

GIS中导电微粒运动及局部放电特征研究

徐 轩¹, 滕开雯¹, 何 金², 黄 朝³, 常亚楠⁴

(1. 国网天津市电力培训中心, 天津 300181; 2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300041;
3. 国网天津市电力公司, 天津 300010; 4. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 气体绝缘组合电器(Gas Insulated Switchgear, GIS)由于自由金属微粒的存在会导致电场发生畸变, 使GIS内部发生局部放电、击穿等现象。为研究GIS中不同金属微粒的运动状况与局部放电特征, 在不同气压条件下, 将不同长度和数量的线性金属微粒放入126 kV GIS的同一位置中, 以特高频法测量局部放电信号并用高速相机观察其运动特性。对获得的起始放电电压、放电次数和放电幅值进行比较, 结合微粒运动情况进行分析。结果表明, 对于自由线性金属微粒, 其最大放电幅值、平均放电幅值和放电次数在达到起晕电压后急剧增大, 之后随实验电压增加, 最大放电幅值未发生明显变化, 平均放电幅值和放电次数均先减小后增大; 微粒起跳后跳动次数随微粒长度增加出现峰值, 平均放电幅值与放电次数和微粒长度呈正相关, 而与压强呈负相关, 且平均放电幅值有随压强增加趋于饱和的趋势; 多金属微粒在GIS中运动存在三种模式, 平均放电幅值与放电次数和微粒个数呈正相关。

关键词: GIS; 线性微粒; 运动特性; 局部放电

Study on motion and partial discharge characteristics of conductive particles in GIS

XU Xuan¹, TENG Kaiwen¹, HE Jin², HUANG Chao³, CHANG Yanan⁴

(1. Electric Power Training Center of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300181, China;
2. Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300041, China; 3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 4. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The free metal particles in the gas insulated switchgear will lead to the distortion of the electric field and the deterioration of the discharge in the GIS. In order to study the motion and partial discharge characteristics of different metal particles in GIS, a set of 126 kV gas-insulated composite apparatus is established by using UHF method as the detection method of partial discharge. Linear metal particles of different lengths and quantities are placed in same positions of GIS at different pressure, and their motion characteristics are observed with high-speed camera. The initial discharge voltage, the discharge times and the discharge amplitudes are compared and analyzed with the particle motion. The results show that the maximum discharge amplitude, the average discharge amplitude and the discharge times of the free linear metal particles are the same as the maximum discharge amplitude, increasing sharply after reaching the starting voltage. The maximum discharge amplitude decreases slightly with the increase of the test voltage, and the average discharge amplitude and the number of discharges decrease first and then increase with the rise of the lift voltage. The jumping times of the particle after take-off peak with the increase of particle length, and the average discharge amplitude has a positive correlation with the particle length, and has a negative correlation with the SF₆ pressure, and the average discharge amplitude tends to be saturated. There are three modes of motion of polymetallic particles in GIS, and the average discharge amplitude and discharge times are positively correlated with the number of particles.

Key words: gas insulated switchgear (GIS); linear particle; kinematic characteristics; partial discharge

0 引言

GIS因在占地面积、环保性能和绝缘性能等方面的优势，在高压输电领域获得了广泛应用。在GIS的生产、装配和运行过程中都会不可避免地产生金属微粒，如生产过程中未清理的金属屑及运行中触头运动产生的金属颗粒等。自由金属微粒作为一种常见的缺陷，造成的绝缘故障占GIS中全部绝缘故障的38%以上。其中绝缘颗粒在气体放电过程中，在其表面会获得一个薄的导电涂层，其行为会像金属颗粒，但不会对GIS的绝缘强度构成主要威胁，而金属颗粒在电场作用下在GIS腔体内自由移动，可能会附着在电极表面和绝缘子表面，从而造成GIS的绝缘水平降低^[1-3]。因此研究导电微粒在GIS中的运动规律及局部放电行为具有重要意义。

针对线性微粒的运动行为及放电特性，国内外学者开展了广泛的理论与实验研究。文献[4-5]研究比较了平板电极间的球形微粒和线形微粒运动行为，认为线形微粒比球形微粒飞行时间更长，但未考虑线形微粒的长度对微粒运动行为的影响。文献[6-8]对不均匀电场中微粒运动规律进行了仿真计算并开展了试验研究。文献[9-10]对直流电压下绝缘子附近的金属微粒运动行为进行了研究，但未对交流电压下绝缘子附近微粒的运动行为进行研究。文献[11-12]将线形金属微粒贴覆于真实绝缘子表面，采用特高频方法监测微粒引起的局部放电，结果表明放电发展经历三个阶段，而通过局部放电特征可以有效判断金属微粒的危险程度。文献[13-15]利用平板电极系统测量了金属微粒尺寸与局部放电起始电压的关系，但没有给出具体的判据。文献[16]以实际420 kV GIS为实验平台，分别研究了微粒固定在高压母线、外壳及绝缘子上时的放电特征。文献[17]研究了直流GIL中微粒的局部放电量与微粒长度的关系，但未考虑微粒数量的影响。

以上研究对自由金属微粒的运动、局部放电特征及其影响因素进行了研究，但缺乏对交流GIS中微粒数量的影响分析。本文以特高频法为局部

放电的检测手段，建立126 kV的气体绝缘实验平台，将不同长度和数量的线性金属微粒放入GIS的不同位置中，用高速相机观察其运动特性，对获得的局部放电信号与导电微粒运动状况结合进行研究。

1 实验平台与方法

1.1 实验平台

为研究金属微粒在GIL腔体中的运动行为，并真实反映GIS局部放电特征，本文使用真实126 kV GIS实验平台。其中，导体杆外径 $R_1=60$ mm，外壳内径 $R_2=210$ mm，并能实现实验腔体的气体环境设置；腔体两个侧面均采用透明石英玻璃密封的观察窗，通过一个侧面观察窗进行补光并使用高速相机观测腔体内部金属微粒的运动行为。特高频传感器安装于另一个侧面观察窗，用于进行同步实时局部放电信号测量，并连接计算机进行实验数据储存、分析。GIS实验平台如图1所示。实验用金属微粒为线形铝丝，半径为0.3 mm，长度分别为3 mm、6 mm、9 mm和12 mm。

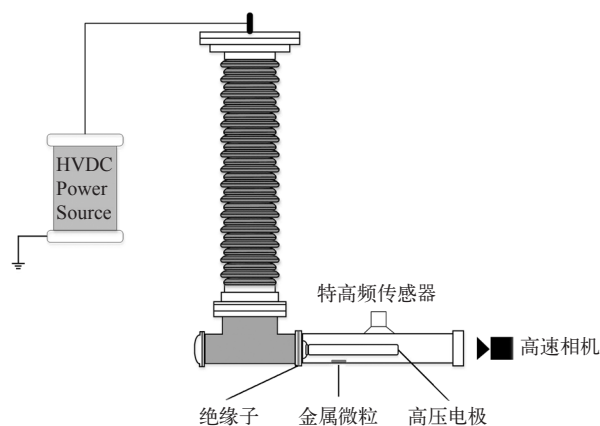


图1 126 kV GIS实验平台

Fig.1 126 kV GIS experiment platform

1.2 实验方法

实验开始时，首先将单个线形金属微粒水平放入腔体中，每次实验微粒放置的位置保持不变，之后对GIS抽真空后再充入纯 SF_6 气体。对实验腔体缓慢升高电压至出现稳定的局部放电信号，每隔一分钟加压一次，步长为1 kV/min，微粒

跳动后用相机连续记录10 s颗粒的运动,同时采用特高频测量设备连续测量放电脉冲信号,由于特高频信号目前无法实现视在放电量的标定,因此用信号的幅值来表征局部放电量的大小。改变金属微粒的尺寸、气体压强以及放入腔体内金属微粒的数量进行实验,每组实验进行3次。

2 微粒运动和放电现象及影响因素

2.1 微粒运动和放电现象

(1) 微粒运动

加压到一定电压等级后,自由金属微粒在地电极积累电荷后起跳并开始往复运动,在运动过程中发生对中心导体和地电极放电。以长度 L 为12 mm的平躺线形金属微粒为例,在放入气体压强为0.3 MPa的腔体中,当电压升至38 kV时微粒开始起举站立,并立即开始贯穿性轴向随机跳动,如图2所示。向绝缘子方向运动的金属微粒跳动频率会逐渐减小,且不会向反方向运动。当运动到绝缘子附近时,会附着到绝缘子上不再运动;远离绝缘子方向的金属微粒跳动频率不会发生明显变化,并会出现反方向运动,即向绝缘子方向运动。

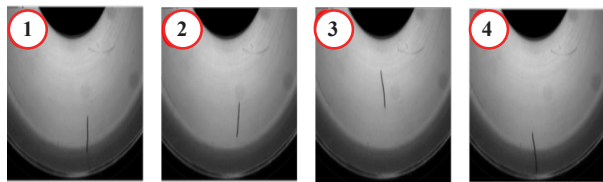


图2 金属微粒贯穿性运动

Fig.2 Penetrating movement of metal particles

(2) 放电现象

以1 min作为统计时间段,平均放电幅值、最大放电幅值和放电次数随电压的发展趋势如图3~图5所示,相位-放电重复率谱图如图6所示。从测得的特高频信号来看,在达到放电起始电压后,平均放电幅值、最大放电幅值和放电次数均随着电压升高而增大,在达到金属微粒的起跳电压后急剧增大,最大放电幅值增大幅度达到1.5倍,而放电次数增大幅度高达4~5倍,之后随实验电压增加,最大放电幅值不发生明显变化,而平均放电幅值和放电次数均先减小后增大,且平

均放电幅值的增大趋势与金属微粒起跳前相同,从图6可以看出,正负半周放电较为对称。

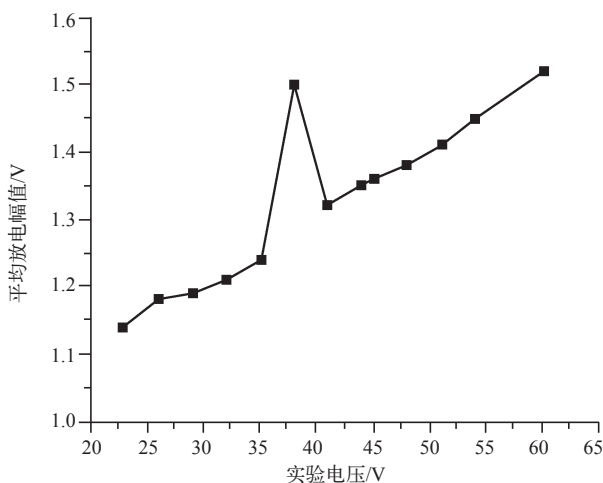


图3 平均放电幅值发展趋势

Fig.3 Development trend of average discharge amplitude

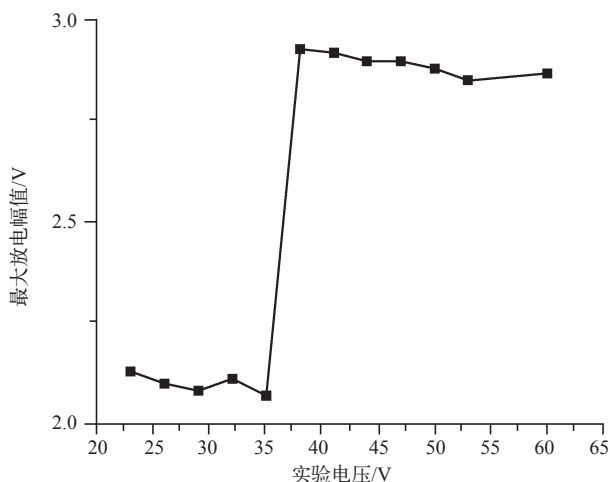


图4 最大放电幅值发展趋势

Fig.4 Development trend of maximum discharge amplitude

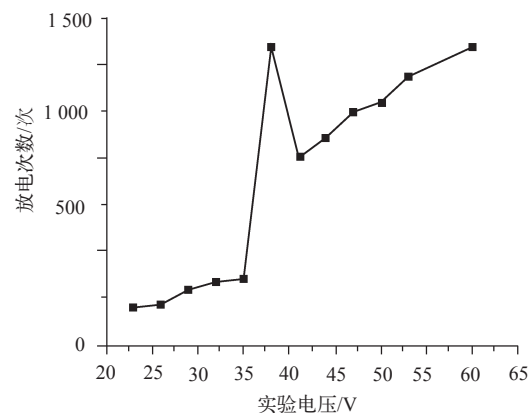


图5 放电次数发展趋势

Fig.5 Development trend of discharge times

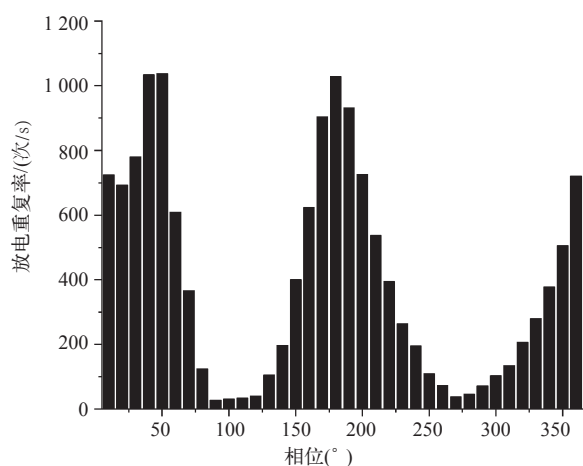


图6 相位-放电重复率谱图

Fig.6 Phase and discharge repetition rate spectrum

(3) 结果分析

GIS中的自由金属微粒在外加电场作用下会溢出电子,从而影响GIS腔体内局部电场发生畸变。在电场强度较大的区域,电子碰撞与SF₆碰撞后发生电离,在碰撞电离、光电离和热电离等因素的共同作用下,就形成连续的放电通道。而带电的金属微粒在库仑力、洛伦兹力和电场梯度力等多种力的作用下发生移动,当力的作用较大时,金属微粒就会进行贯穿性运动。如果金属微粒在向绝缘子移动过程中速度较慢,就可能会由于绝缘子上积聚的电荷而附着到绝缘子表面,对GIS的安全运行造成隐患。

实验中,在达到起举电压前,随着电压增大,GIS中局部电场也随之增大,从而导致平均放电幅值和放电次数随之增加。当加压至起举电压后,金属微粒的运动加剧这一过程且会产生持续的局部放电。当金属微粒在移动的过程中,电场的均匀程度会随之改变;当微粒所在位置的局部电场不足以维持金属微粒的运动时,金属微粒停止运动,从而使局部放电被削弱,但金属微粒的运动导致的电场畸变依然存在,所以局部放电依然存在且比未起举电压之前剧烈。因此在达到起举电压38 kV时,局部放电平均放电幅值、最大放电幅值和放电次数均剧烈增大。一段时间后金属微粒稳定下来吸附于绝缘子上,且电压升高后未再发生微粒跳动现象,但微粒导致的电场畸

变依然存在,因而局部放电最大放电幅值在剧烈增大后不再发生明显变化,而放电次数和平均放电幅值在微粒停止跳动时发生急剧下降,之后又随电压升高而逐渐增大。

2.2 金属微粒长度与压强的影响

(1) 微粒运动

气压在0.3 MPa时,当金属微粒起跳后,通过高速相机记录10 s金属微粒运动,统计腔体不同长度的线形微粒在不同压强下起举后10 s内的跳动次数,如图7所示。金属微粒起举后10 s内跳动次数随着微粒长度增加而出现峰值。

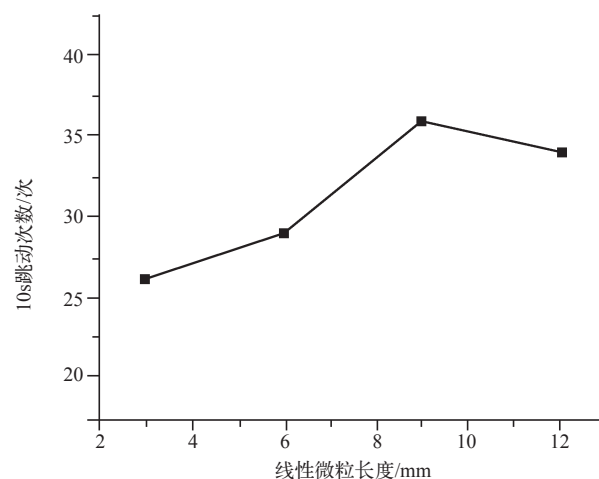


图7 跳动次数与微粒长度的关系

Fig.7 The relationship between the number of pulsation and the length of particles

当GIS中金属微粒距离绝缘子较远时,绝缘子对微粒的影响忽略不计,金属微粒等同于在同轴圆柱体中运动,若此时在GIS中施加工频交流电压 $u(t)$,则GIS中电场强度 $E(t)$ 可表示为

$$E(t) = \frac{U_0 \sin(100\pi t)}{(0.0625 - z) \ln \frac{R_0}{r_0}} \quad (1)$$

式中, U_0 为工频电压峰值; R_0 为GIS腔体外壳内径; r_0 为高压电极半径; z 为线形微粒距离外壳内壁的高度。

线形微粒平躺时的带电量可表示为

$$q = -2\pi\epsilon_0 aLE(t) \quad (2)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数; a 为线形微粒半径; L 为线形微粒长度。

线形微粒受到的库仑力可表示为

$$F_q = -kqE(t) \quad (3)$$

式中, q 为线形微粒所带电荷; k 为镜像电荷引起的修正系数, 当微粒距电极较远时为1, 微粒与电极接触或与同极性电极接近时取0.832。

由于线形微粒平躺时所受的电场梯度力较小(可忽略不计), 故当线形微粒受到的库仑力大于重力时微粒开始跳动。线形微粒的起举起始条件为

$$\frac{2k\pi\epsilon_0 aLE^2(t)}{0.0625^2 \ln^2 \frac{R_0}{r_0}} = \pi a^2 L \rho_m g \quad (4)$$

式中, ρ_m 为线形微粒的密度。

由式(4)可知, 同轴圆柱结构腔体中平躺的线形微粒起举条件与微粒的长度无关。

(2) 放电现象

电压稳定在60 kV时, 1 min内的放电次数和平均放电幅值与微粒长度、位置及压强的关系如图8、图9所示。平均放电幅值和放电次数均随微粒长度增大而增加, 与微粒位置无关, 说明随着微粒长度增加, 微粒的放电更加剧烈。

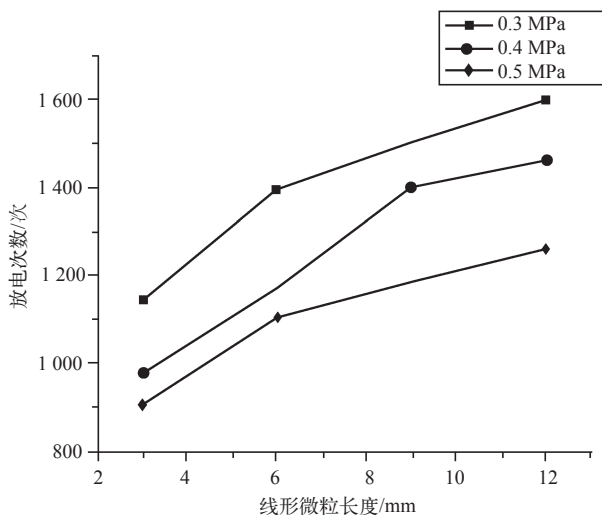


图8 放电次数与微粒长度及压强的关系

Fig.8 The relationship between discharge time and the particles length and pressure

(3) 结果分析

在达到起举电压后, 金属微粒在多个作用力下开始剧烈运动, 并在达到高压电极或腔体外壳时发生反弹。随着微粒长度增加, 对周围电场

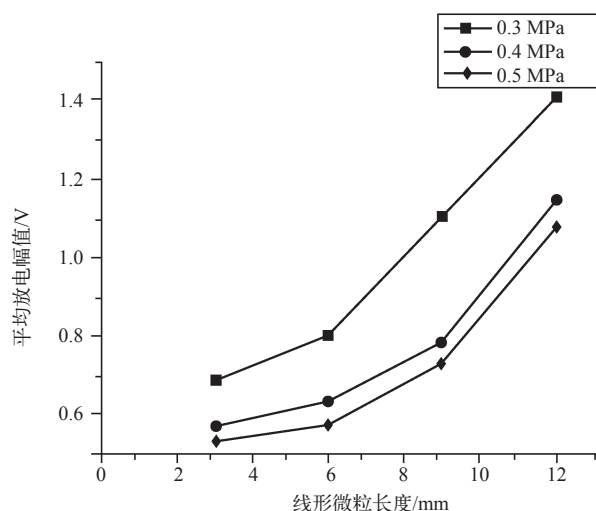


图9 平均放电幅值与微粒长度及压强的关系

Fig.9 Relationship between average discharge amplitude and particle length and pressure

的畸变作用会增强, 从而受到的电场力也随之增大, 但由于微粒长度增加, 金属微粒的重量也会增大, 对应增大的重力部分可能会与增大的电场力部分相抵消, 因此随着微粒长度增加, 金属微粒的跳动次数会出现峰值。

在交流电场作用下, 微粒运动至靠近导体或地电极时会在两者之间发生微放电, 其放电幅值随着微粒运动会发生变化, 且在微粒与导体传导带电时, 线形金属微粒的放电幅值与其尺寸有关, 微粒与电极发生碰撞时, 微粒的一端先靠近电极, 在接近电极以及与电极接触的过程中会发生微放电以及电荷转移。随着微粒长度增加, 对电场的畸变作用也会增强, 微粒的运动变得更加剧烈, 和电极间的充放电时间缩短, 放电次数和平均放电幅值均增加。因此局部放电信号的参量可以在一定程度上反映出放电的严重程度, 并可以用来判断线形微粒的长度。

SF_6 作为GIS中常用的绝缘气体, 由于电负性很强, 可以有效地吸附自由电子。当气压增大时, 会减小腔体中自由电子的平均自由行程, 一定程度上限制了金属微粒运动导致的微放电现象; 另一方面, 随着气压升高, 气体对金属微粒运动形成的阻力越大, 会抑制金属微粒的运动行为。因此, 腔体中 SF_6 气体压强的升高, 减弱了金

属微粒导致的局部放电现象, 增强了绝缘性能。但由于 SF_6 的绝缘性能会随着气压的增大而出现饱和, 因此局部放电的平均放电幅值和放电次数的减弱程度会随着气压的增加变缓。

2.3 金属微粒数量的影响

(1) 微粒运动

为分析比较不同数量的线形微粒对微粒的运动和放电行为的影响, 在实验腔体中分别放入不同数量的长为3 mm、半径为0.3 mm的线形金属微粒。以放入两个线形微粒为例, 分析多个线形微粒下其运动行为特征。

当电压升至51 kV时, 其中一个线形微粒站立并发生大幅度跳动, 这时出现三种不同的运动模式。模式一如图10a所示, 首先发生跳动的金属微粒沿着其起跳方向运动, 但另一个金属微粒并没有发生跳动; 模式二如图10b所示, 当首先起跳的金属微粒一端靠近另一个金属微粒时, 使另一金属微粒也站立并剧烈运动, 两个金属微粒朝向同一方向运动, 但金属微粒之间的距离会增加; 模式三如图10c所示, 当首先起跳的金属微粒一端靠近另一个金属微粒时, 另一金属微粒也站立并剧烈运动, 并朝向首先起跳微粒运动的反方向运动。当金属微粒数量增加到3~4个时, 运动模式与两个金属微粒相同。

对于模式一, 当一个金属微粒起跳后, 其导致的另一微粒位置电场的畸变程度不足以起跳, 因此会出现只有一个金属微粒起跳而另一金属微粒不发生运动的现象; 当两个金属微粒均起跳时, 由于两个微粒在同一极性电压下起跳, 所带电荷即为相同极性, 此时两个金属微粒相互排斥, 但由于两微粒之间电场梯度力的存在, 两微粒会朝向同一方向运动, 且之间距离会增加, 出现模式二; 而当微粒之间的电场梯度力较小时, 由于相同极性金属微粒间的斥力, 两微粒会朝相反方向运动, 出现模式三。

(2) 放电现象

不同微粒个数下的微粒起举电压与起始放电电压如表1所示, 可以看出, 随着微粒个数增加, 微

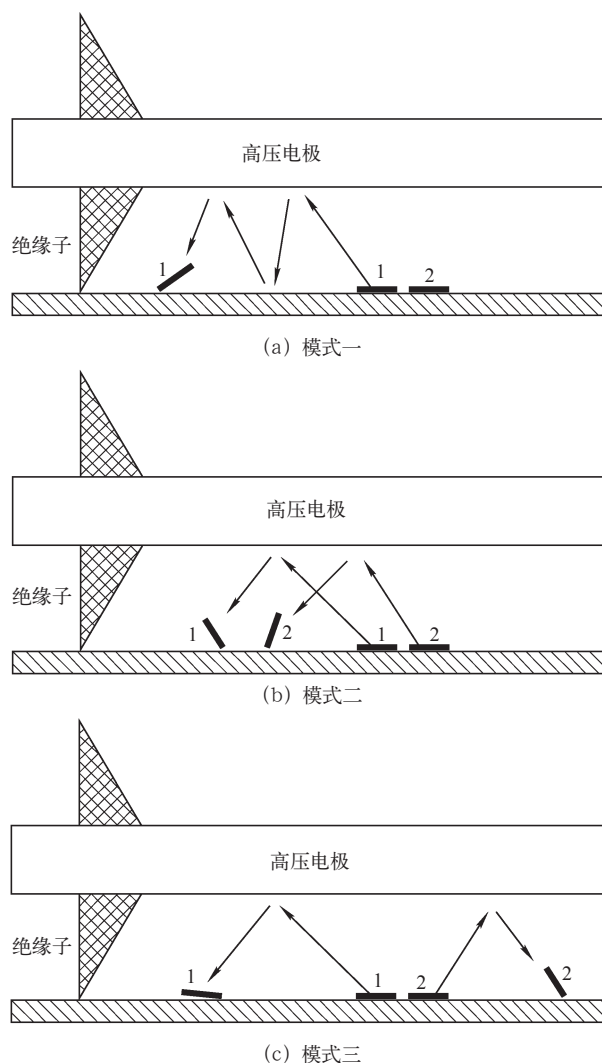


图10 多金属微粒运动行为模式

Fig.10 Model of motion behavior of polymetallic particles

粒起举电压与起始放电电压均会随之减小。以1 min为统计单位, 当微粒发生起举后, 不同微粒个数下平均放电幅值与放电次数如表2所示, 放电次数随之增加, 而平均放电幅值未发生明显变化。

表1 不同金属微粒个数下起举电压与放电起始电压比较

Tab.1 Comparison of starting voltage and discharge voltage under different metal particle numbers

微粒个数 / 个	U_{lift}/V	U_{f}/V
1	64	37
2	53	34
3	48	30
4	45	24

表2 不同金属微粒个数下局部放电参数

Tab.2 Partial discharge parameters under different number of metal particles

微粒个数 / 个	平均放电幅值 U_{ave}/V	放电次数 / 次
1	0.73	1 123
2	0.77	1 527
3	0.68	1 894
4	0.75	2 507

3 结束语

1) 在GIS中, 自由金属微粒在电压作用下发生并立即开始贯穿性轴向随机跳动, 同时产生局部放电信号。对于自由线形金属微粒, 在达到放电起始电压后, 平均放电幅值、最大放电幅值和放电次数随着电压升高而增大; 在达到金属微粒的起跳电压后, 达到起举电压后急剧增大, 之后随实验电压增加, 最大放电幅值未发生明显变化, 而平均放电幅值和放电次数均先减小后增大。

2) 随着微粒长度增加, 重量随之增加, 所以金属微粒起举后10 s内跳动次数会随之出现峰值; 平均放电幅值和放电次数均随微粒长度增加而增大, 随压强增大而减小且有饱和的趋势, 说明随着微粒长度增加, 微粒的放电更加剧烈。

3) 当GIS腔体中出现多个金属微粒时, 若其中一个线形微粒站立并发生大幅度跳动, 这时出现三种不同的运动模式, 分别为: 仅首先起跳的金属微粒运动; 多金属微粒向相同方向运动, 且之间的距离会变大; 多金属微粒向相反方向运动。当金属微粒数量增加时, 放电次数随之增加, 而平均放电幅值未发生明显变化。

参考文献

- [1] 王健, 李庆民, 李伯涛, 等. 直流应力下电极表面覆膜对金属微粒启举的影响机制研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 119-127.
- WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Mechanism analysis of the electrode-coating's impact on the particle -lifting under DC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 119-127.
- [2] HOSHINA Y, YASUOKA T, TAKEI M. Influence

of tiny metal particles on charge accumulation phenomena of GIS model spacer in high-pressure SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1895-1901.

- [3] MOUKENGUE IMANO A. The influence of the dielectric strength of the N₂/SF₆-insulation by conducting particle on the spacer surface[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 483-490.
- [4] 黎大健, 杨景刚, 梁基重, 等. 气体绝缘开关内自由运动金属颗粒的超声波信号特性[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 102-105.
- LI Dajian, YANG Jinggang, LIANG Jizhong, et al. Characteristics of acoustic signal from free moving metallic particles in gas insulated switchgear[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(2): 102-105.
- [5] 黎大健, 杨景刚, 米楚明, 等. 基于超声波信号的GIS内自由金属颗粒危险评估研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 53-57.
- LI Dajian, YANG Jinggang, MI Chuming, et al. Risk assessment of basis of free metallic particles in GIS based on ultrasonic Signal[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 53-57.
- [6] ASANO K, YATSUZUKA K, HIGASHIYAMA Yoshio. The motion of charged metal particles within parallel and tilted electrodes[J]. Journal of Electrostatics, 1993, 30: 65-74.
- [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] SAKAI K, ABELLA D L, KHAN Y, et al. Theoretical and experimental studies for spherical free-conducting particle behavior between non-parallel plane electrodes with AC voltages in air[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 404-417.

- [9] KHAN Y, SAKAI K, HARA M, et al. Motion behavior and deactivation method of free-conducting particle around spacer between diverging conducting plates under DC voltage in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 444-457.
- [10] KHAN Y, OKABE S, SUEHIRO J. Proposal for new particle deactivation methods in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 147-157
- [11] QI B, LI C R, HAO Z, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011 18(3): 792-800
- [12] QI B, LI C R, XING Z L, et al. Partial discharge initiated by free moving metallic particles on GIS insulator surface: severity diagnosis and assessment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 766-774
- [13] SAKAI K, ABELLA D L, KHAN Y, et al. Experimental studies of free conducting wire particle behavior between non-parallel plane electrodes with AC voltages in air[I]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 418-424
- [14] 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
- [15] 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
- [16] PRABAKARN T, USA S, et al. Analysis of partial discharge signals in 420 kV gas insulated substation[C]. 2013 IEEE 1st International Conference on Condition Accession Techniques in Electrical Systems, 2013: 249-254.
- [17] 李庆民, 刘思华, 王健, 等. 直流气体绝缘线路中自由金属微粒的局部放电特性与影响因素[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 367-374.
- LI Qingmin, LIU Sihua, WANG Jian, et al. Characteristics of partial discharges caused by free metal particle and influencing factors in DC gas insulated line[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 367-374.

作者简介



徐 轩

徐轩（1988—），男，工程师，长期从事高电压技术研究与教学。

滕开雯（1982—），男，高级工程师，长期从事变电运行研究与教学。

（收稿日期：2018—10—08）**EA**