

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.04.018

采用碰撞频率和放电量估算运行电压下线形金属颗粒的尺寸

张西子^{1,2}, 季洪鑫^{1,2}, 李成榕^{1,2}, 郑书生^{1,2}, 庞志开^{1,2}, 曾梓鹏^{1,2}

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 金属颗粒的形状、尺寸及材质对降低GIS的原绝缘强度有明显影响,颗粒的运动是金属颗粒引发击穿的重要原因,目前针对GIS中金属颗粒的检测主要通过局部放电测量,由于在运行电压下不同尺寸颗粒的运动行为不一样,产生的局部放电也存在差异,如何将颗粒的局部放电与颗粒的运动行为建立联系,并通过局部放电实现线形颗粒尺寸的估算,可为后续金属颗粒有害性的判断提供重要依据。为此,笔者对GIS内部不同尺寸线形颗粒运动行为进行了仿真分析,并在实验室中制备了以实际126 kV GIS设备为原型等比例缩小的试验腔体,并在试验腔体内分别放置不同尺寸的金属颗粒,采用常规脉冲电流检测仪和超声波检测仪对颗粒的放电信号进行检测,并采用高速相机对颗粒的运动轨迹进行拍摄。研究结果表明:不同长度及半径的线形颗粒的运动行为差别较大,随着线形颗粒直径的减小或长度的增加,线形颗粒的跳动高度变大、颗粒飞行时间变长;在运行电压下,线形颗粒碰撞外壳的频率由颗粒的尺寸决定,且颗粒在与外壳碰撞过程中超声波检测仪可较灵敏地检测到超声信号,通过超声脉冲频率可基本估算颗粒碰撞外壳的频率;颗粒的最大视在放电量与颗粒所带最大电荷量间存在一定比例关系,且当颗粒的尺寸不变时该比例关系则基本不变。通过将试验中测得的线形颗粒最大视在放电量 and 超声脉冲频率与仿真结果进行比对,可以实现线形颗粒尺寸的估算。

关键词: GIS; 线形颗粒; 颗粒跳动; 局部放电

Size Estimation of Linear Metal Particle Based on the Collision Frequency and Discharge Amplitude

ZHANG Xizi^{1,2}, JI Hongxin^{1,2}, LI Chengrong^{1,2}, ZHENG Shusheng^{1,2},
PANG Zhikai^{1,2}, ZENG Zipeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Voltage and Electromagnetic Compatibility, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The shape, size and material of the metal particle significantly affect the original insulation strength. The motion of particles is an important reason of the breakdown of GIS. The detection of metallic particles in GIS mainly relies on the partial discharge measurement. The movement behavior and the partial discharge of particles with different sizes are different under the operation voltage. Therefore, the relationship between the partial discharge and movement behavior of metal particles should be established, and the size of linear particles may be estimated by the partial discharge. In this paper, the movement behaviors of metal particles with different sizes in the GIS are simulated. A 126 kV GIS prototype proportion shrinking test chamber is set up in the laboratory. Different sizes of linear particles are placed respectively in GIS and their discharge signals are detected by the conventional pulse current detector and ultrasonic detector. The particle motion trajectory is taken by a high speed camera. The results indicate that, the movement behavior of metal particles with different length and radius are

different, and the jumping height and flight time increases with the decrease of particle diameter or the increase of particle length. The collision frequency depends on the size of metal particle. The particle collision is sensitively detected by ultrasonic detector and the collision frequency could be estimated by the frequency of ultrasonic signals. There is a certain proportion relation between the maximum measurement apparent discharge amplitude and the maximum charge of particle, and the proportion relation is basically consistent when the size of particle is not charged. The size of metal particle can be estimated by comparing the maximum apparent discharge amplitude and the ultrasonic pulse frequency.

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

0 引言

随着 GIS 的广泛应用, GIS 设备的运行可靠性引起了国际社会普遍关注。过去普遍认为 GIS 属于无需检修或检修周期长的设备,但从近 40 年的运行经验来看,绝缘故障始终是影响 GIS 可靠性的重要因素之一^[1-5]。国际大电网会议(CIGRE)于 1996 年向世界范围的用户做了调查,其调查结果显示,不同绝缘缺陷类型引起的绝缘故障比率不同,其中由金属微粒及异物引起的绝缘故障率最高(20%)^[6]。由于实际 GIS 中导电微粒并非总是球形颗粒,更多的是线形颗粒,且相比于球形颗粒而言,线形颗粒的危害性更大,为此,有必要优先对线形颗粒进行研究^[7]。

GIS 中金属颗粒的检测主要依靠局部放电的测量,目前已有相关文献对 GIS 中运动金属颗粒的局部放电现象进行了研究。文[8]以实际 420 kV GIS 为试验平台,分别研究了颗粒在高压母线、外壳及绝缘子上时的放电特征。当颗粒固定在高压母线上时,在电压正半周峰值处的放电信号大于负半周内的放电信号,但在放电起始电压下,放电信号首先在负半周内出现。当颗粒固定在外壳内壁上时,在电压负半周峰值处的放电信号大于正半周内的放电信号,且放电信号首先出现在正半周内。当颗粒固定在绝缘子上时,正负半周内的放电基本一致,散点图呈三角形分布,且在放电起始电压下,放电信号在正负半周内均有出现。当颗粒自由的放置在外壳内壁上,而不固定在内壁上时,颗粒的运动与颗粒的大小、形状以及电场的幅值有关,颗粒的位置在电场作用下不断变化,自由金属颗粒的局部放电散点图与相位无关,局部放电信号散点图几乎分布在整個相位区间内。文[9]根据自由金属颗粒的运动状态划分为 3 个阶段:静止不动、小幅跳跃和大幅跳跃,并在交流电压下测量了 3 个运动状态下的局部放电,并对放电脉冲信号的散点图进行了分析,当颗粒进行小幅度跳

动时,放电脉冲已经遍布整个工频周期的范围,但是并未形成完整的正弦包络带,在正负半周的峰值处的正弦包络带仍存在一定的空白区域,当颗粒进行大幅度跳动时,正弦包络带的空白区域消失,形成完整的正弦包络带。文[10-11]研究了 GIS 内自由运动金属颗粒的超声波信号特征。当颗粒静止不动发生放电时,超声波信号幅值较小,且有较强的相位相关性,当颗粒自由跳动时,信号幅值非常大且相位相关性较弱,颗粒的飞行时间随外施电压的升高而变长。文[12]首先使用颗粒悬浮时间分布(颗粒跳动频率的倒数)来对颗粒进行仿真计算,并采用颗粒悬浮时间来评估颗粒放电特征。文[13]研究了超声波形信号的幅值—悬浮时间特征谱图与颗粒长度之间的关系,并把超声信号的最大测量幅值作为特征参数。另外,文[14]研究了颗粒放电幅值—悬浮时间特征谱图,并分析了颗粒的带电量与颗粒质量的比值对颗粒悬浮时间的影响,研究结果显示该比值能够决定颗粒的悬浮时间。文[15]建立了自由金属颗粒的典型缺陷模型并进行大量局部放电试验,试验结果表明,自由金属颗粒的超声波信号的飞行谱图呈现三角形“驼峰”特征,此特征是所有其他各类缺陷所不具有的,因此,可通过超声波飞行图实现对自由金属颗粒的类型识别。超声波飞行图中的三角形“驼峰”的幅值及数量表征金属颗粒的严重程度,三角形“驼峰”的幅值越大,数量越多,说明放电越严重,颗粒对 GIS 绝缘的危险程度也越大。

目前的研究主要集中于颗粒在不同运动行为下局部放电现象的描述以及颗粒缺陷的识别等方面,而金属颗粒的形状、尺寸及材质对降低 GIS 的原绝缘强度有明显影响,颗粒的运动是金属颗粒引发放电击穿的重要原因^[16],在运行电压下不同尺寸颗粒的运动行为不一样,产生的局部放电也存在差异,如何将不同尺寸颗粒的局部放电与颗粒的运动行为建立一定量关系,并通过局部放电实现线形颗粒尺寸的估算,可对后续金属颗粒有害性的判断提

供重要依据。

为此,笔者对 GIS 内部不同尺寸线形颗粒运动行为进行了仿真分析,并在实验室中制备了以实际 126 kV GIS 设备为原型等比例缩小的试验腔体,并在试验腔体内分别放在不同尺寸的金属颗粒,采用常规脉冲电路检测仪和超声波检测仪对颗粒的放电信号进行了检测,并采用高速相机对颗粒的运动轨迹进行了拍摄。分析了运行电压下线形颗粒的运动特征与局部放放电间的关系,提出了基于颗粒碰撞频率和放电量实现线形颗粒尺寸估算的方法。

1 试验平台

1.1 试验回路

金属颗粒运动行为及局部放电试验平台主要包括高压电源、试验模型、LDS-6 常规脉冲电流检测仪、超声波检测仪、高速相机共 5 部分。金属颗粒试验测试回路见图 1。

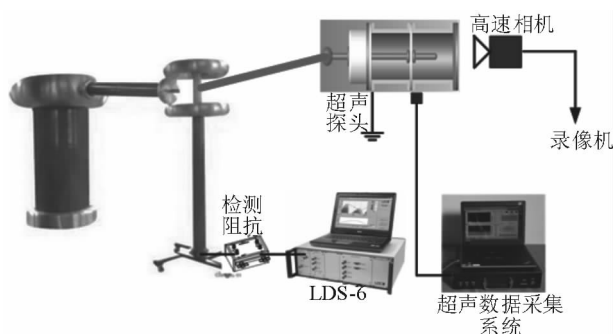


图 1 试验回路

Fig. 1 Diagram of the experimental circuit

试验中采用的相机是 Phantom v1210,该相机是一款高清晰超高速摄影机,能以全分辨率 1 280×800 拍摄 12 000 fps 画面,降低分辨率则可高达 1 000 000 fps。 $v1210$ 相机可以配置 12、24、48 GB 的存储器。存储器可以最多被分割成多达 63 个分区,允许循环连续拍摄。由于颗粒的最大跳动频率为 100 Hz,在一个工频周期内连续拍摄 10 张图片则基本可以记录该工频周期内的颗粒运动,为此,将相机的帧数设置为 500 fps,连续拍摄时间为 10 s。

1.2 试验腔体设计

该运动颗粒试验腔体以实际 126 kV GIS 设备为原型采用两倍缩比尺寸制备而成,该试验腔体为圆筒状,腔体由 3 段组成,其中第 1 段腔体长 60 cm,外壳内半径 6.25 cm,外半径 7.75 cm,高压导杆半径 1.5 cm,在该高压导杆上设置一屏蔽环,其外半径为 2.5 cm。该段腔体上设置了 3 个观察窗,其中腔体端部的圆形观察窗用来观察颗粒的径向运

动,腔体侧面的 2 个方形观察窗用来观察颗粒的径向运动。第 2 段腔体长 20 cm,主要用来支撑腔体内的高压导杆,。第 3 段腔体长 15 cm,采用绝缘材料制成,主要起高压套管的作用。由于运动颗粒试验腔体以实际 126 kV GIS 设备为原型采用两倍缩比尺寸制备,当该试验模型施加 31.5 kV 电压时,其电场结构可近似等同于实际 126 kV GIS 运行电压(63 kV 相电压)时的电场结构。试验腔体的实物图见图 2。

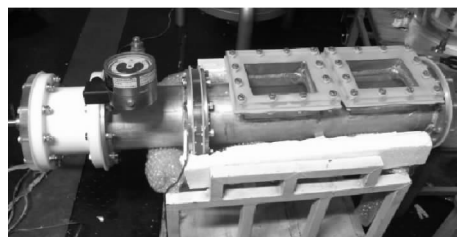
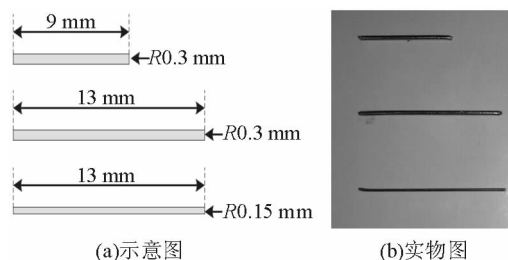


图 2 试验腔体

Fig. 2 Diagram of the cavity

1.3 试验模型及试验方法

为分析运行电压下不同尺寸线形颗粒的运动行为与局部放放电间的联系,制备了如下尺寸的试验模型:长 9 mm、半径 0.3 mm;长 13 mm、半径 0.3 mm;长 13 mm,半径 0.15 mm。金属颗粒的示意图及实物图见图 3。



(a)示意图

(b)实物图

图 3 线形颗粒的示意图及实物图

Fig. 3 Diagrammatic sketch and image of the actual metal particle model

试验中采用逐步升压法对试品加压,加压步长为 0.5 kV/s,直至金属颗粒开始站立运动。然后将该电压值降至 GIS 运行电压,采用常规脉冲电路检测仪和超声波检测仪对颗粒的放电信号进行了检测,并采用高速相机对颗粒的运动轨迹进行了拍摄。

2 线形颗粒受力分析

金属颗粒的运动行为是其影响 GIS 绝缘强度的主要方式,而颗粒的运动特性由其受力情况决定。外施电压的类型、绝缘子的形状、颗粒的形状等均会对颗粒周围的电场发生变化,电场的变化造成

微粒受力情况发生变化,进而对颗粒的运动行为造成差异。文中主要分析 GIS 母线上屏蔽环处的线形颗粒的受力。

高压导体上施加工频交流电压 $u(t)$, 则同轴结构腔体内电场强度 $E(t)$ 可表示为

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

式(1)中: U_0 为工频电压峰值; R_0 为同轴结构腔体外壳内径; r_0 为高压导体半径。

线形微粒竖立时的带电量可表示为

$$q = -\frac{\pi \epsilon_0 L^2 E(t)}{\ln(2L/a) - 1} \quad (2)$$

导电微粒受到的库仑力 F_q 可以表示为

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

式(3)中: q 为颗粒所带正极或负极性电荷; k 为镜像电荷引起的修正系数。

颗粒在稍不均匀电场中所受静电力还包括电场梯度力。在同轴结构腔体中, 站立状态的线形颗粒的电场梯度力 F_{grad} 指向高压导体方向。

$$F_{\text{grad}} = \frac{\pi \epsilon_0 \mu^2 L^3}{12 \ln^2(R_0/r_0)(0.0625 - z)^3} \times \frac{3}{2} \frac{(r^4 + 1)}{\sqrt{1 - r^2}} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 - r^2}}{1 - \sqrt{1 - r^2}} \right) - 2(r^4 + 2) \quad (4)$$

$$(1 - r^2) \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 - r^2}}{1 - \sqrt{1 - r^2}} \right) - \sqrt{1 - r^2}$$

式(4)中: $r = 2a/L$, a 是颗粒半径; L 是颗粒长度。

金属颗粒在腔体中浮起并运动时, 微粒受到空气粘滞力 F_d 的作用, 其方向与金属颗粒运动方向相反。线形颗粒受到的粘滞阻力可以表示为

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_g v^2 C_D S \quad (5)$$

式(5)中: v 为颗粒运动速度; S 为颗粒横截面积; ρ_g 为气体密度; C_D 是阻力系数。

线形颗粒所受重力为

$$F_g = \pi a^2 L \rho_m g \quad (6)$$

式(6)中, ρ_m 是线形颗粒的密度。

线形颗粒在同轴结构腔体内站立并跳动, 其运动方程式可表示为

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_q + F_{\text{grad}} - F_g - F_d \quad (7)$$

3 运行电压下不同尺寸线形颗粒的运动行为及局部放电的测量

以铝线形颗粒为例, 仿真分析并试验研究不同长度(9、13 mm), 不同半径(0.15、0.3 mm)时线形颗粒在运行电压下的运动行为及放电特征。

3.1 长 9 mm、半径 0.3 mm 的线形颗粒运动行为及放电特征

对长 9 mm、半径 0.3 mm 的单根铝颗粒逐步升高试验电压, 加压步长为 0.5 kV/mm, 采用常规脉冲电流检测仪和超声波检测仪连续测量 1 s 的放电脉冲信号, 并用相机连续记录 1 s 颗粒的运动。当电压升至 45 kV 时颗粒开始站立, 颗粒一旦站立, 立即在同轴结构腔体内进行大幅度跳动, 将电压降至 31.5 kV 后, 颗粒仍保持站立但跳动幅度大大减小, 仅在腔体外壳上进行小幅度的跳动, 见图 4。

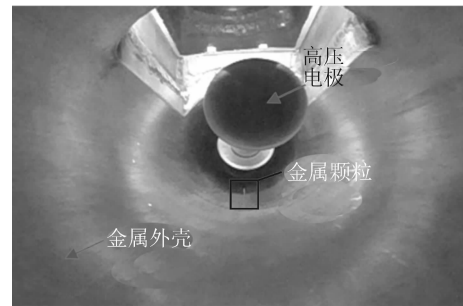


图 4 半径 0.3 mm、长 9 mm 线形颗粒运动图片

Fig. 4 Image of movement of linear particle with 0.3 mm radius and 9 mm length

对该线形颗粒的运动行为进行仿真计算并进行试验研究, 在仿真过程中设置交流电压为 31.5 kV, 见图 5。线形颗粒在连续 50 个工频周期内的运动轨迹及颗粒带电量的变化见图 5(b)、(d)。在实验室内对长 9 mm、半径 0.3 mm 金属颗粒施加 31.5 kV 工频电压, 采用超声波检测仪和常规脉冲电流检测仪检测到的放电脉冲信号见图 5(c)、(e)。

从图 5 中可以看出, 在 31.5 kV 电压下, 该线形颗粒在同轴结构腔体内跳动频率较高, 在一个工频周期内有 1~2 次的碰撞, 且在单位时间内共有 51 次左右的碰撞。但颗粒跳动的高度较小, 最大仅有 2.8 mm 高。由于外施电压呈正弦变化, 颗粒所受的库仑力及电场梯度力也在不断变化, 因此造成颗粒的加速度也在不断变化, 而由于在每个工频周期内颗粒的初始速度不一样, 造成在每个工频周期内颗粒的运动速度差别较大, 进而造成颗粒在每个工频周期内颗粒跳动高度及飞行时间存在一定的差异。

当颗粒静止在腔体上时, 超声波检测仪检测不到信号, 一旦颗粒在腔体上跳动时, 超声波检测仪开始检测到较大的信号, 可以用超声波信号来反映颗粒在腔体上的跳动。在 31.5 kV 工频电压下, 超声波检测仪基本上在一个工频周期内可检测到 1~2 个超声信号, 超声信号幅值可达 0.02~0.06 V(见图 5(c)), 在单位时间(1 s)内超声波脉冲个数是 64 个, 这比颗

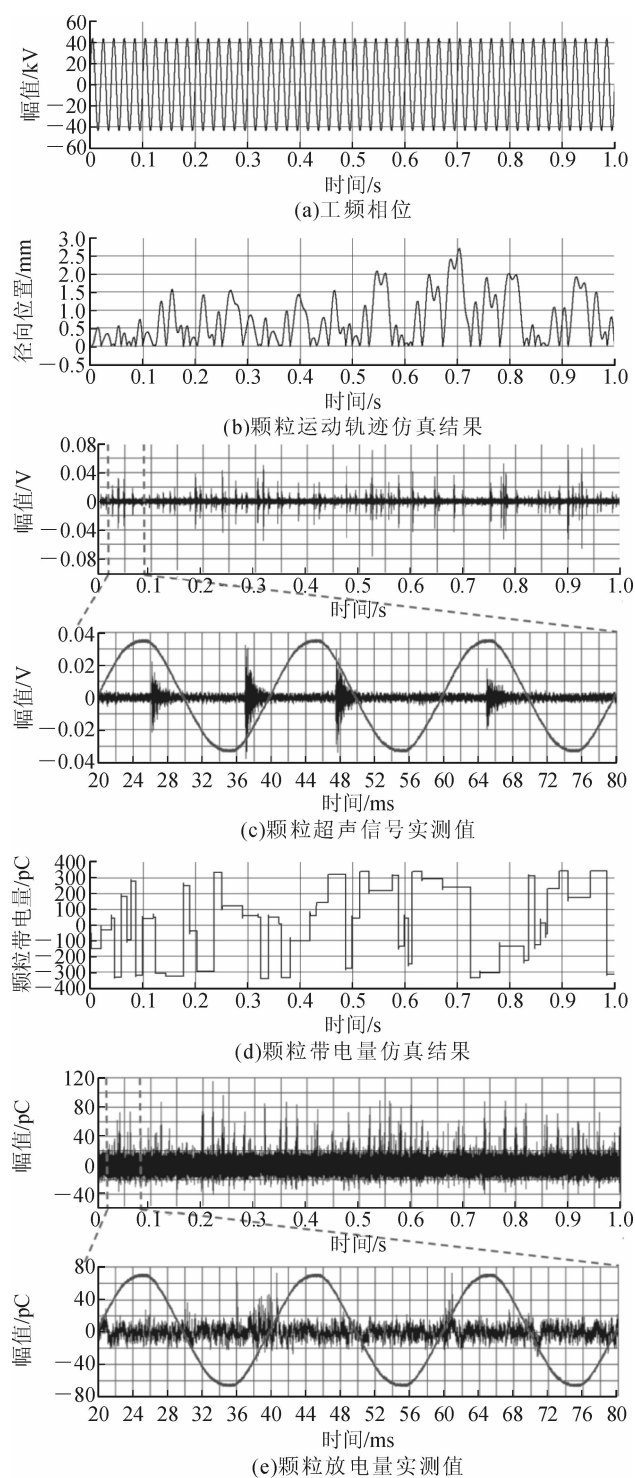


图5 半径0.3 mm、长9 mm 线形颗粒运动行为及局部放电的仿真及试验结果

Fig. 5 Movement and partial discharge of linear particle with 0.3 mm radius and 9 mm length

粒碰撞次数的仿真计算结果(见图5(b))大13次。

线形颗粒在与金属外壳碰撞过程中由于传导作用而带有电荷,其带电量的大小和极性与颗粒跟外壳碰撞时刻的外施电压有关。电压越高颗粒带电量越大;颗粒带电量的极性与外施电压极性相反;

而颗粒在飞行过程中,带电量则基本保持不变。在31.5 kV 交流电压下,长9 mm、半径0.3 mm 线形颗粒最大带电量仿真计算值为 ± 340 pC,见图5。

常规脉冲电流检测仪在每个工频周期内一般可检测到1次放电脉冲信号,放电脉冲个数小于超声脉冲个数,这主要是由于颗粒并非在每次碰撞过程中都会发生放电。对于长9 mm、半径0.3 mm 金属颗粒的放电脉冲幅值最大值可达120 pC (见图5(e)),而颗粒带电量的仿真计算值最大值是340 pC (见图5(d)),该金属颗粒的最大放电脉冲幅值的试验测试结果比颗粒最大带电量的仿真结果小220 pC,两个差别较大。

3.2 长13 mm、半径0.3 mm 的线形颗粒运动行为及局部放电

在31.5 kV 电压下,线形颗粒半径不变($r=0.3$),长度增加至13 mm,线形颗粒的跳动高度明显增加,且在跳动过程中,颗粒端部不停地摆动。这主要是由于颗粒端部的曲率半径不固定的,颗粒在与外壳碰撞后的反射角存在随机性。颗粒运动照片见图6。

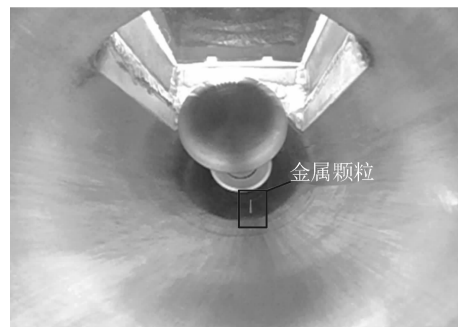


图6 半径0.3 mm、长13 mm 的线形颗粒运动图片

Fig. 6 Image of movement of linear particle with 0.3 mm radius and 13 mm length

在31.5 kV 电压下50个工频周期内,长13 mm、半径0.3 mm 的线形金属颗粒运动行为及局部放电的仿真试验结果见图7。该线形颗粒在经历10个工频周期的小幅度跳动后,跳动幅度变大,其最大跳动幅度可达6 mm。与长9 mm、半径0.3 mm 的线形颗粒飞行时间不足1个工频周期、颗粒带电量不足340 pC 相比,该颗粒的最大飞行时间的仿真结果可增大至6个工频周期,颗粒最大带电量可达750 pC (见图7(c))。图7(b)是在31.5 kV 交流电压下长13 mm、半径0.3 mm 线形颗粒超声信号的测量结果。从图7中可以看出,相邻超声波信号的时间间隔主要在1~5个工频周期内,在单位时间内超声脉冲个数可达24个,比颗粒碰撞外壳次数的仿真结

果(见图7(a))少5次。

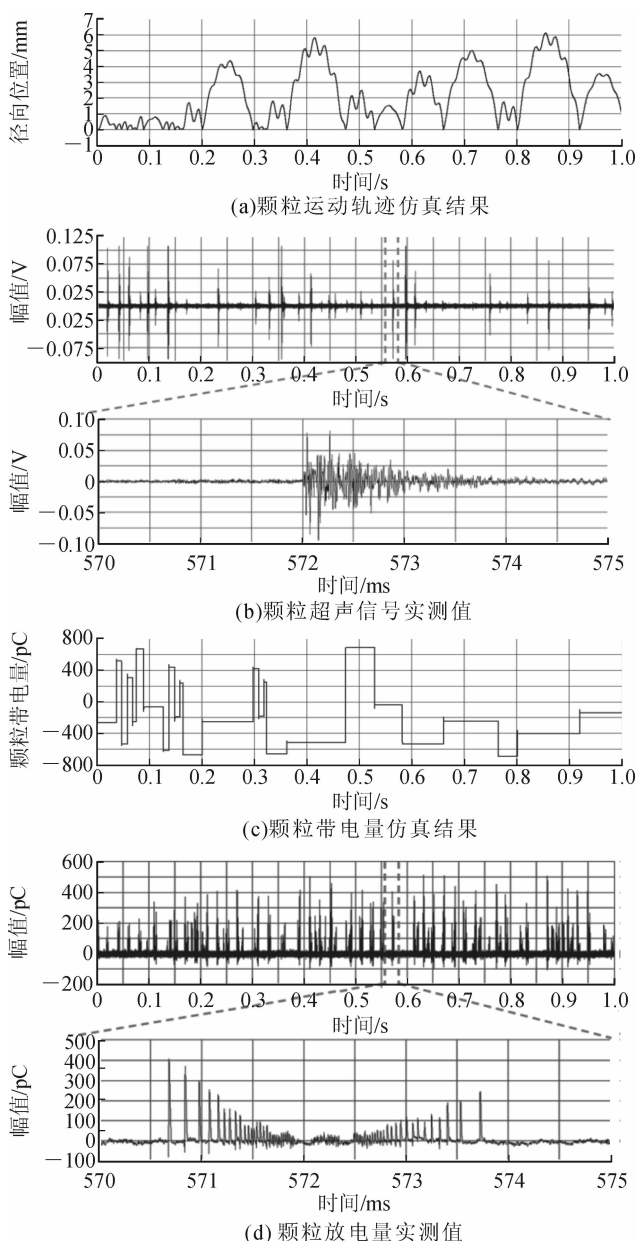


图7 长13 mm 半径0.3 mm 线形颗粒运动行为及局部放电的仿真及试验结果

Fig. 7 Movement and partial discharge of linear particle with 0.3 mm radius and 13 mm length

图7(d)展示出的是金属颗粒的局部放电脉冲信号,与图7(b)进行对比可以看出,常规脉冲信号的个数多于超声波信号。这主要是由于颗粒跳动高度相对较低,颗粒的飞行时间较长,颗粒在飞行过程中随着外施电压的变化,颗粒端部与外壳间的电场发生变化。当电场增大至 SF_6 气体的临近击穿电压时,金属颗粒与外壳间发生放电,而此时颗粒并未与外壳发生碰撞,超声波检测仪未检测到超声信号,因此造成常规脉冲信号的个数多于超声波信号。该金属颗粒产生的最大放电量可达520 pC,而颗粒最大

带电量的仿真计算值是750 pC,金属颗粒最大放电量实测值比颗粒最大带电量的仿真计算值小230 pC。颗粒在每一次与外壳碰撞接触之前和碰撞接触之后均存在较大较密集的放电脉冲,而颗粒在与外壳接触时,其放电量变得非常小。颗粒在一次碰撞过程中,其放电脉冲的位置呈现“V”型分布。

3.3 长13 mm、半径0.15 mm的线形颗粒运动行为及局部放电

在31.5 kV电压下,线形颗粒长度(13 mm)不变,半径减小至0.15 mm时,在31.5 kV电压下,该线形颗粒在同轴结构腔体内进行贯穿性跳动,且由于颗粒端部的不规则性,颗粒在与外壳或高压导杆碰撞时的反射角随机变化,造成颗粒在跳动过程中不断翻滚,见图8。

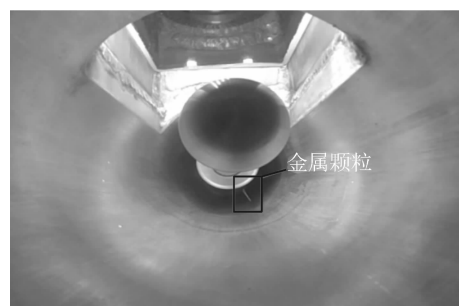


图8 半径0.15 mm、长13 mm的线形颗粒运动图片
Fig. 8 Image of movement of linear particle with 0.15 mm radius and 13 mm length

长13 mm、半径0.15 mm线形金属颗粒的运动行为仿真结果和局部放电试验测试结果见图9。从图9可以看出,在50个工频周期内金属颗粒仅有11次碰撞外壳,从超声波脉冲个数可以估算在50个工频周期内金属颗粒约有10次碰撞腔体外壳,仿真结果与试验结果较一致。从图9还可以看出,金属颗粒的最大放电脉冲幅值主要在660 pC以下,而颗粒最大带电量的仿真计算值是1 400 pC(见图9(c)),该金属颗粒的放电脉冲幅值的试验测试结果同颗粒带电量的仿真结果差别较大。

4 运行电压下线形金属颗粒碰撞次数的试验结果与仿真结果的对比分析

当颗粒静止在腔体上时,超声波检测仪检测不到信号,一旦颗粒在腔体上跳动时,超声波检测仪开始检测到较大的信号,可以用超声波信号来反映颗粒在腔体上的跳动。为研究线形金属颗粒碰撞次数的实测结果与仿真结果间的关系,对不同尺寸(长9 mm、半径0.3 mm;长13 mm、半径0.3 mm;长13 mm、半径0.15 mm)线形颗粒单位时间内产生的超声脉

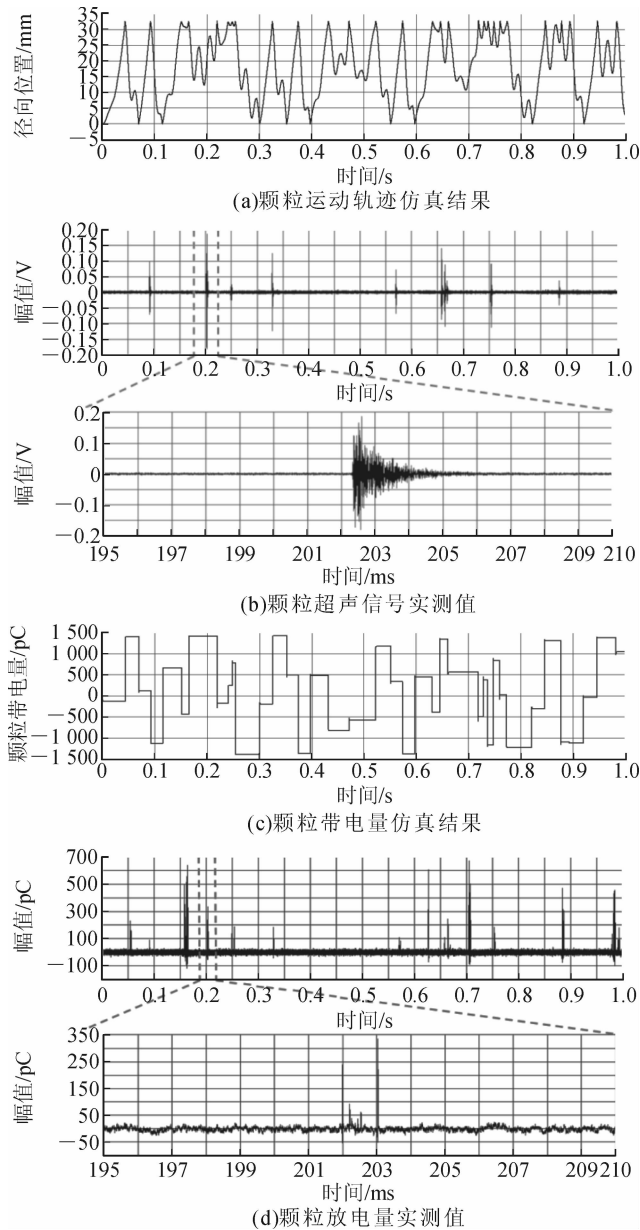


图9 长13 mm、半径0.15 mm的线形颗粒运动行为及局部放电的仿真及试验结果

Fig. 9 Movement and partial discharge of linear particle with 0.15 mm radius and 13 mm length

冲个数与颗粒碰撞次数的仿真结果进行了对比,其对比结果见图10。

图10示出的是不同尺寸线形颗粒在31.5 kV电压下的颗粒碰撞次数实测结果与仿真结果的对比。从图10中可以看出,半径0.3 mm、长9 mm线形颗粒在单位时间(1 s)内的超声脉冲个数是64次,仿真计算得到的颗粒碰撞次数是51次,仿真结果比实测结果小20%左右。半径0.3 mm、长13 mm线形颗粒在单位时间内的超声脉冲个数是29次,仿真计算得到的颗粒碰撞次数是24次,仿真结果比实测结果小14%左右。半径0.15 mm、长13 mm线

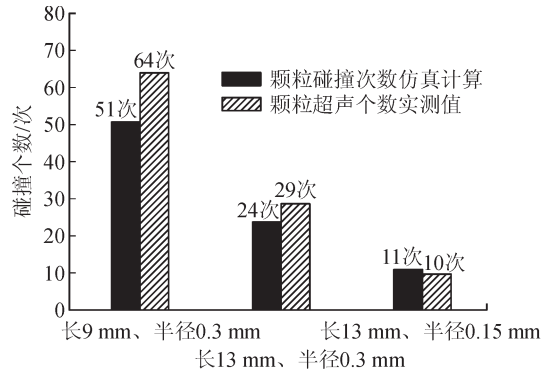


图10 颗粒碰撞次数实测结果与仿真结果的对比

Fig. 10 Comparison of collision frequency between experimental results and simulation results

形颗粒在单位时间内的超声脉冲个数是10次,仿真计算得到的颗粒碰撞次数是11次,仿真结果比实测结果大10%,通过上面的对比可以看出,颗粒碰撞次数的实测值与仿真结果较接近,可通过颗粒的仿真计算来近似估算颗粒的实际碰撞次数。

5 运行电压下线形金属颗粒最大带电量与最大视在放电量的对比分析

为研究线形金属颗粒放电量实测结果与颗粒带电量仿真结果间的关系,对不同尺寸(长9 mm、半径0.3 mm;长13 mm、半径0.3 mm;长13 mm、半径0.15 mm)线形颗粒单位时间内最大放电量的实测结果与颗粒最大带电量的仿真结果进行了对比,其对比结果见图11。

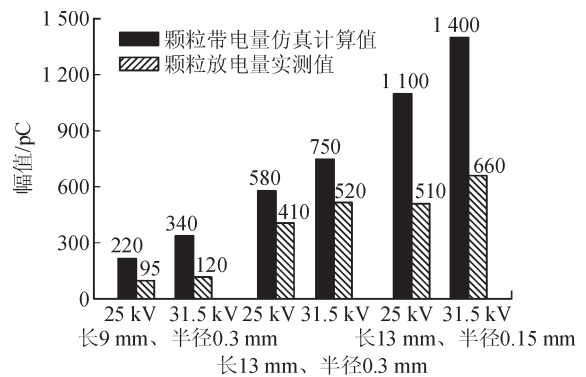


图11 线形颗粒带电量仿真结果与试验结果的对比

Fig. 11 Discharge comparison between simulation results and experimental results of linear particle

图11示出的是不同尺寸线形颗粒分别在25、31.5 kV电压下的颗粒最大带电量仿真结果与试验结果的对比。从图11中可以看出,长9 mm、半径0.3 mm线形颗粒在25 kV电压下的仿真结果是220 pC,试验测试结果是95 pC,仿真结果与实测结果的比值是2.32;该颗粒在31.5 kV电压下仿真结

果与实测结果的比值是 2.83, 该线形颗粒在不同电压下的颗粒最大带电量仿真结果与颗粒最大放电量的实测结果的比值较接近。另外, 长 13 mm、半径 0.3 mm 线形颗粒在 25、31.5 kV 电压下的仿真结果与实测结果的比值分别是 1.41 和 1.44。长 13 mm、半径 0.15 mm 线形颗粒在 25、31.5 kV 电压下的仿真结果与实测结果的比值分别是 2.15 和 2.12。线形颗粒尺寸一定的情况下, 在不同电压下线形颗粒的最大带电量仿真结果与颗粒最大放电量的实测结果的比值较接近; 而在电压相同的情况下, 不同尺寸的线形颗粒的最大带电量仿真结果与颗粒最大放电量的实测结果的比值差别较大。针对这一现象的解释是: 将一线形颗粒放置在 GIS 腔体内时, 颗粒的示意图及等效电路图见图 12。其中 C_1 、 R_1 分别表示线形颗粒与高压导体间的等效电容及等效电阻, C_2 、 R_2 分别表示线形颗粒与外壳间的等效电容及等效电阻, C_3 、 R_3 分别表示高压导杆与外壳间的等效电容及等效电阻, C_k 表示耦合电容, Z_m 为检测阻抗。线形颗粒与外壳间的气隙被击穿引发放电, 此时颗粒的真实放电量 Q_2 为

$$Q_2 = C_2 U_2 \quad (8)$$

经过检测阻抗的放电量 Q_m 为

$$Q_m = \frac{k}{1+k} \times \frac{C_1}{C_2} Q_2 \quad (9)$$

式(9)中, $k = C_k / C_3$; R_1 、 R_2 、 R_3 阻值非常大, 可忽略。由式(9)可知, 检测阻抗测得的视在放电量与真实放电量存在一比例系数, 在试验过程中试验回路不变即 C_k / C_3 不变; 当颗粒的尺寸发生变化时可引起 C_1 / C_2 发生变化, 当该比值变大时, 颗粒的真实放电量与视在放电量的比值变大, 反之则变小; 而当颗粒的尺寸不变时, C_1 / C_2 的比值则基本不变, 在不同电压下颗粒的真实放电量与视在放电量的比值则相对固定。当外施电压达到峰值时, 颗粒碰撞外壳并离开, 此时颗粒所带电量最大, 在下次碰撞时当线形颗粒所带电量将传导作用全部释放掉时, 颗粒的最大真实放电等于颗粒最大所带电荷量, 此时测得颗粒的视在放电量最大。由于颗粒所带最大电荷量 $Q_{1\max}$ (该值可通过仿真计算获得) 与颗粒的最大视在放电量 $Q_{2\max}$ 间存在一定比例关系

$$k_i = \frac{Q_{1\max}}{Q_{2\max}} \quad (10)$$

且当颗粒的尺寸不变时, 该比例关系则基本不变。线形颗粒竖立时的最大带电量可表示为

$$Q_{1\max} = \frac{\pi \varepsilon_0 L^2 E_{\max}}{\ln(2L/a) - 1} \quad (11)$$

根据式(10)、(11)得到金属颗粒最大视在放

电量

$$Q_{2\max} = \frac{\pi \varepsilon_0 L^2 E_{\max}}{k_i \ln(2L/a) - 1} \quad (12)$$

从式(12)可以得到, 对于长为 L 、半径为 a 的线形颗粒的最大视在放电量与该颗粒的尺寸(长度、半径)存在定量关系 $Q_{2\max} = f(L, a)$ 。因此, 当不同尺寸线形颗粒的仿真结果和试验结果的比值确定后, 通过线形颗粒局部放电量的测量(最大视在放电量及超声信号脉冲个数)与仿真结果(颗粒最大带电量及碰撞外壳的次数)的比对可以实现线形颗粒尺寸的估算。

6 线形金属颗粒尺寸的估算方法

根据前面的分析可以得知颗粒的碰撞频率与颗粒的最大视在放电量与颗粒的尺寸有关。通过采用超声检测仪和局部放电检测仪可获得颗粒碰撞外壳时的超声脉冲频率和颗粒的最大视在放电量, 并结合颗粒的仿真计算结果可实现颗粒尺寸的估算, 线形颗粒尺寸的估算流程见图 12。

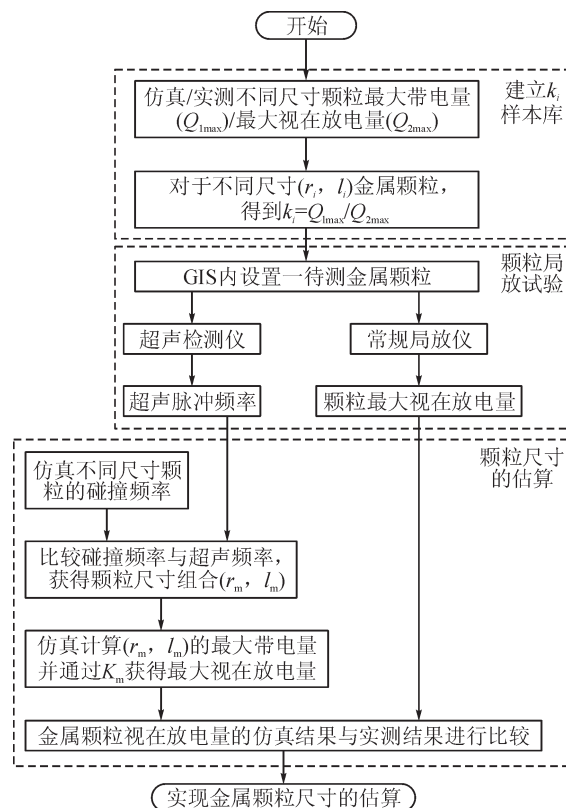


图 12 线形颗粒尺寸估算流程图

Fig. 12 Flow chart of linear particle size estimation

1) 建立 k_i 样本库

首先对不同半径 r_i (如: 0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mm), 不同长度 l_i (如: 1、3、5、7、9、11、13 mm) 线形颗粒的最大带电量 ($Q_{1\max}$) 进行仿真计算, 并采用常规脉冲电流检测仪测量不同尺寸颗粒的最大视在放

电量($Q_{2\max}$)。金属颗粒不同的尺寸组合(r_i, l_i)(其中 $i=1, 2, 3, \dots$)对应不同的比例系数 k_i , 则

$$k_i = \frac{Q_{1\max}}{Q_{2\max}} \quad (13)$$

式(13)中, k_i 只与腔体结构和颗粒尺寸有关, 而与外施电压无关。

2) 颗粒局部放电试验

将一待测线形颗粒放置在 GIS 腔体内, 并将电压升至 GIS 的运行电压, 采用常规脉冲电流检测仪和超声波检测仪测量金属颗粒的局部放电量和超声信号, 进而获得单位时间内金属颗粒的最大放电量和超声脉冲个数。

3) 颗粒尺寸的估算

仿真计算不同尺寸组合(r_i, l_i)金属颗粒的碰撞频率, 并将碰撞频率与颗粒的超声脉冲频率进行比对, 得到碰撞频率与颗粒的超声脉冲频率较接近时的颗粒的尺寸组合(r_m, l_m)(其中 $m=1, 2, 3, \dots$)。仿真计算不同尺寸组合(r_m, l_m)金属颗粒的最大带电量, 并乘以 k_m 获得颗粒最大视在放电量的计算值。将颗粒最大视在放电量的仿真结果与实测结果进行比较, 得到碰撞频率与颗粒的超声脉冲频率较接近时的金属颗粒的一个尺寸组合(r, l), 从而实现线形颗粒尺寸的估算。

7 结论

1) 不同长度及半径的线形颗粒的运动行为差别较大, 随着线形颗粒直径的减小或长度的增加, 线形颗粒的跳动高度变大、颗粒飞行时间变长。

2) 在运行电压下, 线形颗粒碰撞外壳的频率由颗粒的尺寸决定, 且颗粒在与外壳碰撞过程中超声波检测仪可较灵敏地检测到超声信号, 通过分析超声脉冲频率可基本估算颗粒碰撞外壳的频率。

3) 颗粒的最大视在放电量与颗粒所带最大电荷量间存在一定比例关系, 且当颗粒的尺寸不变时该比例关系基本不变。将试验中测得的线形颗粒最大视在放电量与超声脉冲频率与仿真结果进行比对, 可以实现线形颗粒尺寸的估算。

参考文献:

- [1] 李 信, 李成榕, 丁立健, 等. 基于特高频信号检测 GIS 局放模式识别[J]. 高电压技术, 2003, 14(3): 16-20.
LI Xin, LI Chengrong, DING Lijian, et al. Identification of PD patterns in gas insulated switchgear(GIS) based on UHF signals[J]. High Voltage Engineering, 2003, 14(3): 16-20.
- [2] PEARSON J S, FARISH O, HAMPTON B F, et al. Partial discharge diagnostics for gas insulated substations[J]. IEEE

- Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 893-905.
- [3] 张晓星, 舒 娜, 徐晓刚, 等. 基于三维谱图混沌特征的 GIS 局部放电识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 249-254.
ZHANG Xiaoxing, SHU Na, XU Xiaogang, et al. GIS partial discharge recognition based on chaos features of the three-dimensional spectra[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 249-254.
- [4] 隋少臣, 孟延辉, 李 强. GIS 现场故障检测方法及实例分析[J]. 电工技术, 2011(2): 59-61.
SUI Shaocheng, MENG Yanhui, LI Qiang, et al. Detection method and case analysis of GIS field fault[J]. Electric Engineering, 2011(2): 59-61.
- [5] 李 钊. 110 kV GIS 内置式局部放电监测装置有效性校核方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
LI Zhao. The testing method for internal PD sensor in 110 kV GIS[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [6] CIGRE Joint Working Group 33/23, 12. Insulation coordination of GIS: Return of experience, on site tests and diagnostic techniques [C]//International Council on Large Electric Systems. Paris, France: [s. n.], 1998: 67-97.
- [7] SAKAI K, ABELLA D L, KHAN Y. Experimental studies of free conducting wire particle behavior between non-parallel plane electrodes with ac voltage in air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 418-424.
- [8] PRABAKARAN T, USA S. Analysis of partial discharge signals in 420 kV gas insulated substation[C]//2013 IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems. Kolkata, India: IEEE, 2013: 249-254.
- [9] 胡泉伟, 张 亮, 吴 磊, 等. GIS 中自由金属颗粒缺陷局部放电特性的研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(1): 1-4.
HU Quanwei, ZHANG Liang, WU Lei, et al. Probe into the partial discharge characteristics of free metal particles in GIS[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(1): 1-4.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] HOLMBERG M, L-A M. Identification of metallic particles in GIS by statistical analyzes of Acoustical measurements

- In situ Raman analysis of gas formation in NiMH batteries [J]. *Applied Spectroscopy*, 2005, 59(1): 109-114.
- [11] 夏益华, 罗榴彬, 李晓丽, 等. 共聚焦显微拉曼光谱研究碱处理对稻秸发酵制沼气的的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(3): 657-662.
- XIA Yihua, LUO Liubin, LI Xiaoli, et al. Confocal microscopic Raman spectroscopy study of alkali treatment on rice straw biogas fermentation system impact[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 657-662.
- [12] 侯茹, 李书婷, 牛峰, 等. RuSi_n(n=1~6)团簇的结构、稳定性和电子性质的密度泛函研究[J]. *原子与分子物理学报*, 2016, 33(2): 252-258.
- HOU Ru, LI Shuting, NIU Feng, et al. Geometries, stabilities and electronic properties of the RuSi_n(n=1~6)cluster: A density functional investigation[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2016, 33(2): 252-258.
- [13] 廖文裕, 苏亚欣, 周皞, 等. 铁原子与 SO₂ 反应的密度泛函理论研究[J]. *原子与分子物理学报*, 2016, 33(2): 221-227.
- LIAO Wenyu, SU Yaxin, ZHOU Hao, et al. Theoretical study on the reaction of Fe and SO₂ based on density functional theory[J]. *Journal of Atomic and Molecular physics*, 2016, 33(2): 221-227.
- [14] 陈伟根, 赵立志. 激光拉曼光谱应用于变压器油中溶解气体分析[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(15): 2485-2492.
- CHEN Weigen, ZHAO Lizhi. Analysis of dissolved gas in transformer oil based on laser raman spectroscopy[J]. *proceedings of the CSEE*, 2014, 34(15): 2485-2492.
- [15] 邹乔, 姜龙, 杜显元, 等. 基于密度泛函理论的非分子结构与光谱研究[J]. *发光学报*, 2012, 33(12): 1389-1397.
- ZOU Qiao, JANG Long, DU Xianyuan, et al. Optimization of phenanthrene structure and vibrational spectra studies based on density functional theory[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(12): 1389-1397.
- [16] 李俊平, 周光明, 张丽君, 等. 基于密度泛函理论的左旋延胡索乙素的红外、拉曼光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(11): 2989-2993.
- LI Junping, ZHOU Guangming, ZHANG Lijun, et al. Based on density functional theory of sinistral tetrahydropalmatine infrared and Raman spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(11): 2989-2993.
- [17] 陈光巨, 黄元河. 量子化学[M]. 上海: 上海华东理工大学出版社, 2008.
- CHEN Guangju, HUANG Yuanhe. Quantum chemistry[M]. Shanghai: Shanghai East China University of Science and Technology Press, 2008.
- [18] 刘瑜, 王虎. 塑化剂邻苯二甲酸二辛酯的拉曼光谱计算及分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(1): 122-127.
- LIU Yu, WANG Hu. Plasticizer phthalate dioctyl calculation and analysis of the Raman spectra[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(1): 122-127.
- [19] 蒋启华, 蒋君好, 邓萍, 等. L-Thr-TPPMg 电子结构及光谱性质的理论研究[J]. *计算机与应用化学*, 2015, 32(4): 477-479.
- JIANG Qihua, JIANG Junhao, DENG Ping, et al. L-Thr-TPP Mg electronic structure and optical properties of theory research[J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2015, 32(4): 477-479.
- [20] WRIGHT R B, WANG C H. Density effect on the fermi resonance in gaseous CO₂ by Ramanscattering[J]. *the Journal of Chemical Physics*, 1973, 58(7): 2893-2895.
- [21] SOMEKAWA T, KASAOKA M. Analysis of dissolved C₂H₂ in transformer oils using laser raman spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1086-1088.
- [22] SCOTT A P, RADOM L. Harmonic vibrational frequencies: An evaluation of hartree-fock, moller-plesset, quadratic configuration interaction, density functional theory, and semiempirical scale factors[J]. *the Journal of Physical Chemistry*, 1996, 100(41): 16502-16513.
- 陈新岗(1968—), 男, 教授, 硕导, 主要从事电气设备在线监测及过电压、信号采集与信号处理、智能传感器等方面的研究和教学工作。
- 杨定坤(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事电气设备在线监测。

(上接第 115 页)

- and computer simulations[C]//9th International Symposium on HV Engineering. Graz: [s.n.], 1995: 5661.
- [13] RUNDE M, AURUD T, LJOKELSOY K, et al. Risk assessment basis of moving particles in gas insulated substations [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997, 12(2): 714-721.
- [14] SCHLEMPER H D, FESER K, Characterisation of moving particles in GIS by acoustic and electric partial discharge detection[C]//10th International Symposium on HV Engineering. Montreal: [s.n.], 1997: 87-90.
- [15] 戎琳, 贾勇勇, 杨景刚. 基于超声波飞行图的 GIS 自由金属微粒缺陷诊断研究[J]. *电工电气*, 2014(10): 19-23.
- RONG Lin, JIA Yongyong, YANG Jinggang. Study on defect diagnosis of free metal particle in gas insulated switchgear based on ultrasonic flight plot[J]. *Electronic Electric*, 2014(10): 19-23.
- [16] ALAN H, OWEN F. Particle initiated breakdown between coaxial electrodes in compressed SF₆[J]. *IEEE Transactions on Power*, 1973, PAS-92(3): 871-876.
- 张西子(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 局放放电检测传感器等。
- 季洪鑫(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为高电压电气设备在线监测与故障诊断。
- 李成榕(1957—), 男, 博士, 教授, 博导, 从事电力系统动态安全防御与电气设备状态检测、高电压新技术及其应用, 电气绝缘理论及新材料、气体放电等方面的研究。