第 51 卷 第 3 期：1025-1037 高电压技术 Vol.51, No.3: 1025-1037
2025 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241326

GIS 带电操作下金属微粒起跳吸附及诱发绝缘子沿面闪络特性

李晓昂[1]，杨晓宇[1]，吕肖肖[1]，向　岭[1]，王　浩[2]，张乔根[1]
（1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049;
2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘　要：国家电网公司超/特高压金属封闭组合电器(gas insulated metal-enclosed switchgear，GIS)故障统计表明，开关带电操作后秒级至分钟级内发生故障的占比较高，疑与开关操作机械振动激发异物运动有关。针对于此，构建了 126 kV 真型 GIS 模拟操作试验平台，重点研究了带电操作下绝缘子附近金属微粒运动及放电特性。结果表明，断路器带电操作产生机械振动的峰值可达 100*g*(*g* 表示重力加速度)，持续时间 30~50 ms，会明显降低金属微粒起跳场强，激发微粒运动。当受激微粒位于绝缘子附近时，可吸附于绝缘子表面，并产生“转向”行为，即线形微粒沿着电场线方向排布。当多个微粒同时吸附时，由于多微粒对电场的畸变作用，微粒会产生“转向”、“吸引”等行为，并最终形成“多星连珠”的径向排列趋势。最后试验研究了 0.4 MPa SF_6 中不同微粒数量对 126 kV 真型盆式绝缘子沿面闪络电压的影响规律，发现吸附微粒可显著降低盆式绝缘子闪络电压，特别是当微粒形成“多星连珠”排列时，闪络电压可降至 126 kV GIS 工频耐压值的 52%。该文研究阐明了 GIS 带电操作条件下异物起跳吸附和诱发绝缘子闪络的基本过程，对于认识带电操作下 GIS 突发放电机理和绝缘优化具有很好的参考作用。
关键词：金属封闭组合电器；金属微粒；断路器操作；冲击振动；闪络

Metal Particles Movement and Its Induced Insulator Flashover Characteristics in GIS Under Electrified Operation

LI Xiaoang[1], YANG Xiaoyu[1], LYU Xiaoxiao[1], XIANG Ling[1], WANG Hao[2], ZHANG Qiaogen[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract：According to statistics from the State Grid Corporation of China, a high proportion of faults occur within seconds to minutes after operating a switch while it is energized, indicating a possible correlation with mechanical vibrations induced by the switch operation causing foreign object movement. In this study, a 126 kV real-type simulation operation platform for gas insulated metal-enclosed switchgear (GIS) was established to investigate the movement of metallic particles near insulators and discharge characteristics under energized conditions. The results indicate that the peak mechanical vibration generated by the energized operation of the circuit breaker reaches 100*g*(*g* represents the acceleration due to graving), lasting 30~50 ms, significantly reducing the threshold for metal particle jumping and inducing particle movement. When stimulated particles are located near insulators, they can adhere to the insulator surface and exhibit an “alignment” behavior, where the particles align linearly along the direction of the electric field lines. With multiple particles simultaneously adhering, the interaction-induced distortion of the electric field leads to behaviors such as “alignment” and “attraction”, ultimately resulting in a radial arrangement trend known as “multiple-star alignment”. Moreover, the influence of varying particle quantities in 0.4 MPa SF_6 on the surface flashover voltage of a 126 kV real-type bushing insulator is investigated. It is observed that the presence of adsorbed particles significantly reduces the flashover voltage of the bushing insulator, particularly when particles are arranged in a “string-of-pearls” configuration, leading to a flashover voltage decrease to 50% of the 126 kV GIS AC withstand voltage. The paper elucidates the fundamental processes of foreign object jumping and adhesion under charged GIS operating conditions, shedding light on the mechanisms of sudden discharge in GIS and insulation optimization under electrified operations.
Key words：GIS; metal particles; circuit breaker operation; impact vibration; flashover

基金资助项目：国家电网公司科技项目(5500-202355792A-3-8-KJ)。
Project supported by Science & Technology Project of SGCC(5500-202355792A-3-8-KJ).

0 引言

目前研究结果表明，金属微粒依然是引发气体绝缘金属封闭组合电器(gas insulated metal-enclosed switchgear，GIS)绝缘故障的主要原因之一[1-5]。从国家电网公司对 2014 年至今的 550 kV 及更高电压等级 GIS 故障统计数据来看，GIS 设备绝缘损坏所引发的故障已经成为 GIS 最重要的绝缘问题之一，占总故障的比率高达 60%[6-8]。而 GIS 设备击穿所引发的故障中，又有近 60%(占总故障量 36%左右)的故障出现在开关操作后瞬间到几分钟的量级内，故障发生的位置并无固定规律，且事后发现发生故障处可检测并收集到不同尺寸的金属微粒。究其原因，可以推测带电操作后发生的瞬时故障疑与开关操作产生的快速暂态过电压引发微粒起跳运动有关；而对于在带电操作后较短时间内发生的故障，由于快速暂态过电压的衰减时间极短，通常只有几毫秒，这不足以有效刺激微粒的跳跃运动[9-12]，因此这种故障更有可能是开关操作产生的机械振动导致 GIS 内部静止的金属微粒起跳所致。而当这些微粒受激后起跳运动至设备内部绝缘性能较差的地方，则很容易引发微粒放电现象，从而增加了故障的风险[13-16]。

目前，学者们针对 GIS 带电操作产生的机械振动激励微粒起跳并最终诱发设备故障展开了大量研究[17-19]。华北电力大学王健学者通过搭建线形微粒“飞萤运动”观测平台，确定了线形微粒群的运动特性，研究结果表明微粒群飞萤起始电压与微粒数量呈负相关，且随微粒直径的增大而增大、随微粒的长度增大而减小[20]。清华大学刘卫东团队则通过搭建电场叠加冲击振动试验装置，分析了冲击振动对金属微粒运动的影响，解释了现场 GIS 绝缘子沿面放电的大量故障案例与开关操作的强相关性[21]。上海电力大学卢武学者对直流气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated metal enclosed transmission line, GIL)绝缘子气-固界面电荷的积聚特性进行了深入探究，研究发现，当电荷大多积聚在固体侧时，绝缘子表面会产生晕状与单极性点电荷，且二者的数量会随着通电时间延长而增加；而当电荷大多积聚在气体侧时，不仅同样会出现晕状与单极性点电荷，还伴随产生成对分布的双极性离散电荷斑[22]。西安交通大学李晓昂团队研究了断路器带电操作所产生的机械振动激励下 GIS 内不同形状的金属微粒运动与诱发间隙击穿的特性，对冲击振动激励前后微粒运动情况与分布规律、冲击振动对微粒运动影响、多微粒运动过程中引发串联击穿的机理作出了解释[23-24]。

已有的研究已经证明断路器带电操作所产生的机械振动会对 GIS 内部金属微粒产生明显的激励作用，而内部微粒在受到冲击作用后，会激励起跳并引发气体间隙击穿，但仍缺少对金属微粒激振后起跳、运动、吸附和闪络全过程的分析研究。且大量现场故障表明，发生绝缘子闪络的气室内存在数量较多的金属微粒[25-29]。因此相较于单个微粒，更有必要研究多微粒共存情况下微粒的典型运动行为及其吸附过程。基于此，本文以 126 kV 真型 GIS 母线段作为试验平台，开展了在真实断路器气室内外施激振对单微粒起跳、运动、吸附和闪络全过程的研究，并且给出了多微粒共存情况下的典型运动行为。

1 GIS 真型试验平台与试验方法

1.1 GIS 真型试验平台

采用 126 kV 真型 GIS 母线段作为 550 kV GIS 的缩比试验腔体，包括套管、母线、绝缘子等主要组部件。试验中采用电磁式激振装置来外施冲击振动，激振装置固定在试验腔体下方。试验电源由一 200 kV 无局放试验变压器提供，经保护电阻、阻容分压器后进入 126 kV GIS 套管侧，平台接线见图 1。

该 126 kV GIS 试验腔体外壳内径为 248 mm，高压导体直径为 60 mm。为等效模拟 550 kV 真型 GIS(外壳内径为 560 mm，高压导体直径为 140 mm)内的电场分布，试验电压设为 144 kV，在此条件下 126 kV 试验 GIS 与 550 kV 真型 GIS 的径向电场强度分布情况如图 2 所示。由图 2 可以看出，126 kV 试验 GIS 能够较好地等效 550 kV 真型 GIS 内的电场分布。

运行经验表明，GIS 断路器分合闸操作时，其动作的驱动力可达数万牛，瞬时加速度可达 100g(g=9.8 m/s²为重力加速度)，持续时间达到 30~50 ms。为等效模拟实际 GIS 带电操作产生的壳体冲击振动，本研究前期采用了快响应的加速度传感器(601A02 型，带宽为 0.17 Hz~10 kHz)对 550 kV GIS 断路器操作的振动加速度进行了现场实测，获得了断路器操作产生的冲击振动加速度信号的时域波形，如图 3(a)所示。

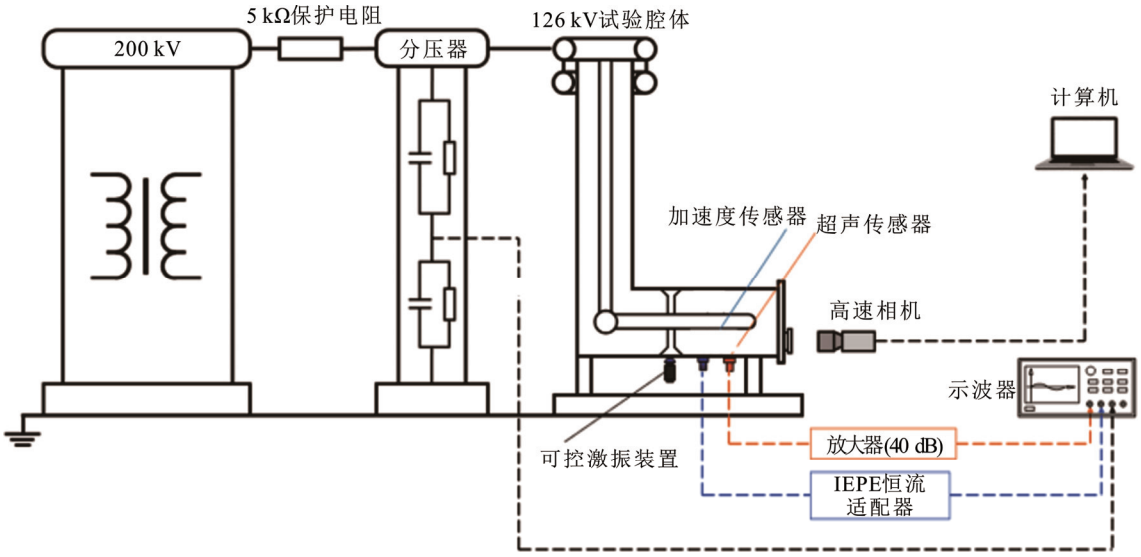


图 1　126 kV GIS 试验平台示意图

Fig.1　Experimental platform diagram of the 126 kV GIS

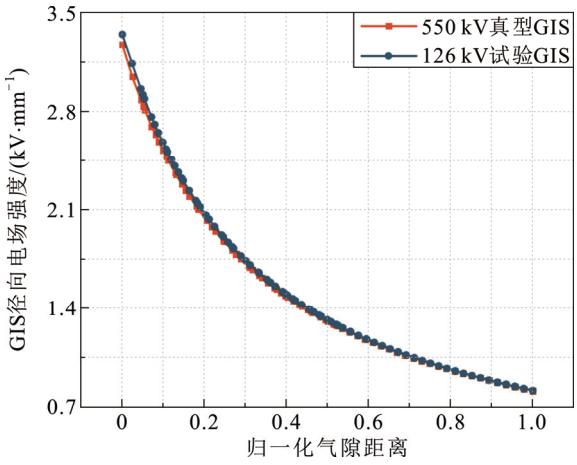


图 2　550 kV 真型 GIS 与 126 kV 试验 GIS 电场分布对比

Fig.2　Comparison of electric field distribution between 550 kV real GIS and 126 kV experimental GIS

可控激磁装置由继电器及其控制电路、缓冲弹簧和配重块等组部件组成，可实现对外施激振击打腔体力度及击打位置的控制，即通过调节控制电路、弹簧形变量、配重块质量等参数实现参数可调、可拓展。从而来模拟断路器开关操作给腔体带来的振动影响，可施加幅值范围为 0~120g、持续时间为 30~100 ms，与实际断路器操作振动加速度波形频率分布一致的外施激振。加速度传感器(灵敏度为 20 mV/g)安装在绝缘子下方的试验腔体外表面处，试验时可通过示波器观察 GIS 壳体上的微粒运动信号波形。根据 550 kV 实际断路器操作的振动加速度

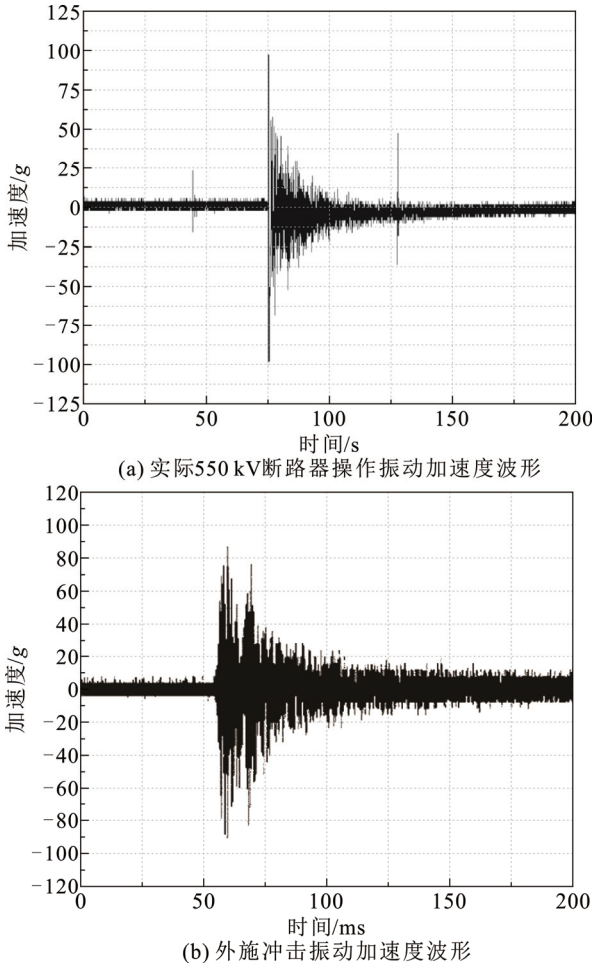


图 3　操作振动与模拟振动加速度波形

Fig.3　Operational vibration and simulated vibration acceleration waveform

波形，调整出的某次外施激振下壳体表面最大峰值可达 90g，频率一致的振动加速度波形如图 3(b)所示。

为观察和记录外施激振后试验腔体中金属微粒的运动情况及诱发的绝缘子表面闪络现象，在试验腔体端部外壳处开有观察窗，在观察窗外架设有 1 台拍摄帧率为 5 000 帧/s 的高速相机，可以观察到微粒的运动情况，满足试验需求。

由于 GIS 内部金属微粒引发的局部放电能量较弱，电荷转移量和电磁辐射量较低，因此传统的局放检测方法难以发现微粒缺陷。现有研究表明，基于微粒相邻碰撞声信号建立的超声检测手段，作为一种非侵入式的局放检测手段，不仅对微粒碰撞检测具有极高的灵敏性，而且可以通过处理微粒碰撞声信号，提取各种特征量并进行组合，从而估计金属微粒参数。因此在断路器下方壳体附近安装 3 个超声传感器(型号为 Soundwel G60，带宽为 15~70 kHz)，以在试验过程中识别提取金属微粒的运动状况。

为了准确量化分析金属微粒在开关操作后的荷电过程与运动情况，需要确定 GIS 中存在的金属微粒外形和尺寸特征。根据现有运行经验可知，在断路器长期运行后产生的异物主要包括线形微粒和不规则的片状微粒。其中，微粒的尺寸以微米级和亚毫米级为主，少量可达毫米级；线形微粒最长可达 15 mm，片状微粒最大尺寸也在 5 mm 左右，见图 4，尺寸极小的微粒可以视作球形微粒。由于断路器主要材质采用金属铝、钢，故清理出的金属微粒材质基本是金属铝、钢材质。且在开罐检查后发现绝大部分微粒聚集于断路器气室的末端，少量微粒存在于触头下方，分析认为气室末端与触头下方都属于弱电场区域。且通过对不同微粒在工况和外施激振下起跳场强的对比分析，最终试验选用尺寸为 5 mm×0.5 mm 的线形金属铝微粒，并于每次试验时将 5 个这样的微粒平均布置在屏蔽罩下方，如图 5 所示。

1.2 GIS 试验方法

由于试验模拟的是长期运行的 GIS 设备，因此单次试验时间较长。为减少电极材料因表面氧化对后期荷电和运动的影响，每次试验结束后均用砂纸打磨电极，并用带有无水乙醇的无纺布擦净电极及试验微粒。待试验微粒放置完毕后，密闭试验腔体，通过腔体预留的气路对腔体抽真空后静置，再冲入 SF_6 气体，洗气过程重复 2~3 次，最后冲入 0.4 MPa 的 SF_6 气体静置 60 min，待气体均匀后展开试验。

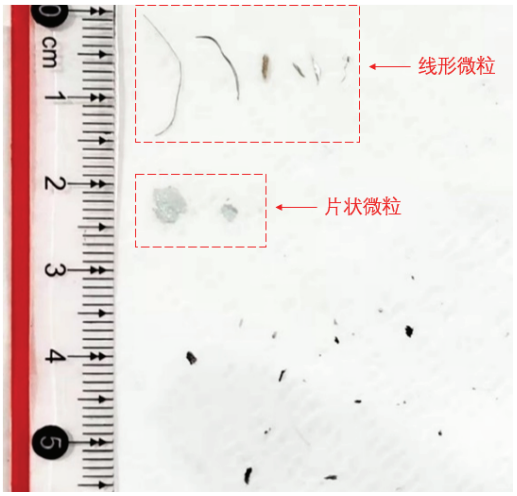


图 4 断路器气室内清理出的金属微粒

Fig.4 Metal particles removed from the gas chamber of the circuit breaker

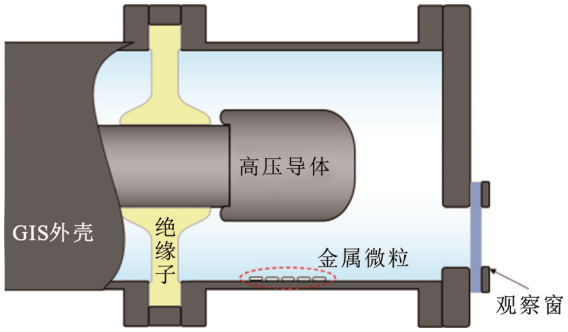


图 5 GIS 试验内部结构与试验布置图

Fig.5 Diagram illustrating the internal structure and layout of a GIS experiment

大量工程经验表明，GIS 内金属微粒起跳并诱发绝缘子表面闪络过程具有一定偶然性，即在 GIS 长期运行过程中或开关操作时，微粒并不能每次都诱发绝缘子表面闪络。因此为节约试验资源，在试验室中复现微粒运动至闪络全过程，试验将在高于工作电压的情况下模拟断路器开关操作。考虑到在设备运行过程中，即使在气体泄漏等因素的影响下，SF_6 气体仍能保持足够性能以保障设备正常运行，避免因压力不足而导致的设备故障或性能下降，因此本文在最低功能气压 0.4 MPa 下进行试验。

为了试验顺利进行，观察外施激振下微粒起跳、运动、吸附和绝缘子表面闪络的全过程，设计试验步骤如下所述。

1）每次进行试验时，均采用一定的速率逐步升压至 126 kV GIS 的运行电压 63.5 kV，再进行 10 min 耐压试验。

2）在 63.5 kV 电压等级下的耐压试验结束后，模拟断路器开关操作，并通过观察窗和高速相机观察金属微粒在开关操作后的起跳、运动、吸附和绝缘子表面闪络过程。

3）若在 63.5 kV 电压等级的耐压试验和开关操作后均未发生金属微粒的起跳至闪络过程，则可逐步升压至最高 184 kV(126 kV GIS 设备额定短时工频耐受电压的 80%)，重复过程 2），并观察耐压试验期间与开关操作后金属微粒是否出现起跳等动作。

4）若在耐压试验期间或升压过程中出现绝缘子表面闪络，则保持其他试验条件不变，在该电压等级下进行 5 次重复试验，以确定金属微粒在断路器尚未动作情况下的平均击穿电压 U_{av}，同时降低 U_{av} 电压大约 10~20 kV，并在这个电压等级下模拟断路器开关操作，记录模拟冲击振动下微粒起跳运动并最终引发绝缘子表面闪络的击穿电压。

2 GIS 金属微粒的荷电和运动特性

2.1 运行电压下微粒起跳场强

对于微粒起跳场强的研究，选择 3 次同种微粒降低试验的随机性。预试验发现较长的升压时间可直接提高微粒与电极之间的粘滞阻力、提高起跳场强。为了降低粘滞阻力对微粒运动的影响，升压以 5 kV/s 的速率采用连续升压方式，待微粒起跳后记录电压有效值，试验重复 20 次，最后将数据取平均值并分析误差。

1）球形金属微粒起跳场强

球形金属微粒所受重力为：

$$G=-mg=-\frac{4}{3}\pi a^3\rho g \tag{1}$$

式中：a 为球形微粒半径，m；ρ 为金属微粒密度，kg/cm^3；m 为球形金属微粒质量，kg。

结合 Félici 采用镜像电荷法得到的库仑力为：

$$F_q=-kqE \tag{2}$$

式中：k 为电镜像力引起的修正系数，取 0.832；E 为球形金属微粒所在位置的电场强度，V/m；q 为球形金属微粒带电量，C。

球形金属微粒静置于极板所带电荷 q 为：

$$q=-\frac{2}{3}\pi^3\varepsilon_0\varepsilon_r a^2E_0 \tag{3}$$

式中：ε_0 为真空中的介电常数，F/m；ε_r 为 SF_6 的相对介电常数；E_0 为微粒与极板接触所在位置电场强度，V/m。

当 GIS 中球形金属微粒处于静置状态时，其运动方程为：

$$F_N+F_q+G=0 \tag{4}$$

式中：F_N 为金属微粒所受支持力，N；F_q 为金属微粒所受库伦力，N；G 为金属微粒所受重力，N。

结合式(4)可知，当金属微粒所受支持力 F_N 为 0 时，球形金属微粒将脱离电极底部，达到临界起跳条件，即：

$$F_q+G\geq 0 \tag{5}$$

联立式(1)—式(5)可知，理论上工频电压下球形微粒的临界起跳场强为：

$$E_s\geq\sqrt{\frac{2a\rho g}{k\pi^2\varepsilon_0\varepsilon_r}} \tag{6}$$

选取半径为 0.25 、0.5、0.75 mm 的球形微粒，利用搭建的试验装置测量球形导电微粒的起跳电压，从而确定起跳场强。图 6 为工频电压下球形金属微粒起跳场强试验值 E_1 和理论计算值 E_0。

可以看到，随着微粒半径的增大，球形金属微粒起跳场强呈指数趋势升高，并且增长趋势逐渐变缓；球形金属微粒起跳场强试验值与理论值相差不大。

2）线形金属微粒起跳场强

同理由式(5)可得，理论上平躺于 GIS 外壳底部的线形金属微粒起跳场强 E_l 满足：

$$E_l\geq\sqrt{\frac{r\rho g}{k\varepsilon_0\varepsilon_r}} \tag{7}$$

式中：r 为线形微粒半径，m。

由式(7)可以看出，理论上计算的微粒起跳场强

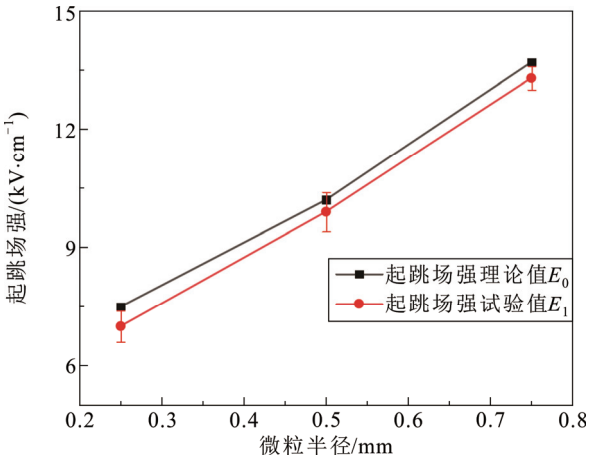


图 6 工频电压下球形微粒起跳场强理论值与试验值

Fig.6 Theoretical and experimental assessments of the critical electric field strength required for spherical particles to initiate jumping behavior under power frequency voltage

与微粒长度、半径和密度有关，而 SF_6 气体相对于空气而言，其质量与密度要大得多，对微粒的起跳可能存在一定的影响。图 7 展示了当微粒长度 l 为 2 mm 时，不同半径的金属微粒起跳所需场强随气体压力变化的趋势。研究发现，对于不同尺寸的微粒，其起跳场强几乎不受气体压力增高的影响。此外，试验结果并未揭示气压变化对各种尺寸微粒起跳场强的影响存在明确的规律性。因此，在深入探讨微粒起跳场强特性时，选择了气压为 0.1 MPa 的情况作为示例进行阐述。

图 8 揭示了微粒的起跳场强会随着它们的长度而改变的特性。可以观察到，当微粒长度逐渐增加时，微粒的起跳场强也有相应的提升。实际观察到的现象与理论状态存在一定的偏差，这可能是由于微粒在极板上承受的外部压力造成的，关于产生该差异的具体理论原理，未来还需要进行更深层次的探讨。

图 9 展示了各种规格线形微粒的实际起跳场强与经过计算后得到的理论起跳场强 E_{theory}。另外，可以观察到随着微粒直径的增大，微粒的起跳场强具有明显的上升趋势。当微粒长度≤3 mm 时，随着其直径的增大，测量到的微粒实际起跳场强与理论预测值相对匹配；而当微粒长度>3 mm 时，随着微粒尺寸的减小，起跳场强测量值与理论预测值之间的偏差较为明显。

2.2 带电操作下微粒起跳场强

1）球形金属微粒起跳场强

针对 GIS 内可能出现的不同大小的潜伏性球形金属微粒，试验选取了半径 a 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 mm 和 1.0 mm 的球形金属铝微粒和金属钢微粒，在 GIS 同轴试验平台上根据前述试验方法和步骤，测得球形微粒分别在试验工频电压下和外施冲击振动叠加工频电压下的起跳场强，如图 10 所示。

研究表明，随着球形金属微粒半径 a 的增大，球形自由金属微粒起跳场强呈升高趋势，试验起跳场强与理论计算起跳场强趋势一致且略高。相较于铝质微粒，钢质微粒的起跳场强更高。

2）线形金属微粒起跳场强

由于线形微粒的长度对微粒的起跳场强影响不大，试验选取微粒长度 l 均为 5 mm，半径 r 分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 mm 和 0.5 mm 的线形金属铝和金属钢微粒，在相同的试验平台和试验条件下，测得线形微粒分别在试验工频电压下和外施冲击振

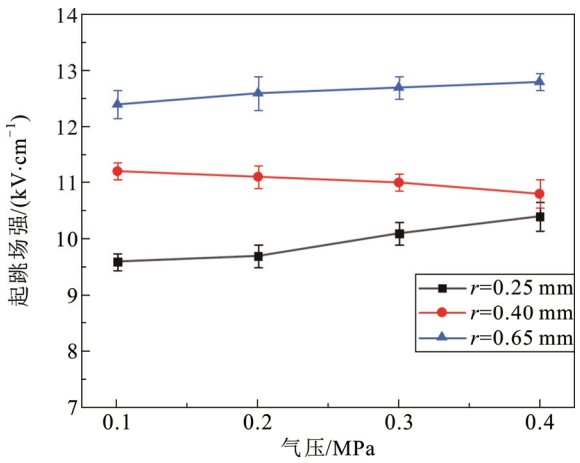


图 7 微粒起跳场强随气压的变化曲线(l=2 mm)

Fig.7 Correlation between particle jumping field strength and air pressure curve (l=2 mm)

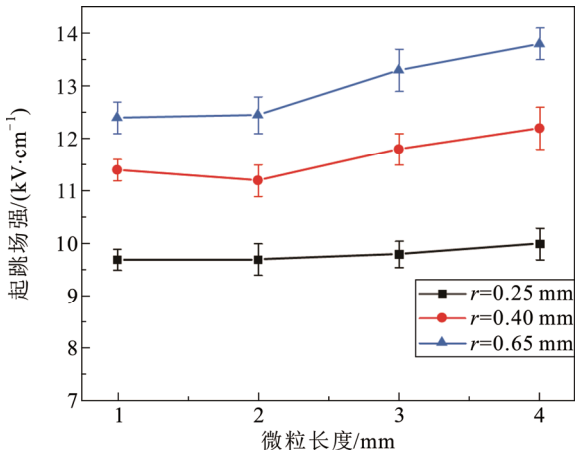


图 8 微粒起跳场强随长度的变化关系

Fig.8 Correlation between the strength and length of particle jumping fields

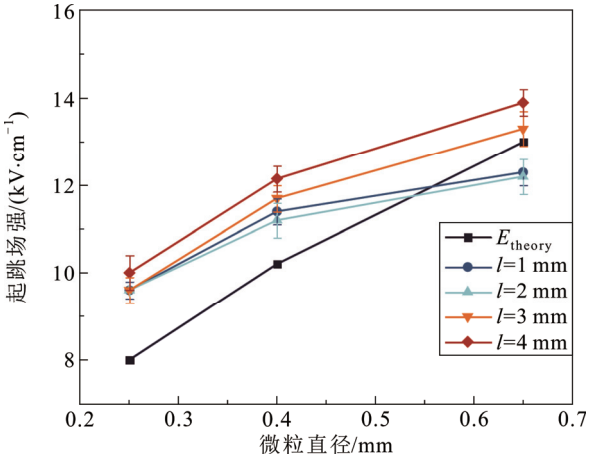


图 9 微粒起跳场强随直径的变化关系

Fig.9 Correlation between field strength of particle jumping and particle diameter

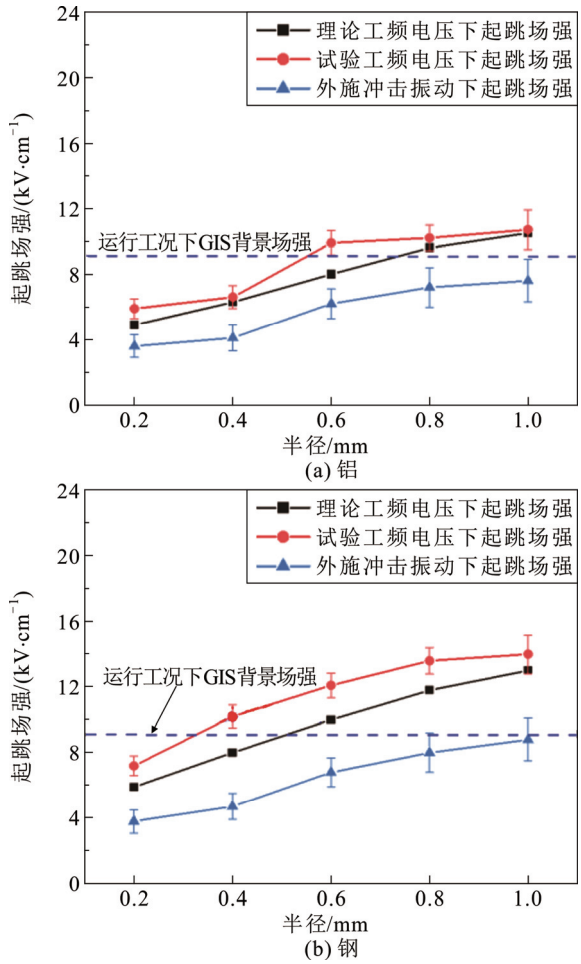


图 10　外施冲击振动下不同金属微粒起跳场强

Fig.10　Field strength variation among diverse metal particles when subjected to external impact vibration

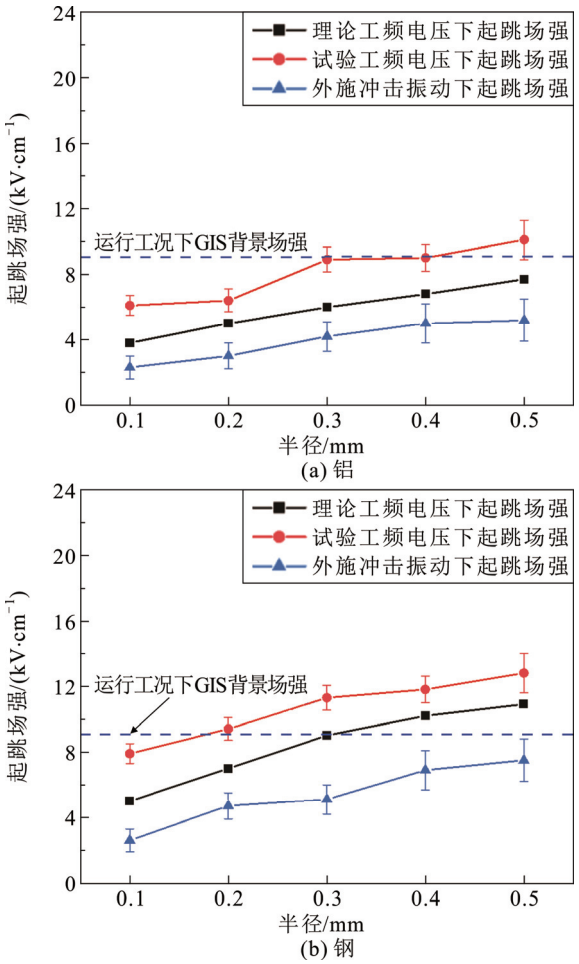


图 11　不同条件下线形金属微粒起跳特性

Fig.11　Jumping behavior of linear metal particles under varying conditions

动叠加工频电压下的起跳场强，如图 11 所示。

随着线形微粒的尺寸增大，微粒的起跳场强逐渐升高，并且外施冲击振动后线形微粒的起跳场强明显降低。而受到冲击振动作用后，平躺的线形微粒的姿态会发生变化，表现为线形微粒的倾斜程度发生改变。

3　带电操作下单微粒运动机理分析

通过对不同微粒在工况和外施激振下起跳场强的对比分析，发现外施激振对线形金属铝微粒的起跳场强影响最大，故我们选择选取 20 个 5 mm×0.5 mm 的线形金属铝微粒，试验前先将微粒布置于屏蔽罩正下方，详细情况如图 12 所示，再向 GIS 试验腔体中充入 0.4 MPa 的 SF_6(绝对气压)，准备工作完毕后按照试验步骤开始试验。

GIS 带电操作产生的冲击振动激励绝缘子附近微粒起跳运动并吸附至绝缘子表面的过程如下所述。

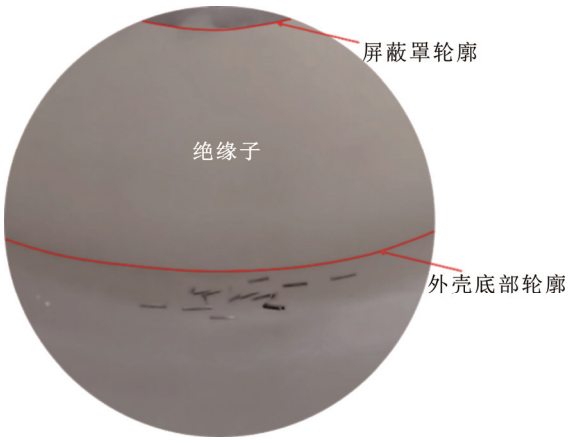


图 12　试验前微粒的布置情况

Fig.12　Setup of particles before the experiment commenced

3.1　单微粒的起跳与运动

冲击振动激励下潜伏性金属微粒受到向上的壳体支持力，当微粒达到临界起跳条件时，将脱离 GIS 外壳底部进行飞行运动。

GIS 壳体冲击振动激励下，线形微粒的姿态将发生由“平躺”向“竖立”的转变，微粒的荷电量也随微粒倾斜姿态的变大而增加。当微粒完全“竖立”时，微粒可获得最大荷电量，作用于微粒的电场力的幅值也可达到最大，满足微粒持续运动的条件，微粒将在 GIS 壳体底部进行高度随机地飞行、碰撞运动。线形微粒在不同倾斜姿态下的表面电场分布和荷电量如图 13、图 14 所示。图中 x、h 为金属微粒水平、竖直坐标。

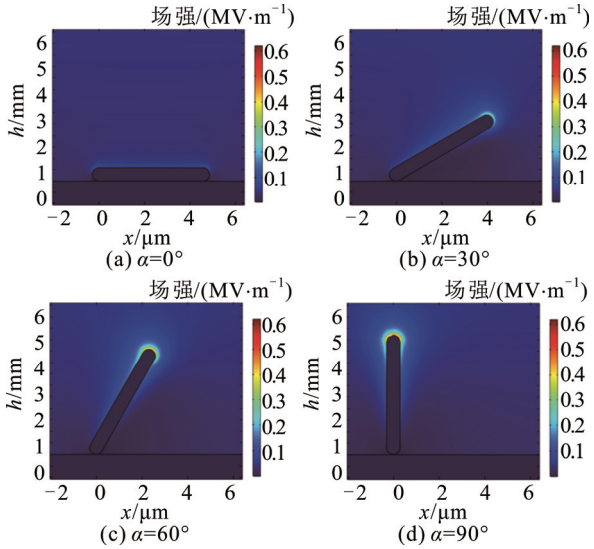


图 13 线形微粒不同倾斜姿态下表面电场情况

(l=5 mm，r=0.25 mm)

Fig.13 Electric field on the surface of linear particles at varying inclination angles

(l=5 mm，r=0.25 mm)

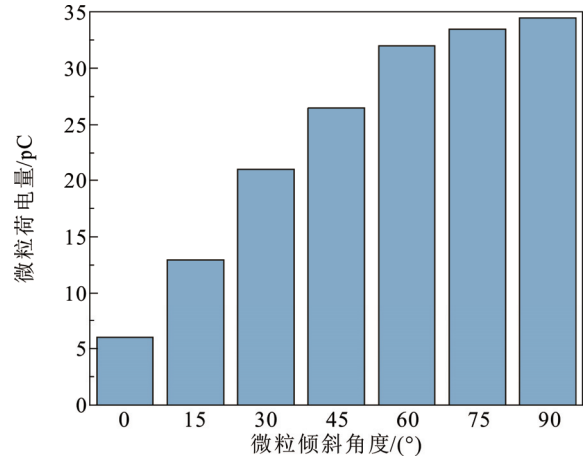


图 14 线形微粒不同倾斜姿态下荷电量

(l=5 mm，r=0.25 mm)

Fig.14 Charge capacity of linear particles under various tilt postures(l=5 mm, r=0.25 mm)

线形微粒在外施激振下“受激”起跳运动示意图和实际运动现象如图 15、图 16 所示。

微粒受激起跳并进行飞行运动时，与绝缘子表面之间的距离更近，极易受到绝缘子表面的静电吸附力而向着绝缘子表面飞行，如图 17 所示。

微粒“受激”起跳后在 GIS 壳体底部碰撞跳跃的运动过程，期间将释放出显著的局部放电信号，信号的幅值与工频电压的相位具有强相关性：当微粒在工频电压 90°或 270°与 GIS 壳体碰撞并完成放电、充电过程，此时微粒的荷电量、局部放电量均达到最大值，如图 18 所示，运动的自由金属微粒局部放电信号相位谱图在工频正、负半周期呈现对称双峰形。运动的自由金属微粒的局部放电量表达式为：

$$\begin{cases} \Delta Q = \dfrac{\pi\varepsilon l^2}{\ln(\dfrac{2l}{r})-1} \cdot \dfrac{\sqrt{2}U_{\mathrm{rms}}}{R_2 \ln\left(\dfrac{R_2}{R_1}\right)} \cdot S \\ S = \sin 100\pi t_1 - \sin 100\pi t_2 \end{cases} \tag{8}$$

式中：l 单位为 m；U_{rms} 为电压有效值，kV；ε为 SF_6 的相对介电常数；R_2 为 GIS 外壳半径，m；R_1 为 GIS 高压导体半径，m；t_1 和 t_2 分别是微粒相邻 2 次碰撞时刻，s。

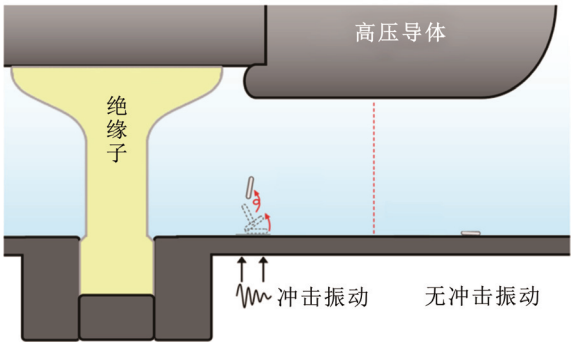


图 15 外施激振下静止微粒的“受激”起跳运动示意图

Fig.15 Jumping movement displayed by stationary particles when stimulated by external forces

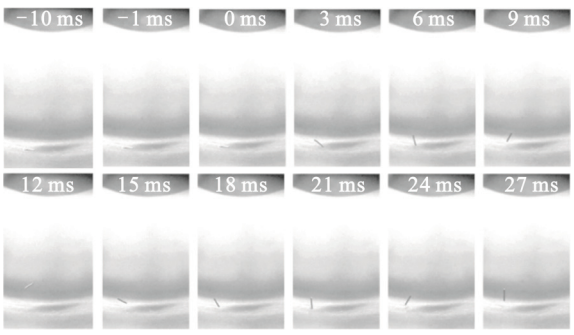


图 16 冲击振动激励下静止微粒的“受激”起跳运动

Fig.16 Phenomenon of particles initiating motion when subjected to shock vibration excitation

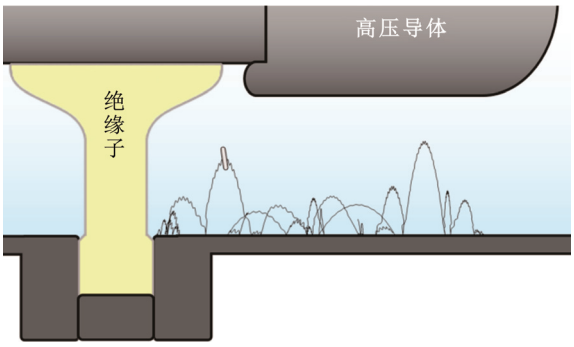


图 17 微粒“受激”起跳后飞行运动示意图

Fig.17 Propulsion of particles following their activation to initiate flight

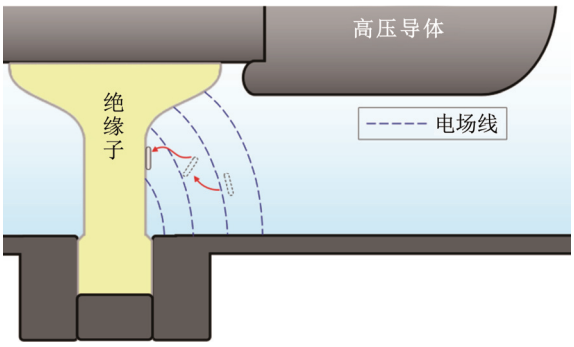


图 19 外施激振下微粒起跳运动并吸附至绝缘子表面示意图

Fig.19 Particles undergo jumping movements and adhere to insulator surfaces when externally excited

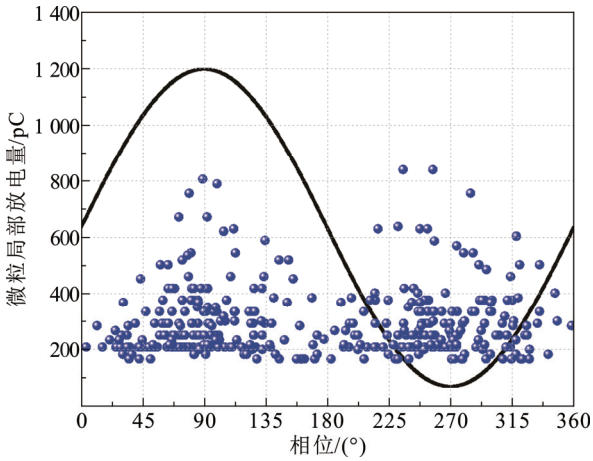


图 18 自由金属微粒运动的局部放电信号相位谱图

Fig.18 Phase spectrum of partial discharge signal for the motion of free metal particles



图 20 微粒吸附于绝缘子表面后的分布情况

Fig.20 Distribution of particles adsorbed on insulator surfaces

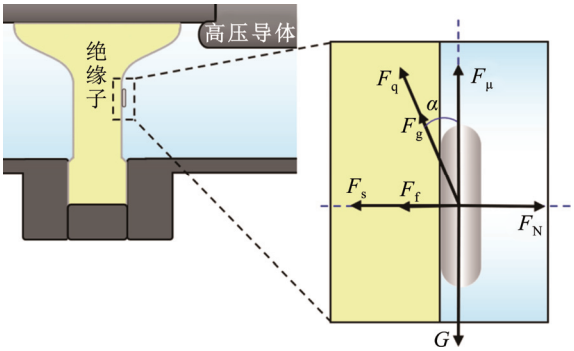


图 21 微粒吸附于绝缘子表面时的受力情况

Fig.21 State of forces acting on particles attached to insulator surfaces

3.2 单微粒的吸附

当绝缘子表面对微粒的静电吸附力和范德华力满足微粒的吸附条件时，微粒将吸附于绝缘子表面，如图 19、20 所示。

微粒吸附于绝缘子表面时，将会受到绝缘子表面的电荷吸附力和范德华力，如图 21 所示。

F_s 为微粒受到绝缘子表面电荷的静电吸附力，表达式为：

$$F_s = \frac{kq\oint_s \sigma \mathrm{d}s}{Z^2} \tag{9}$$

式中：q 为微粒的荷电量；σ 为绝缘子表面的面电荷密度；Z 为微粒与绝缘子表面之间的距离。

F_f 为微粒受到绝缘子表面的范德华力，表达式为：

$$F_f = \frac{A}{6}\left(\frac{r_s}{Z^2} + \frac{R}{(Z^2 + r_s)^2}\right) \tag{10}$$

式中：A 为 Hamaker 常数，为 10^{-21} J；Z 取经验定值 0.3 nm；r_s 为接触表面的粗糙突出部分半径，通常取值为 0~10 nm；R 为微粒半径。

竖直方向微粒的受力 G 的方程为：

$$G = F_\mu + (F_s + F_f)\cos\alpha \tag{11}$$

水平方向微粒的受力方程为：

$$F_s + F_f + (F_q + F_g)\sin\alpha = F_N \tag{12}$$

式中：摩擦力 $F_\mu = \mu F_N$，μ 为金属微粒与绝缘子表面之间的静摩擦系数；α 为金属微粒与竖直方向夹角，°；F_g 为微粒所受到的电场梯度力，N。

根据微粒的受力情况，微粒吸附于绝缘子表面的临界条件为：

$$F_s + F_f \geq \frac{G - \mu(F_q + F_g)\sin\alpha}{\mu + \cos\alpha} \tag{13}$$

当金属微粒吸附于绝缘子表面时，由于微粒的两端较为尖锐，更易于聚集电荷并进行局部放电。若电压为正极性时，微粒靠近 GIS 母线一端的前方将存在大量的负离子，而微粒的另一端前方将存在大量的正离子。此时，电场力将会促使微粒“摆正”自身的姿态，使得微粒的姿态趋向于与绝缘子表面的电场方向平行。

3.3 单微粒的闪络

当观察到微粒吸附于绝缘子表面后出现的姿态转向行为时，继续以 5 kV/s 的速度升高电压，直至电压等级达到 160 kV，即 126 kV GIS 工频耐压值的 69.6%时，可观察到微粒闪络现象，见图 22。

4 带电操作下多微粒的典型运动行为

当 GIS 试验腔体内同时存在多个金属微粒时，各金属微粒的起跳至吸附到绝缘子表面的过程大致相似。微粒吸附过程及其受力示意图如图 23、24 所示。而当多个金属微粒附着于绝缘子表面时，微粒之间因局部放电而存在电荷的相互作用力，如图 25 所示。由于相互靠近微粒的端部电荷极性相反，因此微粒之间将相互吸引，使得其中的 1 个微粒转动靠近另 1 个微粒，如图 26 所示。

当绝缘子表面吸附多个金属微粒时，多微粒在经过“转向”、“吸引”等运动后会在绝缘子表面形成类似“多星连珠”的径向排列。多个微粒形成“多星连珠”时，微粒间感应出来的电荷将会增强微粒

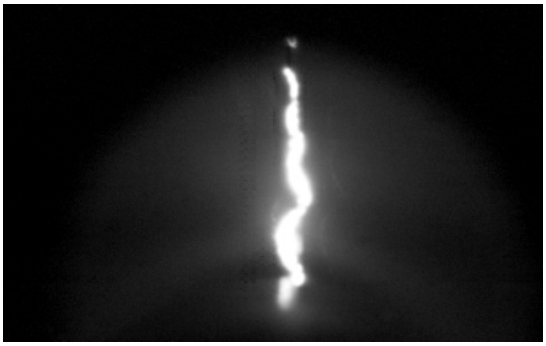


图 22 单微粒的闪络现象

Fig.22 Flashover phenomenon of individual particles

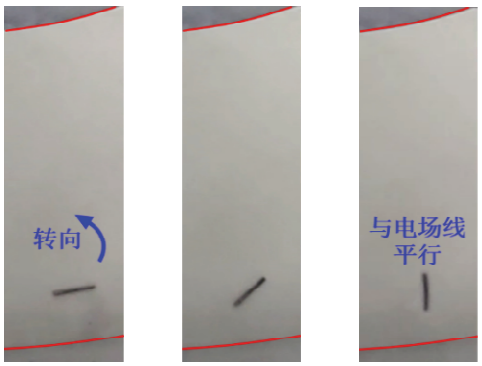
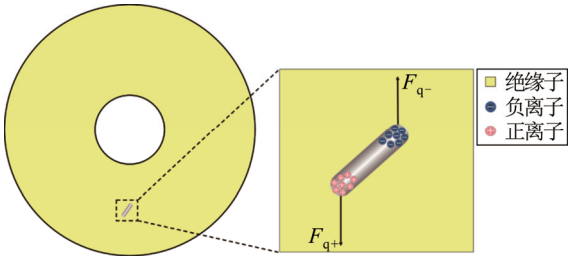


图 23 微粒吸附于绝缘子表面后出现的姿态转向行为

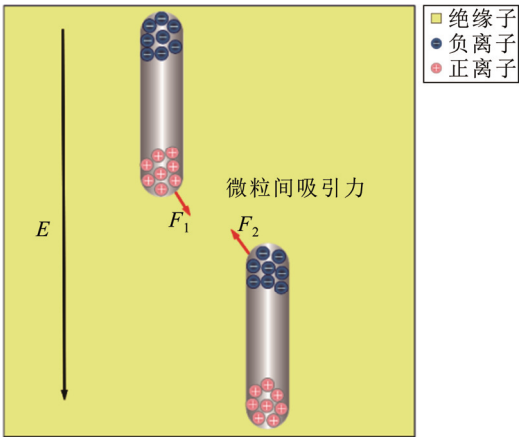
Fig.23 Behavioral changes in particles adhered to insulator surfaces in response to attitude adjustments



下标+、−号对应正、负离子

图 24 微粒吸附于绝缘子表面时端部受力示意图

Fig.24 Schematic diagram showcasing the end force generated as particles adhere to insulator surfaces



F_1—微粒 2 对微粒 1 的作用力；F_2—微粒 1 对微粒 2 的作用力

图 25 微粒之间电荷相互作用力示意图

Fig.25 Schematic representation illustrating the forces of charge interaction between particles



图 26 受微粒间电荷力作用而被吸引、靠近的微粒运动情况

Fig.26 Motion of particles attracted to each other and drawn nearer by the force of charge between them

之间的电场强度ΔE，且微粒之间的电场方向与 GIS 绝缘子表面的电场 E 方向一致，电场叠加下可进一步促进微粒诱发放电的过程。绝缘子表面存在多微粒时表面电场分布见图 27。

为研究绝缘子表面吸附不同数量的金属微粒时诱发的放电电压大小，根据前述绝缘子表面微粒的运动与分布特征，在绝缘子表面均匀布置不同数量的 5 mm×0.5 mm 线形金属铝微粒，采用 2 kV/s 连续升压，在 0.4 MPa 的 SF_6 环境中测得绝缘子表面固定不同数量微粒的闪络电压，如图 28 所示。相对于无微粒时绝缘子表面闪络电压的 230 kV，随着微粒数量的增加，闪络电压随之降低。

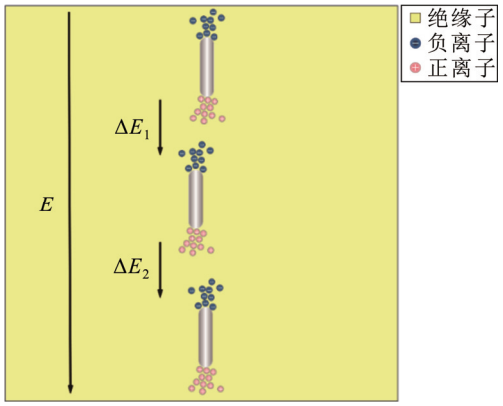


图 27　绝缘子表面存在多微粒时的表面电场分布情况

Fig.27　Distribution of the surface electric field in the presence of multiple particles on insulator surfaces

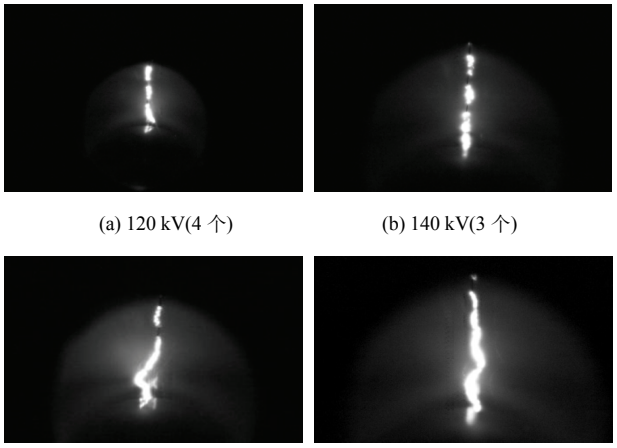
5　结论

1）断路器操作后可产生峰值达到 100g、持续时间 30~50 ms 的冲击振动，该振动可以有效地降低不同形状的微粒起跳场强，且相较于球形微粒，外施激振对线形金属微粒的起跳场强影响更大。

2）在外施激振的作用下，单个金属微粒存在起跳、运动、吸附到引发绝缘子表面闪络的过程。且当金属微粒吸附于绝缘子表面时，微粒受到电场力的作用并逐渐“摆正”自身的姿态，最终姿态趋向于与绝缘子表面的电场方向平行，这可能与电荷积聚和电场作用有关。

3）当绝缘子表面吸附多个金属微粒时，多微粒会经过“转向”、“吸引”等行为，并最终形成“多星连珠”的径向排列。

4）在 0.4 MPa 的工作电压下，通过试验发现，相较于单微粒击穿放电所需的 160 kV，多微粒所需的闪络电压更低，例如 4 个微粒的击穿电压可降至 126 kV GIS 工频耐压值的 52%，即 120 kV。这可以作为断路器带电操作后，气室内常发生绝缘子击穿故障的一种解释。



(a) 120 kV(4 个)　(b) 140 kV(3 个)

(c) 150 kV(2 个)　(d) 160 kV(1 个)

图 28　绝缘子表面多微粒“多星连珠”放电行为

Fig.28　Behavior of discharge exhibited by multiple particles on insulating surfaces

参考文献　References

[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] 庞先海，王　潇，乔松松，等. SF_6/N_2 混合气体中金属微粒在工频电压下运动的仿真与实验研究[J]. 高电压技术，2021，47(2)：679-686.
PANG Xianhai, WANG Xiao, QIAO Songsong, et al. Simulation and experimental study on the motion of metal particles in SF_6/N_2 mixed gas under power frequency voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 679-686.

[3] 树　婷，杨玥坪，郭若琛，等. 交流与负极性雷电冲击叠加电压下 SF_6 中自由金属颗粒局部放电激发特性[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3305-3315.
SHU Ting, YANG Yueping, GUO Ruochen, et al. Partial discharge excitation characteristics of free metal particles in SF_6 gas under AC and negative lightning impulse superposition voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3305-3315.

[4] 刘云鹏，黄志成，耿江海，等. 颗粒与绝缘子碰撞粘附问题的模型选择[J]. 高电压技术，2022，48(3)：809-819.
LIU Yunpeng, HUANG Zhicheng, GENG Jianghai, et al. Selection of model for particle-insulator collision adhesion problem[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 809-819.

[5] 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.

[6] 张乔根，李晓昂，刘 琳，等. GIS 中 SF_6 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 SF_6 insulation systems in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2689-2698.

[7] 李庆民，常亚楠，王 健，等. 气体绝缘输电管道微粒陷阱设计技术研究进展[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4182-4193.
LI Qingmin, CHANG Yanan, WANG Jian, et al. Methodological advances of metal particle traps design in gas insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4182-4193.

[8] 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(北京)，2017.
JI Hongxin. Study on movement behavior and discharge characteristic of metal particle in GIS under AC operating voltage[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2017.

[9] 许 渊. 运行中 GIS 绝缘子表面金属颗粒诱发放电研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2020.
XU Yuan. Investigation on mechanism of metallic particle induced flashover of GIS insulators in operation condition[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2020.

[10] LI X, LIU W D, DING D W, et al. Metal particle movement and induced insulator flashover under impact vibration generated by switching operation in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 757-766.

[11] YOU H Y, ZHANG Q G, GUO C, et al. Motion and discharge characteristics of metal particles existing in GIS under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 876-885.

[12] LI X A, LI J, REN J, et al. Acoustic method for multiple free metallic particle recognition in GIS/GIL[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 2104-2111.

[13] WU Z C, ZHANG Q G, SONG J J, et al. Improved method for acoustic identification of free conductive particle defects in GIL[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1317-1323.

[14] 杨卓栋，齐 波，董 浩，等. SF_6 直流穿墙套管金属微粒产生过程模拟及沿面闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(7)：2848-2857.
YANG Zhuodong, QI Bo, DONG Hao, et al. Simulation of metal particles generation process in SF_6 DC wall bushing and experimental study of flashover characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2848-2857.

[15] LI X A, PEI Z H, WU Z C, et al. Free microparticles-An inducing mechanism of pre-firing in high pressure gas switches for fast linear transformer drivers[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(3): 035113.

[16] NEGARA Y, YAJI K, IMASAKA K, et al. AC particle-triggered corona discharge in low pressure SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 91-100.

[17] HARA M, NEGARA Y, SETOGUCHI M, et al. Particle-triggered pre-breakdown phenomena in atmospheric air gap under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 1071-1081.

[18] 夏苏怡，潘 成，姚雨杭，等. 稍不均匀直流电场下静止与流动变压器油中金属微粒聚集特性[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1693-1702.
XIA Suyi, PAN Cheng, YAO Yuhang, et al. Accumulation characteristics of metal particles in static and flowing transformer oil under slightly nonuniform DC field[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1693-1702.

[19] 刘 鹏，张语桐，吴泽华，等. ±320 kV 直流 GIL 微粒陷阱关键结构参数分析及优化[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4695-4706.
LIU Peng, ZHANG Yutong, WU Zehua, et al. Key parameter analysis and structure optimization of particle trap in ±320 kV DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4695-4706.

[20] 胡智莹，魏 来，耿秋钰，等. 直流 GIS/GIL 中线形金属微粒群飞萤运动现象与危险程度评估[J]. 中国电机工程学报，2024，44(15)：6219-6228.
HU Zhiying, WEI Lai, GENG Qiuyu, et al. Firefly movement phenomenon of wire particle swarm and risk assessment in DC GIS/GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6219-6228.

[21] 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.

[22] 王耀港，王哲铭，李 珂，等. 不同主导机制下考虑表面陷阱效应的直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚特性[J/OL]. 上海交通大学学报，2023：1-24[2024-07-24]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/31.1466. U. 20231020.1700.002. html.
WANG Yaogang, WANG Zheming, LI Ke, et al. Characteristics of surface charge accumulation on DC GIL insulators under different dominant mechanisms considering surface trapping effect[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023: 1-24[2024-07-24]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/31.1466. U. 20231020.1700.002. html.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 王 健，李庆民，李伯涛，等. 直流 GIL 中自由线形金属微粒的运动与放电特性[J]. 中国电机工程学报，2016，36(17)：4793-4800.
WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Motion and discharge behavior of the free conducting wire-type particle within DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4793-4800.

[26] 李晓昂，邵奕凯，李志兵，等. 特高压混合直流工程快速旁路保护用兆伏级 SF_6 间隙等离子体喷射触发特性及工程设计[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2614-2622.
LI Xiaoang, SHAO Yikai, LI Zhibing, et al. Triggering characteristics and engineering design of megavoltage-grade SF_6 gap plasma injection for fast bypass protection in ultra-high voltage hybrid DC projects[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2614-2622.

[27] 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.

[28] 李志兵，徐晓东，张 然，等. ±800 kV 混合直流输电工程用 DC 80 kV SF_6/N_2 等离子体喷射触发间隙研制[J]. 高电压技术，2023，49(3)：937-945.
LI Zhibing, XU Xiaodong, ZHANG Ran, et al. Development of DC 80

kV SF_6/N_2 plasma injection trigger gap for ±800 kV hybrid DC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 937-945.

[29] 李晓昂，张宁博，李志兵，等. 高气压 SF_6 中毛细管放电等离子体的喷射特性[J]. 高电压技术，2022，48(12)：5080-5089.
LI Xiaoang, ZHANG Ningbo, LI Zhibing et al. Plasma injection characteristics driven by capillary discharge in high pressure SF_6[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 5080-5089.



李晓昂(通信作者)
1989—，男，博士，副研究员，硕导
主要从事脉冲功率技术、高电压试验技术、脉冲放电等离子体方面的研究工作
E-mail: li_xiaoang@xjtu.edu.com

LI Xiaoang
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



向　岭
2002—，男，硕士生
主要研究方向为 GIS/GIL 绝缘状态监测与诊断技术
E-mail: 2053812166@qq.com

XIANG Ling



杨晓宇
2002—，男，硕士生
主要研究方向为 GIS/GIL 绝缘状态监测与诊断技术
E-mail: 1780914882@qq.com

YANG Xiaoyu



王　浩
1985—，男，博士，教授级高工
主要从事超特高压 GIS 领域、特高压 GIS 变电站 VFTO 防护关键技术等方面的研究工作
E-mail: wanghao2010@epri.sgcc.com.cn

WANG Hao
Ph.D., Professor



吕肖肖
2001—，男，硕士生
主要研究方向为 GIS/GIL 绝缘状态监测与诊断技术
E-mail: 2581315256@qq.com

LYU Xiaoxiao



张乔根
1965—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压试验技术、电力设备状态诊断、脉冲放电与等离子体等方面的研究工作
E-mail: hvzhang@xjtu.edu.cn

ZHANG Qiaogen
Ph.D., Professor

收稿日期　2024-08-14　修回日期　2024-12-11　　编辑　曾文君