

工频电压下机械振动激励金属微粒运动规律与局部放电特性分析

姜海波¹, 燕景杰¹, 王毅¹, 翟宾¹, 孙惠涛¹, 詹振宇², 辛伟峰², 刘丰硕³, 汲胜昌³

(1. 国网河南省电力公司, 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049)

摘要: GIS 有着占地空间小, 绝缘性能高等优点, 在电网中被广泛运用。然而其内部自由金属微粒的跳跃、集聚等行为会降低其绝缘稳定性, 对设备安全可靠运行留有隐患。文中搭建了模拟 GIS 振动带电试验平台, 研究工频电压下, 机械振动激励对金属微粒运动规律和局部放电特性的影响。首先研究分析了不同工况下自由金属微粒运动行为及其起跳电压变化规律, 结果表明: 振动激励会拓宽金属微粒的运动范围, 并有效降低其起跳电压, 最大降幅可达 29.8%, 进而建立了微粒得 3 种典型运动模式。其次使用脉冲电流法测量分析了振动激励下金属微粒的放电特性, 结果表明振动的施加在一定程度上增加了金属微粒局部放电 PRPD 谱图的分散性, 尺寸小密度低金属微粒局部放电最大放电量明显增加, 0.5 mm 铝粒的最大放电量可增大 146%, 且在达到一定电压阈值后迅速增长, 易引发击穿; 而机械振动激励对粒径 1 mm 铜粒等较重微粒的局部放电特性影响较低。研究结果可为实际工程中 GIS 带电操动断路器自由金属微粒的检测与分析提供理论支撑。

关键词: GIS; 金属微粒; 机械振动; 局部放电; 运动规律; 起跳电压; 脉冲电流法; 放电特性

Analysis of Motion and Partial Discharge Characteristics of Metal Particles Excited by Mechanical Vibration Under Power Frequency Voltage

JIANG Haibo¹, YAN Jingjie¹, WANG Yi¹, ZHAI Bin¹, SUN Huitao¹, ZHAN Zhenyu², XIN Weifeng², LIU Fengshuo², JI Shengchang²

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. State Grid Henan Electric Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: GIS has the advantages of small space and high insulation performance, and is widely used in power grid. However, the movement of free metal particles in its interior will reduce its insulation stability, leaving hidden dangers for the safe and reliable operation of the equipment. Firstly, the motion behavior of free metal particles and the change of take-off voltage under different working conditions are studied. The results show that vibration excitation can broaden the motion range of metal particles and effectively reduce their take-off voltage by 29.8%, and then three typical motion modes of the particles are established. Secondly, pulse current method was used to measure and analyze the discharge characteristics of metal particles under vibration excitation. The results showed that the application of vibration increased the dispersion of PRPD spectra of metal particles to a certain extent, and the maximum discharge of small size and low density metal particles significantly increased, and the maximum discharge of 0.5 mm aluminum particles increased by 146%. And after reaching a certain voltage threshold rapidly increase, easy to cause breakdown; The mechanical vibration excitation has little effect on the partial discharge characteristics of heavy particles such as 1 mm copper particles. The research results can provide theoretical support for the detection and analysis of free metal particles in GIS active circuit breakers in practical engineering.

Key words: GIS; metal particles; mechanical vibration; partial discharge; motion law; take-off voltage; pulse current method; discharge characteristic

0 引言

气体绝缘全封闭开关电器 (gas insulated switchgear, GIS) 是主要采用 SF₆ 为绝缘介质的金属

封闭开关设备。有着占地面积小、绝缘性能好、可靠性高等优点, GIS 对于保障电力系统的安全稳定运行发挥着不可替代的作用^[1]。然而在设备实际工作中, 加工缺陷或断路器开关磨损等情况会导致

GIS 内部存在自由金属微粒, 微粒受到电场和断路器操作振动的作用会在腔体内自由运动并引发局部放电, 甚至可能引起击穿和沿面闪络发生, 其行为在潜在影响 GIS 设备的绝缘可靠性甚至影响区域电网的稳定性^[2-6]。

微粒的运动行为是影响 GIS 绝缘强度的主要方式, 微粒承受库仑力、电场梯度力、重力、阻力等作用, 其运动形式存在复杂性和不确定性^[7-9]。国内外学者对微粒的运动行为进行了分析, L.E. Lundgaard 等学者利用超声传感器采样计算得到同轴圆柱电极下金属微粒飞行高度与飞行时间, 为金属微粒缺陷的声学检测提供了理论基础^[10]。贾江波等学者观察楔形电极间的微粒运动形式, 建立了自由金属微粒运动模型^[11-12]。丁然等学者通过仿真分析了金属微粒在同轴圆柱电极间的运动特性, 提出用平均谐振频率和平均起跳强度对金属微粒活跃程度进行表征^[13]。季洪鑫等学者对 GIS 中不同类型金属颗粒的运动行为和局部放电情况进行了研究, 提出金属颗粒危害程度的诊断方法^[14]。

目前对 GIS 内部金属微粒的诊断主要通过对其局部放电量检测来实现。许渊等学者建立高灵敏度局部放电检测系统, 通过分布测量法将局部放电识别灵敏度提高到 0.02 pC ^[15], 同时对 GIS 绝缘子表面亚毫米级金属微粒的运动和放电特性进行研究^[16-17]。吴治诚等学者分析局部放电信号与微粒运动状态, 认为 GIS 内自由导电微粒缺陷的理论局部放电相位图谱为正弦带状包络^[18]。正常状态下 GIS 中金属微粒导致的局部放电量小, 且不易诊断。然而当断路器由于开断而管壁面外加振动激励条件下, 金属微粒的运动会更加活跃^[19]。李晓昂等学者分析了在正弦振动和冲击振动不同激励条件下自由金属微粒的运动和起跳特性, 认为外施冲击振动激励相对工频情况下能够明显降低微粒起跳场强, 且振动的施加会使微粒的飞行图谱与工频电压下分布相异^[20-22]。李军浩等学者分析了机电联合作用下气体微粒的运动和局部放电特点, 认为振动时微粒放电更加剧烈, 放电分散性更高, 超声飞行图谱整体保持三角脉冲群的典型特征, 且脉冲群周期为工频周期^[23-24]。

综上所述, 目前的研究对正常工频条件对外施激励及机电联合作用下微粒带电运动特性和放电机理进行了分析, 但是目前的研究对振动激励模拟简单, 对金属微粒局部放电的分析方式单一。因此有

必要探究对于带电操动断路器工况下金属微粒运动行为和其引发的局部放电特性。

文中搭建了模拟 GIS 振动带电试验平台, 对不同振动形式和母线电压作用下自由金属微粒运动行为进行观察并总结运动规律, 使用脉冲电流法测量金属微粒的放电特性, 并基于颗粒运动的受力分析对试验结果进行解释, 研究结果可为实际工程中 GIS 带电操动断路器自由金属微粒的检测与分析提供理论支撑。

1 实验平台与实验方法

1.1 模拟 GIS 振动带电试验平台搭建

根据 GIS 内部管道的同轴圆柱结构, 文中搭建了如图 1 中由球形电极和弧形底部构成的金属微粒缺陷模型, 以模拟在 GIS 内部结构和金属微粒所受径向电场力。金属微粒缺陷模型内部为 0.4 MPa 的 SF_6 气体。针对 GIS 的铝质外壳和铜质触头结构, 同时结合 GIS 内部常见金属微粒尺寸^[3], 选用直径为从 0.5 mm 到 1 mm 的铜和铝材质球形微粒进行试验, 每组实验在腔体正下方放置 10 个微粒, 以模拟 GIS 内部可能存在的微粒累积。围绕模型建立金属微粒运动及局部放电实验平台进行实验。

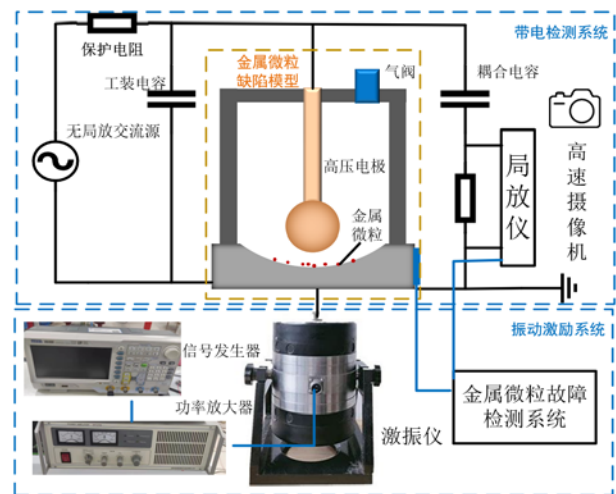


图 1 金属微粒运动及局部放电实验平台

Fig. 1 Experimental platform of metal particle motion and partial discharge

金属微粒运动及局部放电实验平台见图 1, 包括带电检测系统和振动激励系统两部分。带电检测系统使用脉冲电流法测量金属微粒缺陷模型局部放电, 回路还包括交流源、保护电阻、耦合电容、检测阻抗和局放仪等设备。为保证局部放电质量, 实验平台在环境电磁噪声 $< 5 \text{ pC}$ 的高等级电磁屏蔽室

中搭建。使用高速摄像机记录微粒运动行为。

振动激励系统由信号发生器、功率放大器、激振器、金属微粒缺陷模型和计算机组成。通过信号发生器模拟振动信号，经过功率放大器驱动激振仪起振，激振器通过导杆敲击缺陷模型底部给金属微粒提供起跳初速度。在缺陷模型底部设置探头通过采集卡记录振动波形。由于钢质金属材质触头敲击壳体时产生的碰撞信号与断路器动作产生的振动信号最为接近^[21]，其导杆选用钢质材质。

实验平台中带电检测系统和振动激励系统在缺陷模型的底座处接触，两系统存在的电气连接影响局部放电的测量，需要对其进行电气隔离。虽然底座有接地处理，但是当激振仪启动后，缺陷模型会持续振动，容易导致接地不良，因此在导杆处和金属微粒底座同时接地处理。实验平台主要设备性能指标见表 1。

表 1 实验平台主要设备性能指标

Table 1 Experimental platform main equipment performance indicators

器件	性能指标	范围
工频交流源	调压范围(有效值)/kV	0~100
	额定电压视在放电量/pC	<3
激振仪	振动加速度/g	0~50
	振动频率范围/Hz	1~1×10 ⁶
	最大载重/kg	4.5
信号发生器	幅度范围(峰峰值)/mV	10~10×10 ³
	任意波频率范围/Hz	1×10 ⁻⁶ ~50×10 ⁶

1.2 激振仪振动信号确定

为了确定 GIS 断路器开断操动振动在管壁处的频率和加速度，文中针对一台 252 kV 断路器布置测点进行测量。测点位置布置在金属微粒可能聚集的管壁处，见图 2。

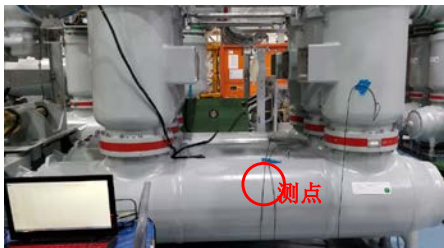


图 2 252 kV GIS 断路器测点布置

Fig. 2 252 kV GIS breaker measuring point layout

断路器开断振动在测点处的典型时频分析见图 3。从图 3 可以看到，断路器开断后 0.2 s 内振动较为强烈，振动加速度主要在 20g 以内，最大可达

50g，典型振动频率为 100 Hz 和 400 Hz。文中将根据上述实验结果进行振动信号模拟，对金属微粒施加振动激励，以探究机械振动对金属微粒运动和放电的影响。

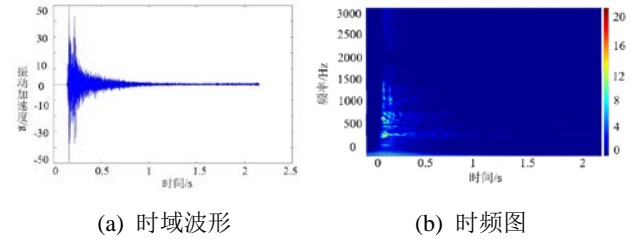


图 3 测点典型时域波形和时频图

Fig. 3 Time domain waveform and time frequency diagram of measuring point

1.3 实验方法

实验研究不同材质、尺寸的球形金属微粒在正常运行工况下的起跳规律，为了避免升压速率不一致对微粒运动的影响，采用阶梯升压方式，升压速度保持为 500 V/s 左右，直至击穿或达到实验平台电压阈值。为了避免单次实验给实验结果造成误差，每组实验均重复 10 次，以降低微粒运动过程随机性造成的误差。

在实验前后，为避免金属微粒在放电过程中烧蚀产生的杂质以及底部电极表面的脏污对微粒运动的影响，每次试验前用 1 000 目精细砂纸抛光，用蘸有无水乙醇的棉布擦拭装置与试品，待乙醇挥发，再进行六氟化硫充气操作。

2 振动激励下金属微粒运动特性

2.1 振动激励下金属微粒运动行为分析

实验中分别设置球形微粒的直径为 0.5、1 mm，微粒材质为铜和铝，每组放置 10 个微粒。外施振动激励频率为 100 Hz 和 400 Hz 同相叠加，其总振动加速度为 20g，对每种给定的加速度进行线性升压，观察其微粒运动特性变化。

直径为 1 mm 铝粒在不同条件下的运动状态见图 4。试验结果表明，如图 4(a)、(b)在交流电压较低条件下，仅凭外施振动激励无法使金属微粒长时间跳跃，外施振动停止后，微粒随即即回落到底部。如图 4(c)随着电压的不断提升，在达到微粒的起跳电压后，微粒才开始持续运动。如图 4(d)存在外施振动激励时，微粒的起跳高度和运动范围有所提升。如图 4(e)、(f)，振动激励的施加能够有效拓宽金属微粒群的运动范围。

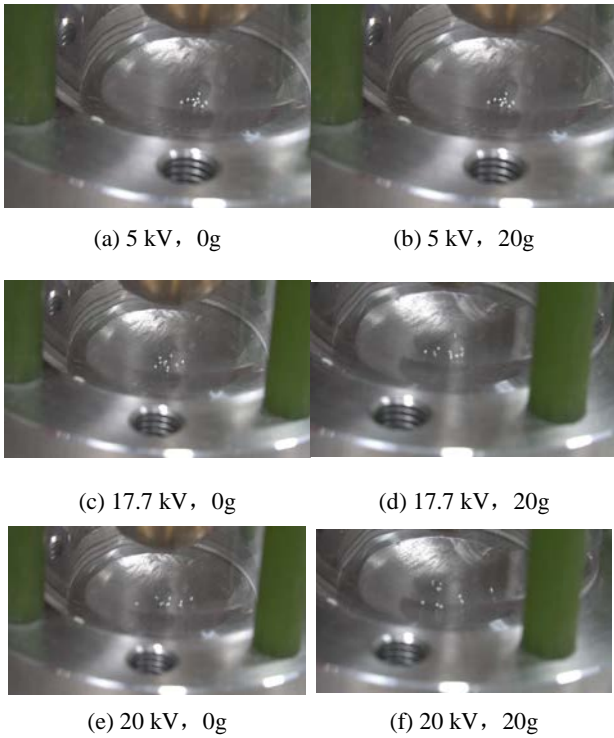


图 4 振动前后不同电压下金属微粒运动情况

Fig. 4 Movement of metal particles at different voltages before and after vibration

微粒在振动激励有无状态下的运动行为模式也存在差异。在没有外施激励时，大部分微粒受到工频电压影响下往往呈现出沿弧面运动的趋势，仅有最轻的 0.5 mm 铝粒在较高电压下有上下跳动的情况出现。微粒在弧面上的滑动大致呈现为椭圆形，在弧面切面来回大幅度运动，运动模式见图 5。而当外施振动激励后，金属微粒因机械作用而上下跳动，在一定电压下，金属微粒竖直方向保持这种上下跳动模式，微粒在沿面方向仍然保持图 5 中所示的运动轨迹。

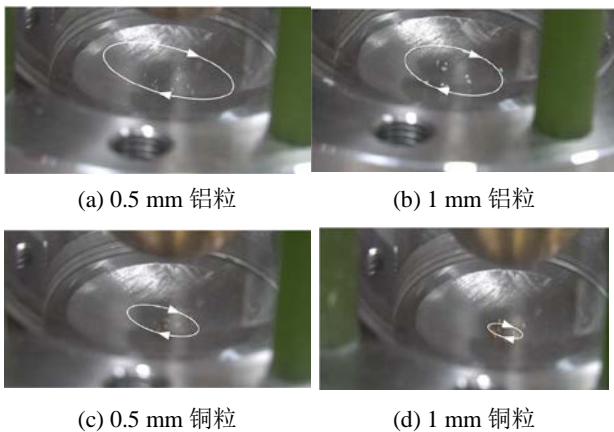


图 5 不同材质和大小微粒的运动状态

Fig. 5 The motion state of particles of different materials

and sizes

在保持相同 20 kV 电压和 20g 加速度的条件下，4 种不同微粒也呈现出了如图 5 所示不同的运动形式。总体而言，铝粒有着更宽的运动范围和更高的跳跃高度，其运动活跃性更强，在此工况下绝大部分 0.5 mm 的铝粒子在跳跃见图 5(a)。而对于 1 mm 的铜微粒而言，图 5(d)其运动范围更窄，且上下跳动不明显，其运动活跃性较低。

综上所述可以发现，在施加振动激励后，更轻的微粒的运动范围更广、同时微粒会存在上下跳动的情况，这使得金属微粒获得更高的运动速度，这增加了其运动到 GIS 内部法兰界面等三结合点或者其他绝缘薄弱处的几率，对 GIS 的绝缘有潜在威胁。

2.2 金属微粒起跳电压变化规律

对振动条件下金属微粒运动的起跳电压进行分析，首先将电压升至初始电压 U_0 ，然后开始阶梯升压，每上升一个阶段对金属微粒施加 0.2 s 的振动激励，观察金属微粒是否起跳。直到金属微粒起跳并在振动消失后持续运动，此时将此电压记作 U_r ，其为振动条件下微粒起跳电压，之后缓慢降低电压，直到微粒不再运动，将此电压记作运动终止电压 U_s 。然后反复进行此过程，缩短阶梯间距，直到电压值稳定。文中同时测量了在不施加振动条件下的微粒起跳电压 U_a 。微粒起跳电压加压程序见图 6。

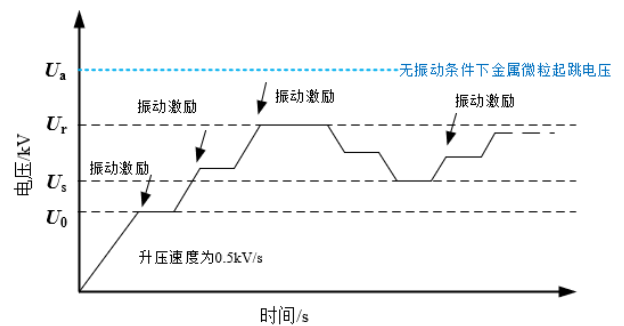


图 6 微粒起跳电压加压程序

Fig. 6 Procedure of particle take-off voltage test

不同工况下微粒起跳电压和运动终止电压见表 2。在无外加振动激励的作用时，金属微粒的起跳电压相较运动终止电压更高，而当激励后，金属微粒起跳电压和运动终止电压相近。

表 2 不同微粒起跳电压变化

Table 2 The take-off voltage of different particles varies		铝		铜		
材质		0.5	0.8	0.5	0.8	1.0
直径/mm		0.5	0.8	1.0	0.5	0.8
无振 起跳电压/kV		14.8	16.3	19.2	16.7	20.8
						—

动	终止电压/kV	12.7	14.8	17.3	14.6	18.6	—
振动	起跳电压/kV	10.4	14.3	18.0	14.2	18.8	—
	终止电压/kV	10.8	13.9	17.5	14.0	18.3	—

振动条件下微粒的起跳电压相比无振动时更低，由表 2 可得，起跳电压相比存在振动时减小了 1.2 kV 到 4.4 kV，相对降幅为 6.25%~29.8%。原因可能是由于在微粒尚未运动时，较多微粒相互堆叠挤压、微粒受到静摩擦力的作用，此时微粒需要更高电场力以使其自身克服摩擦运动。而振动激励可以给微粒提供初速度，使微粒静摩擦力转换为动摩擦力，减小了微粒运动的阻力。从另一方面而言，微粒受振动获得初速度后，其由于向上跳跃后位置更靠近高压，其所受电场力更大，微粒更容易克服重力向上运动从而获得更高动能，这有助于使微粒在更低的电压下起跳。综合上述因素使得微粒能够在较低电压时保持管壁内的持续运动。

2.3 振动激励金属微粒运动模式分析

在断路器操动后，静止的金属微粒将会随变压器壳体一同运动，不同的振动频率和振幅将导致微粒存在不同的初始发射速度。微粒与外壳层未脱离时，微粒受到重力 G 、支持力 F_N 、电场力 F_q 和摩擦力 F_f 的作用，满足式(1)

$$\vec{F}_q + \vec{F}_N + \vec{G} + \vec{F}_f = m\vec{a} \quad (1)$$

其中微粒因还未与振动中的 GIS 管壁分离，其振动加速度相同。而在 GIS 断路器工作后，管壁振动的周期相较于交流电场周期更长，可以看做是由多个典型频率的正弦波叠加，其加速度可以表示为式(2)

$$a = A_1 \omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + A_3 \omega_3^2 \sin(\omega_3 t + \varphi_3) + \dots \quad (2)$$

对此可以建立振动激励下金属微粒的运动模型，见图 7。可以将微粒运动行为分为 3 类：

1)微粒受振动起跳，但是在小幅跳动后撞击回退到壁面。这种微粒一般为尺寸较大、密度较高，微粒起跳后其所承受的电场力和电场梯度力小于其自身重力和气体粘滞阻力，其对绝缘的影响也较小；

2)微粒受到振动起跳。在撤去振动激励后微粒仍然能保持小幅跳动。这种微粒一般尺寸更小、密度更低。微粒在起跳后获得了更高的电场力、速

度更快，这使得微粒可以持续跳动，这种跳动能够扩大粒子在 GIS 轴向运动范围，可能造成绝缘隐患。

3)微粒在壁面上滑动，这种一般是振动较小或微粒足够重，以至于不足以让微粒起跳或无振动情况下金属微粒运动形式，微粒因受到了切向电场的的影响而在壁面滑动。

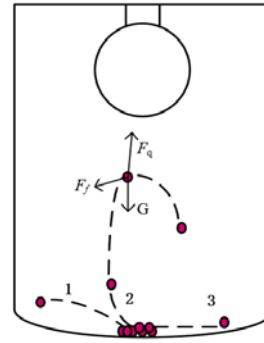


图 7 振动激励金属微粒运动模式

Fig. 7 Vibration-excited metal particle motion model

综上，微粒在第二种情况对绝缘危害更大，此时原本不会在 GIS 内部运动金属微粒因振动影响而小幅度的跳跃，其运动不会随着振动的消失而停止。此时金属微粒的运动范围变广，微粒跳跃距离更高，甚至可能造成击穿。如果发生冲击过电压等情况将对系统绝缘造成潜在威胁。

为验证金属微粒的运动模式，在保持相同 20 kV 电压和单次 20g 加速度振动激励的条件下，使用录像帧率为每秒 60 帧的相机对金属微粒的运动行为进行拍摄，0.5 mm 铝粒、1 mm 铝粒和 1 mm 铜粒的逐帧运动行为见图 8。图 8(a)中 0.5 mm 铝粒的运动上下幅度较为明显，微粒受振起跳后存在毫米级的跳跃高度。同时在横向运动范围也有所拓宽。能够看到微粒明显的连续跳跃现象，与图 7 中行为 2 相对应。图 8(b)中 1 mm 铝粒在受振后轻微跃起，后大多持续在壁面滑动，仅有少数粒子能持续以小幅度上下跳动，与图 7 中行为 1 相对应。图 8(c)中 1 mm 铜粒受振后几乎看不到明显的起伏跳动情况，呈现出沿弧面运动的趋势，滑动大致呈现为椭圆形，与图 7 中行为 3 相对应。

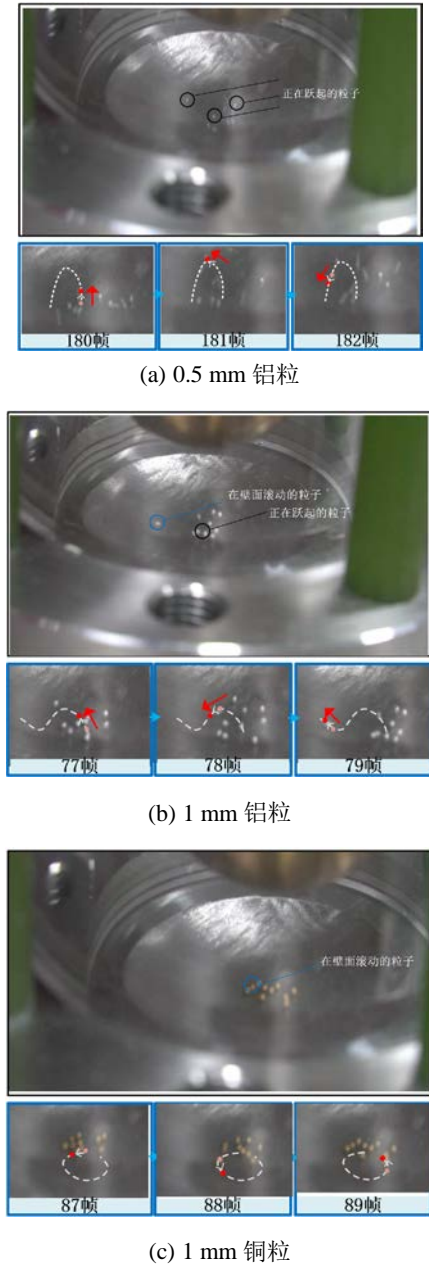


图 8 振动激励金属微粒运动模式行为验证

Fig. 8 Vibration excitation of metal particles motion mode behavior verification

3 振动激励下金属微粒局部放电特性

通过前述章节分析了振动激励工况的金属微粒运动特性，其特殊的运动模式可能导致新型的放电现象，据此本文采集金属微粒缺陷模型的局部放电信号，分析振动后局部放电的特性变化。

3.1 振动激励下局部放电谱图特征

为分析激励前后 PRPD 谱图特征，对跳跃行为更加明显的 0.5 mm 铜和铝质微粒进行局部放电试验。设置电压为 18 kV，振动加速度为 20g、振动频率 100 Hz；实验中设置局放仪设置最小捕捉阈值为

15 pC，统计 1 分钟内局部放电变化。

结果见图 9，有无振动条件下，局部放电的正负电极彼此均呈中心对称，同时各极性的局部放电也以 90°和 270°为轴对称分布，基本符合微粒振动局部放电的带状特征。分析两者 PRPD 谱图可以发现，振动后微粒出现零散的较高的放电值，与不振动前有明显区别，正半周的最大放电量高于负半轴。

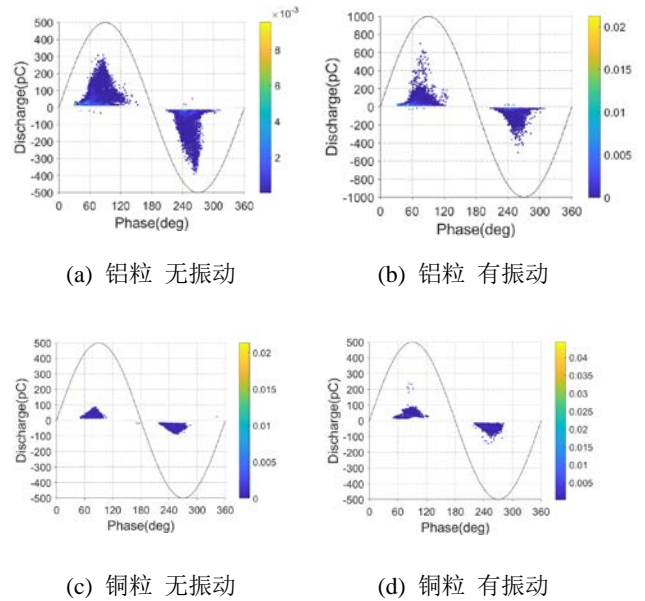
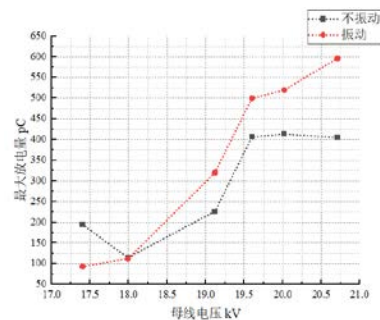


图 9 振动激励前后金属微粒 PRPD 谱图

Fig. 9 PRPD images of metal particles with and without vibration excitation

3.2 电压对局放信号的影响

对 0.5 mm 铜和铝质微粒施加不同的电压，观察其局部放电最大放电量变化，结果见图 10。在较低的电压等级下，金属微粒最大放电量很低，最大放电量在达到金属微粒起跳电压后迅速增长，铝粒的最大放电量在 18 kV 为 100 pC，而在 19.5 kV 时就达到了 500 pC。同样铜粒也在 17.5~18 kV 的区间最大局部放电增加了约 200 pC。这表明在六氟化硫气体绝缘介质的情况下，金属微粒缺陷导致的在到达某一电压阈值后容易引起局部放电的迅速增长，极易引发击穿。



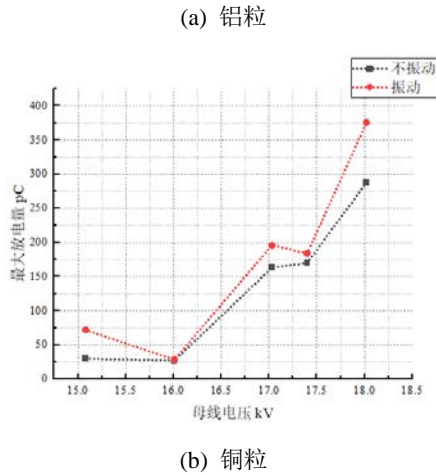


图 10 不同电压下金属粒子最大放电量图

Fig. 10 Maximum discharge of metal particle under different AC voltages

对比有无振动激励可以发现，存在振动激励的放电量-电压曲线更高，变化也更为迅速，这种差异在铝粒上更加明显。施加振动后金属微粒运动更加活跃，外加电压为 21 kV 时，振动前后铝粒最大放电量从 405 pC 提高到 592 pC，增加了 46%，铜粒在 18 kV 电压下，最大放电量从 284 pC 提高到 375 pC，增加了 32%。相对而言铝粒由于密度更低，其运动最为活跃，其局部放电的变化也更明显。

利用同样的方法对 1 mm 粒径的铜粒缺陷模型进行实验，其结论见图 11。其最大放电量同样随电压的升高而增加。但是其平均放电量变化不明显，且振动前后曲线彼此重合。这说明对于半径大、密度高的金属微粒而言，GIS 的振动并不会对其运动行为有明显影响，其放电特性随之也鲜有变化。

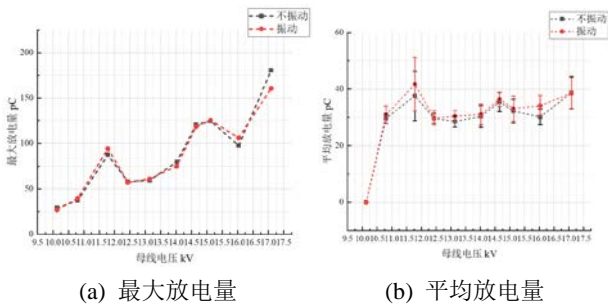


图 11 不同电压下大颗粒金属微粒放电量变化

Fig. 11 The discharge quantity of large metal particles varies under different voltages

3.3 振动加速度对局放信号的影响

选取 1 mm 粒径的铜粒进行不同振动幅度的实验，实验结果见图 12：随振动频率的增加，平均放电量负极性放电有减小趋势，从 0~25g，其负极性

放电量降低约 19 pC，降幅为 55.8%。而正极性放电没有明显变化；随着振动加速度的增加，其放电重复率均出现小幅波动，趋势并不明显。

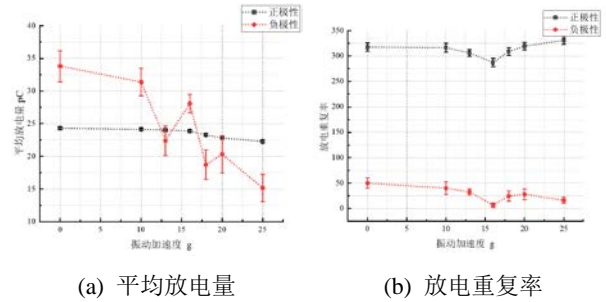


图 12 不同振动加速度金属微粒局部放电特征量变化

Fig. 12 Partial discharge characteristics of metal particles with different vibration accelerations

金属微粒缺陷模型的放电来源主要为带电金属微粒撞击底板而形成的电荷交换，而对于 1 mm 粒径的铜粒等跳跃高度较低的微粒而言，微粒所带电荷就是其离开管壁时的感应电荷，其与离开管壁时高压侧电压相关，因此振动加速度的高低对金属微粒带电量影响不大。对于运动更加剧烈、跳跃范围更高的微粒，它们在高电场下会造成更加明显的电场畸变，进而会导致系统局部放电发生变化。实验结论表明振动造成的金属微粒运动不直接影响其局部放电特性。

4 结论

文中搭建了模拟 GIS 振动带电试验平台，针对工频电压下、机械振动激励的金属微粒运动规律与局部放电特性分析，主要结论如下：

1)文中观察研究不同工况下金属微粒运动状态，认为振动激励能够有效降低金属微粒的起跳电压，相对降幅针对不同微粒范围为 6.25%到 29.8%。同时激励能拓宽其运动范围，增加其运动速度，使其更容易到达 GIS 内部法兰界面等绝缘薄弱处，对 GIS 的绝缘可靠性造成潜在威胁。

2)文中综合金属微粒的运动行为、受力情况和起跳电压建立了金属微粒运动模型，对其 3 种运动行为和可能造成的绝缘缺陷进行汇总分析。

3)文中通过脉冲电流法测试了振动条件下金属局部放电量变化特性，发现振动激励下金属微粒局部放电的谱图特征在原有带状分布的基础上出现零散的较高放电值。振动后局部放电最大值对于尺寸小、密度低的金属微粒的局部放电最大放电量有明显增加，0.5 mm 的铝粒和铜粒振动后局部放电量增

大了 46% 和 32%。粒子局部放电在达到一定电压阈值后迅速增长, 易引发击穿。

4) 对于半径大、密度高的金属微粒, GIS 的振动并不会对其运动行为有明显影响, 其放电特性随之也鲜有变化。

文中的研究结果有助于深入理解振动激励下金属微粒的运动规律和局部放电特性, 为实际工程中 GIS 带电操动断路器自由金属微粒的检测与分析提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MORCOS M M, WARD S A, ANIS H, et al. Insulation integrity of GIS/GITL systems and management of particle contamination[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(5): 25-37.
- [3] 董曼玲, 臧春艳, 詹振宇, 等. GIL 内部金属微粒问题研究进展[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 1-14.
DONG Manling, ZANG Chunyan, ZHAN Zhenyu, et al. Research progress on metal particle issues inside GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 1-14.
- [4] RIECHERT U, HOLAUS W. Ultra high-voltage gas insulated switchgear-a technology milestone[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 60-82.
- [5] 韩 帅, 高 飞, 廖思卓, 等. GIS 盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 12-22.
HAN Shuai, GAO Fei, LIAO Sizhuo, et al. Review on surface defects and diagnosis methods of basin-type insulator in GIS[J]. Insulating Materials, 2022, 55(2): 12-22.
- [6] 张乔根, 李晓昂, 刘 琳, 等. GIS 中 SF₆ 绝缘系统缺陷放电的“0-1”现象[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2689-2698.
ZHANG Qiaogen, LI Xiaoang, LIU Lin, et al. “One-zero” phenomenon of discharge induced by defects in SF₆ insulation systems in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2689-2698.
- [7] 张连根, 路士杰, 李成榕, 等. GIS 中线形和球形金属微粒的运动行为和危害性[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4217-4225.
ZHANG Liangen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Motor behavior and hazard of spherical and linear particle in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4217-4225.
- [8] 邓瑾怡, 高 凯, 任茂鑫, 等. 110 kV GIS 内不同形态金属微粒附着缺陷电场分析[J]. 电气工程学报, 2024, 19(2): 316-324.
DENG Jinyi, GAO Kai, REN Maoxin, et al. Electric field analysis of multi-shape metal particle adhesion defects in 110 kV GIS[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 316-324.
- [9] 季洪鑫. 交流运行电压下 GIS 中金属颗粒运动行为及放电特征[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
JI Hongxin. Study on movement behavior and discharge characteristic of metal particle in GIS under AC operating voltage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [10] LUNDGAARD L E. Particles in GIS characterization from acoustic signatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1064-1074.
- [11] 贾江波, 陶风波, 杨兰均, 等. GIS 中不均匀直流电场下球状自由导电微粒运动分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 106-111.
JIA Jiangbo, TAO Fengbo, YANG Lanjun, et al. Motion analysis of spherical free conducting particle in non-uniform electric field of GIS under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 106-111.
- [12] 贾江波, 张乔根, 师晓岩, 等. 交流电压下绝缘子附近导电微粒运动特性[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 7-11.
JIA Jiangbo, ZHANG Qiaogen, SHI Xiaoyan, et al. Motion of conducting particle near PTFE spacer under AC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 7-11.
- [13] 丁 然, 赵 科, 李洪涛, 等. 交流 GIL 内金属微粒的受力及运动特性分析[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 70-79.
DING Ran, ZHAO Ke, LI Hongtao, et al. Force and motion characteristic analysis of metal particles in AC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 70-79.
- [14] 季洪鑫, 李成榕, 庞志开, 等. GIS 中自由运动片状颗粒的局部放电特征[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7367-7376.
JI Hongxin, LI Chengrong, PANG Zhikai, et al. Partial

- discharge characteristics of sheet free-movement particle in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7367-7376.
- [15] 许 渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 交流 GIS 绝缘子表面亚毫米级金属颗粒的运动和局部放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4315-4324.
- XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Motion characteristics and partial discharge characteristics of submillimeter metal particles on the surface of AC GIS spacer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4315-4324.
- [16] 李 星, 许 渊, 丁登伟, 等. 温度对 GIS 绝缘子表面金属异物局部放电及闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 406-414.
- LI Xing, XU Yuan, DING Dengwei, et al. Influence of temperature on partial discharge and flashover characteristics of metal particle on GIS insulator surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 406-414.
- [17] 李 星, 刘卫东, 许 渊, 等. 冲击振动下 GIS 内金属颗粒运动及其诱发沿面闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2838-2847.
- LI Xing, LIU Weidong, XU Yuan, et al. Movement behavior of metal particles and its induced insulator flashover characteristics under impact vibration in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2838-2847.
- [18] 吴治诚, 张乔根, 宋佳洁, 等. GIS 内自由导电微粒缺陷的局部放电相位图谱[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1995-2002.
- WU Zhicheng, ZHANG Qiaogen, SONG Jiajie, et al. Phase resolved partial discharge pattern of free conductive particle defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1995-2002.
- [19] 王国利, 高 超, 杨 芸, 等. GIS 绝缘缺陷局部放电检测的有效性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 62-72.
- WANG Guoli, GAO Chao, YANG Yun, et al. Partial discharge detection effectiveness of typical insulation defects in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 62-72.
- [20] 李 杰, 李晓昂, 吕玉芳, 等. 正弦振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4580-4589.
- LI Jie, LI Xiaoang, LYU Yufang, et al. Motion characteristics of free metal particles in GIS under sinusoidal vibration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4580-4589.
- [21] 李晓昂, 李 杰, 任 静, 等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒起跳特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 2005-2012.
- LI Xiaoang, LI Jie, REN Jing, et al. Lift-off characteristics of free metal particles in GIS under shock vibration[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 2005-2012.
- [22] 胡新文, 李晓昂, 王舒啸, 等. 冲击振动激励下 GIS 内自由金属微粒运动及其诱发间隙击穿特性[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 339-347.
- HU Xinwen, LI Xiaoang, WANG Shuxiao, et al. Free metal particles movement and its induced gap breakdown characteristics in GIS under impact vibration[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 339-347.
- [23] 王 博, 牛 勃, 李军浩, 等. 机—电联合作用下尖端电极中金属微粒的运动行为与局部放电特性[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 127-135.
- WANG Bo, NIU Bo, LI Junhao, et al. Motion behavior and partial discharge characteristics of metal particles in tip electrode under mechanical and electrical combined action[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 127-135.
- [24] 宋颜峰, 郑中原, 于金山, 等. 机—电联合作用下 SF₆ 气体中金属微粒运动行为与局部放电特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(7): 74-83.
- SONG Yanfeng, ZHENG Zhongyuan, YU Jinshan, et al. Study on the motion behavior and partial discharge characteristics of metal particles in SF₆ gas under the combined action of mechanical and electrical[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(7): 74-83.
- 姜海波(1981—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力设备在线监测及故障诊断等(E-mail: 15039812363@139.com)。