

直流 GIL 中球形金属颗粒运动特性研究

戴 锋¹, 陈 轩¹, 王立宪², 车 凯¹, 朱 超¹, 马宏忠²

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211000; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211000)

摘 要:针对 GIL 中球形金属颗粒自由跳动造成严重绝缘故障的问题, 在分析金属颗粒受力情况的基础上, 搭建根据实际 GIL 设备等比例缩小的实验平台, 拍摄和记录金属颗粒在腔体内的运动轨迹和起跳场强, 进行多次重复性实验保证实验结果的一般性。实验结果表明: 当金属颗粒材质一定时, 球形颗粒的起跳场强主要由颗粒的半径决定, 气体压强和电压极性对起跳场强几乎没有影响, 起跳场强随着颗粒数量的增加而降低; 球形颗粒在直流 GIL 中运动时可能出现伪谐振现象和围绕负电极徘徊运动的飞萤现象, 颗粒半径越大, 飞萤现象的概率就越高; 球形颗粒在靠近绝缘子时, 颗粒的起跳速度比在高压导体中部时更快; 存在多个颗粒时, 会出现颗粒分时起跳现象, 整体的运动轨迹和单个颗粒的运动轨迹基本相似。

关 键 词:直流 GIL; 球形颗粒; 起跳场强; 运动轨迹; 飞萤现象

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.021 中图分类号:TM85 文章编号:1673-9140(2022)03-0173-08

Kinetic characteristic analysis of spherical metal particles in DC GIL

DAI Feng¹, CHEN Xuan¹, WANG Lixian², CHE Kai¹, ZHU Chao¹, MA Hongzhong²

(1. Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211000, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211000, China)

Abstract: In order to solve the problem that serious insulation fault caused by free pulsation of spherical metal particles in GIL, an experimental platform proportional shrunken according to GIL device is set up on the basis of analyzing the force of metal particles. The movement locus of metal particle and jumping field are filmed and recorded. The generality of the experimental results is guaranteed through multiple repetitive experiments. The results indicate that the particle jumping field is determined by the radius of the particles while the material is fixed. The gas pressure and the voltage polarity almost have no effect to the jumping field. The jumping field intensity decreases gradually with the increase of the quantity of neighboring particles. The pseudo resonance phenomena and firefly phenomena may appear when spherical particle moves in DC GIL. The probability of firefly phenomena increases with the increasing particle radius. The jump rate of the particles near the insulator is faster than that of the particles in the middle of the high voltage conductor. Multiple particles will cause the time-divided jumping phenomena and the movement locus is basically similar to the single particle.

Key words: DC GIL; spherical particle; jumping field; movement locus; firefly phenome

气体绝缘封闭输电线路(gas insulated transmission lines, GIL)在 20 世纪 70 年代开始进入工程应用,具有输送电压等级高、能量损耗小、故障检修率低、铺设方式灵活等优点,将成为未来全球电力输送的重要手段之一^[1-3]。直流 GIL 在生产、运输、装配及运行过程中,会不可避免地产生以球形、线形为主的自由金属颗粒。这些颗粒在电场中频繁运动,导致电场严重不均匀,进而造成气隙击穿、绝缘子沿面闪络,甚至大面积停电等严重后果^[4-6]。研究直流 GIL 中球形金属颗粒的运动特性具有重要的现实意义。

目前国内外的研究成果都是在分析直流 GIL 中金属颗粒受力情况的基础上,通过金属颗粒的运动模型对颗粒的运动特性进行仿真模拟,搭建平板、楔形、同轴圆柱等典型实验平台,观察颗粒的运动轨迹。文献[7]搭建直流楔形电极实验平台,通过改变楔形极板倾斜角度和电极覆膜厚度,对球形颗粒的动力学行为进行研究,观察和记录金属颗粒的谐振现象和振动信号,但研究过程中并没有验证楔形极板电场和同轴圆柱电场的等效性。文献[8-9]在考虑球形颗粒非弹性碰撞的前提下,搭建封闭式同轴圆柱电极实验平台,利用实验结果验证运动模型的准确性;发现颗粒运动的谐振频率与颗粒半径、绝缘介质成分有关,颗粒在腔体内的活跃度随着随机反射角、电压幅值的增大而增大;实验中颗粒仅放置于腔体中部,没有考虑绝缘子侧电场分布对颗粒运动行为的影响。通过上述总结发现,现有研究中搭建的实验平台与实际 GIL 腔体结构不同,两者的电场分布具有一定差异性^[10-13]。研究球形颗粒运动行为时,颗粒起始位置基本都是处于远离绝缘子或腔体终端,始终忽略轴向不均匀电场,缺乏颗粒数量和盆式绝缘子对金属颗粒运动特性影响的研究。

针对上述问题,搭建等比例缩放 GIL 实验平台,拍摄和记录球形金属颗粒在腔体中部和绝缘子附近的运动轨迹,对比分析颗粒半径、数量、气压、起始位置和电压极性对球形颗粒运动特性的影响,为球形颗粒故障诊断和防治提供有效的研究依据。

1 球形金属颗粒受力分析

特高压 GIL 设备由高压导体、外壳、绝缘子、连接组件等组成,标准单元段的长度达到 10 m 以上,球形颗粒在标准单元段内的受力如图 1 所示,GIL 腔体为同轴圆柱体, R_0 为高压导体半径, R_1 为腔体半径,内部电场为稍不均匀电场。忽略球形金属颗粒自旋效应和虚假质量力,颗粒在 GIL 腔体内带电后主要受到库仑力、梯度力、重力和气体粘滞阻力的影响^[14-16],这些力的瞬态耦合决定了颗粒的运动状态。

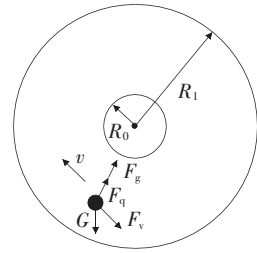


图 1 金属颗粒受力模型

Figure 1 Mechanical model of metal particle

当高压导体施加直流电压 U 时,GIL 腔体内的电场强度可以表示为

$$E = \frac{U}{d \ln(R_1/R_0)} \quad (1)$$

式中 d 为球形颗粒距离高压导体轴心的距离。

忽略颗粒在运动时产生的微放电和电场畸变情况,球形颗粒与腔体外壳接触时的带电量为

$$q_1 = -\frac{2}{3}\pi^3 r^2 \epsilon_0 \epsilon_1 E \quad (2)$$

式中 r 为球形颗粒半径; ϵ_0 为真空介电常数,取 $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ^[17-19]; ϵ_1 为绝缘气体相对介电常数,当气体为 SF_6 时, $\epsilon_1 = 1.002$ 。

球形颗粒与高压导体接触时的带电量为

$$q_2 = \frac{2}{3}\pi^3 r^2 \epsilon_0 \epsilon_1 E \quad (3)$$

颗粒带电后受到的库仑力为

$$F_q = k |qE| \quad (4)$$

式中 k 为镜像电荷下的修正系数,当颗粒距电极

较近或接触电极时, $k = 0.832$, 其余情况下 $k = 1$ ^[20-22]; q 为颗粒所带电荷量。

由于 GIL 腔体电场为稍不均匀电场, 颗粒会受到与电荷量无关的电场梯度力, 即

$$F_g = 2\pi r^3 \epsilon_0 \epsilon_1 |\nabla E^2| \quad (5)$$

颗粒在直流电场运动时, 速度大于 0.2 m/s, 颗粒受到的气体粘滞阻力已经不能忽略^[23-24]。计算气体粘滞阻力时, 首先需要估算雷诺数。流体力学中, 雷诺数是一个无量纲数, 用以表征流体流动情况, 即

$$R_e = 2vr\rho_s/\mu_s \quad (6)$$

式中 r_s 为气体密度; μ_s 为气体粘滞系数; v 为颗粒运动速度。

将腔体内部等效为恒温、静止和不可压缩的流体场, 流体与颗粒的相对速度可以等效为颗粒的运动速度, 颗粒受到的气体粘滞阻力为

$$F_v = \frac{1}{2} \left(\frac{24}{R_e} + \frac{6}{\sqrt{R_e} + 1} + 0.4 \right) \pi r^2 v^2 \rho_s \quad (7)$$

颗粒在腔体内受到的重力为

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g \quad (8)$$

式中 r_1 为颗粒密度, 当颗粒为铝球时, $r_1 = 2700 \text{ kg/m}^3$; g 为万有引力常量, 取 9.81 m/s^2 。

颗粒在起跳阶段时, 电场梯度力和气体粘滞阻力的影响可以忽略不计, 只要满足 $F_q \geq G$, 颗粒即可起跳, 结合式(2)、(4)、(8), 得到颗粒的起跳场强为

$$E_L = \sqrt{\frac{2r\rho_1 g}{k\pi^2 \epsilon_0 \epsilon_1}} \quad (9)$$

2 实验方法

2.1 实验平台

为了准确监测球形颗粒的起跳场强和运动轨迹, 搭建如图 2 所示的金属颗粒运动测试实验平台, 包括无局放高压直流系统(无局放高压试验变压器、无局放整流硅堆、耦合电容器等)、GIL 实验腔体、高速相机、计算机等设备。

GIL 实验腔体以实际 GIL 设备为原型等比例

缩放制成, 由高压绝缘套管、直行腔体、T 型腔体和盆式绝缘子等部件组成。实验颗粒所在的腔体为直筒状, 开设 3 个观察窗口, 用以保证高速相机拍摄时需要的进光量, 内部高压导体直径为 30 mm。高速相机型号为 Phantom VEO710L, 能以 7 400 帧/s 速度拍摄 1280×800 的高质量运动图片, 标准模式下最高拍摄速率为 680 000 帧/s, 最小曝光率为 $1 \mu\text{s}$, 可配置 18、36、72 G 存储器, 能够拍摄满足实验需求的颗粒起跳瞬间和运动轨迹, 相关设备实物如图 3 所示。

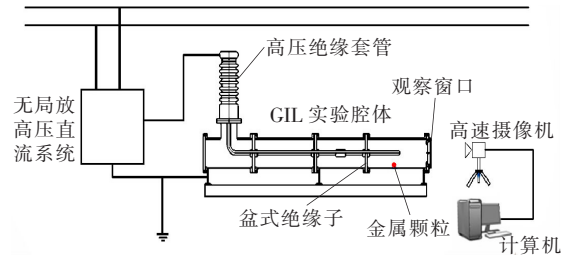


图 2 颗粒运动测试实验平台

Figure 2 Experiment platform of particle motion

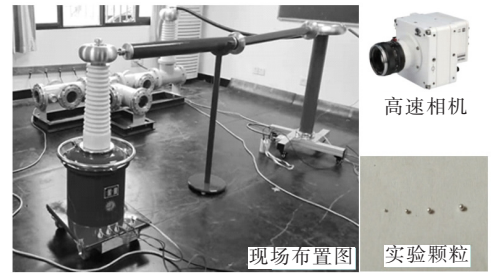


图 3 设备实物

Figure 3 Physical drawing of equipment

为了验证开窗后腔体内的电场分布不会影响实验颗粒的运动轨迹, 使用 Comsol 软件对腔体内电场分布进行有限元分析, 腔体内气压设置为 0.1 MPa, 绝缘介质为 SF₆ 气体, 直流运行电压幅值为 120 kV, 仿真对比结果如图 4 所示。由图 4 可知, 开有观察窗口的实验腔体内电场分布与同尺寸的全封闭腔体基本相同, 实验腔体观察窗处的电场发生畸变, 但畸变程度较小。根据文献[24]描述的实验颗粒运动分布特性, 对比 2 种腔体内高压导体下部空间的电场分布, 证明球形颗粒在实验腔体内的运动可以等效为在全封闭腔体内的运动。

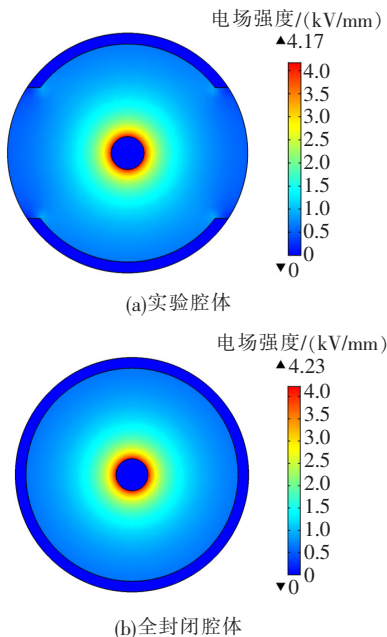


图4 腔体内电场分布

Figure 4 Electric field distribution in cavity

2.2 实验步骤

颗粒运动特性实验在室温下进行,腔体内绝缘介质为纯净度 99.99% 的 SF_6 气体,选取半径为 0.5、0.8、1.0、1.2 mm 的铝球颗粒作为研究对象。球形颗粒和实验腔体为厂家专业加工制成,保证了表面打磨的光滑度,最大程度降低金属颗粒和腔体内壁表面粗糙度对实验的影响。具体实验步骤如下。

1)每次实验前先用接地棒连接实验腔体,清除上次实验后腔体附带的残余电荷,保障实验人员人身安全;然后用干净并沾有酒精的丝绸布依次擦拭高压导体、绝缘子和腔体内壁,减少金属颗粒放电后可能产生的杂质、水分等外在因素对实验的影响;最后待酒精蒸发后,在相应位置放入金属颗粒进行实验。

2)向腔体内充入满足实验气压环境需求的 SF_6 绝缘气体,为了保障绝缘气体的纯净度,首次实验需要多次充入绝缘气体进行洗气。

3)实验升压方式为电压从 0 kV 开始加压到实验颗粒开始起跳的电压,通过高速相机观察到颗粒起跳后立即停止加压,记录电压幅值,结合式(1)、(4)求得颗粒的起跳场强,利用高速相机拍摄颗粒的运动轨迹并进行存储,单个和 3 个 1.0 mm 球形颗粒在腔体内的运动图片如图 5 所示,框内为实验颗粒。

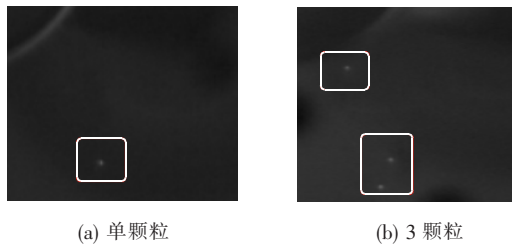


图5 颗粒运动

Figure 5 Particle motion diagram

为了避免单次实验数据可能造成的随机性干扰,每组实验重复 10 次,使用起跳场强的平均值和颗粒运动轨迹的整体趋势作为实验研究依据。

3 实验现象

3.1 球形颗粒的起跳场强

为了研究影响球形颗粒起跳场强的的相关因素,将颗粒的初始位置放置在高压导体中部的正下端(距离绝缘子 200 mm),半径为 1.0 mm 球形颗粒在腔体底部时周边电场分布的仿真结果如图 6 所示。由图 6 可知,球形颗粒平躺在腔体时,周边电场均发生畸变,靠近高压导体一端的场强畸变最大。

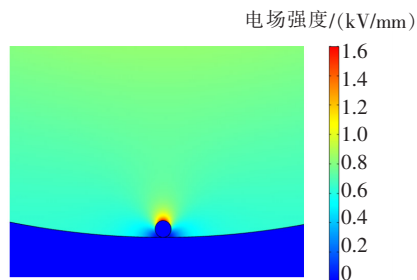


图6 球形颗粒电场仿真结果

Figure 6 Simulation results of the spherical particle

由式(9)可知,当球形颗粒材质一定的情况下,颗粒的起跳场强主要受颗粒半径的影响,不同半径的球形颗粒在 0.1 MPa 气压下起跳场强理论值和实验值的对比结果如图 7 所示。由图 7 可知,不同半径球形颗粒的起跳场强理论计算值和实验值最大误差不超过 2%,两者的数值基本相符。球形颗粒的半径越大,颗粒的起跳场强越大。

为研究球形颗粒在不同气压环境下起跳场强的变化情况,选用不同半径的球形颗粒作为研究对象,起跳场强的变化结果如图 8 所示。

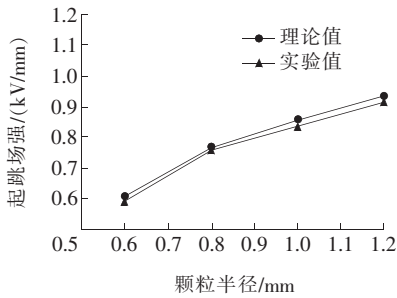


图 7 实验与仿真结果对比

Figure 7 Comparison between the experiment and simulation results

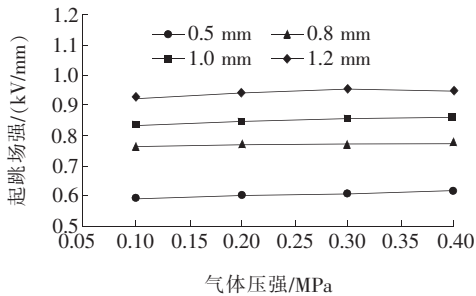


图 8 气体压强对起跳场强的影响

Figure 8 Effect of gas pressure on the jumping field

根据图 8 的实验结果可知,球形颗粒起跳场强随着气压增大出现无规律的轻微波动,气压变化对起跳场强无明显影响,气体压强不是起跳场强的主要影响因素。因此,后续实验都在 0.1 MPa 腔体气压下进行研究分析。

为研究颗粒数量对起跳场强的影响,选取同尺寸,不同数量的球形颗粒水平紧贴放置在腔体底部,起跳场强随颗粒数量的变化曲线如图 9 所示。

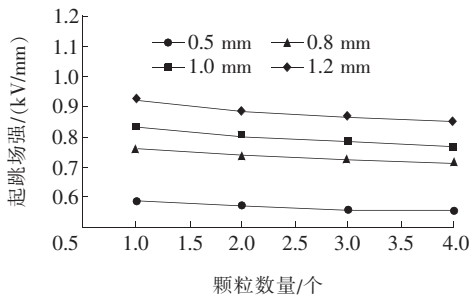


图 9 颗粒数量对起跳场强的影响

Figure 9 Effect of particle quantity on the jumping field

图 9 中,球形颗粒的起跳场强随着颗粒数量的增多而降低,这是因为多个同尺寸的球形颗粒紧贴放置在一起时,整体可以等效为表面有凹凸状的片状颗粒,造成的场强畸变程度比单个颗粒时更高。

实验加压后,颗粒不仅会受到向上的库仑力,还会受到周边带电颗粒对其的斥力,造成颗粒的起跳场强降低。随着颗粒数量的增加,起跳场强降低的幅度逐渐减少。

将不同半径的球形颗粒放置在不同电压极性的实验环境下,研究电压极性对球形颗粒起跳场强的影响,结果如图 10 所示。由图 10 可知,球形颗粒的起跳场强几乎不受电压极性的影响,正负极性下的起跳场强实验值和理论计算值基本相符。

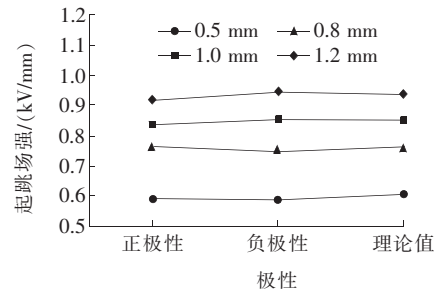


图 10 电压极性对起跳场强的影响

Figure 10 Effect of voltage polarity on the jumping field

3.2 球形颗粒运动轨迹

根据实验结果统计,球形颗粒起跳后的运动行为主要受到电压极性、起跳初始位置、颗粒数量的影响,颗粒在直流电场下的运动轨迹如图 11 所示。

1) 正极性电压。

当运行电压为正极性电压时,球形颗粒首先放置在高压导体中部正下端(距离绝缘子 200 mm),颗粒起跳后立即在腔体内做“外壳—导体—外壳”的贯穿性跳动,起跳初始阶段会向绝缘子方向轻微移动,随着运动时间的增加,颗粒向绝缘子方向运动趋势增大。与绝缘子碰撞后不会立即远离强电场区域,而是在强电场区域反复碰撞后向弱电场区域运动,由于球形颗粒与绝缘子的面接触近似等效为点接触,接触面的静摩擦力始终小于重力,因此不会出现球形颗粒吸附在绝缘子表面的现象。在颗粒向弱电场区域跳动的过程中,如果颗粒在某一位置上轴向受力平衡,则颗粒会保持横向位置不变,在极板中做时间很短的谐振运动,如图 11(a)所示。这种谐振运动出现的位置和运动时间都具有很大的随机性,因此可以称之为“伪谐振现象”。运动到弱电场区域后,可能出现颗粒围绕外壳徘徊运动的“飞萤现象”,颗粒半径越大,出现飞萤现象的概率就越大。

“伪谐振现象”和“飞萤现象”之间不存在必然联系，没有先后发生顺序，都是颗粒在运动时可能发生的运动现象。

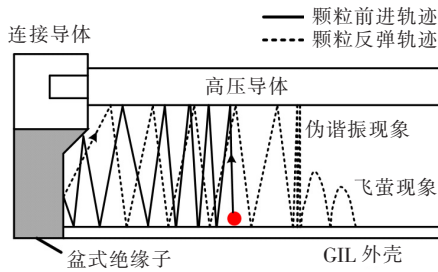
当颗粒初始位置在绝缘子附近时(距离绝缘子 20 mm)，运动轨迹如图 11(b)所示。对比式(4)、(5)可知，电场强度是影响颗粒受力及运动的重要因素之一，绝缘子附近的电场强度比高压导体中部更大，结合高速相机拍摄的运动图片可以看出：颗粒起跳后会立即向绝缘子方向跳动，起跳速度比在高压导体中部时更快，向弱电场区域运动后可能出现“伪谐振现象”和“飞萤现象”。

2) 负极性电压。

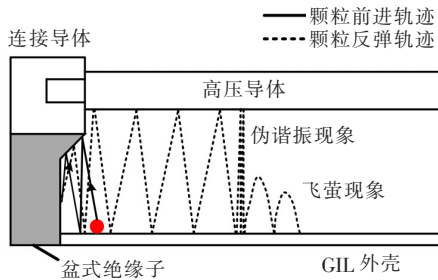
当运行电压为负极性电压时，在高压导体中部的球形颗粒的运动轨迹如图 11(c)所示。颗粒的运动轨迹和正极性时相似，贯穿性跳动并与绝缘子碰撞后向弱电场运动，运动期间可能出现“伪谐振现象”和围绕负极性导体徘徊运动的“飞萤现象”(图中仅标注出“飞萤现象”)。颗粒的半径越大，出现飞萤现象的概率就越大。颗粒的初始位置在绝缘子附近时，运动轨迹见图 11(d)，颗粒起跳后立即向绝缘子运动，颗粒的起跳速度更快，与绝缘子反复碰撞并徘徊运动的概率增大。

3) 多个颗粒。

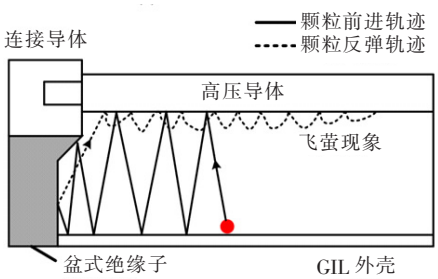
当腔体内存在多个球形颗粒时，会出现某个颗粒优先起跳，其他颗粒间隔起跳的分时起跳现象，电压极性和起跳初始位置不会影响分时起跳现象的发生，多个球形颗粒的整体运动轨迹与单个颗粒的运动轨迹基本相似。



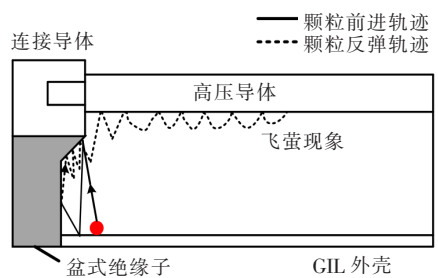
(a) 正极性—高压导体中部



(b) 正极性—绝缘子附近



(c) 负极性—高压导体中部



(d) 负极性—绝缘子附近

图 11 球形颗粒运动轨迹

4 结语

1) 在腔体尺寸和绝缘介质确定的情况下，球形颗粒起跳场强的理论值和计算值基本相符，颗粒的半径越大，起跳场强越大。气体压强和电压极性和起跳初始位置对起跳场强几乎没有影响，随着颗粒数量的增加，起跳场强逐渐降低。

2) 球形颗粒在直流 GIL 腔体内运动时可能出现“伪谐振现象”和围绕负电极徘徊运动的“飞萤现象”，颗粒半径越大，飞萤现象的概率就越高。靠近绝缘子的颗粒起跳速度比在高压导体中部时更快。在负极性电压下，初始位置越靠近绝缘子，颗粒与绝缘子反复碰撞的概率越大，造成绝缘子沿面放电的可能性越高。

3) 存在多个颗粒时，会出现某个颗粒优先起跳，其他颗粒间隔起跳的分时起跳现象，电压极性和起跳初始位置不会影响分时起跳现象的发生，多个颗粒的整体运动轨迹和单个颗粒的运动轨迹基本相似。

参考文献:

[1] 贾志杰,张斌,范建斌,等. 直流气体绝缘金属封闭输电线路中绝缘子的表面电荷积聚研究[J]. 中国电机工程

Figure 11 Movement locus of the spherical particle

- 学报,2010,30(4):112-117.
- JIA Zhijie, ZHANG Bin, FAN Jianbin, et al. Study of charge accumulation along the insulator surface in the DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 112-117.
- [2] DAI D D, WANG X P, LONG J C, et al. Feature extraction of GIS partial discharge signal based on S-transform and singular value decomposition [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(2):186-193.
- [3] 蒋龙,臧春艳,胡学深,等. 基于低频振动信号的 GIL 机械故障诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3):86-91.
- JIANG Long, ZANG Chunyan, HU Xueshen, et al. Research on the diagnosis of GIL mechanical fault by low frequency vibration signal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):86-91.
- [4] HARA M, MAEDA Y, NAKAGAWA N, et al. DC breakdown voltage characteristics of saturated liquid helium in the presence of metallic particles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(3):470-476.
- [5] 梁瑞雪,王健,胡琦,等. 直流 GIL 盆式绝缘子附近微米级金属粉尘的动力学行为与吸附机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4):1387-1397.
- LIANG Ruixue, WANG Jian, HU Qi, et al. Study on kinetic behavior and adsorption mechanism of the micron metal dust near the basin-type insulator in DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4):1387-1397.
- [6] 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.
- [7] METWALLY I A, A-RAHIM A A. Dynamic analysis of motion of spherical metallic particles in non-uniform electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2):282-293.
- [8] 成林,高坤,閻山,等. VFTO 对 GIS 中电子式互感器的电磁干扰研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(12):37-44.
- CHENG Lin, GAO Kun, YIN Shan, et al. Electromagnetic interference of electronic transformer in GIS by VFTO[J]. Smart Power, 2021, 49(12):37-44.
- [9] WANG Jian, LI Qingming, LI Botao, et al. Motion analysis of spherical metal particle in AC gas-insulated lines: random effects and resistance of the SF₆/N₂ mixture[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5):2617-2625.
- [10] 王克胜,赵彦平,原帅,等. 基于电场计算及模态分析的 220 kV GIS 盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8):32-38, 47.
- WANG Kesheng, ZHAO Yanping, YUAN Shuai, et al. The crack defect detection method of 220 kV GIS basin-type insulators based on electric field calculation and modal analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8):32-38, 47.
- [11] SAKAI K, TSURU S, ABELLA D L, et al. Conducting particle motion and particle-initiated breakdown in dc electric field between diverging conducting plates in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(1):122-130.
- [12] HARA M, AKAZAKI M. A method for prediction of gaseous discharge threshold voltage in the presence of a conducting particle [J]. Journal of Electrostatics, 1997, 2(3):223-239.
- [13] 季洪鑫,李成榕,庞志开,等. GIS 中线形颗粒起举电压的影响因素[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):301-313.
- JI Hongxing, LI Chengrong, PANG Zhikai, et al. Influence factors of the lifting voltage of linear particle in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):301-313.
- [14] 孙秋芹,罗宸江,王峰,等. 直流 GIL 导体表面金属颗粒跳跃运动特性研究[J]. 电工技术学报, 2016, 42(3):5206-5216.
- SUN Qiuqin, LUO Chenjiang, WANG Feng, et al. Jumping characteristics of metal particle on the surface of DC gas insulated transmission line conductor[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2018, 33(22):5206-5216.
- [15] 马飞越,张涛,丁培,等. 运行电压下 GIS 异物颗粒飞行特征速查法研究及应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13):118-125.
- MA Feiyue, ZHANG Tao, DING Pei, et al. Research and application of quick check method for the flying characteristics of foreign particles in GIS under operating voltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13):118-125.

- [16] 汪佛池,曹东亮,杨磊,等. 微粒陷阱对直流稍不均匀场中球状自由导电微粒运动的影响规律[J]. 高电压技术,2018,44(9):2897-2903.
WANG Fochi, CAO Dongliang, YANG Lei, et al. Effect of particle traps on movement of spherical free-conducting particles in slightly inhomogeneous DC field[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2897-2903.
- [17] 高山,丁然,赵科,等. 直流 GIL 内金属微粒的落点分布研究[J]. 高压电器,2022,58(4):32-39.
GAO Shan, DING Ran, ZHAO Ke, et al. Study on drop point distribution of metal particles in DC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 32-39.
- [18] KHAN Y, OKABE S, SUEHIRO J, et al. Proposal for new particle deactivation methods in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 147-157.
- [19] 汤亮亮,吕金煌,谭进,等. 架空线-GIL 混合系统短路电流分布特性研究[J]. 高压电器,2021,57(9):34-42.
TANG Liangliang, LYU Jinhuang, TAN Jin, et al. Study on short circuit-current distribution characteristics of overhead transmission line-GIL hybrid transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 34-42.
- [20] LEBEDEV N N, SKAL'SKAYA I P. Forces acting on a conducting sphere in the field of a parallel plane conductor[J]. Soviet Physics-Technical Physics, 1962, 7(3): 268-270.
- [21] LENY R. The electrostatic problem of a portion of a sphere protruding from a plane electrode in an electric field[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1981, 14(4): 945-955.
- [22] 张利,屈斌,王永宁,等. GIS 壳体振动机理和局部放电优化诊断与应用[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 80-86.
ZHANG Li, QU Bin, WANG Yongning, et al. GIS shell vibration mechanism and partial discharge optimization diagnosis[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 80-86.
- [23] 贾江波,淘风波,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): 106-110.
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): 106-110.
- [24] 赵科,丁然,李洪涛,等. 基于热特性差异的 GIL 故障辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 13-20.
ZHAO Ke, DING Ran, LI Hongtao, et al. Research on GIL fault identification based on thermal characteristic difference[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 13-20.