

沙尘微粒在硅橡胶绝缘材料表面的沉降模型

贺博¹, 陈邦发¹, 高乃奎¹, 张刚¹, 金海云¹, 庄文兵², 李耀中², 彭宗仁¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 新疆电力科学研究所, 830011, 乌鲁木齐)

摘要: 为研究电力设备表面积污分布规律, 提出一种沙尘颗粒在硅橡胶绝缘材料表面的沉降模型. 根据风速、颗粒粒径、密度、入射速度及壁面弹性系数和摩擦系数等实际因素, 建立了沙尘颗粒-硅橡胶材料表面的碰撞方程以及沙尘颗粒沉降的判别条件, 并对该沉降模型进行数值求解. 分析实验结果表明, 湍流中心积污多于湍流边缘, 背风面积污较迎风面均匀, 这些和沙尘暴模拟实验所测结果相同. 该模型能够为人工无法完成的测量复杂外形的表面积污提供指导, 对电力设备防污闪的深入研究具有积极意义.

关键词: 碰撞; 模型; 湍流; 积污

中图分类号: TM852 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)12-0086-05

A Model for Sand/Dust Deposition on the Surface of Silicon Rubber

HE Bo¹, CHEN Bangfa¹, GAO Naikui¹, ZHANG Gang¹, JIN Haiyun¹

ZHUANG Wenbing², LI Yaozhong², PENG Zongren¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xinjiang Electric Power Scientific Research Institute, Urumchi 830011, China)

Abstract: A model of particle deposition on the surface of silicon rubber is proposed to study the surface contamination distribution of power devices. Particle-wall collision equations and a particle deposition criterion on the surface of silicone rubber material in flow field are given based on some practical factors such as wind speed, particle size, density, incidence velocity, wall-elasticity and friction coefficients, etc. Results show that the contamination in turbulent center is larger than the contamination in turbulent edge, and that the distribution on the lee side is more uniform than the distribution on the windward side. The results are similar to the artificial sandstorm experiments. The model may play an important role in measuring the contamination on complex shape surfaces that the artificial simulation is unable to complete, and in the study of anti-pollution flashover.

Keywords: collision; model; turbulent; deposition

表面积污对电力设备的可靠性具有重大影响, 是电力设备外绝缘的关键问题. 灰尘和无机盐在绝缘结构表面的沉降将导致电场发生畸变, 降低设备的绝缘强度, 严重时会引起放电事故. 因此, 研究灰尘颗粒在绝缘设备上的沉降规律, 有效节约工作人员的清洁维护成本, 提高工作效率, 是一项具有实际意义的工作.

一些学者对表面颗粒黏附过程进行了相关研究: 对于低流速气流下(小于 0.5 m/s)微米粒径颗粒在风管内壁的沉降过程, 颗粒在惯性和剪切力的作用下向管壁运动, 并和管壁发生碰撞, 此时采用软球模型, 并考虑颗粒的旋转作用^[1]; 在颗粒更加细小的情况下(胶体), 则需要增加考虑布朗运动^[2]; 在考虑设备表面已沉降颗粒对颗粒沉降的影响时, 选用

硬质球模型,假设沉降过程为“冰冻”过程,即在不考虑颗粒-壁面相互作用以及磨蚀和拽曳移动的情况下,对颗粒的沉降过程进行研究^[3].

在风沙气流流经电力设备绝缘件时,颗粒通常要和绝缘件表面发生碰撞,固体颗粒可以看作是刚性的,但绝缘件表面常由硅橡胶等有机材料构成,材质较软,属非刚性表面,因此上述理论并不能完全适用此种情况.本文针对这一特殊问题建立了一种颗粒沉降模型,为电力设备抗风沙、防污闪提供了设计参考.

1 模型介绍

1.1 受力分析

本文选用硬质圆球来近似风沙流体中的固体颗粒,用软质平面来近似设备表面.将颗粒与材料表面的碰撞过程分为2个阶段:将颗粒以某一速度和壁面接触直到法向速度减小为0这一阶段视为颗粒入射过程(过程Ⅰ),粒子由 O_1 运动到 O_2 ;将颗粒由法向速度为0到脱离壁面束缚这一阶段视为出射过程(过程Ⅱ),粒子由 O_2 运动到 O_3 .

在过程Ⅰ中,随着颗粒法向速度的减小,壁面在颗粒惯性冲击作用下不断被压缩,颗粒受到的法向作用力有:弹力 f_e ,重力法向分量 f_{gN} ,拽曳力法向分量 f_{dN} ,范德华力 f_w .颗粒受到的切向作用力有:摩擦力 f_f ,拽曳力切向分量 f_{dT} ,重力切向分量 f_{gT} .

在过程Ⅱ中,颗粒切向受力维持不变,法向受力增加了液桥黏结力 f_b .液桥黏结力主要来自固体颗粒表面所吸附的一层水膜,其大小和材质表面的浸润状况密切相关.

颗粒与材料表面碰撞的示意图和受力分析如图1所示,法向为垂直于材料面,切向为沿着材料表面的切面方向. V_f 和 V_p 代表流体和粒子的速度, V_{fN} 和 V_{pN} 分别为流体和粒子的法向速度分量, V_{fT} 和 V_{pT} 分别为流体和粒子的切向速度分量.

1.2 力的大小分析

球-板间的范德华作用力与粒子半径及 Hamaker 常数相关,可根据相关公式进行计算^[4].

流体对颗粒的拽曳力为^[5]

$$f_d = mF_d(v_f - v_p) \quad (1)$$

式中: v_f 、 v_p 分别为流体速度和粒子速度; m 为粒子质量; F_d 为拖拽力系数^[5]

$$F_d = \frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p d_p^2} \quad (2)$$

其中 μ 为流体动力黏度, Re 为相对雷诺数或颗粒雷

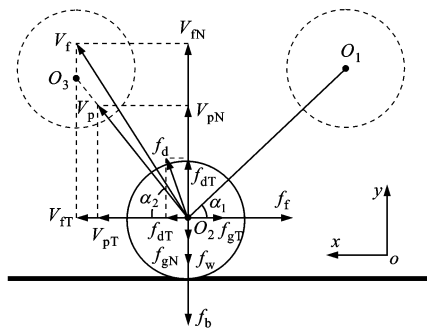


图1 模型及受力分析

诺数, ρ_p 为粒子密度, d_p 为粒子直径, C_d 为拽曳力系数^[5]

$$C_d = \frac{24}{Re}(1 + b_1 Re^{b_2}) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re} \quad (3)$$

其中系数 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为与颗粒形状系数相关的量,并可由经验公式获得^[5].

颗粒-平板间的液桥黏结力为^[6]

$$f_b = 4\pi\sigma\gamma_p \cos\theta \quad (4)$$

式中: σ 为液体的表面张力系数; θ 为液体在粒子表面的接触角; γ_p 为粒子半径.

颗粒所受重力为

$$f_g = m_p g = \frac{4\pi}{3} r_p^3 \rho_p g \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度.

在过程Ⅰ中,颗粒的法向速度不断减小,壁面在法向不断被压缩,壁面形变产生的弹力 f_e 相对其他力要大得多,液桥黏结力对粒子运动没有影响,所以该过程只考虑弹力 f_e ,忽略其他受力.

在过程Ⅱ中,壁面形变在恢复过程中向颗粒施加了弹力 f_e ,并使颗粒沿法向被加速,在颗粒和壁面分离瞬间,弹力 f_e 减小为0,此时颗粒受到 f_{gN} 、 f_{dN} 、 f_w 、 f_b 的综合作用. f_e 的大小将在后面讨论. f_w 和 f_b 的作用距离范围分别为10~100 nm和10 nm~2 μm ^[7],由于 f_w 的作用距离很短,远小于粒子直径,因此在碰撞过程中将 f_w 忽略不计.

1.3 碰撞过程

按照1.2节的分析,在颗粒和壁面碰撞的过程中,凡涉及到壁面形变,弹性力即对颗粒的运动起主导作用,其余各力的作用小到可以忽略.

(1) 法向运动模型 可将壁面视为半径趋于无穷大的球体,设 s 为壁面形变, r_a 为重叠部分的圆面半径, O_1 、 O_2 为粒子质心, d_1 、 d_2 为粒子半径,粒子运动模型如图2所示.

碰撞产生的弹力 f 、平均粒径 d_a 和由材料弹性

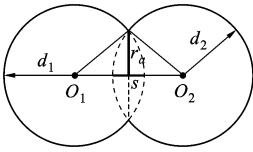


图 2 碰撞过程模型

模量 E_i 和泊松比 ν_i 决定的参量 k 分别为^[8]

$$f = \frac{8r_a^3}{3kd_a} \approx f_c \tag{6}$$

$$d_a = \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \tag{7}$$

$$k = k_1 + k_2 \tag{8}$$

$$k_i = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad i = 1, 2 \tag{9}$$

由于 $d_2 \rightarrow \infty$, 且 $d_1 = d_p$, 所以 $d_a = d_p$.

s 的法向分量 s_y 可表示为

$$d_1 + d_2 - ((d_1^2 - r_a^2)^{1/2} - (d_2^2 - r_a^2)^{1/2}) = s_y \tag{10}$$

考虑到 $d_2 \rightarrow \infty$, 所以式(10)可改写为

$$d_1 - s_y = (d_1^2 - r_a^2)^{1/2} \tag{11}$$

由上述公式可推出粒子法向运动方程和其边界条件为

$$s_y^2 - 2d_p s_y + \left(\frac{3}{8} d_p k \left(m_p \frac{d^2 s_y}{dt^2} \right)^{2/3} \right) = 0 \tag{12}$$

$$s_y \Big|_{t=0} = 0 \tag{13}$$

$$\frac{ds_y}{dt} \Big|_{t=0} = v_y \tag{14}$$

(2)切向运动模型 切向受力为

$$f_t = \zeta f_z \tag{15}$$

式中: ζ 为摩擦系数; f_z 为法向综合力.

切向运动方程和相应的边界条件为

$$f_{dT} - f_t = m_p \frac{d^2 s_x}{dt^2} \tag{16}$$

$$s_x \Big|_{t=0} = 0 \tag{17}$$

$$\frac{ds_x}{dt} \Big|_{t=0} = v_x \tag{18}$$

1.4 沉降条件

假定颗粒-壁面碰撞过程法向恢复系数为 Φ_1 , 根据上述受力和运动方程, 对于入射速率为 V_i 、入射角为 α_1 的入射粒子, 可以求出经过非弹性碰撞过程后的出射速率 V_o 和出射角 α_2 .

颗粒沉降的条件建立在颗粒出射的状态判断上. 本文认为只有法向不能克服液桥黏结力的束缚

作用, 切向不能被拽曳移动, 颗粒才能沉积. 沉降条件可表示为

$$\frac{1}{2} m_p V_o^2 \sin^2 \alpha_2 \leq f_b l_b - \int_{l_1}^{l_2} f_{dN} dl \tag{19}$$

$$f_{dT} \leq f_t \tag{20}$$

式中: l_b 为液桥黏结力作用距离; l_1 、 l_2 为液桥黏结力作用范围. 由于 l_b 非常小, 在液桥黏结力作用的很小范围内, 颗粒速度和流场风速的变化也都很小, 所以 f_{dN} 几乎维持不变, 故式(19)可表示为

$$\frac{1}{2} m_p V_o^2 \sin^2 \alpha_2 \leq (f_b - f_{dN}) l_b \tag{21}$$

2 表面沉降仿真及验证

2.1 模型数值分析

本文首先对上述模型进行了数值求解, 重点分析了颗粒和表面碰撞过程中壁面弹力对颗粒运动状态的影响, 计算过程中的参数选取如表 1 所示.

表 1 计算参数

序号	名称	符号	取值	单位
1	摩擦系数	ζ	0.5	1
2	恢复系数	Φ_1	0.6	1
4	液桥力作用距离下限	l_1	10	nm
5	液桥力作用距离上限	l_2	2	μm
6	粒子密度	ρ_p	2600	kg/m^3
7	流体动力黏度	μ	17.9×10^{-6}	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
8	颗粒弹性模量	E_1	80	GPa
9	壁面弹性模量	E_2	0.01	GPa
10	颗粒泊松比	ν_1	0.17	1
11	壁面泊松比	ν_2	0.48	1
12	表面张力系数	σ	0.0742	N/m
13	Hamaker 常数	A	7×10^{-20}	J

选取 $d_p = 10 \mu\text{m}$, 液滴接触角 $\theta = 80^\circ$ (如无声明, 其余条件见表 1, 下同), 入射速率对出射速率的影响如图 3 所示. 由图 3 可知, 入射速率越大, 壁面沉积越难发生, 但相应的出射速率也越大.

为了考察粒径对颗粒-壁面碰撞过程的影响, 选取 $V_i = 10 \text{ m/s}$ 、 $\theta = 80^\circ$ 进行了出射速度的计算, 结果见图 4. 由图 4 可知: 粒径越大, 沉降越困难, 反之越容易沉降; 粒径大的颗粒具有更大的出射速率.

2.2 仿真结果

将上述模型以编程方式内嵌到商用流体计算软

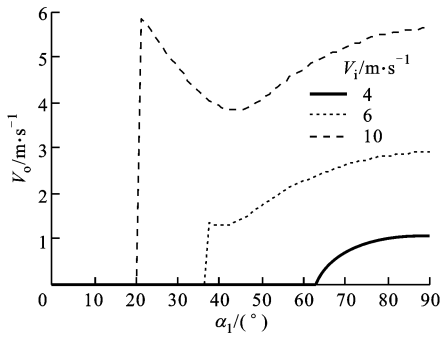


图3 粒子入射速率对出射速率的影响

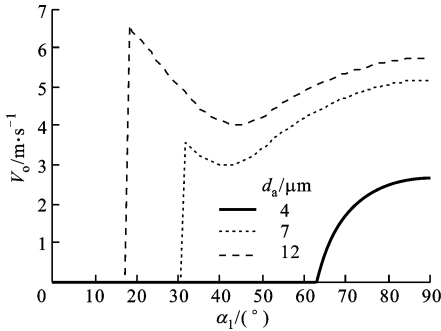


图4 粒径对出射速率的影响

件 Fluent 中,运用 DPM 非稳定模型进行两相流场的求解,其中采用 $\kappa-\epsilon$ 模型处理湍流流场.采用本文模型计算碰撞后的状态:如果颗粒满足表面沉降的条件,则颗粒轨道的计算终止,并计算和储存沉降率;否则,计算该颗粒的出射速度并输出给 DPM 模型,完成该颗粒后继轨道的求解.

本文以流场中的平板模型为例进行了仿真计算,硅橡胶平板长 0.8 m,与水平方向的夹角为 45° ,气固两相流从水平方向流入,初始流速为 10 m/s,左侧为流体入口,右侧为出口.仿真结果如图 5 所示,可见壁面迎风侧下部和背风侧上部存在明显的湍流,湍流中心的速率低于边缘处,背风面速率上的总体要低于迎风面上的.

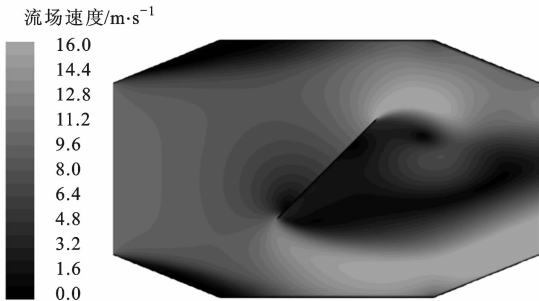


图5 流场速度场

图 6、图 7 分别为迎风面和背风面上颗粒的平均沉降速率,其横坐标起始于板的下表面的端点.可以明显看出,在湍流的中心处,颗粒的沉降率较大,而边沿处颗粒沉降率较小,迎风面的颗粒沉降率要低于背风面,且背风面上沉积较为均匀.

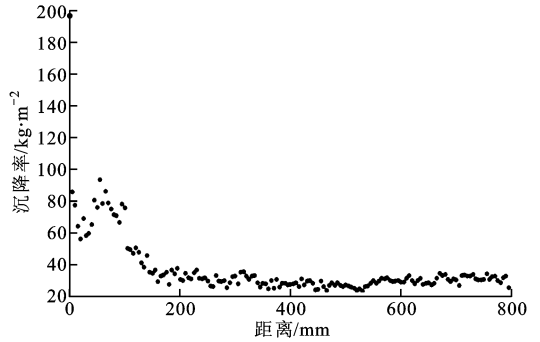


图6 迎风面上的颗粒平均沉降率

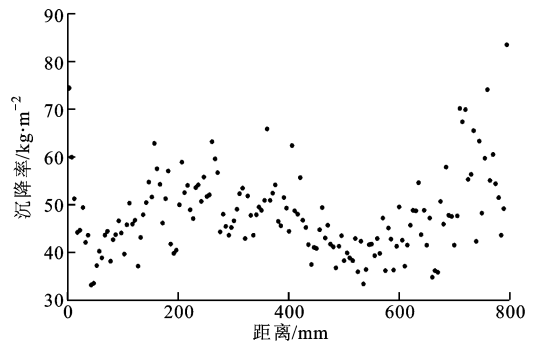


图7 背风面上的颗粒平均沉降率

3 实验验证

本文利用西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室的沙尘暴模拟实验平台进行了模拟实验,实验平台采用风机在密闭风道内产生循环风沙混合流体,实验仓入口气流流速在 $0\sim 25$ m/s 速度范围内精确可控.将 800 mm 长、10 mm 厚的硅橡胶材质平面后倾 45° 固定,进风面平均风速为 10 m/s,颗粒选用砂土细粒,最大粒径控制为 $12\text{ }\mu\text{m}$.

由于表面积污的测量需要历经清洗、过滤、烘干、称量等过程,且只能对一定面积、一定范围内的积污量进行测量,无法准确测量出积污量在空间的分布,实验中只可以看出表面沉降量分布趋势和图 6、图 7 基本一致,但无法定量体现.

4 模型的讨论

4.1 忽略颗粒旋转和滚翻的根据

本文的模型忽略了颗粒的旋转运动状态,原因

在于流场中的旋转颗粒会受到 Magnus 力和 Saffman 力作用,层片状颗粒的旋转受力要明显大于球形颗粒.图 8 为表面沉降粒子的 1 000 倍放大图片,可明显看出表面粒子的几何形状基本以近似球状颗粒为主且粒径较大(约 10 μm 左右),具有较大的质量和惯性,故而旋转受力对运动影响较小.

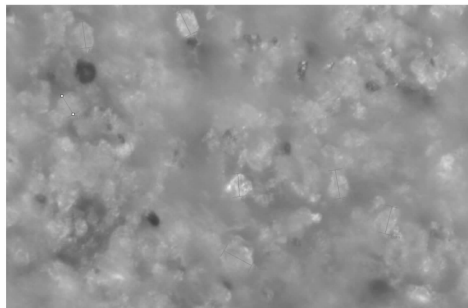


图 8 表面颗粒沉降微观照片 $\times 1\,000$

4.2 关于表面存在水膜的根据

沙尘颗粒表面存在水膜这一论断已多次获得认同,如 Greeley 等认为吸附于颗粒表面的水分因为碰撞升温而被电离是导致沙尘颗粒产生空间电场的原因^[9];中科院寒旱所屈建军研究团队在沙尘暴起电的研究中,认为空气中的沙尘颗粒容易充当水气的凝结核,表面水膜随着空气湿度的增加而迅速增加^[10].

沙尘暴模拟实验结果表明:相同实验条件下,经人工干燥处理后的沙尘很难在试样表面产生沉降,所沉降的少量沙尘连接疏松,和实际现场表面沉积物的形态结构完全不同,此外积尘量和直观沉降物形态受湿度的影响非常明显.

式(13)所示的液桥黏结力公式适用于表面亲水性的情况,然而在沙尘环境下,硅橡胶材料表面会首先沉积一层非常细小的颗粒,这层颗粒会导致硅橡胶表面由憎水性变为亲水性,由于憎水性迁移相对较慢,此后的沉降过程中,表面表现为短期的亲水性,所以式(13)在本文条件中是成立的.

4.3 后续工作

本模型的研究中忽略了颗粒彼此间的碰撞作用,并假设颗粒的沉降条件是固定的,这 and 实际沉降条件存在差异.由于已沉降颗粒会对后续沉降产生影响,且本文没有考虑电场力的作用,故模型在这些面需要进一步改进.

5 结 论

本文以实际工程应用为研究背景,建立了沙尘

微粒在硅橡胶绝缘材料表面的沉降模型,并对模型进行了仿真计算和实验验证.结果表明,在湍流的中心处,颗粒的沉降率较大,而边沿处颗粒沉降率较小,迎风面的颗粒沉降率要低于背风面,且背风面沉积较为均匀.本文模型涵盖了丰富的物理属性,理论模型和实际物理模型接近,仿真和实验结果趋势吻合,能够对硅橡胶材料在不同风速下的积污提供预测,对复杂外形的表面积污提供参考.本文的研究结果对电力设备防污闪具有指导意义.

参考文献:

- [1] MARSHALL J S. Particle aggregation and capture by walls in a particulate aerosol channel flow [J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(3): 333-351.
 - [2] FRANK M, ANDERSON D, WEEKS ER, et al. Particle migration in pressure-driven flow of a Brownian suspension [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 493(10): 363-378.
 - [3] WALSH P M, SAYRE A N, LOEHDEN D O, et al. Deposition of bituminous coal ash on an isolated heat exchanger tube: effects of coal properties on deposit growth [J]. Progress Energy and Combustion Science, 1990, 16(4): 327-346.
 - [4] 任俊, 沈健, 卢寿慈. 颗粒分散科学与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 66-68, 70-72.
 - [5] 谢振华. 工程流体力学 [M]. 3 版. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 156-160.
 - [6] DEBISSCHOP F R E, RIGOLE W J L. A physical model for liquid capillary bridges between adsorptive solid spheres: the NODOID of plateau [J]. Journal of Colloid Interface Science, 1982, 88(1): 117-128.
 - [7] RUMPF H. Particles technology [M]. London, UK: Chapman and Hall, 1990: 116-120.
 - [8] TIMOSHENKO S. Theory of elasticity [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1934.
 - [9] GREELEY R, IVERSEN J D. Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1985.
 - [10] 屈建军, 言穆弘, 董光荣, 等. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究 [J]. 中国科学, D 辑: 地球科学, 2003, 33(6): 593-601.
- QU Jianjun, YAN Muhong, DONG Guangrong, et al. Summary on wind tunnel experiment study of sand storm electrification [J]. Science in China, Series D: Earth Sciences, 2003, 33(6): 593-601.

(编辑 刘杨 杜秀杰)