

微粒粒度分布光学测量中的动力学特征

洪云, 王亚伟, 吴大建, 刘莹

(江苏大学理学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 针对非球形的真实形体微粒在光散射区内运动的随机性对微粒粒度测量结果产生的影响, 比如对真实粒子的非对称性因子、散射截面等产生的实际影响, 对流场中形体微粒建立了特征模型, 基于流场中的动力学理论, 应用数值计算技术, 研究了不同形体, 不同入射角和不同特征流场下微粒的取向特征, 得到了取向时间和微粒形体特征以及流场之间的关系, 为微粒粒度测量技术的提高提供了有力的支撑。

关键词: 微粒; 粒度; 形体; 取向时间; 流场

中图分类号: O436.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-6254(2006)06-0031-04

Dynamic characters of motion particles in optical measurement of size distribution

HONG Yun, WANG Ya-wei, WU Da-jian, LIU Yin

(Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Focusing on the effect of granularity measuring result by random motion in the area of real small particles, a model of particles in flow field is presented according to the theory of dynamics. Then, systematic study is made about the orientation characters of particle in different entrance angles and flow field of different characters with the aid of numerical computation. Finally, conclusion is drawn about the relationship among time, size character of the particle and the flow field, which makes the accurate measurement of the particle granularity possible.

Key words: particle; size; granularity; orientation; flow field

随着国民经济和科学技术的迅速发展, 与微粒密切相关的技术问题在工业、农业、环境、国防和科研等领域越来越受到重视。例如, 各种燃料雾化装置所喷射的液滴大小及其分布的测试, 病原细胞大小及其分布的检测, 环保业中除尘效率的评定等等, 无不要求对粒度的尺寸及分布参数进行准确的测量和研究。测量方法按照物理原理的不同有光学法, 电学法, 动力学法等, 其中基于光散射原理的光学测量因其测量范围广、精度高、不接触样品、快速、可自动化实时等优点, 已被确认为是一种先进的、最具有广泛

发展前景的测量方法。

在利用光散射原理进行的光学测量中, 形体微粒通过光敏区的取向决定着其散射截面, 进而影响着相应的散射谱, 并对粒度分布的最终反演结果也会产生影响, 这在以往的研究中已经有了相应的讨论和结论^[1-3]。对于球形粒子而言, 由于对称性, 其取向不会对散射结果产生影响, 但在工业技术和生物医学界, 非球形的粒子极为常见, 其中细长的圆柱形微粒就是一类极具代表性的非球形粒子, 比如纤维粒子或是管形细胞等均属这一类粒子, 这类圆柱形的散射体随着

收稿日期: 2006-08-17

收稿日期: 江苏省教育厅自然科学基金资助项目(04kjb140017); 江苏大学创新基金资助项目(04cx06)

作者简介: 洪云(1976-), 女, 江苏溧阳人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事光散射方面的研究。

王亚伟(1957-), 男, 江苏镇江人, 教授, 博导, 主要从事光学传感器与光信息处理技术的研究。

气流或液流被带入光敏区时粒子的取向影响其散射的结果,从而影响测量结果的准确性。

作者从真实形体微粒在光散射区运动的随机性对微粒粒度测量结果影响的问题着手,通过流场中粒子特征模型的建立,基于其在流场中的动力学理论,应用数值计算技术,研究了不同形体、不同入射角和不同特征流场下微粒的取向特征,得到了取向时间和微粒形体特征以及流场之间的关系;得到了形体微粒在不同流场中的取向分布特征和规律,为微粒粒度精确测量技术的提高提供了有力的支撑。

1 微粒的基本模型及其动力学理论

1.1 微粒的特征模型

为讨论取向问题,对真实形体微粒做出如下的假设:

(1) 粒子为细长刚性柱状粒子,其特征尺度由其长度来确定,常见的从几十微米到几十毫米。

$$\beta = l/a \gg 1$$

式中 β 为其长径比, l 和 a 分别为粒子的半长和半径。

(2) 忽略粒子的端部效应和粒子间的作用力。

(3) 粒子的特征长度远小于流场的特征长度,故粒子附近的流场假定是 Stokes 定常流,同时作为稀相,可以忽略柱状粒子对流场的扰动,粒子所在处流场的速度即为没有粒子加入时此处流场的速度。

(4) 取圆形管道中的流场为背景流场^[4]。

1.2 动力学理论

在流体中不管粒子形状如何,粒子受到力的种类大致相同。在定常流动中,粒子主要受到 Stokes 力,即流体对粒子的粘性力,非定常流动^[5]中,粒子受力要复杂得多。当然,对细长的柱状粒子而言,其受力描述又要比球状粒子的复杂。

根据流体的细长体理论,细长体在非定常流体中运动时,在 Fourier 领域内受力表示为^[6]

$$F = \mu a \{ D + B^\infty \lambda + M \lambda^2 + (B^0 - B)^\infty \cdot [\lambda / (\lambda + 1)] \} v$$

式中 μ 为流体的粘性系数, D , M , B^∞ 分别为 Stokes 阻力系数、附加质量力系数和 Basset 力系数张量, $B^0 = DD/6\pi\nu$ 是流体与柱状粒子的相对速度, $\lambda^2 = -4i\omega a^2/\nu$, 式中 ω 为柱状粒子的振荡频率, ν 是流动粘度。

将上式括号外各项乘入后,右边四项分别表示粘性阻力项、Basset 力项、附加质量力项和粒子高频

振荡的修正项。对于定常流的条件,相对于 Stokes 阻力,其他作用力都较小,故只考虑柱状粒子所受的 Stokes 阻力,故有

$$F = \mu a D v \quad (1)$$

式中 $D = \begin{bmatrix} D_{\parallel} & 0 \\ 0 & D_{\perp} \end{bmatrix}$, D_{\parallel} 和 D_{\perp} 分别为平行和垂

直于粒子轴线方向上的阻力系数, Loewenberg^[7] 已经通过实验给出了其随长径比 β 变化的曲线。

对于管道流场,流体只存在流向速度,在径向的速度分量始终为零。即使粒子在截面上有起始的速度或是转动,也会由于粒子的跟随性,在径向的速度分量也会很快的降为零。在忽略重力的作用下,粒子的运动可以看作在粒子轴线与中心所在点流体流向所构成的平面内运动,其中当然也包括粒子的转动。

从细长体理论^[8,9]出发,在运动平面内,柱状粒子所受的力矩为^[10]

$$L_3 = \frac{8}{3} \pi \mu \sigma L^3 (C - \dot{\theta}) [1 - \sigma (\ln 2 - 1.8333)] \quad (2)$$

式中 $\sigma = \ln^{-1}(2\beta)$, θ 为粒子轴线与管道轴线所成的角。

$$C = \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} \right) + \cos^2 \theta \frac{\partial u_2}{\partial \xi_1} - \sin^2 \theta \frac{\partial u_1}{\partial \xi_2} \quad (3)$$

由式(1)和式(2)可得柱状粒子的运动方程为

$$\ddot{r} = (c_1/St) A^{-1} D A (u_f - \dot{r}) \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = 4(C - \dot{\theta}) \sigma \mu [1 - \sigma (\ln 2 - 1.8333)] / a^2 \quad (5)$$

式中 \ddot{r} 为粒子加速度矢量, \dot{r} 为粒子速度矢量, u_i 为粒子中心处流体速度矢量, $\ddot{\theta}$ 为粒子角加速度, $\dot{\theta}$ 为粒子角速度, A 为变换矩阵: $A = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$, 常数 $c_1 = u/\pi\beta L$, Stokes 数 $St = \rho_p a^2 u/\mu L$, 而 u 和 L 分别为流场特征速度和特征长度。

$$\text{将 } u_i = u_i \Big|_0 + \frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} \Big|_0 \xi_j \quad (i, j = 1, 2)$$

$$\xi_1 = l \cos \theta, \xi_2 = l \sin \theta$$

$$u_1 = u_0 + k \xi_2, u_2 = u_0 + k \xi_1$$

式中 u_0 为流场中心轴线上流速, k 为流场的速度梯度,是负常数。

代入式(3)可得到

$$C = \sin \theta \cos \theta \left(\frac{\partial u_2}{\partial \xi_2} - \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} \right) + \cos^2 \theta \frac{\partial u_2}{\partial \xi_1} - \sin^2 \theta \frac{\partial u_1}{\partial \xi_2} = 2k \cos 2\theta$$

1.3 参数设定

现有的一些光散射测量仪器中微粒所在的圆管流场的半径都较小,其流场相应的速度梯度分别设为1,10,采用空气流场模型,其粘滞系数取 1.8×10^{-3} ,若为空气,其粘滞系数为 1.8×10^{-5} ,则

$$b = 4\sigma\mu[1 - \alpha(\ln 2 - 1.8333)]/a^2$$

计算结果 b 分别为 3 317.9(半径为 100 μm) 和 33.179(半径为 1 mm)。

2 试验模拟结果

公式(5)无解析解,进行数值计算,结果如下。

2.1 $a = 1 \text{ mm}$ 时不同角度,不同梯度的情况

取粒子模型的半径为 1 mm,流场模型为空气流场(例如粒子计数器中较大的煤粉粒子等),则参数 $b = 33.179$,同时取初始角度 θ_0 分别为 30° 和 60° 。

图1、图2给出了 $a = 1 \text{ mm}$ 的粒子以不同的初始角度在速度梯度为1,图3、图4给出了 $a = 1 \text{ mm}$ 的粒子以不同的初始角度在速度梯度为10,分别在空气流场中运动时粒子角度和角速度随时间的变化情况。

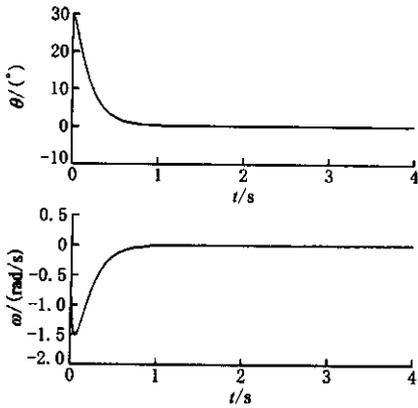


图1 $\theta_0 = 30^\circ$ 时粒子角度和角速度随时间的变化

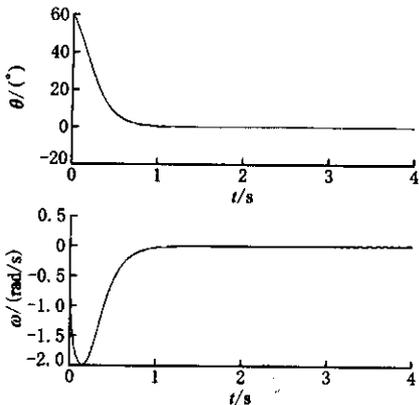


图2 $\theta_0 = 60^\circ$ 时粒子角度和角速度随时间的变化

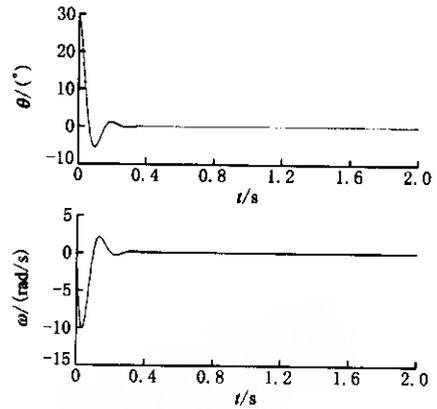


图3 $\theta_0 = 30^\circ$ 时粒子角度和角速度随时间的变化

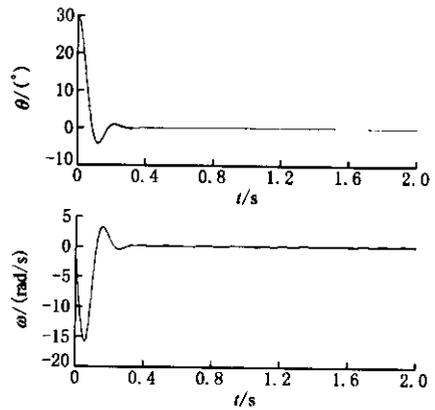


图4 $\theta_0 = 60^\circ$ 时粒子角度和角速度随时间的变化

2.2 $a = 100 \mu\text{m}$ 时不同角度,不同梯度的情况

取粒子模型的半径为 100 μm ,流场模型仍然为空气流场(如粒子计数器中较小的颗粒),则参数 $b = 3 317.9$,同时取初始角度分别为 30° 和 60° 。

图5、图6给出了 $a = 100 \mu\text{m}$ 的粒子以不同的初始角度在速度梯度为1,图7、图8给出了 $a = 100 \mu\text{m}$ 的粒子以不同的初始角度在速度梯度为10,分别在空气流场中运动时粒子角度和角速度随时间的变化情况。

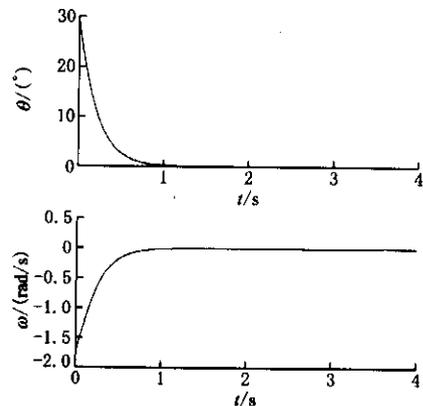


图5 $\theta_0 = 30^\circ$ 时粒子角度和角速度随时间的变化

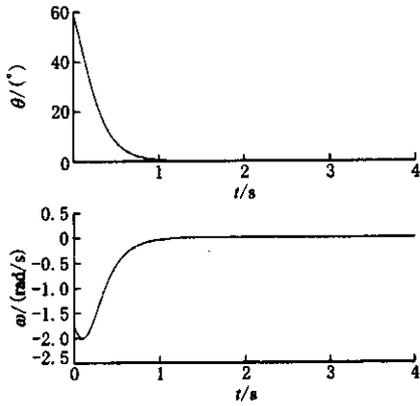


图 6 $\theta_0 = 60^\circ$ 时粒子角度和角速度随时间的变化

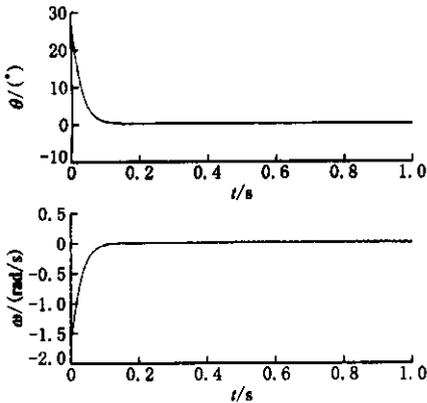


图 7 $\theta_0 = 30^\circ$ 时粒子角度和角速度随时间的变化

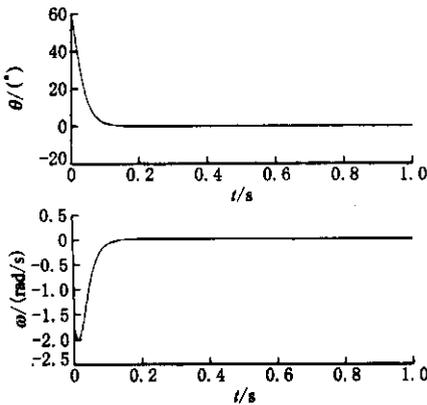


图 8 $\theta_0 = 60^\circ$ 时粒子角度和角速度随时间的变化

3 结 论

由上述研究结果可以得到以下结论：

(1) b 值主要受粒径影响, 粒径越小 b 值越大, 粒子越小跟随性越好, 到光敏区时粒子的空间取向

也已经确定, 故其光散射的结果可以不考虑其取向分布问题; 当粒径较大时 b 参数取值较小, 粒子在流体中的空间取向呈振荡分布, 在这种情况下, 在光敏区内的粒子其取向与粒子到达光敏区所用时间有直接关系, 不同时间则对应着不同的空间角度, 故在讨论粒子的光散射形体分布时必须考虑其取向分布。

(2) 在粒径确定的条件下, 粒子振荡的周期与流场的速度梯度有直接关系, 速度梯度越大, 振荡的周期越短, 频率越快, 而且粒径越大此现象就越明显, 但其到达稳定的时间基本一致。这是由于速度梯度影响着粒子所受到的力矩作用而产生的结果。

参考文献 (References)

- [1] 王亚伟, 贺安之. 微粒的运动随机性对其光散射频谱的影响[J]. 激光杂志, 2000, 21(3) : 36 - 38.
- [2] 王亚伟, 贺安之. 微粒特征分布函数测量理论和方法的进一步研究[J]. 计算物理, 2002, 19(4) : 339 - 343.
- [3] 杨 娟, 卞保民, 何幼权, 等. 尘埃粒子计数器粒子散射光信号幅度概率分布[J]. 光电子激光, 2001, 12(1) : 67 - 70.
- [4] Belmiloud M, 陈善群. 分叉管流动的数值模拟[J]. 排灌机械, 2005, 23(2) : 39 - 41.
- [5] 田长留, 孟 超. 非定常水射流的调制原理及形成方法[J]. 排灌机械, 2005, 23(3) : 35 - 38.
- [6] Pozrikidis C. A singularity method for unsteady linearized flow[J]. *Physics of Fluids A Fluid Dynamics*, 1989, 1(9) : 1508 - 1520.
- [7] Loewenberg M. Stokes resistance, added mass, and Basset force for arbitrarily oriented, finite-length cylinders[J]. *Physics of Fluids A Fluid Dynamics*, 1993, 5(3) : 725 - 734.
- [8] Batchelor G K. Slender-body theory for particles of arbitrary cross-section in stokes flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 44(26) : 419 - 420.
- [9] Cox R G. The motion of long slender bodies in a viscous fluid[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971, 45(4) : 625 - 626.
- [10] 张卫峰, 林建忠. 气固两相管道流中柱状粒子取向的数值研究[J]. 空气动力学学报, 2003, 21(2) : 237 - 243.

(责任编辑 贾国方)