

重力条件对稠密气固两相流动特性影响的数值模拟

刘 阳¹, 陆慧林², 黄本诚¹

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京市海淀区 100094;
2. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

NUMERICAL SIMULATION OF DENSE GAS-SOLID TWO-PHASE FLOW CHARACTERS AFFECTED BY GRAVITY CONDITIONS

LIU Yang¹, LU Hui-lin², HUANG Ben-cheng¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Haidian District, Beijing 10094, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: An Euler-Euler two fluid model was applied to study the dense gas-solid two-phase flow behaviors with the aerospace and ground gravity conditions in gas-fluidized reactor. Discrete medium characters of particles were considered on the basis of the kinetic theory of dense gases and the kinetic theory of granular in this model. Turbulence flow of gas phase was modeled by the large eddy simulation. Detailed results on particles concentration and velocity, gas velocity and small-scale particles fluctuation intensity originated from the particle-particle collision were numerically simulated. The calculate results showed gravity conditions took greatly effects on the dense particles-fluid dynamic characters, the decrease of gravity was in favor of generating the heterogeneous structure and enhancing the small-scale particles fluctuation intensity.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Gravity conditions; Dense gas-solid two-phase flow; Two fluid model; SGS model; Numerical simulation

摘要: 基于稠密气体分子运动论和颗粒动力学, 考虑颗粒与颗粒之间离散介质特性, 应用稠密气固两相流动的欧拉-欧拉双流体数学模型, 采用大涡模拟求解气相湍流流动, 数值模拟航天环境中部分重力条件和地面重力条件下气-固反应器内稠密气固两相流体的流动行为, 得到了颗粒浓度、气相和颗粒相速度以及源于颗粒间碰撞而产生小尺度颗粒脉动强度的详细分布。计算结果表明: 重力条件是影响稠密颗粒流体动力特性的重要因素, 重力降低有利于在系统中产生非均匀结构和增强小尺度颗粒脉动强度。

基金项目: 国家自然科学基金项目(10072019)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China(10072019).

关键词: 热动力工程; 重力条件; 稠密气固两相流动; 双流体模型; 大涡模拟; 数值模拟

1 引言

稠密气固两相流动广泛应用在工业领域中, 如气力输送、固体火箭推进器和循环流化床等, 其中流体动力特性是反映气固流化质量最重要的因素^[1-2]。模拟稠密气固两相流动的数学模型主要分为两类: 欧拉-欧拉双流体模型^[3]和欧拉-拉格朗日离散颗粒模型^[4-8]。在双流体模型发展历程中最重要的贡献在于考虑了因颗粒和颗粒之间相互作用而产生的颗粒应力。目前, 处理颗粒应力的方法主要有两类: 一类是由 Pritchett 等(1978)^[9]、Bouillard 等(1989)^[10]、Lychzkowski 等(1993)^[11]和 Gera 等(1998)^[12]提出的固体弹性模量模型法, 它将颗粒应力类似于固体力学中的弹性模量并在颗粒相动量守恒方程中引入固体弹性模量的概念, 缺点在于弹性模量为经验式乏理论依据。另一种重要的方法是由 Savage (1981)^[13] 首先类比分子动力学方法来研究气固两相颗粒流的颗粒动力学法, Sinclair 等(1989)^[14] 首先将此方法引入到气固两相流动的数值模拟, 建立壁面上颗粒速度和湍动能梯度分布模型, 模拟了垂直管中考虑颗粒间碰撞的气固两相流动的压力场和速度场的分布。Ding 等(1990)^[15]从 Boltzmann 积分-微分方程入手定义了颗粒温度概念, 其定义为:

$q = \bar{C}^2 / 3$, 其中 \bar{C} 为颗粒的脉动速度, 物理意义在于反映颗粒之间碰撞而产生的小尺度的脉动强度。

迄今为止, 在部分重力条件下对两相流动的流动特性的研究尚未见报导。部分重力条件主要应用在航天领域, 航天器从地面到太空所受到重力影响主要经历了超重和失重两种状态。其中超重时间阶段较短, 大部分时间都处在失重状态下。本文针对于此, 应用欧拉-欧拉双流体稠密气固两相流动数学模型, 将颗粒应力建立在颗粒温度基础之上, 采用重力源相考虑重力条件的影响, 将颗粒作为拟流体并采用类似于 Navier-Stokes 方程的形式处理, 考虑气固两相相间作用以及气相湍流流动的动力粘度并采用大涡模拟方法求解, 研究不同重力条件对稠密气固流动特性的影响。

2 数学模型

2.1 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{e}_k \mathbf{r}_k) + \nabla \cdot (\mathbf{e}_k \mathbf{r}_k \mathbf{n}_k) = 0 \quad (1)$$

式中 当 $k = g$ 时表示对于气相, $k = s$ 时表示对于固相; \mathbf{r}_k 为 k 相的密度; \mathbf{e}_k 为 k 相的容积份额; \mathbf{v}_k 为 k 相的速度; t 为时间。

2.2 气相动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{e}_g \mathbf{r}_g \mathbf{n}_g) + \nabla \cdot (\mathbf{e}_g \mathbf{r}_g \mathbf{n}_{g,g}) = -\nabla P_g + S_{g,g} + \nabla \cdot \mathbf{t}_g + \mathbf{b}(\mathbf{n}_g - \mathbf{n}_s) \quad (2)$$

式中 P_g 为气相的压力; \mathbf{b} 为气固相间曳力系数; \mathbf{t}_g 为气相应力张量; $S_{g,g}$ 为气相重力源相。其中, 气相重力源相为

$$S_{g,g} = \mathbf{e}_g \mathbf{r}_g g \quad (3)$$

气相应力张量为

$$\mathbf{t}_g = \mathbf{m}_g [\nabla \mathbf{n}_g + (\nabla \mathbf{n}_g)^T] - \frac{2}{3} \mathbf{m}_g (\nabla \cdot \mathbf{n}_g) \mathbf{I} \quad (4)$$

$$\mathbf{m}_g = \mathbf{m}_{g,lam} + \mathbf{m}_t \quad (5)$$

其中, \mathbf{I} 为单位张量; \mathbf{m}_g 为气体剪切粘度; $\mathbf{m}_{g,lam}$ 为流体层流动力粘度; \mathbf{m}_t 为气相流体湍流动力粘度; g 为重力加速度, 假定气体为不可压缩, 密度为常量。

气相湍流采用大涡模拟方法, 克服工程中常用的 $k-e$ 双方程中只考虑气相层流的粘性系数而忽略湍流粘性系数的缺点(认为 $\mathbf{m}_t = 0$), 即对气相大尺度涡直接求解 Navier-Stokes 方程, 而小尺度涡通过建立 SGS 湍流模型求解^[16], 气相粘性系数为

$$\mathbf{m}_t = \mathbf{r}_g (0.1\Delta)^2 \sqrt{S_g : S_g} \quad (6)$$

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (7)$$

$$S_g = \frac{1}{2} [\nabla \cdot \mathbf{u}_g + \nabla \cdot \mathbf{u}_g^T] \quad (8)$$

2.3 固相动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{e}_s \mathbf{r}_s \mathbf{n}_s) + \nabla \cdot (\mathbf{e}_s \mathbf{r}_s \mathbf{n}_s) = S_{s,s} + \nabla \cdot \mathbf{t}_s - \mathbf{b}(\mathbf{n}_g - \mathbf{n}_s) \quad (9)$$

式中 P_s 为固相的压力; \mathbf{t}_s 为固相应力张量; $S_{s,s}$ 为固相重力源相^[3,15]。

固相重力源相为

$$S_{s,s} = \mathbf{e}_s \mathbf{r}_s g \quad (10)$$

固相应力张量为

$$\mathbf{t}_s = (-p_s + \mathbf{e}_s \mathbf{x}_s \nabla \cdot \mathbf{n}_s) \mathbf{d}_{ij} - 2\mathbf{e}_s \mathbf{m}_s S_s \quad (11)$$

$$S_s = [\nabla \mathbf{n}_s + (\nabla \mathbf{n}_s)^T] / 2 - \nabla \mathbf{n}_g / 3 \quad (12)$$

固相压力为

$$p_s = \mathbf{e}_s \mathbf{r}_s q [1 + 2(1+e)g_0 \mathbf{e}_s] \quad (13)$$

式中 e 为颗粒弹性恢复系数, $e=0.9999$ ^[3]。

固相动力粘度为

$$\mathbf{m}_s = \frac{4}{5} \mathbf{e}_s^2 \mathbf{r}_s d_s g_0 (1+e) \sqrt{\frac{q}{\pi}} + \frac{10 \mathbf{r}_s d_s \sqrt{\pi q}}{96(1+e) \mathbf{e}_s g_0} [1 + \frac{4}{5} g_0 \mathbf{e}_s (1+e)]^2 \quad (14)$$

固相表观粘度为

$$\mathbf{x}_s = \frac{4}{5} \mathbf{e}_s \mathbf{r}_s d_s g_0 (1+e) (q/\pi)^{1/2} \quad (15)$$

径向分布函数 g_0 采用 Bagnold(1954)^[17]的

$$g_0 = \left[1 - (\mathbf{e}_s / \mathbf{e}_{s,max})^{1/3} \right]^{-1} \quad (16)$$

Ding 等(1990)^[13]所采用的径向分布函数将式(16)乘以 0.6, 给模型带来了缺陷。径向分布函数的含义为对于低颗粒浓度时, 径向分布函数应趋于 1, 并随着稠密程度的增加, 逐渐增大, 当颗粒紧密的堆积在一起, 以至于不能运动时, 径向分布函数变得无穷大。

\mathbf{b} 为气固相间阻力系数, 当 $\mathbf{e}_g \geq 0.8$ 时

$$\mathbf{b} = \frac{3}{4} C_D \frac{\mathbf{e}_s \mathbf{e}_g \mathbf{r}_g |\mathbf{n}_g - \mathbf{n}_s|}{d_s} \mathbf{e}_g^{-2.65} \quad (17)$$

当 $\mathbf{e}_g < 0.8$

$$\mathbf{b} = 150 \frac{\mathbf{e}_s^2 \mathbf{m}_g}{\mathbf{e}_g d_s^2} + 1.75 \frac{\mathbf{r}_g \mathbf{e}_s |\mathbf{n}_g - \mathbf{n}_s|}{d_s} \quad (18)$$

其中, C_D 为阻力系数, 当 $Re_p < 1000$ 时

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left[1 + 0.15 (Re_p)^{0.687} \right] \quad (19)$$

当 $Re_p \geq 1000$

$$C_D = 0.44 \quad (20)$$

$$\text{其中 } Re_p = \frac{e_g r_g |n_g - n_s|}{m_g} \quad (21)$$

2.4 固相脉动能量方程

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (e_s r_s q) + \nabla \cdot (e_s r_s q n_s) \right] = \nabla \cdot (k_s \nabla q) - g_s - 3bq \quad (22)$$

式中 g_s 为颗粒间碰撞能量耗散, 用公式表示为^[3,15]

$$g_s = 3(1-e)^2 e_s^2 r_s g_0 q \left[\frac{4}{d_s} \left(\frac{q}{\pi} \right)^{1/2} - \nabla \cdot n_s \right] \quad (23)$$

脉动能量传递系数为

$$k_s = 2e_s^2 r_s d_s g_0 (1+e) (q/\pi)^{1/2} \quad (24)$$

3 计算对象和数值模拟方法

3.1 计算对象

二维气固流化反应器几何结构如图 1 所示, 颗粒相和反应器基本参数如表 1 所示, 反应器上半部分是自由开口。

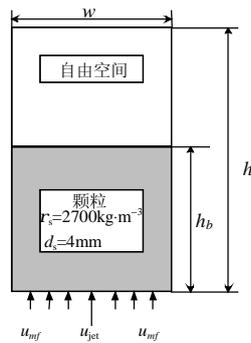


图 1 二维气固流化反应器几何结构

Fig.1 Geometry of two dimensional gas-fluidized reactors

表 1 计算参数

Tab. 1 Parameters of calculation

参数	数值	参数	数值
颗粒形状	球形	反应器宽/mm	580
颗粒材料	铝	反应器高/mm	1000
颗粒密度 r_s /(kg/m ³)	2700	网格宽度 D_x /mm	20
颗粒直径 d_s /mm	4	网格高度 D_y /mm	20
颗粒初始体积浓度比 α_0	0.4	网格数量 N_x /个	21
颗粒堆积体积浓度比 α_{max}	0.6413	网格数量 N_y /个	42
颗粒初始堆积高度 h_b /mm	600	射流孔直径 d_{jet} /mm	20
气体动力粘度 m_f /(kg·m/s ⁻¹)	1.789×10^{-5}	最小流化速度 u_{mf} /(m/s)	1.77
气体密度 r_g /(kg/m ³)	1.225	射流气速 u_{jet} /(m/s)	30

3.2 初始条件

高速射流气体从底部中间位置喷入, 其余部分以最小流化速度均匀进入。颗粒的轴向和径向速度均为零。计算网络见图 2, 网络标识及其相应类型见表 2。

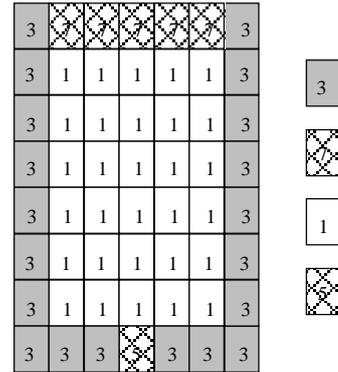


图 2 气体运动的计算网格

Fig. 2 Calculation cells of gas motion

表 2 网格标识及其相应类型

Tab. 2 Type and flag of cells

网格标识	性质
1	内部网格, 不限定边界条件
3	壁面网格, 无穿透性, 无滑移边界条件
5	入口网格, 需要限定速度
7	出口网格, 变量的梯度为零

4 计算结果与讨论

4.1 空隙率和颗粒速度

图 3 表示重力条件分别为 $g=9.8m/s^2$ 和 $g=0.98m/s^2$ 时, 不同时刻下空隙率和颗粒速度的计算结果。其中(a)、(c)和(b)、(d)代表上述的两种重力条件情况(因计算结果很多, 只取部分)。从图中可以看出, 当射流气体流经射流孔进入到反应器内时, 原来处于射流孔处阻挡气流进入的颗粒被向上推开, 局部空隙率快速增长, 在此位置处开始生成了气泡。气泡的出现诱发了气固系统呈现不稳定状态。因气泡底部压力较小, 周围的颗粒从底部进入气泡, 迫使气泡脱离射流孔, 形成气泡单独作上升运动并逐渐长大, 最后在表面破裂。由于气泡的出现, 导致颗粒间发生激烈的碰撞, 促进了颗粒的混合。

计算结果表明, 反应器内颗粒和气泡运动对重力的变化非常敏感。当重力条件为地面时, 气泡一旦产生之后, 迅速通过堆积的颗粒向反应器表面层移动, 在反应器内部滞留的时间较短, 并且气泡容易破裂, 气泡体积明显小于后者。从颗粒速度矢量图看出, 破碎气泡周围颗粒发生了明显的循环现象, 气相和固相之间的作用非常强烈, 但没能够形成颗

粒在整个反应器内循环。当重力条件为 0.1 倍地面重力时，形成了体积较大的气泡，并且气泡滞留在反应器内的时间较长。从颗粒速度矢量图看出，由于气泡能够贯穿并且维持整个反应器的高度，颗粒形成了在整个反应器内的循环。

重力条件影响作用的解释：颗粒流体系统不稳定性特征是当系统平衡遭到破坏后，气体不会均匀地穿过颗粒层，而是出现了一种非均匀结构——空隙率快速增长的现象，即类似于气泡的形状。当射

流气体的速度超过最小流化速度时，一部分“多余”的气体将以气泡的形式通过反应器表层，形成初始气泡或者初始射流。颗粒相受气相的影响程度主要通过曳力的大小来反映，而曳力与空隙率密切相关，空隙率越低，则曳力越大。当曳力大于颗粒重力时，便促使颗粒向上运动，导致局部的空隙率加大形成了初始气泡，伴随气泡长大，空隙率逐渐加大，气体对颗粒曳力又逐渐减小，当颗粒重力大于曳力时，则出现颗粒下落现象。在流化过程的最初期，所形

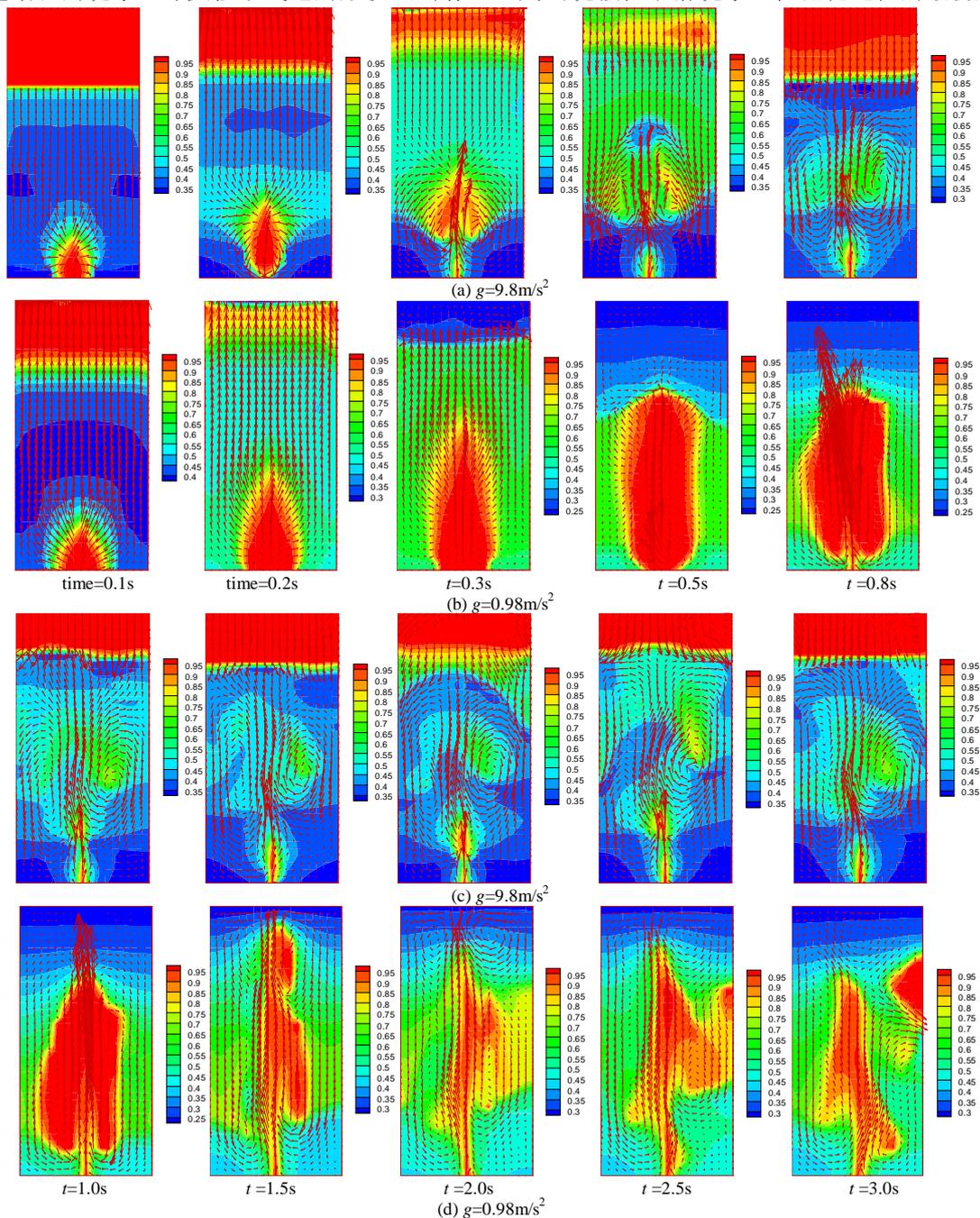


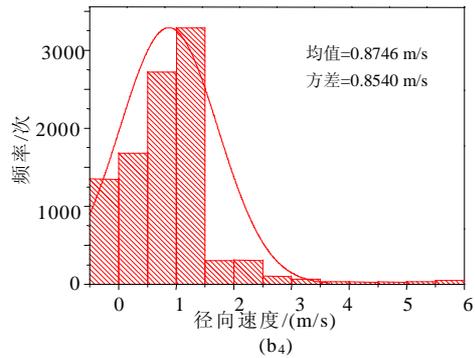
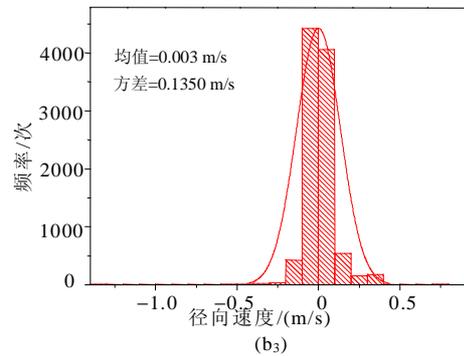
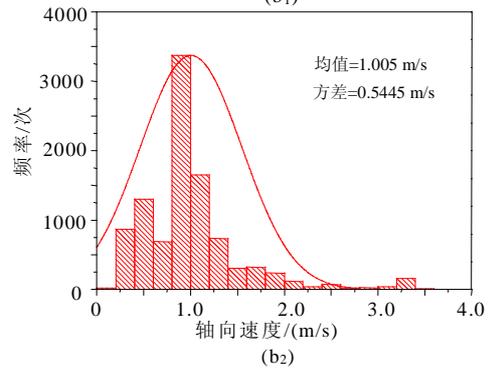
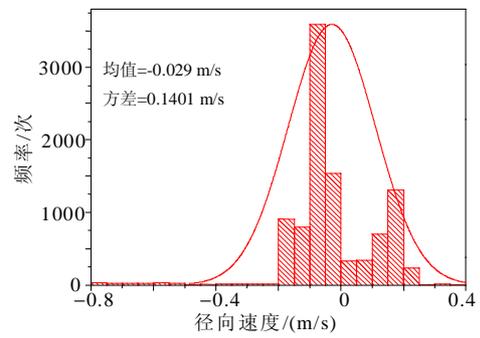
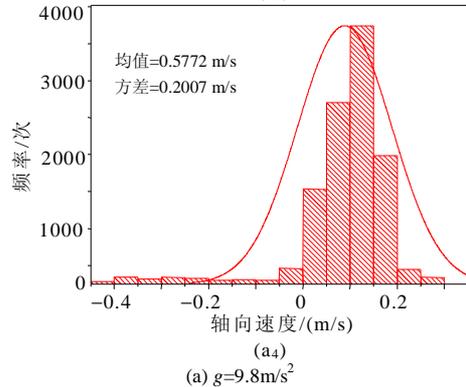
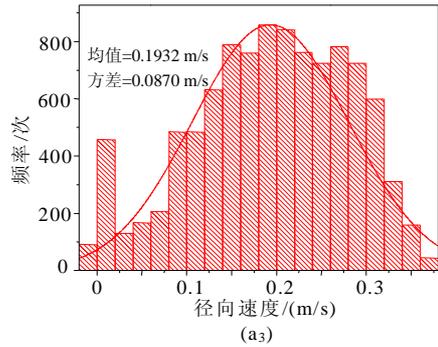
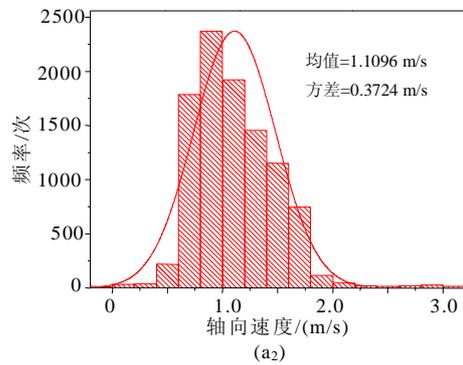
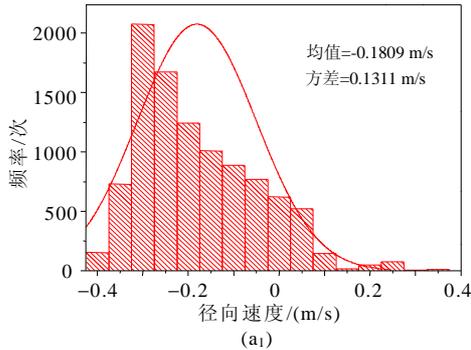
图3 不同重力条件下空隙率和颗粒速度的计算结果

Fig. 3 Calculation results of porosity and particle velocity under different gravity conditions

成气泡体积和形状十分接近，但随着空隙率逐渐增大，重力作用的结果逐渐明显，重力加速度越大，颗粒越容易回落，气泡形状越不易保持，反之亦然。

4.2 颗粒速度计算结果的直方图

图 4 表示反应器内在不同高度处、不同重力环境下（取值点在床宽的 1/2，高度分别为 24cm 和 50cm）颗粒速度分布的直方图，并给出颗粒速度的数学期望和方差。其中：(a)表示 $g=9.8\text{m/s}^2$ ，(b)表



(b) $g=0.98\text{m/s}^2$

图 4 颗粒速度直方图

Fig. 4 Histogram of particles velocity

示 $g=0.98\text{m/s}^2$ ，(1)、(3)和(2)、(4)分别表示径向和轴向速度。为保证统计的精确性和样本的容量，计算时间为 10s，取样时间间隔定为 0.001s。数学期望描述了随机变量的取值中心即均值，方差表示随机变量的可能取值与均值偏差的疏密程度，即脉动程度。图中可见：颗粒轴向速度的均值和方差都要大

于径向的结果。这是由于在射流孔处轴向射流速度非常大并且空隙率变化剧烈,颗粒受到轴向流体的曳力作用非常强烈,导致轴向颗粒间碰撞频率剧增,速度变化显著,但径向较弱,速度的变化比较平缓。

在较小的重力条件下,颗粒速度轴向和径向的方差都要大于较大重力环境下的计算结果。由此可见方差的大小可以表示出颗粒间相互作用的程度,其值越大,颗粒脉动强度愈大,颗粒相互作用也愈强,反之亦然。比较两种重力条件的计算结果,可以看出,大气泡的长时间存在加大了颗粒间以及颗粒与气相间的相互作用。重力越小,颗粒间的碰撞效果越强,小尺度颗粒脉动强度越大。

5 结论

本文应用稠密气固两相流动欧拉-欧拉双流体模型,考虑颗粒间的离散介质特性并采用大涡模拟求解气相湍流,数值模拟不同重力条件下稠密颗粒流体系统的流动特性。模拟结果发现:①重力条件是影响稠密气固流动结构的重要因素,重力越小则越容易在系统中生成非均匀结构;②颗粒速度方差能够反映颗粒的脉动强度即颗粒间碰撞效果,其结果将随重力值下降而增大;③部分重力条件主要在航天空间环境中产生,研究结果为气固多相流动在未来空间应用进行了初步探索。

参考文献

- [1] 刘向军,徐旭常. 循环流化床稠密气固两相流动的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 161-165.
Liu Xiangjun, Xu Xuchang. Numerical simulation of the dense two-phase flow in a gas particle circulating fluidized bed [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 161-16
- [2] 樊建人,罗坤,金含辉,等. 直接数值模拟三维气固两相混合层中颗粒与流体的双向耦合[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 153-157.
Fan Jianren, Luo Kun, Jin Hanhui *et al.* Direct numerical simulation of the two-way coupling effects between particles and fluid in the three-dimensional particle-laden mixing[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 153-157.
- [3] Gidaspow D. Multiphase flows and fluidization[M]. San Diego: Academic Press Inc, 1994: 86-119.
- [4] Tsuji Y, Kawaguchi T, Tanaka T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed[J]. Power Technology, 1993, 77(1): 79-87.
- [5] Hoomans B P B, Kuipers J A M, Briels W J. Discrete particle simulation of bubble and slug formation in a two-dimensional gas-fluidized bed[J]. Chem. Eng. Sci. 1996, 51(1): 99-108.
- [6] 周浩生,陆继东. 流化床颗粒燃烧过程的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 212-217.
Zhou Haosheng, Lu Jidong. Coal combustion in a fluidized bed with DEM-LES simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 212-217.
- [7] 刘安源,刘石. 流化床内颗粒碰撞传热的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 161-165
Liu Anyuan, Liu Shi. Theoretical study on impact heat transfer between particles in fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 161-165.
- [8] 刘安源,刘石,马玉峰,等. 流化床锅炉热烟气点火过程的离散颗粒模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 120-124.
Liu Anyuan, Liu Shi, Ma Yufeng *et al.* Discrete particles simulation of hot gas ignition process of fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 120-124.
- [9] Prichett J W, Blake T R, Garg S K. A numerical model of gas fluidized beds[C]. AIChE Symp, 1978, 176(74): 134-148.
- [10] Bouillard J S, Lyczkowski R W, Gidaspow D. Porosity distribution in a fluidized bed with an immersed obstacle[J]. J. AIChE[J]. 1989, 35(6): 908-912.
- [11] Lyczkowsky R W, Gamwo I K, Dobran F *et al.* Validation of computed solids hydrodynamics and pressure oscillation in bubbling atmospheric fluidized bed[J]. Powder Technology[J]. 1993, 76(65): 65-76.
- [12] Gera D, Gautam M, Tsuji Y *et al.* Computer simulation of bubbles in large-particle fluidized beds. Powder Technology[J]. 1998, 98(1): 38-47.
- [13] Savage S B, Jeffery D J. The stress tensor in a granular flow at high shear rates[J]. J. Fluid Mech. 1981, 110(1): 255-272.
- [14] Sinclair J L, Jackson R. Gas-particle flow in a vertical pipe with particle-particle interaction[J]. J. AIChE. 1989, 35(6): 1473-1486.
- [15] Ding J, Gidaspow D. A bubbling fluidization model using kinetic theory granular flow[J]. J. AIChE, 1990, 36(4): 523-538.
- [16] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equation[J]. J. Chem. Phys. 1963, 91(6): 99-164.
- [17] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in Newtonian fluid under shear[J]. Proc. Roy. Soc. 1954, A(225): 49-63.

收稿日期: 2005-05-16。

作者简介:

刘阳(1972-),男,博士后,从事气固两相流动和航天器热控仿真研究;

陆慧林(1956-),男,博士,教授,博士生导师,从事气固两相流动和流态化工程研究;

黄本诚(1937-),男,研究员,博士生导师,从事空间环境工程技术研究。