两相流动中椭圆颗粒沉降规律的数值模拟

刘汉涛,常建忠,马理强,安康

(中北大学 机电工程学院,山西 太原 030051)

摘要:应用任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法,对椭圆形颗粒在一定雷诺数范围内的沉降过程进行了数值模拟, 流体运动由守恒方程计算,通过积分黏性应力和压力获得的颗粒受力来跟踪颗粒运动.结果表明:圆形颗粒与 初始时刻长轴垂直于 *x* 轴放置的椭圆颗粒,一直沿通道中心线稳定沉降;初始时刻长轴平行于 *x* 轴放置的椭圆 颗粒,沉降时向一侧壁面旋转靠近,最终也稳定在通道中心线,颗粒长轴与颗粒沉降方向垂直;两种情况下的椭 圆颗粒最终沉降速度相同.

关 键 词:数值模拟;颗粒沉降;两相流;任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法 中图分类号:0359 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-640X(2010)03-0075-04

颗粒两相流动广泛存在于自然界、工业设备和生物体中,对其流动现象、机理和过程的研究对学术理论和工程应用都有重要意义.目前对球形颗粒研究较多,获得了颗粒(颗粒群)的运动速度、受力、颗粒尾涡结构、颗粒对湍流的作用规律等成果^[1-3].工业过程中存在更多的非球形颗粒,对于非球形颗粒,大多引入等效直径及球形度定义对颗粒的受力等进行修正,按近似球形颗粒的规律进行计算^[4].研究方法主要采用试验测量及数值模拟.目前,颗粒两相流动的测量方面,激光粒子速度场仪(PIV)、相位多普勒法(PDPA)、粒子动态分析仪(PDA)等较多地用于测量颗粒两相流动速度、湍流度以及颗粒尺寸和浓度,但无法获得运动颗粒间的受力^[5-6].数值计算目前主要采用基于雷诺平均的 N-S 方程^[7-8],包括:欧拉-欧拉法(多流体/双流体模型)、欧拉-拉氏法.随着计算机处理能力的不断提高,直接数值模拟逐渐应用到颗粒两相流动中,因其不需要任何封闭模型,颗粒的受力不通过模型计算,而是通过积分表面的黏性力和压力获得.它可以给出实际流动中颗粒的受力规律和颗粒的形状变化,也可以给出颗粒的脉动及其尾涡对流体的作用.本文采用任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eulerian,ALE)方法对圆形和椭圆形颗粒的两相流进行直接数值模拟.通过对两种形状颗粒在竖直通道中沉降过程的模拟来研究椭圆颗粒的受力和运动规律.

1 计算条件

本文应用任意拉格朗日--欧拉(ALE)方法模拟惰性颗粒 两相流动,计算控制方程、数值计算方法及测试算例可参见 文献[9-10].为阐明椭圆颗粒在竖直通道中的沉降规律,分 别模拟了3种情况下的颗粒沉降过程:直径为2d的圆形颗 粒沉降(记为 P_1);长轴为2d,短轴为d的椭圆颗粒初始时 刻长轴垂直于 x 轴沉降(记为 P_2);长轴为2d,短轴为d的椭 圆颗粒初始时刻长轴平行于 x 轴沉降(记为 P_3).颗粒密度 ρ_s 与流体密度 ρ_o 之比恒定为 $\rho_s/\rho_o=1.00232$,颗粒温度与流



收稿日期: 2009-10-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50976108);山西省青年创新基金资助项目(2008021004)

作者简介:刘汉涛(1975-),男,山东安丘人,讲师,博士研究生,主要从事计算流体力学理论与应用研究.

E-mail: lht@ nuc. edu. cn

体温度相同,流体的黏性系数为μ=0.172×10⁻³,时间步长为0.01 s,计算时间为100 s. 计算区域示意图见图 1,其中竖直通道宽 L=8 d,颗粒中心与计算区域顶端至底端的距离均为15 d,颗粒在通道中心线上释放.

2 计算结果及分析

3种情况下颗粒沉降速度、角速度、沉降轨迹和颗粒受力随时间的变化分别见图 2~4.

由图 2(a) 可见, 开始时颗粒沉降速度都随时间逐渐增大, 经过一段时间速度达到最大值. 圆形颗粒 P_1 与初始时刻长轴垂直于 x 轴放置的椭圆颗粒 P_2 在速度达到最大值后便开始稳定沉降, 达到平衡所需时间也 较短; 同时 P_1 和 P_2 的角速度恒为 0(见图 2(b)), 颗粒一直沿通道中心线沉降(见图 3).

初始时刻长轴平行于 x 轴放置的椭圆颗粒 P_3 速度达到最大值后逐渐减小,经历短时间的周期波动后沉降速度稳定为一恒定值,最终沉降速度与 P_2 相同,颗粒沉降的最终雷诺数 Re 为 13.4,小于圆形颗粒 P_1 沉降的最终雷诺数 21.2.这是由于 P_3 在沉降开始后,一边沿 x 方向沉降一边顺时针摆动(图 2(a)),并且角速度不断变大,在 16 s 时达到最大值,此时颗粒靠近左侧壁面(图 2(b)),之后角速度逐渐减小,同时由于壁面限制椭圆颗粒向通道中心方向移动,在靠近通道中心位置前椭圆颗粒做顺时针和逆时针周期性摆动,由于黏性流体的阻尼,摆幅不断减小,此外,由于壁面效应,循环几次后最终在通道中心停止摆动,此时,颗粒角速度为0,颗粒长轴方向与颗粒沉降方向垂直,此后稳定沉降,这与 J. Feng 等^[11]的结论一致.



图 2 不同时刻颗粒沉降速度及角速度





从颗粒受力(图4)中也可看出颗粒速度的变化规律:圆形颗粒 P₁ 开始时受力最大,其加速度也最大,因此其达到最终受力平衡所需的时间最短;初始时刻长轴平行于 x 轴放置的椭圆颗粒 P₃ 虽然受力也较大,但由于其要经历长轴由平行于 x 轴变为垂直于 x 轴的过程,颗粒周期性摆动,因此达到受力平衡所需时间最长.

图 5 为 3 种情况下沉降时颗粒状态及两相流场的流线. 可见,由于流场的不对称,初始时刻长轴平行于

x 轴放置的椭圆颗粒 P₃ 在开始沉降时颗粒产生转动,颗粒浮升力引起颗粒位移,并最终沿通道中心线稳定沉降.



3 结 语

本文对通道中圆形和椭圆形颗粒在一定雷诺数范围内的沉降过程进行了数值模拟,结果表明:

(1)圆形颗粒与初始时刻长轴垂直于 x 轴放置的椭圆颗粒一直沿通道中心线稳定沉降,角速度为0,沉降雷诺数分别为21.2 和13.4.

(2)初始时刻长轴平行于 x 轴放置的椭圆颗粒释放后由于流场的不对称性,颗粒一边向一侧壁面运动 一边旋转,此后向通道中心靠近,最终也稳定在通道中心线,此时颗粒长轴方向与颗粒沉降方向垂直,最终雷 诺数为 13.4.

(3)3种情况下,圆形颗粒达到最终平衡所需的时间最短,初始时刻长轴平行于 x 轴放置的椭圆颗粒达 到平衡所需的时间最长.

与以往研究等温惰性颗粒的运动规律相比,本文用直接数值模拟的方法对圆形颗粒和椭圆颗粒的运动 进行了模拟,在介观尺度上阐明了该复杂流动中颗粒的运动规律.

参考文献:

- LIN J Z, LIN J, SHI X. Research on the effect of cylinder particles on the turbulent properties in particulate flows [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2002, 23(5): 542-548.
- [2] LIU M Y, TANG X P, JIANG P. Studies on the hydrodynamic and heat transfer in a vapor-liquid-solid flow boiling system with a CCD measuring technique [J]. Chem Eng Sci, 2004, 59: 889-899.
- [3] 王大伟,王元,杨斌. 风沙两相流 PIV 测量算法研究[J]. 力学学报, 2006, 38(3): 302-308. (WANG Da-wei, WANG Yuan, YANG Bin. An algorithm in PIV measurement of wind-sand two phase flow[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(3): 302-308. (in Chinese))
- [4] 由长福,祁海鹰,徐旭常. 气固两相流动中非球形颗粒所受曳力的数值研究[J]. 化工学报, 2003, 54(2): 188-191.
 (YOU Chang-fu, QI Hai-yin, XU Xu-chang. Numerical simulation of drag force on non-spherical particle in gas-particle two-phase flow[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(2): 188-191. (in Chinese))

- [5] LIU M Y, TANG X P, JIANG P. Studies on the hydrodynamic and heat transfer in a vapor-liquid-solid flow boiling system with a CCD measuring technique [J]. Chem Eng Sci, 2004, 59: 889-899.
- [6] XU Y M, CHI W, MO L X. PIV measurement technique and its application [J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(3): 101-105.
- [7] 周力行. 离散型湍流多相流动的研究进展和需求[J]. 力学进展, 2008, 38(5): 610-622. (ZHOU Li-xing. Recent advances in studies of dispersed turbulent multiphase flows and issues to be researched[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38 (5): 610-620. (in Chinese))
- [8] JURIC D, TRYGGVASON D. Computations of boiling flows[J]. Int J Multiphase Flow, 1998, 24: 387-410.
- [9] 安康,常建忠,刘汉涛. 通道宽度对单颗粒沉降运动影响的直接数值模拟[J]. 水运工程,2008,418(8):6-9. (AN Kang, CHANG Jian-zhong, LIU Han-tao. Direct numerical simulation of the influence by channel width in the sedimentation of a single particle[J]. Port & Waterway Engineering, 2008, 418(8):6-9. (in Chinese))
- [10] 刘汉涛, 仝志辉, 安康, 等. 溶解与热对流对固体颗粒运动影响的直接数值模拟[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6369-6375. (LIU Han-tao, TONG Zhi-hui, AN Kang, et al. Direct simulation of the influence on the motion of particles in a Newtonian fluid by melting and convection[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6369-6375. (in Chinese))
- [11] FENG J, HU H H, JOSEPH D D. Direct simulation of initial value problems for the motion of solid bodies in a Newtonian fluid Part 1. Sedimentation [J]. J Fluid Mech, 1994, 261: 85-134.

Numerical simulation of settlement principle of elliptical particle in two-phase flows

LIU Han-tao, CHANG Jian-zhong, MA Li-qiang, AN Kang

(School of Mechatronice Engineering of North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Numerical simulation of the problem of elliptical solid particle sedimentation at certain Reynolds number is carried out with arbitrary Lagrangian-Eulerian technique. The fluid motion is computed by the conservation laws, and the particles are moved according to the equations of motion of a rigid body under the action of gravity and hydrodynamic forces arising from the motion of the fluid. The results show that the circular and the elliptical particle with its initial major axis perpendicular to x axis of coordinates settles along the center of the channel all the time; the elliptical particle with its initial major axis perpendicular to x axis parallel to x axis of coordinates rotates while settling synchronously, then close to the center of the channel, and settles along the center finally with its major axis perpendicular to the direction of sedimentation; while the elliptical particles settle at the same velocity at last.

Key words: numerical simulation; particle sedimentation; two-phase flows; arbitrary Lagrangian-Eulerian