

基于光声麦克风的 GIS 典型绝缘缺陷声发射特征研究

肖焱艳, 赵 科, 李洪涛, 庄添鑫, 尹 泽, 高 山

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 气体绝缘开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 中的各类绝缘缺陷是导致 GIS 绝缘劣化和故障的关键诱因。传统超声检测法受限于压电传感器响应频带及 GIS 外壳谐振特性, 无法准确获取宽频带分布的局部放电信号, 影响检测有效性。因此文中采用内置式宽频光声麦克风技术, 获取金属尖刺、自由微粒、悬浮电位和环氧内部气隙等 4 种典型缺陷的宽频声发射特征。结果表明金属尖刺和自由微粒缺陷声信号呈簇状, 持续时间较长且峰值频率较低, 而悬浮电位和环氧内部气隙缺陷声信号呈脉冲状, 持续时间短且峰值频率更高; 绝缘缺陷声信号的峰值频率、幅值等与缺陷尺寸呈强相关关系, 且采用等效时间和等效频率法能对 4 种缺陷声信号进行有效区分, 为 GIS/GIL 绝缘缺陷的检测与诊断提供参考。

关键词: GIS; 金属尖刺; 自由金属微粒; 悬浮电位; 环氧内部气隙; 声发射; 光声麦克风

An Investigation Into Acoustic Emission Characteristics of Typical Insulation Defects in GIS Using an Optical Microphone

XIAO Hanyan, ZHAO Ke, LI Hongtao, ZHUANG Tianxin, YIN Ze, GAO Shan

(State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103 China)

Abstract: Insulation defects in gas-insulated switchgear (GIS) are the primary cause of insulation performance deterioration and safety accidents. The conventional ultrasonic testing method is limited by the response frequency band of the piezoelectric sensors and the resonance feature of the GIS metal shell. Broadband partial discharge ultrasound signals cannot be obtained accurately by this method, affecting the effectiveness of insulation defect detection investigate. In this study, the acoustic emission characteristics of typical insulation defects in GIS with broadband acoustic sensors, including metal spike defect, free particle defect, floating potential defect and air-bubble defect inside epoxy, were investigated. The results show that acoustic signals generated by metal tip defect and free particle defect are cluster-shaped, with a longer duration and a lower peak frequency, while that of floating potential defect is pulse-shaped, with a short duration and a higher peak frequency. Besides, it is noted that the peak frequency and amplitude of insulation defect sound signals are strongly correlated with defect size. The equivalent time equivalent frequency method can distinguish the four types of defect sound signals effectively. The research results have a guiding role in the detection and diagnosis of partial discharge acoustic signals of typical defects in GIS.

Key words: GIS; metal spike; free metal particle; floating potential; air-bubble inside epoxy; acoustic emission; optical microphone

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)凭借其可靠性高、受外界环境影响小、安装维护方便等特点而被广泛应用于电力系统中^[1-4]。实际运行经验表明, GIS 在制造、运输、装配和运行过程中不可避免地会出现金属尖刺及自由金属微粒等缺陷。这些缺陷会使得设备局部电场发生畸变, 当局部场强达到 SF₆ 击穿场强时, 则会产生局部放电(partial discharge, PD), 进而可能会发展为绝缘故障^[5-9]。因此, 对 GIS 进行及时、准确的缺

陷检测是评估其绝缘状态、预防绝缘故障、保证其安全稳定运行的关键。

相较于其他缺陷检测方法^[10-13], 超声检测法具有较强的抗电磁干扰能力和快速准确的缺陷定位能力等优势, 因而受到了国内外众多学者的关注^[14-18]。现阶段 GIS 局部放电超声检测一般是将压电式超声换能器(piezoelectric transducer, PZT)外置于 GIS 的金属壳壁上, 通过检测金属壳壁的振动强度和模态来判断其内部局部放电的发展情况, 通过分析多个 PZT 传感器所测超声信号的时序关系来对局部放电点进行定位^[19-21]。Yang 等采用 PZT

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5500-202318169A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202318169A-1-1-ZN).

传感器对 110 kV 等级 GIS 模拟装置中的金属尖刺、金属导电微粒、悬浮电极、绝缘子内部气隙和铁芯电磁冲击等 5 种典型缺陷产生的超声信号进行了探测,且指出不同类型缺陷局部放电产生的超声信号在波形、幅值上有显著差异,超声波法可以用于 GIS 局部放电的检测及缺陷类型的识别^[22]。孔凡珺等研究了 GIS 中 SF₆ 压力对于金属尖端、悬浮电极和沿面缺陷局部放电超声检测灵敏度的影响,发现超声波法在 0.2~0.5 MPa 的 SF₆ 压力下均能有效检测悬浮和尖端缺陷,且对悬浮缺陷的检测灵敏度与特高频法相当^[23]。杨宁等在 1100 kV GIS 真型模拟平台上,分别采用特高频法和超声法对电晕放电、悬浮放电、自由颗粒放电、绝缘气隙放电和绝缘表面污秽放电进行了检测,发现特高频法对悬浮电极放电和绝缘污秽放电较为敏感,超声波法对自由微粒放电和悬浮电极放电的检测效果较好,通过声电联合检测,可以弥补单一检测方法的局限性^[24]。

现有研究表明, GIS 内部不同类型缺陷的局部放电超声信号频带分布广且差异显著,对超声传感器的响应频率范围提出了更为严苛的要求^[25]。受压电材料自身谐振特性影响,传统 PZT 传感器的响应频谱均呈单峰状,其中心频率因材料不同而呈现差异,一般为数十 kHz 至数百 kHz,而其平坦频带范围通常仅为数 kHz 或数十 kHz,从而导致采用单一 PZT 传感器无法准确提取宽频带分布的局部放电超声信号,绝缘缺陷检测有效性尚存欠缺。因此,需要采用具有宽响应频带的声传感器对绝缘缺陷激发的声信号特征进行研究。同时,由于 SF₆ 和金属壳壁的声阻抗差异显著,穿透金属壳壁到达 PZT 传感器的超声信号不仅声压幅值小,而且频谱特征也会受到金属壳壁谐振特性的影响。因此,为掌握 SF₆ 中绝缘缺陷激发声波的本征特点,有必要使用内置式超声传感器进行 GIS 内部绝缘缺陷检测。

针对上述问题,文中采用内置式宽频声传感器对 4 种典型缺陷声信号进行了实验研究,包括金属尖刺、自由微粒、悬浮电位和环氧内部气隙缺陷。首先介绍 GIS 绝缘缺陷局部放电超声检测实验平台和实验方法,然后分别从时域和频域角度分析 4 种缺陷在不同条件下局部放电声信号的特征,最后

采用等效时间和等效频率法对 4 种缺陷的声信号进行了分析,指出绝缘缺陷声信号的等效时间 T_{eq} 和等效频率 W_{eq} 可以作为区分 4 种绝缘缺陷的特征参量。通过研究掌握了金属尖刺、自由微粒、悬浮电位和环氧内部气隙等 4 种典型绝缘缺陷的宽频声纹特征,为 GIS/GIL 典型绝缘缺陷的诊断提供了参考。

1 实验平台及方法

1.1 实验平台

GIS 典型缺陷声信号检测实验在 110 kV 电压等级 GIS 模拟实验平台上进行。实验平台见图 1,主要由交流高压产生与测量装置、GIS 实验腔体、缺陷模型以及局部放电检测装置组成。

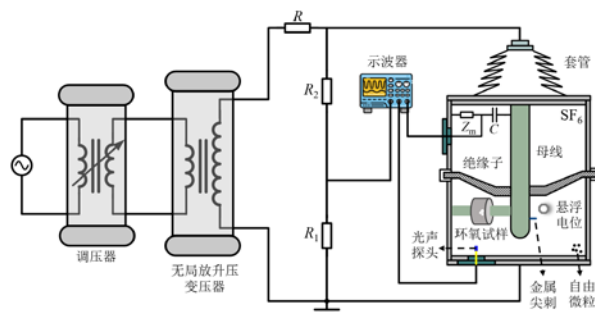


图 1 GIS 绝缘缺陷超声检测实验平台

Fig. 1 Experiment platform of acoustic emission characteristic generated by various partial discharges in GIS

交流电压由市电提供,通过调压器调节和额定最高电压为 200 kV 的无局部放电升压变压器升压,再经阻值为 50 kΩ 的保护电阻和高压套管后接入 GIS 母线,实验中采用分压比为 10000:1 的电阻分压器对母线高压进行测量。实验腔体为同轴结构,尺寸与实际 110 kV 电压等级的 GIS 腔体尺寸一致,腔体内部充有 SF₆ 气体,通过调压阀调节内部气压。

实验采用脉冲电流法和超声波法对 GIS 典型缺陷局部放电进行检测。脉冲电流法采用检测阻抗 Z_m 与耦合电容 C_x 串联回路,检测阻抗 Z_m 由阻值为 32 kΩ 的测量电阻 R_m 和感值为 500 mH 的分流电感 L_s 并联而成,耦合电容选用额定电压为 300 kV、容量为 100 pF 的无局部放电陶瓷电容器。超声波法采用固定于腔体端部内壁的宽频、无膜式光学麦克风 Eta250 Ultra 对缺陷声信号进行检测,该光

学麦克风基于介质折射率受声波调制的原理实现超声探测，其频率响应平坦频带范围为 10 Hz~1 MHz，动态范围为 50~150 dB，灵敏度达 10 mV/Pa。

1.2 实验方法

在 GIS 实验腔体内部，分别按照如下方法搭建了 4 种典型绝缘缺陷模型。

1)金属尖刺缺陷：依次在导电杆上固定长度为 3 cm、尖端曲率分别为 50 μm 和 400 μm 的钢针。

2)悬浮电位缺陷：使用绝缘扎带依次将长度为 20 mm、外径分别为 8、12、18 mm 的金属螺栓悬挂于导电杆上，调整扎带保持螺栓与导电杆表面距离约为 2 mm。

3)自由金属微粒缺陷：使直径为 1 mm 的铝珠依次从距壳壁底部 10、20、30 cm 处自由下落，模拟实际工况中自由金属微粒的跳跃运动。

4)环氧内部气泡缺陷：采用微量进样器依次向已真空脱气的环氧树脂和固化剂的混合液注入体积分别为 5 μL 和 10 μL 的空气，待其固化后形成含有 mm 级气泡的圆柱形环氧试样($\phi 50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$)，以模拟不同程度的环氧内部气泡缺陷。浇注含缺陷环氧试样时，在试样两端分别固定圆柱形铝电极($\phi 20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$)，该铝电极一方面可在环氧浇注时为微气泡提供附着面，便于气泡注入；另一方面在 PD 检测实验时可通过螺栓与导电杆和壳壁实现电气连接。安装前后的含缺陷环氧试样分别见图 2(a)、(b)。

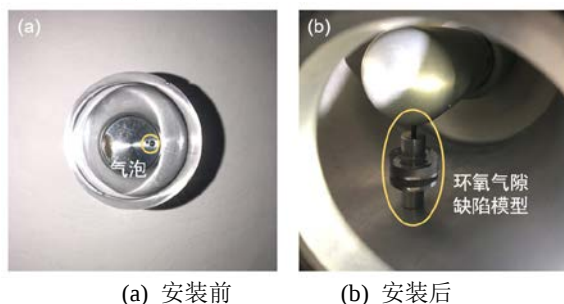


图 2 安装前、后的环氧气泡缺陷模型

Fig. 2 Epoxy specimen with air bubble defect before and after installed in GIS cavity

进行局部放电声信号检测实验时，首先将缺陷模型安装至腔体内部，使用真空泵将腔体抽至真空后再充入 SF_6 气体至表压为预设值。然后采用阶梯升压法逐步升高电压至发生局部放电，电压

每隔 2 min 升高 1 kV，将脉冲电流法首次检测到重复 PD 信号时的电压作为该缺陷的局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)，记录不同条件下各种缺陷的局部放电声信号。最后，对光声麦克风采集的声信号数据进行小波阈值降噪，并提取其时频特征。

2 实验结果

2.1 金属尖刺缺陷

首先在腔体内部 SF_6 压强为 0.1 MPa 的氛围中，对 GIS 母线上曲率分别为 50 μm 和 400 μm 的两种金属尖刺缺陷进行了局部放电检测。分别采用脉冲电流法和光声麦克风首次检测到重复 PD 时的电压见图 3。从图 3 可以发现，曲率半径较小的尖刺缺陷因其尖端周围的电场不均匀程度更高，因而局部放电起始电压也较低。同时由于放电起始时产生的声信号较微弱，故光声麦克风首次检测到 PD 时的电压高于脉冲电流法。

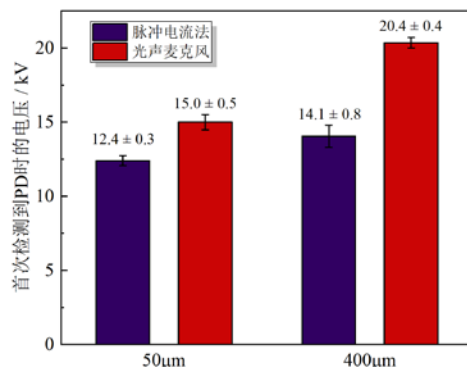


图 3 不同曲率金属尖刺缺陷的局部放电起始电压

Fig. 3 PDIV of metal tip defects with different curvature radius

在电压为 20 kV 的条件下，分别连续多次采集两种尖刺缺陷的局部放电信号，获得其典型波形分别见图 4(a)、(b)。从图 4 中可以看出，两种尖刺缺陷在单个周期内都多次发生局部放电，并且脉冲电流信号和超声信号均具有良好的时序对应关系。50 μm 尖刺缺陷发生局部放电的频次较低，脉冲电流信号呈多次的单脉冲，超声信号也因此呈多脉冲状，但单超声脉冲的持续时间较长，导致多个脉冲发生混叠，峰值声压约为 10 Pa。400 μm 尖刺缺陷发生局部放电的频次较高，脉冲电流信号和超声信号均呈簇状，峰值声压约为 8 Pa。

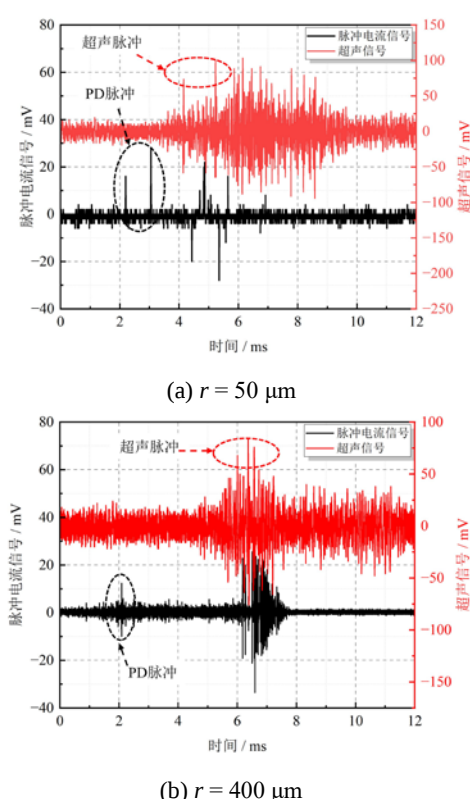


图 4 两种曲率金属尖刺缺陷的 PD 声信号

Fig. 4 PD acoustic signals generated by two metal tip defects with different curvature radius

为进一步获得两种尖刺缺陷局部放电声信号的频域特征, 采用傅里叶变换和小波变换获得图 4 中超声信号的频率分布和时频图谱分别见图 5 (a)、(b)、(c)、(d)。从图 5 中可以看出, 两种缺陷局部放电声信号的频谱均呈近似单峰分布, 且主频率成分都分布在 10~30 kHz 范围内。对于 50 μm 尖刺缺陷, 其局部放电声信号的峰值频率约为 20.1 kHz, 峰值频率出现在 6 ms 处, 即声信号的时域峰值时间。而对于 400 μm 尖刺缺陷, 其局部放电声信号的峰值频率约为 14.2 kHz, 稍低于前者, 峰值频率出现在 6.5 ms 处, 即声信号到达时域峰值。对于曲率半径较小的尖刺缺陷, 其尖端电场不均匀程度更高, 局部放电区域更小, 形成单次局部放电脉冲的时间更短, 所产生超声信号频率也更高。

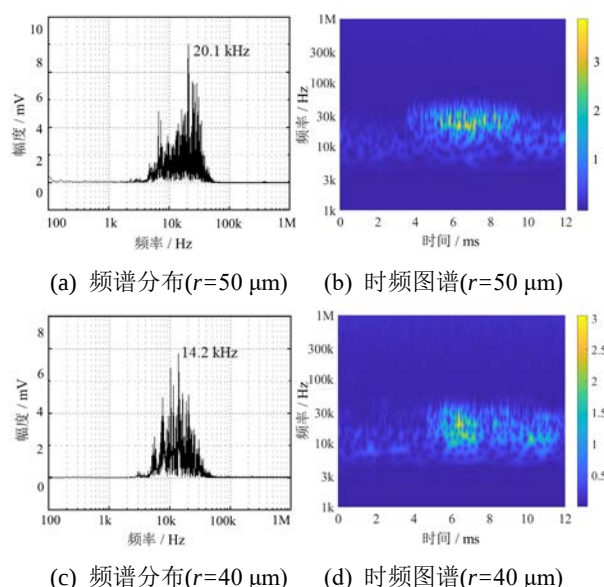


图 5 两种曲率金属尖刺缺陷 PD 声信号的频率分布和时频图谱

Fig. 5 Frequency distribution and time-frequency diagram of PD acoustic signal generated by metal tip defect

2.2 自由微粒缺陷

GIS 在安装、运行、维护过程中不可避免地会产生线形、片形甚至球形的金属微粒, 微粒在电场作用下荷电并在腔体内运动, 当其与壳壁发生碰撞时则会产生声信号。实验时使直径为 1 mm 的铝珠分别从距壳壁底部 $h=10$ 、20、30 cm 的位置处自由下落撞击壳壁, 从而模拟不同强度的微粒跳跃运动产生的声信号。同一下落距离时, 测量多次微粒撞击壳壁的声信号, 并记录多次声信号峰值的均值。3 种下落距离时光声麦克风所采集的声信号时域波形分别见图 6, 声信号峰值平均值的拟合曲线见图 7。

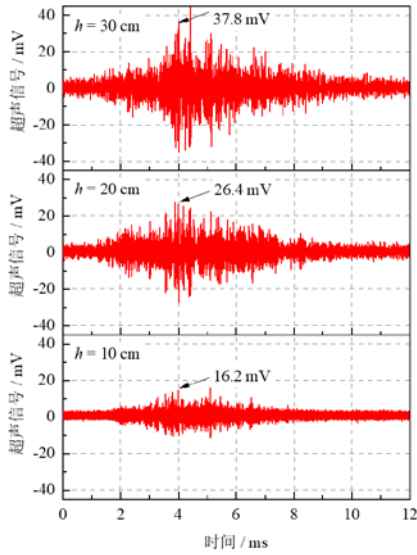


图 6 不同下落高度时金属微粒撞击壳壁的声信号
Fig. 6 Acoustic signals generated by free metal particle falling from different distances

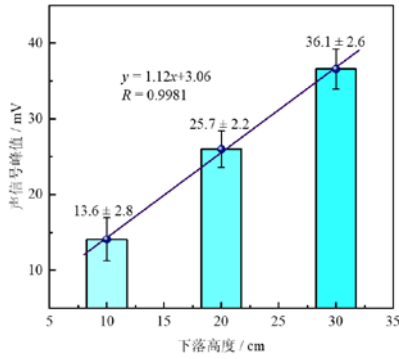


图 7 自由金属微粒缺陷的声信号峰值随下落距离的变化
Fig. 7 The correlation between falling distance and the acoustic signals peak of metal particle defect

从图 6 中可以看出，金属微粒撞击壳壁产生的声信号与尖刺缺陷局部放电产生的声信号有显著差异，后者的上升沿较陡且持续时间较短，约为数 ms，而前者上升沿较缓、持续时间长，约为数十 ms，且峰值时间不明显。从图 7 可以看出金属微粒下落时的机械能部分转化为撞击时产生的声能，且随下落高度增加，声信号峰值也近似线性增加，故可认为每次撞击时的能量转换效率相近，因此可以通过声信号强度来估算金属微粒的下落高度。

为进一步获得自由金属微粒缺陷声信号的频域特征，对图 6 中下落距离为 30 cm 时的声信号进行处理获得其频率分布和时频图谱，见图 8。从图 8 中可以看出，相对于尖刺缺陷声信号，自由金属

微粒声信号的频谱分布范围较广，主频率成分分布在 10~80 kHz 区间内，峰值频率出现在 6~12 ms 之间，约为 27.9 kHz，高于尖刺缺陷声信号的峰值频率。

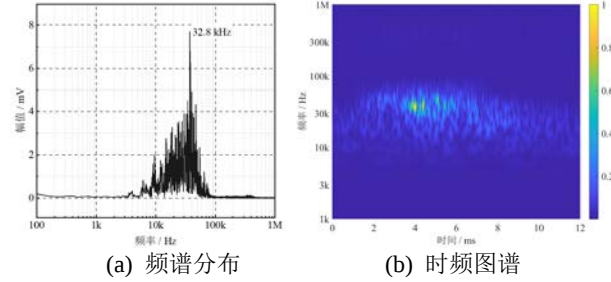


图 8 自由金属微粒撞击壳壁激发声信号的频率分布和时频图谱(下落距离 $h = 30$ cm)

Fig. 8 Frequency distribution and time-frequency diagram of acoustic signal generated by free metal particle defect (falling distance $h = 30$ cm)

2.3 悬浮电位缺陷

实验中通过将不同尺寸金属螺栓用绝缘扎带悬挂于 GIS 导电杆上，使得金属螺栓和导电杆之间保持一定距离，以此模拟悬浮电位缺陷。分别使用外径 D 分别为 8、12、18 mm 的金属螺栓作为悬浮电极体，获得不同外施电压下悬浮电位缺陷模型局部放电的声信号。

如图 9 所示是 $D=18$ mm 的悬浮电极体在外施电压为 65 kV 时产生的局部放电脉冲电流信号和超声信号。从图中可以看出，悬浮电位缺陷局部放电脉冲电流信号和超声信号与金属尖刺缺陷差异显著：前者的脉冲电流信号为高幅值、低重复频率的单脉冲，而后者为低幅值、高重复频率的脉冲簇；前者的超声信号为多个互不重叠的单脉冲，且与脉冲电流信号存在明显的时序相关性，而后者为多个相互重叠的脉冲簇，且与脉冲电流信号无明显的时序相关性。

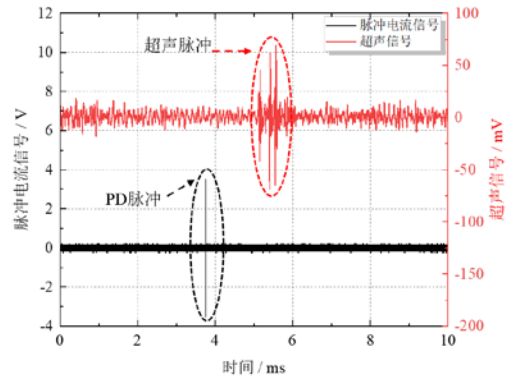


图 9 悬浮电位缺陷的局部放电声信号
Fig. 9 PD Acoustic signals generated by floating potential

defect

对图 9 中悬浮电位缺陷局部放电声信号进行频谱分析, 分别获得其频率分布和时频图谱, 见图 10。从频率分布中可以发现, 主频率成分分布 5~40 kHz 区间内, 在该区间内存在多个频率峰值, 分别为 5.2、7.3、13.2、26.7、34.4 kHz。对比图 5 和图 10 可以发现, 相对于金属尖刺缺陷, 悬浮电位缺陷局部放电声信号的频率分布范围更广, 中心频率更高。从时频图谱中可以看出, 悬浮电位缺陷局部放电声信号峰值频率出现在 5.5 ms 处, 约为 35.8 kHz, 高于金属尖刺和自由微粒缺陷声信号的峰值频率。

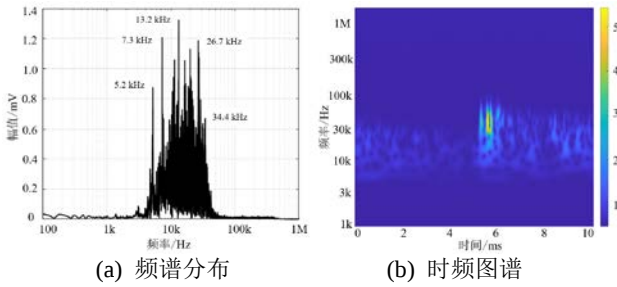


图 10 悬浮电位缺陷 PD 声信号的频谱分布和时频图谱
Fig. 10 Frequency distribution and time-frequency diagram of acoustic signal generated by floating potential defect

实验还获得了悬浮电位缺陷局部放电声信号随外施电压和悬浮电极体尺寸的变化规律见图 11。从图 11 中可以发现, 对于同一尺寸的悬浮电位缺陷, 声信号幅值随着外施电压的增加而总体呈上升趋势, 且声信号幅值的分散性也随之增加; 对于不同尺寸的悬浮电位缺陷, 相同外施电压下声信号幅值随悬浮电极体尺寸的增大而显著升高。

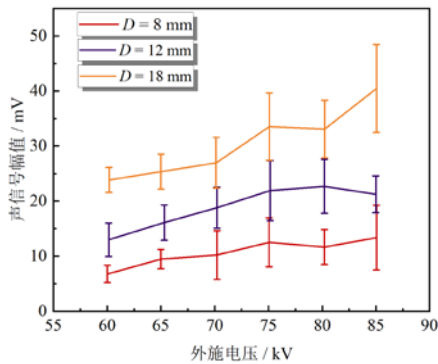


图 11 不同尺寸悬浮电极体局部放电声信号幅值随外施电压的变化规律

Fig. 11 The correlation of voltage and amplitude of PD acoustic signal generated by floating potential metal bolts

2.4 环氧内部气隙缺陷

实验时浇注含有不同尺寸、数量微气泡的圆柱形环氧试样用以模拟环氧内部气隙缺陷。环氧气隙缺陷

的局部放电声信号见图 12, 该环氧试样中含有直径 d 分别为 0.8、1.5、2.2 mm 的 3 个球形气泡, 气泡均附着于高压电极表面。

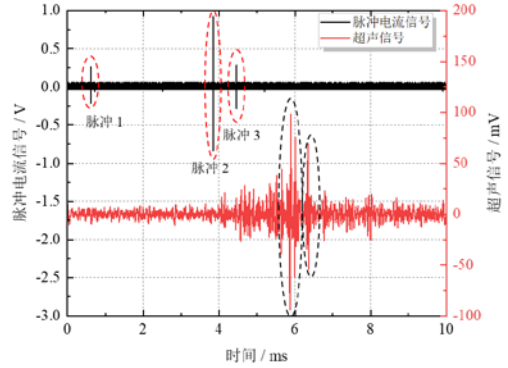


图 12 环氧气隙缺陷局部放电声信号

Fig. 12 PD Acoustic signals generated by air bubble defect inside epoxy specimen

从图 12 中可以发现, 环氧气隙缺陷局部放电声信号与悬浮电位缺陷类似, 均明显区别于金属尖刺缺陷, 即脉冲电流信号呈高幅值、低重复频率的单脉冲, 声信号与脉冲电流信号存在明显的时序相关性。从图 12 中还可发现与悬浮电位缺陷放电信号不同, 环氧气隙缺陷的声信号和脉冲电流信号在时序关系上并不严格一一对应, 存在无声脉冲跟随的脉冲电流信号, 如图中的脉冲 1。这是因为对于金属尖刺缺陷和悬浮电位缺陷, 放电发生在 SF_6 氛围中, 声波传播至光声探头的过程中衰减较少, 而环氧内部气隙放电产生的声信号须穿透环氧试样才可在腔体中传播并被光声探头拾取。因此, 气隙内部微弱放电产生的声波经过环氧的衰减作用后无法被检测到。对图 12 中的悬浮电位缺陷局部放电声信号进行频谱分析, 分别获得其频率分布和时频图谱见图 13。从图 13 可以发现, 与悬浮电位缺陷类似, 环氧气隙缺陷的主频成分分布在 5~40 kHz 区间内, 在该区间内存在多个频率峰值。

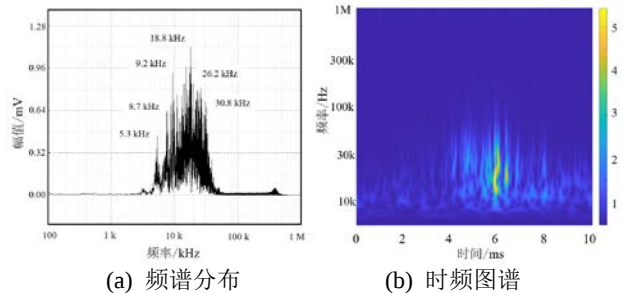


图 13 环氧内部气隙缺陷局部放电声信号的频率分布和时频图谱

Fig. 13 Frequency Distribution and time-frequency diagram of acoustic signal generated by air bubble defect

inside epoxy specimen

实验中还分别获得了环氧内部存在单气泡和多气泡缺陷时局部放电声信号随外施电压的变化规律,结果见图 14。从图 14 可以发现,对于同一缺陷试样,声信号幅值随外施电压升高而明显上升;但由于环氧气隙缺陷声信号幅值的分散性较大,故相同电压下,两个试样的声信号幅值与气泡尺寸和数量无显著相关性。

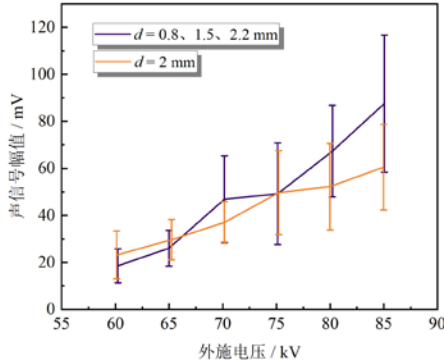


图 14 环氧气隙缺陷声信号幅值随外施电压的变化规律

Fig. 14 The correlation of voltage and amplitude of PD acoustic signal generated by air bubble defect inside epoxy specimens

3 讨论

前文中已获得 GIS 中金属尖刺缺陷、自由微粒缺陷、悬浮电位缺陷和环氧内部气隙缺陷声信号的时频特征,为进一步明晰其声发射机理以便实现缺陷识别,因此采用等效频率和等效时间法(T-F

表 1 GIS 绝缘缺陷声信号的等效时间和等效频率

Table 1 Equivalent time and equivalent frequency of electromechanical defects in GIS

参数	数值				
	金属尖刺		自由微粒 $h=30$ cm	悬浮电位 $D=18$ mm	环氧内部气隙 $d=2$ mm
	$r=50$ μ m	$r=100$ μ m			
T_{eq}/μ s	1076.35	1128.92	5186.72	527.68	686.32
$W_{eq}/$ kHz	19.64	14.56	30.64	34.28	20.24

由 T-F 法的分析结果可以发现,金属尖刺、自由微粒、悬浮电位和环氧内部气隙这 4 种典型缺陷的等效时间 T_{eq} 和等效频率 W_{eq} 存在显著区别,这表明采用 T_{eq} 和 W_{eq} 可以充分地表征 4 种典型缺陷的声发射特征差异,这为以 T_{eq} 和 W_{eq} 为特征参量的 GIS 内部局部放电缺陷的识别分类方法提供了依据。

4 结论

文中采用内置式宽频光声麦克风获得了 GIS/GIL 中的金属尖刺缺陷、自由金属微粒缺陷和

法)对 4 种缺陷声信号进行分析。T-F 法的原理如式 (1)-(3):

$$t_0 = \frac{\sum_{i=1}^N t_i s_i(t_i)^2}{\sum_{i=1}^N s_i(t_i)^2} \quad (1)$$

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_0)^2 s_i(t_i)^2}{\sum_{i=1}^N s_i(t_i)^2}} \quad (2)$$

$$W_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N f_i^2 s_i(f_i)^2}{\sum_{i=1}^N s_i(f_i)^2}} \quad (3)$$

式(1)-(3)中: t_i 是采样时刻; $s_i(t_i)$ 是 t_i 时刻的信号幅值; f_i 是频率; $s_i(f_i)$ 是频率为 f_i 的分量幅值; t_0 是采样时刻的加权平均值; 等效时间 T_{eq} 是各采样时刻 t_i 与 t_0 时刻时间差值的加权标准差,用以表征声信号的持续时间; 等效频率 W_{eq} 则是各分量频率的加权标准差,用以表征声信号的重心频率。

4 种缺陷声信号的等效时间和等效频率见表 1。

从表 1 可以发现,自由微粒缺陷声信号的等效时间最长,金属尖刺缺陷次之,悬浮电位和环氧内部气隙缺陷则最短。这是因为自由微粒缺陷声信号持续时间较长,而悬浮电位缺陷声信号呈现互不交叠的脉冲状,持续时间较短。同时,悬浮电位缺陷声信号的等效频率最高,自由微粒缺陷次之,金属尖刺和环氧内部气隙缺陷则最低,这与缺陷声信号的时频图谱结果相符。

悬浮电位缺陷的声信号时频特征。结果表明:

1)从时域角度,金属尖刺缺陷声信号呈多脉冲状,具有较陡的上升沿和较短的持续时间。而自由微粒缺陷声信号呈簇状,具有较缓的上升沿和较长的持续时间。悬浮电位和环氧内部气隙缺陷的声信号呈互不重叠的多脉冲状,声压幅值高、持续时间短。从频域角度,金属尖刺、自由微粒缺陷的声信号频谱呈单峰分布,中心频率位于 15~25 kHz; 而悬浮电位和环氧内部气隙缺陷声信号的频谱呈多峰分布,中心频率位于 20~30 kHz。

2)尖端曲率对于金属尖刺缺陷声信号的幅值无明显影响,而与声信号的峰值频率呈负相关。自由微粒缺陷声信号幅值随微粒下落高度增加而近似线性升高。悬浮电极体尺寸对悬浮电位缺陷声信号的频谱分布无明显影响,而声信号幅值则与之呈正相关。环氧内部气隙缺陷的声信号幅值与气泡尺寸、数量无明显相关性。

3)4种典型绝缘缺陷声信号的等效时间 T_{eq} 和等效频率 W_{eq} 呈现出明显差异:悬浮电位缺陷的 T_{eq} 最短、 W_{eq} 最高,自由微粒缺陷的 T_{eq} 最长,金属尖刺缺陷的 W_{eq} 最低。因此,进一步研究中可采用以 T_{eq} 和 W_{eq} 为特征参量的智能算法对局部放电声信号进行识别和分类。

参考文献:

- [1] Anis H. Gas-insulated switchgear[M]. Florida: CRC Press, 2018: 291-334.
- [2] Koch H, Goll F, Magier T, et al. Technical aspects of gas insulated transmission lines and application of new insulating gases[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1448-1453.
- [3] 冯英, 武建文, 王智, 等. GIS多频振动信号产生机理及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7863-7877.
Feng Ying, Wu Jianwen, Wang Zhi, et al. Study on generation mechanism and experiment of GIS multi-frequency vibration signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7863-7877.
- [4] 沈威, Bausch J, Koch H. 气体绝缘开关设备(GIS)的运行连续性和模块设计对其运行、维护和扩建的影响[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 136-142.
Shen Wei, Bausch J, Koch H. Influence of service continuity and module design of gas insulated switchgear(GIS)on its operation, maintenance and extension[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 136-142.
- [5] 尉元龙, 何柏娜, 崔荣喜, 等. 金属微粒对直流 GIL 盆式绝缘子电场的影响[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5):198-207.
Wei Yuanlong, He Baina, Cui Rongxi, et al. Effect of metal particles on the electric field in DC GIL basin insulator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5):198-207.
- [6] 张欣, 李高扬, 黄荣辉, 等. 不同运行年限的 GIS 缺陷率统计分析与运维建议[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 184-188.
Zhang Xin, Li Gaoyang, Huang Ronghui, et al. Statistical analysis of defects and maintenance advice for GIS in different operating years above 110 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 184-188.
- [7] 段大鹏, 王彦卿, 江阳, 等. SF₆气体绝缘开关设备典型绝缘缺陷的局部放电发展规律及诊断方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(8): 114-122.
Duan Dapeng, Wang Yanqing, Jiang Yang, et al. PD development law and diagnostic methods of typical insulation defects in SF₆ gas-insulated switchgear[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(8): 114-122.
- [8] Schichler U, Koltunowicz W, Endo F, et al. Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2165-2172.
- [9] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. GIS绝缘子局部放电高灵敏测量方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1703-1712.
Xu Yuan, Liu Weidong, Chen Weijiang, et al. High-sensitivity measurement method and application of GIS spacer partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1703-1712.
- [10] 王路伽, 房春旭, 杨海涛, 等. 基于 S11 和 S21 互比对的 GIS 局部放电特高频传感器校验仿真[J]. 电力工程技术, 2026, 45(3):28-36.
Wang Lujia, Fang Chunxu, Yang Haitao, et al. Simulation of GIS partial discharge UHF sensor verification based on S11 and S21 cross-comparison[J]. Electric Power Engineering Technology, 2026, 45(3):28-36.
- [11] 周电波, 许本茂, 张劲, 等. GIS 固体绝缘缺陷所激发特高频信号时频特征研究[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 33-41.
Zhou Dianbo, Xu Benmao, Zhang Jin, et al. Study on time-frequency characteristics of UHF signals excited by solid insulation defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 33-41.
- [12] Jiang Jun, Chen Judong, Li Jiansheng, et al. Propagation and localisation of partial discharge in transformer

- p bushing based on ultra-high frequency technique[J]. High Voltage, 2021, 6(4): 684-692.
- [13] 张晓星, 唐俊忠, 唐 炬, 等. GIS 中典型局放缺陷的 UHF 信号与放电量的相关分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 59-65.
- Zhang Xiaoxing, Tang Junzhong, Tang Ju, et al. Relationship between UHF signals and discharge magnitude from typical partial discharge defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 59-65.
- [14] 董冰冰, 李秉华, 李建生. 油纸绝缘缺陷多源局放超声混合脉冲识别方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5):176-187.
- Dong Bingbing, Li Binghua, Li Jiansheng. Multi-source partial discharge ultrasonic hybrid pulse identification method for oil-paper insulation defects[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5):176-187.
- [15] 霍 天, 吴振升, 桂俊峰. 高压开关柜局部放电声-电联合定位方法研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 62-66.
- Huo Tian, Wu Zhensheng, Gui Junfeng. Acoustic-electric joint localization method of PD in high voltage Switch cabinet[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 62-66.
- [16] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
- Li Junhao, Han Xutao, Liu Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [17] 王卫东, 赵现平, 王达达, 等. GIS 局部放电检测方法的分析研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 13-17.
- Wang Weidong, Zhao Xianping, Wang Dada, et al. Analysis on the method of GIS partial discharge detection[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 13-17.
- [18] 谢天喜, 陆云才, 石琦, 等. 用于局放声发射探测的 Sagnac 非平衡干涉超声传感技术[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6):211-217.
- Xie Tianxi, Lu Yuncai, Shi Qi, et al. Sagnac unbalanced interferometric ultrasound sensing for localised acoustic emission detection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 211-217.
- [19] 张兴辉, 常文治, 杜 非, 等. GIS 局部放电多特征量传感研究进展[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 8-16.
- Zhang Xinghui, Chang Wenzhi, Du Fei, et al. Research progress of multi-physics sensing in partial discharge of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 8-16.
- [20] Sikorski W, Ziomek W. Detection, recognition and location of partial discharge sources using acoustic emission method[M]. Acoustic Emission, 2012: 49-74.
- [21] Gong D, Chen W, Zhan Z. Analysis of ultrasonic partial discharge characteristics of GIS's reducing unit based on finite element method[C]//2022 Journal of Physics: Conference Series on Power Grid Systems and Green Energy(PGSGE), 2022: 012016.
- [22] Yang J, Shi W, Li H, et al. Analysis of partial discharge ultrasonic wave characteristic on typical defects in GIS[C]//2016 MATEC Web of Conferences on Mechatronics , Manufacturing and Materials Engineering(MMME), 2016: 01017.
- [23] 孔凡珺, 马径坦, 湛珉灏, 等. SF₆ 压力对 GIS 典型缺陷局部放电检测灵敏度的影响[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 233-241.
- Kong Fanjun, Ma Jingtan, Shen Minhao, et al. Effect of SF₆ pressure on the sensitivity of partial discharge detection of typical defects in GIS[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(3): 233-241.
- [24] 杨 宁, 毕建刚, 弓艳朋, 等. 1100 kV GIS 设备内部缺陷局部放电带电检测方法试验研究及比较分析[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 37-47.
- Yang Ning, Bi Jiangang, Gong Yanpeng, et al. Experimental research and comparative analysis on live test methods of partial discharge of internal defects in 1100 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 37-47.
- [25] Rodrigo Mor A, Castro Heredia L C, Muñoz F A. Effect of acquisition parameters on equivalent time and equivalent bandwidth algorithms for partial discharge clustering[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017(88): 141-149.
- 肖焱艳(1992—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为开关设备状态检测与评价技术 (E-mail : 15950559834@163.com)。
- 赵 科(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为开关设备状态检测与评价技术 (E-mail : 15105168884@163.com)。
- 李洪涛(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向

为开关设备状态检测与评价技术(E-mail: 5pro@163.com)。

庄添鑫(1995—)，男，硕士，工程师，研究方向为开关设备状态检测与评价技术 (E-mail : 1024060195@qq.com)。

尹 泽(1993—)，男，博士，工程师，研究方向为开

关设备状态检测与评价技术(E-mail: sdkyinze@163.com)。

高 山(1971—)，男，硕士，教授级高级工程师，研究方向为开关设备状态检测与评价技术 (E-mail : jsepcgs@aliyun.com)。