

玻璃纤维增强环氧树脂表面电痕化显微特征影响分析

蒋文辉¹, 李 远¹, 张凤啸², 王永强²

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510555;

2. 华北电力大学 输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071028)

摘要:为探究玻璃纤维增强环氧树脂复合绝缘材料的表面放电过程及其显微特征,本文通过搭建斜板电极实验平台,采用恒定电痕化电压法对试样进行表面电痕化和蚀损试验,并结合理想液体的伯努利方程分析了电痕的形成机理。还测试了不同电痕蚀损阶段下环氧树脂材料的官能团变化情况、表面粗糙度以及三维形貌。结果表明:绝缘复合材料的潮湿污秽区域极易产生泄漏电流并发生放电,且电痕放电和最严重的蚀损情况总是首先出现在下电极处;随着试样表面电痕腐蚀程度增加,环氧树脂分子链中环氧基、羟基、氨基、醛基逐渐分解,羰基产生后又不完全分解;材料的表面形貌逐渐变得粗糙和不规则,表面粗糙度呈上升趋势,其中爆发期的粗糙度约为起始期的 2.8 倍。

关键词:环氧树脂;玻璃纤维;复合材料;耐电痕化;表面形貌

Influence analysis on microscopic characteristics of tracing on surface of glass fiber reinforced epoxy resins

JIANG Wenhui¹, LI Yuan¹, ZHANG Fengxiao², WANG Yongqiang²

(1. China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute, Guangzhou 510555, China;

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Baoding 071028, China)

Abstract: In order to investigate the surface discharge process and its microscopic characteristics of glass fiber reinforced epoxy resin composite insulating material, an experimental platform of slant plate electrode was constructed in this paper. Surface tracing and corrosion tests were conducted on samples by a constant tracing voltage method, and the formation mechanism of electric trace was analyzed by combining the Bernoulli equation of ideal liquid. The change of functional groups, surface roughness, and three-dimensional morphology of epoxy resin materials under different stages of tracing corrosion were tested. The results show that the damp and polluted area of insulation composite material is very easy to generate leakage current and discharge, and the most serious corrosion situation always occurs at the bottom electrode firstly. With the increase of tracing corrosion degree on the surface of sample, the epoxy group, hydroxyl group, amino group, aldehyde group in epoxy resin molecular chain gradually decompose, and the carbonyl group decompose not completely after its generation. The surface morphology of the material gradually becomes rough and irregular, the surface roughness shows an upward trend, and the roughness during the explosive period is about 2.8 times bigger than that during the starting period.

Key words: epoxy resin; glass fiber; composites; electric tracing resistance; surface morphology

0 引言

换流变压器阀侧套管作为换流变压器的重要组成部分,其绝缘可靠性直接影响着电力系统平稳运行^[1-3]。然而,换流变压器阀侧套管在长期运行过程中可能会发生绝缘受潮,其外层的玻璃纤维增强环氧树脂不可避免地会发生电痕化失效的绝缘劣化现象^[4]。该现象由污秽、水分等外界因素而起,发展

基金项目:南方电网重点科技项目(GZHKJXM20200003)。

过程为在电场的作用下发生表面放电,当放电持续足够长的时间后,绝缘材料将在高温、场强作用下发生碳化沉积^[5-6]。当碳化沉积区域贯通电极后,绝缘电阻会突然降低,表面介电性能丧失将不可恢复,严重损害设备安全^[4]。因此,需要对玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的电痕化失效过程进行研究,以实现电气设备运行的绝缘可靠性。

近年来,许多学者对包括环氧树脂在内的聚合

介质的电痕化失效进行了研究,文献[6]研究了聚乙烯材料发生电痕化的环境因素,使用污染液滴加的方法模拟了绝缘材料工作的污秽环境,探究了直流、交流电压下的电痕化过程。文献[7]发现填充硼酸锌会使材料表面包覆一层玻璃态结构,该结构通过抑制电痕化时碳的沉积和桥接来增强材料的耐电痕化能力。文献[8]指出电痕老化与材料表面的接触角、分子结构密切相关,并研究了紫外线下粉煤灰作为填充材料对环氧树脂材料高压绝缘的接触角、电痕化时间和平均漏电流值的影响。文献[9]通过光谱分析发现,电痕化的放电形式主要有3种,并简要分析了电痕化机理。杜伯学等^[10]认为起始放电电压和电痕失效时间随着界面压力的增大而增大。M SUCHITRA 等^[11]对环氧树脂填充了适当的纳米氧化铝、二氧化硅和微米氧化铝等填料,发现填料的加入影响着复合材料的表面能、疏水性,可以改善耐电痕化性能。何伟韩等^[12]通过向树脂体系中添加金属水合物 $Al(OH)_3$,有效改善了相应样品的相比电痕化指数,其机理在于,金属水合物在高温下的分解及生成物的优良导热性削弱了材料表面的温度场,一定程度上降低了材料表面的蚀损破坏及沉积碳的生成速度;金属水合物分解产生的水蒸气冲刷试样表面的碳化物,延缓了碳树枝的发展速度。

目前,提高绝缘材料耐电痕化性能的方法通常有两种:①抑制电痕化中材料表面碳的沉积和桥接;②降低电痕化放电对材料表面的侵蚀破坏^[13]。开展后一项研究工作的前提是对材料表面微观形貌进行定量、系统、准确地分析。然而,目前专家学者对电痕放电过程中绝缘材料表面微观形貌的定量研究较少,大部分是基于扫描电镜(SEM)对材料表面微观形貌特征进行主观判断或定性描述^[14-15]。此外,关于电痕化过程中表面微观形貌特征与电痕放电阶段的关联性研究也尚无定论,可见材料表面形貌与耐电痕化性能之间的关系有待进一步探索。

本文依据 IEC 60587:2022 的规定模拟玻璃纤维增强环氧树脂在实际运行中的表面污秽环境,搭建斜板电极实验平台,采用恒定电痕化电压法对玻璃纤维增强环氧树脂试样进行耐电痕化和蚀损试验。利用傅里叶红外光谱仪测量电痕腐蚀不同阶段试样的官能团成分,利用扫描电镜测量不同电痕腐蚀程度试样的表面形貌,并基于灰度值建立试样表面

三维形貌。希望能为研究绝缘材料的蚀损发展状况、界面结合程度,预测及评估电气设备中的环氧树脂浇注绝缘故障状态提供参考。

1 试验

1.1 试样制备及实验模型设计

电痕化试样采用的环氧树脂为双酚A型二缩水甘油醚(E-51型,上海树脂厂),通过盐酸-丙酮法测定其平均环氧值约为0.520 1。采用甲基六氢邻苯二甲酸酐(中国常州润翔化工有限公司)作为固化剂;采用2,4,6-三(二甲基氨基)苯酚(DMP-30,广州市忠高新材料科技有限公司)作为促进剂。将无碱玻璃纤维原丝(方隆集团有限公司)经短切、研磨、筛分制备微米级球状无碱玻璃纤维粉末,粒径约为32 μm ,以此作为填料。

试样制备步骤如下:①将环氧树脂、固化剂、促进剂置于烧杯中进行初次混合,三者质量比为100:80:0.5,使用磁力搅拌器均匀快速地搅拌混合液10 min,保证其充分混合;②将混合物浇注于自制的硅胶模具中并将模具置于真空干燥箱中,在25℃下进行2 h的抽真空处理;③将真空处理后的硅胶模具置于鼓风干燥箱内,在120℃下进行2 h的固化处理;④冷却至室温后将模具和试样分离,得到浇注纯环氧树脂试样。在制备含有玻璃纤维的环氧树脂样品时,先配制含有玻璃纤维的环氧树脂、固化剂和促进剂的混合液,其中玻璃纤维的质量分数为①中混合液总质量的20%,具体步骤为搅拌加入玻璃纤维的混合液30 min,转速为1 200 r/min,待其充分混合后,按上述步骤②~④进行浇注、真空干燥、固化脱模处理。

为模拟电气绝缘材料所处的严酷环境,对制备的试样进行加工处理,试样形状为矩形板,尺寸为120 mm×50 mm×6 mm,将试样钻孔以放置电极,孔直径为5 mm,位置如图1所示。然后使用切割机将固化后的试样按照标准尺寸进行切割。在钻孔、切割完成后,根据 IEC 60587:2022 中的规定对试样表面使用浸有去离子水的400目金刚砂细砂纸打磨,直至试样表面完全湿润,且干燥后表面均匀且无光泽^[16]。

用于测试试样交流电压的装置如图2(a)所示。该装置由上、下两个不锈钢电极组成,通过不锈钢螺钉固定电极与试样。将若干层滤纸置于试样和

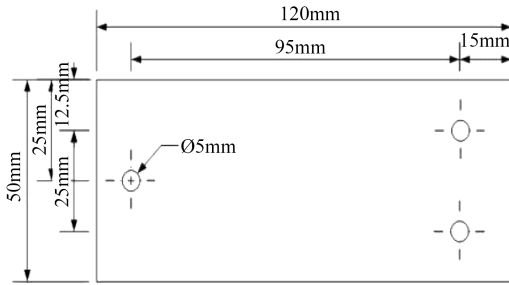


图1 带有固定电极孔的试样

Fig.1 Sample with fixed electrode hole

上电极之间以储存污染液,污染液为质量分数为0.1%的氯化铵溶液,在23℃测得的污染液电阻率为3.95 Ω/m。图2(b)和图2(c)分别为上电极和下电极的尺寸参数,除角度外的尺寸参数单位均为毫米。上电极和下电极均开有直径为2.5 mm的半圆形轴孔槽,污染液自上电极轴孔流下,经试样表面流入下电极轴孔。

1.2 试验平台搭建

电痕放电检测平台如图3所示,包括工频高压试验控制系统、局部放电检测系统和图像实时观测系统。工频高压试验控制系统的保护电阻为10 kΩ,电容式分压器电容为1 000 pF;局部放电检测系统使用HCPD-2622型局部放电巡检仪,采用脉冲电流法检测局放信号,采样频率为20 MHz;图像实时观测系统使用高清数码摄像机对试样表面进行实时拍摄。

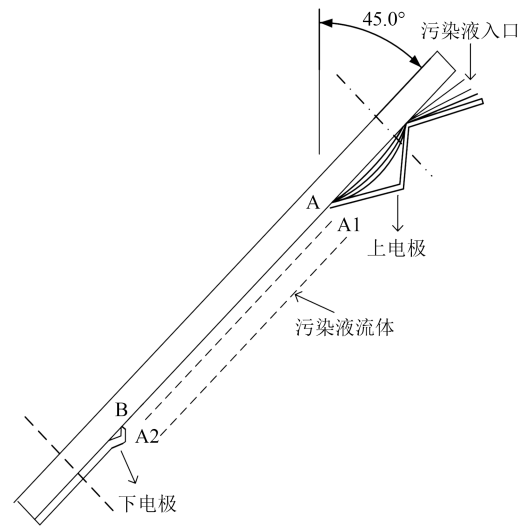
1.3 耐电痕测试方法

在试验温度23℃下,使用电子天平称量试样的原始质量,安装试样时将试样均匀无光泽的表面朝下,与水平面呈45°,上、下电极之间距离为5 cm,具体恒定电痕化电压法的试验步骤如下。

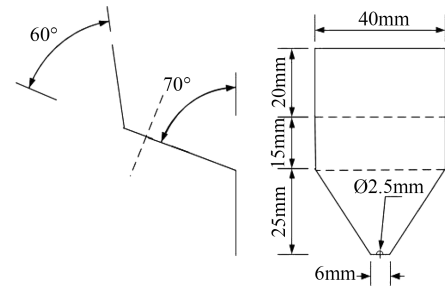
(1)调节污染液流速为0.1 mL/min,在安全范围内观察污染液流动5 min,以确保液体于上电极轴孔处流下而不是自滤纸旁边或顶部溢出;然后缓慢增加流速并校准至0.3 mL/min,在安全范围内观察污染液流动10 min,同样确保液体在上、下电极间以规定流速稳定流下,10 min后闭合试验变压器开关。

(2)电闸合上后,以1.5 V/s的升压速率将电压缓慢升高,待局放巡检仪检测到放电信号后停止升高电压并维持当前电压10 min,若此时仍有稳定放电信号,则将该电压定义为试样的起始放电电压(U)。

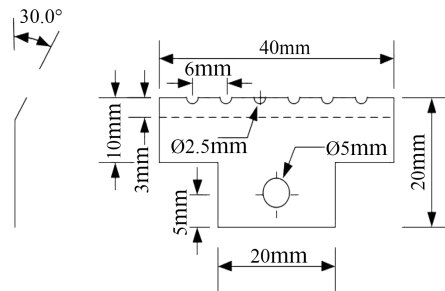
(3)记录起始放电电压后,升压至3.5 kV进行



(a) 交流电压测试装置



(b) 上电极尺寸



(c) 下电极尺寸

图2 交流电压测试装置与电极尺寸

Fig.2 AC voltage testing device and electrode shape

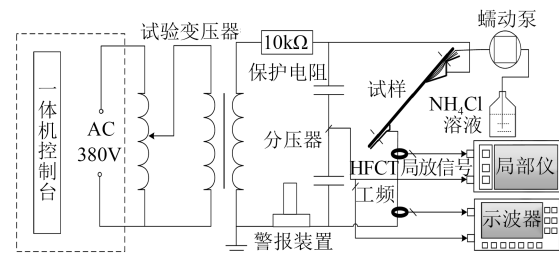


图3 电痕放电检测平台

Fig.3 Detection platform for trace discharge

耐电痕化试验,施加电压时间为6 h。每10 s采集一次放电量,若期间试样被击穿或电流大于60 mA并

且持续2 s,则停止实验并安全取下试样。

耐电痕化试验结束后,使用去离子水洗去试样表面污染液和烧蚀的环氧树脂,擦净表面水渍后将试样放置通风处干燥,24 h后再次称量试样质量。

2 结果与讨论

2.1 电痕化过程与理论分析

2.1.1 玻璃纤维增强环氧树脂的表面电痕测试

为深入研究绝缘材料表面的电痕化过程,将玻璃纤维增强环氧树脂复合材料试样分为4组,分别对其施加电压0、2、4、6 h。

依据图像实时观测系统对试验中的玻璃纤维增强环氧树脂复合材料表面的放电现象进行观测,将绝缘复合材料的电痕放电过程依据放电类型的不同分为放电起始期、放电稳定期、放电发展期和放电爆发期。绝缘复合材料的电痕破坏过程如图4所示。

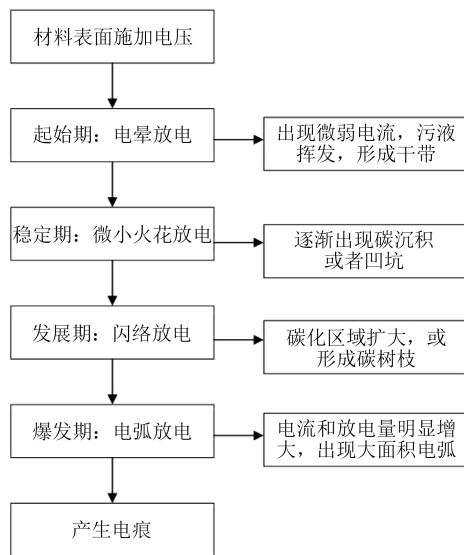


图4 玻璃纤维增强环氧树脂的电痕破坏过程图
Fig.4 Diagram of the electrical damage process for glass fiber reinforced epoxy resins

不同时期的玻璃纤维增强环氧树脂表面放电的情况如图5所示。在放电起始期,当沿倾斜的试样表面滴加污染液时,上、下电极间会出现微弱的放电电流,在电流热效应作用下挥发水分后形成了干带,观察到放电颜色为紫色的放电现象,放电类型为电晕放电。该放电远离玻璃纤维增强环氧树脂绝缘材料表面,紫色的放电从下电极附近出现,放电电流较小。

在放电稳定期,随着电晕放电的进行,试样表

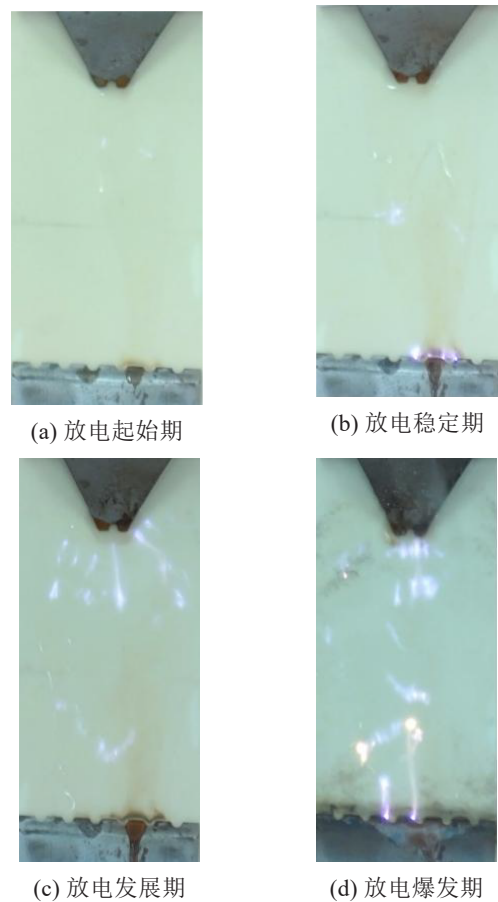


图5 不同放电阶段下绝缘复合材料的电痕化现象

Fig.5 Electrical etching phenomenon of insulating composite materials at different discharge stages

面出现了微弱的淡紫色荧光,下电极附近出现火花,并观察到有少许碳沉积的棕色痕迹从下电极向上电极延伸,同时试样表面下电极附近出现少量凹坑,放电类型为火花放电。实验表明,碳沉积、火花和凹坑总是首先在下电极出现,并随着放电的发展逐渐向上电极延伸和蚀损。

在放电发展期,随着放电的进行,试样表面的放电颜色变为淡黄色和紫色,放电强度较放电稳定期有所增大,碳化区域不断扩大,碳沉积痕迹交织堆叠形成碳树枝,且由下电极向上电极发展的速度增快,放电类型为闪络放电。

在放电爆发期,放电程度进一步增大,放电电流明显增大,两电极间出现明显的紫色和黄色光辉,碳化沉积区域向上电极扩张明显。碳化导电通路逐渐贯穿两电极。大面积的电弧放电开始出现,且远离试样表面,出现在两个电极和材料表面的碳层之间。

在整个电痕化放电过程中,随着施加电压时间

的增加,试样表面电弧长度变长,电弧颜色由紫色逐渐变为黄色。

2.1.2 基于伯努利方程的电痕化过程分析

电痕放电和最严重的蚀损情况总是首先出现在下电极处,这并非偶然现象,可由动能定理来解释,即物体动能在某运动过程中的变化量等于作用于该物体的全部力在这段运动过程中所做功的代数和,其积分表达式可表示为式(1)。

$$T_B - T_A = \sum W \quad (1)$$

式(1)中: T_A 、 T_B 表示始末位置的动能; W 表示合外力做功。

斜板电极上的氯化铵溶液从A到B做稳定流动,由于流动的氯化铵溶液没有黏性也不可压缩,可简化考虑因素,即假设氯化铵液体流动时没有摩擦阻力,则合外力做功表达式可由式(2)~(5)所示。

$$\sum W = W_p + W_{mg} \quad (2)$$

$$W_p = P_1 A_1 v_1 \cdot \Delta t_A - P_2 A_2 v_2 \cdot \Delta t_B \quad (3)$$

$$W_{mg} = -g(z_2 - z_1) \cdot dm \quad (4)$$

$\sum W = P_1 A_1 v_1 \cdot \Delta t - P_2 A_2 v_2 \cdot \Delta t - g(z_2 - z_1) \cdot dm$ (5)
式(2)~(5)中: W_p 表示压力做功; W_{mg} 表示重力做功; A_1 、 A_2 分别表示试样A点、B点的污染液截面面积; P_1 、 P_2 分别表示A点、B点所受压强沿斜板方向的分解量; v_1 、 v_2 分别表示A点、B点污染液的流速; Δt_A 、 Δt_B 分别表示污染液流过A点、B点所需时间; dm 表示污染液质量微元; g 表示重力加速度; z_1 、 z_2 分别表示A点、B点的垂直高度。

根据连续性方程可得到式(6)。

$$\rho A_1 v_1 \cdot \Delta t_A = \rho A_2 v_2 \cdot \Delta t_B = m \quad (6)$$

式(6)中, ρ 表示污染液密度。

由式(2)~(6)可得氯化铵液体在斜板电极上的压力和重力的总功表达式为式(7)。

$$\sum W = \frac{P_1}{\rho} m - \frac{P_2}{\rho} m - mg(z_2 - z_1) \quad (7)$$

由于氯化铵液体在上电极流下时具有一定的初速度,在沿试样表面流动的过程中,到达下电极附近时会获得更大的速度,与斜板上电极处的液体的流速产生动能差,该动能差表达式如式(8)所示。

$$T_A - T_B = \frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{1}{2} m v_2^2 \quad (8)$$

代入动能定理可得到式(9)~(10)。

$$\frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{1}{2} m v_2^2 = \frac{P_1}{\rho} m - \frac{P_2}{\rho} m - mg(z_2 - z_1) \quad (9)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (10)$$

在一段时间间隔内,斜板两端的氯化铵液体遵循守恒现象。其表达式如式(11)所示。

$$\frac{P}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g} = N \quad (11)$$

式(11)中, $P/\rho g$ 表示单位质量液体的比压能; z 表示单位质量液体的比势能; $v^2/2g$ 表示单位质量液体的比动能; N 为恒定值。

由式(11)可知,氯化铵液体在重力势能和压力能的共同作用下,到达下电极时已具有较大流速,较上电极处流经单位截面积的液体流量变大,导电离子增多,污秽程度更甚,在交流电压的作用下,更易产生放电。氯化铵液体在下电极附近做短程下流运动时,忽略重力势能的影响,动能的增加将导致液体压力能减小,饱和温度降低,蒸发散热过程相对变慢,火花放电、闪络放电、电弧放电和泄漏电流热效应产生的热量更容易累积。此外,热量的长期作用和放电过程中高速运动的电子撞击导致了绝缘复合材料C-H键的断裂并产生碳沉积^[7]。因此,在玻璃纤维增强环氧树脂的电痕化过程中,火花放电总是首先出现在下电极,最严重的蚀损情况也总是发生在下电极。

2.2 傅里叶红外光谱分析

使用 Nicolet iS5 型傅里叶红外光谱仪 (FTIR) 对绝缘样品进行红外检测。试验条件为:室温(20℃),相对湿度小于50%,扫描次数为32次,分辨率为4 cm⁻¹,波数范围为800~4 000 cm⁻¹,最终的扫描结果以吸光度显示。在每次样品测量前进行背景空气扫描,以消除外部干扰。本节选取了放电起始期、放电稳定期、放电发展期、放电爆发期4个阶段的红外图像进行分析以探究各个放电阶段材料官能团的变化。

图6为不同放电阶段试样的FTIR谱图。从图6可以看出,915 cm⁻¹处为环氧基特征峰,在放电的前三个阶段环氧基特征峰强度随着放电的发展逐渐降低,放电爆发期则未见特征峰,说明环氧基在放电爆发期已经基本分解完全。1 680~1 750 cm⁻¹之间为羰基伸缩振动峰,在放电前三个阶段羰基特征峰强度随着放电的发展逐渐增大,放电爆发期强度则突然降低,说明随着放电的发展,试样表面先有羰基产生,后在放电爆发期发生了不完全分解。2 800~2 900 cm⁻¹之间的双峰为费米双峰,由醛基

中C-H键的弯曲振动和伸缩振动产生,该波段的双峰强度随放电的发展逐渐减弱,说明试样中的醛基随放电的进行逐渐分解;3 200~3 700 cm⁻¹之间为羟基和氨基伸缩振动特征峰,该波段特征峰随着放电的发展强度降低,表明随着电痕放电的进行,羟基和氨基逐渐被分解。

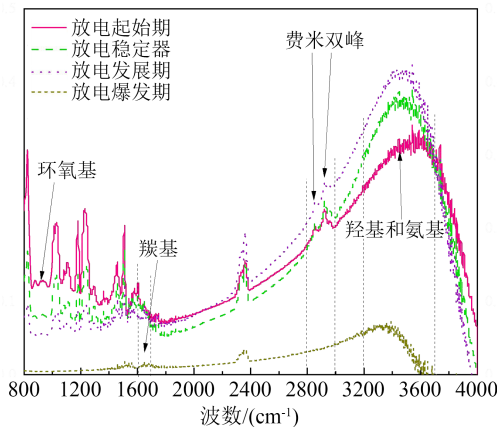


图6 不同放电阶段下绝缘复合材料的红外光谱图

Fig.6 Infrared spectra of insulating composite materials at different discharge stages

结合以上分析,由于放电及其带来的高温共同作用,玻璃纤维增强环氧树脂在放电的前三个阶段,其分子链中的羟基、氨基逐渐分解,醛基逐渐断裂,产生羰基;在放电爆发期时期,羰基等官能团分解,表面的分子链发生断裂或分解,环氧基团破坏较为严重。

2.3 微观形貌表征测试

实验针对不同电痕放电发展时期的试样,采用COXEM EM 30 Plus型扫描电镜对试样的表面形貌进行扫描观测。观察不同电痕放电发展阶段下试样的纤维表面与树脂界面结合的紧密程度。

2.3.1 电痕化表面形貌变化分析

绝缘材料受水气和污秽污染时,在同一放电电压下产生的表面泄漏电流远大于洁净材料表面产生的泄漏电流。该泄漏电流产生的热量将蒸干部分潮湿污染物中的水分,使绝缘材料的表面处于不均匀的干燥状态,形成局部干燥点或干燥带。干燥区的形成将使材料表面电阻增大,增加电场的均匀程度,进而逐渐产生火花放电及闪络放电。其中,闪络放电的温度可高达2 000℃,该高温可使材料表面碳化区域增加、绝缘电阻减小,施加电压的电极尖端形成的电场强度增大,进而放电程度愈加剧烈,逐渐发展为电弧放电,直到引起施加电压的电极间表面绝缘破坏,形成导电通道,最终导致绝

缘失效。

图7为不同电痕放电时期下试样表面SEM图像,同一放电时期选取了两幅典型的试样表面SEM图像,其中右图是由左图发展而成。从图7(a)可以看出,在放电起始期试样表面有少许不平整的浅色区域,但整体较为光滑。随着放电的进行,如图7(b)所示,放电稳定期的微小火花侵蚀和碳沉积覆盖导致材料表面不平整区域增多,开始出现裂纹,少部分的固体晶体也开始显现,试样表面不再平滑。到放电发展期时,从图7(c)可以看出碳沉积导致试样表面的粗糙和不规则程度进一步加深,开始出现气泡状孔隙,且裂纹逐渐变大,试样缺陷处出现塌陷现象,固体晶体进一步析出并增多。在放电爆发期,试样表面的晶状固体由于被剧烈的电弧放电粉碎而变为细丝状,后逐渐变为粉末状,且不均匀地

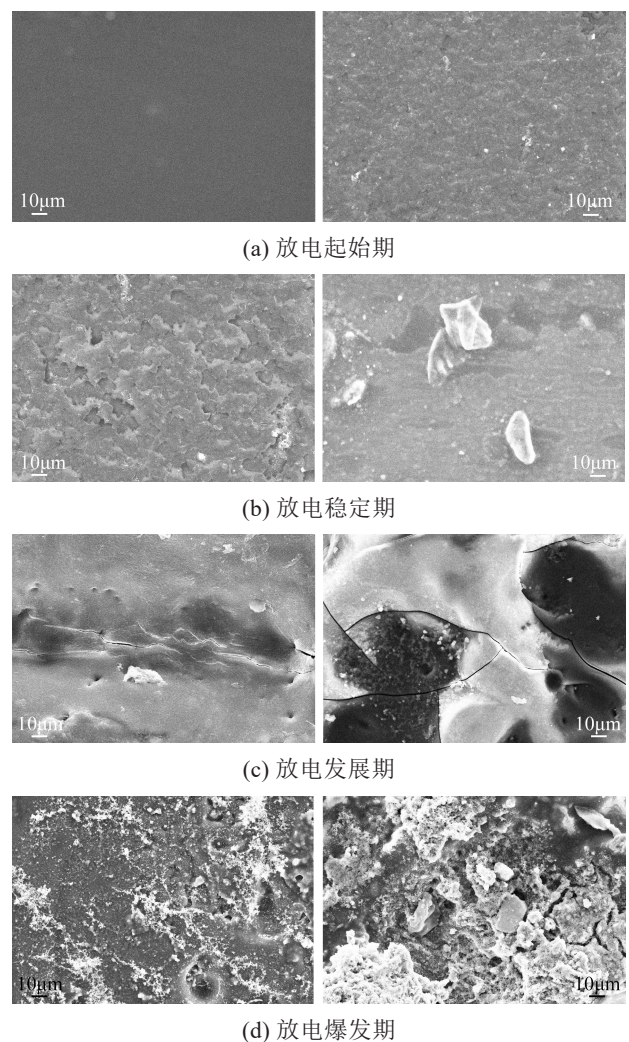


图7 不同放电阶段下绝缘复合材料表面的SEM图像
Fig.7 SEM images of the surface of insulating composite materials at different discharge stages

覆盖在试样表面,此时大量的环氧分子链断裂或分解,固体晶体脱离出现团聚现象,材料表面更加粗糙和不规则,如图7(d)所示。

2.3.2 电痕放电不同阶段下的蚀损分析

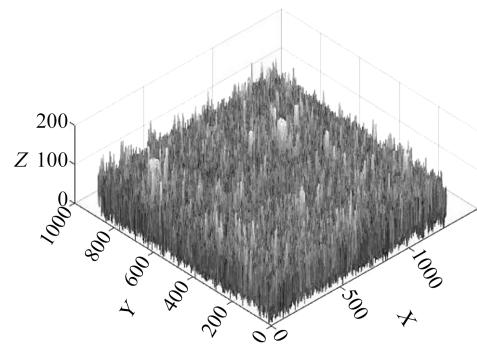
使用MATLAB软件对各个放电阶段试样表面的微观形貌进行建模,将得到的图像进行灰度处理,像素点越亮,处理后的该像素点灰度值就越高。以像素值为 X 、 Y 轴,处理后的灰度值为 Z 轴进行三维建模得到不同放电阶段下玻璃纤维增强环氧树脂表面的三维形貌图,如图8所示。

从图8可以看出,在电痕放电起始期,材料表面较为平整,图片整体呈灰暗状。在放电稳定期,开始出现凹痕、微小裂缝、固体状晶体,三维形态出现些许“凸起”,但图片整体仍以灰暗色为主,仅分布有少量高灰度的亮点,试样表面平整度和整体形貌,与放电起始期差别不大。在放电发展期,闪络放电导致材料的表面粗糙和不规则程度加深,大量的碳沉积、大裂缝、塌陷的出现致使三维形貌图“凸起处”愈凸,“凹陷处”愈凹,试样表面高低起伏,形状类似连绵不断的“山峰”,平整度较差,颜色呈现亮暗相间,表面形貌与前两个阶段已有明显差异。在放电蚀损的爆发期,剧烈的电弧放电导致析出的固体晶体粉末化,材料表面的“山峰”基本消失,粉末化的固体覆盖在材料表面使图像灰度增加,颜色几乎整体变亮,表面形貌更加粗糙和不规则。

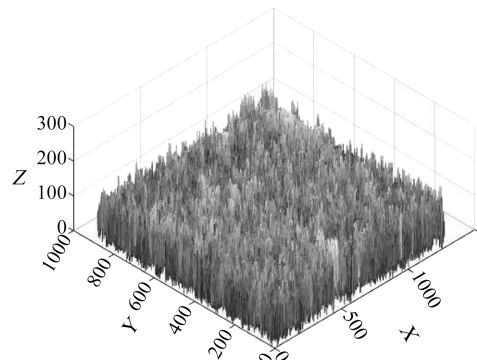
对试样表面的粗糙程度用三维算术偏差的平均值 S_a 进行表征,如式(12)所示。

$$\begin{cases} S_a = \frac{1}{AB} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |Z(x_i, y_j) - \mu| \\ \mu = \frac{1}{AB} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Z(x_i, y_j) \end{cases} \quad (12)$$

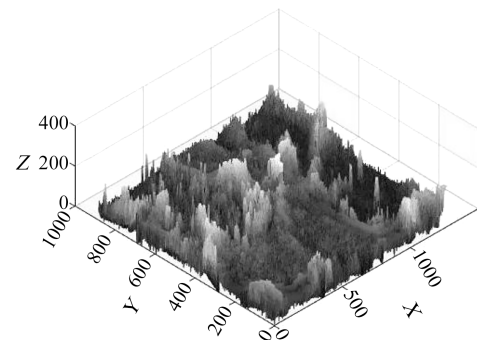
式(12)中: μ 为偏移量绝对值的算术平均值; A 和 B 分别表示图8中各图像 x 坐标的取值、 y 坐标的取值,均为256, $Z(x_i, y_j)$ 为像素点 (x_i, y_j) 的灰度值,按式(12)计算得图8各个放电阶段的三维算术平均偏差 S_a ,结果如图9所示。从图9可以看出,玻璃纤维增强环氧树脂复合材料在不同电痕放电阶段表面粗糙度的三维算术偏差的平均值 S_a 发展呈上升趋势。其中,在放电爆发期上升速度增长最快,其三维表面粗糙度(0.211)约为放电起始期(0.076)的2.8倍,上升速度(0.202)约为放电起始期(0.017)的12倍。因此,环氧树脂绝缘材料在不同电痕化放电阶段的危害程度不同,其中放电爆发期对绝缘材料的危害



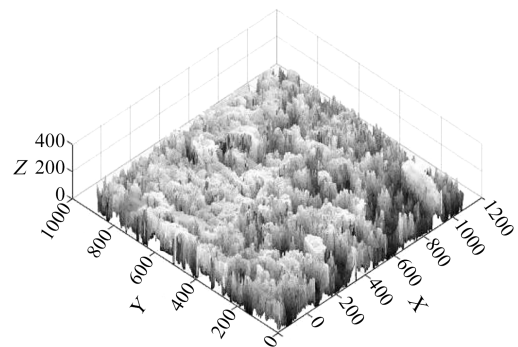
(a) 放电起始期



(b) 放电稳定期



(c) 放电发展期



(d) 放电爆发期

图8 不同放电阶段下绝缘复合材料的三维形貌图像

Fig.8 Three-dimensional morphology images of insulating composite materials in different discharge stages

程度最大,需要及时检查绝缘部位,避免电痕化放电进入放电爆发期。

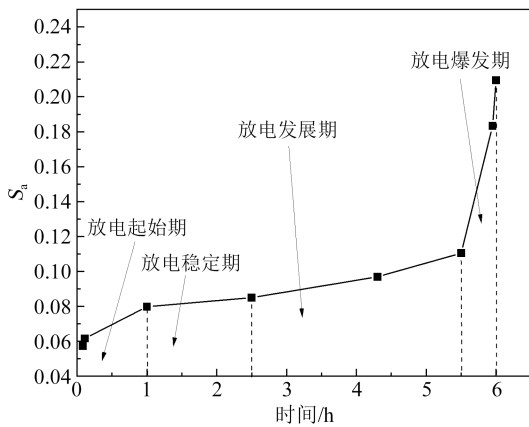


图9 不同放电阶段下绝缘复合材料表面粗糙度的三维算术偏差平均值

Fig.9 The average three-dimensional arithmetic deviation of surface roughness of insulating composite material at different discharge stages

3 结论

(1)电痕发生时,随着施加电压时间的增加,试样表面放电类型依次为电晕放电、火花放电、闪络放电和电弧放电,由此将试样表面的电痕化过程分为放电起始期、放电稳定期、放电发展期、放电爆发期。在电痕化放电过程的不同阶段,环氧树脂分子链上的环氧基、羟基、醛基、氨基逐渐断裂分解,羰基在起始期、稳定期、发展期逐渐产生并在爆发期发生不完全分解。

(2)玻璃纤维增强环氧树脂复合材料在电痕化过程中,随着施加电压时间的增长,材料的表面粗糙度不断增加,在放电爆发期三维表面粗糙度最大,约为起始期的2.8倍,且三维算术偏差平均值 S_a 上升速度最快,约为起始期的12倍。试样表面的SEM图像显示,起始期的材料表面较为平整。稳定期的材料表面形貌开始变得复杂,裂纹、固体晶体相继出现。在发展期,裂纹和固体晶体逐渐变大、增多,气泡状空隙和塌陷开始出现。在爆发期,固体晶体被剧烈的放电粉碎后出现团聚现象,材料表面变得更加粗糙和不规则。

参考文献 References

[1] 杜伯学,姜金鹏.换流变压器油纸绝缘水分对局部放电行为的影响综述[J].高电压技术,2021,47(8):2932-2945.
DU B X, JIANG J P. Research progress on influence of water content of oil-paper insulation on partial discharge of converter transformer[J]. High Voltage Engineering,2021,47(8):2932-2945.

[2] 赵涛,刘乐康,孙建涛,等.特高压换流变压器网侧绕组电流检测

系统设计及谐波特性分析[J].高电压技术,2021,47(4):1443-1450.

ZHAO T, LIU L K, ZHAO J T, et al. Design of detection system and harmonic characteristic analysis for the grid side winding current of UHVDC converter transformer[J]. High Voltage Engineering,2021,47(4):1443-1450.

[3] 张施令,彭宗仁,吴昊.±800kV换流变压器阀侧干式套管的损耗分析[J].电网技术,2014,38(7):1758-1764.
ZHANG S L, PEN Z R, WU H. Analysis on power loss of valve-side rip bushing for ±800kV converter transformer[J]. Power System Technology,2014,38(7):1758-1764.

[4] LI S T, YIN G L, CHEN G, et al. Short-term breakdown and long-term failure in nanodielectrics: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(5):1523-1535.

[5] 曹雯,张敏,刘倩,等.电缆接头复合界面处水分对其闪络特性的影响[J].高电压技术,2018,44(11):3699-3706.
CAO W, ZHANG M, LIU Q. Influence of moisture on flashover performance of composite interface cable joint[J]. High Voltage Engineering,2018,44(11):3699-3706.

[6] MASON J H, DU B X, KOBAYASHI S, et al. Environmental factors affecting DC resistance to tracking of polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2003, 11(5):911-912.

[7] ERSOY A, OZCELEP Y, KUNTAMAN A. A study on the reliability of polyester insulators blended with borax[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences,2008,16(3): 257-266.

[8] SYAQR A, HERMAWAN, SUTANTO H. Study on tracking time of epoxy resin insulating material under artificial accelerated aging[C]//International conference on high voltage engineering and power systems, Denpasar, INDONESIA:IEEE,2017:2-5.

[9] YOSHIMURA N, NISHIDA M, NOTO F. Light emission from tracking discharges on organic insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1984,19(2):149-155.

[10] 杜伯学,徐航,李云鹏,等.特高压直流用高导热纳米复合绝缘子耐电痕特性研究[J].高电压技术,2013,39(12):2910-2915.
DU B X, XU H, LI Y P, et al. Study on characteristics of tracking resistance of silicon rubber composite insulators with high thermal conductivity for UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2013,39(12):2910-2915.

[11] SUCHITRA M, RENUKAPPA N M, RANGANATHAIAH C, et al. Cor-relation of free space length and surface energy of epoxy nanocomposites to surface tracking[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(6):2129-2138.

[12] 何伟韩,谢志辉,程圣,等.大型电机用耐电痕化环氧玻璃布层压板的制备与性能[J].绝缘材料,2023,56(6):23-27.
HE W H, XIE Z H, CHENG S, et al. Preparation and properties of epoxy resin based glass cloth laminates with high CTI for large generator[J]. Insulating Materials,2023,56(6):23-27.

[13] 郑一泉.有机绝缘材料耐电痕化的影响因素探讨[J].绝缘材料,2012,45(4):55-59.
ZHENG Y Q. Factors influencing the tracking resistance of or-

- ganic insulating materials[J]. *Insulating Materials*, 2012, 45(4): 55-59.
- [14] LIU X, LIN H, LIANG Y, et al. Effect of atmospheric-pressure microsecond pulsed discharges on epoxy resin surface[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(13): 158-165.
- [15] CHENG P, WEI S, WU K, et al. Ablation resistance of epoxy resin based composite under pulse current in the vacuum[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(11): 115-120.
- [16] VAS V J, VENKATESULU B, THOMAS M J. Tracking and erosion of silicone rubber nanocomposites under DC voltages of both polarities[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(1): 91-98.
- [17] 王少飞. 交流高压下乙丙橡胶绝缘表面电痕破坏机理及其评估方法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- WANG S F. Study on the surface electrical tracking failure mechanism and evaluation method for ethylene propylene rubber under HVAC[D]. Taiyuan, China: Taiyuan University of Technology, 2018.
-
- 收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-11-29。
- 作者简介:
- 蒋文辉(1984-), 男(汉族), 湖南耒阳人, 工程师, 主要从事变电站自动化设备及电网智能化的研究;
- 通信作者: 王永强(1975-), 男(汉族), 河北定州人, 副教授, 主要从事高电压技术、绝缘材料、电介质及其制品、电气测量技术及仪器等研究。