

沙粒的松弛过程

许卫疆, 车得福, 徐通模

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了深入了解非稳态下沙粒的运动规律, 对风洞中沙粒的加速运动过程进行了跟踪拍照, 通过改变沙粒的粒径以及风速, 系统地研究了沙粒的松弛过程. 实验结果表明: 在沙粒松弛初始阶段, 沙粒的实际运动速度与球形粒子的理论计算值存在较大差异; Basset 力对松弛过程无显著影响. 将衡量沙粒跟随流体运动能力的斯托克斯数 St 引入到沙粒运动中, 使其成为判断沙粒运动形式的一个判断标准.

关键词: 松弛过程; 风洞; 拖曳力; 斯托克斯数

中图分类号: O373 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)05-0536-04

Relaxation Process of Sand Particles

Xu Weijiang, Che Defu, Xu Tongmo

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The relaxation process is experimentally investigated by a high-speed camera in a wind tunnel to reveal the particles motion under unsteady conditions. The results show an obviously different velocity feature of sand particles from spherical ones at initial stage of particle-accelerated movement due to the quite distinguishable shapes, and that the Basset force has no evident influence on the relaxation process. Stokes number is introduced in this investigation to evaluate the motion types of sand particles.

Keywords: *relaxation process; wind tunnel; drag force; Stokes number*

当静止的沙粒被释放到运动的气流中时, 由于颗粒相和流体相之间存在较大的密度差, 气固两相具有不同的速度, 两者发生相互作用, 其速度有相互接近的趋势, 这一过程通常称作松弛过程. 沙粒的松弛过程是其跟随过程的非稳态阶段, 由于沙粒的瞬时速度不易通过测量得到, 因此对其松弛过程的研究很少.

目前, 有关沙粒跟随性的研究中涉及松弛过程的很少, 主要集中在理论解及数值分析上^[1,2], 而这些结果是在对模型作了大量的简化基础上得到的. 文献^[3]对 Basset-Boussinesq-Oseen (BBO) 方程进行了修正和改进, 推导出了颗粒跟随性的计算公式. 有些研究人员将注意力集中在间接测量的结果上, 例如通过能谱分析得到颗粒的跟随性能^[3,4].

本研究从实验的角度出发, 采用高速摄影仪记

录不同时刻不同粒径粒子的位置, 通过胶片分析仪分析得到不同粒径粒子的瞬时速度, 为进一步研究颗粒的松弛过程提供可靠的基础数据.

1 实验系统

为简化研究对象, 搭建了风洞实验台. 在风洞中撒播不同粒径的沙粒, 沙粒受到风力的作用开始加速运动. 在沙粒运动的路径上选择不同的位置进行摄影, 通过高速摄影仪 (E-10 旋转棱镜式高速摄影仪) 记录不同位置沙粒的运动特征. 实验系统见图 1.

通过高速摄像技术, 采用跟踪每一个沙粒运动规律的方法, 来求得流场中运动颗粒的位置、位移、速度和轨迹, 而且不受流场中颗粒密度分布的影响, 适合于测量较低颗粒密度的流场颗粒运动. 通过摄

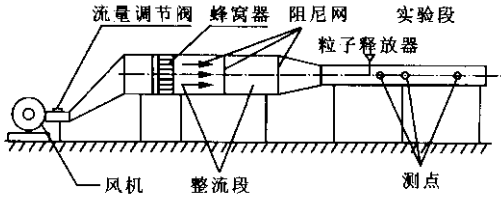


图1 风洞实验系统图

像系统在一定的时间间隔下拍摄并获得沙粒运动的系列图像,可根据同一沙粒在相邻两帧图像中的位置、位移和时间间隔算出颗粒的运动参数。

2 结果分析

2.1 理论分析

对于在风洞中运动的颗粒,可以近似地认为是一维运动,热泳力、虚假质量力、压力梯度力、Saffman升力和重力相比都比较小,旋转升力在各种颗粒直径下均和重力为同一数量级,它平衡了颗粒的部分重力。在湍流脉动中,Basset力起着重要的作用。一般来说,气流的拖曳阻力是作用在颗粒上最大的力,起着加速颗粒的作用^[5,6]。因此,颗粒运动方程可以写为

$$\frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \frac{du_p}{dt} = 3\pi\mu_f d_p f(u_f - u_p) - \frac{1}{2} \times \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_f \frac{du_p}{dt} - \frac{3}{2} d_p^2 (\pi\rho_f\mu_f)^{\frac{1}{2}} \int_{t_0}^t \frac{du_p/dt}{(t-\tau)^{1/2}} dt \quad (1)$$

式中: u_f 为流体的运动速度(m/s); ρ_p 为颗粒密度(kg/m^3); d_p 为颗粒直径(m); μ_f 为流体的运动黏性系数(m^2/s)。在只考虑斯托克斯阻力的情况下,颗粒的运动速度随时间的变化规律为

$$u_p = u_f + (u_{p0} - u_f) \exp(-t/\tau_v) \quad (2)$$

对于一维运动

$$\tau_v = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \times \frac{1}{f(Re)} \quad (3)$$

式中: u_{p0} 为颗粒的初始速度(m/s); τ_v 为颗粒的速度松弛时间(s); $f(Re)$ 为适应不同应用范围而提出的修正函数。

2.2 实验结果分析

2.2.1 粒径、风速对沙粒速度的影响 由于沙粒的非球形特征(包括片状、球形、椭球形、棱角状等),在胶片上观察到输送过程中大多数沙粒总是以迎风截面积最小的方向对着来流,此时,沙粒的粒径采用正对来流的投影面积折算粒径更为合理。实验结果表明,不同粒径沙粒的松弛过程是不相同的,在相同的

位置及风速下,粒径大的沙粒速度值总是小于粒径小的沙粒速度值,而风速的提高有利于加快沙粒的松弛过程。

在得到当地沙粒速度后,根据实验数据求出相应沙粒的 Re 、松弛时间,再根据式(2)计算得到相应的速度值,结果如图2所示。

由图2可以看出,在沙粒松弛的初始阶段,实测值 u_p 总是大于计算值 u_p^0 ,这是由于沙粒在加速的过程中不断旋转造成迎风面积变化,而非球形沙粒的阻力系数要大于同等当量直径球形沙粒的阻力系数,因此不同形状的沙粒受到的拖曳力是不同的。真实沙粒的形状大都是不规则的,而式(2)是球形粒子的结果,所以实验值总是大于式(2)的计算值。随着沙粒运动速度的增加,沙粒旋转的速度变慢,其对阻力系数的影响逐渐减小,因此沙粒运动速度的实测值 u_p 与式(2)的计算值 u_p^0 越来越接近。

2.2.2 拖曳力对沙粒松弛过程的影响 在松弛过程中,沙粒受到拖曳力的变化是比较复杂的:一方面,沙粒与气体之间的相对速度不断变化引起拖曳力的改变;另一方面,速度变化引起沙粒的 Re 发生变化,导致阻力系数也在不断变化,对于球形沙粒,阻力系数的经验公式已相当完善,对于非球形沙粒还需进一步研究。

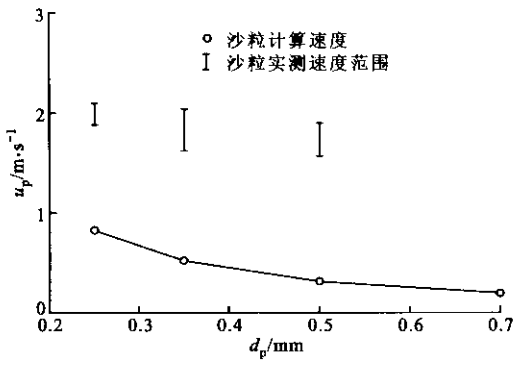
实验结果表明,在松弛过程中,沙粒不断做加速运动,与气体之间的速度差不断减小,因此拖曳力也在不断减小。随着风速的升高,拖曳力与重力的比值增大,沙粒粒径越小,拖曳力与重力的比值也越大。

2.2.3 其他力对沙粒松弛过程的影响 由理论分析可知,虚假质量力、热泳力、压力梯度力、Saffman升力、Magnus升力对沙粒松弛过程的影响很小,因此可以不予考虑。

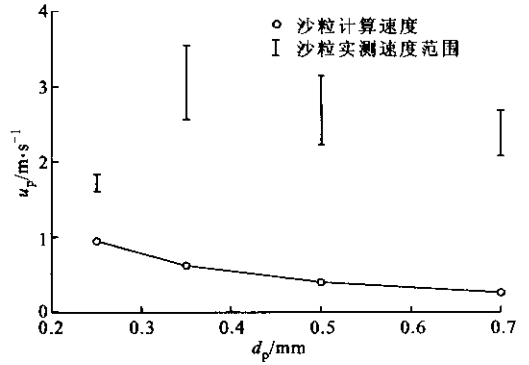
Basset力的产生是由于颗粒相与气体相之间的加速度而产生的,其物理意义是表征颗粒相对流体作非恒速运动时所受到的附加黏性作用的时间积分,并且与颗粒在任意时刻 t 之前的运动历史有关。在加速过程中,Basset力对沙粒的运动有较大的影响^[7-9]。对Basset力进行数值积分,得到如图3所示的变化规律。

由图3可以看出,在绝大多数的情况下,Basset力与拖曳阻力相比是很小的,因此,Basset力在讨论颗粒的受力分析时也可忽略不计。

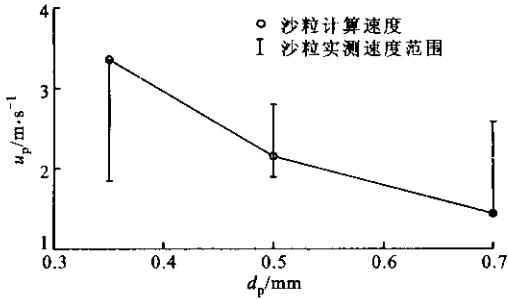
2.2.4 沙粒运动形式的判断 沙粒的运动形式分为沿地表运动的蠕移($d_p > 500 \mu\text{m}$)、跳跃前进的跃移($100 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$)以及悬浮在大气中的悬



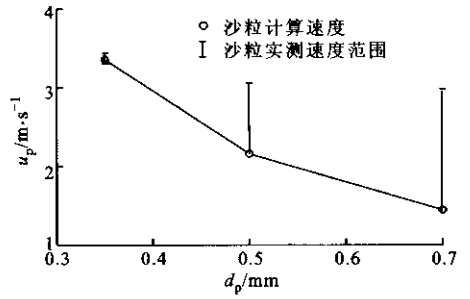
(a) $u_t = 10 \text{ m/s}, L = 0.1 \text{ m}$



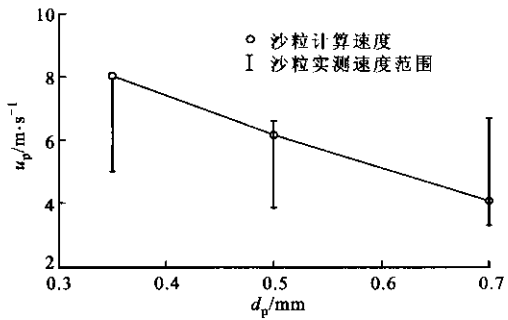
(b) $u_t = 15 \text{ m/s}, L = 0.1 \text{ m}$



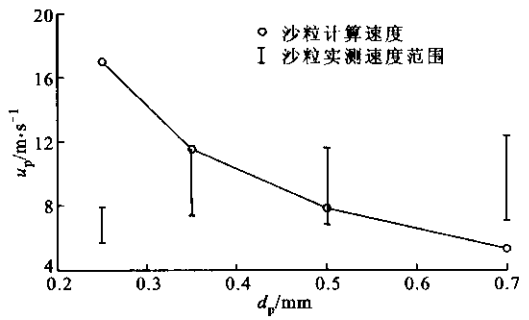
(c) $u_t = 15 \text{ m/s}, L = 0.5 \text{ m}$



(d) $u_t = 18 \text{ m/s}, L = 0.5 \text{ m}$



(e) $u_t = 18 \text{ m/s}, L = 1.5 \text{ m}$



(f) $u_t = 28 \text{ m/s}, L = 1.5 \text{ m}$

图 2 沙粒速度 u_p 、 u_p^0 及风速 u_t 的比较 (L 为颗粒运动距离)

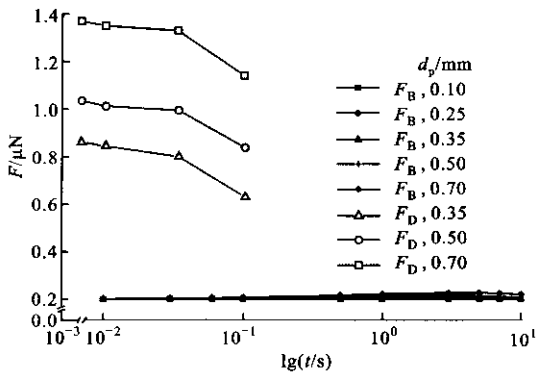


图 3 Basset 力 F_B 与颗粒拖曳阻力 F_D 的比较

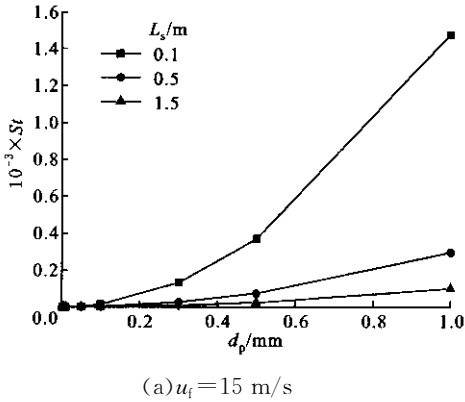
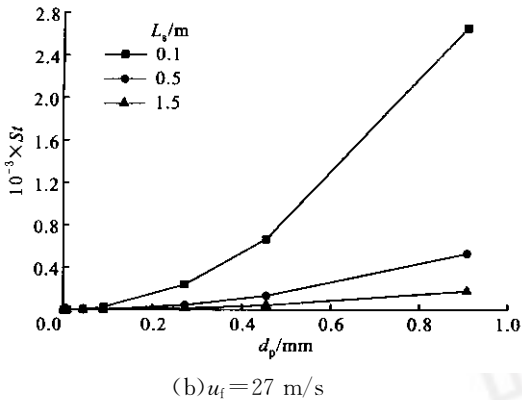
移运动 ($d_p < 50 \mu\text{m}$)^[10]. 沙粒在风洞中的加速运动过程受到沙粒的运动距离、速度以及携带沙粒的流体运动特性等因素的影响.

采用斯托克斯数可以衡量在不同情况下沙粒跟随流体运动的能力. 斯托克斯数根据粒子响应时间和系统响应时间的关系来定义, 即

$$St = \tau_d / t_s$$

式中: $\tau_d = \rho_p d_p^2 / 18 \mu_g$; $t_s = L_s / U_s$ 是根据所考察系统的特征长度 (L_s) 和特征速度 (U_s) 来定义的. 由图 4 可以看出: 随着沙粒粒径的增大、风速的提高, St 急剧增

大,即沙粒跟随气流运动的能力急剧降低;随着沙粒的运动距离的增加, St 减小,此时沙粒受到气流的影响逐渐增大,不断被气流加速,沙粒与气流间相互作用力减小,沙粒的运动与流体的运动趋于相互协调一致.当 $St \ll 1.0$ 时,沙粒具有很好的跟随性^[11],当 $St > 1.0$ 时,沙粒独立于流场运动.因此,能够进行悬移运动的沙粒的 St 数均小于1.0,而变性跃移的 St 约为1.0,跃移及蠕移的 St 大于1.0. St 越小,颗粒停留在空中的时间越长.

(a) $u_t = 15$ m/s(b) $u_t = 27$ m/s图4 沙粒粒径与 St 的关系

3 结论

(1) 通过高速摄影仪拍摄风洞中沙粒的运动过程,得到了沙粒松弛初始阶段的速度分布.可以看

出,在沙粒松弛初始阶段,沙粒的实际运动速度与理论计算值存在较大差异,因此应用公式计算颗粒松弛初始阶段的运动速度还需进一步研究.

(2) 采用数值积分的方法研究了 Basset 力对沙粒松弛过程的影响,结果表明,Basset 力在沙粒松弛过程中对其运动无显著的影响.

(3) 将气固两相流动中描述颗粒运动的 St 引入沙粒运动的研究中,使其作为判断沙粒运动形式的一个标准,为风沙两相流中关于颗粒运动形式的研究提供了理论基础.

参考文献:

- [1] 黄社华,魏庆鼎. 激光测速粒子对复杂流动的响应研究[J]. 水科学进展, 2003,14(1):28-35.
- [2] Slater S A, Young J B. The calculation of inertial particle transport in dilute gas-particle flows[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001(27):61-87.
- [3] 刘小兵,曾庆川,程良骏. 用 Lagrange 方法分析颗粒在湍流场中的运动[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(10):45-50.
- [4] 张永泽,李 嘉,赵文谦. 湍流中悬浮颗粒跟随性对粒径和密度的依赖性分析[J]. 四川水力发电,1997,16(2):83-88.
- [5] 樊建人,岑可法. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 杭州:浙江大学出版社,1990. 192-208.
- [6] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1993. 45-50.
- [7] 黄社华,程良骏. 非均匀流场中变速运动颗粒所受 Basset 力的性质及其数值计算[J]. 水利学报,1996(7):54-60.
- [8] 黄社华,程良骏. 非定常流场中颗粒运动所受 Basset 力的性质解析[J]. 力学与实践, 1996,18(3):50-52.
- [9] 刘小兵,程良骏. Basset 力对颗粒运动的影响[J]. 四川工业学院学报, 1996,15(2):55-63.
- [10] Bagnold R A. 风沙和荒漠沙丘物理学[M]. 钱 宁,林秉南,译. 北京:科学出版社,1959. 12-34.
- [11] Fluent Inc. Fluent 6.0 user's guide[Z]. 10 Cavendish Court, Lebanon; Fluent Inc, 2001. 1 135-1 146.

(编辑 王焕雪)