

界面形态对XLPE-EPDM复合界面放电特性的影响研究

陶桂东¹, 张安¹, 孙传铭¹, 陈祖祥², 刘凯², 高国强²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 电缆主绝缘与附件绝缘之间的界面击穿是电力电缆绝缘破坏的主要形式, 为此有必要对固体复合界面击穿机理、放电特性进行研究。以 XLPE-EPDM 复合界面为研究对象, 基于表面接触理论及界面放电试验, 通过显微镜观测界面微观形貌并提取界面形态特征, 研究了界面接触形态对复合界面放电特性的影响规律。结果表明, 复合界面绝缘强度与界面形态特征之间有良好的关联性。随着表面粗糙度的减小, 界面实际接触面积比例增大, 接触点密度增大, 气隙尺寸减小, 界面形态改善; 而局部放电起始电压、界面击穿电压均有所上升, 放电重复率及放电功率均下降, 局部放电强度降低。本研究为改进电缆附件材料与结构设计、选型、指导电缆附件安装工艺及电缆故障检测提供了理论基础。

关键词: 电缆附件; XLPE-EPDM 复合界面; 微观形貌; 形态特征; 局放特性

Effect of interface morphology on discharge characteristics of XLPE-EPDM composite interface

TAO Guidong¹, ZHANG An¹, SUN Chuanming¹, CHEN Zuxiang², LIU Kai², GAO Guoqiang²

(1. CRRC Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The interface breakdown between cable main insulation and accessory insulation is the main form of power cable insulation damage, so it is necessary to study the solid composite interface breakdown mechanism and discharge characteristics. In this paper, the XLPE-EPDM composite interface is taken as the research object. Based on the surface contact theory and interface discharge test, the micro morphology of the interface is observed by microscope and the characteristic quantity of the interface morphology is extracted. The influence of the interface contact morphology on the interface discharge characteristics is studied. The results show that there is a good correlation between the insulation strength of the composite interface and the interface morphology. With the decrease of surface roughness, the ratio of actual contact area increases, the density of contact points increases, and the size of air gap decreases; however, the initial voltage of partial discharge and the breakdown voltage of interface increase, the repetition rate of discharge and the power of discharge decrease, and the intensity of partial discharge decreases. This study provides a theoretical basis for improving the material and structure design, type selection, guiding the installation process of cable accessories and cable fault detection.

Key words: cable accessories; XLPE-EPDM composite interface; micro morphology; morphological characteristics; partial discharge characteristics

0 引言

电缆附件通常由多层固体复合绝缘结构组

成, 在其绝缘屏蔽层截断处存在较强电场畸变, 在长期运行过程中, 容易引起界面放电, 导致界面电痕侵蚀甚至造成击穿事故, 目前电缆附

件已成为高压电力电缆线路的最大绝缘薄弱环节^[1-8]。国家电网公司对实际电缆的故障案例统计数据表明,在不计及外力破坏时,70%的电缆故障是由电缆附件造成的。

国内外学者对不同条件因素下的复合界面击穿问题做了大量研究工作。20世纪90年代,文献[9]研究XLPE-XLPE、XLPE-EPDM及EPDM-EPDM等固体复合界面的击穿电压及影响因素,研究发现界面击穿电压随着界面压力的提高及表面粗糙度的降低明显增大,而电缆附件的老化会降低界面压力,导致界面绝缘强度下降。文献[10-11]研究了界面压强及表面光滑度对XLPE-SiR界面电痕破坏特性的影响,发现随着界面压力和表面光滑度的增加,初始放电电压及电痕破坏时间均增大,且压力增大使得界面放电光通道变窄、分支数减少,碳化通道的形成被抑制。文献[12]分别研究了界面压强及表面粗糙度对XLPE-SiR界面的电树枝生长特性的影响,研究表明,较高电压下,光滑表面的界面间会产生电树,且随着压强增大,树枝起始电压增大。文献[13-14]通过观察固体界面间气隙局部放电图像,认为表面粗糙度及界面压强影响了界面间气隙通道的长度,进而影响放电通道的形态,且固体接触点的耐电痕性对于阻挡放电流注的传播具有重要作用。

目前,众多学者对于复合界面击穿问题的大量研究主要集中于界面本征属性及各种外部影响因素对界面宏观击穿特征(如击穿电压、局部放电起始电压、放电光和碳化特征等)的影响规律方面,但由于电缆为封闭式紧凑型结构,无法直接观察到电缆附件内部的放电发展过程,电缆附件复合界面的击穿过程及规律尚不明确。因此,亟需开展多层固体绝缘界面的放电过程、放电特性、介质破坏机理及其影响因素等方面的深入研究,探明界面形态对XLPE-EPDM复合界面局部放电特性的影响规律,为改进电缆附件的材料与结构设计、选型、指导电缆附件安装工艺及电缆故障检测提供理论基础,对于保障高压电缆的安全可靠运行具有重要意义。

1 试样制备及试验平台搭建

1.1 试样制备

XLPE样片:选用商用XLPE粒料,将原料放入模具中,在120℃使用平板硫化机预热5 min,再逐步升高压力至10 MPa,在170℃下保持压力15 min,随后保持压力自然冷却至室温,制得的XLPE样片厚度为1 mm,并裁剪为40 mm×40 mm的方形样片。

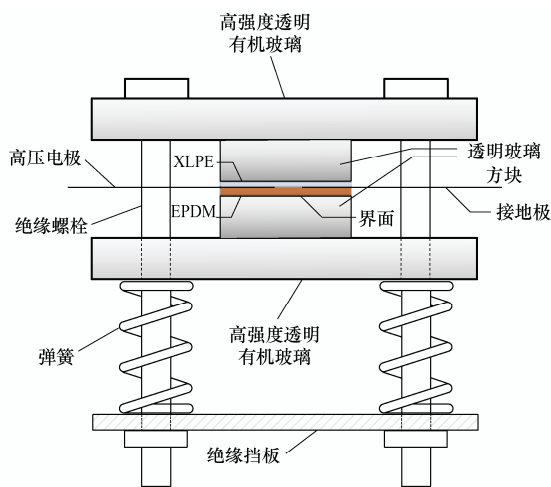
EPDM样片:选用美国陶氏3722 P三元乙丙橡胶原料(密度0.87 g/cm³),通过添加一定比例的碳黑、防老剂和DCP等添加剂,经密炼机混炼后制成混炼胶,最后放入模具中,在160℃、10 MPa下硫化5 min,待试样自然冷却至室温后取出,制备的EPDM样片厚度约2 mm,并同样裁剪为40 mm×40 mm的方形样片。

将制备好的EPDM样片采用金相磨抛机对表面进行进一步打磨处理,打磨砂纸分别选用80目、240目和1 000目三种型号,打磨方式为均匀随机打磨,使得材料表面近似各向同性,并控制每组的打磨时间相同,使得相同型号砂纸打磨的样品表面粗糙度相近。为防止打磨过程中橡胶表面残留较多的砂粒杂质及橡胶粉末,在每一组试样制作完成后,采用去离子水对橡胶表面进行清洗,去除表面杂质,试样表面处理洁净后放入真空干燥箱中干燥10 h(温度80℃,真空度10⁻² Pa),完成后取出待用。

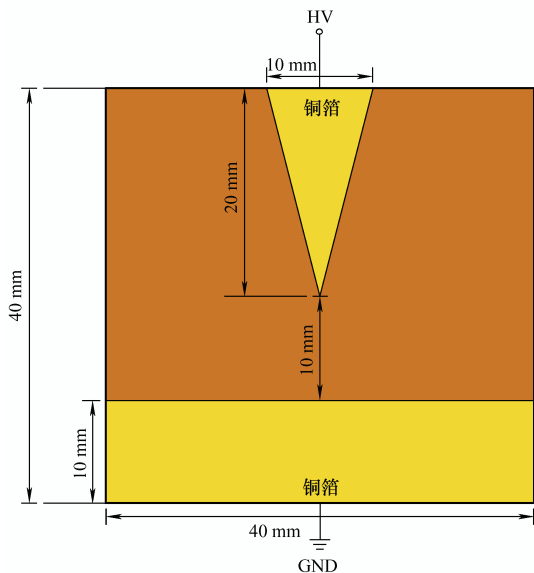
1.2 复合界面放电试验模型设计

本文主要研究因界面切向电场下引起的复合绝缘界面沿面放电过程,采用XLPE-EPDM双层绝缘模型设计制作的复合界面放电试验模型结构如图1a所示。模型采用高强度透明有机玻璃层压复合绝缘试样,并采用绝缘螺栓固定,可通过底部螺栓调节弹簧压缩长度施加界面压力,并可通过测量弹簧压缩量计算弹簧压力,进而计算界面压强。参考实际电缆附件的界面压强范围为0.1~0.3 MPa,本试验界面压强设置为0.3 MPa。为避免调节弹簧压力过大时造成有机玻璃板局部变形引起的样品界面压力分布

不均匀, 采用两块与样品同等面积尺寸且厚度为 20 mm 的双层透明玻璃方块层压住复合绝缘试样, 放置于上下两块玻璃盖板之间。除弹簧外, 模型其他部分均采用绝缘材料, 避免对界面电场造成干扰。由于实际电缆附件中的故障通常是由局部电场集中所致, 因此本试验采用针板电极模拟实际电缆附件中复合绝缘界面间的局部不均匀电场。电极由厚度 $20\ \mu\text{m}$ 的铜箔裁剪制成, 电极结构如图 1b 所示, 试验时针电极上施加工频电压, 板电极接地。



(a) 试验模型



(b) 电极结构

图 1 复合界面放电试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of composite interface discharge test device

1.3 试验回路及测试方法

搭建复合界面放电试验回路如图 2 所示。其中, AC 为 0~150 kV 工频无晕变压器; R_1 为阻值 $0.5\ \text{M}\Omega$ 的保护电阻; 电容 C_1 与 C_2 为分压电容器; C_k 为 $300\ \text{pF}$ 的耦合电容; Z_m 为阻值 $50\ \Omega$ 的检测阻抗, 并与测量带宽为 0~20 MHz 的 MPD600 局部放电检测仪相连; 采集到的局部放电信号经 USB 接口上传至计算机中实时显示及保存。

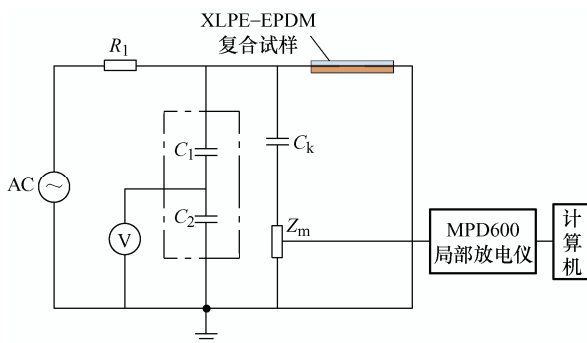


图 2 复合界面放电试验回路

Fig. 2 Composite interface discharge test circuit

试验在屏蔽实验室内进行, 试验温度为 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$, 相对湿度 50% 左右。采用直径 30 mm 铝波纹管作为高压引线屏蔽线, 并加装空心防晕球于高压引线与铜箔电极连接处, 有效屏蔽电晕放电。环境背景噪声控制在 $5\ \text{pC}$ 以下, $10\ \text{kV}$ 下高压引线局部放电干扰放电量控制在 $30\ \text{pC}$ 以下。根据国标 GB/T 7354—2003, 以试验回路首次出现大于 $100\ \text{pC}$ 局部放电的电压为局部放电起始电压; 当界面出现火花或电弧时的电压为击穿电压, 测试方式如下:

1) 局部放电起始电压测试。先施加预期局部放电起始电压的 50%, 随后均匀缓慢升高电压, 当最大局部放电量达到 $100\ \text{pC}$ 时, 停止加压并记录起始电压。

2) 击穿电压测试。为了在有限时间内获取大量的试验数据与现象, 且不影响最终击穿结果, 采用 20 s 阶梯升压法, 以 $1\ \text{kV}$ 步长升压, 各电压等级保持 20 s, 期间统计 500 个工频周期的局部放电信号, 当观察到界面出现火花放电时, 则视为已产生放电通道, 保持电压不变, 待试样击穿后停止试验并记录击穿电压。考虑到试验结果的分散性, 上述试验重复 3 次, 取测试平均值作为最终结果。

2 试验结果与分析

2.1 本征放电特性

为探究极不均匀交流电场下 XLPE-EPDM 复合界面的本征放电特性, 不对样片作进一步处理, 直接将两层制备好的纯净试样层组合成复合界面。本试验共重复进行了 3 次, 其整体放电现象基本一致, 局部放电起始电压及击穿电压结果如表 1 所示。

表 1 XLPE-EPDM 复合界面局部放电起始/击穿电压
Tab. 1 PD initiation/breakdown voltage of XLPE-EPDM composite interface

(单位: kV)

模型	起始电压	击穿电压
复合界面 放电模型	8.3	22

在复合界面放电的发展过程中, 通过采集放电过程的局部放电信号, 提取最大放电量 $Q_{\max}$ 、平均局部放电量 Q_{avg} 、放电重复率 N 和放电功率 P 作为表征复合界面放电的特征参数, 如图 3 所示。

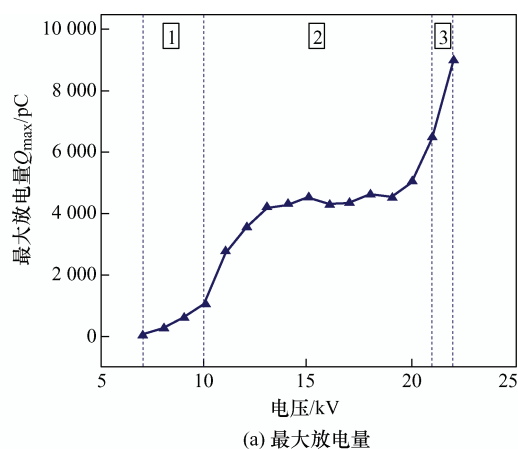
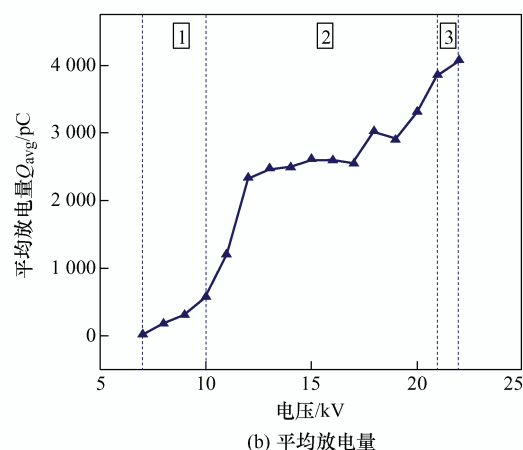
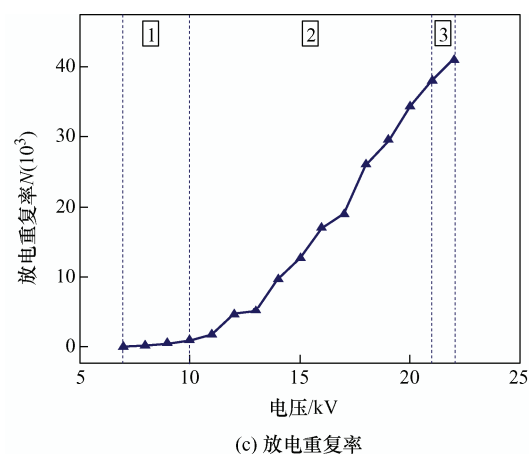
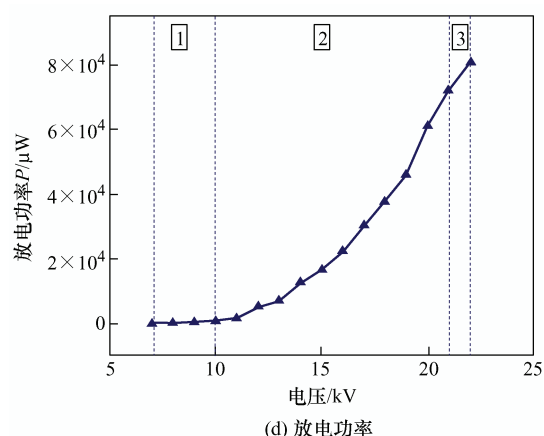


图 3 XLPE-EPDM 本征放电特征参数发展规律
Fig. 3 Development law of intrinsic discharge characteristic parameters of XLPE-EPDM

从图 3 可以发现, 将局部放电特征参数变化曲线划分为三个阶段, 通过对比局部放电特征参数的变化规律可以得出, 不同放电阶段的局部放电特征参数有较大差异。随着外施电压的增大, 最大局部放电量与平均放电量先迅速增加。当电晕放电形式趋于稳定时, 最大放电量与平均放电量的上升趋势开始平缓; 当电压临近沿面流注放电起始电压时, 最大局部放电量与平均放电量再次迅速上升; 而放电重复率与放电功率随电压的增大, 整体始终保持上升趋势, 且上升幅度越来越大, 两种参量随电压的变化曲线具有较好的二次函数拟合特征。

2.2 界面形态观测与表征

为更直观反映砂纸打磨后的 EPDM 试样表面形态特征差异, 采用金相显微镜对不同型号砂纸

打磨后样品表面形貌进行观测, 金相显微镜型号为 Leica DM2700 M。图 4 给出了采用不同砂纸打磨的 EPDM 样品和未打磨的 XLPE 样品表面形貌。由图 4 可以看出, 样品表面呈现出随着表面粗糙度减小逐渐趋于光滑的趋势。相比于 1 000 目打磨的表面, 80 目砂纸打磨后的 EPDM 样品单个表面微凸体面积明显增大, 微凸体分布密度更低, 相邻微凸体间沟壑深度及宽度更大, 且存在相邻凹坑间相互连通形成一条较深且较长的沟壑, 这将使得表面发生接触时形成一条长气柱通道; 未打磨的 XLPE 样品表面粗糙度及形貌相对于打磨的 EPDM 样品更为光滑, 其表面凹坑的数量及尺寸均极小。

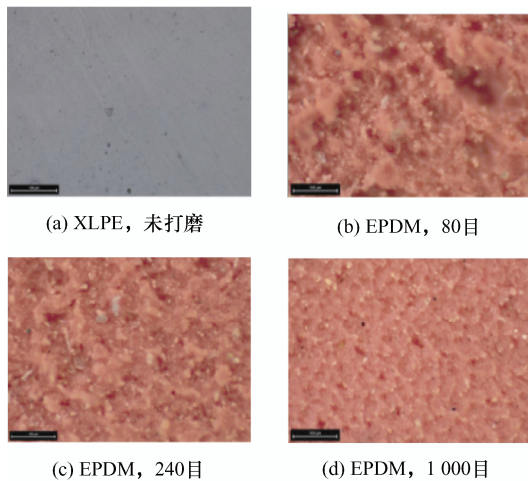


图 4 XLPE-EPDM 界面形貌放大 200X
Fig. 4 Interface morphology of XLPE-EPDM is enlarged by 200X

为准确获取不同砂纸打磨后 EPDM 样品表面形态特征, 本文采用 TR200 触针式表面粗糙度测试仪测量打磨后样品的平均表面粗糙度参数及表面原始轮廓, 测试仪的垂直分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$ 。测试取样长度 $l_r = 0.8 \text{ mm}$, 评定长度 $l_n = 5l_r$, 选用轮廓算术平均偏差 R_a 作为介质表面粗糙度评价指标, 其定义为单位取样长度内, 样品表面轮廓偏距绝对值的算术平均值, 如图 5 所示, 选用微凸体高度均方差 σ 、微凸体平均曲率半径 β_m 、微凸体表面分布密度 η 以及表面二维轮廓的微凸体分布密度 D 作为复合界面形态参数, 其计算公式为

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx \quad (1)$$

$$\sigma = 0.35 \times \sqrt{W^2 + SW^2} \quad (2)$$

$$\beta_m = \frac{AR^2 + SAR^2}{16R} \quad (3)$$

$$\eta = 1.2D^2, D = \frac{1}{AR} \quad (4)$$

式中, 根据国际标准 ISO 4287 定义, R 为评定长度内粗糙度 Motifs 的高度 R_i 的算术平均值; AR 为评定长度内粗糙度 Motifs 宽度 AR_i 的算术平均值; SAR 为评定长度内粗糙度 Motifs 宽度 AR_i 的均方根。在粗糙度 Motifs 的基础上, 只保留峰顶, 可以得到波纹度 Motifs, 其中, W 为评定长度内波纹度 Motifs 的高度 W_i 的算术平均值; SW 为评定长度内波纹度 Motifs 的高度 W_i 的均方根。

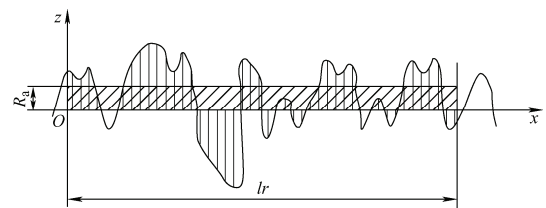


图 5 粗糙度 R_a 示意图
Fig. 5 Roughness R_a schematic diagram

通过 G-W 粗糙接触模型估算了 XLPE-EPDM 复合界面在不同表面粗糙度下的接触界面形态特征量, 其中弹性接触条件下实际接触面积 A_{re} 与界面压强的关系式如下

$$\frac{A_{re}}{A_a} = 3.2 \times \frac{P_a}{E^* \sqrt{\frac{\sigma}{\beta_m}}} \quad (5)$$

式中, A_a 为实际接触面积; P_a 为界面压强, 0.2 MPa ; E^* 为界面复合弹性模量。

接触点数量 n 可通过下式计算

$$n = 1.21\eta A_a \left(\frac{P_a}{(\eta\sigma\beta_m)E^* \sqrt{\frac{\sigma}{\beta_m}}} \right)^{0.88} \quad (6)$$

为便于计算, 将界面间气隙形状等效为球形,

则气隙平均直径 d_0 的关系式可表示为

$$d_0 = 2\sqrt{\frac{A_a - A_{re}}{n\pi}} \quad (7)$$

根据所述方法, 计算得到不同粗糙度下 XLPE-EPDM 复合界面相态参数及形态特征量, 如表 2、表 3 所示。

表 2 XLPE-EPDM 复合界面形态特征参数
Tab. 2 Characteristic parameters of XLPE-EPDM composite interface morphology

(单位: μm)

砂纸类型	σ	β_m	η	Ra
未打磨	0.76	22.87	4.01×10^{-4}	1.204
80 目	4.89	8.72	9.18×10^{-5}	6.051
240 目	2.39	14.15	1.85×10^{-4}	3.430
1 000 目	0.72	23.52	4.84×10^{-4}	1.187

表 3 XLPE-EPDM 复合界面形态特征值
Tab. 3 Characteristic values of XLPE-EPDM composite interface morphology

参数 界面	$A_{re}/A_a(\%)$	$n/(1/\text{mm}^2)$	$d_0/\mu\text{m}$
未打磨	26.0	1 709	22.0
80 目	6.4	235	71.2
240 目	11.6	544	45.5
1 000 目	27.1	1 781	22.9

未经打磨的 XLPE-EPDM 样品表面粗糙度略高于 1 000 目砂纸打磨的样品; 打磨砂纸目数越高, 样品表面粗糙度越低, 界面的实际接触面积比例 A_{re}/A_a 显著增大, 触点密度 n 增加, 气隙直径 d_0 减小; 尤其当打磨砂纸目数从 240 目增大到 1 000 目时, 接触形态参数有较大的变化, 因此, 减小表面粗糙度, 对于提高界面实际接触面积比例、减小气隙的尺寸及改善界面接触形态具有重要作用。

2.3 界面形态对 XLPE-EPDM 复合界面放电特性的影响

不同界面形态下的 XLPE-EPDM 复合界面局部放电起始电压试验结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, XLPE-EPDM 界面局部放电起始电压随着界面粗糙度的增大而增大。界面击穿电压随

表面粗糙度的变化趋势与局部放电起始电压类似。

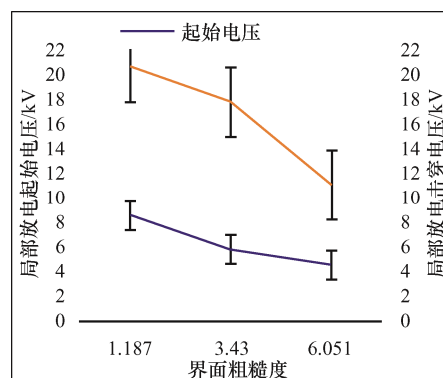


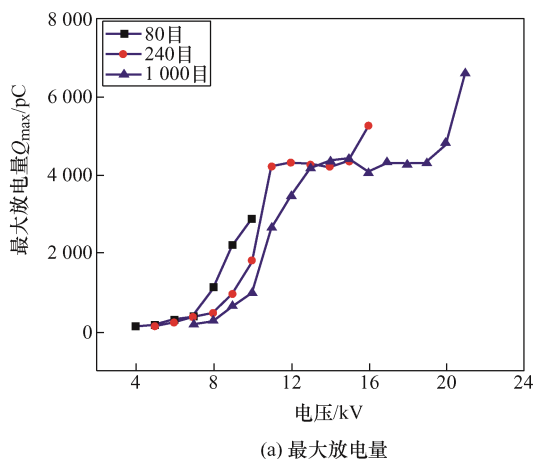
图 6 XLPE-EPDM 复合界面局部放电起始/击穿电压
Fig. 6 Initiation / breakdown voltage of partial discharge at XLPE-EPDM composite interface

分析认为: 随着表面粗糙度减小, 接触界面形态明显改善, 界面的实际接触面积增大, 且气隙半径减小, 根据 Paschen 定律, 尺寸越小的气隙击穿场强越高, 因此局部放电起始电压随之增大。当表面粗糙度减小时, 界面接触形态改善, 界面间接触更为紧密, 界面实际接触面积增加, 气隙尺寸减少, 使得针尖附近不易产生电离, 相同电压下电离产生的电荷数量更少, 使得流注通道起始的条件难以达到; 且由于接触面对于沿面流注通道的阻挡作用增强, 电子崩的发展会受到限制, 界面击穿电压将增大。

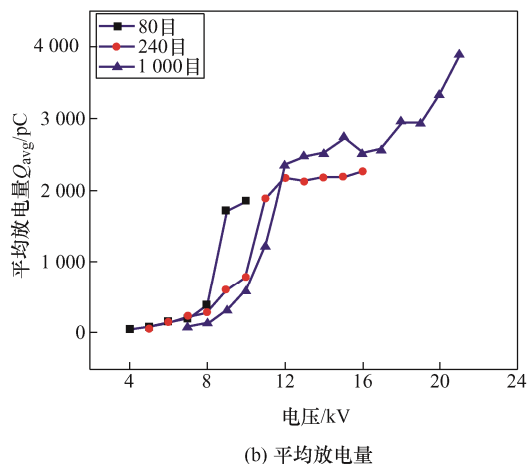
2.4 界面局部放电特性参数变化规律

为分析界面放电发展过程中的局部放电特性, 以最大放电量 $Q_{\max}$ 、平均局部放电量 Q_{avg} 、放电重复率 N 和放电功率 P 作为表征复合界面放电的局部放电特征参数, 分析不同接触界面形态对放电发展过程中局部放电特征参数的影响规律, 如图 7 所示。当电压低于 11 kV 时, 界面放电尚未出现电晕光, 此时不同表面粗糙度的界面放电特性具有相似的发展趋势, 各个局部放电参数均随着电压的上升有所增加, 且表面粗糙度越大, 界面放电的最大放电量 $Q_{\max}$ 、平均局部放电量 Q_{avg} 、放电重复率 N 和放电功率 P 越高, 且 80 目砂纸打磨的界面在 9 kV 时平均放电量有明显的增大。当电压达到 11 kV

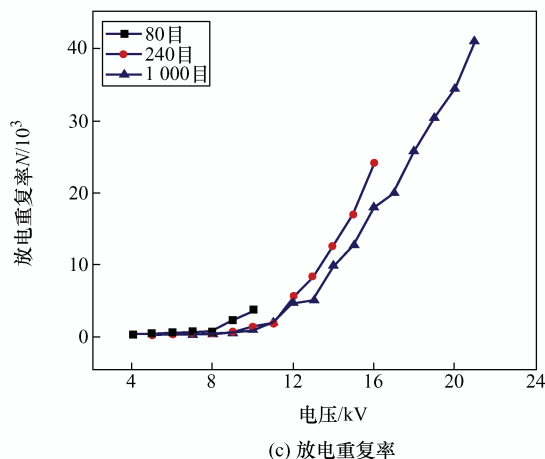
时, 80 目砂纸打磨界面直接闪络击穿, 此后 240 目与 1 000 目砂纸打磨的界面开始出现电晕放电, 各个特征参数均有明显的上升; 在电晕放电前期, 240 目打磨界面的 $Q_{\max}$ 与 Q_{avg} 要高于 1 000 目打磨的界面; 随后 $Q_{\max}$ 与 Q_{avg} 随电压上升发展趋势平缓, 且放电量大小关系改变, 240 目打磨的界面 $Q_{\max}$ 与 Q_{avg} 略低于 1 000 目打磨的界面。在 17 kV 时, 240 目砂纸打磨界面直接闪络击穿, 此后 1 000 目砂纸打磨界面放电持续增长, $Q_{\max}$ 与 Q_{avg} 在电晕放电后期再次明显增大, 并在 21 kV 时出现沿面流注通道, 当沿面流注通道发展到对面电极时发生闪络击穿; 随着电压的上升, 不同表面粗糙度界面的放电重复率 N 与放电功率 P 均存在相似的发展趋势, 随着电压的上升, 放电重复率 N 与放电功率 P 明显增大, 且表面粗糙度越大, 放电重复率 N 与放电功率 P 也越高。



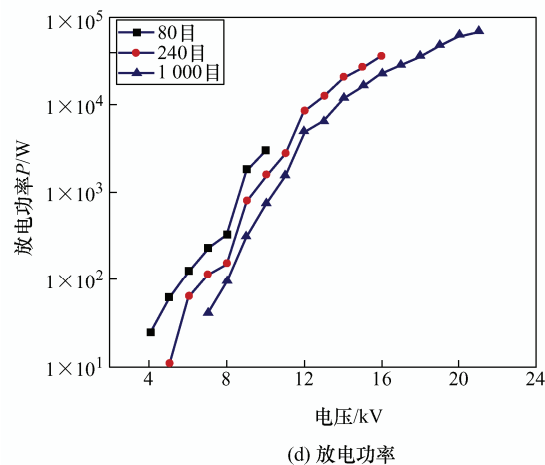
(a) 最大放电量



(b) 平均放电量



(c) 放电重复率



(d) 放电功率

图7 不同表面形态下局部放电特征参数发展规律

Fig. 7 Development law of partial discharge characteristic parameters under different surface morphology

分析认为, 造成不同表面粗糙度界面局部放电特征参数发展趋势不同的原因为样品表面粗糙度越高, 界面的气孔尺寸越大, 气隙的击穿场强越低, 则局部放电越剧烈。在电晕放电幅值稳定阶段, 由于 1 000 目砂纸打磨的界面接触更为紧密, 电子崩的运动受到限制, 电晕放电电离产生的大量电荷分布更为集中, 使得电晕放电的极性效应增强, 增大了正半周的放电幅值, 但通过放电重复率及放电功率参数可以看出, 240 目砂纸打磨的界面仍然比 1 000 目砂纸打磨的界面放电更为剧烈。

3 结束语

针对电力电缆附件中普遍存在的主绝缘与附件绝缘之间界面放电与击穿问题, 本文以

XLPE-EPDM 复合界面为研究对象,分析探讨了界面形态对 XLPE-EPDM 复合界面放电特性和发展过程的影响规律及机理,主要结论如下:

1) 微观尺度上,材料表面均为凹凸不平的粗糙表面,因此固体复合界面实际是由连续分布的接触面及气隙组成的混合体。

2) 由于气隙的击穿强度远低于固体介质,分析认为界面气隙局部放电的持续发展是引起界面击穿的主要因素。根据 Paschen 定律,气隙尺寸越小,击穿场强越高,因此接触界面形态对于复合界面绝缘强度有较大影响。

3) 分别通过粗糙表面接触理论及界面放电试验研究了表面粗糙度对于 XLPE-EPDM 复合界面的接触形态特征与界面放电特性的影响规律。结果表明,随着表面粗糙度的减小,复合界面实际接触面积比例增大,接触点密度增大,气隙尺寸减小,即界面接触更加紧密,界面形态得到改善。

4) 局部放电起始电压及界面击穿电压随界面形态改善均有所上升,放电重复率及放电功率下降,局部放电强度降低,这验证了复合界面的绝缘强度与界面形态特征之间有较好的关联性,减小接触面表面粗糙度,可提高复合界面绝缘强度。

参考文献

- [1] 戴静旭,刘杰,王彦伟. 高压电缆故障原因分析及对策措施[J]. 高电压技术, 2004(增刊 1): 54-55.
- [2] 林礼健. 一起 220 kV 电缆线路故障原因剖析[J]. 山西电力, 2003 (2): 39-40.
- [3] 雷秀生. 高压电缆中间接头故障原因及防范对策[J]. 电力安全技术, 1999(1): 29-30.
- [4] 张鸿. 某 110 kV 高压电缆改造工程中间接头故障分析[J]. 工程技术研究, 2017 (1): 72-74.
- [5] 曾成富,简伟奇. 35 kV 电缆终端头绝缘故障分析[J]. 电气时代, 2001(10): 31.

- [6] 史济康,曹家,袁检,等. XLPE 电力电缆中间接头复合介质沿面放电研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 52-53, 58.
- [7] 戴征宇,姜芸,罗俊华. 预制型电缆附件沿面放电试验研究[J]. 高电压技术, 2002 (9): 7-8.
- [8] 惠宝军,傅明利,刘通,等. 110 kV 及以上电力电缆系统故障统计分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(12): 44-50.
- [9] DANG C, FOURNIER D. Dielectric performance of interfaces in premolded cable joints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 29-32.
- [10] DU B X, GU L. Effects of interfacial pressure on tracking failure between XLPE and silicon rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1922-1930.
- [11] DU B X, ZHU X H, GU L, et al. Effect of surface smoothness on tracking mechanism in XLPE-Si-rubber interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 176-181.
- [12] 李成贵. 表面微观形貌的 MOTIF 参数计算[J]. 航空精密制造技术, 2001(1): 42-46.
- [13] 王佩龙. 高压电缆附件的电场及界面压力设计[J]. 电线电缆, 2011 (5): 1-4, 10.
- [14] HASHEMINEZHAD M, ILDSTAD E. Application of contact analysis on evaluation of breakdown strength and PD inception field strength of solid-solid interfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 1-7.

作者简介:



陶桂东

陶桂东 (1974—), 男, 教授级高工, 研究方向动车组设计。

(收稿日期: 2020-8-19) **EA**