

电缆附件绝缘界面放电故障气体诊断方法

刘凤莲¹, 薛志航¹, 张宗喜¹, 苟 杨², 冯 阳², 孙 韬³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610095; 2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610021; 3. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022)

摘 要: 本文探究了电缆附件交联聚乙烯-硅橡胶绝缘界面在不同放电故障类型下的特征气体生成规律, 并以此提出了电缆附件界面放电类型的气体诊断判据。首先搭建电缆附件绝缘界面放电产气实验平台, 通过高频电流互感器法区分不同放电故障类型, 进一步通过气相色谱法分析绝缘界面放电故障的逸出气体特性。然后搭建真型电缆附件放电故障产气平台, 对界面放电故障下的特征气体生成规律进行实验验证。最后, 基于特征气体生成规律提出电缆附件放电故障的诊断判据。结果表明: 电缆附件绝缘界面在低能放电(局部放电)下主要生成 H_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 C_2H_6 , 在高能放电(电弧放电)下则额外产生 C_2H_4 和 C_2H_2 。基于此提出了综合性气体诊断判据: 当 CO 和 CO_2 浓度比为 $0.10 \sim 0.69$ 时为低能放电, 大于 0.70 时为高能放电; 气体组分中仅含前 5 种气体对应低能放电, 同时检出 C_2H_4 和 C_2H_2 则对应高能放电。量化指标显示, 高能放电中不饱和烃占比为 $0.07 \sim 0.16$, 不饱和烃与 H_2 的浓度比为 $0.08 \sim 0.30$ 。

关键词: 电缆附件; 绝缘界面; 放电故障; 气体判据

Gas diagnosis method for discharge faults of insulation interface in cable accessories

LIU Fenglian¹, XUE Zhihang¹, ZHANG Zongxi¹, GOU Yang², FENG Yang², SUN Tao³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610095, China;
2. Chengdu Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610021, China;
3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China)

Abstract: This paper investigated the generation laws of characteristics gases at the cross-linked polyethylene-silicone rubber insulation interface of cable accessories under different types of discharge faults, and proposed gas diagnostic criteria for discharge fault types at the cable accessory interface based on this. Firstly, a gas generation experimental platform for insulation interface discharge of cable accessories was established, different types of discharge faults were distinguished by the high-frequency current transformer method, and the characteristics of the escaping gases from insulation interface discharge faults were analyzed by gas chromatography. Then, a real-type discharge fault gas generation platform of cable accessory was built to experimentally verify the generation laws of characteristic gases under interface discharge faults. Finally, the diagnostic criteria for discharge faults in cable accessories were proposed based on characteristic gas formation laws. The results show that the insulation interface mainly generates H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , and C_2H_6 under low-energy discharges (partial discharges), while additionally produces C_2H_4 and C_2H_2 under high-energy discharges (arc discharges). Based on this, a comprehensive gas diagnostic criteria is proposed: when the concentration ratio of CO to CO_2 is between 0.10 and 0.69 , it is considered as low-energy discharge; when it is greater than 0.70 , it is considered as high-energy discharge. Only the first five gases are present in the gas composition, it is considered as low-energy discharge; while both C_2H_4 and C_2H_2 are detected, it is considered as high-energy discharge. Quantitative indicators show that the proportion of unsaturated hydrocarbons in high-energy discharges ranges from 0.07 to 0.16 , and the concentration ratio of unsaturated hydrocarbons to H_2 ranges from 0.08 to 0.30 .

Key words: cable accessories; insulation interface; discharge fault; gas criterion

0 引言

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5500-202326176A-1-1-ZN)。

随着城镇化的快速发展, 我国持续推进城市电网升级工程, 电力系统的电缆化改造已全面覆盖 10

~500 kV 电压等级^[1]。电缆网络的可靠性与工业生产及民生保障密切相关。因此,保障电缆系统的安全稳定运行至关重要。

电缆附件是连接电缆与输配电设备、保障电缆线路电气和力学性能稳定的关键组件,其性能直接影响电缆系统的安全稳定运行。在安装电缆附件过程中,由于现场环境复杂、作业人员操作水平参差不齐,容易在电缆附件绝缘界面中引入金属杂质、半导体层突起、气隙等缺陷。这些缺陷容易在绝缘界面引发局部电场畸变,产生局部放电现象,甚至导致界面击穿。因此,需要对电缆附件的运行状态进行检测。电缆附件的状态检测方法可以分为电气测量法与非电气测量法,包括局部放电检测法^[2-3]、温度检测法^[4-5]、超声波检测法^[6-7]、太赫兹检测法^[8-10]等。但现有的检测方法存在灵敏度较低或通用性较差的问题。气体检测法作为电力设备状态的重要检测方法,通过测定特定气体组分的浓度、比值等特征,能够有效检测电力设备的早期故障。目前,该方法在变压器油中溶解气体分析^[11-12]领域已有较为深入的研究,这些研究成果体现出气体检测方法对于电力设备状态评估的潜力。在研究人员的探索下,气体检测技术用于电力电缆系统故障识别的研究已有了初步的成果。李晓杉等^[13]、张浩然等^[14]分别提出了基于 FTIR 与气体分析和结合温度测量与气体分析的电缆故障综合检测方法。周凯等^[15-16]系统地研究了 XLPE 电缆在局部放电、高能放电、腐蚀、过热等一系列故障下的产气特征,然后提出了一种基于 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 等关键气体的断层识别方法,并在现场验证了该方法的普适性和准确性。郭卫等^[17-18]主要研究了电流密度、受潮程度与缓冲层烧蚀过程中产气浓度的变化规律,揭示了特征气体浓度与缓冲层烧蚀故障严重程度间的关系。

上述研究表明,气体检测技术能有效诊断电缆故障的类型、严重程度,但现有研究更多聚焦于电缆本体,关于气体检测技术在电缆附件中的应用研究较少。而电缆附件的材料、绝缘结构与本体存在明显差异,缺陷类型也有所不同。因此,现有气体检测技术并不适用于电缆附件的故障诊断。

本文将主要探索气体检测技术在电缆附件绝缘状态诊断上的应用。首先探索电缆附件交联聚乙烯-硅橡胶绝缘界面在不同放电故障类型下的特征气体生成规律,然后以此提出电缆附件界面放电类型的特征气体诊断判据。

1 界面样本产气实验

1.1 样本制备与实验平台

在电缆实际运行时,电缆橡胶附件与电缆绝缘层需过盈配合形成一定的界面压力,构成紧密贴合的固-固界面复合结构。为研究电缆附件绝缘界面放电的产气特性,本文设计绝缘界面样本,并模拟实际电缆附件绝缘界面的材料和压力特性进行分析。

本文研究对象为电缆附件硅橡胶(SiR)与电缆主绝缘材料交联聚乙烯(XLPE)构成的 XLPE-SiR 绝缘界面。将由 XLPE 粒料制成的 XLPE 片裁剪成尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm 的样片,使用 400 目砂纸将其表面打磨光滑。将由 SiR 生胶制成的 SiR 片裁剪成尺寸为 20 mm×20 mm×2 mm 的样片。分别使用酒精擦拭 XLPE 样片、SiR 样片后,用蒸馏水冲洗干净,并放入 80℃ 真空干燥箱中干燥 48 h 后取出。

绝缘界面样本由 XLPE 样片和 SiR 样片堆叠构成,针、板电极放置在样片之间,其中板电极宽度为 20 mm、长度为 40 mm、厚度为 0.1 mm,针电极宽度为 10 mm、长度为 40 mm、厚度为 0.1 mm、针尖角度为 40°,针电极与板电极的垂直距离为 5 mm。绝缘界面样本模型由界面样本、透明有机玻璃板、螺栓组、弹簧组成。将界面样本放置于有机玻璃板中心位置,使用螺栓组固定样片位置,使用弹簧对界面施加(0.10±0.02)MPa 压力。

绝缘界面产气装置由绝缘界面样本、密封腔、气路等共同构成,如图 1 所示。将绝缘界面样本放置在密封腔内,密封腔使用螺栓、橡胶圈密封。导线和导气管穿过密封腔壁,在接口处使用玻璃胶密封。

本文搭建的绝缘界面放电产气实验平台由无局放实验装置、绝缘界面产气装置、信号采集系统构成,如图 2 所示。无局放实验装置包括分压器、工频无局放试验变压器和保护电阻。信号采集系统分别通过分压器和高频电流传感器(HFCT)检测放电电压和电流,示波器采集放电信号,上位机计算放电信号。采用日置(上海)测量技术有限公司的 MR6000 型示波器,最高采样率为 200 MS/s。

1.2 气体检测方法

气相色谱(gas chromatography, GC)凭借快速分离、高灵敏度和高选择性的优点,可用于定量检

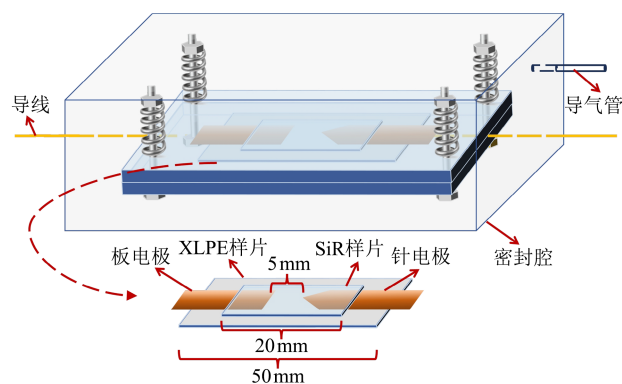


图1 绝缘界面样本及产气装置

Fig.1 Insulation interface sample and interface gas production device

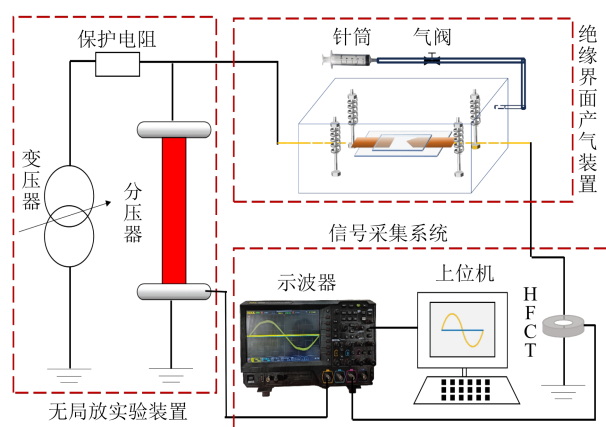


图2 绝缘界面放电产气实验平台

Fig.2 Discharge gas production experiment platform for insulation interface

测小分子气体。采用上海仪电(集团)有限公司的GC126N型气相色谱仪(检测上限为 3×10^{-12} g/s,注入样品量为30 mL)分析绝缘界面放电产生气体(H_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2)的成分与含量。

1.3 界面样本放电产气实验

搭建上述绝缘界面放电产气实验平台后,关闭气阀。在开展放电产气实验前,需确保放电实验平台电路连接正确,绝缘界面产气装置气密性符合实验要求,信号采集系统信号传输正常。

电缆附件绝缘界面的放电程度可分为低能放电(局部放电)和高能放电(电弧放电),通过高频电流传感器测得的放电波形可划分放电产气实验中绝缘界面的放电程度^[19-20]。本文将绝缘界面放电产气实验按不同放电程度划分为低能放电实验、高能放电实验。在低能放电产气实验过程中,保持恒定速率缓慢升压,直至实验样本出现稳定局放,保持该电压等级持续加压48 h,期间每间隔2 h采集500

个工频放电周期的局放电流、电压波形。在高能放电产气实验过程中,保持恒定速率缓慢升压,直至出现稳定的电弧放电,保持该电压等级不变,直至最终绝缘失效,记录界面击穿的电流、电压波形。

绝缘界面放电产气实验结束后,打开气阀,使用针筒抽取气体样本,并将其注入气相色谱仪,通过GC法定量分析气体样本中的小分子气体成分。

2 电缆附件产气实验

2.1 实验对象及集气装置

采用由长缆科技集团股份有限公司制造的10 kV单芯交联电缆冷缩式户内终端来模拟实际电缆附件界面放电产气情况。电缆附件界面区域发生放电故障后,初始阶段通常是以局部放电为主的低能放电,经历长期的劣化后,转化为高能放电,最终导致界面击穿失效。鉴于该劣化过程历时较长,为在实验条件下快速获取电缆附件的放电产气特征,需采用加速实验方法。本文采取了以下措施:施加不同等级的电压,研究不同能量放电故障的产气特性;在界面中制造严重的金属颗粒缺陷;缩短剥开的半导电层长度,减小缆芯与半导电层之间的电气绝缘距离^[21]。实验中缩短剥开的半导电层长度使半导电层至缆芯的轴向距离为5 cm,同时在XLPE绝缘层上均匀放置若干厚度为0.05 mm、长度为0.5~1.0 mm的不规则铜箔以模拟金属颗粒缺陷,如图3所示。



图3 中压电缆终端界面缺陷

Fig.3 Interface defects of medium-voltage cable terminal

部分额定电压为26/35 kV及以下的电力电缆附件由于缺乏密封结构,运行过程中产生的逸出气体会直接扩散至大气环境中^[22]。本文采用剖分式电缆附件集气装置收集开放式电缆附件产生的逸出气体,如图4所示。该装置安装于电缆冷缩终端管与冷缩绝缘管的搭接部位,两个半圆柱形集气盒对接界面预置高弹性硅橡胶密封胶条,采用螺栓组加固的方式实现集气盒的固定与气体密封。在集气

箱体壁上安装导气管,并在气管一端加装气阀,便于逸出气体的储存与采集。

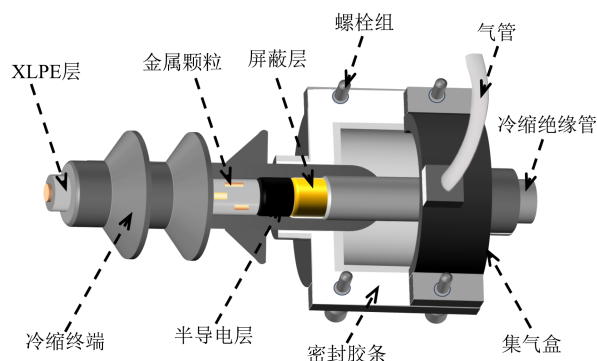


图4 10 kV 电缆附件集气装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of gas collecting device for 10 kV cable accessories

2.2 电缆附件放电产气实验平台

搭建电缆附件放电产气实验平台,如图5所示。该平台采用无局放高压试验变压器成套装置作为电压源,整套系统由调压控制箱、无局放变压器、耦合电容分压器、保护电阻组成。局放检测系统由HFCT、示波器以及搭载了局放检测软件的上位机组组成,通过分压器测量电压信号,通过HFCT测量接地线上的电流信号并接入示波器。示波器与搭载了局放采集系统的计算机相连,以实现实时监测与数据采集。无局放变压器输出电压为100 kV、额定容量为10 kVA。HFCT的频带范围为1.2~100 MHz,最大灵敏度为5.83 mV/mA。

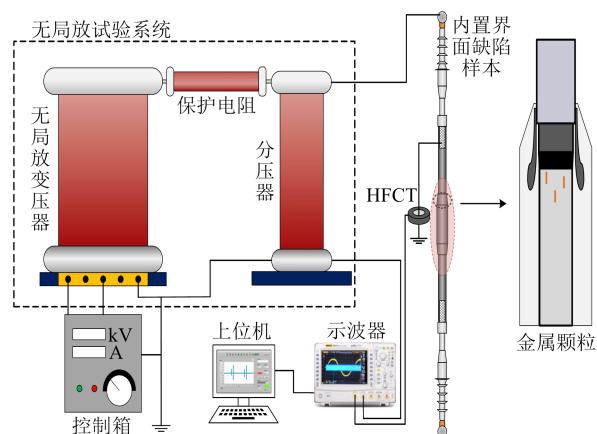


图5 电缆附件低能放电产气实验平台

Fig.5 Discharge gas generation experiment platform for cable accessories

2.3 电缆附件放电产气实验

加压前,测试正常运行工况下电缆附件的产气特性。电缆导体的额定运行温度为90℃,采用加热带缠绕冷缩绝缘管的方式加热,如图6所示。长时

间加热后,收集集气装置中的气体样本,通过GC法定量分析其中的小分子气体成分,排除正常运行中背景气体的干扰,确保结果的准确性和可靠性。

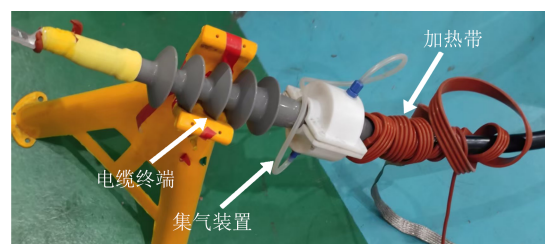


图6 电缆附件加热示意图

Fig.6 Heating schematic diagram of cable accessories

进行电缆终端低能放电产气实验时,对电缆终端施加恒定的10 kV电压,确保电缆终端出现稳定的局部放电。加压20 d,每天加压10 h,每间隔5 h采集500个工频放电周期的局放电流、电压波形。收集集气装置内气体,通过GC法定量分析其中的小分子气体成分。进行电缆终端高能放电产气实验时,对电缆终端施加19 kV的电压,一段时间后电缆终端绝缘界面发生持续电弧放电,变压器自动跳闸。通过示波器采集电缆终端高能放电期间产生的电弧放电电流、电压波形。高能放电产气实验后,静置5 min使高能放电产生的气体充分逸出到电缆附件集气装置内。收集集气装置内气体,通过GC法定量分析其中的小分子气体成分。

3 结果与讨论

3.1 界面样本产气实验结果

3.1.1 放电实验结果

在绝缘界面样本上开展界面低能放电产气实验,加压至5.6 kV时出现持续且稳定的局部放电现象,保持该电压水平持续加压48 h。分析采集到的局放电流波形,计算出在加压实验过程中局部放电总量约为 5.4×10^{-2} C,单次平均局部放电量约为 4.0×10^{-11} C。由于放电行为具有不确定性和随机性,通常统计一段时间内多个工频周期的局部放电信号,绘制局部放电相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)图进行分析。基于局部放电的电流、电压波形绘制PRPD图,基于平均局部放电量、局部放电总量采用三次样条插值法绘制其随着时间的变化关系,结果如图7所示。从图7可以看出,由于局部放电量整体较低,电压波形未出现明显的畸变现象,呈现出正弦波信号特征。局放主要分布在工

频周期一、三象限内,且随着加压时间的增加,平均局部放电量与局部放电总量整体呈现下降的趋势。与局部放电实验前绝缘界面样本相比,低能放电实验后界面样本在外观上无明显变化,未出现明显的物理损伤或形变,如图8所示。

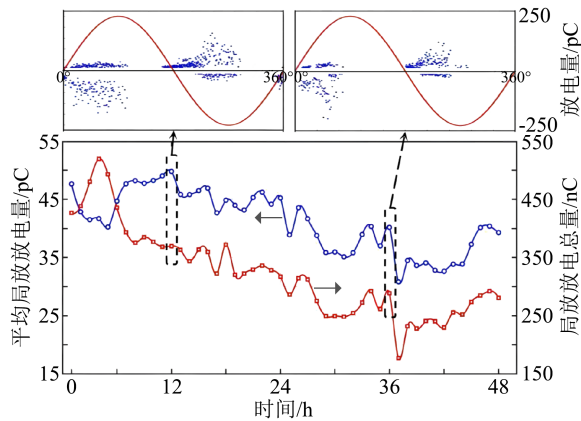


图7 局部放电量随时间变化及其PRPD图

Fig.7 The variation of partial discharge capacity with time and its PRPD diagram

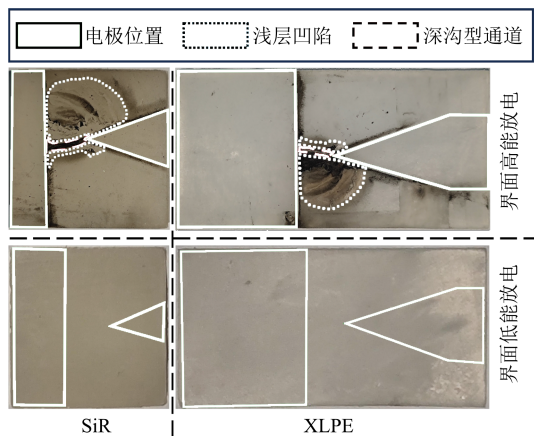


图8 界面放电实验样本

Fig.8 Interface discharge experimental samples

在绝缘界面样本上开展界面高能放电产气实验中,共记录 58 739 次放电,总放电量约为 1.6×10^{-1} C,单次平均放电量约为 2.7×10^{-6} C。实验测得的界面击穿电压、电流波形如图9所示。界面高能放电产气过程中观察到持续的燃弧现象,随着时间的推移,界面逐渐丧失绝缘性能,最终发生击穿。与实验前界面样本对比,实验后电极间的 SiR 和 XLPE 样片表面出现深沟型电痕通道,在其周围有明显的浅层凹陷。另外,界面间显现出明显的烧蚀痕迹以及大量的炭黑颗粒,如图8所示,表明持续放电作用使得材料表面发生了高温分解,出现了碳化现象。

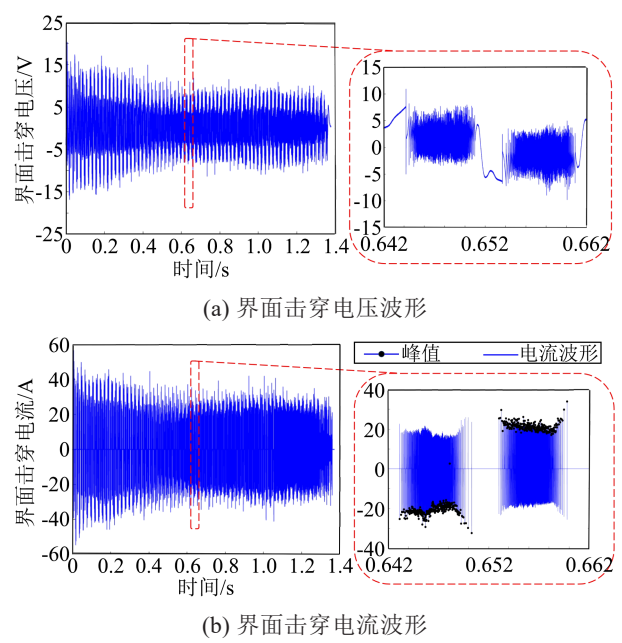


图9 界面击穿电压/电流波形

Fig.9 Interface breakdown voltage/current waveforms

3.1.2 气体测试结果

为降低实验过程中随机因素的影响,本研究对界面低能、高能放电产气实验分别重复3次。采用 GC 法对逸出气体中的小分子气体进行定量分析,检测结果如图10所示。从图10可以看出,界面低能放电产气实验中逸出气体含量从低到高依次为: CH_4 、 CO 、 H_2 、 CO_2 ,未检测到 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 气体成分。界面高能放电产气实验中逸出气体含量从低到高依次为 C_2H_6 、 CH_4 、 C_2H_4 、 CO 、 C_2H_2 、 CO_2 、 H_2 ,值得注意的是界面高能放电产生了不饱和烃的气体成分 C_2H_4 、 C_2H_2 。

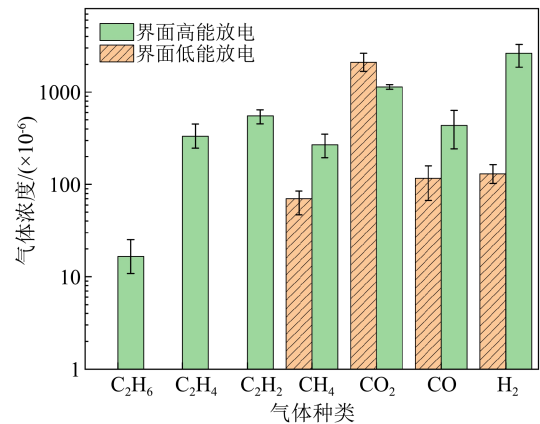


图10 绝缘界面样本产气实验气相色谱结果

Fig.10 Gas chromatography results of insulation interface sample gas production experiment

3.2 电缆附件低能放电产气结果

3.2.1 背景气体测试结果

加压前,先对电缆终端正常运行工况下的背景气体进行采集和分析。将电缆终端加热 30 d,每间隔 10 d 采集背景气体样本,通过 GC 法定量分析集气装置内小分子气体成分,结果如图 11 所示。

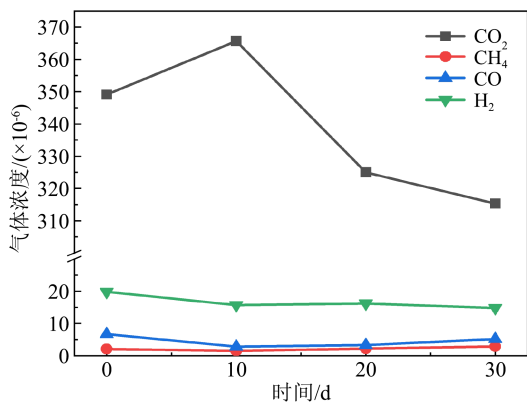


图 11 电缆终端背景气体

Fig.11 Background gas of cable termination

从图 11 可以看出,电缆终端背景气体主要成分为 CO₂,还含有微量的 CH₄、H₂及 CO。CO₂主要来源于空气,微量的 CH₄、H₂为过氧化物交联剂在高温交联反应过程中产生的气体副产物,CO 由聚合物在高温环境下发生氧化反应产生。在加热过程中气体副产物逸出,CO₂的浓度稳定在 320×10⁻⁶,CH₄、H₂及 CO 的浓度稳定在 0~20×10⁻⁶。

3.2.2 放电实验结果

为减小实验过程中随机因素对实验结果的影响,本研究重复进行 5 次电缆附件低能放电产气实验。连接好实验电路后,将电缆终端缓慢升压至 10 kV,并持续加压 20 d。每天加压 10 h,间隔 5 h 采集局放电流与电压波形。每天加压结束后,采集集气装置内气体,分析气体特征。

分析采集到的局放电压、电流信号,绘制部分 PRPD 图,采用颜色梯度表征放电点的密度分布,如图 12 所示。从图 12 可以看出,采集到的局放信号呈现明显的极性效应,从放电幅值来看,第一象限的放电幅值明显大于第三象限,从放电次数来看,第一象限同时存在少量高幅值放电和大量低幅值放电,而第三象限以低幅值放电为主。出现这种现象是由于金属颗粒与界面处存在气隙,气隙内电场严重畸变,极易引发局部放电。在工频正半周内,气隙内的空间电荷削弱了电场强度,进而提高了局

部放电的放电幅值。在工频负半周内,电离产生的电子迁移至金属颗粒,并沿表面均匀分布,质量较大的正电荷滞留于气隙内,增强了绝缘介质侧的电场强度,降低了起始放电电压,导致局部放电的放电幅值较小,呈现出典型的悬浮电位放电特征^[23]。

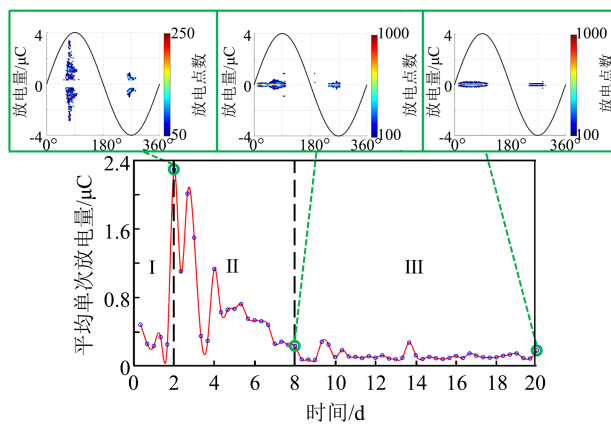


图 12 平均单次局部放电量随时间变化及 PRPD 图

Fig.12 The variation of average single partial charge capacity with time and PRPD diagram

处理采集到的电缆终端局部放电数据,得到加压 20 d 局部放电平均单次放电量随时间变化的关系,如图 12 所示。根据局放放电量的变化规律,可将界面的局部放电过程划分为 3 个典型阶段^[23]:

阶段 I: 0~2 d 内,局部放电平均放电量由 0.4 μC 左右快速上升到 2.3 μC 左右。该阶段主要为气隙内气体发生局部放电,气体的压强、成分等是影响放电的主要因素。

阶段 II: 3~8 d 内,局部放电平均放电量由 2.3 μC 左右下降到 0.1 μC 左右。该阶段气隙表面电导率上升,气隙表面空间电荷难以积累,在金属颗粒电场畸变处出现小幅值的放电。

阶段 III: 9~20 d 内,局部放电平均放电量由 0.1 μC 左右开始缓慢增长到 0.2 μC 左右。随着放电的进行,气隙内部产生了电负性气体,吸附大量空间电子,使局部放电次数减少,平均放电量上升。

3.2.3 气体测试结果

通过 GC 法测得电缆附件低能放电后集气装置内小分子气体含量随时间的变化情况如图 13 所示。

从图 13 可知,集气装置内检测到 H₂、CO₂、CO、CH₄、C₂H₆,未检测到 C₂H₄、C₂H₂,其中小分子气体的含量从低到高依次为 C₂H₆、H₂、CO、CH₄、CO₂。在 0~12 d 内,集气装置内主要气体为 CO₂,主要对应于局部放电的 I、II 两个发展阶段。在局部放电阶段 I,

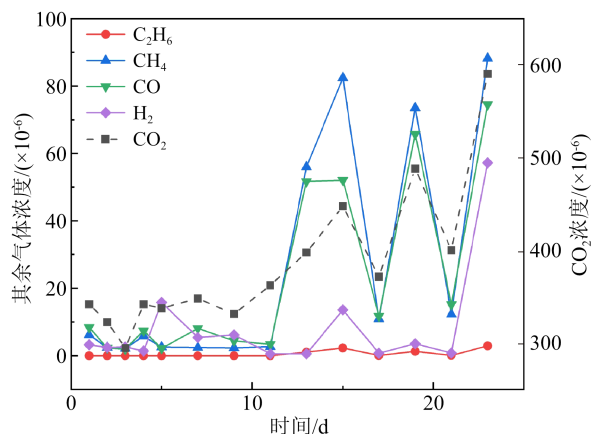


图13 小分子气体含量随时间变化关系

Fig.13 The variation of small molecule gas content with time

气隙内气体的放电为主导因素,界面内氧气被消耗。在局部放电阶段II,金属颗粒电场畸变处出现小幅值放电,绝缘材料分解产生小分子气体,气隙内压强上升,气体缓慢地沿界面逸出,界面气体逸出滞后于界面间气体的产生。在12~20 d内, H_2 、 CO 、 CH_4 、 CO_2 的含量逐渐上升,主要对应于局部放电阶段III,气隙内气体的产生与界面气体逸出达到动态平衡,气体由绝缘界面逸出到集气装置内,且气体含量逐渐上升。

3.3 电缆附件高能放电产气结果

3.3.1 放电实验结果

为减小实验过程中随机因素对实验结果的影响,本研究重复进行5次电缆附件高能放电产气实验。连接好实验电路与实验装置,确保气密性良好,对电缆终端进行高能放电产气实验。对电缆终端施加19 kV的电压,一段时间后电缆终端绝缘界面发生持续电弧放电,变压器自动跳闸。同时,通过示波器采集电缆终端电弧放电期间产生的电流、电压波形。实验后,静置5 min使界面放电产生的气体充分逸出到电缆附件集气装置内,打开气阀,使用针筒抽取气体样本,并通过GC法定量分析其中的小分子气体成分。

加压后,示波器上出现明显的电弧放电波形,保持该电压等级一段时间后,电缆终端内发出明显的放电声,说明发生了持续电弧放电现象,直至绝缘击穿,整个加压过程持续2~3 min。在电缆终端产气实验中,需要在较长时间内采集放电波形,因此将示波器的采样率设置为1 M/S。在该采样率下采集到155次放电,总放电量约为 6.8×10^{-4} C,单次平均放电量约为 4.4×10^{-6} C,实验测得的放电电压、

电流波形如图14所示。加压完成后,采集电缆附件集气装置内的气体样本,并沿轴向解剖电缆终端,观察界面击穿后的绝缘损伤情况,解剖后的电缆终端照片如图15所示,其中图15(a)为XLPE绝缘层表面,图15(b)为硅橡胶冷缩终端管内表面。从图15可以看出,电缆XLPE主绝缘层表面和冷缩终端管内表面均存在明显的黑色电痕和炭黑颗粒。这些电痕沿着不规则分布的金属颗粒轴向贯穿整个绝缘界面,且炭黑颗粒呈放射性分布在绝缘界面表面。这一现象表明,在高压放电下,XLPE和SiR界面间发生了剧烈的电化学反应,瞬间产生大量的气体产物,并以湍流形式沿界面逸出。

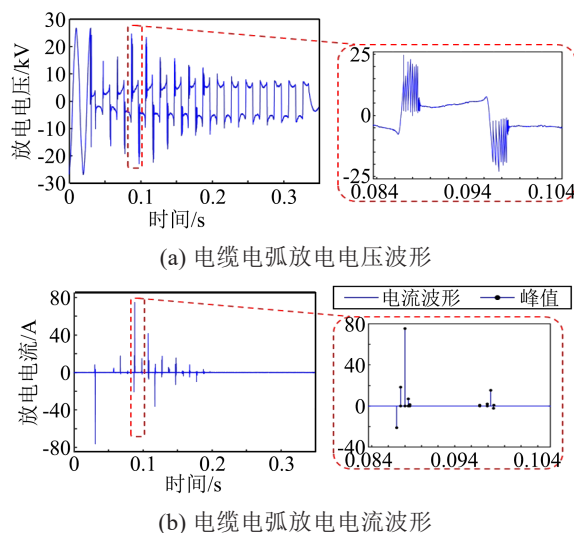
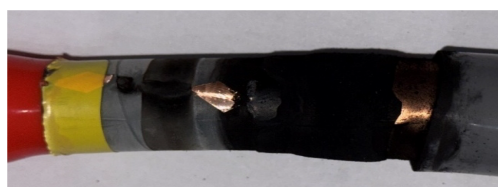


图14 电缆终端电弧放电波形

Fig.14 Arc discharge waveform of cable terminal



(a) XLPE 绝缘层表面



(b) 冷缩终端管内表面

图15 电缆终端解剖照片

Fig.15 Cable terminal anatomy photos

3.3.2 气体测试结果

对电缆附件高能放电采集到的气体样本使用

4 结论

(1) 电缆附件界面发生低能放电会引发聚合物中碳氢键的断裂和聚合物的氧化反应, 该过程的主要气态产物为 H_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 C_2H_6 。

(2) 电缆附件界面发生高能放电会释放出大量高能粒子, 导致聚合物交联网络结构发生解聚, 并生成大量烷基自由基。在电弧放电作用下, 烷基自由基发生脱氢反应, 生成 C_2H_4 、 C_2H_2 气体。

(3) 在实际电缆附件放电气体诊断中, 当检测到 CO 和 CO_2 的浓度比为 $0.10 \sim 0.70$ 时, 界面发生低能放电, 当浓度比大于 0.70 时, 界面发生高能放电。当检测到仅存在 H_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 C_2H_6 时, 表明界面发生低能放电。当检测到不饱和烃时, 表明界面发生高能放电, 其中不饱和烃占比为 $0.07 \sim 0.16$, 不饱和烃与 H_2 的浓度比为 $0.08 \sim 0.30$ 。

参考文献 References

- [1] 阳建强, 陈月. 1949-2019 年中国城市更新的发展与回顾[J]. 城市规划, 2020, 44(2): 9-19, 31.
YANG Jianqiang, CHEN Yue. Review on the development of urban regeneration in China from 1949 to 2019[J]. City Planning Review, 2020, 44(2): 9-19, 31.
- [2] UCKOL H I, ILHAN S, OZDEMIR A. Workmanship defect classification in medium voltage cable terminations with convolutional neural network[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107105.
- [3] 魏亚军, 李开灿, 董振. 基于 Tamura-HOG 纹理特征与矩特征融合的配网电缆终端故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(9): 153-158.
WEI Yajun, LI Kaican, DONG Zhen. Fault diagnosis method for distribution network cable terminal based on fusion of tamura-HOG texture and moment features[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(9): 153-158.
- [4] 庞丹, 王朝斌, 王晓岩, 等. 内置 SAW 传感器的高压电缆接头温度在线监测[J]. 压电与声光, 2021, 43(4): 505-510, 513.
PANG Dan, WANG Chaobin, WANG Xiaoyan, et al. On-line temperature monitoring of high-voltage cable joints with built-in SAW sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(4): 505-510, 513.
- [5] 徐小冰, 袁婧, 廖雁群, 等. 基于 Faster RCNN 与 Mean-Shift 的电缆附件缺陷红外图像自动诊断方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3070-3079.
XU Xiaobing, YUAN Jing, LIAO Yanqun, et al. Autonomous diagnosis method for defects of cable accessories based on faster RCNN and mean-shift algorithm by infrared images[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3070-3079.
- [6] 成立, 方伟, 王汉卿, 等. 基于非线性声学的纳米复合电介质分散性整体无损评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5401-5411.
CHENG Li, FANG Wei, WANG Hanqing, et al. Overall nondestructive evaluation method for the dispersion of nanocomposite dielectrics based on nonlinear acoustics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5401-5411.
- [7] 方春华, 胡冻三, 陶玉宁, 等. 高压电缆终端铅封缺陷超声相控阵柔性耦合检测[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 29-37.
FANG Chunhua, HU Dongsan, TAO Yuning, et al. Ultrasonic phased array flexible coupling detection of lead-sealing defects in high voltage cable terminals[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 29-37.
- [8] 张大奇. 复合绝缘内部毫米级隐含缺陷的太赫兹波谱特征与表征[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
ZHANG Daqi. Terahertz spectral characteristics and characterization of millimeter level hidden defects inside composite insulation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024.
- [9] LI S B, CAO B L, LI J, et al. Review of condition monitoring and defect inspection methods for composited cable terminals[J]. High Voltage, 2023, 8(3): 431-444.
- [10] LI S B, CAO B L, KANG Y Q, et al. Nonintrusive inspection of moisture damp in composited insulation structure based on terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-10.
- [11] 陈杨, 戴景民, 王振涛, 等. 基于近红外 TDLAS 变压器油中溶解气体在线检测装置[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(12): 3712-3716.
CHEN Yang, DAI Jingmin, WANG Zhentao, et al. A near-infrared TDLAS online detection device for dissolved gas in transformer oil[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(12): 3712-3716.
- [12] 江军, 吴睿涵, 何亚倩, 等. 基于光强调制型光热干涉法的绝缘油中乙炔传感[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8316-8327.
JIANG Jun, WU Ruihan, HE Yaqian, et al. Intensity modulated photothermal interferometry-based acetylene detection in insulation oil[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8316-8327.
- [13] 李晓彬, 汤晓君, 陈厚清, 等. 基于 FTIR 的 XLPE 电缆缓冲层烧蚀缺陷特征气体检测技术及应用[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 678-685.
LI Xiaoshan, TANG Xiaojun, CHEN Houqing, et al. Characteristic gases detection technology and application of buffer layer ablation defects in XLPE cables based on FTIR[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 678-685.
- [14] 张浩然, 高建, 武康宁, 等. 基于温度测量和气体分析的高压电缆缓冲层烧蚀故障检测技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 4929-4937.
ZHANG Haoran, GAO Jian, WU Kangning, et al. Detection technology of buffer layer ablation failure in high voltage cables based on temperature measurement and gases analysis[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 4929-4937.
- [15] 袁豪, 周凯, 孔佳民, 等. 不同缺陷条件下高压 XLPE 电缆的逸出气体特性[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 946-955.
YUAN Hao, ZHOU Kai, KONG Jiamin, et al. Evolved gas cha-

- racteristics of high-voltage XLPE cables under different fault conditions[J]. High Voltage Engineering,2025,51(2):946-955.
- [16] KONG J M, ZHOU K, CHEN Y, et al. A novel condition assessment method for corrugated aluminum sheathed XLPE cables based on evolved gas analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2023,30(2):883-891.
- [17] 郭卫,门业堃,任志刚,等. 高压电缆缓冲层烧蚀过程中电流密度与气体产物浓度的关联性研究[J]. 绝缘材料,2023,56(9):71-76.
- GUO Wei, MEN Yekun, REN Zhigang, et al. Study on correlation between current density and gas product concentration of buffer layers for high-voltage cable during ablation process[J]. Insulating Materials,2023,56(9):71-76.
- [18] 任志刚,郭卫,门业堃,等. 基于气体化学计量特征的高压电缆缓冲层烧蚀评估方法研究[J]. 绝缘材料,2025,58(4):109-116.
- REN Zhigang, GUO Wei, MEN Yekun, et al. Evaluation method for buffer layer ablation of high voltage cable based on gas stoichiometric characteristics[J]. Insulating Materials, 2025, 58(4): 109-116.
- [19] 瞿科,张文海,肖先勇,等. 基于波形衰减因子的电缆接头绝缘早期故障状态监测[J]. 高电压技术,2022,48(1):318-327.
- QU Ke, ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, et al. Condition monitoring for incipient faults of cable joint insulation based on waveform attenuation factor[J]. High Voltage Engineering,2022, 48(1):318-327.
- [20] ZHANG W H, XIAO X Y, ZHOU K, et al. Multicycle incipient fault detection and location for medium voltage underground cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2017,32(3):1450-1459.
- [21] 常文治,阎春雨,李成榕,等. 硅橡胶/胶联聚乙烯界面金属颗粒沿面放电严重程度的评估[J]. 电工技术学报,2015,30(24):245-254,261.
- CHANG Wenzhi, YAN Chunyu, LI Chengrong, et al. Assessment of creeping discharge initiated by metal particles on the silicone rubber/XLPE interface in cable joints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(24):245-254,261.
- [22] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压26/35kV及以下电力电缆附件基本技术要求 电缆接头:JB/T 8144.3—1995[S]. 北京:机械工业出版社,1995.
- National Technical Committee 213 on Electric Wires and Cables of Standardization Administration of China. Basic technical requirements for power cable accessories with rated voltages up to 26/35kV Power cable joints: JB/T 8144.3—1995[S]. Beijing: China Machine Press,1995.
- [23] 黄永禄. 电缆附件界面局放引发及发展特性研究[D]. 成都:四川大学,2021.
- HUANG Yonglu Research on the characteristics of partial discharge caused and developed by cable attachment interface[D]. Chengdu:Sichuan University,2021.
- [24] LI H, XI Z B, XU L, et al. Research on the degradation in microstructure and dielectric performance of XLPE cable insulation in service[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023,34(18):1446.
- [25] 陈熠东,周凯,雷清泉,等. 高压电缆阻水缓冲层的白斑现象及析氢腐蚀机理[J]. 中国电机工程学报,2023,43(12):4830-4839.
- CHEN Yidong, ZHOU Kai, LEI Qingquan, et al. Phenomena of white spots on the buffer layer and mechanisms of hydrogen evolution corrosion inside high-voltage cables[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(12):4830-4839.
- [26] TORIYAMA Y, OKAMOTO H, KANAZASHI M, et al. Degradation of polyethylene by partial discharge[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1967,EI-2(2):83-92.
- [27] MONKS P S, NESBITT F L, PAYNE W A, et al. Absolute rate constant and product branching ratios for the reaction between H and C₂H₃ at T=213 and 298 K[J]. The Journal of Physical Chemistry,1995,99(47):17151-17159.

收稿日期:2025-08-08;修回日期:2025-09-24。

作者简介:

刘凤莲(1986—),女(汉族),四川成都人,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术。