

气体绝缘开关内自由运动金属颗粒的 超声波信号特性

黎大健¹, 杨景刚¹, 梁基重¹, 吴磊¹, 郑小川², 罗永芬¹, 李彦明¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西电力科学研究院, 710054, 西安)

摘要: 为了研究气体绝缘开关(GIS)腔体内自由运动金属颗粒的超声波信号特性,首先简单分析了自由颗粒在电场中的受力,然后设计了一个模拟此类缺陷的模型,并测量了不同尺寸和形状的自由运动颗粒产生的超声波信号,最后分析了这些信号的工频相位相关性、幅值以及飞行时间等几个要素的特性.试验结果表明: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,颗粒的尺寸和形状会影响颗粒的飞行时间;与球状颗粒相比,丝状颗粒的飞行时间随电压的升高有更显著的变化,因此它们对GIS绝缘劣化的影响严重度不一样;这些信号的幅值、颗粒飞行时间的变化分布具有周期性.

关键词: 气体绝缘开关;自由运动金属颗粒;超声波信号;放电

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)02-0101-05

Characteristics of Acoustic Signal from Free Moving Metallic Particles in Gas Insulated Switchgear

LI Dajian¹, YANG Jinggang¹, LIANG Jichong¹, WU Lei¹, ZHENG Xiaochuan²
LUO Yongfen¹, LI Yanming¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Electric
Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: To investigate the characteristics of acoustic signals emitted by free moving metallic particles in gas insulated switchgear (GIS) chamber, the force on free particles in GIS chamber is briefly described. And a test cell is designed to simulate this defect. Then a lot of acoustic signals emitted by particles with different shape and different size are measured to extract parameters of acoustic signals, such as the phase correlation, amplitude and flight time. The experimental results show that the acoustic signals are weak but with a strong phase correlation when the discharge is caused by the static particles in the enclosure, while the acoustic signals are strong with a weak phase correlation when the particles jump freely in the enclosure; and the flight time varies with the particle shape and size, and the cylindrical particle flight time is more sensitive to the test voltage than that of the spherical one, which means that they have different effects on the insulation of GIS; moreover, the signal amplitude and particle flight time possess periodicity.

Keywords: gas insulated switchgear; free moving metallic particle; acoustic signal; discharge

气体绝缘开关(GIS)由于其突出的特点,在电力系统能量传输中得到越来越广的应用.由于在制造、装配以及运行过程中不可避免会产生缺陷并会对GIS绝缘水平造成一定的损害,一旦造成断电事

故,维修时间较长. 所以,如果在事故的早期能检测到绝缘缺陷的发生,并对其严重程度进行评估,以便有计划地安排维修,避免事故发生所带来的巨大的损失. 因此,对其缺陷的检测、评价成为 GIS 绝缘状况监测的重要手段^[1-2].

GIS 中最常见的缺陷是产生了自由运动颗粒,这些金属颗粒有细长的线形、螺旋线形、球形、粉末状等不同形状,它们在电场中带电后受静电力作用产生运动,可以使一段绝缘距离短路而造成击穿故障,特别是当自由颗粒跳动到靠近高压导杆的高场强区域时,其危险程度增加^[3].

许多研究采用电检测法(超高频法及脉冲电流法)检测了颗粒在 GIS 中不同位置时的放电信号,并统计了放电脉冲出现的时刻及相位^[4-5],然而颗粒在运动中不一定会产生放电信号^[6],所以仅用电检测法不能描述颗粒的运动状态. 由于颗粒撞击腔体和飞行中发生局部放电时都会产生超声波,因此超声波法是检测 GIS 内自由运动颗粒缺陷一种比较有效的检测手段. 本文设计和模拟了一个 GIS 中自由运动颗粒的缺陷模型单元,使用超声绝缘检测仪器采集并分析不同尺寸和形状金属颗粒产生的超声波信号,研究信号的相位相关性、颗粒飞行时间以及信号幅值等参数的变化规律,同时考虑了颗粒静止及自由运动时产生的超声信号的区别.

1 自由颗粒受力分析

自由颗粒位于电场中时会获得一定的电荷量,因此会受到库仑力的作用^[7],颗粒受到的库仑力为

$$F_q = kqE$$

式中: k 为电镜像力引起的修正系数. 若微粒处于悬浮状态时无放电发生,则认为微粒所带电荷量为前一次与电极碰撞时获得的电荷量 q ,以典型的球形和丝状颗粒为例,颗粒与电极碰撞获得的电荷量可以表示为

$$q_r = (2/3)\pi^3 \epsilon_0 \epsilon_r E_0 r_0^2 \tag{1}$$

$$q_{\text{wire}} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r l^2 E_0}{\ln(2l r^{-1}) - 1} \tag{2}$$

式中: ϵ_0 、 ϵ_r 分别为真空中介电常数和介质相对介电常数; r_0 为球半径; l 、 r 分别为丝状颗粒的长度和截面半径. 除了库仑力和重力的作用,颗粒还会受到摩擦力、气体浮力以及气体黏滞力的作用.

2 测量系统的建立

局部放电测量系统如图 1 所示,该系统主要由

最大输出电压为 150 kV 的无局部放电试验变压器、保护电阻、耦合电容、检测阻抗、内有自由颗粒缺陷的模型单元、局部放电仪、示波器(Tek4054,带宽 500 MHz,最大采样率 2.5 GHz)、传感器、前置放大器以及超声波绝缘检测仪组成,其中耦合电容、检测阻抗以及局部放电仪能采集因颗粒局部放电而产生的信号.

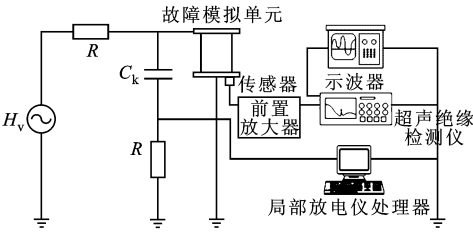


图 1 局部放电测量系统示意图

超声波传感器通过耦合剂固定在地电位外壳上,本文选用频率响应曲线如图 2 所示的超声传感器,其谐振频率约为 30 kHz. 传感器输出的超声信号幅值较小(约为 μV 级),因此需要经过一个 40 dB 前置放大器和一个放大倍数可调的放大器处理后再传送到超声绝缘检测仪终端. 背景噪声信号幅值在最大放大倍数下约为 0.5 mV,通过局部放电仪标定超声波检测系统能检测的最小放电量为 5 pC,具有较好的灵敏度.

为了模拟 GIS 腔体中自由运动颗粒缺陷,本文设计了如图 3 所示的缺陷模型,模型内充以一定气压的 SF_6 气体,采用平板电极模拟 GIS 中的稍不均

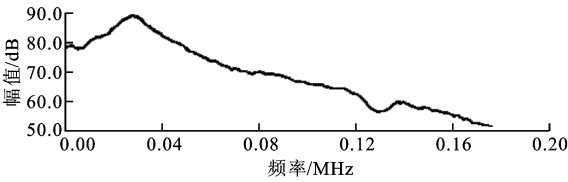


图 2 超声波传感器频率响应曲线

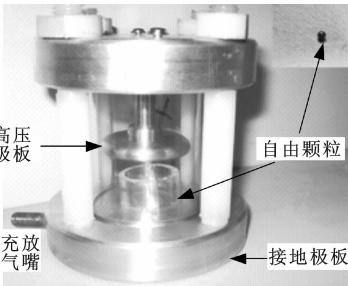


图 3 人工缺陷装置单元照片

匀电场,高压电极是直径为 45 mm 的铜电极,距离接地电极约 25 mm。本文中颗粒选取直径为 1 mm、1.5 mm 的钢球以及 $r=0.2$ mm, $l=5$ mm 的铜丝,同时测量系统还采取措施确保了干扰的消除。

3 试验结果及分析

每次试验仅以单独颗粒为研究对象,每个超声脉冲信号只考虑第一个波峰的特征参数。图 4 为球状颗粒产生的超声脉冲序列,其特征参数如图中所示,其中包括脉冲出现时对应的工频相位 φ ,相邻两个脉冲之间的时间间隔为 Δt (飞行时间),脉冲幅值为 A 。每次采集 1 000 个脉冲进行统计分析。

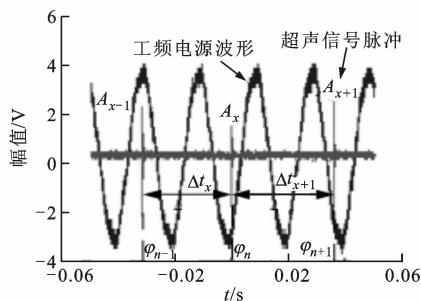


图4 运动颗粒产生的超声波信号特征参数示意图

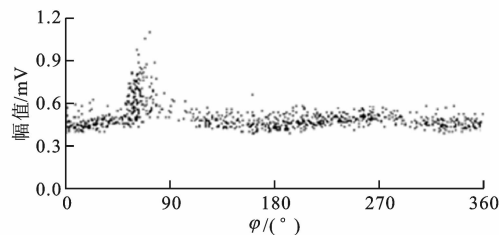
3.1 超声信号的相位相关性

当施加电压较低时,自由颗粒获得的库仑力还不足以使其自由跳动,而是静止于内壳上,这与地电位凸起尖刺缺陷相似,当电压达到一定的幅值时会发生局部放电,因此其脉冲相位分布 (PRPD) 谱图会呈现单峰或双峰的情形。由图 5 可以看到,放电最先发生于施加电压正峰值附近,随着电压升高,正、负峰值附近均能采集到放电信号,其幅值较小,均小于 2 mV,此时 SF_6 气体相对压力为 0.35 MPa。

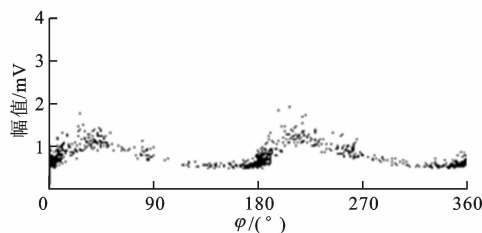
电压升高到一定值时,自由颗粒可以在装置空间内自由跳动,图 6 为颗粒自由跳动时的超声信号相位分布谱图,每个相位区间上都有相当数量的脉冲分布,没有明显的相位相关性,说明运动颗粒与外壳碰撞的时刻是随机的,此时施加电压为 30 kV, SF_6 气体相对压力为 0.35 MPa。

颗粒特别是尖头的丝状颗粒在飞行中由于镜像电荷的作用,会使得颗粒与地电位有电压差,如果此差值足够大,当颗粒飞近地电位时也会发生电晕放电。图 7 为电检测法测量颗粒自由跳动时的局部放电信号 PRPD 谱图,可以看到局部放电主要集中在施加电压的正、负峰值附近,然而由于局部放电产生的超声信号远小于颗粒撞击产生的超声信号^[6](对

比图 5 与图 6 纵坐标幅值),所以看不出明显的相位分布特性。



(a) 15 kV



(b) 20 kV

图5 直径为 1 mm 的球状颗粒局部放电产生的单峰和双峰两种 PRPD 谱图

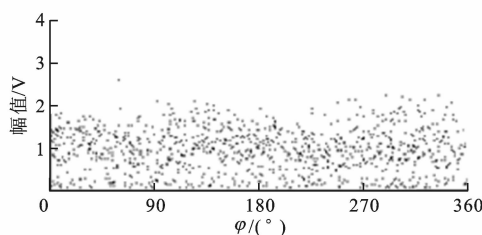


图6 直径为 1 mm 的球状颗粒自由跳动时超声信号相位分布图

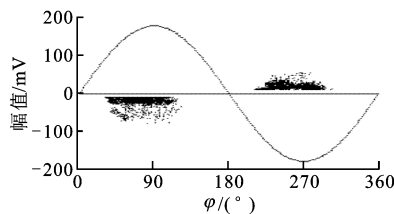


图7 颗粒局部放电信号的 PRPD 谱图

基于以上分析可知,当颗粒静止时,颗粒发生放电,此时超声波信号为放电信号,其幅值较小,且有较强的相位相关性。当颗粒自由跳动时,相比于颗粒撞击外壳引起的机械振动,放电产生的超声信号可以忽略,其幅值非常大,且没有明显的相位相关性。

3.2 飞行时间

颗粒的飞行时间与其自身重力、颗粒形状、起跳时获得的电荷量以及颗粒与腔体的反弹系数等均有

很大关系^[6]. 一般来说,重力越小,颗粒越容易克服重力的作用而自由运动. 颗粒形状会影响颗粒附近的电场畸变程度,一方面,由式(1)和式(2)可知,电场畸变越严重,颗粒获得的电荷量越大,起跳时初始动量就越大,因此飞行时间越长. 另一方面,颗粒头部越尖,飞行中就越容易发生电晕放电(飞萤现象^[6,8]),所以会损失一部分能量,飞行高度下降,因此飞行时间会变短. 另外,腔体的反弹系数也能影响运动颗粒的飞行高度. 图 8 为 3 种颗粒 1 000 次撞击中最大的飞行时间随施加电压的变化曲线. 从图中可以看出,随着电压的升高,颗粒的飞行时间都有所上升,直径为 1 mm 球状颗粒的飞行时间从 40 ms 上升到 55 ms,直径为 1.5 mm 球状颗粒起跳电压较低,飞行时间也较长,从 35 ms 上升到 65 ms,铜丝颗粒的飞行时间变化最快,在很小的电压变化范围内,飞行时间由 50 ms 迅速上升到 76 ms,约为 3 个工频周期.

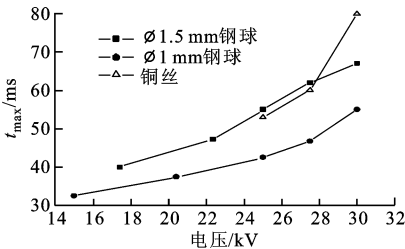


图 8 颗粒飞行时间变化图

如果忽略颗粒在飞行中的摆动振荡并且只考虑重力因素的作用,颗粒上升阶段占用其飞行时间的一半以达到最高点,然后下落,其飞行轨迹的最高点

高度 H_h 可以用以下公式估算^[6]

$$H_h = (1/2)g(t_{\max}/2)^2 \tag{3}$$

式中: $t_{\max}$ 为颗粒最大飞行时间. 由此式可以估算颗粒跳动高度约为 5~8 mm,其中丝状颗粒跳动高度最大. 另外,当气压从 0.35 MPa 下降到 0.1 MPa 时,颗粒的运动和超声波信号并无明显变化,表明气体的摩擦力、浮力以及黏滞力对试验结果影响不大.

以上分析表明,尺寸较大的球形颗粒飞行时间较长,且丝状颗粒比球形颗粒飞行时间更长,因此颗粒跳到高场强区域的可能性越大,甚至可能穿越整个间隙撞击高压电极^[9]. 目前已有的研究表明,丝状颗粒的穿越时间约为几个工频周期^[10],因此对 GIS 绝缘击穿的危险程度较高.

3.3 信号幅值与飞行时间

图 9 中三角状脉冲信号分布群的周期约为 20 ms,随着施加电压的增加,颗粒飞行高度增加,即飞行时间延长,颗粒撞击外壳产生的超声信号幅值也增大,因此三角状脉冲信号群增多,且信号幅值呈上升趋势. 这是一种典型的 GIS 中自由颗粒缺陷模式识别图,因为其他诸如电晕放电、悬浮放电等均不会有如此模式图.

在施加电压一定时,总是先出现飞行时间较短的信号,随后缓慢增加到一个稳定的值. 一般来说,当颗粒与外壳撞击时,颗粒由于反弹(反弹系数一般小于 1.0)就会获得一个初始向上的速度,如果颗粒与地电极碰撞获得的电荷与前一次相等或甚至更大,则其飞行时间变长^[6].

从图 10 中可以看到,飞行时间分布的变化周期

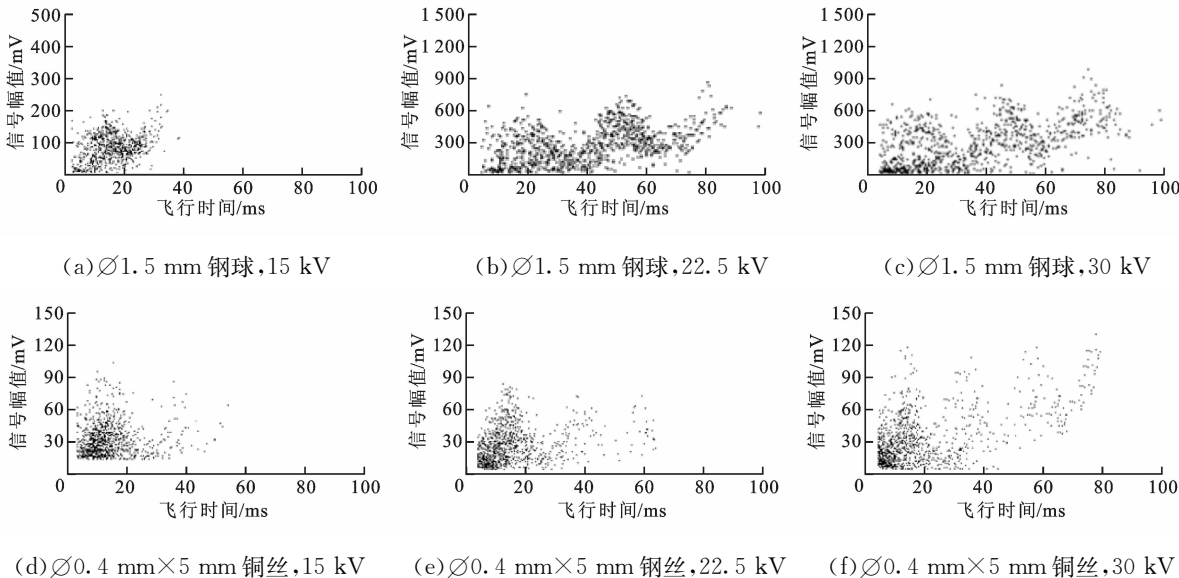


图 9 电压变化时颗粒的飞行时间与信号幅值图

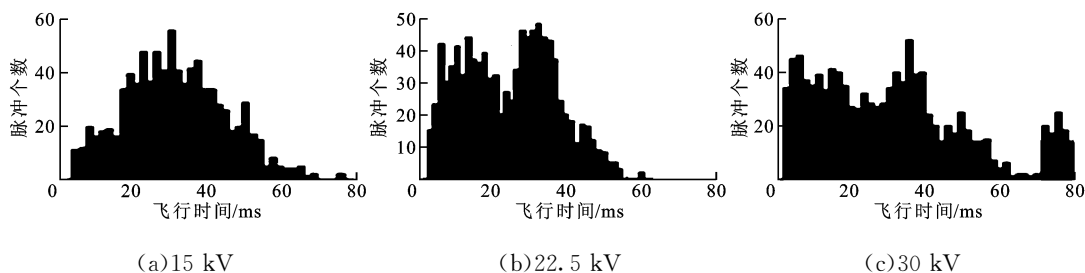


图10 丝状自由颗粒飞行时间分布图

与工频周期大致相同,第一个峰值出现在 $12 \sim 14$ ms处,而下一个出现在 $(13+20)$ ms,从而可以推算出球撞击外壳后在空中的飞行时间约为 $(13+20n)$ ms,其中 $n=0,1,2,\dots$.

基于以上分析可知,虽然颗粒撞击外壳的时刻与工频相位无关,但超声信号幅值、颗粒飞行时间却都表现出较强的周期性变化.当颗粒与金属外壳碰撞时立刻得到新的电荷,从而有一个向上的电荷力使其向上运动,如果忽略飞行中发生放电导致的电荷损失,奇数次半个工频周期后颗粒将获得反方向的电荷力.当电荷力达到最大且和重力方向一致(指向地电极)时,撞击的动量达到极大,检测到的超声信号也达到极大.因此,在模式图上表现出飞行时间与信号幅值比较有规律的周期性变化特性^[9].

4 结论

(1)当颗粒自由运动时,超声信号主要体现颗粒撞击外壳机械振动的声波信号特性,其相位相关性较弱,且信号幅值较高;颗粒静止不动发生放电时,超声信号有单峰或双峰的相位分布形式,信号幅值较低.

(2)颗粒的飞行时间均随着施加电压的升高而加长,且丝状颗粒较为明显,尺寸较大的颗粒比尺寸小的颗粒飞行时间长.

(3)超声信号的幅值以及颗粒飞行时间均随施加电压的增大而都有较强的周期性变化,其变化周期约为 20 ms(工频周期).

(4)GIS 中自由运动颗粒缺陷的超声波信号特征较为明显,因此超声波法是一种检测 GIS 内自由运动颗粒的有效手段.

参考文献:

- [1] 王昌长,李福祺,高胜友.电力设备的在线监测与故障诊断[M].北京:清华大学出版社,2006:252-266.
- [2] LUNDGAARD L E, TANGEN G, SKYBERG B, et al. Acoustic diagnoses of GIS: field experience and de-

velopment of an expert system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 287-294.

- [3] AHMED F, DARUS A B, YUSOFF Z, et al. Free moving metallic particle detection in GIS [C]// APSCOM-97, Hong Kong, China: IEEE, 1997: 314-316.
- [4] INWIN T, LOPEZ-ROLDAN J, CHARLSON C. Partial discharge detection of free moving particles in GIS by the UHF method: recognition pattern depending on the particle movement and location [C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE Power Engineering Society, 2000: 2135-2140.
- [5] OKABE S, YAMAGIWA T, OKUBO H. Detection of harmful metallic particles inside gas insulated switchgear using UHF sensor [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 701-709.
- [6] LUNDGAARD L E. Particles in GIS characterization from acoustic signatures [J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1064-1074.
- [7] LUNDGAARD L E, RUNDE M, SKYBERG B. Acoustic diagnoses of gas insulated substations: a theoretical and experimental basis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4): 1751-1759.
- [8] RUNDE M, AURUD T, LJEKELSOY K, et al. Risk assessment basis of moving particles in gas insulated substations [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2): 714-721.
- [9] 贾江波. GIS中稍不均匀场内自由导电颗粒的运动特性与无害化方法研究[D].西安:西安交通大学电气工程学院,2007.
- [10] SELLARS A G, FARISH O, HAMPTON B F. Assessing the risk of failure due to particle contamination of GIS using the UHF technique[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(2): 323-331.

(编辑 杜秀杰)