

双颗粒在溶解条件下沉降的多相流动特性*

仝志辉 刘汉涛 常建忠[†] 安康

(中北大学能源环境工程与计算流体力学实验室, 太原 030051)

(2011年2月13日收到; 2011年3月28日收到修改稿)

对牛顿流体内溶解双颗粒在垂直管道中的沉降运动进行了直接数值模拟. 流体运动由守恒方程计算, 密度和黏性的变化考虑流场温度变化的影响, 通过积分粘性应力和压力获得颗粒的受力跟踪颗粒运动, 溶解引起的相变及其形状的变化由溶解潜热、溶解质量与分散相边界处的温度梯度的关系建立的方程决定. 通过颗粒和流体间相互的作用力和力矩及边界条件的施加实现相间耦合. 对双颗粒在等温流体无溶解条件和非等温流体溶解条件下的沉降过程进行了计算. 结果表明, 在一定雷诺数内, 热对流产生的颗粒尾迹处涡的脱落以及溶解引起的颗粒质量、颗粒表面形态的变化引起了颗粒的横向摆动, 并使颗粒沉降速度发生了变化.

关键词: 溶解, 颗粒两相流, 直接数值模拟, 沉降

PACS: 44.25.+f, 47.11.-j

1 引言

颗粒在非等温流体中溶解和运动同时存在的现象广泛存在于工业设备中, 但目前对这一现象的系统研究很少, 主要的困难在于这一过程中同时存在着颗粒相和瞬态流动结构之间复杂的相互作用、相变、热质传递、热量组分对流、颗粒运动、颗粒形状变化等^[1-3]. 当前对一些流动现象, 如对颗粒的受力和颗粒的热量质量传递, 大多是在单个颗粒或固定颗粒的基础上加以修正而得到的, 许多实验也都是摸索和修正这些经验关系式, 不能正确表征相间速度差引起的阻力以及温差引起的热交换, 更不能刻画流场内部流动的细节^[4-5]. 由于计算上的困难及研究方法的限制, 对运动颗粒两相流动的研究往往只局限于惰性颗粒. 靠理论简化分析和利用实验半经验的方法以及引入许多经验关系式的数值模拟方法, 也不能正确描述该复杂流动中的颗粒受力、动量能量的相间传递、相间分界面的变化, 影响人们对该流动真实机理的理解和掌握^[6-7]. 因此发展能对传热传质情况下颗粒两相流动的本质特征进行研究的数值方法具有重要的理论意义和工程应用价值. 本文将在应用任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 方法模

拟等温惰性颗粒两相流的基础上, 发展在溶解情况下对颗粒两相流进行直接数值模拟的方法, 应用该方法, 模拟计算在牛顿流体中单颗粒、双颗粒的沉降运动, 研究溶解对其沉降运动的影响和作用. 在介观尺寸上阐明该复杂流动中颗粒的运动规律、相间分界面的移动变形以及传热和流动的相互作用机理.

2 方程及数值方案

在有牛顿流体的竖直通道中, 释放初始速度为零的固体颗粒, 颗粒由于重力作用开始沉降. 假设颗粒是圆形的, 流体初始温度为 T_0 , 颗粒温度为 T_s , 沉降过程中颗粒温度恒定不变 (这样可突出颗粒与流体的温差对流场流动和传热的影响, 如果颗粒温度不固定, 很快就会与流体温度一样, 热效应的影响很快就会消失).

流体的连续性方程、运动方程、能量方程分别为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g}, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金 (批准号: 50976108), 山西省青年创新基金 (批准号: 2008021004) 和中北大学校基金资助的课题.

[†] E-mail: changjz01@nuc.edu.cn

$$\rho_0 c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T. \quad (3)$$

在方程 (2) 中, 采用 Boussinesq 假设, 流体密度 ρ 的变化与温度的关系为

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (4)$$

其中 ρ_0 是 T_0 温度时的流体密度, β 是流体的热膨胀系数.

颗粒按如下方程平移和旋转:

$$m_i \frac{dV_i}{dt} = G_i + F_i, \quad (5)$$

$$I_i \frac{d\Omega_i}{dt} = T_i, \quad (6)$$

i 表示第 i 个颗粒, m_i 和 I_i 分别是颗粒的质量和转动惯量, V_i 和 Ω_i 是颗粒的线速度和角速度, G_i , F_i 和 T_i 分别是体积力, 流体对颗粒的作用力和力矩.

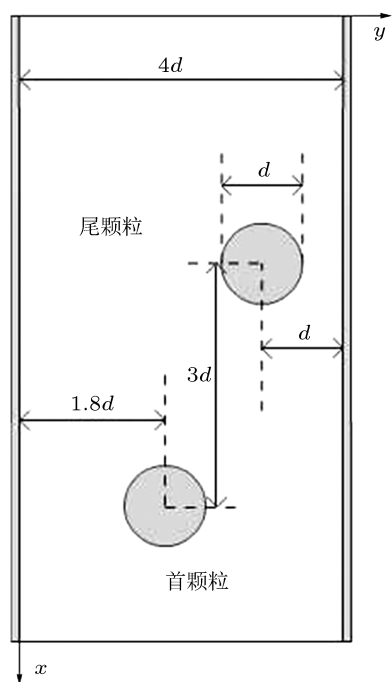


图1 计算区域示意图

颗粒运动和流体流动间耦合通过颗粒和流体间相互的作用力和力矩及边界条件的施加实现. 颗粒的溶解速度由颗粒表面的热流密度决定:

$$\rho_s h_f \frac{dr_n}{dt} = -k \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (7)$$

式中, ρ_s 为颗粒密度, h_f 为溶解潜热, r_n 为沿颗粒当地法线方向 $\mathbf{n}$ 的颗粒表面坐标. 计算区域四周的边界条件如下:

BC, CD, DA 边上: $v = 0, T = T_0$;

AB 边上: $\tau_{xy} = \tau_{yy} = 0, \partial T / \partial x = 0$.

τ 表示切应力, 在模拟过程中, 计算区域将随

着颗粒的运动而移动, 并在每一时间步内重新定义, 但区域的大小和颗粒在区域中的相对位置不变, 即颗粒在计算区域中与顶端和底端的距离始终不变. 在本文中 m_i 和 I_i 分别为 $\pi \rho_s d^2 / 4$ 和 $\pi \rho_s d^4 / 32$.

本文采用的数值方法可参见文献 [8—12].

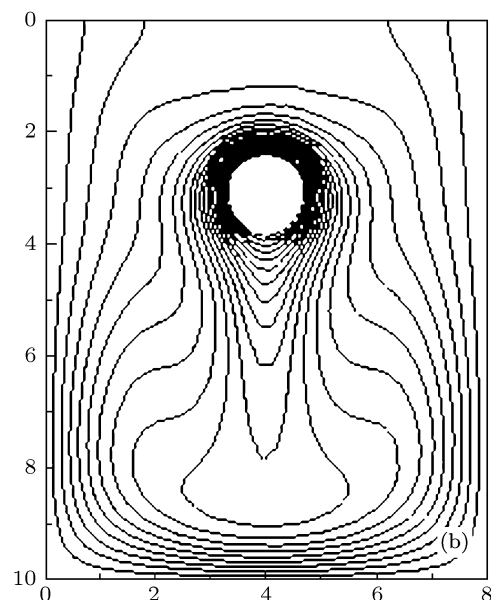
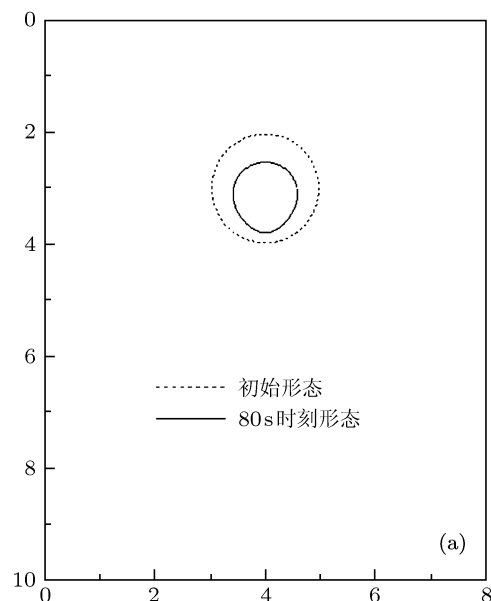


图2 固定颗粒溶解 (a) 不同时刻颗粒溶解时表面形态; (b) 溶解颗粒周围的等温线

3 固定颗粒的溶解

文献对颗粒溶解的实验及数值计算很少 [13—15], 也没有严格的理论推导及数值计算结论.

本文首先对固定颗粒的溶解进行了计算, 一方

面验证程序的有效性, 另一方面为双颗粒的沉降计算作准备. 颗粒放入热流体中, 流体材料与颗粒相同, 流体温度高于颗粒的溶解温度, 考虑热对流的影响, 而不考虑组分对流, 计算中瑞利数 $Ra = 800$, 普朗特数 $Pr = 0.7$.

图 2(a) 为不同时刻固体颗粒表面的形态变化, 从图中可以看出, 颗粒上顶点的溶解速度较中部稍大, 在 80 s 时颗粒上半部分略扁, 但仍接近半圆形; 颗粒下半部形成尖的突起. 显然颗粒表面的溶解速度和热流密度有关, 而热流密度的大小由颗粒表面的温度梯度决定. 从图 2(b) 颗粒周围的等温线可以看出, 颗粒上半圆表面温度梯度较大, 因而热流密度大, 颗粒上半部溶解较快. 并且上半部分热流密度大体相当, 形成了表面为圆形的形态. 而下半部的热流密度较上部小, 溶解速度也较慢, 所以形成了尖的突起.

4 双颗粒沉降

在多相流中, 颗粒间的相互作用决定了流场的微观结构, 从而影响着流体流动, 在惰性颗粒沉降中, 这种相互作用主要由颗粒前驻点处压力及颗粒

尾迹处动力学特性决定的. 因此在颗粒沉降过程中, 颗粒间在水平方向会相互排斥, 在垂直方向相互吸引^[8]. 本文在二维通道内对双颗粒的沉降规律进行研究: 直径为 d 的两圆形颗粒在宽度为 $L = 4d$ 的垂直管道内释放, 然后在重力下沉降. 通道中后颗粒 (trailing particle) 的初始位置在中心线与通道壁的中间, 前颗粒 (leading particle) 的初始位置与另一侧通道壁的距离为 $1.8d$, 与后颗粒的垂直距离为 $3d$. 本文分别对惰性、溶解颗粒进行模拟计算, 计算条件为 $Ra = 800$, $Pr = 0.7$.

释放后两颗粒朝通道中心线相向运动, 后颗粒越过中心线的幅度较前颗粒大, 此后两颗粒摆幅逐渐减小后稳定在通道中心线上, 并在此后的 60 s 内, 两颗粒一前一后依次沿通道中心沉降. 这段时间内由于后颗粒速度较前颗粒速度大, 两颗粒逐渐靠近, 但在低雷诺数下, 后颗粒并未处于前颗粒尾部区域, 因此两颗粒没有相互影响. 当后颗粒进入前颗粒尾部区域后, 后颗粒加速接近前颗粒, 此后两颗粒间距呈现阻尼摆动的形式, 前颗粒较后颗粒更靠近一侧壁面, 摆动幅度也较小 (图 3(a)). 图 3(b) 显示了两颗粒水平及垂直方向的间距. 两颗粒的角速度也呈现阻尼摆动如图 3(d) 所示.

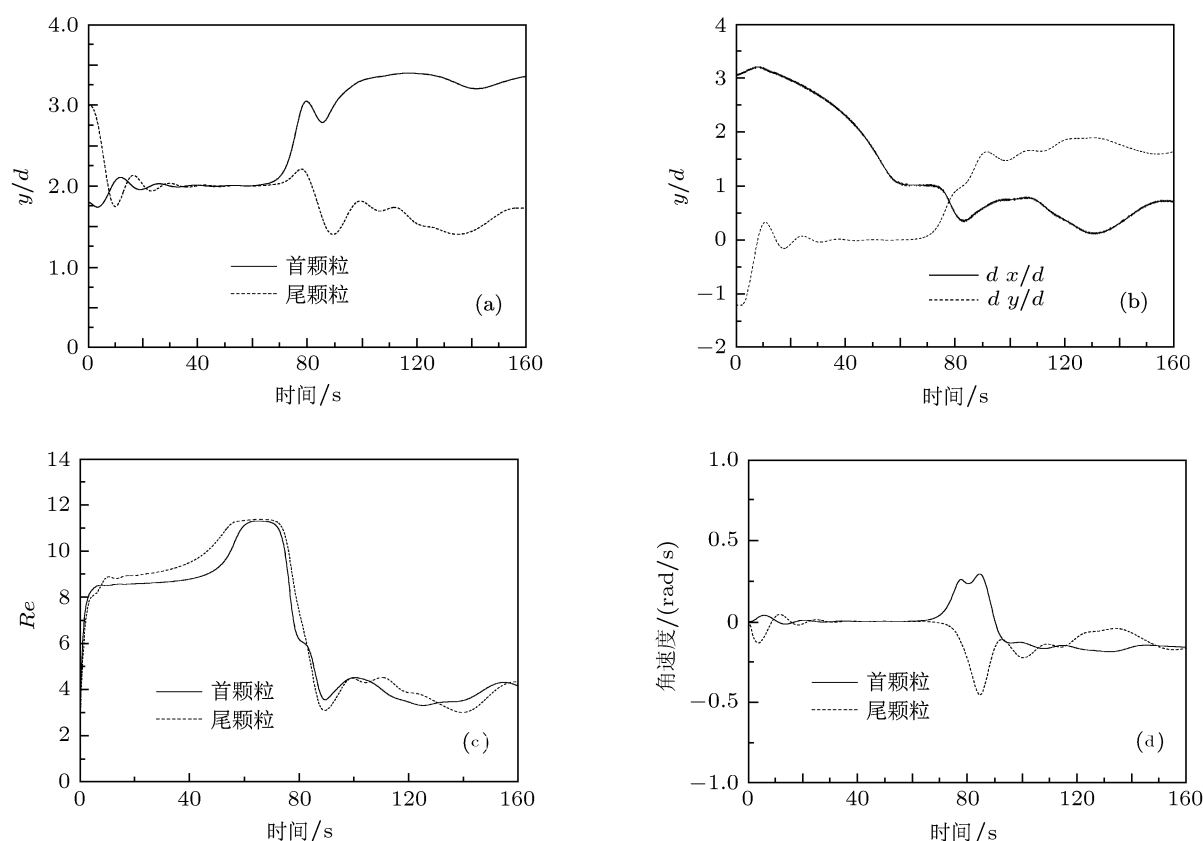


图3 等温条件下双颗粒沉降规律 (a) 双颗粒水平方向的轨迹; (b) 双颗粒垂直及水平方向无量纲距离; (c) 双颗粒垂直方向沉降雷诺数; (d) 双颗粒角速度 (负值对应顺时针方向)

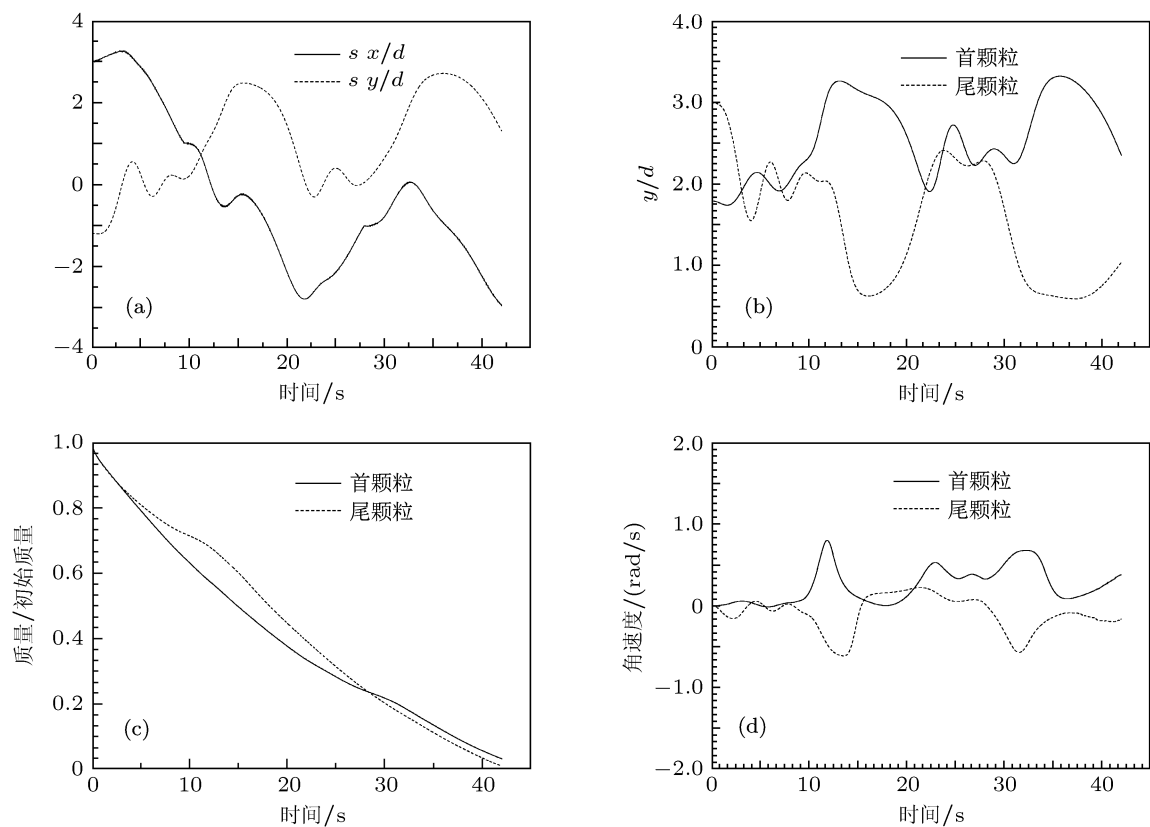


图4 为颗粒溶解时双颗粒沉降规律 (a) 双颗粒垂直及水平方向无量纲距离; (b) 双颗粒水平方向的轨迹; (c) 颗粒质量随时间变化的关系; (d) 颗粒角速度

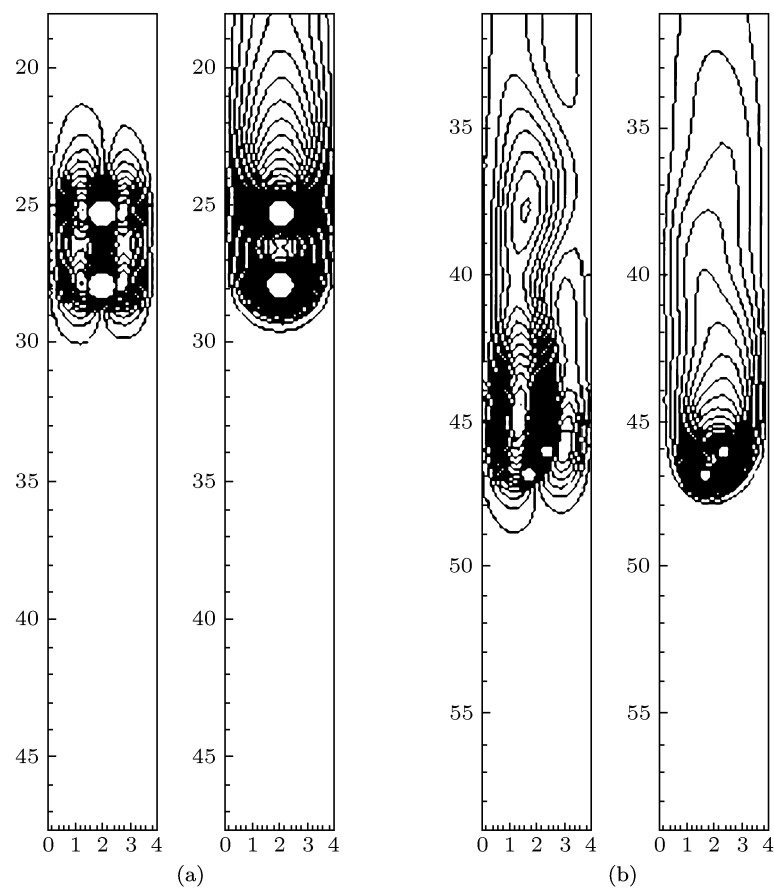


图5 30 s 时不同情况下两相流场的流线和等温线 (a) 等温颗粒沉降流线和等温线; (b) 溶解及热对流流场的流线和等温线

颗粒在热液体内边沉降边溶解, 颗粒初始释放位置与惰性等温颗粒相同. 图 4 为颗粒间距离、颗粒轨迹、颗粒质量变化以及颗粒角速度变化. 在初始阶段, 两颗粒朝通道中心线相向运动, 在 12 s 左右后颗粒便加速进入前颗粒尾迹区域. 由于颗粒溶解, 质量逐渐减小, 两颗粒相互作用变弱, 致使后颗粒靠近前颗粒后超过前颗粒, 并在此后沉降过程中始终保持在前. 后颗粒靠近时, 前颗粒朝一侧壁面运动, 其逆时针角速度不断加速, 在到达壁面附近时达到最大值. 同时颗粒间的相互排斥作用迅速增大, 使尾部颗粒顺时针也快速转动, 导致后颗粒朝另一侧壁面运动. 到达壁面附后受壁面作用, 两颗粒又朝通道中心线相向运动. 此后的过程中, 基本重复此前的运动阶段, 但由于颗粒溶解, 质量及半径减小, 颗粒间相互作用减弱. 与等温双颗粒沉降

相比, 虽然由于溶解使颗粒间相互作用减弱, 但由于溶解颗粒尾部对流引起了涡的脱落 (图 5) 以及颗粒表面形态变化是溶解颗粒摆动频率较大的原因.

5 结 论

颗粒的溶解速度由固体颗粒的热力学性质、周围流体的自然对流、以及颗粒表面不同位置决定. 而颗粒表面温度梯度决定了颗粒表面的热流密度, 从而决定了颗粒的溶解速度. 颗粒溶解速度产生了颗粒表面的不同形态; 与等温条件下颗粒沉降相比, 溶解双颗粒沉降时, 颗粒运动轨迹、颗粒间的相互作用除与颗粒质量相关外, 还与对流引起的颗粒尾迹、涡的脱落有关.

-
- [1] Juric D, Tryggvason G 1998 *Int. J. Multiphase Flow*. **24** 387
 - [2] Guardo A, Coussirat M 2007 *Chemical Engineering Science* **62** 5503
 - [3] McLeod, P, Riley D S 1996 *J. Fluid Mech.* **327** 393
 - [4] Shigeo A, Hideo I 2001 *Int. J. Therm. Sci.* **40** 724
 - [5] Mezhericher M, Levy A, Borde I 2008 *Chem. Eng. Sci.* **63** 12
 - [6] Zhao S Y, Xue M S 2006 *J. Comput. Phys.* **217** 424
 - [7] Hao Y, Prosperetti A 1998 *APS/DFD Annual Meeting*, Philadelphia.
 - [8] Feng, Hu, Joseph D D 1994 *J. Fluid Mech.* **261** 95
 - [9] Hu, Joseph D D 1992 *Fluid Dyn.* **3** 285
 - [10] Gan H, Chang J Z, Hu F 2003 *J. Fluid. Mech.* **481** 385
 - [11] Liu H T, Tong Z H, An K, Ma L Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6369 (in Chinese) [刘汉涛, 全志辉, 安康, 马理强 2009 物理学报 **58** 6369]
 - [12] Liu H T, Chang J Z, Zn K, Su T X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1877 (in China) [刘汉涛, 常建忠, 安康, 苏铁熊 2010 物理学报 **59** 1877]
 - [13] Kuehn, Goldstein 1976 *J. Fluid Mech.* **74** 695
 - [14] McLeod P, Riley D S, Sparks R S J 1996 *J. Fluid Mech.* **327** 393
 - [15] Kerr, R C 1994 *J. Fluid Mech.* **280** 255

Direct simulation of melting solid particles sedimentation in a Newtonian fluid*

Tong Zhi-Hui Liu Han-Tao Chang Jian-Zhong[†] An Kang

(The Lab. of Energy & Environment and Computational Fluid Dynamic, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(Received 13 February 2011; revised manuscript received 28 March 2011)

Abstract

The influence on the motion of single solid particles in a Newtonian fluid by melting and convection is directly simulated. The fluid motion is computed from the conservation laws. Density and viscosity change with fluid temperature, and the particle moves according to the equation of motion of a rigid body under the action of gravity and hydrodynamic forces arising from the motion of the fluid. In the process of melting, a distinctive morphology develops due to the different heat fluxes around the particle's surface, and the thermal gradient determines the melting rate. The phases are coupled by the fluid-particle mutual force, force moment and the boundary conditions. In our study, two different situations are carried out, which are sedimentation in isothermal fluid without thermal convection and melting; sedimentation with thermal convection and melting, two double particles are simulated separately. The results show that the vortex shedding arising by the natural convection, mass losing by melting and melting morphology change the sedimentation velocity and induce horizontal oscillation.

Keywords: melting, two-phase flows, direct numerical simulation, sedimentation

PACS: 44.25.+f, 47.11.-j

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50976108), the Natural Science Foundation for Young Scientists of Shanxi Province, China (Grant No. 2008021004), and the Foundation of North University of China.

[†] E-mail: changjz01@nuc.edu.cn