

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.006

GIS 中球形金属颗粒与电极碰撞的法向恢复系数计算方法

葛廷利, 林 琳

(国网冀北电力有限公司技能培训中心, 河北 保定 071003)

摘要: 法向恢复系数对计算GIS中金属颗粒的运动具有重要影响。基于球形金属颗粒与电极的法向碰撞物理过程,提出了碰撞时法向恢复系数的计算方法,实验验证了该方法的准确性。在此基础上,研究了球形金属颗粒直径、初始碰撞速度对法向恢复系数的影响规律,结果表明:颗粒直径对法向恢复系数基本无影响;随着初始碰撞速度的增大,法向恢复系数减少,并指出由初始碰撞速度增大引发的塑性形变能量损耗占整个碰撞过程总能量的比值增加是导致法向恢复系数减少的原因。为满足金属颗粒运动研究需求,给出了铜球、不锈钢球、铝球分别与铜电极、不锈钢电极、铝电极碰撞时的法向恢复系数与初始碰撞速度之间的经验关系式。

关键词: GIS; 球形金属颗粒; 法向恢复系数

Calculation Method of Normal Restitution Coefficient of Spherical Metal Particles Impacting with Electrode in GIS

GE Tingli, LIN Lin

(State Grid Ji Bei Electric Power Company Limited Skill Training Center, Hebei Baoding 071003, China)

Abstract: Normal restitution coefficient has important influence on the calculation of movement of metal particles in GIS. Based on the normal collision physics process between spherical metal particles and electrode, calculation method of normal restitution coefficient of collision is proposed. The accuracy of this way is verified by experiment. And on this basis, diameter of spherical metal particles and rule of the influence of initial impact velocity on normal restitution coefficient are studied. The results show that the particle diameter has no effect on normal restitution coefficient basically; with the increase of the initial impact velocity, normal restitution coefficient decreases, which is caused by the increase the ratio of the total energy in the collision process when the increase of initial impact velocity leads to the energy loss of plastic deformation. To meet the demand of metal particles movement research, the empirical formulas between normal restitution coefficient and initial impact velocity when copper, stainless steel and aluminum ball collides with their corresponding electrodes are listed.

Key words: GIS; spherical metal particles; normal restitution coefficient

0 引言

SF₆气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)因其绝缘强度高、输送容量大、占地面积小、抗干扰能力强等优点在电力系统中占有重要地位并得到了应用^[1-2]。然而,GIS在加工、运输、安装、运行过程中由于振动摩擦、机械机构运动等将不可避免产生金属颗粒^[3]。在电场力、电场梯度力、气体粘滞力、重力、摩擦力等作用力下,金属颗粒会在GIS腔

体内运动到绝缘子附近或者粘附在绝缘子表面,降低了GIS的绝缘强度甚至发生沿面放电或气体间隙击穿^[3-5],统计表明,由金属颗粒等异物引发的GIS故障占到GIS总故障的24%。

研究GIS中金属颗粒的运动特性并提出抑制方法对改善由金属颗粒运动引起的绝缘强度降低、保证GIS的运行可靠性具有重要意义。为此,明确金属颗粒的受力情况、建立运动方程并对其运动特性进行分析是上述研究的常用路线^[3-5]。如文[4-5]采

用上述路线,分别建立了直流、交流电压下金属颗粒的运动方程,较为全面系统地分析了直流、交流电压下金属颗粒的运动特性。

在研究金属颗粒运动特性时,法向恢复系数是一个非常重要的参数,其决定了金属颗粒与电极发生碰撞后的反弹速度及高度等^[6-9],由于金属颗粒在运动过程中可能多次与电极发生碰撞,因此法向恢复系数对金属颗粒的整个运动过程将会产生重要影响。

一般情况下,金属颗粒与电极的碰撞会发生塑性形变,存在能量损失,意味着发生碰撞后的法向恢复系数小于1,且取值与碰撞物理过程有紧密联系。然而,已有金属颗粒运动研究中法向恢复系数一般取固定值,(如文[4]中不锈钢球取0.47,但文[5]中不锈钢球取0.8),尚未从碰撞物理过程角度对法向恢复系数的取值进行分析探讨,亦未考虑金属颗粒直径、初始碰撞速度、金属颗粒与电极材质等因素对法向恢复系数的影响,这显然会对金属颗粒运动分析产生影响。

基于上述分析,文中根据碰撞力学原理,建立了球形金属颗粒与电极发生碰撞时的碰撞力学模型,对法向恢复系数进行了计算,通过法向恢复系数的测量试验验证了计算模型的准确性,在此基础上分析了金属颗粒直径、初始碰撞速度对法向恢复系数的影响,给出了多种碰撞材质下金属颗粒法向恢复系数与初始碰撞速度之间的的经验表达式,弥补了现有模拟GIS中金属颗粒运动时法向恢复系数设为定值这一不足,为后续更加便捷和精确分析金属颗粒的运动特性奠定基础。

1 碰撞过程分析

当金属颗粒与电极发生碰撞时,设金属颗粒与电极的弹性模量分别为 E_1 、 E_2 ,泊松比分别为 ν_1 、 ν_2 ,半径分别为 R_1 、 R_2 ,质量分别为 m_1 、 m_2 ,则在碰撞过程中的等效弹性模量 E' 、等效半径 R 、等效质量 m 可分别表示为^[10-12]:

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (1)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (3)$$

式(2)、(3)中,和金属颗粒相比,电极的直径可认为无穷大,也即 $R_2 \rightarrow \infty$ 、 $m_2 \rightarrow \infty$,因此有 $R=R_1$ 、 $m=m_1$ 。

由于金属颗粒和电极均属于脆性材料^[10],一般发生弹塑性形变,其碰撞过程可分为弹性压缩、弹塑性压缩、弹性恢复3个阶段^[10]。

1)弹性压缩阶段。碰撞初始,接触区域首先发生弹性形变,接触区域中心处的压力 P 最大,边缘处的压力 P 为0,接触区域中心处开始发生弹性变形并逐渐向外侧扩散,当接触应力 P 超过仅发生弹性形变的临界压力 P_c 时,弹性压缩阶段结束,此时,发生弹性压缩的相对位移 x 等于仅发生弹性形变的临界相对位移 x_c 。

在弹性压缩过程中,根据赫兹弹性接触理论有

$$P = k_1 x^{3/2} \quad (4)$$

式(4)中,系数 k_1 满足

$$k_1 = \frac{4}{3} E' \sqrt{R} \quad (5)$$

根据牛顿第二定律,金属颗粒的运动方程为

$$m\ddot{x} = mg - k_1 x^{3/2} \quad (6)$$

常微分方程(6)在 $t=0$ 时的初始条件为 $x(0)=0$, $\dot{x}(0)=v_0$ 。

基于冯米斯准则^[11],发生弹性压缩的临界相对位移 x_c 有

$$x_c = \left(\frac{\pi C S_y}{2 E'} \right)^2 R \quad (7)$$

式(7)中, C 为临界屈服强度系数

$$C = 1.295 e^{0.736 \sigma} \quad (8)$$

对于式(7)、(8)中泊松比和屈服强度的取值,一般选择碰撞过程中金属颗粒与电极首先发生弹塑性形变的材料^[12],也即

$$C S_y = \min[C(\nu_1) S_{y1}, C(\nu_2) S_{y2}] \quad (9)$$

将式(7)带入式(4)可得到临界接触压力 P_c 为

$$P_c = \frac{4}{3} \left(\frac{R}{E'} \right)^2 \left(\frac{\pi C S_y}{2} \right)^3 \quad (10)$$

2)弹塑性压缩阶段。随着碰撞过程的继续,金属颗粒的法向速度将逐渐减小为0,在接触中心区域首先出现塑性形变并逐渐外扩直至接近变形区域的边缘处,但在边缘处仍为弹性变形,见图1。

在弹塑性压缩阶段,根据JG弹塑性形变模型^[10-11],当相对位移 x 满足 $0 \leq x/x_c \leq 1.9$ 条件时,弹性压缩过程中的金属颗粒运动方程(6)仍然适用;而当 $x/x_c > 1.9$ 时,弹塑性形变过程中金属颗粒的运动方程为

$$m\ddot{x} = mg - P_{EP} \quad (11)$$

常微分方程(11)在 $t=t_1$ 时刻的初始条件为 $x(t_1) = 1.9x_c$, $\dot{x}(t_1) = v_1$, P_{EP} 为弹塑性形变过程中的接触压力

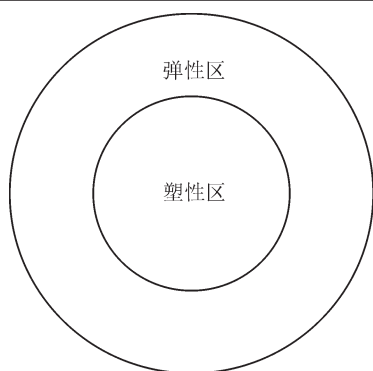


图1 弹塑性形变区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of elastic-plastic area

$$P_{EP} = P_c \left[e^{-\frac{1}{4} \left(\frac{x}{x_c} \right)^{5/12}} \left(\frac{x}{x_c} \right)^{3/2} + \frac{4P_c}{C} \left(\frac{H_G}{S_y} \right) \left[1 - e^{-\frac{1}{25} \left(\frac{x}{x_c} \right)^{5/9}} \right] \frac{x}{x_c} \right] \quad (12)$$

式(12)中, $\frac{H_G}{S_y} = 2.84 - 0.92[1 - \cos(\pi a/R)]$, a 为弹塑性碰撞区域的接触半径,可根据式(13)计算

$$a = \sqrt{R x \left(\frac{x}{1.9 x_c} \right)^B} \quad (13)$$

式(13)中, B 为接触区域材料特性系数,有

$$B = 0.14 e^{23\varepsilon_y} \quad (14)$$

式(14)中, ε_y 为屈服强度和等效弹性模量之比, $\varepsilon_y = S_y/E'$ 。

当金属颗粒的法向碰撞速度为0时,弹塑性压缩阶段结束,接触压力达到最大值 P_m ,假设该时刻为 $t=t_m$,则弹塑性压缩阶段结束后的相对位移、金属颗粒的运动速度分别为 $x(t_m) = x_m$ 、 $\dot{x}(t_m) = 0$ 。

3)恢复阶段。在恢复阶段,接触压力从最大值 P_m 逐渐减小到0,假设金属颗粒在恢复阶段为完全弹性形变,则在该过程中的接触压力变化满足赫兹接触理论,但值得注意的是,由于在弹塑性压缩阶段发生了塑性形变,该形变为永久性形变,接触区域的半径变为 R_r ,且由塑性形变引起的最大相对位移为 x_r ,Etsion给出了 x_r 、 R_r 的计算表达式^[13]为:

$$\frac{x_r}{x_m} = 1 - \frac{3P_m}{4E'a_m x_m} \quad (15)$$

$$R_r = \frac{4E'a_m^3}{3P_m} \quad (16)$$

恢复阶段金属颗粒的运动方程为

$$m\ddot{x} = mg - \left(\frac{4}{3} E' \sqrt{R_r} \right) (x - x_r)^{3/2} \quad (17)$$

常微分方程(17)的初始条件为 $x(t_m) = x_m$ 、 $\dot{x}(t_m) = 0$ 。

当相对位移 x 小于 x_r 时,恢复阶段结束,若此时

金属颗粒的速度为 v_r ,则整个碰撞过程中的法向恢复系数为

$$h_n = -v_r/v_0 \quad (18)$$

2 计算模型

2.1 计算流程图

文中在第1章分析了金属颗粒与电极碰撞发生弹塑性形变时的物理过程,并指出只有当弹性压缩阶段的接触压力的最大值超过临界压力时,才会进入弹塑性形变阶段,因此,在利用上述物理过程计算法向恢复系数时需首先判断是否能够进入弹塑性压缩阶段,如果不能进入,则整个碰撞过程仅发生弹性形变,忽略弹性形变过程中有弹性波、内摩擦损失的能量,颗粒的恢复系数为1^[14-15]。

Daivs等人在对弹性压缩过程分析后,首次提出存在一临界速度 v_c ^[16] 当初始碰撞速度 v_0 大于临界速度 v_c 时,发生弹塑性形变。

$$v_c = \left(\frac{\pi}{2E'} \right)^{1/2} \left(\frac{2}{5\rho} \right)^{1/2} S_y^{5/2} \quad (19)$$

式(19)中, ρ 为金属颗粒密度。

综合上述分析,金属颗粒在碰撞过程中的计算流程图见图2。

2.2 计算结果

根据2.1节的计算流程图,分别对铜球、不锈钢球与铜电极发生碰撞时的法向恢复系数进行计算,计算过程中不锈钢、铜的材料参数见表1,铜球和不锈钢球在不同直径(1、2、2.5 mm)、不同初始碰撞速度(1.7、2.1、2.5 m/s)时的计算结果见表2、3。

3 计算模型的实验验证

3.1 实验原理

假设金属颗粒 h 高度自由落下后,并与水平方向呈 45° 角的 H62 铜基板碰撞,由运动学公式得小球碰撞前的瞬时速度,即接近速度为

$$V_0 = \sqrt{2gh} \quad (20)$$

式(20)中, g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

将金属颗粒与铜基板碰撞后的分离速度分解为水平方向速度 V_x 和竖直方向速度 V_y ,其与 H62 铜基板碰撞反弹做抛物线轨迹运动后的水平位移为 S_1 ,竖直位移为 h_1 ,设下落时间为 t ,则

$$\begin{cases} S_1 = V_x t \\ h_1 = V_y t + \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (21)$$

式(21)中,下落时间 t 很难准确测量,未知量分别为 t 、 V_x 、 V_y ,不满足求解条件。为此,可通过改变下

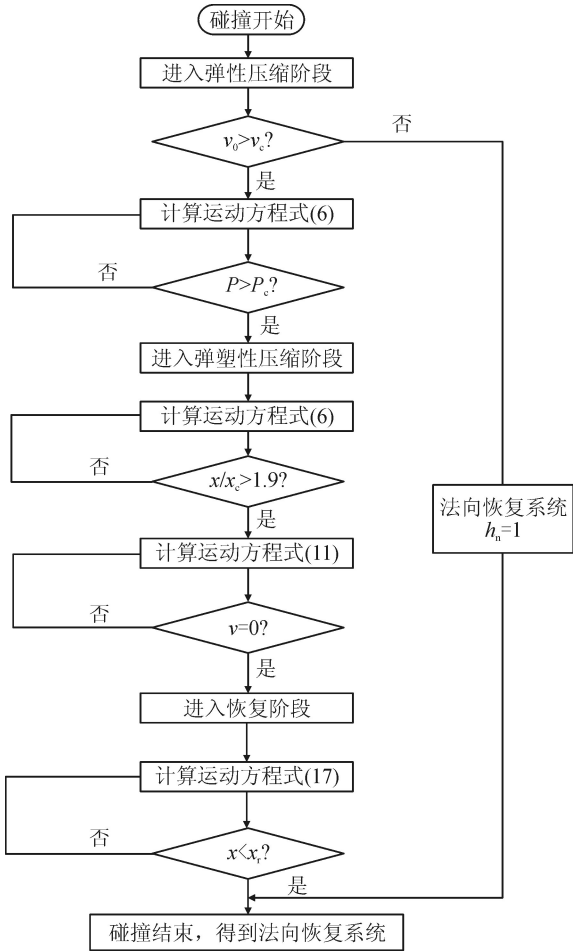


图2 法向恢复系数计算流程图

Fig. 2 Calculation flowchart of normal restitution coefficient

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	屈服强度/GPa	泊松比
H62 黄铜	8 300	110	0.310	0.343
不锈钢	7 800	200	0.512	0.290

表2 铜球法向恢复系数计算结果

Table 2 Calculation results of normal restitution coefficient of copper ball

速度/(m·s ⁻¹)	直径		
	1.0 mm	2.0 mm	2.5 mm
1.7	0.675	0.675	0.675
2.1	0.648	0.648	0.648
2.5	0.630	0.630	0.630

表3 不锈钢球法向恢复系数计算结果

Table 3 Calculation results of normal restitution coefficient about stainless steel ball

速度/(m·s ⁻¹)	直径		
	1.0 mm	2.0 mm	2.5 mm
1.7	0.633	0.633	0.633
2.1	0.608	0.608	0.608
2.5	0.589	0.589	0.589

落高度 h , 测量得到2组不同 h 下的金属颗粒运动水平位移 S_1 和 S_2 及竖直位移 h_1 和 h_2 , 代入运动学公式(21), 联立求解可得 V_x 和 V_y (求解时取水平向右和竖直向下为速度正方向), 如下:

$$\begin{cases} V_x = \sqrt{\frac{gS_1S_2(S_1-S_2)}{2(h_1S_2-h_2S_1)}} \\ V_y = \frac{h_1V_x}{S_1} - \frac{gS_1}{2V_x} \end{cases} \quad (22)$$

小球与铜板碰撞前后的示意图见图3, 将 V_x 和 V_y 分别分解到铜基板的法向 V_n 和切向 V_t , 则根据向量运算和恢复系数的定义, 法向恢复系数的计算表达式为

$$h_n = \frac{V_x - V_y}{V_0} \quad (23)$$

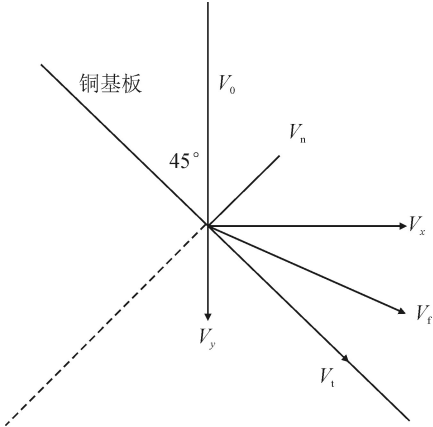


图3 碰撞示意图

Fig. 3 Schematic of collision

3.2 实验平台

基于3.1节实验原理, 参考文[17]中恢复系数的测量方法, 搭建了如图4所示的法向恢复系数测量平台, 主要由投料基准面、支架、H62铜基板、坐标纸、保鲜膜、黄油组成。其中, 投料基准面的材质为环氧树脂, 中部有一个2~3 mm的孔洞作为金属颗粒的投料孔; 支架的高度在20~40 cm之内可调用以调整金属颗粒的初始碰撞速度; 坐标纸记录金属颗粒碰撞后的水平位移; 为了保证金属小球在实验坐标纸上不发生滑动及实验坐标纸的可重复利用, 首先将一层保鲜膜罩在坐标纸上面, 然后在保鲜膜上涂黄油来收集金属颗粒; 实验时, 用镊子夹持金属颗粒控制其下落。

3.3 实验结果及与计算结果对比

基于上述计算模型, 选择直径为1、2、2.5 mm的铜球、不锈钢球与铜基板发生碰撞, 并根据式(21)–(23)进行法向恢复系数的计算, 并与计算结果进行对比。

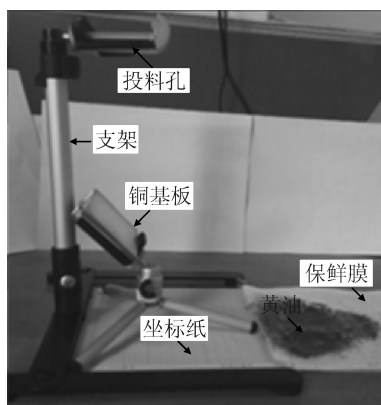
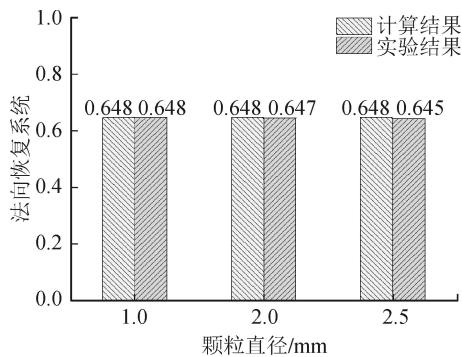


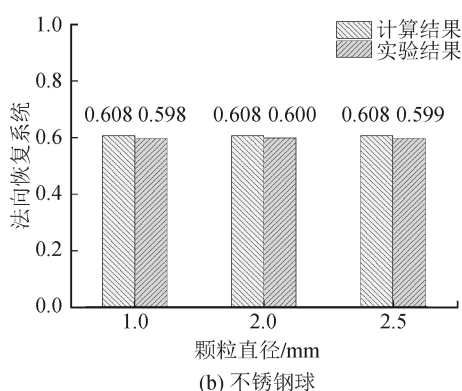
图4 法向恢复系数测量平台

Fig. 4 Measurement platform of normal restitution coefficient

当金属颗粒的初始下落速度相同为2.1 m/s时,实验测量结果与理论计算结果的对比图见图5,由图5可知,无论铜球和不锈钢球,在1、2、2.5 mm 3种直径下,法向恢复系数数值基本相同,且实验结果和计算结果基本相同,初步验证了文中计算模型的准确性。



(a) 铜球



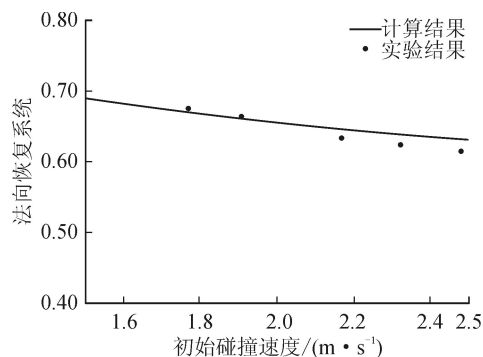
(b) 不锈钢球

图5 不同直径下实验结果与计算结果对比

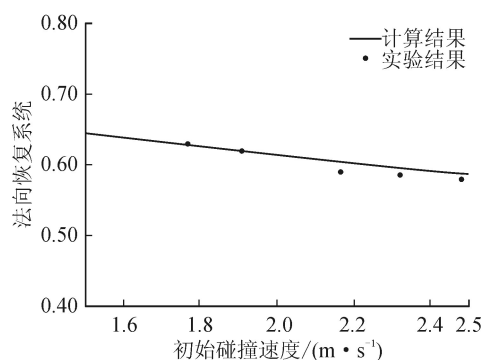
Fig. 5 Comparison between experimental and calculation results under different diameters

在上述实验结果基础上,选择直径为2 mm的金属颗粒,测量在不同的初始碰撞速度下法向恢复系数,并与理论计算结果对比见图6,由图6可知,无论铜球和不锈钢球,实验结果和计算结果基本相同,均表

现为随着碰撞初始速度的增加,法向恢复系数逐渐减小的规律,更进一步验证了文中计算模型的准确性。



(a) 铜球



(b) 不锈钢球

图6 不同初始碰撞速度下实验结果与计算结果对比

Fig. 6 Comparison between experimental and calculation results under different initial velocities

4 分析与讨论

4.1 颗粒直径对法向恢复系数的影响

从理论上讲,3个过程中的颗粒运动均与颗粒的质量有关,而颗粒质量与颗粒直径密切相关,因此法向恢复系数的值应与颗粒直径有关,文[18]指出颗粒法向恢复系数的值与颗粒半径存在如下关系式

$$1 - h_n \propto R^{-1/2} \quad (24)$$

但由节3.3可知,对于文中结果,颗粒直径对法向恢复系数的影响有限,其他文献中的试验结果亦表明相似结论^[19-20],因此,可认为在球形金属颗粒与电极碰撞的工程计算中,能够忽略金属颗粒直径对法向恢复系数的影响。

4.2 初始碰撞速度对法向恢复系数的影响

由节3.3可知,初始碰撞速度对法向恢复系数有较为明显的影响,具体表现为随着初始碰撞速度的增加,法向恢复系数逐渐减少。

结合碰撞过程中的能量损耗对此进行分析解释:在碰撞过程中,忽略弹性压缩过程中由于弹性

波、内摩擦引发的损耗,则在整个运动过程中的能量损耗由塑性形变引起。Reed曾推导出塑性形变导致的能量损耗的表达式^[21]

$$Q_p = \left[\frac{(2mv_0^2 - \frac{1}{8}mv_c^2)^{1/2} - (\frac{15}{8}mv_c^2)^{1/2}}{2} \right]^2 \quad (25)$$

则塑性形变能量损耗占整个系统能量的比值为

$$e = \frac{Q_p}{mv_0^2/2} \quad (26)$$

以不锈钢球与铜板碰撞为例,可计算获得 e 与初始碰撞速度 v_0 的变化规律见图7。由图7可知,随着 v_0 的增大, e 也增大。表明,随时初始碰撞速度的增大,碰撞过程中塑性形变引起的能量损耗占比增大,也即较少比例的能量转化为恢复阶段的初始动能,从而导致金属颗粒的法向恢复系数减少。

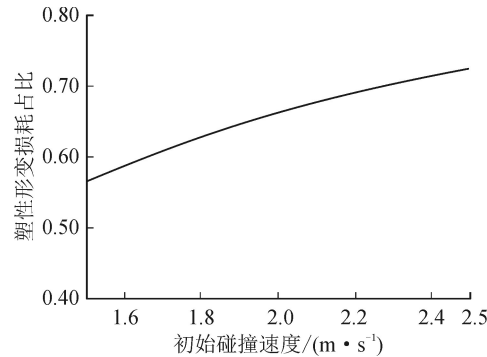


图7 不锈钢球与铜板碰撞塑性形变损耗占比

Fig. 7 Loss ratio of plastic deformation between stainless steel ball impact with copper flat

4.3 法向恢复系数经验公式

文中分别计算了不锈钢球、铜球与铜的恢复系数,并通过实验验证了计算结果的准确,但对于实际GIS,其电极材料主要有铝或者不锈钢^[22-23],科研人员在研究GIS金属颗粒运动时采用的材料有不锈钢、铜、铝等^[4-5],因此有必要计算不锈钢球、铜球、铝球分别于铜电极、不锈钢电极、铝电极发生碰撞时的法向恢复系数。计算用铝的材料参数见表4。

表4 铝材料参数

Table 4 Material parameters of aluminum

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	屈服强度/GPa	泊松比
铝	2 700	68	0.38	0.33

此外,对于工程问题,如果金属颗粒每次与电极碰撞时的法向恢复系数都通过理论计算获得,将会大大增加工作量和复杂程度。为此,参考工程中常用到的经验公式法,利用文中提出的计算方法获得不同碰撞情况下的法向恢复系数值,结合文[16]

给出的法向恢复系数与初始碰撞速度呈负指数幂关系的结论,通过最小二乘法拟合出了适用于工程计算的金属颗粒恢复系数的经验公式,见图8-10。

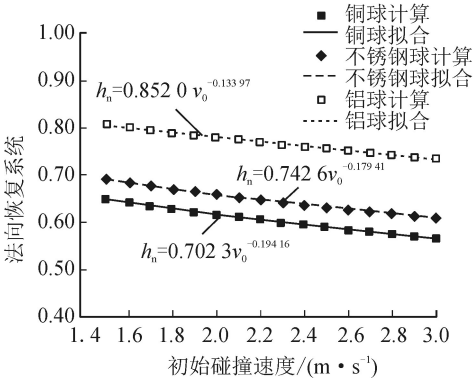


图8 与铜电极碰撞

Fig. 8 Impact with copper electrode

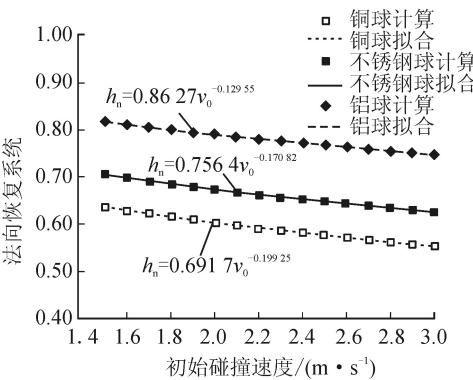


图9 与不锈钢电极碰撞

Fig. 9 Impact with stainless steel electrode

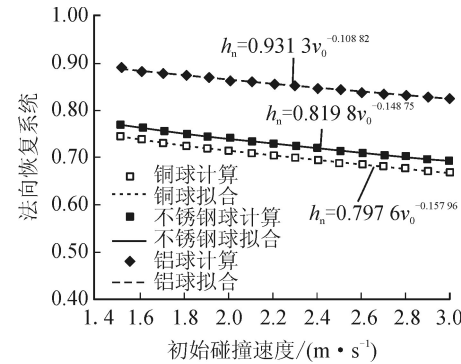


图10 与铝电极碰撞

Fig. 10 Impact with aluminum electrode

5 结论

1)基于碰撞物理过程,提出了球形金属颗粒与电极碰撞时法向恢复系数的计算方法,实验验证了该方法的准确性;

2)探究分析了金属颗粒直径、初始碰撞速度与法向恢复系数之间的关系,指出法向恢复系数与金

属颗粒的直径无明显关系,随着初始碰撞速度的增大,法向恢复系数减小;

3)提出了铜球、不锈钢球、铝球分别与铜电极、不锈钢电极、铝电极碰撞时法向恢复系数与初始碰撞速度有关的经验公式。

参考文献:

- [1] 律方成,金 虎,王子建,等. 基于组合核多特征融合的GIS局部放电检测与识别[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10):334-340.
LYU Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. GIS partial discharge detection and recognition based on the kernel combination and multiple feature fusion method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 334-340.
- [2] 范建斌,李 鹏,李金忠,等. 特高压直流 GIL 关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 1-7.
FAN Jianbin, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Study on key technology of ± 800 kV UHVDC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 1-7.
- [3] ASANO K, YATSUZUKA K, HIGASHIYAMA Y. The motion of charged metal particles within parallel and tilted electrodes[J]. Journal of Electrostatics, 1993(30):65-74.
- [4] 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.
- [5] 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3):404-417.
- [6] METWALLY I 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.
- [7] MORCOS M M, ZHANG S, GUBANSKI S M, et al. Performance of particle contaminated GIS with dielectric coated electrodes[C]//Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. [S.l.]:IEEE, 2000: 725-731.
- [8] MORCOS M M, ZHANG S, SRIVASTAVA K D, et al. Dynamics of metallic particle contaminants in GIS with dielectric-coated electrodes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2):455-460.
- [9] PRAKASH K S, SRIVASTAVA K D, MORCOS M M. Movement of particles in compressed SF₆ GIS with dielectric coated enclosure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(3):344-347.
- [10] JACKSON R L, GREEN I, MARGHITU D B. Predicting the coefficient of restitution of impacting elastic-perfectly plastic spheres[J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 60(3): 217-229.
- [11] JACKSON R L, GREEN I. A finite element study of elasto-plastic hemispherical contact against a rigid flat[J]. Journal of Tribology-Transactions of the ASME, 2005, 127(2):343-354.
- [12] GREEN I. Poisson ratio effects and critical valus in spherical and cylindrical hertzian contacts[J]. Applied Mechanics and Engineering, 2005, 10(3):451-462.
- [13] ETSION I, KLIGERMAN Y, KADIN Y. Unloading of an elastic - plastic loaded spherical contact[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(13):3716-3729.
- [14] REED J. Energy losses due to elastic wave propagation during an elastic impact[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1985, 18(12):2329-2337.
- [15] DAHNEKE B. The capture of aerosol particles by surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1971, 37(2): 342-353.
- [16] THORNTON C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres[J]. Journal of Applied Mechanics, 1997, 64(2):383-386.
- [17] 黄小毛,查显涛,潘海兵,等. 油菜籽粒点面接触碰撞中恢复系数的测定及分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 22-29.
HUANG Xiaomao, ZHA Xiantao, PAN Haibing, et al. Measurement and analysis of rapeseeds' restitution coefficient in point - to - plate collision model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 22-29.
- [18] LABOUS L, ROSATO A D, DAVE R N. Measurements of collisional properties of spheres using high - speed video analysis[J]. Physical Review E, 1997, 56(5):5717-5725.
- [19] LECONTE M, GARRABOS Y, PALENCIA F, et al. Inelastic ball-plane impact: An accurate way to measure the normal restitution coefficient[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(24):243518.
- [20] KHARAZ A H, GORHAM D A. A study of the restitution coefficient in elastic-plastic impact[J]. Philosophical Magazine Letters, 2000, 80(8):549-559.
- [21] ROGERS L N, REED J. The adhesion of particles undergoing an elastic-plastic impact with a surface[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1984, 17(4):677-689.
- [22] SRIVASTAVA K D, MORCOS M M. A review of some critical aspects of insulation design of GIS/GIL systems[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. [S.l.]:IEEE, 2001:787-792.
- [23] MCDONALD, JOHN D. Electric power substations engineering[M]. U.S.A.:CRC Press, 2012:2-4.

葛廷利(1979—),男,讲师,主要研究方向为GIS盆式绝缘子绝缘问题和闪络机理。