

采用颗粒团离散单元方法研究颗粒浓度的非均匀分布

刘向军¹, 石磊¹, 徐旭常²

(1. 北京科技大学热能工程系, 北京市 海淀区 100083; 2. 清华大学热能工程系, 北京市 海淀区 100084)

Study on Non-uniformity of Particle Distribution Using Cluster Discrete Element Method

LIU Xiang-jun¹, SHI Lei¹, XU Xu-chang²

(1. Thermal Engineering Department, University of Science & Technology, Haidian District, Beijing 100083, China;

2. Thermal Engineering Department, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Particle interactions result in non-uniform distribution of the particle in a flow field especially in dense particle-gas two-phase flow, and most particles are congregated as clusters. The particle cluster is directly treated as one discrete phase, the cluster discrete element method (DEM) including calculation expression of the cluster instant size, cluster motion and collision models and the corresponding algorithm are established, thus the real motion and collision process of each particle cluster in a flow field are described. This method is used to numerically study three types of two-phase flow, and detailed results regarding the cluster motion, reforming and the dense two-phase flow characteristic in different flow field are obtained. The developing process of non-uniformity of particle distribution is visualized. Detailed information of the cluster formation, cluster distribution and size are obtained. Calculated results show that in uniform gas flow field, particle evenly congregates; while in non-uniform gas flow field, non-uniformity of particle distribution intensifies. These results are reasonable and are agreement with previous experimental and calculating ones. It shows the cluster DEM model can reveal the dense two-phase flow characteristic in deed, and the computational memory and computational time are effectively reduced.

KEY WORDS: non-uniformity; particle distribution; cluster discrete element method; dense two-phase flow

摘要: 气固两相流中尤其是稠密气固两相流中颗粒浓度在空间的分布总是非均匀, 局部颗粒聚集。该文直接以颗粒团为研究对象, 采用颗粒团离散单元方法(DEM), 建立非球形颗粒团的运动碰撞的模型与算法, 基于真实碰撞, 跟踪每个颗粒团的运动, 模拟3种均匀或非均匀流场内的颗粒团运动经

历。计算结果展现了颗粒浓度非均匀局部聚集的过程, 揭示不同工况下流场中颗粒团的大小, 颗粒分布及局部颗粒聚集的规律, 结果表明在均匀流场中, 颗粒均匀密集, 非均匀流场中, 颗粒浓度的非均匀性加剧。所得计算结果合理, 与前人的模拟结果及实验结果相符。同时计算表明, 采用颗粒团DEM模型能真实地揭示稠密气固两相流的特性, 并使计算量有效减少。

关键词: 非均匀; 颗粒浓度; 颗粒团离散单元方法; 稠密气固两相流

0 引言

稠密气固两相流中由于颗粒浓度大, 颗粒之间相互作用强烈, 碰撞频繁, 使得稠密气固两相流中有很多重要的现象, 如颗粒在流场中分布不均匀, 局部颗粒聚集等^[1-2]。已有研究表明, 在中高浓度气固两相流中, 有时甚至在浓度很低时, 颗粒在空间的分布都是非均匀的^[2-3], 在每个瞬时, 总是局部浓度高, 而另一部分局部浓度低, 颗粒浓度的这种非均匀分布对中高浓度气固两相流动和反应过程产生了根本的影响, 详细研究这一现象, 揭示其非均匀分布规律, 对气固两相反应流的发展与应用具有重要意义。

研究颗粒浓度的非均匀分布规律, 必须真实地模拟颗粒之间的相互作用。DEM(discrete element method)模型直接对每个颗粒进行跟踪, 揭示颗粒之间复杂相互作用过程, 可较真实地模拟出稠密气固两相流中颗粒相的经历, 是目前研究稠密气固两相流最强有力的工具。目前国内外已有不少研究者采用DEM模型跟踪稠密气固两相流中单个颗粒的运动来模拟稠密气固两相流^[4-6], 得到了很好的结果。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50406025)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50406025).

但由于受计算量的限制,到目前为止DEM模型尚未用于工程意义上的稠密气固两相流问题。

由于颗粒浓度分布总是非均匀的,在稠密两相流动中大部分颗粒总是聚集成团的,作为一个整体流体团在两相流场中运动^[7]。文献[8]直接将颗粒团作为两相流场中的离散相,在Cundall和Strack^[9]所提出的DEM软球模型的基础上,建立了颗粒团运动与碰撞的DEM模型,本文在文献[8]的基础上进一步完善了模型与算法,采用此模型与算法对比计算了3种均匀与非均匀流场内颗粒团的运动经历,模拟研究不同气相流场中颗粒浓度分布规律,揭示了不同流场中颗粒分布非均匀性的规律。

1 颗粒团的 DEM 软球模型

1.1 颗粒团的定义与大小

本文所指的颗粒团是指气固两相流中颗粒浓度较大的局部颗粒群体。采用颗粒团的DEM软球模型关键是确定颗粒团的大小。根据Chavan的理论,颗粒团的有效当量直径 l 与系统的能量输入 E_{in}^* ,也就是将连续的乳化相破碎成颗粒团所需要的那部分能量成反比^[10],即

$$l = K / E_{in}^* \quad (1)$$

对于确定的流动, K 为常数,表达式见文献[10], E_{in}^* 为外界输入能量与颗粒最小流化态所需能量 N_{smf} 之差,采用颗粒团的DEM软球模型,外界输入颗粒团的能量除外界气体输入能量 N_{st} 外还应包括其他颗粒团与之相作用所输入的能量 N_{cc} ,则

$$E_{in}^* = N_{st} + N_{cc} - N_{smf} \quad (2)$$

式中: $N_{st}=(n_i F_D \cdot u_g) / [(1-\varepsilon_i) \rho_s]$, $N_{smf}=[U_{mf}+U_p / (1-\varepsilon_{mf})]g$,其中 n_i 为颗粒数密度, F_D 为流体曳力, u_g 为当地流体速度, ε_i 为当地空隙率, ρ_s 为颗粒密度, U_p 为当地颗粒相的平均速度, U_{mf} 为最小流化态风速, ε_{mf} 为最小流化态对应的空隙率, ε_{max} 为最大空隙率,常取0.9997; $N_{cc}=\left| \sum_{j=1}^{N_p} (F_{ij} \cdot \Delta u_{ij}) \right| / m_i$,其中 F_{ij}

为颗粒团 j 对团 i 的接触力,由颗粒团碰撞模型确定。

1.2 颗粒团的运动与碰撞

目前DEM模型主要有软球模型和硬球模型2种形式^[11],其中软球模型将颗粒(团)之间的碰撞视为非弹性碰撞,能较真实地模拟颗粒(团)之间的碰撞过程,同时可以处理一个颗粒(团)与多个颗粒(团)之间的碰撞。采用DEM软球模型,颗粒所受到的力

除气流的作用力外,还包括颗粒团之间非弹性碰撞所带来的切向力和法向力。

根据Hertz接触理论,2颗粒团碰撞法向力可表示为^[12]

$$F_n = -(k_n \delta_n s_n / |s_n| + \eta_n v_n) \quad (3)$$

式中: k_n 为颗粒团的法向弹性系数; S_n 为2球心的法向相对位移(即法向位移); δ_n 为法向变形量; v_n 为2球的法向相对速度; η_n 为法向粘滞阻尼系数。

切向作用力根据Mindlin和Dereciwicz理论,其表达式为^[12]

$$F_t = \begin{cases} -\{\mu |F_n| [1 - (1 - |\delta_t| / \delta_{max})^{3/2}] v_t / |v_t| + \eta_t v_t\}, & \text{若 } |F_t| < \mu |F_n| \\ -\mu v_t |F_n| / |v_t|, & \text{若 } |F_t| \geq \mu |F_n| \end{cases} \quad (4)$$

式中: μ 为摩擦系数; δ_{max} 为未发生滑动时切向最大变形; η_t 为切向粘滞阻尼系数,其大小可视为与法向粘滞阻尼系数相同 v_t 为2颗粒(团)的切向相对速度。

这样,颗粒(团) j 对颗粒(团) i 作用的合力为: $F_{ij}=F_n+F_t$ 。

假设在某个瞬时与颗粒团 i 相接触的颗粒团总数为 N_p ,只考虑气动力和重力的影响,颗粒团的运动方程为

$$m_i \frac{dV_i}{dt} = \sum_{j=1}^{N_p} F_{ij} + F_D + m_i g \quad (5)$$

式中: m_i , V_i 为颗粒团 i 的质量和速度; F_D 为流体对颗粒团 i 的曳力,由于本文的研究对象是非球形的颗粒团,采用不规则形状颗粒团的阻力系数的表达式^[13]。

2 计算流程与时间步长的选取

采用上述颗粒团DEM模型确定颗粒团的运动与大小,每个时间步长对所有的颗粒(团)进行扫描,计算颗粒(团)所受的力及相应的速度、位移,在时间步长末考虑颗粒团的碰撞合并或破碎。若 $d_i > l_i = K_i / E_{in}^*$,颗粒团破碎,破碎后颗粒团的个数 $n = \text{int}(d_i^3 / l_i^3) + 1$,其中 $n-1$ 个颗粒团大小相同,直径均为 l_i ,第 n 个颗粒团的质量为 $m_n = m_i - (n-1)m_k$,破碎后颗粒的动能与质量成正比。若2颗粒团处于接触状态,根据接触后的速度判断颗粒团是分开还是合并,若接触后某个瞬时2颗粒团的速度差 $|\Delta V| < 0.01 |V_i|$,认为2颗粒团合并,合并后的颗粒团当量直径按质量折算,再判断合并后的颗粒团是否破

损, 若 $d_{ij} < l_i = K_i / E_m^*$, 颗粒团合并, 否则颗粒团破碎, 破碎后颗粒团的个数及速度计算同上所述。

在 DEM 软球模型中, 时间步长的选择十分重要。文献[14]提出了时间步长的经验计算式: $\Delta t \leq \pi / 5 \sqrt{m_i / k_n}$, 但计算实验表明采用上述时间步长也经常会出现在不合理的结果。一方面可能出现一个颗粒团从另一个颗粒团中“穿越”情况, 即 $\delta \geq d_i$; 另一种情况就是碰撞前后的颗粒动能之和不变或增加了。但若时间步长足够小, 上述 2 种不合理结果都能避免。本文在计算中首先取 $\Delta t = \min(\Delta t_m, \pi / 5 \sqrt{m_i / k_n})$, Δt_m 为最大允许的时间步长, 完成此时间步长内所有颗粒团的运动与碰撞计算后, 验证碰撞前后所有颗粒团是否满足 $\delta \geq d_i$ 及动能之和减小 $\sum m_i^n (V_i^n)^2 / 2 \leq \sum m_i^{n-1} (V_i^{n-1})^2 / 2$ 。若满足, 进行下一个时间步长的计算, 否则取 $\Delta t^{n+1} = \Delta t^n / 2$, 重复计算, 直到满足条件。

3 颗粒浓度的非均匀性研究

3.1 基本参数与网格划分

采用上述颗粒团的 DEM 模型, 本文对计算域为 $0.3\text{m}(X\text{方向}) \times 0.003\text{m}(Y\text{方向}) \times 0.6\text{m}(Z\text{方向})$ 内的 3 种不同流场情况进行了对比计算。为使问题简化, 便于比较和检验模型, 本文的计算中忽略气体和颗粒在 Y 方向的运动。 X 、 Z 方向的网格为 30×30 。计算的 3 种工况部分参数相同, 见表 1。

表 1 部分工况参数
Tab. 1 Calculation parameters

参数	数值
气体粘度 $\gamma_g / (\text{m}^2/\text{s})$	1.53×10^{-5}
气体密度 $\rho_g / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1.2
颗粒密度 $\rho_p / (\text{kg}/\text{m}^3)$	2000
颗粒弹性恢复系数 e	0.3
颗粒摩擦系数 μ	0.33
颗粒的弹性系数 $k_n / (\text{N}/\text{m})$	10.0
最大时间步长 $s/\Delta t_m$	10^{-6}

3.2 计算工况 1(均匀气相流场, 颗粒体积分数为 1.94%)

3.2.1 工况参数

计算域为 $0.3\text{m}(X\text{方向}) \times 0.003\text{m}(Y\text{方向}) \times 0.6\text{m}(Z\text{方向})$ 。在该区域内, 气相场速度均匀, 且不受颗粒相影响, 忽略 Y 方向的运动, Z 方向平均速度为 $2\text{m}/\text{s}$, X 方向平均速度为 0 , X 、 Z 方向上速度脉动范围为 $(-0.75\text{m}/\text{s}, 0.75\text{m}/\text{s})$ 。计算域内颗粒体积分数为 1.94% , 共 2×10^6 个颗粒, 单个颗粒的大小为 $100\mu\text{m}$ 。假设初始时刻颗粒聚集成团, 团内空隙率

为 50% , 每个颗粒团有 400 个颗粒, 颗粒团当量直径为 $928\mu\text{m}$, 则初始流场中共有 5000 个颗粒团, 假设初始时刻颗粒团在流场中均匀分布。忽略颗粒转动, 采用周期性边界条件, 即穿出某一边界的颗粒团将以同样速度从相对应的边界进入计算域, 从而保证计算域内颗粒体积分数不变。

3.2.2 计算结果与分析

图 1 为计算所得不同时刻的颗粒体积分数分布, $t=0\text{s}$, 颗粒团的直径均为 $928\mu\text{m}$, 在计算区域内均匀随机分布, 单元格内最大颗粒体积分数为 5.5% 。随着计算的进行, 颗粒团在气动力和碰撞力的作用下, 不断有颗粒团破碎或合并, 到 $t=0.01\text{s}$ 时, 颗粒团由 5000 个变为 5638 个, 颗粒团的最小当量直径为 $181.7\mu\text{m}$, 最大当量直径为 $1587.4\mu\text{m}$, 到 $t=0.02\text{s}$ 时, 颗粒团变为 9437 个, 颗粒团的最小当量直径为 $181.7\mu\text{m}$, 最大当量直径为 $1587.4\mu\text{m}$, 单元格内最大颗粒体积分数下降为 4.5% , 颗粒团个数不断增加, 小颗粒团越来越多, 平均当量直径越来越小, 到 $t=0.05\text{s}$ 后基本趋于稳定, 颗粒团变为 62524 个, 其中当量直径小于 $300\mu\text{m}$ 的占 30.35% , 在 $300 \sim 600\mu\text{m}$ 之间的占 66.78% , 在 $600 \sim 900\mu\text{m}$ 之间的占 1.5% , 大于 $900\mu\text{m}$ 的占 1.37% , 平均当量直径 $356\mu\text{m}$, 单元格内最大颗粒体积分数为 4.0% 。在整个计算过程中, 由于气相场均匀分布, 虽然局部颗粒密集, 但这种密集在全流场中是均匀分布的。本文的计算结果与文献[3]所采用的单颗粒 DEM 硬球模型模拟结果相一致。

3.3 计算工况 2(均匀气相流场, 颗粒体积分数为 3%)

3.3.1 计算工况

计算域同工况 1。在该区域内, Z 方向平均速度为 $5\text{m}/\text{s}$, X 方向平均速度为 0 , X 、 Z 方向上速度脉动范围为 $(-0.75\text{m}/\text{s}, 0.75\text{m}/\text{s})$ 。计算域内颗粒浓度为 3.0% , 单个颗粒的大小为 $100\mu\text{m}$, 共 3.1×10^6 个颗粒。初始场颗粒团的大小同工况 1, 则初始流场中共有 7750 个颗粒团, 忽略颗粒转动, 采用周期性边界条件。

3.3.2 计算结果与分析

图 2 为此工况下计算所得不同时刻的计算域内颗粒体积分数分布, 与工况 1 的计算结果相类似, $t=0\text{s}$, 颗粒团在计算区域内均匀随机分布, 单元格内最大颗粒体积分数为 8.0% 。到 $t=0.01\text{s}$ 时, 颗粒团由 7750 个变为 14135 个, 颗粒团的大小在 $181.7 \sim 1587.4\mu\text{m}$ 之间, 到 $t=0.03\text{s}$ 时, 颗粒团变为 72675

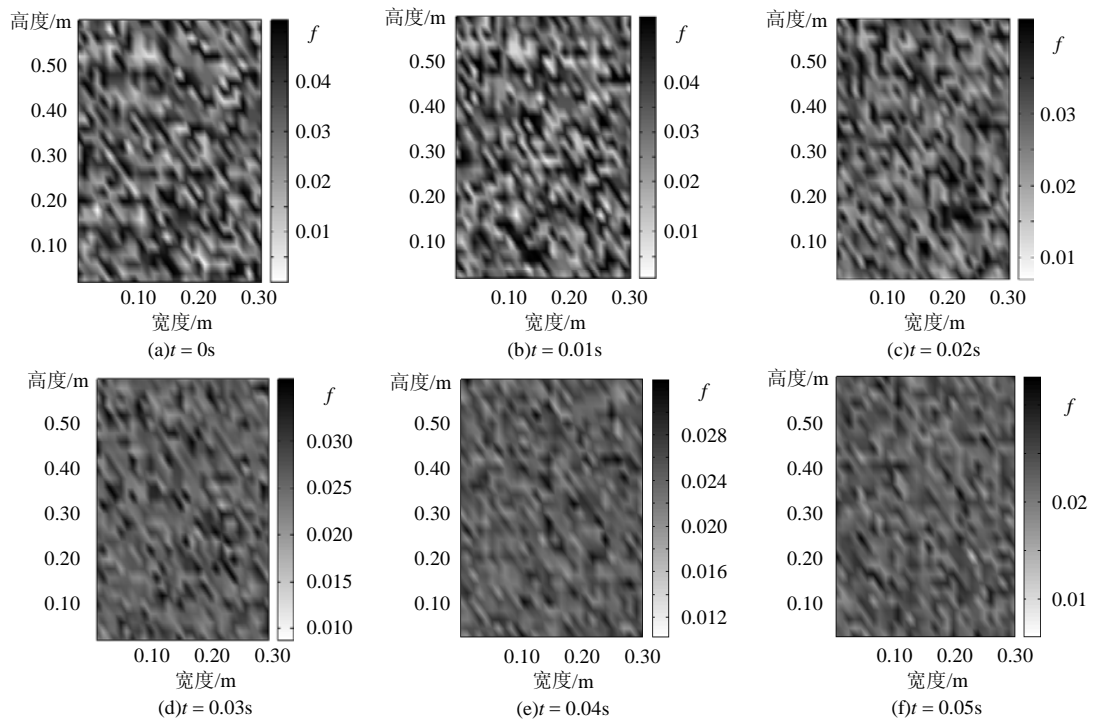


图 1 工况 1 不同时刻的颗粒体积分数分布 f

Fig. 1 Particle distribution at different time of case 1

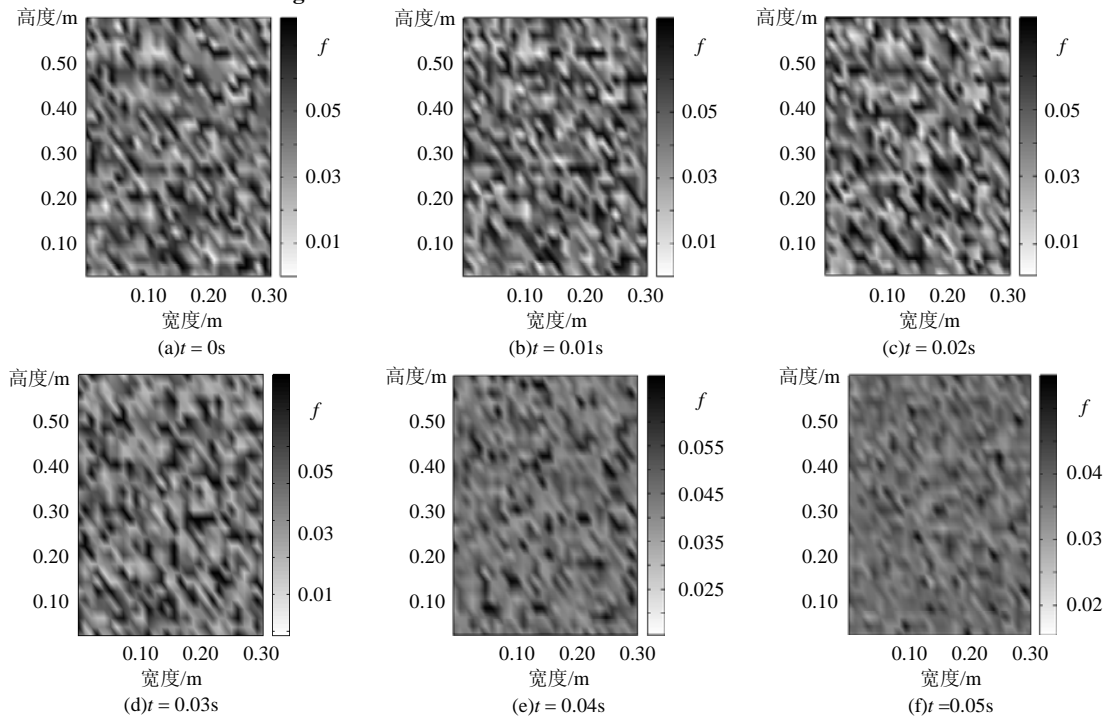


图 2 工况 2 不同时刻的颗粒体积分数分布 f

Fig. 2 Particle distribution at different time of case 2

个，当量直径范围为 $181.7\sim 1587.4\mu\text{m}$ ，颗粒团个数不断增加，小颗粒团越来越多，平均当量直径越来越小，到 $t=0.05s$ 后基本趋于稳定，颗粒团变为 59375 个，其中当量直径小于 $300\mu\text{m}$ 的占 12.71%，在 $300\sim 600\mu\text{m}$ 之间的占 85.62%，在 $600\sim 900\mu\text{m}$ 之间的占 1.47%，大于 $900\mu\text{m}$ 的占 0.20%，平均当量直径

$437.2\mu\text{m}$ ，单元格内最大颗粒体积分数为 6.0%。与工况 1 相同，由于气相场均匀分布，在整个计算过程中，颗粒局部密集在全流场中是均匀分布的。

3.4 计算工况 3(非均匀气相流场, 颗粒浓度为 3%)

3.4.1 计算工况

计算域同工况 1。气相场速度场不受颗粒相影

响, Z 方向的速度分布如图 3 所示, 截面上平均速度仍为 5m/s, X 方向平均速度 0, X、Z 方向上速度脉动范围为(-0.75m/s, 0.75m/s)。计算域内颗粒体积分数为 3.0%, 单个颗粒的大小为 100 μm , 共 3.1×10^6 个颗粒。初始场颗粒团的大小同工况 1, 则初始流场中共有 7750 个颗粒团, 忽略颗粒转动, 采用周期性边界条件。

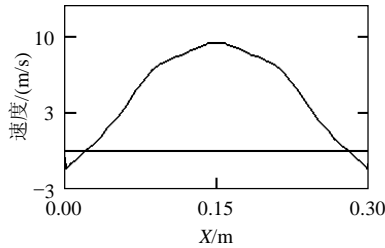


图 3 非均匀速度分布图

Fig. 3 Non-uniform gas velocity

3.4.2 计算结果与分析

图 4 为此工况下计算所得不同时刻的计算网格内颗粒体积分数分布, 此工况 1 下 Z 方向的速度分

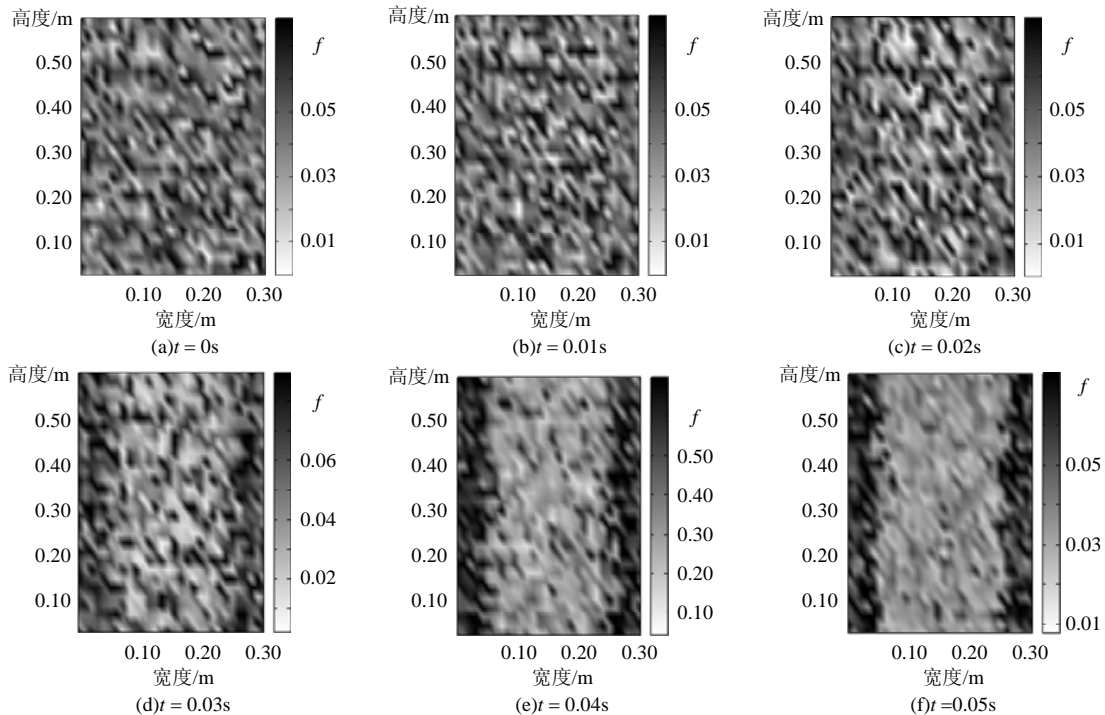


图 4 工况 3 不同时刻的颗粒体积分数分布 f

Fig. 4 Particle distribution at different time of case 3

了不同流场下颗粒的密集现象与规律。

在本文的计算中, 由于直接采用颗粒团进行模拟, 跟踪的对象数量减小, 如工况 2、3 中计算的颗粒数为 3.1×10^6 , 但在计算过程中最多跟踪的颗粒团数不超过 80000 个, 另外, 由于颗粒团较大, 本文计算中时间步长一般为 10^{-6}s , 而若以 $100\mu\text{m}$ 的单个颗粒作为研究对象, 采用 DEM 软球模型, 计算

布在截面上为非均匀分布, 中心高, 两侧低, 局部速度为负值, 这一速度分布是典型的循环流化床上部悬浮段气相速度分布图^[15]。 $t=0\text{s}$, 颗粒团在计算区域内均匀随机分布。随着计算的进行, 颗粒局部密集在全流场中不再是均匀分布的。两侧越来越浓, 中心越来越稀, 同时颗粒团个数也不断增加, 到 $t=0.05\text{s}$ 时, 颗粒团变为 32453 个, 当量直径范围为 $181.7 \sim 1587.4\mu\text{m}$, 其中中心区颗粒团较小, 均小于 $300\mu\text{m}$, 两侧颗粒团较大, 基本在 $600\mu\text{m}$ 以上。颗粒浓度的这种非均匀分布以及颗粒团大小的分布规律合理, 与前人实验结果相符^[16]。

由上述 3 种工况的计算结果分析表明, 采用颗粒团的 DEM 模型, 可以较精确地模拟出颗粒团在流场内的运动、接触碰撞及相应的破碎或合并过程。上述 3 种工况中, 气相速度均匀分布, 则颗粒局部密集现象也均匀分布; 非均匀分布时, 气相速度大的地方颗粒较稀, 颗粒团较小, 气相速度低的地方颗粒较浓, 颗粒团较大, 计算结果较好地揭示

实验表明时间步长一般为应取 10^{-8}s 以下, 采用颗粒团的 DEM 模型研究稠密气固两相流, 计算量减小了几百甚至上千倍。

4 结论

本文直接以颗粒团为研究对象, 采用颗粒团软球 DEM 模型, 建立了非球形颗粒团运动、接触碰

撞及颗粒团大小的计算表达式及算法。采用该模型与算法, 本文对均匀气相流场, 颗粒体积分数为 1.94%, 均匀气相流场, 颗粒体积分数为 3%, 非均匀气相流场, 颗粒体积分数为 3% 3 种工况下颗粒团的运动及碰撞经历进行了详细的模拟, 揭示了不同工况下颗粒团的大小, 颗粒的浓度分布规律, 计算结果合理, 与前人的模拟结果及实验结果相符。

采用颗粒团运动的DEM软球模型, 3 种工况计算了 2.0×10^6 个及 3.1×10^6 个颗粒在流场内的经历, 由于研究对象是颗粒团, 计算过程中最多跟踪的颗粒团数不超过 80000 个, 另外, 由于研究对象是较大的颗粒团, 时间步长一般为 10^{-6} s, 而若跟踪对象是 $100\mu\text{m}$ 的单个颗粒, 计算实验表明时间步长应取 10^{-8} s 以下, 采用颗粒团的DEM模型, 计算量减小了几百甚至上千倍。

参考文献

- [1] 徐旭, 池涌, 李斌, 等. 内旋流流化床床内颗粒运动特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 9-13.
Xu Xu, Chi Yong, Li Bin, et al. Experimental Study on particle motion characteristic in the internal circulating fluidized bed [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 9-13(in Chinese).
- [2] You Changfu, Zhao Hailiang, Cai Yi, et al. Experimental investigation of interparticle collision rate in particulate flow[J]. Int. J. of Multiphase Flow, 2004, 30(5): 1121-1138.
- [3] 刘敏, 张会强, 王希麟, 等. 稠密气固流动中颗粒聚集现象的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(2): 128-134.
Liu Min, Zhang HuiQiang, Wang Xi Lin, et al. Numerical simulation of cluster formation in dense gas-solid flow[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9(2): 128-134(in Chinese).
- [4] 陈敏, 袁竹林, 郜时旺. 移动床过滤除尘的直接数值模拟研究及实验对比[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 195-199.
Chen min, Yuan zhulin, Gao shiwang. Direct numerical simulation and experimental contrast of the moving granular bed dust filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 195-199(in Chinese).
- [5] 蔡桂英, 袁竹林. 用离散颗粒数值模拟对陶瓷过滤器过滤特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 203-207.
Cai Guiying, Yuan Zhulin. A study on the filtration performance of ceramic filter by numerical simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 203-207(in Chinese).
- [6] 尹斌, 章明川, 吴江, 等. L 型定向风帽化床床中气-固流动的离散元素法模拟及可视化研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 183-190.
Yin Bin, Zhang MingChuan, Wu Jiang, et al. Discrete particle simulation and visualized research of the gas-solid fluid in fluidized beds with l-type wind caps[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 183-190(in Chinese).
- [7] Liu H, Xia Y, Tung Y, et al. Micro-visualization of clusters in a fast fluidized bed[J]. Powder Technol, 1991, 66(1): 231-235.
- [8] 刘向军, 赵燕, 徐旭常, 等. 稠密气固两相流中颗粒团运动的 DEM 模型研究[C]. 中国工程热物理学会燃烧学学术会议, 北京, 2005: 285-292.
Liu Xiangjun, Zhao Yan, Xu Xuchang, et al. DEM method for dense gas-particle two-phase flow[C]. Proceeding of the 14th Chinese Engineering Thermophysics Conference on Combustion, Beijing, 2005: 285-292(in Chinese).
- [9] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [10] Li J, Kwauk M. Multiscal nature of complex fluid-particle systems [J]. Ind. Eng. Chem. Res, 2001, 40(2): 4227-4237.
- [11] Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a vertical pipe: on the effect of inter-particle collision. gas-solid flows[J]. ASME, 1991, 121(2): 123-128.
- [12] Kawaguchi T, Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of two-dimensional fluidized beds using the discrete element method (comparison between the two-and three-dimensional models) [J]. Powder Technology, 1998, 96(1): 129-138.
- [13] Trancong S, Gay M, Michaelides E E. Drag coefficients of irregularly shaped particles[J]. Powder Technology 2004, 139(1): 21-32.
- [14] Kuo H P, Knight P C, Parker D J, et al. The influence of DEM simulation parameters on the particle behaviour in a V-mixer [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(2): 3621-3638.
- [15] Lim K S, Zhu J X, Grace J R. Hydrodynamics of gas-solid fluidization[J]. Int. J. Multiphase Flow, 1995, 21(1): 141-193.
- [16] Dry R J. Radial concentration profiles in a fast fluidized bed [J]. Powder Technology, 1986, 49(1): 37-44.

收稿日期: 2007-01-28.

作者简介:

刘向军(1969—), 女, 博士, 副教授, 主要从事流动与燃烧过程的数值模拟研究, liuxj@me.ustb.edu.cn;

石磊(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事气固两相流动的数值模拟研究;

徐旭常(1932—), 男, 教授, 中国工程院院士, 从事洁净煤燃烧技术的研究。

(编辑 车德竞)