

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

谢从珍, 李煜, 苟彬, 徐华松, 杨畅

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 湿热环境下, 含界面缺陷的复合绝缘子更易发生酥朽断裂、界面击穿等严重事故。目前湿热环境下含芯棒-护套界面缺陷复合绝缘子的界面老化机制尚未明确。本文对含有不同界面缺陷的复合绝缘子短样进行湿热老化, 对比吸潮与干燥状态下各试样的温升与放电结果, 然后通过解剖观察、微观形貌观察及表面元素与官能团变化分析, 研究湿热环境对含界面缺陷复合绝缘子性能的影响。结果表明: 绝缘子界面缺陷在湿热作用下会加速绝缘子的老化进程, 扩大为界面失效, 界面处局部放电与水分杂质的极化损耗会引发异常发热故障, 其中金属缺陷引发的温升明显高于其他类型缺陷; 随着界面缺陷逐步扩大, 环氧树脂由界面向内部发生氧化分解, 玻璃纤维大量裸露, 进而发生劣化。

关键词: 复合绝缘子; 老化机制; 界面问题; 湿热老化; 玻璃纤维增强塑料芯棒

中图分类号: TM216 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.04.011

Study on interface ageing mechanisms of composite insulators with core-sheath interface defects under hygrothermal environment

XIE Congzhen, LI Yu, GOU Bin, XU Huasong, YANG Chang

(School of Electrical Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In hot and humid environment, composite insulators with interface defects are more prone to occur serious accidents such as decay-like breakage and interface breakdown. However, there is a lack of studies on the interface ageing mechanisms of composite insulators with core-sheath interface defects under hygrothermal environment. In this paper, composite insulator short samples with different interface defects were subjected to hygrothermal ageing. The temperature rise and discharge results of each sample were compared under conditions of moisture absorption and dry condition. The influence of hygrothermal environment on the performance of composite insulators with interface defects was studied through dissection observation, microscopic morphology observation, and surface elements and functional groups analysis. The results show that the insulator interface defects will expand into interface failures under the action of heat and humidity. Partial discharge and polarization loss of moisture at the interface will trigger abnormal heating faults, and the temperature rise caused by metal defects is significantly higher than that of other defects. As the interface defects gradually expand, epoxy resin undergoes oxidation and decomposition from interface to interior, and the glass fibers exposes and deteriorates.

Key words: composite insulator; ageing mechanism; interface problem; hygrothermal ageing; FRP rod

0 引言

复合绝缘子具有耐污闪性能强、比强度高、质量轻、易于安装维护等优点, 在架空高压输电线路中得到了广泛应用^[1-2]。截至2019年, 我国不同额定电压的交直流架空输电线路中使用了约900万支复合绝缘子^[3]。然而, 随着复合绝缘子运行年限的增加, 越来越多的新问题也逐渐显现。

复合绝缘子由硅橡胶护套和玻璃纤维增强复

合材料(FRP)组成, 由于生产工艺水平和现场运行条件的影响, 其芯棒-护套界面粘接性容易遭到破坏而产生界面缺陷, 在长期恶劣运行环境和局部严重放电的情况下, 护套、芯棒材料会发生局部老化, 缺陷进一步扩大, 将引起内绝缘破坏, 进而发生断串等恶性事故^[4-7]。酥朽断裂、界面击穿是近年来复合绝缘子应用面临的主要故障类型, 不利于电力系统安全稳定运行, 两种事故类型的共同本质是芯棒与护套界面缺陷诱发的酥朽老化^[8-12]。酥朽老化沿轴向的劣化会引起电气性能下降, 可能导致界面击穿; 沿径向的劣化会造成力学性能下降, 引起酥朽

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977084); 广州供电局电力试验研究院重点项目(080037KK52190040)。

断裂^[13]。因此,复合绝缘子的界面性能直接关系其绝缘性能,对于架空输电线路的安全稳定运行具有重要意义。

根据广东电网对运行复合绝缘子的抽检结果和各项性能测试结果,护套与芯棒粘接强度测试结果的整体不合格比例最高,为41.9%,原因在于我国南方地区常年处于高温高湿的气候环境,带有界面缺陷的复合绝缘子长期运行后更易发生界面粘接失效和异常发热故障,最终引发酥朽断裂、界面击穿等严重事故^[14-16]。为了解决上述问题,近年来大量学者研究了湿热环境对复合绝缘子性能和运行状态的影响。曾磊磊等^[17]开展了复合绝缘子芯棒材料的湿热老化试验,发现湿热老化与酥朽断裂芯棒的老化情况相似,说明湿热环境加速了FRP芯棒材料的老化进程。M VOLK等^[18]根据IEC 62217-2012与IEC TR 62039-2021对各种热塑性复合材料进行了试验,提出纤维和树脂间附着力降低和湿热老化效应是影响材料电击穿性能的主要因素。刘宇等^[19]根据试验测试所得材料参数,通过电热耦合仿真,发现介质损耗是湿热老化复合绝缘子高压端温升显著的主要原因。

上述研究仅着眼于单一材料的老化特性,对于芯棒-护套界面缺乏深入探究。尽管FRP芯棒被硅橡胶伞套包覆,但完整伞套本身仍具有一定的透湿性,如果芯棒与护套之间存在缺陷,水分会很快通过绝缘子护套并残留在交界面,加速绝缘子的老化进程^[20]。良好的芯棒-护套界面作为复合绝缘子安全稳定运行的前提,近年来引起了一些学者的关注。李晓等^[21]采用水煮试验和浸泡试验研究水分侵入绝缘子压接界面的路径,结果表明端部密封胶和金具的界面是水分的主要渗透路径。孟祥龙等^[22]开展了水扩散试验,比较了脂环族环氧树脂材料和硅橡胶材料在吸水、脱水、透水等透湿特性方面的不同,结果表明脂环族环氧树脂绝缘子良好的界面性能有助于减少酥朽断裂事故。文献[21-22]系统描述了外界水分侵入芯棒-护套界面的诱因以及可能导致的老龄化结果,然而复合绝缘子界面缺陷引起的老化故障往往是一个动态过程,从微小缺陷到界面失效这一过程的演变机理尚不明晰。此外,在界面缺陷发展过程中,界面处绝缘材料的老化机制也尚待进一步研究。

针对目前湿热环境下含芯棒-护套界面缺陷复合绝缘子的界面老化机制尚未明确的问题,本研究设计并制备含界面缺陷的复合绝缘子短样,对其进行湿热老化处理,研究湿热环境对含界面缺陷复合

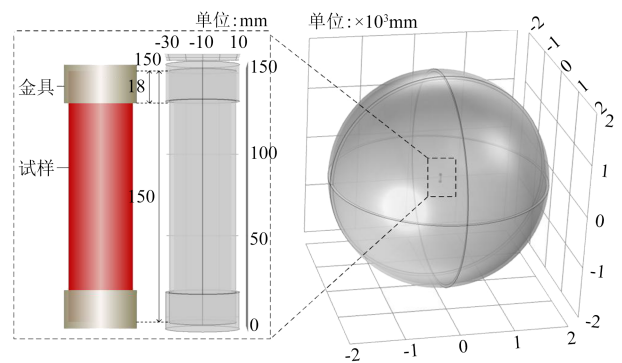
绝缘子性能的影响,以期为核心棒断裂、异常发热事故预防提供参考。

1 试验

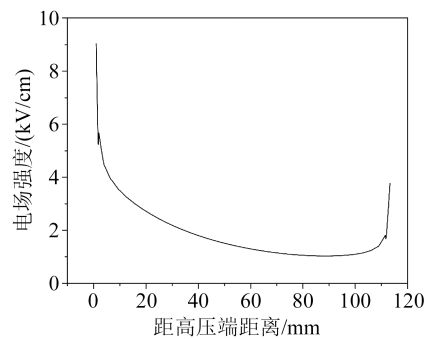
1.1 试样制备

首先设计并制备含不同界面缺陷的复合绝缘子芯棒带护套短样,芯棒直径为34 mm,芯棒长度为150 mm,护套厚度为3 mm。本研究设计的缺陷类型包括界面气隙、粘接不良、潮气及金属缺陷。

为了说明模拟试验的等效性,本研究在Comsol Multiphysics 6.0系统中建立了绝缘子短样的有限元仿真模型,如图1(a)所示。其中硅橡胶的介电常数设定为4.2,芯棒材料的介电常数设定为6.6^[23]。通过建立人工边界,使边界到绝缘子的距离远大于绝缘子本身长度,以有界域模拟电场的无界域。仿真得到的绝缘子短样沿面电场分布曲线为“U形”,如图1(b)所示,与实际绝缘子电场分布相似。



(a) 绝缘子短样的有限元仿真模型



(b) 电场分布仿真结果

图1 绝缘子短样的有限元仿真模型与结果

Fig.1 Finite element simulation model and results of insulator short samples

为了符合绝缘子故障常发生在高压端的客观实际且凸显界面缺陷对电场的畸变作用,本研究将界面缺陷设计在场强最大处即最靠近高压电极处,而本研究所用金具内深1.8 cm,因此界面缺陷被设计在距离高压端护套2 cm处,以避免通电时缺陷被

包覆在金具中而受金属屏蔽影响。

在端部制作界面气隙与金属缺陷,缺陷直径为1 mm,长度为2 mm,位置为距高压端护套2 cm处,制作方法为:在芯棒与硅橡胶交界面处预先埋置铁丝,浇注后削去护套并拔出铁丝,最后再次用室温硅橡胶进行模压;对于金属缺陷试样,铁丝则直接留在芯棒中。潮气缺陷试样则通过对气隙缺陷试样进行水煮获得。粘接不良缺陷试样制作方法为:制备短样时芯棒-护套界面处不涂胶,不涂胶区域长度为50 cm。4种缺陷位置如图2所示。除上述含缺陷试样外,以一支无缺陷样品作为对照组。

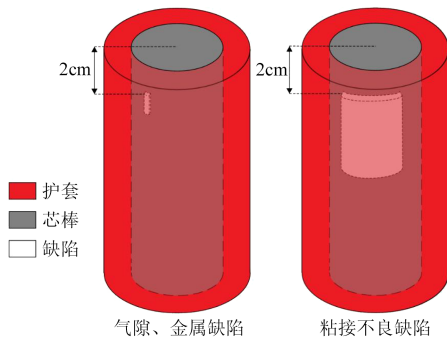


图2 复合绝缘子缺陷位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the location of defects in composite insulators

为了探究湿热环境对复合绝缘子界面性能的影响,采用电热恒温水浴箱(HH-2J型,常州恩培仪器制造有限公司)对部分试样开展湿热老化试验:将绝缘子短样浸没在80℃的水中,水煮期间将绝缘子两端通过包胶封住,以防止芯棒直接吸水而影响试验结果,老化结束后取出试样。部分试样于电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9030A型,上海精宏实验设备有限公司)中在60℃下干燥1天,以获得干燥状态的试样进行后续试验。含缺陷复合绝缘子的试样编号和水煮天数如表1所示。

表1 试样编号

Tab.1 Sample number

试样编号	缺陷类型	水煮时间/天
1-1	无缺陷	0
1-2	无缺陷	10
2-1	气隙	0
2-2	金属	10
2-3	潮气	10
3-1	粘接不良	10

1.2 测试方法

采用红外热像仪(SAT-G96P型,广州飒特红外股份有限公司)进行红外成像测试;采用紫外成像

仪(DayCor® Scalar型,以色列OFIL公司)检测复合绝缘子局部放电过程中产生的不可见紫外线光子,并将其转换为可见斑点;采用Merlin高分辨场发射扫描电子显微镜(德国Zeiss公司)对试样进行观测,观察倍数包括100倍、500倍、1000倍,以获取更为详细的试样表面信息;采用傅里叶变换红外光谱仪(VERTEX 70型,德国Bruker公司)对试样特征官能团进行分析,研究芯棒材料在老化过程中的化学反应,波数范围为4000~400 cm⁻¹;采用热重分析仪(TG 209 F1 Libra型,德国Netzsch公司)研究芯棒试样的热分解机理,反应气氛为空气,升温速率为10℃/min,升温区间为30~800℃;采用X射线光电子能谱仪(Thermo Scientific K-alpha型,美国Thermo公司)分析不同试样的C1s和N1s精细谱,以探究试样主要元素与官能团变化,辐射源为AlK α 。

2 结果与讨论

2.1 紫外放电特征

湿热老化试验结束后,对所有未老化试样及老化试样施加交流电压,以0.5 kV/s的速率升高电压,直至电压升高到20 kV开始出现较大放电声,保持5 min,采用紫外成像仪进行检测。各试样此时均处于吸潮状态,紫外成像检测结果如图3所示。

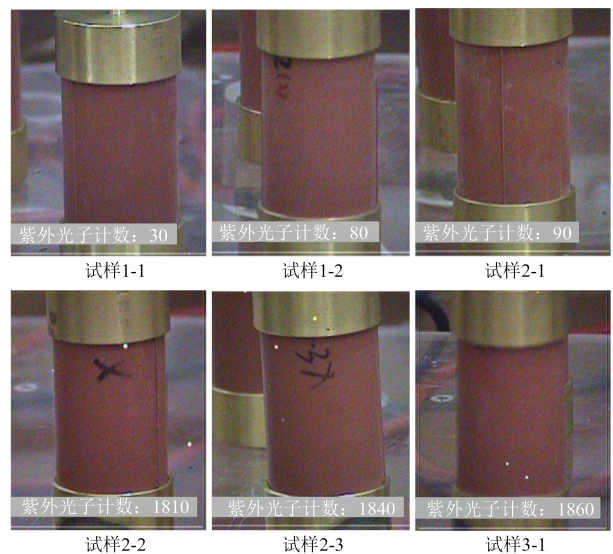


图3 吸潮状态下绝缘子短样的紫外放电特征

Fig.3 UV discharge characteristics of insulator short samples under moisture absorption condition

从图3可以看出,无缺陷试样1-1、1-2及含气隙缺陷试样2-1无明显放电,而其他试样能观察到明显的放电现象,紫外光子计数约为2000,属于中等强度放电^[24]。

将所有试样在60℃下干燥1天后施加20 kV交流电压,再次观察放电状态,干燥后的试样紫外成

像检测结果如图4所示。

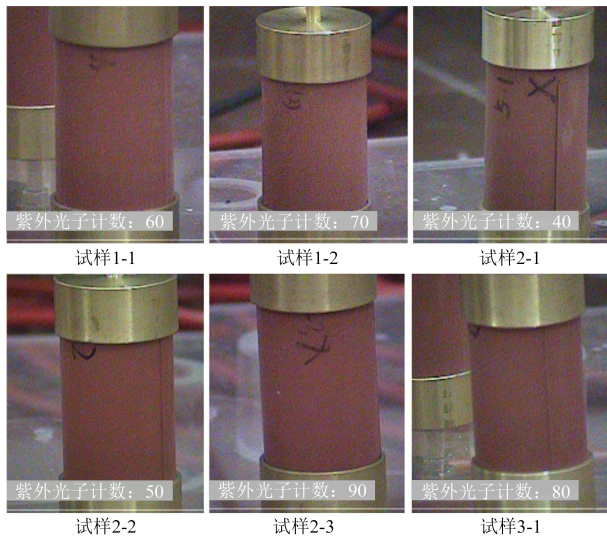


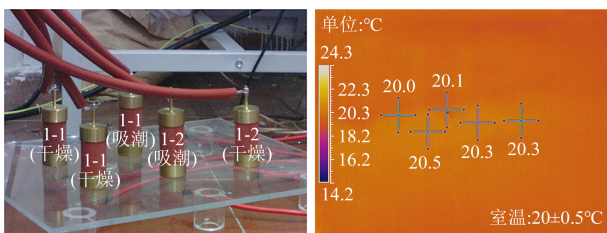
图4 干燥状态下绝缘子短样的紫外放电特征

Fig.4 UV discharge characteristics of insulator short samples under dry absorption condition

从图4可以看出,各试样在干燥状态下施加20 kV交流电压时,几乎均无放电现象。

2.2 红外温升特征

首先对无缺陷试样1-1(2支干燥试样,1支吸潮试样)和水煮10天的无缺陷试样1-2(1支干燥试样,1支吸潮试样)施加有效值为20 kV的交流电压,记录加压4 h时的典型红外热像图,以探究吸潮、湿热老化对无缺陷试样的影响,结果如图5所示。从图5可以看出,无缺陷绝缘子短样在湿热老化、干燥前后均无明显温升。

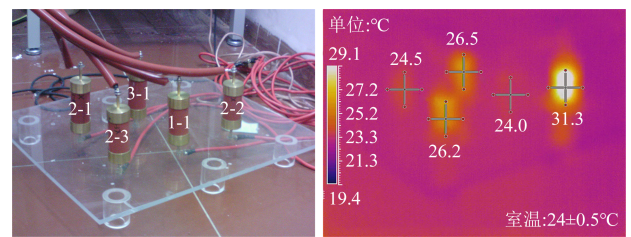


(a)可见光图像 (b)加压4 h时红外图像
图5 无缺陷绝缘子短样的红外温升特征

Fig.5 Infrared temperature rise characteristics of insulator short samples without defect

对所有含缺陷复合绝缘子短样施加有效值为20 kV的交流电压,并以一支无缺陷试样1-1作为对照,得到含缺陷复合绝缘子短样加压4 h时的典型红外热像图如图6所示。从图6可以看出,除去试样1-1、2-1没有发热外,其余试样均有明显温升。各试样的温升值如表2所示,可以看出水煮过的试样中含金属缺陷绝缘子短样2-2发热最严重,加压4 h

时温升高达7.3℃。



(a)可见光图像 (b)加压4 h时红外图像

图6 吸潮状态下带缺陷绝缘子短样的红外温升特征

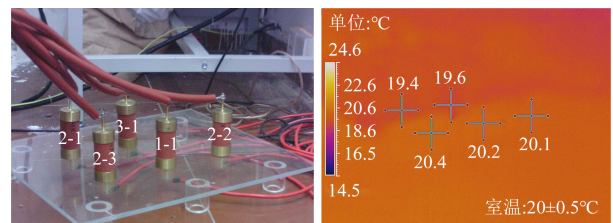
Fig.6 Infrared temperature rise characteristics of defective insulator short samples under moisture absorption

表2 吸潮状态下带缺陷绝缘子短样的温升值

Tab.2 Temperature rise of defective insulator short sample under moisture absorption

试样编号	温升/℃
1-1	0
2-1	0.5
2-2	7.3
2-3	2.2
3-1	2.5

对所有含缺陷复合绝缘子试样进行干燥处理后,施加有效值为20 kV的交流电压,并以一支无缺陷试样1-1作为对照,得到含缺陷复合绝缘子试样加压4 h时的典型红外热像图如图7所示。从图7可以看出,5支试验绝缘子均无明显温升,与图4的紫外检测结果一致。



(a)可见光图像 (b)加压4 h时红外图像

图7 干燥状态下带缺陷绝缘子短样的红外温升特征

Fig.7 Infrared temperature rise characteristics of defective insulator short samples in dry condition

对比紫外成像与红外成像的检测结果可以发现,相同电压和干燥状态条件下不同类型缺陷绝缘子的放电情况无显著差异,但缺陷类型会影响绝缘子的温升情况,其中金属缺陷引发的异常温升值最高。因此紫外放电特征无法用于复合绝缘子界面缺陷类型的判断,但红外成像温升特征可对界面缺陷种类进行识别。

2.3 试样外观与解剖

对湿热老化试样进行解剖,发现水煮后的含缺

陷试样(2-2、2-3、3-1)护套均发生脱粘,护套与芯棒粘接性完全丧失,硅橡胶护套可完全从芯棒上脱离,如图8(b)所示。对于界面失效试样,各从高压端切取1 cm薄片,如图8(c)所示,以进一步开展微观检测与化学成分分析。而湿热老化后的无缺陷试样1-2,其护套与芯棒则粘接性良好,解剖后芯棒表面仍粘附硅橡胶,如图8(a)所示,说明界面缺陷会加速复合绝缘子的老化进程,湿热环境下含界面缺陷的复合绝缘子芯棒-护套界面粘接性更容易遭到破坏。



(c)界面失效试样芯棒试样

图8 解剖后的试样外观

Fig.8 Appearance of samples after peeling

结合解剖观察结果与红外、紫外试验结果可知,老化后的含缺陷绝缘子短样(含气隙缺陷试样2-1除外)在吸潮状态下放电剧烈且出现异常发热现象,干燥后紫外放电光子数大幅减少且无异常温升。结合本课题组之前的研究表明,整支绝缘子水煮老化后,在施加直流电压时几乎无温升,而施加交流电压时温升显著,因此排除了电导损耗对水煮后复合绝缘子通电温升的影响^[23]。此外,王黎明等^[25]、屠幼萍等^[26]、袁之康等^[27-28]的研究也表明,交流电压是吸湿条件下绝缘子温度升高的必要条件,电导损耗不会导致温升。因此,湿热老化后绝缘子异常温升的原因在于:一方面,含缺陷绝缘子经湿热老化后发生界面失效,残留在失效界面的水分引发电场畸变,使局部放电更易发生;另一方面,水分子为极性物质,其介电常数与介质损耗较大,会在高场下引发较高的极化损耗,这是绝缘子异常发热的

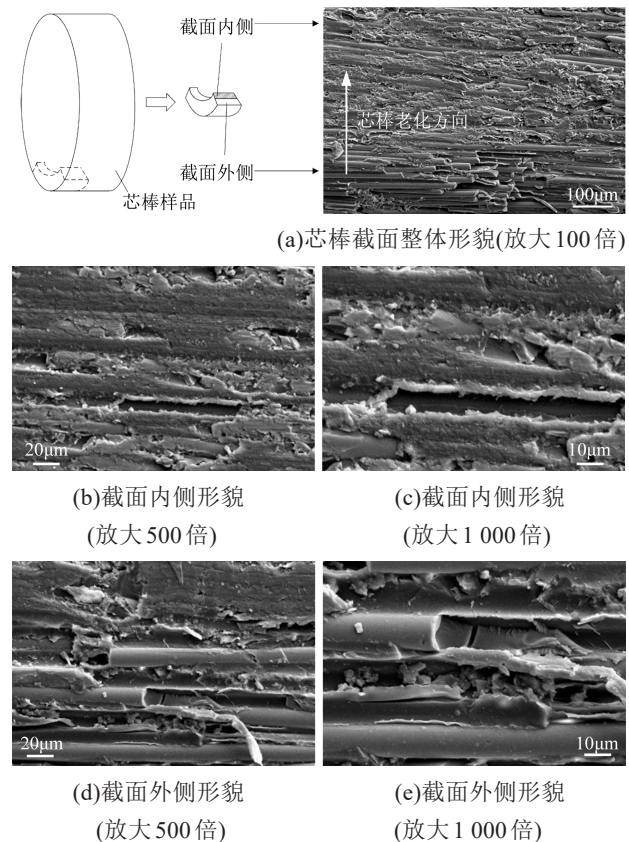
主要原因。相比于气隙与潮气缺陷,金属缺陷引发的芯棒-护套界面电场畸变最严重,而缺陷部位水分极化损耗能量与电场强度成正相关,因此相同电压条件下含金属缺陷试样2-2的异常温升值最高。10天的湿热老化没有破坏无缺陷绝缘子的芯棒-护套界面粘接性,水分不易残余在界面,因此无缺陷绝缘子在干燥、老化前后均无明显放电和温升。

上述结果表明,湿热环境会破坏含界面缺陷复合绝缘子的芯棒-护套界面,界面吸潮是绝缘子异常发热的重要原因。界面缺陷在湿热条件下会扩大,最终导致护套与芯棒界面粘接性完全丧失,水分充满芯棒-护套失效界面,在通电条件下引起严重的电场畸变,使局部放电更易发生,而界面处局部放电与水分杂质的极化损耗会引发异常发热故障。

2.4 扫描电镜分析

为了研究界面处芯棒由外至内的微观形貌变化,取发生界面失效且发热最严重的试样2-2,从芯棒-护套界面处3 mm直径范围内的玻纤环氧芯棒取样,利用场发射扫描电子显微镜分别观察芯棒试样界面、截面(内侧和外侧)及内部形貌。

试样2-2的芯棒截面SEM形貌如图9所示。从图9可以看出,芯棒-护套界面处的环氧玻纤发生了



(a)芯棒截面整体形貌(放大100倍)

(b)截面内侧形貌
(放大500倍)

(c)截面内侧形貌
(放大1000倍)

(d)截面外侧形貌
(放大500倍)

(e)截面外侧形貌
(放大1000倍)

图9 芯棒截面的SEM形貌

Fig.9 SEM morphology of the cross-sectional shape of the core rod

由外向内的劣化,截面外侧(即接触护套的界面侧)约0.15 mm范围芯棒材料中的环氧树脂发生分解,玻璃纤维从基体中剥离,而截面内侧的环氧树脂基体包裹着玻璃纤维,二者之间的微观界面粘接良好。纤维-树脂基体微观界面的粘接性能会直接影响FRP复合材料的整体使用性能。在湿热老化过程中,水分可以通过树脂基体中的宏观断裂处、材料加工过程中产生的气泡和空洞、水溶性杂质产生的渗透压等方式渗入芯棒材料内部,导致芯棒材料中环氧树脂由界面向内部发生裂解^[29]。此外,水分渗入纤维-基体微观界面层还会引发溶胀效应,加之纤维和基体的热膨胀系数不同,产生应力集中,导致微观界面在过大的膨胀应力和热应力下产生

破坏,形成很多微观缺陷^[30]。

图10为芯棒界面与内部的SEM形貌。从图10(a)~(c)可以看出,恶劣环境下芯棒与护套的界面处容易发生劣化,导致芯棒环氧基体大量破损,玻璃纤维排列松散,甚至出现玻璃纤维与环氧树脂基体界面分离现象。从图10(d)~(f)可以看出,芯棒内部玻璃纤维与环氧树脂基体界面仍然保持良好。上述结果表明,湿热作用更容易影响芯棒-护套界面处的芯棒材料,环氧基体由界面向内部发生严重劣化,玻璃纤维大量裸露,纤维-树脂基体微观界面被破坏,从而损坏了FRP复合材料的力学性能及电性能。

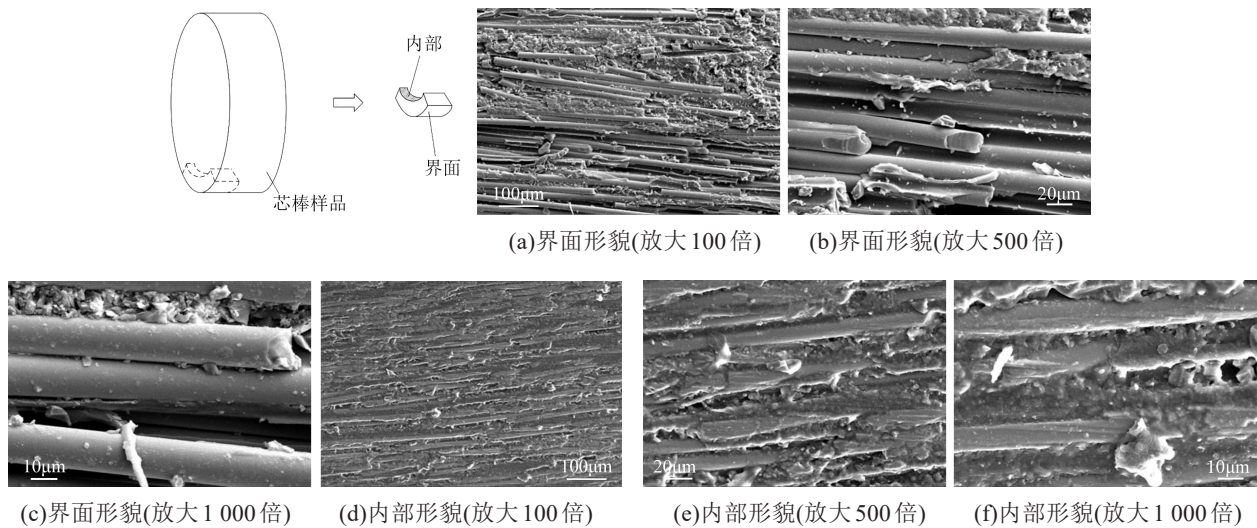


图10 芯棒界面与内部的SEM形貌

Fig.10 SEM morphology of interface and interior of the core rod

2.5 红外光谱分析

复合绝缘子芯棒的主要成分为玻璃纤维、双酚A型环氧树脂及少量固化剂和偶联剂,其中双酚A型环氧树脂的分子式如图11所示,芯棒的主要特征官能团及其对应的吸收峰位置如表3所示^[31-32]。

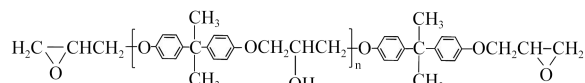


图11 双酚A型环氧树脂的分子式

Fig.11 Molecular formula of bisphenol A glycidyl ether epoxy resin

取界面脱粘试样(2-2、2-3、3-1)的芯棒材料进行红外光谱测试,结果如图12(a)所示。在3700~3200 cm⁻¹的波数范围内出现了羟基吸收峰,主要来源于芯棒吸湿和环氧树脂氧化。位于2970~2920、1736、1457、1182、1040 cm⁻¹处的吸收峰来

表3 芯棒的典型基团红外特征峰及其位置

Tab.3 Characteristic FTIR absorption bands of core rod

特征基团	波数/cm ⁻¹
O-H	3700~3200
CH ₃ 中的C-H	2970~2920
酯基中的C=O	1736
芳香族(苯环)结构	1608
芳香族(苯环)结构	1510
脂肪族的C-H	1457
脂肪族的C-C	1182
脂肪族的C-O-C	1040
芳香族(苯环)结构	831
Si-O	480

自于芯棒中的环氧树脂基体官能团,分别代表甲基、酯基、脂肪族的C-H、C-C和C-O-C等基团,其中酯基来自于芯棒中的酸酐固化剂和硅烷偶联剂。480 cm⁻¹处的吸收峰代表Si-O键,来自芯棒中的玻

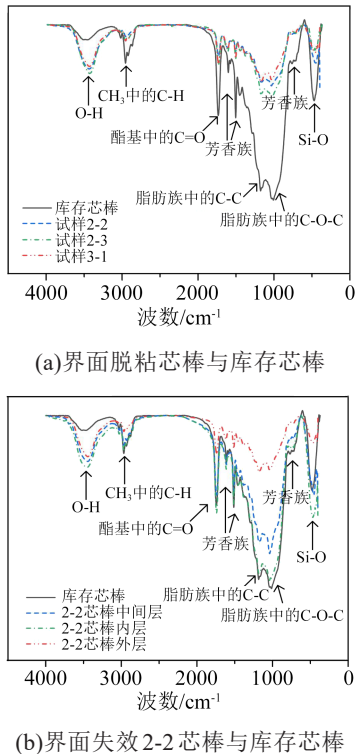


图12 FTIR测试结果

Fig.12 FTIR test results

玻璃纤维官能团。经过老化处理后,试样中代表环氧树脂基体和玻璃纤维的基团吸收峰普遍下降,这表明老化过程中环氧树脂发生氧化分解,主链和侧链断裂,玻纤发生水解和离子交换反应,固化剂和偶联剂发生水解。

对发生界面失效且发热最严重的试样2-2芯棒试样和库存芯棒试样进行红外光谱测试,最外面为芯棒外层(接触护套),内部1 mm处为中间层,1 mm以内为芯棒内层,红外光谱测试结果如图12(b)所示。从图12(b)可以看出, Si-O和甲基、酯基、脂肪族中的C-H、C-C-和C-O-C等吸收峰的强度由外层向内层呈增强的趋势,且芯棒内层的上述基团特征峰强度接近于库存芯棒,说明芯棒发生了由外至内的老化,环氧树脂基体由芯棒-护套界面向内部发生分解,这与SEM结果一致。

2.6 热重分析

图13为库存芯棒与试样2-2芯棒材料的热重分析曲线,该曲线能够表征芯棒材料中环氧树脂的变化情况。从图13可以看出,环氧树脂的气化温度为350~500℃,各试样的质量在该温度区间内迅速下降,主要是由于环氧树脂基体发生热解。玻璃纤维熔点为1300℃左右,在测量温度范围内(30~800℃)不会发生热解,因此残留率能够反映各试样中玻纤的含量。由残留率可得各试样中的环氧树

脂含量:库存芯棒中环氧树脂的含量为22.17%,老化芯棒中外层环氧树脂的含量下降最少,为19.35%,中间层和内层环氧树脂的含量分别为19.79%和21.30%。分解的环氧树脂含量由芯棒外层向内层逐渐增加,说明环氧树脂由外向内发生降解,这与SEM及FTIR测试结果一致。

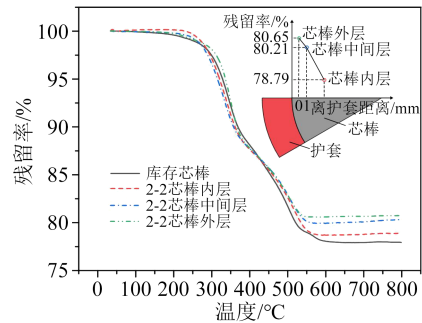


图13 库存芯棒与试样2-2芯棒材料的热重分析结果

Fig.13 Thermogravimetric analysis results of core rods in sample 2-2

2.7 XPS分析

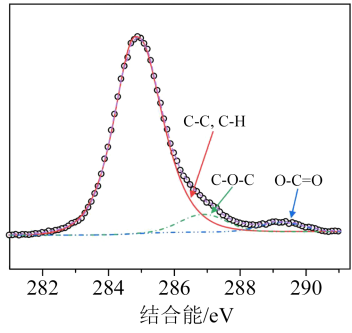
XPS利用X射线的电子能量谱来研究物质表面结构,相比于FTIR具有更高的灵敏度。对分别来自库存芯棒和脱粘试样2-2的4个样品进行XPS检测,得到主要元素的相对含量占比如表4所示。从表4可以看出,脱粘试样芯棒的C元素含量减小,说明环氧树脂发生了氧化分解,且该过程由芯棒外层向内层发展;环氧树脂分解导致玻璃纤维大量裸露,因此老化试样的Si含量大幅增加;脱粘试样芯棒中还出现了库存芯棒中未检测到的N元素,原因在于芯棒表面在放电过程中生成了氨基化合物。

表4 不同试样中主要元素的相对含量占比

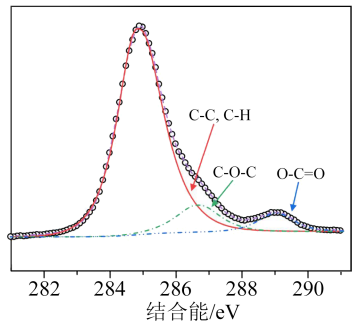
Tab.4 Relative percentages of major elements in different samples

试样	C/%	N/%	O/%	Si/%
库存芯棒	66.27	—	26.63	7.10
试样2-2芯棒内层	60.94	0.73	24.63	13.70
试样2-2芯棒中间层	53.97	1.20	30.26	14.57
试样2-2芯棒外层	50.81	1.19	30.18	17.83

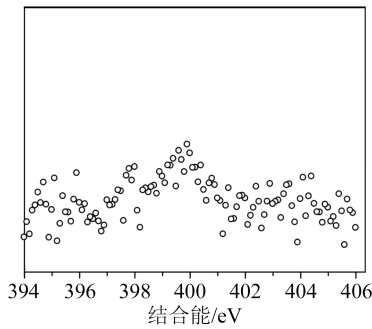
为了进一步探究芯棒外层发生的降解过程,绘制了库存芯棒和老化芯棒外层试样的C1s和N1s精细谱,并利用高斯-洛伦兹函数对其进行分峰拟合,结果如图14所示。从图14(a)~(b)可以看出,C1s的光电子能谱经高斯分峰拟合可分为3个分量,分别为C-C/C-H(284.8 eV)、C-O-C(286.0 eV)、O-C=O(288.5 eV),各试样的峰面积占比列于表5。从表5可以看出,与库存芯棒相比,老化芯棒外层中C-C/



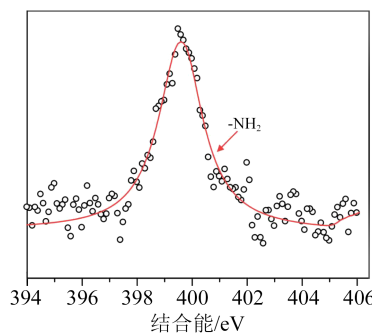
(a) 库存芯棒的C1s精细谱



(b) 界面失效2-2 芯棒外层的C1s精细谱



(c) 库存芯棒的N1s精细谱



(d) 界面失效2-2 芯棒外层的C1s精细谱

图14 试样2-2 芯棒材料的XPS分析结果

Fig.14 XPS analysis results of core rods in sample 2-2

C-H 含量降低,C-O-C 和 O-C=O 含量增加,说明界面处环氧树脂发生了严重氧化分解。

从图 14(c)~(d)可以看出,相比于库存芯棒的 N1s 精细谱,在界面失效试样 2-2 芯棒外层的 N1s 精细谱中出现了位于 399.8 eV 的-NH₂特征峰,这说明

表5 C1s峰拟合曲线中各组分的相对含量

Tab.5 Relative content of each component in the C1s peak fitting curve

官能团	结合能/eV	相对含量/%	
		库存芯棒	芯棒外层
C-C/C-H	284.8	89.25	83.68
C-O-C	286.0	7.18	10.42
O-C=O	288.5	3.57	5.90

芯棒表面有氨基化合物的形成。根据文献[7],氨基化合物可能是因为芯棒表面放电导致环氧树脂基体与 O₂、N₂ 发生反应,反应方程式如图 15 所示。

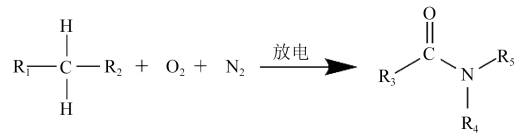


图15 反应方程式

Fig.15 Chemical equation

3 含界面缺陷复合绝缘子劣化过程讨论

本文的试验结果证明界面缺陷能够加速复合绝缘子老化,在湿热环境下会扩展为界面失效,同时芯棒由界面向内部发生劣化,其界面老化机制总结如图 16 所示。复合绝缘子在运行过程中受到电、湿、热、机械等多种应力作用,水分能够透过硅橡胶以液体或者蒸汽的形式进入复合绝缘子内部尤其是界面缺陷处。湿热环境中,硅橡胶层强度下降,且界面缺陷处气隙、金属或潮气的压强增大,芯棒-护套界面处机械应力增大,导致试样出现局部应力畸变,使界面缺陷在多种应力作用下逐步扩大^[32]。随着复合绝缘子界面缺陷逐步深入、扩展,芯棒由外向内发生劣化,表面在放电作用下产生氨基化合物,环氧树脂基体发生氧化分解,玻璃纤维大量裸露,环氧树脂与玻璃纤维间的微观界面在过大的膨胀应力和热应力下发生破坏,导致 FRP 复合材料的力学性能及电性能遭到损坏。

在劣化、湿热环境、电场及机械应力等多种因素协同作用下,复合绝缘子护套与芯棒脱粘,界面完全失效,水分充满整个交界面。芯棒-护套失效界面处残余的水分会引发电场畸变,使局部放电更易发生,并产生极高的极化损耗,为绝缘子异常发热埋下隐患。若有金属缺陷的存在,由于严重的电场畸变,失效界面处残余水分产生的极化损耗会更高,威胁绝缘子安全运行。

综上,复合绝缘子在实际运行过程中受到机械、电、环境、热等多种应力联合作用会诱发界面缺

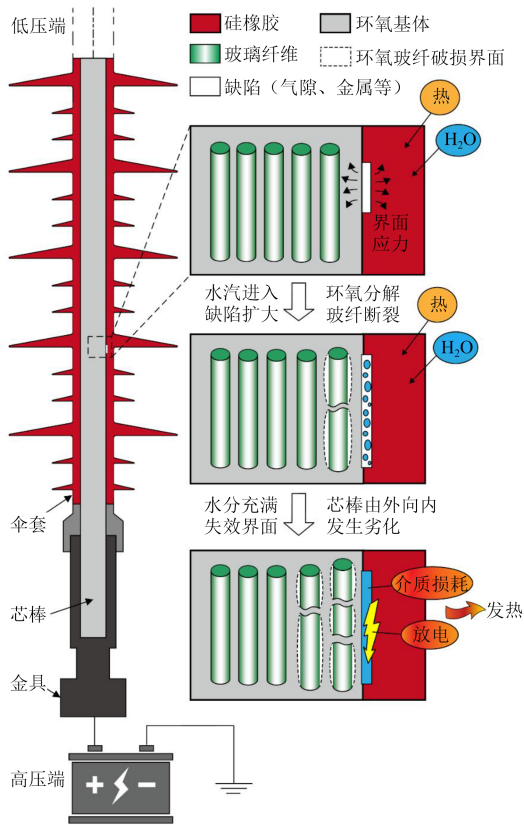


图16 湿热环境下含芯棒-护套界面缺陷复合绝缘子的界面老化机制

Fig.16 Interface ageing mechanism of composite insulators with core-sheath interface defects under hydrothermal environment

陷深入和扩大,加速绝缘子的老化过程,导致护套损坏、芯棒腐朽,内绝缘遭受破坏,从而引发断串、界面击穿等恶性事故。

4 结论

(1)湿热环境下含芯棒-护套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。

(2)界面缺陷在湿热条件下发生了扩大,最终导致护套与芯棒界面粘接性完全丧失,界面处局部放电与水分杂质的极化损耗会引发异常发热故障。

(3)相同电压条件和干燥状态下含不同类型缺陷绝缘子的放电情况无显著差异,但缺陷类型会影响绝缘子的温升情况,其中金属缺陷引发的异常温升值最高。

(4)在湿热作用下,随着界面缺陷逐渐扩大,芯棒发生由外向内的劣化。界面处的芯棒材料更容易受到外界恶劣环境的影响,环氧基体由界面向内部发生劣化,玻璃纤维大量裸露,纤维-树脂基体微观界面被破坏,从而损坏FRP复合材料的力学性能

及电性能。

参考文献:

- [1] 梁曦东,高岩峰,王家福,等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. 高电压技术,2016,42(9):2888-2896.
- [2] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术,2006,30(12):1-7.
- [3] GAO Y F, LIANG X D, LU Y, et al. Comparative investigation on fracture of suspension high voltage composite insulators: A review-Part I: Fracture morphology characteristics[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2021,37(3):7-17.
- [4] 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.
- [5] 王黎明,聂章翔,赵晨龙,等. 水分在环氧树脂复合绝缘子护套中的渗透特性[J]. 高电压技术,2019,45(1):173-180.
- [6] 汪政,黄振,彭向阳,等. 复合绝缘子护套-芯棒界面异常老化特征及原因分析[J]. 绝缘材料,2022,55(3):112-118.
- [7] 梁曦东,高岩峰. 复合绝缘子酥朽断裂研究(一):酥朽断裂的主要特征、定义及判据[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4778-4786.
- [8] 沈浩,刘辉,马新明,等. 等腰三角形界面缺陷对复合绝缘子电场分布的影响[J]. 绝缘材料,2022,55(8):90-96.
- [9] 李超红. 复合绝缘子芯棒断裂研究现状[J]. 绝缘材料,2018,51(6):7-11.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 赵毅飞,黄金磊,张俊鹏. 交流500kV复合绝缘子断裂原因分析[J]. 绝缘材料,2014,47(6):79-82.
- [13] 卢明,伍川,盛从兵,等. 复合绝缘子酥朽断裂及内击穿故障的关联性分析[J]. 电瓷避雷器,2022(1):157-164.
- [14] 黄振,许志海,彭向阳,等. 输电线路复合绝缘子运行状态抽样检测试验[J]. 广东电力,2017,30(5):114-118.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] VOLK M, ARREGUIN S, ERMANNI P, et al. Pultruded thermoplastic composites for high voltage insulator applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(4):1280-1287.
- [19] 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.
- [20] 吕政,鲁兹,成立,等. 复合绝缘子硅橡胶护套材料吸水性与渗水性的试验研究[J]. 陕西电力,2012,40(7):14-18.
- [21] 李晓,李光茂,杨杰,等. 湿热环境下水分侵入复合绝缘子压接界面路径研究[J]. 高压电器,2022,58(6):24-30.
- [22] 孟祥龙,尚瑞琦,樊浩楠,等. 湿热环境下脂环族环氧树脂绝缘

- 子和硅橡胶复合绝缘子芯棒-护套界面老化特性研究[J]. 电网技术,2023,47(1):396-403.
- [23] 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.
- [24] 钱金菊,王锐,黄振,等. 紫外成像检测技术在高压电力设备带电检测中的应用[J]. 广东电力,2016,29(4):115-121.
- [25] 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.
- [26] TU Y P, GONG B, YUAN Z K, et al. Moisture induced local heating of overhead line composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 483-489.
- [27] YUAN Z K, TU Y P, WANG C, et al. Study on artificial multi-stress ageing characteristics of composite insulators[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2018,12(16):3862-3866.
- [28] YUAN Z K, TU Y P, ZHAO Y F, et al. Analysis on heat source of abnormal temperature rise of composite insulator housings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017, 24(6):3578-3585.

收稿日期:2023-04-25;修回日期:2023-07-07。

作者简介:谢从珍(1973-),女(汉族),陕西石泉人,教授,研究方向为输电线路绝缘材料及缺陷诊断、输变电设备在线监测及大数据。