

混合瓷绝缘子界面的水煮老化特性分析

周日文¹, 冒珏岑¹, 王学宗², 张 虎², 黄星宇¹, 梁进祥², 武文华², 王 羽^{1*}

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要:为研究混合瓷绝缘子的界面老化特性,对混合瓷绝缘子与 A 类、B 类复合瓷绝缘子开展 1 000 h 水煮老化试验,测量了老化样品的泄漏电流、红外温升和粘接性,并通过瓷块模拟分析了混合瓷绝缘子的界面粘接机理。结果表明:混合瓷绝缘子水煮过程中泄漏电流变化较小,且未出现温升现象,粘接性为 CC-5 级,界面抗老化性能较好。模拟试验表明,浸涂硅烷偶联剂后,瓷件的表面粗糙度增大 821.4%,Ti-O-Si 化学键合的形成增强了其与硅橡胶的物理啮合;同时瓷件表面出现更多-OH 基团,可以更好地与硅橡胶发生化学键合,达到良好的界面粘接效果。

关键词:混合瓷绝缘子;水煮老化;界面性能;红外温升;微观分析

Analysis on water-boiling ageing characteristics of hybrid porcelain insulator interfaces

ZHOU Riwen¹, MAO Juecen¹, WANG Xuezhong², ZHANG Hu², HUANG Xingyu¹,

LIANG Jinxiang², WU Wenhua², WANG Yu^{1*}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: To study the interface ageing characteristics of hybrid porcelain insulator, the hybrid porcelain insulators, type A and type B composite porcelain insulator were conducted 1 000 h water-boiling ageing test, and the leakage current, infrared temperature rise, and bonding property of the aged samples were measured. The interface bonding mechanism of the hybrid porcelain insulator was analyzed through porcelain block simulation. The results show that during the water-boiling process, the leakage current of the hybrid porcelain insulator changes slightly and no temperature rise occurs, the bonding property is CC-5 level, and the anti-ageing performance of the interface is good. The simulation test show that after coating the silane coupling agent, the surface roughness of the porcelain increases by 821.4%, and the formation of Ti-O-Si chemical bond enhances its physical interlocking with the silicone rubber. At the same time, more -OH groups appear on the surface of porcelain block, which can better chemically bond with silicone rubber, achieving good interface bonding effect.

Key words: hybrid porcelain insulator; water-boiling ageing; interface performance; infrared temperature rise; micro-analysis

0 引言

为了应对我国电力资源与负荷分配不对等的问题,我国电力系统加快建设跨省跨区输电通道^[1]。截至 2023 年底,我国已建成特高压线路 39 条,220 kV 及以上输电线路总长度已达到 91.97 万 km,公用变电设备容量已达到 54.24 亿 kVA^[2]。随着我国电网电压等级的不断提高、建设规模和联网范围的不断扩大、电力输送能力的持续提升,电力系统对输

送线路的外绝缘能力要求也日益严苛。绝缘子作为输电线路外绝缘不可缺少的组成部分,其分布广、用量大,在整个电网中占据着举足轻重的地位。

对于外层包覆硅橡胶的绝缘子,其界面易受到影响发生老化。当该类绝缘子界面存在缺陷时,缺陷处的电场会产生畸变,容易引起局部放电,同时来自外部环境的液体进入绝缘子后更容易积聚在缺陷处,引起材料进一步的水解老化,最终在高压放电、机械应力、温度和水分等多因素的作用下,界面处的缺陷不断扩大^[3]。复合绝缘子由于芯棒-护套的粘接性、耐水解及耐湿热老化性能严重下降而

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5500-202455118A-1-1-ZN)。

产生的界面问题极可能导致护套烧蚀穿孔甚至芯棒断裂^[4]。虽然目前还没有相关文献与运行报告指出硅橡胶类绝缘子存在断裂风险,但界面问题仍然会影响其耐陡波性能。因此,硅橡胶类绝缘子的界面问题不容忽视,良好的界面耐老化性能是保障硅橡胶类绝缘子长期稳定运行的重要条件。

现有关于绝缘子界面性能的研究大多数是针对复合绝缘子。王运松等^[5]通过四电极装置测量水煮老化后的硅橡胶绝缘子样品,发现界面老化是引起硅橡胶绝缘子样品泄漏电流上升的主要原因。杨昌建等^[5]用电解液对复合绝缘子试样进行水煮后继续浸泡,发现其压接界面中环氧树脂、偶联剂与金属原子间的配位键减少。曾磊磊等^[6-7]对复合绝缘子开展了湿热老化试验,结合扫描电子显微镜和热刺激电流测试发现硅橡胶材料的电气性能、表面形貌、表面化学基团均表现出劣化特征,且水煮 26 d 的硅橡胶样品与实际运行老化 10 年的硅橡胶样品老化程度相近。谢从珍等^[8]发现湿热环境下含界面缺陷复合绝缘子的界面粘接性更容易遭到破坏,界面缺陷会加速复合绝缘子的老化进程。聂章翔等^[9]提出复合绝缘子芯棒与护套界面在水和高温作用下的老化模型,并结合试验发现泄漏电流法可有效表征界面性能,水煮样品中泄漏电流的变化主要由界面区域的老化所引起,通过样品中央芯棒及护套的电流在水煮前后未发生显著变化。刘宇等^[10]结合实测获得的材料参数,采用有限元多物理场仿真发现介质损耗增大是导致复合绝缘子温升的主要原因。

现有的关于绝缘子界面的检测方法,基本都是检测复合绝缘子芯棒-护套的界面性能。除了现有标准中最常用的水煮法,张福增等^[11]提出了一种新的等级评价方法以评价芯棒和护套的粘接性。WANG J G 等^[12]对复合绝缘子开展干工频电压试验并总结其发热特征,基于红外热成像轴向温度方法提出了一种复合绝缘子界面缺陷的定量表征方式。而对于硅橡胶类盘形悬式绝缘子,相关特征方法稍显空缺,但二者有相似之处,上述方法对于其检测表征有一定的参考价值与借鉴意义。

混合瓷绝缘子由完整的瓷绝缘件芯体和高温硫化硅橡胶 (high temperature vulcanized silicone rubber, HTV) 包覆层组成,外包覆层采用高温硫化一次注射成型工艺制成。与复合绝缘子相比,混合瓷绝缘子在拥有同样优良的憎水性以及防污闪性

能的同时还兼具瓷绝缘子的机械强度^[13],但是作为一种新型的绝缘子,关于混合瓷绝缘子界面性能的试验研究还较少。

本文开展混合瓷绝缘子与 A 类、B 类复合瓷绝缘子的水煮老化特性研究,通过对这 3 种绝缘子开展 1 000 h 水煮试验并测量其泄漏电流,结合老化后试品的红外温升试验与撕拉试验,对比其界面老化性能并分析混合瓷绝缘子的界面粘接机理。

1 试验

1.1 试验试品

试验选取爬电距离相近的 A 类复合瓷绝缘子 (A1、A2、A3)、B 类复合瓷绝缘子 (B1、B2、B3)、混合瓷绝缘子 (C1、C2、C3) 各 3 片。其中, A 类复合瓷绝缘子采用不带伞裙的绝缘件作为芯体,其余绝缘子采用完整的绝缘子作为芯体;混合瓷绝缘子表面硅橡胶采用一次高温注射成型工艺, A、B 类复合瓷绝缘子表面硅橡胶为人工粘接或高温模压成型, B 类复合瓷绝缘子下表面涂敷室温硫化硅橡胶 (RTV) 涂料。一次高温注射成型的绝缘子产品一体化程度较高,理论上具有更好的界面性能,而人工粘接可能因人为操作不当导致粘接一致性较差,均匀程度低,影响界面粘接质量。高温模压工艺介于二者之间,界面粘接相对均匀但一体化程度较低。各类试品如图 1 所示。



图1 试验试品图

Fig.1 Test sample diagram

1.2 试验方法

1.2.1 水煮试验

水煮试验参照 GB/T 22079—2019,将绝缘子放置于质量分数为 0.1% 的 NaCl 溶液中,每沸煮 (50±0.5) h 后取出冷却,待绝缘子冷却至室温测量一次泄漏电流,累计水煮 1 000 h。试验电压为 30 kV,待电压稳定 1 min 后读取泄漏电流值并记录。

1.2.2 红外温升试验

取出水煮 1 000 h 的绝缘子冷却至室温后施加 30 kV 的电压,通过红外摄像机对加压 180 s 的绝缘

子进行测量,得到绝缘子的表面温度分布图。

1.2.3 撕拉试验

参照 DL/T 1471—2015,用手术刀沿绝缘子表面径向任意划两道相隔 20 mm 左右的划痕,采用手工撕拉的方式施加外力,施力方向与绝缘子表面夹角大于 30°,直至硅橡胶撕裂为止。

1.2.4 粗糙度测试

选用型号为 NewView9000 的白光干涉 3D 表面轮廓仪对瓷件的表面粗糙度进行测量。

1.2.5 红外光谱测试

选用型号为 Nicolet™ iS50 的傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)检测瓷件的表面官能团变化。

1.2.6 泄漏电流测试

采用图 2 所示泄漏电流测量系统进行测试。其中直流高压电源由调压器和试验变压器组成并经由硅堆整流输出电压。试验变压器额定容量为 30 kVA,额定输入电压为 220 V,额定输出电压为 100 kV,额定输出电流为 0.3 A。调压器的额定容量为 15 kVA,额定输入电压为 220 V,输出电压为 0~200 V,输出电流为 0~75 A。阻容式分压器的额定电压为 100 kV,额定变比为 10 000:1,稳压电容为 0.25 μF。

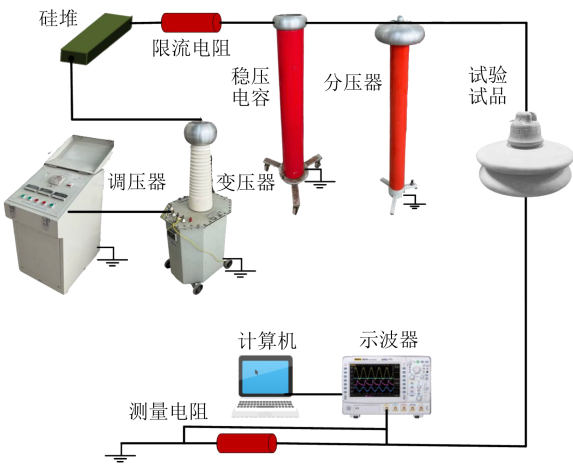


图 2 泄漏电流测量系统
Fig.2 Leakage current measurement system

2 试验结果与分析

2.1 外观变化

每次测量泄漏电流前对各绝缘子进行外观检查并记录。A 类复合瓷绝缘子累计水煮时间达到 100 h 时,试样 A1、A3 密封环处出现细小裂缝,挤压裂缝处有水珠渗出,并随着水煮时间的累积,裂缝

逐渐变大,A2 试样密封环未发现开裂,该类绝缘子密封环的劣化情况如图 3(a)所示;B 类复合瓷绝缘子累计水煮时间达到 50 h 时,所有试样底部的 RTV 涂层均出现大量鼓泡,如图 3(b)所示,继续水煮后鼓泡破裂,绝缘子下表面的 RTV 涂层受损;混合瓷绝缘子在 1 000 h 水煮过程中外观检查未见异常,如图 3(c)所示。

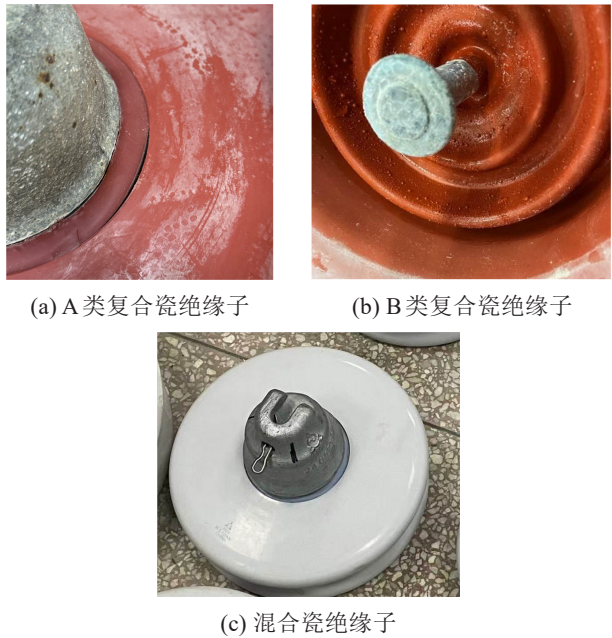


图 3 水煮后各绝缘子外观情况
Fig.3 Appearance of each insulator after water-boiling

2.2 水煮试验结果

水煮试验能够有效考验水分能否浸入绝缘子界面,而泄漏电流变化情况能够在一定程度上反映绝缘子的界面粘接情况。绝缘子泄漏电流随水煮时间的变化情况如图 4 所示。从图 4 可以看出,相较于水煮前,水煮后 A 类复合瓷绝缘子的泄漏电流增长明显,泄漏电流值增大约 190 倍,B 类复合瓷绝缘子的泄漏电流增大约 4 倍,混合瓷绝缘子的泄漏电流增大约 5 倍。从整个泄漏电流变化情况看,B 类复合瓷绝缘子和混合瓷绝缘子的差异不大,但 A 类复合瓷绝缘子的泄漏电流增长最快,增幅最大。

2.3 红外温升测量结果

水分进入绝缘子界面以及绝缘子表面,硅橡胶吸水后介质损耗增大,可能会导致绝缘子的异常温升。对水煮 1 000 h 后的试样逐一进行红外温升试验,3 类绝缘子加压前后的平均温度及其标准差如图 5 所示,典型试验图像如图 6 所示。

由图 5~6 可知,加压前后除 A 类复合瓷绝缘子

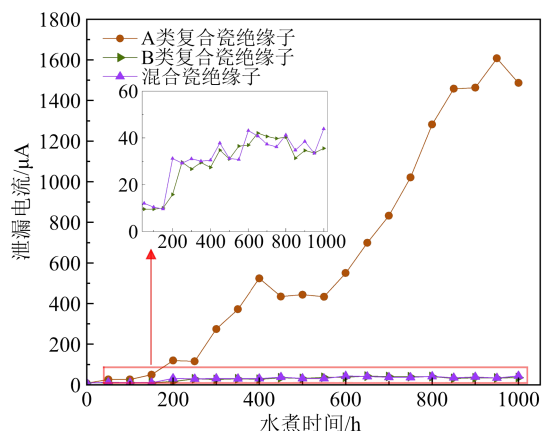


图4 绝缘子泄漏电流随水煮时间的变化

Fig.4 Variations of insulator leakage current with water-boiling time

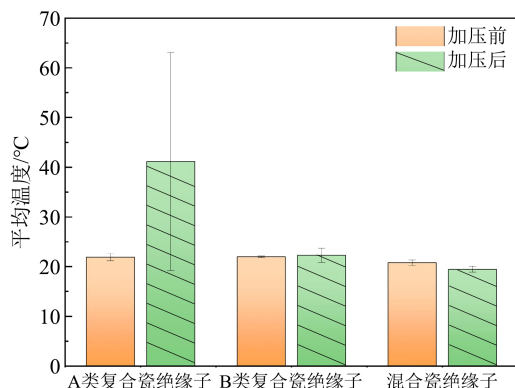
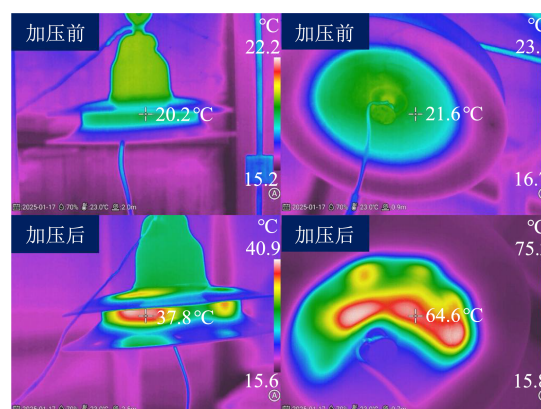


图5 加压前后各类绝缘子平均温度

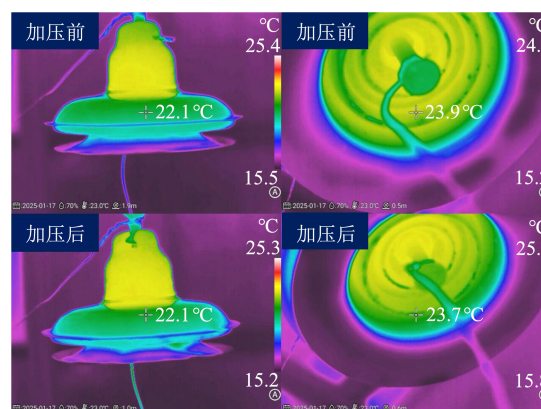
Fig.5 Average temperature of various insulators before and after applying voltage

外,其余绝缘子均无明显的温度变化。A类复合瓷绝缘子的温度分布不均匀,温升位置主要集中在界面区域,且位于绝缘子密封环开裂处,最高温度为64.6℃。试品温升区域可以反映水分的分布位置,温升幅值可以反映水分的含量。因此可以推测A类复合瓷绝缘子试品中的水分主要分布在界面处,且水分含量较多。具体试验中发现,A类复合瓷绝缘子试品中,A1试品的温度上升情况最为严重,其也是泄漏电流上升最明显的试品;A3试品温升其次,其泄漏电流上升幅度仅次于A1试品;A2试品未见明显温升,分析其原因是由于A2试品水煮后劣化程度较低,密封环没有开裂,界面浸入水分较少,泄漏电流数值也较低,未达到发热程度。

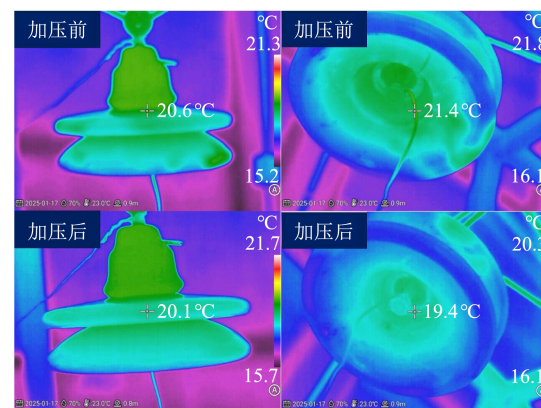
通过泄漏电流变化情况以及红外温升测量结果可知,水煮老化1 000 h后,A类复合瓷绝缘子的界面劣化严重。



(a) A类复合瓷绝缘子



(b) B类复合瓷绝缘子



(c) 混合瓷绝缘子

图6 红外温升测量结果

Fig.6 Infrared temperature rise measurement results

2.4 撕拉试验结果

3类绝缘子的撕拉试验结果如图7所示。从图7可以看出,A类复合瓷绝缘子撕拉后表面没有残留的硅橡胶,绝缘件完全裸露,出现光洁的瓷面。B类复合瓷绝缘子撕拉后表面残余较多的硅橡胶,裸露出部分绝缘件,可见其瓷面。混合瓷绝缘子难以撕拉且撕拉后表面未见裸露瓷面。参考文献[11]的粘接性评价指标,A类复合瓷绝缘子的界面粘接性

为CC-1级,B类复合瓷绝缘子的界面粘接性为CC-3级,混合瓷绝缘子的界面粘接性为CC-5级。另外A类复合瓷绝缘子的伞裙拆开后可见大量水珠,分析其原因是水煮老化后密封环开裂,水分由此进入绝缘子界面,经过长时间的高温水煮老化,界面粘接性能下降产生空隙,导致大量水分子贮存在界面内部,该现象与红外温升测量试验的推测相吻合。而B类复合瓷绝缘子界面也发生不同程度的劣化,由撕拉试验结果可知其界面破坏情况是非连续的,未能为界面泄漏电流提供较连续的通路,推测这是B类复合瓷绝缘子泄漏电流变化不明显的原因。

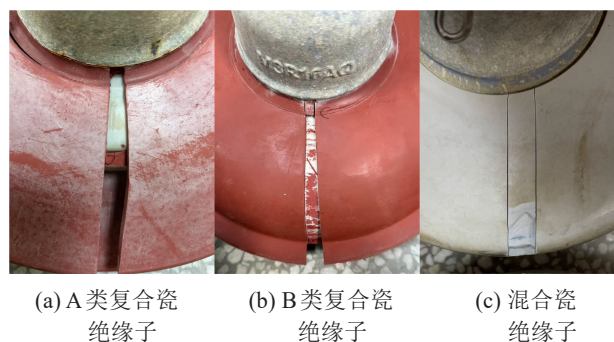


图7 撕拉试验结果
Fig.7 Tearing test results

3 混合瓷绝缘子粘接机理分析

界面粘接强度提升主要依赖于两种关键作用机制^[14]:一是通过改变物体表面形貌特征,增大基材表面粗糙度以强化物理锚定效应,从而在无机基材与有机材料之间形成有效的物理啮合;二是通过化学键合,在界面区域形成共价键、氢键等化学键,实现两种异质材料在分子水平上的稳定结合。

试验选取与混合瓷绝缘子胚体材料一致的瓷块(尺寸为2 cm×2 cm)模拟混合瓷绝缘子,并进行浸涂偶联剂与烘干工艺处理,分析处理前后其表面粗糙度以及官能团的变化情况,以从物理啮合和化学键合方面分析其界面粘接机理,试验样品如图8所示。

3.1 表面轮廓仪测试结果

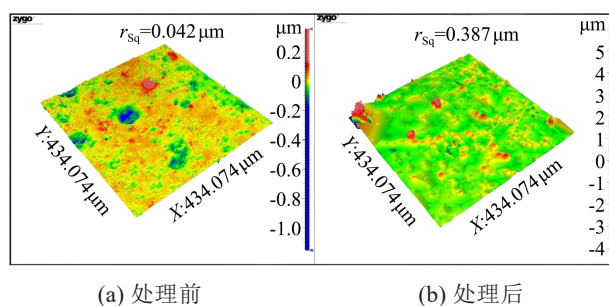
均方根粗糙度 r_{sq} 是表面粗糙度的重要参数之一,其通过计算材料表面所有点高度偏离基准面的均方根值,量化表面的波动强度。 r_{sq} 对极端峰谷值更敏感,适用于动态载荷分析。因此本研究选用均方根粗糙度 r_{sq} 表征瓷件表面的粗糙程度。

处理前后的瓷件表面粗糙度测量结果如图9所示。由图9可知,经偶联剂处理后瓷件的 r_{sq} 明显增



图8 试验瓷件样品

Fig.8 Test porcelain sample



(a) 处理前 (b) 处理后
图9 瓷件表面粗糙度表征图

Fig.9 Surface roughness characterization of porcelain parts

大,增幅达到821.4%,说明其表面粗糙程度显著提高。瓷件表面形成的粗糙细小颗粒形貌能够提高胶黏剂与瓷件表面的实际接触面积,提供较强的物理啮合作用,从而明显提升界面粘接力。

3.2 FTIR 测试结果

利用FTIR测量物质对红外光的吸收特性,可以获取其分子结构和化学组成信息。通过FTIR检测瓷件在每一道工序处理之后的表面官能团变化,分析混合瓷绝缘子粘接界面的化学键合情况,测试结果如图10所示。由图10可知,经硅烷偶联剂处理后的瓷件谱图在3 000 cm^{-1} 左右出现分裂峰,872 cm^{-1} 左右的分裂峰增强。经分析,谱图中在3 000 cm^{-1} 左右出现的分裂峰是源自硅烷偶联剂(乙烯基三甲氧基硅烷)中不饱和 $-\text{CH}=\text{H}_2$ 的伸缩振动^[15],证明硅烷偶联剂成功粘附在样品表面。872 cm^{-1} 左右的分裂峰增强是由于硅烷偶联剂中的钛酸四异丙酯在反应中水解生成 $\text{Ti}-\text{OH}$,并与瓷件表面的 $\text{Si}-\text{OH}$ 缩合,形成 $\text{Ti}-\text{O}-\text{Si}$ 键,进一步增强了界面结合力,改善涂层耐久性、耐候性及长期稳定性。高温烘干后瓷件的吸光度降低,表明烘干后的表面更光滑、残留溶剂更少,减少了光的散射,提高了透光率。但其波形基本不变,说明硅烷偶联剂的热稳定性好,在实际生产工艺中,高温烘干并不会对混合瓷绝缘子的界面粘接强度产生负面影响。综上,浸

涂硅烷偶联剂后硅烷偶联剂与瓷件样品表面形成 Ti-O-Si 化学键合,提升了瓷件与偶联剂的粘接效果。同时瓷件表面出现更多-OH 基团,可以更好地与硅橡胶发生化学键合。

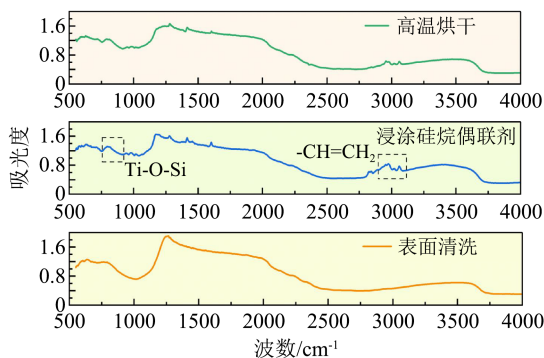


图 10 各道工序处理后瓷件的 FTIR 谱图对比

Fig.10 Comparison on FTIR spectra of porcelain parts after each processing step

4 结论

本文通过对混合瓷绝缘子、A 类与 B 类复合瓷绝缘子进行 1 000 h 水煮老化试验,通过泄漏电流变化情况、红外温升情况以及撕拉试验结果评估其界面性能,并分析了混合瓷绝缘子的界面粘接机理,主要得到以下结论:

(1) 水煮后 A 类复合瓷绝缘子的泄漏电流增长最快,增幅最大,其余两种绝缘子水煮前后的泄漏电流差异不大。

(2) 经 1 000 h 水煮老化后, A 类复合瓷绝缘子出现明显温升现象,且温升主要集中在界面缺陷处。

(3) 经 1 000 h 水煮老化后,混合瓷绝缘子界面粘接性最好,达到 CC-5 级, B 类复合瓷绝缘子次之,为 CC-3 级, A 类复合瓷绝缘子较差,为 CC-1 级。

(4) 瓷件样品经硅烷偶联剂处理后,表面粗糙度增大 821.4%,硅烷偶联剂与瓷件样品表面形成 Ti-O-Si 化学键合,提升了界面粘接效果。

参考文献 References

[1] ZHUO Zhenyu, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3172.

[2] 梁曦东, 仵超, 左周, 等. 高电压有机外绝缘发展综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7412-7426.

LIANG Xidong, WU Chao, ZUO Zhou, et al. Review and outlook on the development of high-voltage organic external insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7412-7426.

[3] 王运松, 刘育豪, 樊浩楠, 等. 硅橡胶和脂环族环氧树脂复合绝缘子界面的水煮老化特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 2028-2035.

WANG Yunsong, LIU Yuhao, FAN Haonan, et al. Water-boiling aging characteristics of the interface between silicone rubber and alicyclic epoxy resin composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 2028-2035.

[4] 伍弘, 刘世涛, 郝金鹏, 等. 运行复合绝缘子芯棒-护套界面性能评估[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 153-158, 166.

WU Hong, LIU Shitao, HAO Jinpeng, et al. Performance evaluation of the core-sheath interface of in-service composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 153-158, 166.

[5] 杨昌建, 徐驰, 晏年平, 等. 水分侵入压接界面对复合绝缘子的影响[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1841-1848.

YANG Changjian, XU Chi, YAN Nianping, et al. Effect of moisture intrusion at the crimp interface on composite insulators[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1841-1848.

[6] 曾磊磊. 复合绝缘子异常发热及湿热老化特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

ZENG Leilei. Study on abnormal heating and humidity-heat aging characteristics of composite insulators[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[7] 曾磊磊, 张宇, 缪雪梅, 等. 复合绝缘子芯棒湿热老化与吸湿特性研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(1): 58-63.

ZENG Leilei, ZHANG Yu, MIAO Xuemei, et al. Study on humidity-heat ageing and moisture absorption characteristics of composite insulator core rods[J]. Insulating Materials, 2020, 53(1): 58-63.

[8] 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 ageing mechanism of composite insulators with core rod-sheath interface defects under humid-heat conditions[J]. Insulating Materials, 2024, 57(4): 72-81.

[9] 聂章翔, 王黎明, 杨翠茹. 复合绝缘子芯棒与护套交界面在水和高温作用下的老化特性[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4601-4611, 4661.

NIE Zhangxiang, WANG Liming, YANG Cuiru. Aging characteristics of the core rod-sheath interface of composite insulators under the combined effects of water and high temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4601-4611, 4661.

[10] 刘宇, 李光茂, 朱晨, 等. 湿热环境异常发热复合绝缘子电热耦合仿真分析[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 31-39, 49.

LIU Yu, LI Guangmao, ZHU Chen, et al. Simulation analysis of electrothermal coupling in abnormal heating of composite insulators under humid-heat environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 31-39, 49.

[11] 张福增, 宋磊, 李锐海, 等. 复合绝缘子断裂原因分析及缺陷评价方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3093-3100.

ZHANG Fuzeng, SONG Lei, LI Ruihai, et al. Analysis of the causes of composite insulator breakage and defect evaluation methods[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3093-3100.

[12] WANG J G, XIAO X, FAN Y D, et al. Interface defect detection

- for composite insulators based on infrared thermography axial temperature method[J]. *Infrared Physics & Technology*,2018,93: 232-239.
- [13] 王羽,黄星宇,陈碧芳,等.盘形悬式混合瓷绝缘子关键技术研究与应用前景[J]. *绝缘材料*,2025,58(9):1-8.
- WANF Yu, HUANG Xingyu, CHEN Bifang, et al. Pivotal technology research and application prospect of cap and pin suspension hybrid porcelain insulators[J]. *Insulating Materials*,2025,58 (9):1-8.
- [14] 曹鹏宇,董宏刚,李娜,等.表面处理增强聚酰亚胺复合材料与硅橡胶粘接性能研究[J]. *化工新型材料*,2025,53(增刊 1): 153-156.
- CAO Pengyu, DONG Honggang, LI Na, et al. Study on the bonding performance of polyimide composite materials and silicone rubber enhanced by surface treatment[J]. *New Chemical Materials*,2025,53(S1):153-156.
- [15] 辛颢,罗旭,霍天宇,等.纳米 SiO₂ 和端羧基聚酯协同改性环氧树脂复合材料[J]. *兵器装备工程学报*,2025,46(1):314-324.
- XIN Jie, LUO Xu, HUO Tianyu, et al. Synergistic modification of epoxy resin composites with nano-SiO₂ and carboxylic acid-terminated polyester[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*,2025,46(1):314-324.

收稿日期:2025-07-23;修回日期:2025-08-25。

作者简介:

周日文(2002—),男(汉族),江西吉安人,硕士生,主要从事高电压绝缘与监测的研究工作。

通信作者:王羽(1983—),男(汉族),湖北襄阳人,教授,主要从事电力系统防雷接地、外绝缘等领域的研究工作。