

基于光子和光强测量的 GIS 金属粉尘局部放电特征研究

林川杰¹, 王 阳¹, 卢诗鸿¹, 陈 宁¹, 张润昊¹, 吴 桐¹, 范贤浩², 李传扬^{2*}

(1. 国网福建省电力有限公司福州供电公司, 福建 福州 350009;

2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘 要: 粉尘状金属微粒常见于运行多年的 GIS 腔体内部。然而, 对于金属粉尘是否会引发局部放电进而对 GIS 绝缘造成危害等问题目前尚无定论。鉴于此, 本文基于光学(光子计数及光强)、特高频、超声及脉冲电流法, 研究交流电压下不同粒径和单位面积浓度的金属粉尘局部放电特征, 明确不同测量方法对粉尘微粒诱发的局部放电信号测量的适应性, 并对粉尘堆积引发绝缘气体放电电压降低的机制进行初步探索。结果表明: 相比于光学法, UHF、超声与脉冲电流法对金属粉尘局部放电测量的灵敏度较低; 金属粉尘产生的光子数量随单位面积浓度和电场强度增加而上升, 且测得的局放光强信号幅值与粉尘粒径呈正相关。此外, 金属粉尘堆积会在一定程度上降低 GIS 气体间隙的绝缘性能。

关键词: 气体绝缘开关设备; 金属粉尘; 光子计数; 缺陷检测; 气隙击穿

Research on partial discharge characteristics of metal dust in GIS based on photon counting and light intensity measurements

LIN Chuanjie¹, WANG Yang¹, LU Shihong¹, CHEN Ning¹, ZHANG Runhao¹,

WU Tong¹, FAN Xianhao², LI Chuanyang^{2*}

(1. Fuzhou Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350009, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Dust-like metal particles are commonly found inside the cavity of GIS that has been operated for many years. However, there is still no clear conclusion as to whether the metal dust will cause partial discharge (PD) and thereby pose a threat to the GIS insulation. In this study, five measurement techniques including photon counting, optical intensity, UHF, ultrasonic, and pulse current methods were employed to investigate the PD characteristics of metal dust with different particle sizes and unit area concentrations under AC voltage. The adaptability of different measurement methods to the measurement of local discharge signals induced by dust particles was clarified, and the mechanism of discharge voltage reduction for insulating gas caused by dust accumulation was preliminarily examined. The results show that compared to optical methods, UHF, ultrasonic, and pulse current methods show lower sensitivity to PD signals generated by metal dust. The number of photons generated by metal dust increases with the increase of unit area concentration and electrical field strength, and the amplitude of PD optical intensity signals shows a positive correlation with the particle size of dust. Furthermore, the accumulation of metal dust will to some extent reduce the insulation performance of the gas gap in GIS.

Key words: gas insulated switchgear; metal dust; photon counting; defect detection; air gap breakdown

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)因其绝缘性能良好、占地面积小、容量大等优点在电力系统中得到广泛应用^[1]。然而, GIS 设备在生产、安装、运输与运行等环节均有可能引入金属微粒^[2], 进而导致其运行过程中面临金属微粒引发的偶发放电问题。据统计, 近 10 年来由金属微粒导

致的局部放电在 GIS 异常放电事故中占比高达 79%^[3-4]。因此, 对于金属微粒诱发放电的检测研究受到广泛关注。

在 GIS 内部, 金属异物的形态和尺寸差异较大, 涵盖了从亚毫米级到厘米级的范围。随着 GIS 生产工艺的不断完善, 厘米级金属微粒的出现已经变得极为罕见。目前, 在现场检查中发现的金属异物主要以毫米级微粒和微纳米级金属粉尘为主^[5]。在电场的作用下, 这些金属异物在 GIS 设备内部的运动

基金项目: 国网福州供电公司科技项目(SGTYHT/23-JS-001)。

与聚集成为导致偶发性放电故障的潜在诱因。

GIS设备内部发生局部放电的同时,往往伴随光信号的发射,因此基于光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)的光学测量方法在局部放电检测中展现出潜力^[6]。相较于超高频(UHF)与超声测量手段,光学测量方法具有不易受外界电磁环境以及GIS设备现场震动干扰^[7]的性能优势。同时, GIS设备内部封闭环境也为光学测量方法的应用提供了环境基础。光子计数技术将PMT与计数模块集成,具有高信噪比、对微弱光信号高响应灵敏度等特性^[8]。已有研究表明,该技术在金属微粒放电检测中具有良好的应用前景,然而当前研究主要聚焦于毫米级金属颗粒,针对亚毫米级乃至微米级金属颗粒的测量尚缺乏系统性研究^[9-10]。

针对金属粉尘对电气性能的影响研究已有相关报道,梁瑞雪等^[11]发现金属粉尘可引发3类典型放电现象:沿面闪络、气隙击穿及扩散式爆炸;薛乃凡等^[12]对金属粉尘在盆式绝缘子附近的吸附行为与击穿模式进行了分析;王媛等^[13]基于弥散浓度光探测系统量化分析了微纳米级金属粉尘对直流气隙电气强度的影响。现有研究普遍认为金属粉尘对气隙绝缘性能的影响有限^[14-16]。然而,受限于现有测量手段的灵敏度,金属粉尘诱发的微弱局部放电信号难以被准确捕捉^[17-18],此外,目前关于金属粉尘在交流电压下对气体绝缘击穿特性的影响研究多停留在现象与机理分析层面,尚缺乏定量评估。

本文搭建基于光学、特高频、超声及脉冲电流法联合测量的局部放电试验平台,探索不同粒径与单位面积浓度金属粉尘局部放电光子数及其相位分布图谱,并传统光电倍增管法测得的局部放电信号进行对比分析。此外,还对极端条件下金属粉尘的危害机制进行量化研究,分析光子数的变化趋势,并通过调节金属粉尘作用下外加电压与粉尘单位面积浓度,进一步明确气体间隙发生击穿的边界条件。研究有望为GIS内部金属粉尘的识别与危害评估提供技术支撑和数据参考。

1 试验

1.1 试验平台

图1为金属粉尘局部放电联合测量试验平台,平台置于全遮光暗室内。为便于研究局部放电发生机制和发展过程,采用ZL101A铝合金制成的平

板电极,极板间距为10 mm,以模拟GIS内电场环境,电极间设有石英玻璃罩,用于限制金属粉尘的运动范围。整体装置置于耐压试验腔体内,腔体通过SF₆气体回收系统维持0.2 MPa的相对气压。

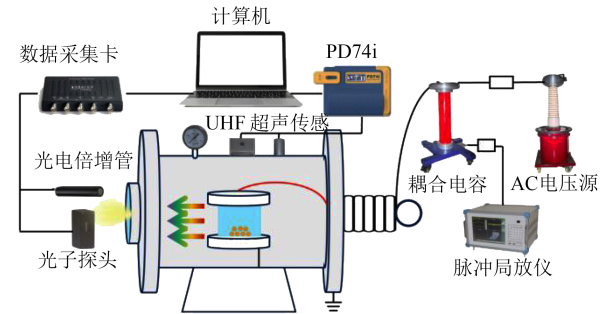


图1 金属粉尘局部放电特性测量试验平台示意图
Fig.1 Schematic diagram of metal dust partial discharge characteristics measurement detection platform

针对金属粉尘运动特征试验,采用型号为WP-UT130M的工业相机及补光灯组合进行观测。该相机分辨率为1 280×1 024,帧率最高可达到210 fps。

针对金属粉尘局部放电特征,采用光学、特高频、超声及脉冲电流法联合测量。其中,光子计数探头(滨松公司,型号为H8259-01)可将单光子信号转换为电脉冲信号,其暗计数典型值为80次/s,光电倍增管(滨松公司,型号为H10493-001)输出模拟电压信号,典型噪声电压小于2 mV^[18]。UHF与超声传感器测量采用SDMT公司生产的Pd74i型手持式无线PD探测器,脉冲电流法所用测试设备为武汉福禄德公司生产的FLDJF-T型脉冲局放仪。试验时,UHF传感器与超声传感器的背景噪声分别维持在-78 dBm与1.5 mV以下,其中UHF传感器灵敏度为0.1 pC,脉冲电流局放仪灵敏度为0.1 pC,试验时背景噪声保持在1 pC以内。光传感器的光谱范围与声电传感器的测量频带如表1所示。

表1 传感器参数				
Table 1 Parameters of sensors				
传感器类型	型号	光谱范围/nm	测量频率	
光传感	光子计数探头	H8259-01	185~850	—
	光电倍增管	H10493-001	300~650	—
声电传感	UHF传感器	Pd74i	—	300~1 500 MHz
	超声传感器	Pd74i	—	10~30 kHz
	脉冲局放仪	FLDJF-T	—	10~1 000 kHz

试验过程中采用阶段升压,每个阶段电压维持10 s。测量时光子计数探头的暗计数率控制在50次/s以内。通过相位过零检测器触发后,光子计数

探头采集 1 s 内数据并上传至工控机,生成实时光子计数曲线及光子相位分布图谱。光电倍增管信号由型号为 PS2000a(采样率最高 1 G/s)的数据采集卡经相位信号触发后采集并同步上传至工控机,生成局部放电光强相位分布图谱。UHF 与超声传感器测得的信号则通过 Pd74i 型局部放电检测系统内置的数据终端进行处理。

1.2 试验样品

对一台 220 kV GIS 断路器进行 7 000 次开断,收集脱落金属粉尘并对其特性进行分析^[19],基于分析结果设置 4 种粒径(100、75、50、25 μm)的铝粉作为试验样品,铝粉样品显微镜照片如图 2 所示。从图 2 可以看出,不同粒径铝粉颗粒形状均表现为不规则形态。

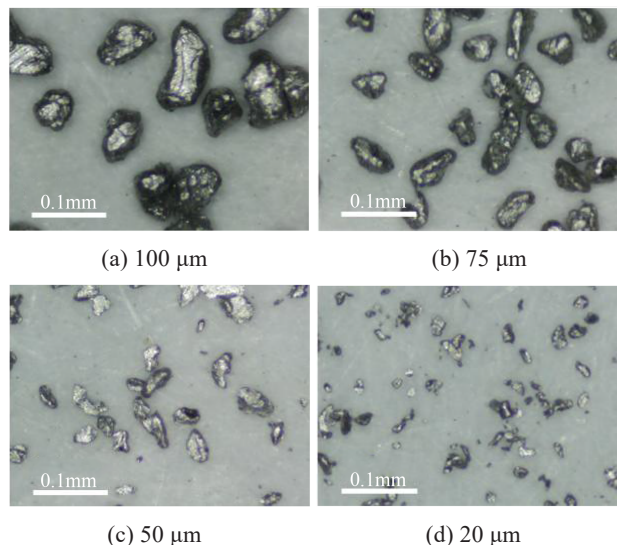


图2 金属粉尘显微图

Fig.2 Microscopic images of metal powder

根据现场调研结果,金属粉尘多聚集于 GIS 底部或局部高场强区域。基于此,为便于量化试验结果,将地电极表面上的金属粉尘质量归一化到单位面积,定义为金属粉尘的单位面积浓度,如式(1)所示。

$$\sigma_m = \frac{m}{A} \quad (1)$$

式(1)中: σ_m 为金属粉尘的单位面积浓度; m 为地电极表面的金属粉尘总质量; A 为对应的电极面积。

以平板电极与石英玻璃罩之间的夹持区域作为金属粉尘的分布面积,针对 4 种粒径的铝粉设置 4 种不同单位面积浓度(0.217、0.434、0.868、43.40 mg/cm^2)进行试验。

2 金属粉尘运动特征

表 2 为铝粉起跳试验结果。从表 2 可知,不同粒径的铝粉起跳场强分布在 0.38~0.42 kV/mm 范围内,数值相差不大,粒径对铝粉受电场力作用下的运动行为影响相对有限。图 3 展示了粒径为 100 μm 的铝粉在电场作用下的运动过程,随着场强逐渐增大,金属粉尘运动状态呈现阶段性变化,可大致分为 3 个阶段:①当极板间场强达到 0.38~0.87 kV/mm 时,少量铝粉从顶部起跳并反复弹跳,起跳高度大约为 3 mm;②当场强进一步增大至 1.21~1.39 kV/mm 时,铝粉堆表层粉尘开始运动,且跳跃高度随着场强增加而上升,处于 5~7 mm;③当场强达到 1.56~1.73 kV/mm 时,所有铝粉均起跳并剧烈运动,高度达到板电极内空间最大值(10 mm)。

表2 金属粉尘起跳场强

Table 2 Onset electric field strength of metal dust

粒径/ μm	起跳场强/(kV/mm)
100	0.38±0.01
75	0.39±0.01
50	0.38±0.01
25	0.42±0.02

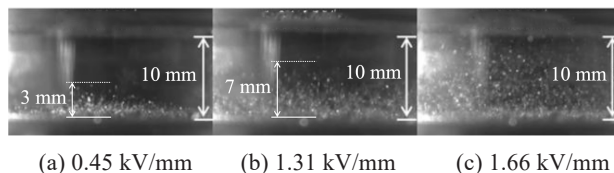


图3 100 μm 铝粉运动图

Fig.3 Motion of 100 μm aluminum powder

3 金属粉尘局部放电测量结果

3.1 超声、UHF 及脉冲电流法测量结果

当铝粉粒径为 100 μm 、单位面积浓度达到 43.4 mg/cm^2 ,且外加电压升高至 20 kV 时,UHF 传感器检测到少量局部放电信号,测量结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,大部分信号竖直分布于电压负半周期,最大幅值为 -60 dBm(测量阻抗为 50 Ω)。在相同试验条件下,超声传感器及脉冲电流法均未检测到明显的局部放电信号。

3.2 光子及光强测量结果

3.2.1 光子特征

不同粒径、单位面积浓度铝粉在不同电压下 10 s 内的光子数累计测量结果如图 5 所示,光子数起始电场与最高电场下的光子数测量结果如表 3 所示。

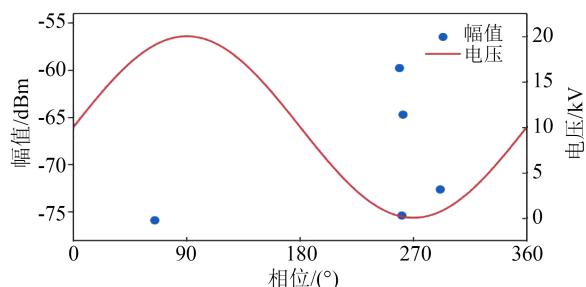


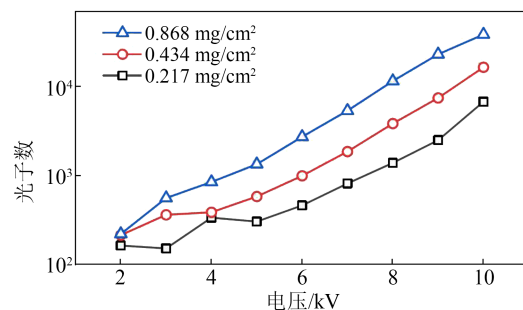
图4 UHF传感器在铝粉单位面积浓度为43.40 mg/cm²时的测量结果

Fig.4 Measurement results of UHF sensor at aluminum powder concentration of 43.40 mg/cm²

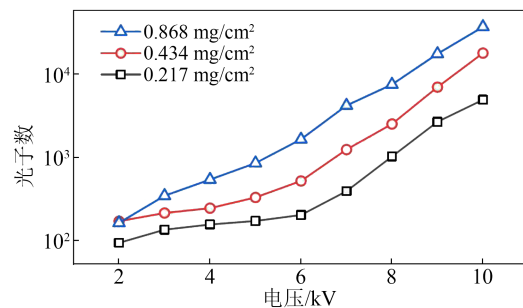
从图5和表3可以看出,对于粒径为100 μm的铝粉,当单位面积浓度为0.868 mg/cm²和0.434 mg/cm²时,其起始电场均约为0.42 kV/mm,在该电场下可测得高于背景噪声的光子信号,对应光子总数分别为362和560;当单位面积浓度为0.217 mg/cm²时,起始电场升高至约0.57 kV/mm,光子总数为336。随着电场进一步增强,该粒径下单位面积浓度为0.217、0.434、0.868 mg/cm²的铝粉导致的光子数在最终场强为1.41 kV/mm时分别上升至6 811、16 668和39 088。

粒径为75 μm的铝粉在单位面积浓度为0.868 mg/cm²时,测得高于背景噪声的光子信号起始电场为0.42 kV/mm,对应的光子数为349;而在单位面积浓度为0.434 mg/cm²和0.217 mg/cm²时,起始电场均上升为0.57 kV/mm,对应光子数为158和248,最终电场为1.41 kV/mm时单位面积浓度为0.217、0.434、0.868 mg/cm²的铝粉光子数分别达到了4 953、18 016和37 237。对于粒径为50 μm的铝粉,在电场低于0.42 kV/mm时未能测得有效信号,而在电场为0.57 kV/mm时,3个单位面积浓度下的光子数分别达到146、192和247,随后在更高电场下持续增加,最终在电场为1.41 kV/mm时3个单位面积浓度下的光子数分别达到9 040、19 189和39 822。对于粒径为25 μm的铝粉,3个单位面积浓度下的起始场强均为0.57 kV/mm,光子数分别为533、710和1 130。随着最终电场增强至1.41 kV/mm时,3个单位面积浓度下的光子数分别达到12 109、17 659和3 9817。

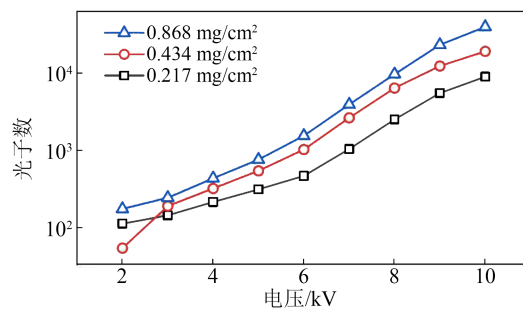
不同粒径铝粉的光子起始测量电场均处于0.42~0.57 kV/mm范围内,对应的运动状态为少量铝粉起跳,此时光子测量已能够实现有效响应;随着施



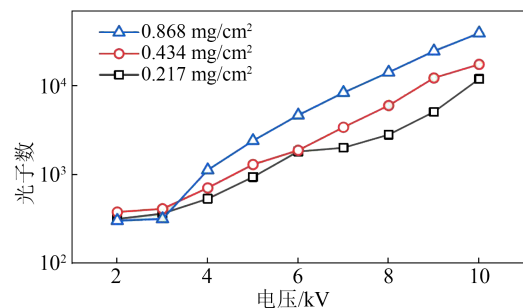
(a) 粒径为100 μm



(b) 粒径为75 μm



(c) 粒径为50 μm



(d) 粒径为25 μm

图5 不同粒径、单位面积浓度铝粉在不同电压下的光子数测量结果

Fig.5 Measurement results of photon numbers of aluminum powder with different particle sizes and unit area concentrations under different voltages

加电场的进一步升高,铝粉运动逐渐增强,光子数亦呈逐步上升的趋势。

对光子测量数据特征进一步提炼,得到平均光子数变化规律如图6所示。从图6可以看出,光子

表3 起始和最高场强下的光子计数结果
Table 3 Photon counting results under initial and maximum field strength

粒径/ μm	单位面积浓度/ (mg/cm^2)	起始/最终电场/ (kV/mm)	起始/最终光子数
100	0.217	0.57/1.41	336/6 811
	0.434	0.42/1.41	362/16 668
	0.868	0.42/1.41	560/39 088
75	0.217	0.57/1.41	158/4 953
	0.434	0.57/1.41	248/18 016
	0.868	0.42/1.41	349/37 237
50	0.217	0.57/1.41	146/9 040
	0.434	0.57/1.41	192/19 189
	0.868	0.57/1.41	247/39 822
25	0.217	0.57/1.41	533/12 109
	0.434	0.57/1.41	710/17 659
	0.868	0.57/1.41	1 130/39 817

数会随着铝粉单位面积浓度的升高而增加。在电

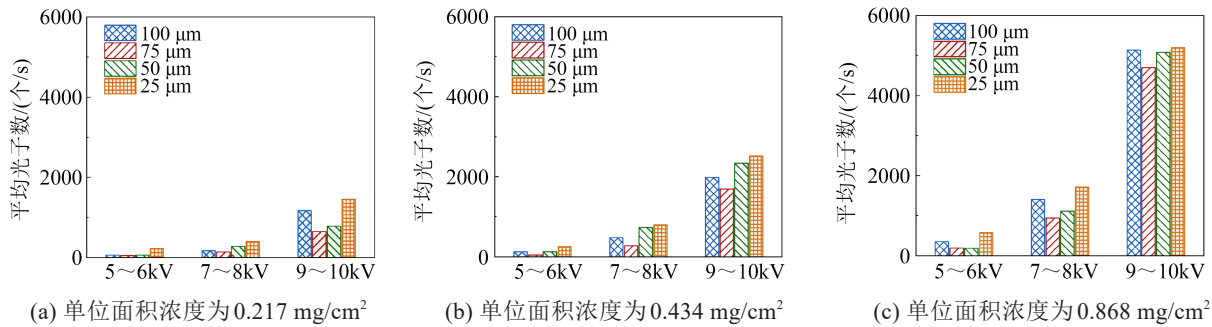


图6 相同单位面积浓度铝粉在不同电压和粒径下的平均光子数对比结果

Fig.6 Comparison of average photon numbers results of aluminum powder with the same concentration under different voltage and particle sizes

单位面积浓度为0.434 mg/cm^2 时不同粒径铝粉在工况电场下积累 10 s 的光子/光强相位分布图谱如图 7 所示。从图 7 可以看出,不同粒径铝粉的光子相位分布图谱以及光强相位分布图谱特征相似,二者均为对称分布结构且均存在约 45° 的相位偏移现象。

然而,通过对相同实验条件下测得的光强局放信号进行对比发现:随着铝粉粒径的减小,光强局放信号幅值呈现下降趋势。根据该现象可进一步推测,若继续减小铝粉粒径,光学测量方法存在无法有效测量金属粉尘的可能性。其原因可能为粒径金属粉尘减小后,单个颗粒放电能量相应降低,使得光强信号的整体幅值显著减小,当光发射量不足时,测量结果易受到噪声干扰,从而限制了该方法对更小粒径金属粉尘的有效检测。

压和单位面积浓度相同的条件下,铝粉产生的光子数随粒径减小先降低后升高,并在粒径为 $25\ \mu\text{m}$ 时达到峰值,但总体而言不同粒径下产生的光子数差距较小。产生这一现象的原因可能与不同粒径铝粉运动中的空间分布特性相关,较大粒径铝粉在相同电压下局部放电活动相对分散,单颗贡献较大但累积效应有限,当粒径减小时,相同单位面积浓度铝粉在空间上分布更加密集,局放光子信号的累积效应增强,从而导致光子数上升。

3.2.2 光强特征

在进行铝粉的光子测量时,同步获取了其对应的光子相位分布图谱 (phase resolved photon counting, PRPC),同时通过数据采集卡触发采集获取了光电倍增管测量的局部放电光强相位分布图谱 (phase resolved partial discharge, PRPD)。

4 金属粉尘危害机制研究

由于 GIS 设备内金属粉尘运动聚集从而导致电场畸变程度增加,威胁设备运行安全,试验针对不同单位面积浓度的铝粉对地电极气隙绝缘危害机制开展量化研究。

4.1 铝粉危害性试验

在第 3 节的铝粉局放特性测量中,少量铝粉(单位面积浓度低于 $0.868\ \text{mg}/\text{cm}^2$)在工况电场下导致的局放信号,除光学传感器外其余传感器检测到的信号均较为微弱,且在试验过程中没有引发击穿现象,因此可以认为在该单位面积浓度下铝粉对绝缘气隙造成的危害相对有限。为模拟极端情况下的测量结果,选择了粒径为 $100\ \mu\text{m}$ 与 $25\ \mu\text{m}$ 两种产生光子数较高的铝粉样品,将其单位面积浓度提升至局部放电测量试验最高值的 20 倍(单位面积浓度为

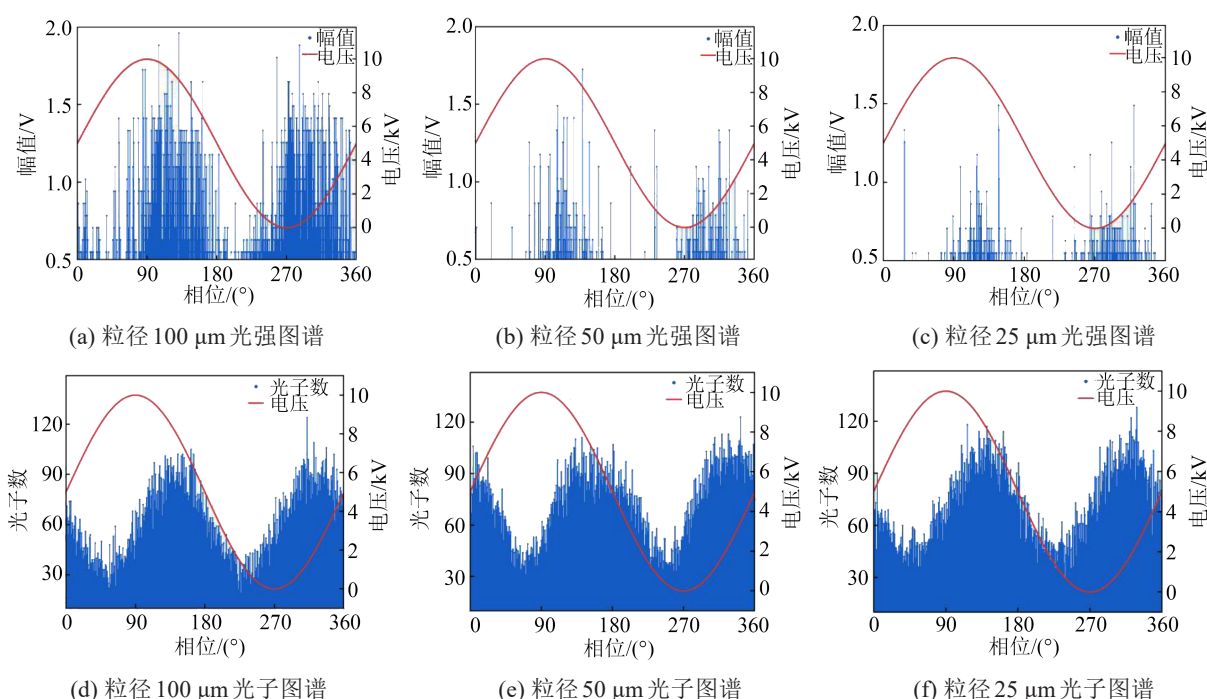


图7 不同粒径铝粉在10 kV电压下积累10 s测得的光子相位分布图谱与局部放电光强相位分布图谱

Fig.7 PRPC and PRPD spectra of aluminum powder with different particle sizes under 10 kV voltage accumulated for 10 s

43.40 mg/cm²),此时铝粉几乎覆盖地电极表面,该状态在实际工程应用中很难出现。在此极端条件下对铝粉样品开展耐压试验,分别施加5、10、15 kV电压,最高电压等级对应约为GIS运行工况下地电极表面场强的1.5倍,每个电压维持至少15 min,耐压过程中使用光子传感器同步测量,试验结果如图8所示。从图8可以看出,当电压保持恒定时,不同粒径铝粉在气隙中产生的光子信号表现出一定的规律性。对于粒径为100 μm的铝粉,当电压升高至5 kV时,光子数迅速升高至 9.1×10^3 个/s,但当电压保持恒定时,光子数随时间逐渐回落至 6.4×10^3 个/s,回落幅度为29%。当电压升高至10 kV时,光子数攀升至 1.6×10^5 个/s,随后在电压保持恒定时逐渐回落至 2.4×10^4 个/s,回落幅度为85%。当电压升高至15 kV时,光子数随电压再次升高至 1.7×10^5 个/s,随后在电压保持恒定时逐渐回落至 1.0×10^5 个/s,回落幅度为42%。

粒径为25 μm的铝粉在5 kV与10 kV电压下产生的光子信号变化规律相似。5 kV电压下光子数攀升至 7.4×10^3 个/s后回落至 3.0×10^3 个/s,回落幅度为43%,且在5 kV电压时,光子数波动幅度较大。10 kV电压下光子数攀升至 2.2×10^5 个/s后回落至 1.2×10^5 个/s,回落幅度为44%。但当电压进一步升高至15 kV时,光子数变化趋势转变为随时间而逐

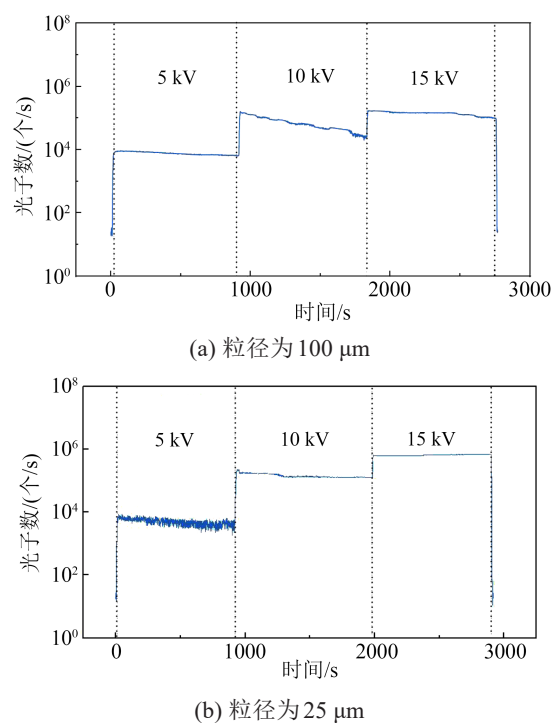


图8 单位面积浓度为43.40 mg/cm²时铝粉的光子测量结果

Fig.8 Photon number results of aluminum powder with a concentration of 43.40 mg/cm²

渐升高的趋势,具体从 6.6×10^5 个/s逐步升高至 7.0×10^5 个/s,且相较于粒径为100 μm的铝粉,其在15 kV时的峰值光子数也更高,依据其持续升高的趋势推

测,后续可能存在气隙击穿的风险。

总体而言,即便在模拟的极端单位面积浓度与高场强条件下,铝粉样品对绝缘气隙的危害程度仍然有限。尽管在试验中测量到了较高水平的光子数,但在工况场强下其放电剧烈程度会逐渐回落,且在耐压过程中并未出现直接引发气隙击穿的现象。

4.2 击穿边界条件

为定量探究铝粉引发气隙击穿的边界条件,参考 4.1 节的试验结果,在保持最高电压等级(15 kV)不变的前提下,以粒径为 25 μm 、单位面积浓度为 43.40 mg/cm^2 为基准,逐步提高铝粉的单位面积浓度,得到击穿试验结果如表 4 所示。从表 4 可知,即便铝粉单位面积浓度提升 10 倍(即 434.0 mg/cm^2),此时铝粉已在地电极表面形成约 0.5 mm 厚的粉层,气体间隙仍未发生击穿。鉴于该试验条件下金属粉尘单位面积浓度已接近极限,继续提升单位面积浓度的实际意义有限。

表 4 不同单位面积浓度铝粉条件下气体间隙
击穿试验结果

Table 4 Gas gap breakdown test results of aluminum
powder at different concentrations

单位面积浓度/(mg/cm^2)	最高场强/(kV/mm)	试验结果
130.2	1.7	未击穿
260.4	1.7	
434.0	1.7	

因此,在铝粉单位面积浓度为 434.0 mg/cm^2 的基础上逐步提高施加电压,最终在场强升高到约 3.7 kV/mm 时瞬间发生击穿,如图 9 所示,打开腔体后发现腔体内内壁附着白色粉末,且平板电极间出现相对位移,电极表面存在明显烧灼痕迹,推测击穿形式表现为剧烈的“爆炸”放电。击穿后可观察到石英玻璃罩内附着大量白色粉末,可能为放电后生成的氟化铝。

5 结论

基于平板电极,研究了 4 种粒径的铝粉在不同电压下的局部放电响应特性,并对铝粉的危害机制进行了量化分析,得出如下结论:

(1)基于本文试验条件与测试参数,除光子测量与光电倍增管外,传统 UHF、超声与脉冲电流法在金属粉尘单位面积浓度低于 43.40 mg/cm^2 时均未表现出有效的局部放电检测能力。

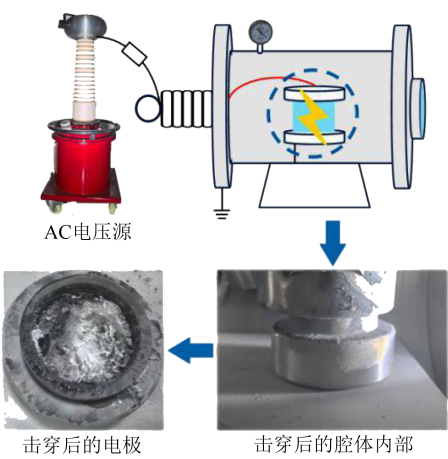


图9 铝粉在单位面积浓度为 434.0 mg/cm^2 、电场为 3.7 kV/mm 条件下发生击穿

Fig.9 Breakdown of aluminum powder observed at a concentration of 434.0 mg/cm^2 under an electric field of 3.7 kV/mm

(2)铝粉产生的光子数与电场强度及单位面积浓度呈正相关关系。在电压和单位面积浓度相同条件下,光子数随粒径增大总体呈先降低后升高的趋势。此外,随着铝粉粒径减小,局部放电光强信号幅值明显降低,而光子计数变化相对较小,表明相较于光强测量方法,光子计数方法对金属粉尘局部放电的检测具有更高灵敏度。

(3)击穿破坏试验结果表明,在满足铝粉覆盖地电极、铝粉层厚度为 0.5 mm、场强接近 3.7 kV/mm 条件下,铝粉引发“爆炸”放电。在 GIS 运行工况下,位于接地壳体堆积的铝粉对 GIS 气体间隙的绝缘性能影响非常有限,然而当粉尘过多集中在高场强(接近 3.7 kV/mm)区域时,引发局部粉尘“爆炸”放电的概率大幅提升。

参考文献 References

[1] 郝艳捧,梁学致,黄盛龙,等. GIS/GIL 绝缘子超声检测研究进展与展望[J]. 高电压技术,2023,49(9):3596-3606.
HAO Yangpeng, LIANG Xuezhi, HUANG Shenglong, et al. Status and prospect of ultrasonic detection for GIS/GIL insulators[J]. High Voltage Engineering,2023,49(9):3596-3606.

[2] 李庆民,王健,李伯涛,等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术,2016,42(3):849-860.
LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering,2016, 42(3):849-860.

[3] 马康. 直流 GIS/GIL 中金属微粒粉尘动力学特性及治理方法的研究[D]. 北京:华北电力大学,2023.
MA Kang. Study on the dynamic characteristics and suppressing methods of metal particle dust in DC GIS/SIL[D]. Beijing: North

- China Electric Power University,2023.
- [4] 李庆民,魏来,薛乃凡,等. 交直流 GIS/GIL 微纳粉尘可视化探测技术研究进展[J]. 高电压技术,2023,49(9):3607-3624.
LI Qingmin, WEI Lai, XUE Naifan, et al. Research advances in visualization detection technology of micron-nano dust in AC and DC GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3607-3624.
- [5] 薛乃凡,李庆民,刘智鹏,等. 微纳粉尘运动行为与微弱放电探测技术研究进展[J]. 电工技术学报,2022,37(13):3380-3392.
XUE Naifan, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Research advances of the detection technology for kinetic behavior and weak discharge of the micro-nano dust[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(13):3380-3392.
- [6] 朱旭亮,何金,张黎明,等. 绝缘子沿面局部放电的光电探测效率分析研究[J]. 绝缘材料,2022,55(7):104-111.
ZHU Xuliang, HE Jin, ZHANG Liming, et al. Study on photoelectric detection efficiency of insulator creeping partial discharge[J]. Insulating Materials,2022,55(7):104-111.
- [7] 耿伊雯,芮逸凡,范路,等. 基于 D-S 证据多源信息融合与固态光电倍增-UHF 联合检测的 GIS 局部放电模式识别[J]. 绝缘材料,2022,55(11):109-117.
GEN Yiwen, RUI Yifan, FAN Lu, et al. GIS Partial discharge pattern recognition based on D-S evidence multi-source information fusion and solid state photomultiplier-UHF combined detection[J]. Insulating Materials,2022,55(11):109-117.
- [8] FAN X H, LUO H H, LIANG F W, et al. Feature fusion of pulse current, ultrahigh frequency, and photon count signal: a novel discharge pattern recognition method of metal particles in GIS/GIL[J]. IEEE Sensors Journal,2024,24(22):36979-36986.
- [9] 卢武,杨华,张俊,等. 直流 GIS/GIL 中金属微粒诱发沿面闪络的机理研究与抑制策略综述[J]. 高电压技术,2025,51(3):1010-1024.
LU Wu, YANG Hua, ZHANG Jun, et al. Review on mechanism study and suppression strategy of metal particles induced surface flashover in DC GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering,2025,51(3):1010-1024.
- [10] TIAN Z C, LI X L, SUN X B, et al. Movement and discharge characteristics of metal dust in GIS under AC voltage: focus on a special luminescence phenomenon[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2026,31(1):723-731.
- [11] 梁瑞雪,刘衡,胡琦,等. GIS/GIL 内微米级金属粉尘动力学行为与诱发放电特性研究进展[J]. 中国电机工程学报,2020,40(22):7153-7166.
LIANG Ruixue, LIU Heng, HU Qi, et al. Research advances in the kinetic behavior and induced discharge characteristics of micron metal dust within GIS/GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(22):7153-7166.
- [12] 薛乃凡,李庆民,王媛,等. GIS 内微纳粉尘沿绝缘子界面吸附的时空动力学特性与团聚爆炸现象[J]. 高电压技术,2025,51(4):2002-2012.
XUE Naifan, LI Qingmin, WANG Yuan, et al. Spatial-temporal dynamic characteristics and agglomeration explosion phenomenon of micron-nano dust adsorption along the insulator interface in GIS[J]. High Voltage Engineering,2025,51(4):2002-2012.
- [13] 王媛,杨睿成,苏宝亮,等. 直流 GIS/GIL 内微纳粉尘弥散浓度分布特性及对气隙击穿强度的影响[J]. 电工技术学报,2025,40(5):1601-1613.
WANG Yuan, YANG Ruicheng, SU Baoliang, et al. Characterization of diffuse concentration distribution of micron-nano dust in DC GIS/GIL and the effect on air gap breakdown strength[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2025,40(5):1601-1613.
- [14] LAGHARI J R, QURESHI A H. A review of particle-contaminated gas breakdown[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,2007,EI-16(5):388-398.
- [15] ZIORNEK W, KUFFEL E. Activity of moving metallic particles in prebreakdown state in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1997,4(1):39-43.
- [16] DIESSNER A, TRUMP J G. Free conducting particles in a coaxial compressed-gas-insulated system[J]. IEEE Transactions on power apparatus and systems,1970,PAS-89(8):1970-1978.
- [17] 许渊,刘卫东,陈维江,等. 基于高灵敏测量的 GIS 绝缘子表面微金属颗粒局部放电特性[J]. 高电压技术,2019,45(9):2707-2714.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Partial discharge characteristics of metal particles on spacer surface in GIS based on high sensitivity measurement[J]. High Voltage Engineering,2019,45(9):2707-2714.
- [18] LUO H H, FAN X H, LIANG F W, et al. Surface defect detection of GIS aramid insulation pull rod via photon counting[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2024,31(4):1772-1777.
- [19] 刘博,苏伟,张泽皓,等. 直流 GIS/GIL 金属异物运动特征、抑制及检测方法[J]. 高电压技术,2025,51(3):1038-1051.
LIU Bo, SU Wei, ZHANG Zehao, et al. Motion characteristics, suppression and detection methods of metal particles in DC GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering,2025,51(3):1038-1051.

收稿日期:2025-07-09;修回日期:2025-08-21。

作者简介:

林川杰(1993-),男(汉族),福建福州人,高级工程师,博士,主要从事变电设备运维检修相关技术的研究;

王阳(1993-),男(汉族),福建福州人,工程师,博士,主要从事变电运维专业的工作;

通信作者:李传扬(1987-),男(汉族),副研究员,博士,主要从事直流 GIL/GIL 基础理论、关键技术及装备研发的研究。