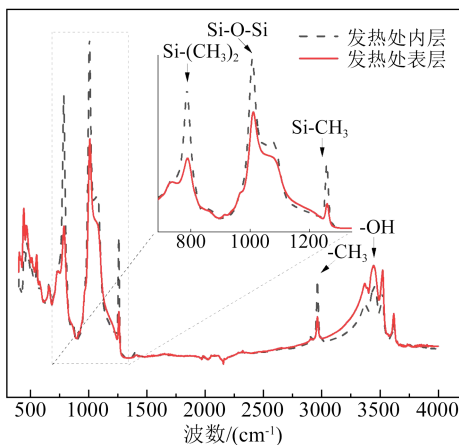
(d) I-4

图 12 发热处表层和内层硅橡胶红外光谱图

Fig.12 Infrared spectra of surface and inner layer rubber at the heating point



(a) I-1



(b) I-2

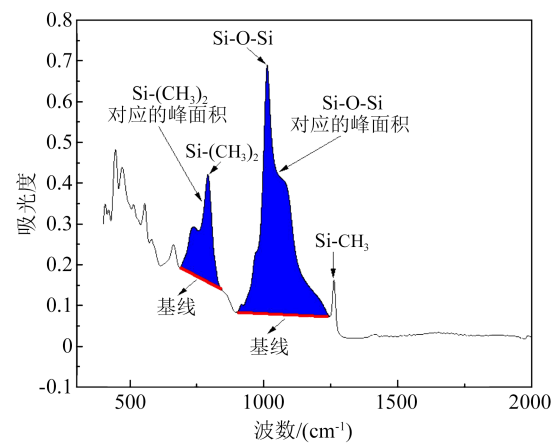


图 13 基线和峰面积示意图

Fig.13 Schematic diagram of baseline and peak area

大量断裂。由此可见, 主链、侧链的断裂程度是表征绝缘子硅橡胶老化的重要参量。表 5 为 PDMS 中典型化学键的平均键能。由表 5 可知, Si-C 键的键

表4 主要特征基团对应吸收峰的面积

Table 4 The area of absorption peak corresponding to the main characteristic functional groups

试样	特征峰吸收面积				
	-OH	-CH ₃	Si-CH ₃	Si-O-Si	Si-(CH ₃) ₂
I-1 内层	34.73	3.70	4.20	71.22	27.27
I-1 表层	46.77	1.40	1.40	56.80	16.11
I-2 内层	29.10	3.68	4.39	72.97	28.74
I-2 表层	39.64	1.35	1.34	59.75	16.86
I-3 内层	30.39	3.78	4.43	72.75	28.65
I-3 表层	46.66	1.86	1.78	58.82	19.74
I-4 内层	34.95	3.62	4.06	70.06	27.34
I-4 表层	51.37	1.61	1.46	58.73	17.76

能较小,对老化过程最为灵敏,因此硅橡胶在老化过程中侧链先发生断裂,导致憎水性基团-CH₃减少。此时,亲水性硅氧主链失去了憎水基团的屏蔽,极易与活性基团发生反应而断裂,造成PDMS分子降解,进而导致硅橡胶憎水性减弱。

表5 PDMS中典型化学键的平均键能

Table 5 Average bond energy of typical chemical bonds in PDMS

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

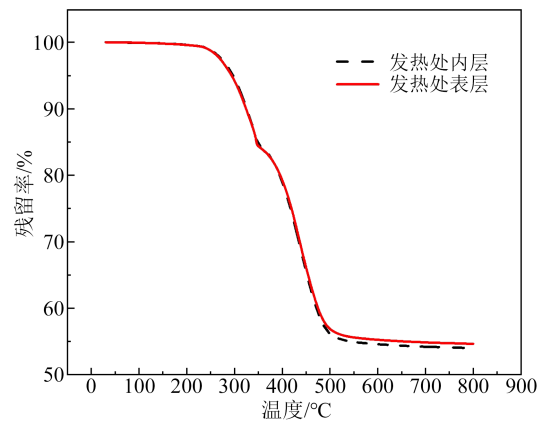
从表4中还可以发现,发热处表层老化的硅橡胶试样中-OH基团含量明显增多。这是因为,一方面Al(OH)₃在老化过程中会分解生成Al₂O₃和结晶水(H₂O),从而导致-OH增多^[30];另一方面,PDMS分子在受热条件下会发生裂解和氧化等反应而导致主链断裂,断裂后端部的自由基(SiO·)与主链反应生成硅醇基团(Si-OH)或与氢氧根离子(OH⁻)反应生成硅烷醇(Si-CH₂-OH),从而导致硅橡胶样品中-OH含量增加^[31]。

3.3 热解特性分析

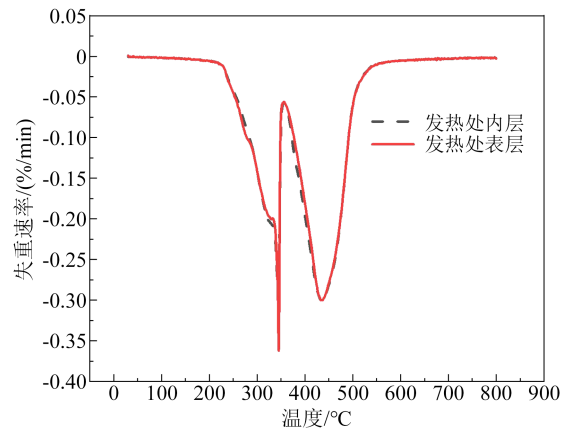
对I-1和I-2硅橡胶试样开展热重分析试验,测量发热处表层和内层硅橡胶的热失重(TG)曲线和热失重速率(DTG)曲线,结果如图14所示。每次试验取样5 mg,温度范围为室温至800℃,升温速率为10℃/min。白炭黑的熔点远高于800℃,因此在热重分析试验期间不会发生分解,样品失重主要是Al(OH)₃脱水分解和PDMS热解。其中Al(OH)₃分解温度为220~350℃,PDMS主要在350~570℃范围内发生热解^[32]。

由图14可知,I-1和I-2发热处表层和内层硅橡

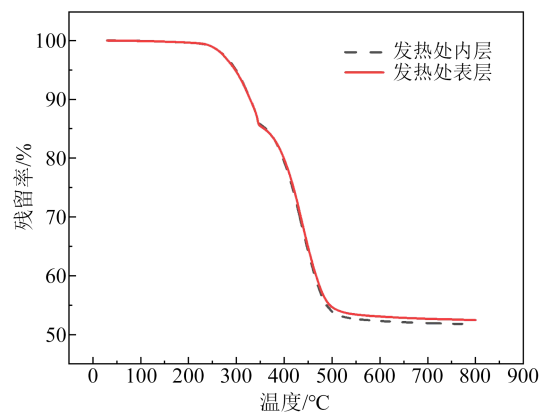
胶试样的热失重速率曲线均存在两个失重速率峰,故可将复合绝缘子硅橡胶的受热分解过程分为3个阶段。温度为室温至220℃时,硅橡胶热失重主要对应硅橡胶试样中低分子量物质挥发和填料脱水;温度为220~350℃时,主要为Al(OH)₃在高温下发生脱水分解反应,其化学反应式见式(3),由于反应阶段生成了水,水的挥发导致质量的减少;温度为350~570℃时,主要为PDMS的热裂解。当温度继续升高至800℃,试样的质量保持稳定。



(a) I-1 TG



(b) I-1 DTG



(c) I-2 TG

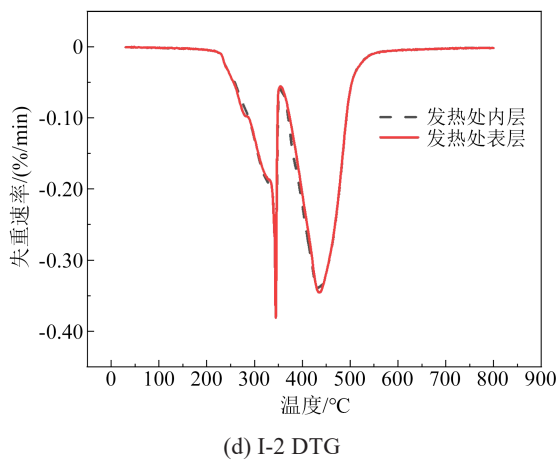
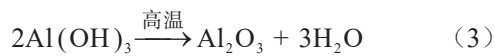


图14 I-1和I-2硅橡胶试样的TG和DTG曲线
Fig.14 TG and DTG curves of I-1 and I-2 silicone rubber samples



护套老化受潮复合绝缘子硅橡胶试样3个阶段的损失率结果见表6。

表6 各热解阶段的损失率

取样部位	第一阶段损失率/%	第二阶段损失率/%	第三阶段损失率/%	残留率/%
I-1 内层	0.51	15.78	29.77	53.91
I-1 表层	0.55	15.31	28.62	55.51
I-2 内层	0.49	14.63	33.01	52.92
I-2 表层	0.46	14.29	31.69	53.56

从表6可以看出,在第一阶段内,发热处硅橡胶表层和内层均未出现明显失重,此时硅橡胶样品中的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和PDMS几乎不发生分解,热失重主要由自由水、结合水或小分子量物质的挥发所致;在第二阶段 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 阻燃剂的分解中,发热处表层硅橡胶的损失率均小于内层试样,说明表层老化硅橡胶的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 阻燃剂早已发生了分解反应,生成了 Al_2O_3 颗粒和结晶水;在第三阶段PDMS的热裂解中,发热处表层硅橡胶的损失率均小于内层试样,说明在热老化过程中,发热处表层硅橡胶样品中的PDMS分子在老化时已大量裂解^[26]。这与前文FT-IR分析中Si-O-Si和Si-CH₃含量明显降低的结论相符。

从表6还可以看出,发热处表层硅橡胶的最终剩余质量明显小于内层硅橡胶试样,这是由于表层硅橡胶老化过程中,无机填充材料和PDMS分子已经发生了劣化反应并生成气体挥发。热重分析中

样品第三阶段的损失率和最终剩余质量可成为评价硅橡胶材料的老化程度的量化指标。

3.4 介电特性分析

对I-1~I-3高压端、中部和低压端的伞裙分别取3个直径为20 mm、厚度为3 mm的试样,用宽频介电谱仪测量试样的介电常数(ϵ)和介质损耗因数($\tan\delta$),每个试样测量3次后取平均值。试样在频率为50 Hz、温度为20°C下的测量结果见表7。

表7 I-1~I-3硅橡胶试样介电特性测量结果

Table 7 Dielectric properties measurement results of I-1~I-3 silicon rubber samples

取样部位	I-1		I-2		I-3	
	ϵ	$\tan\delta$	ϵ	$\tan\delta$	ϵ	$\tan\delta$
高压端	4.54	4.34	4.43	4.54	4.50	4.63
中部	4.50	4.13	4.13	3.22	4.22	3.47
低压端	4.42	4.09	4.07	3.16	4.25	3.49

由表7可知,3根复合绝缘子硅橡胶的介电常数最大值和最小值分别为4.54和4.07,其介质损耗因数最大值和最小值分别为4.63和3.16。I-1~I-3为同一厂家生产的同类型复合绝缘子,介电特性测量结果存在差异可说明3根复合绝缘子的伞套均存在不同程度的老化。老化后伞套的介电常数增大会导致电场畸变,而介质损耗因数增大说明复合绝缘子的介质损耗增大,最终共同造成复合绝缘子高压端发热。I-1~I-3高压端硅橡胶介电常数和介质损耗因数均大于中部和低压端,说明高压端在强电场的作用下,复合绝缘子高压端硅橡胶老化更严重。结合前文测试,I-1~I-3发热位置仅为高压端,说明硅橡胶材料的老化是护套老化受潮复合绝缘子异常发热的内因。

将干燥后的I-1~I-3高压端硅橡胶试样置于恒温恒湿环境中受潮96 h,环境温度保持在20°C,环境相对湿度为80%。每隔24 h测量一次介电参数,单次测量时间小于3 min,测量结果见表8。由表8可知,干燥后硅橡胶的介电常数和介质损耗因数均明显减小,其中I-2硅橡胶介电常数降至3.97,介质损耗因数降至1.54,说明材料内的水分对其介电性能有很大的影响。随着硅橡胶逐渐受潮,其介电常数和介质损耗因数逐渐增大。这是因为水具有强极性,在20°C工频下水的介电常数为81,远高于硅橡胶介电常数。硅橡胶材料吸水后在交流电场的作用下会加剧偶极子极化过程,导致介电常数和介

表8 受潮后硅橡胶的介电参数
Table 8 Dielectric parameters of silicon rubber after getting wet

受潮时间/h	I-1		I-2		I-3	
	ϵ	$\tan\delta$	ϵ	$\tan\delta$	ϵ	$\tan\delta$
0	4.13	1.67	3.97	1.54	4.07	1.80
24	4.21	2.32	4.07	2.31	4.28	3.68
48	4.32	2.68	4.14	3.01	4.35	4.59
72	4.43	3.59	4.31	4.85	4.47	6.77
96	4.52	6.03	4.48	6.02	4.77	6.94

质损耗因数增加。受潮96 h后, I-1~I-3 硅橡胶介电常数平均增加了13.16%, 介质损耗因数平均增加了279.2%, 说明介质损耗因数受湿度影响较大, 导致在环境湿度较高时, 老化后硅橡胶介质损耗急剧增加, 可引起复合绝缘子异常发热, 而在低湿度条件下, 硅橡胶的介电参数均恢复正常, 复合绝缘子发热幅值大幅降低甚至发热现象消失, 故高湿度环境是护套老化受潮复合绝缘子异常发热的外因。

3.5 发热检修策略

在同一条线路护套老化发热缺陷绝缘子中选取5支试样, 在实验室开展发热位置表层护套切削前后的工频耐压与红外对比测试, 发热幅值变化如表9所示, 典型发热红外图像如图15所示。

表9 CX绝缘子护套切削前后的发热幅值
Table 9 Heating amplitude of CX insulator sheath before and after cutting

试样编号	护套切削前发热幅值/K	护套切削后发热幅值/K
CX-1	2.8	<1
CX-2	4.1	<1
CX-3	4.1	<1
CX-4	3.7	<1
CX-5	2.1	<1

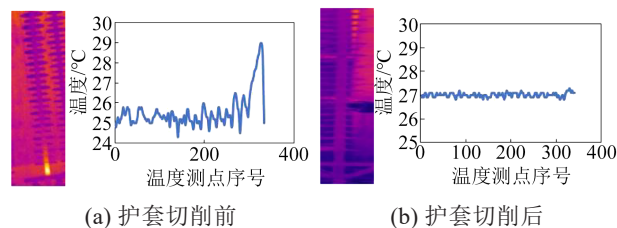


图15 CX-4绝缘子护套切削前后的红外图像

Fig.15 Infrared thermal images of CX-4 insulator sheath before and after cutting

从图15可以看出, 将发热位置表层护套去除后, 发热现象几乎消失, 这是因为发热来源于表层

老化护套的介质损耗, 且绝大部分复合绝缘子护套表层老化深度很浅, 所以将护套表层削去后发热幅值显著下降。

以CX-3绝缘子为例, 其在不同现场环境湿度下的红外图像如图16所示。

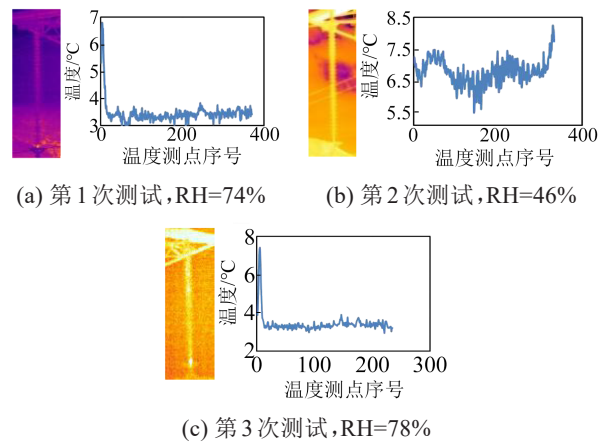


图16 CX-3绝缘子护套切削前后的红外图像

Fig.16 Infrared thermal images of CX-3 insulator sheath before and after cutting

从图16可以看出, 在现场跟踪测试时, 随着环境湿度下降, 受潮缺陷发热幅值显著下降, 当湿度回升, 发热幅值也将上升。

对CX-1绝缘子开展机械破坏、端部密封、剖检试验, 发现试样的机械破坏负荷均超过额定机械破坏负荷(120 kN), 端部密封试验结果合格, 剖检结果无缺陷, 其剖检照片如图17所示。



图17 CX-1发热绝缘子剖检图像

Fig.17 Dissection image of CX-1 heating insulator

对于护套老化受潮缺陷, 发现芯棒无蚀损、变色现象, 结合机械破坏负荷试验结果, 可以判定芯棒并未受到表层护套发热的影响。

护套老化受潮均处于护套表层, 目前观测到的发热幅值最大不超过30 K, 不足以破坏端部密封。由前文的微观形貌分析可知, 护套老化受潮样品高压端发热处内层硅橡胶试样未出现裂纹, 且表面结构保持平整; 由热重分析和红外光谱分析可知, 高压端发热处内层硅橡胶并未出现分子结构的裂解现象。由此说明护套内部、芯棒均没有受到表层发热的影响, 即绝缘子运行性能未受影响。现有案例

表明^[4,9,13],大部分护套老化受潮缺陷发热幅值不超过 10 K;文献[10]解剖验证了其绝缘子内部芯棒未受护套发热的影响;文献[10,33]对护套老化受潮端部发热绝缘子进行了宏观性能试验,包括密封性能试验、机械破坏负荷试验和带护套芯棒水扩散试验,发现试验结果符合 GB/T 19519—2014 和 DL/T 1000.3—2015 的要求。因此对于发热幅值不超过 10 K 的绝缘子不必进行更换,而是通过跟踪测试掌握其状态。对于发热幅值超过 10 K 的绝缘子,建议在低湿环境下进行复测,若发热幅值明显下降则转为一般缺陷,如发热幅值仍然高于 10 K 且存在上升趋势,则该支绝缘子可能存在内部缺陷,建议予以更换。

4 结论

本文对 220 kV 复合绝缘子护套的异常发热特征、发热影响因素及其规律、发热对运行的影响进行了研究,得到以下结论:

(1) 护套老化受潮复合绝缘子的异常发热与硅橡胶材料的老化和环境湿度有关。护套老化受潮复合绝缘子发热位置处于高压端,发热区间较短。

(2) 湿度的增加会引起护套老化受潮复合绝缘子的发热区间增大、发热幅值上升。现场红外巡检应选择干燥天气开展,避免湿度的影响造成复合绝缘子发热状态的误判。

(3) 风速增加会引起护套老化受潮复合绝缘子的发热区间缩短、发热幅值降低。发热缺陷的复测应选择无风或者风速较小时开展。

(4) 护套受潮老化发热未对内层护套、芯棒产生影响。SEM 及 FTIR 分析显示,护套发热位置表层存在裂纹、孔洞, Si-O-Si 和 Si-(CH₃)₂ 主链断裂。内层护套则无上述现象。

(5) 高湿环境会促进复合绝缘子硅橡胶表层护套的发热与老化。受潮后硅橡胶试样平均介电常数增加了 13.16%, 平均介质损耗因数增加了 279.2%, 在高湿环境诱发的发热作用下, 表层护套可能更早出现老化现象, 因此对于沿海高湿环境, 建议改良硅橡胶配方, 提升复合绝缘子运行寿命。

(6) 综合考虑发热原因及其对运行性能的影响, 对于护套老化受潮发热复合绝缘子, 发热幅值不超过 10 K 时可进行跟踪测试, 对于干燥条件下发热幅值仍持续高于 10 K 且存在上升趋势的复合绝

缘子, 建议予以更换。

参考文献 References

- [1] 谢从珍,李煜,苟彬,等. 湿热环境下含芯棒-护套界面缺陷复合绝缘子的界面老化机制研究[J]. 绝缘材料,2024,57(4):72-81.
XIE Congzhen, LI Yu, GOU Bin, et al. Study on the interface aging mechanism of composite insulators with core-sheath interface defects under hot and humid environment[J]. Insulating Materials, 2024,57(4):72-81.
- [2] 周颖,王婷婷,姜廷域,等. 水分侵入对现场老化硅橡胶性能影响的研究[J]. 绝缘材料,2023,56(12):78-84.
ZHOU Ying, WANG Tingting, JIANG Tingyu, et al. Study on the influence of moisture intrusion on the performance of field aged silicone rubber[J]. Insulating Materials,2023,56(12):78-84.
- [3] 王晓杰,许军,林朝晖,等. 输电线路复合绝缘子温升现象及其成因分析[J]. 电瓷避雷器,2022(5):165-171.
WANG Xiaojie, XU Jun, LIN Zhaohui, et al. Analysis of the temperature rising of composite insulators of transmission lines [J]. Insulators and Surge Arresters,2022(5):165-171.
- [4] 申巍,宋治波,王森,等. 基于红外成像的缺陷复合绝缘子温升特性分析[J]. 无损检测,2023,45(9):5-11.
SHEN Wei, SONG Zhibo, WANG Sen, et al. Analysis of temperature rise characteristics of defective composite insulators based on infrared imaging[J]. Nondestructive Testing,2023,45(9):5-11.
- [5] YUAN Z K, TU Y P, JIANG H, et al. Study on heating mechanism of GRP rod in a composite insulator[J]. IET Science, Measurement & Technology,2019,13(1):108-113.
- [6] TU Y P, GONG B, WANG C, et al. Effect of moisture on temperature rise of composite insulators operating in power system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015, 22(4):2207-2213.
- [7] WANG C, LI T F, TU Y P, et al. Heating phenomenon in unclean composite insulators[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 65: 48-56.
- [8] 卢明,张中浩,李黎,等. 复合绝缘子酥朽发热老化的原因分析[J]. 电网技术,2018,42(4):1335-1341.
LU Ming, ZHANG Zhonghao, LI Li, et al. Reason analysis of decay-like aging for composite insulator[J]. Power System Technology,2018,42(4):1335-1341.
- [9] 李特,陶瑞祥,张锐,等. 典型发热缺陷复合绝缘子红外特征及无人机红外测试参数选择[J]. 高电压技术,2022,48(3):865-875. 6520.
LI Te, TAO Ruixiang, ZHANG Rui, et al. Infrared characteristic of typical composite insulator heating defects and selection of fieldunmanned aerial vehicle infrared test parameters[J]. High Voltage Engineering,2022,48(3):865-875,6520.
- [10] 黄振,张中浩,彭向阳,等. 复合绝缘子表面异常发热现象分析及其抑制措施[J]. 电瓷避雷器,2020(6):171-175,186.
HUANG Zhen, ZHANG Zhonghao, PENG Xiangyang, et al. Analysis on surface abnormal heating and the countermeasure for composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters,2020 (6):171-175,186.

- [11] 王黎明,张中浩,成立,等. 复合绝缘子护套受潮对端部异常温升的影响[J]. 电网技术,2016,40(2):608-613.
WANG Liming, ZHANG Zhonghao, CHENG LI, et al. Effect of moisture on composite insulator sheath on abnormal end temperature rise[J]. Power System Technology,2016,40(2):608-613.
- [12] CHENG L, LIAO R J, YANG L J, et al. An optimized infrared detection strategy for defective composite insulators according to the law of heat flux propagation considering the environmental factors[J]. IEEE Access,2018(6):38137-38146.
- [13] 李特,王少华,叶金标,等. 含人工缺陷复合绝缘子红外特征试验研究[J]. 浙江电力,2021,40(4):94-100.
LI Te, WANG Shaohua, YE Jinbiao, et al. Experimental study on infrared characteristics of composite insulators containing artificial defects[J]. Zhejiang Electric Power,2021,40(4):94-100.
- [14] 李特,何坚,吴旭翔,等. 一起1000 kV输电线路复合绝缘子蚀损缺陷问题分析[J]. 电工技术,2024(1):90-94.
LI Te, HE Jian, WU Xuxiang, et al. Analysis of an actual corrosion damage defect of compositeinsulator on 1000 kV transmission line[J]. Electrical Engineering,2024(1):90-94.
- [15] 吴旭翔,朱其杰,李特,等. 一起500 kV线路复合绝缘子发热缺陷分析[J]. 电工电气,2023(10):36-41.
WU Xuxiang, ZHU Qijie, LI Te, et al. Analysis of the composite insulator heating of 500 kV lines[J]. Electrotechnics Electric, 2023(10):36-41.
- [16] 李勃铖,李稳,张稷,等. 一起500 kV复合绝缘子断裂故障分析[J]. 浙江电力,2023,42(9):117-123.
LI Bocheng, LI Wen, ZHANG Ji, et al. Cause analysis on fracture of a 500 kV composite insulator[J]. Zhejiang Electric Power, 2023,42(9):117-123.
- [17] 朱丽君,吕鑫. 输电线路复合绝缘子断裂原因分析及处置[J]. 农村电气化,2024(2):43-46.
ZHU Lijun, LÜ Xin. Analysis and treatment of composite insulator fracture of transmission line[J]. Rural Electrification,2024(2):43-46.
- [18] 卢明,高超,李子岳,等. 复合绝缘子酥朽断裂事故的分布规律研究[J]. 高压电器,2024,60(2):133-142.
LU Ming, GAO Chao, LI Ziyue, et al. Study on distribution of decay-like fracture of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus,2024,60(2):133-142.
- [19] 王祖林,黄涛,刘艳,等. 合成绝缘子故障的红外热像在线检测[J]. 电网技术,2003(2):17-20.
WANG Zulin, HUANG Tao, LIU Yan, et al. On-line inspection of defective composite insulators by infraredtemperature measurement[J]. Power System Technology,2003(2):17-20.
- [20] 程养春,李成裕,陈勉,等. 高压输电线路复合绝缘子发热机理的研究[J]. 电网技术,2005(5):57-60.
CHENG Yangchun, LI Chengrong, CHEN Mian, et al. Research on the heating mechanism of composite insulators for high-voltage transmission lines[J]. Power System Technology, 2005(5):57-60.
- [21] COSTA E G D, FERREIRA T V, NERI M G G, et al. Characterization of polymeric insulators using thermal and UV imaging under laboratory conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2009,16(4):985-992.
- [22] 王黎明,付铠玮,梅红伟,等. 环境湿度对复合绝缘子红外测温的影响[J]. 高电压技术,2019,45(6):1955-1961.
WANG Liming, FU Kaiwei, MEI Hongwei, et al. Effect of ambient humidity on infrared temperature measurement of composite insulators[J]. High Voltage Engineering,2019,45(6):1955-1961.
- [23] 彭向阳,黄振,张中浩,等. 高湿热地区高温发热复合绝缘子分析[J]. 智慧电力,2019,47(8):83-90.
PENG Xiangyang, HUANG Zhen, ZHANG Zhonghao, et al. Analysis of high temperature heating composite insulators in hot and humid areas[J]. Smart Power,2019,47(8):83-90.
- [24] 张育铭,刘云鹏,侯思祖,等. 高湿电晕老化对复合绝缘子端部护套异常温升的影响及抑制措施[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版),1-13[2025-05-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20231108.1008.002.html>.
ZHANG Yuming, LIU Yunpeng, HOU Sizu, et al. Research on the effect of high humidity corona aging on abnormaltemperature rise of composite insulator end sheath and its suppression method[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 1-13[2025-05-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20231108.1008.002.html>.
- [25] 孟繁萃. 湿污绝缘子表面发热与温度场研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2019.
MENG Fancui. Study on slrface heateng andtemperatlre field of-wetpolltted insulator[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology,2019.
- [26] 彭向阳,李子健,黄振,等. 基于TG-DSC法的复合绝缘子硅橡胶主组分含量研究[J]. 南方电网技术,2017,11(1):36-44.
PENG Xiangyang, LI Zijian, HUANG Zhen, et al. TG-DSC coupling techniques based investigation on main component content of silicone rubber composite insulators[J]. Southern Power System Technology,2017,11(1):36-44.
- [27] 全国化学标准化技术委员会有机化工分技术委员会. 红外光谱分析方法通则:GB/T 6040—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
Organic Chemical Sub Technical Committee of National Chemical Standardization Technical Committee. General rules for infrared analysis: GB/T 6040—2019[S]. Beijing: Standards Press of China,2019.
- [28] KIM S H, CHERNEY E A, HACKAMA R, et al. Chemical-changes at the surface of RTV silicone-rubber coatings on insulators during dry-band arcing[J]. IEEE Transactions on Delectrics and Electrical Insulation,1994,1(1):106-123.
- [29] 彭向阳,林宏升,黄振,等. 应用显微红外外法的硅橡胶复合绝缘子伞裙老化深度研究[J]. 电网技术,2017,41(4):1350-1356.
PENG Xiangyang, LIN Hongsheng, HUANG Zhen, et al. An in-

- frared microspectroscopy method for determining degradation depth of silicone rubber composite insulator shed[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1350-1356.
- [30] 雷超平, 莫文雄, 栾乐, 等. 复合绝缘子硅橡胶伞裙热老化特性研究[J]. 电工技术, 2018(22): 20-22.
- LEI Chaoping, MO Wenxiong, LUAN Le, et al. Study on thermal aging characteristics of silicone rubber sheds of composite insulators[J]. Electric Engineering, 2018(22): 20-22.
- [31] 陈金法. 绝缘子红外热像检测及诊断技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- CHEN Jinfa. Research on infrared thermal imaging detection and diagnostic technology of insulators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [32] 谢从珍, 袁超, 胡长猛, 等. $\pm 800\text{kV}$ 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 $\pm 800\text{kV}$ DC tension strings[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 735-741.
- [33] 雷超平, 莫文雄, 栾乐, 等. 复合绝缘子端部发热伞套理化特性研究[J]. 电工技术, 2018(17): 144-146.
- LEI Chaoping, MO Wenxiong, LUAN Le, et al. Study on the physicochemical properties of end-heating of composite insulator[J]. Electric Engineering, 2018(17): 144-146.

收稿日期: 2024-04-24; 修回日期: 2024-07-05。

作者简介:

叶昊亮(1997-), 男(汉族), 浙江温州人, 工程师, 主要从事高电压与绝缘技术、输变电设备运维与状态监测的研究工作。