

# 循环流化床内稠密气固两相流动的数值模拟

刘向军<sup>1</sup>, 徐旭常<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学热能系, 北京 100083;

2. 煤的清洁燃烧技术国家重点实验室, 清华大学 北京 100084)

## NUMERICAL SIMULATION OF THE DENSE TWO-PHASE FLOW IN A GAS-PARTICLE CIRCULATING FLUIDIZED BED

LIU Xiang-jun<sup>1</sup>, XU Xu-chang<sup>2</sup>

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

2. The State Key Laboratory of Clean Combustion of Coal, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** Particle clustering is an important phenomenon in dense particle-gas two-phase flow. In this paper, a binding force is introduced to present the impact of particle clustering and a linear expression of this binding force is obtained by summarizing all the forces acted on one particle inside a cluster. Dividing the dense two-phase flow field in a gas-particle circulating fluidized bed into gas-rich dilute phase and solid-rich cluster phase, the dense gas-particle two-phase flow field in a circulating fluidized bed (CFB) is numerically studied. The particle cluster is treated as one discrete phase and the trajectory model is used to describe the behavior of clusters in every time step. Detailed results on cluster structure, cluster size, bed voidage, gas velocity, and particle velocity are obtained, and the non-uniformity of two-phase flow field and the core-annulus flow structure in a CFB can be successfully simulated. These calculated results are in agreement with experiment ones. It shows that these models and algorithm are feasible and can be used to study the dense two-phase flow in a CFB efficiently.

**KEY WORDS:** Boiler; Dense two-phase flow; Clusters; Numerical simulation.

**摘要:** 颗粒团聚是稠密气固两相流动中的一个重要现象, 该文定义了颗粒团聚合力的概念来表征稠密气固两相流动中颗粒所受到的团聚效应, 对单个颗粒进行了全受力分析, 得到了聚合力的线形模型表达式。采用聚合力的线形模型, 将两相流场分为稀相区和浓相颗粒团, 将颗粒团视为整体

离散相, 文中数值模拟了循环流化床内的稠密气固两相流动, 得到了床内颗粒团分布、颗粒团大小、床内空隙率、气相速度、颗粒相速度的详细分布, 揭示了循环流化床内稠密气固两相流场的规律, 以及循环流化床内两相流场的核心-环形流动结构。计算结果与前人实验结果相符并表明, 采用该模型及其算法模拟循环流化床内稠密气固两相流动是可行的。

**关键词:** 锅炉; 稠密气固两相流动; 颗粒团; 数值模拟

### 1 引言

气固两相流在工业生产中应用广泛, 它包括稀疏、中浓度和高浓度的两相流动, 对于后两类浓度较高的两相流动 (如气力输送、循环流化床内的流动), 颗粒内部的相互作用十分剧烈、复杂, 原有的建立在稀疏悬浮流假设基础上的两相流动的模型与算法已不再适合<sup>[1,2]</sup>。发展稠密两相流动数学模型, 对气固两相流的发展具有重大意义。

稠密两相流动的数值模拟近年来受到广泛重视, 目前的模拟办法多倾向于采用多流体模型, 但对于颗粒的复杂变化经历 (如物理、化学特性随时间的变化经历), 多流体模型难以描述。因此, 许多研究者一直尝试采用轨道模型来研究稠密两相流动。采用轨道模型来研究稠密两相流动的关键在于模拟颗粒之间的相互作用。Lorenco<sup>[3]</sup>等人采用直接求解带碰撞项的 Boltzmann 方程的方法模拟了水平管道内气固两相流动; B.Oesterle<sup>[4]</sup>等人提出一种

考虑颗粒碰撞的 Lagrangian 方法, 在轨道计算中考虑环境粒子的影响, 加入模拟的颗粒碰撞。Tanaka 和 Tsuji<sup>[5]</sup>采用直接模拟 Monte-Carlo 算法, 将颗粒的自由运动与颗粒间的相互碰撞解耦, 通过反复计算颗粒的自由运动和颗粒间的相互作用获得颗粒的运动特性。上述方法都能在一定程度上模拟出稠密两相流中颗粒相的分布, 能较好地揭示出气固两相局部结构的规律。但由于其研究对象是单个颗粒, 受计算量及算法的限制, 到目前为止, 用轨道模型来研究稠密两相流动还只能用于模拟小尺度物理模型内的流动问题, 模拟的颗粒数较少, 模拟结果尚不能揭示出稠密气固两相流动宏观整体上的分布规律。对于工程意义上流动特性的稠密两相流动数学模型的研究还有待进行。

稠密气固两相流动的一个重要现象就是颗粒团聚, 它是气固两相流尤其是稠密两相流动中常见的一种现象, 是指部分颗粒在气体-颗粒、颗粒-颗粒间的相互作用下聚集成团, 作为一个整体流体团在两相流场中运动(反应)。但同时, 此颗粒团又随时可能在气动力、颗粒碰撞的作用下与其他颗粒聚集或破碎成多个小颗粒团。研究稠密两相流动特性, 颗粒团聚问题是其关键。文[6]定义了颗粒团聚合力的概念, 来表征颗粒所受到的团聚效应, 将两相流场分为稀相区和浓相颗粒团。稀相区颗粒以单颗粒的形式存在, 体积分数小, 是气体为主的连续相, 稀相区颗粒的运动采用无滑移模型, 并假设颗粒在稀相区是均匀随机分布的。浓相颗粒团由多个颗粒所组成, 在模拟中每时间步长内把它作为一个整体, 作为流场中的离散相, 采用颗粒轨

道模型, 研究其在床内的形成、运动及破碎经历, 本文采用文[6]所提出的算法, 以清华大学煤燃烧国家重点实验室循环流化床排烟脱硫装置为研究对象, 数值模拟研究了床内两相流动。

## 2 研究对象及计算工况

本文的研究对象是清华大学煤燃烧国家重点实验室中温干法循环流化床排烟脱硫装置, 此装置反应器内径 0.203 m, 床高(布风板到床顶) 5.350 m, 床温操作范围为 400~800℃, 床内平均风速一般在 4.3~5.5 m/s, 物料(煤粉灰)平均粒径为 88 μm, 本文取悬浮区开始一段 2.0 m 高的床段为计算域, 忽略入口段及出口段的周向不均匀性, 循环流化床内的流动可简化为轴对称问题, 计算工况选取如表 1。

## 3 数学模型及计算方法

### 3.1 气相控制方程

气相湍流模型采用  $k-\epsilon$  双模型, 对于本文所研究的轴对称问题, 其通用形式的控制方程表示为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\eta\rho u\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\eta r p v\phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}) + S_\phi + S_{p\phi}$$

式中  $\eta$  为当地空隙率; 其它具体各项含义见表 2。

$$\eta_{ij} = 1 - N_{ij}V_p / V_{ij}$$

式中  $V_{ij}$  为当地网格体积;  $N_{ij}$  为该网格内颗粒总数;  $V_p$  为单个颗粒体积。

本文所研究的中温干法循环流化床排烟脱硫装置床温操作范围为 400~800℃, 每种工况操作中, 床内温度基本保持不变, 因此在本文计算中取床温恒定, 为 500℃。

表 1 工况参数  
Tab. 1 Operation parameters

计算域高 $H/m$	2	单个颗粒粒径 $d/\mu m$	88
计算域半径 $D/m$	0.1015	平均颗粒体积分数/%	3
进口风速 $v/(m \cdot s^{-1})$	5.0	床内颗粒总体积 $V/m^3$	$1.942 \times 10^{-3}$
床内温度 $T/^\circ C$	500	床内颗粒总个数 $N/\text{个}$	$5.44 \times 10^9$
气体密度 $\rho_g/(kg \cdot m^{-3})$	0.424	颗粒密度 $\rho_p/(kg \cdot m^{-3})$	1700

表 2 气相控制方程  
Tab. 2 Governing equations for gas phase

方程	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$	$S_{p\phi}$
连续	1	0	0	0
x-动量	$u$	$\mu_c$	$-\partial p/\partial x + \partial/\partial x(\mu_c \partial u/\partial x) + 1/r(\partial/\partial r)(r\mu_c \partial v/\partial x)$	$S_{px}$
r-动量	$v$	$\mu_c$	$-\partial p/\partial r + 1/r(\partial/\partial x)(r\mu_c \partial v/\partial r) + (\partial/\partial x)(\mu_c \partial u/\partial r)$	$S_{pr}$
湍动能	$k$	$\mu_c/\sigma_k$	$-(G_k - \rho\epsilon)$	0
湍能耗散率	$\epsilon$	$\mu_c/\sigma_\epsilon$	$(C_1 G_k - C_2 \rho\epsilon) \rho k$	0

表中  $\mu_c = \mu + C_\mu \rho k^2/\epsilon$ ;  $G_k = 2\mu_c[(\partial u/\partial x)^2 + (\partial u/\partial r)^2 + (u_{rr}/r)^2 + ((\partial u/\partial r) + (\partial u/\partial x))^2]$ ;  $C_1 = 1.44$ ;  $C_2 = 1.92$ ;  $C_\mu = 0.09$ ;  $\sigma_k = 1.0$ ;  $\sigma_\epsilon = 1.3$

### 3.2 颗粒相的控制方程

#### (1) 颗粒相的运动方程

实验研究表明, 颗粒团是由 30~1000 个颗粒组成的直径小于 1 cm 的絮状物, 团内颗粒体积份数一般为 41%~50%。团内颗粒之间、颗粒与气体存在复杂的相互作用, 但在每一时刻它作为一个整体在气动力的作用下运动。因此在计算中, 每步计算时将每个颗粒团视为流体团似的整体, 为离散相, 采用颗粒轨道模型研究其经历, 其控制方程为

$$m_c \frac{d\bar{v}_c}{dt} = \sum \bar{F}_c$$

式中  $\sum \bar{F}_c$  为颗粒团受到的合力, 本文主要考虑气动阻力和重力对颗粒团运动的影响。

颗粒团运动的阻力系数取<sup>[7]</sup>

$$C_D = \frac{32}{Re} \left( 1 + 2 \frac{\mu_p}{\mu} - 0.314 \times \frac{1 + 4(\mu_p/\mu)}{Re} \right)$$

式中  $\mu$  为稀相区气体粘度;  $\mu_p$  为浓相颗粒团内的粘度; 且

$$\mu_p/\mu = 1 + 2.5\alpha + 10.05\alpha^2 + 0.00273e^{16.6\alpha}$$

#### (2) 碰撞对象及碰撞概率的确定

颗粒团  $k$  在流场中运动, 与其他颗粒 (团)  $j$  相碰撞的概率为

$$p_{kj} = n_j S_k g_{kj} \Delta t / N$$

式中  $n_j$  为网格内  $j$  颗粒 (团) 的数密度;  $S_k$  为颗粒团  $k$  的底面积;  $g_{kj}$  为相对速度;  $N$  为网格内的总颗粒 (团) 数。详见文[8]。

#### (3) 碰撞模型

采用文[9]中定义的聚合合力  $\tau_k$  及其表达式为

$$\tau_k = (0.1 \sum_1^N f_w + 0.01 \sum_1^N f_f) / \pi d$$

式中  $N$  为颗粒密集体内颗粒总数;  $f_w$  为尾涡的影响力<sup>[9]</sup>;  $f_f$  为单个颗粒间的范德华力<sup>[10]</sup>。

聚合合力  $\tau_k$  应该是颗粒所受到的所有力的综合作用, 包括尾涡的影响力、范德华力、液体桥力和静电力等。液体桥力和静电力通常只有一些特殊工况才有较大影响 (如湿度较大, 液体桥力须考虑)。对于本文的模拟工况, 只考虑了尾涡的影响力及颗粒间的范德华力。

颗粒团所受到气动力、聚合合力以及其他颗粒碰撞的冲力, 其发生合并或破碎的概率计算如下:

设颗粒团  $k$  与颗粒 (团)  $j$  在静止气体中相遇, 合并的概率为  $f_{kj}$ , 设颗粒在纯气动力的作用下破

碎的概率为  $\varphi_{ck}$ , 颗粒最终合并概率为<sup>[11]</sup>

$$f_{kj} = f_{ckj} - \varphi_{ck}$$

式中  $f_{ckj} = 1 - 0.246 Re_{kj}^{0.407} L_{pk}^{-0.096} \Delta_{kj}^{-0.278}$

$$\varphi_{ck} = \begin{cases} 0.0046A & A \leq 40.6 \\ 11.85(0.01A)^{4.64} & 40.6 < A \leq 120 \end{cases}$$

$$A = Re_{kj}^{0.285} L_{pk}^{0.2} \Delta_{kj}^{0.4} We_k^{0.442}$$

$$Re_{kj} = \frac{2r_j \rho_{mk} |v_k - v_j|}{\mu_k}; L_{pk} = \frac{2r_k \rho_{mk} \tau_k}{\mu_k^2};$$

式中 两个颗粒团半径之比  $\Delta_{kj} = r_k/r_j$ ; 韦伯数

$$We_k = \frac{2r_k \rho (v - v_k)^2}{\tau_k}$$

两颗粒碰撞后分开的概率为  $1 - f_{kj}$  ( $f_{kj} > 0$ )。

碰撞动量的确定为

$$\begin{cases} J_z = -(1+e)(V_{1z} - V_{0z})m_0m_1/(m_0+m_1) \\ J_r = -(1+e)(V_{1r} - V_{0r})m_0m_1/(m_0+m_1) \end{cases}$$

若  $f_{kj} < 0$  或  $A > 120$ , 则颗粒破碎, 破碎后颗粒的尺寸取对数正态分布, 破碎后颗粒的动能与质量成正比。另外, 各颗粒团的形状可由  $We_k$  数确定。

### 3.3 控制方程的求解

计算域内网格数为  $51 \times 30$ , 采用非均匀正交网格, 壁面及进口处网格加密, 其他地方较稀。在此网格内, 气相流场的计算采用 Simpler 算法, 数值计算采用 Gauss-Seidel 迭代法。颗粒团的运动方程的求解采用 Gill 算法, 在积分时间  $\Delta t$  内并行计算所用的轨道, 在  $\Delta t$  时间末考虑  $\Delta t$  时间内发生的颗粒碰撞, 积分时间  $\Delta t$  取 0.001s, 颗粒相运动的总时间长度是 4.0 s。

### 4 初始条件及边界条件

已知气体入口速度为 5.0 m/s, 则气体的体积流量为 0.16183 m<sup>3</sup>/s, 床内气体的总体积为 6.473 × 10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup> 取床内颗粒的体积分数为 3%, 则颗粒的总体积为 1.942 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>, 颗粒总个数为 5.44 × 10<sup>9</sup> 个, 则 1 弧度的计算域内颗粒的个数为 8.658 × 10<sup>8</sup>, 根据前人实验结果, 对于本文的工况, 假设离散在气体中的颗粒占 10%: 8.658 × 10<sup>7</sup> 个, 聚集成团的颗粒占 90%: 7.792 × 10<sup>8</sup> 个, 假设颗粒团内体积分数为 50%, 则床内颗粒团的总体积为 3.4956 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>。假设初始 400 个颗粒为一个颗粒团, 则初始状态下计算域内有 1.948 × 10<sup>6</sup> 个流体团, 每个流体团的体积为 2.85456 × 10<sup>-10</sup> m<sup>3</sup>, 假设颗粒团为球形, 折合每个颗粒团的直径为 8.1692 × 10<sup>-4</sup> m。

初始状态下取每个颗粒团内有 400 个颗粒，颗粒团入流速度为 2 m/s，每时间步长(0.001s)有 200 个颗粒团(代表 1948 个颗粒团)流入床内。1.948×10<sup>6</sup> 个流体团全部流入而出口颗粒流量为零时，入口颗粒质量为零，出口颗粒流量不为零时，入口颗粒质量等于出口颗粒质量，床内颗粒相总质量保持不变。在本文的计算中，t=2.0s 后，床内两相流动已趋于稳定，本文计算的总时间长度是 4.0s。

### 5 计算结果与分析

图 1 所示为计算所得床内两相流动达到稳定后床内某时刻(t=4.0 s)颗粒分布图，图 2 所示为高度分别为 0.0~0.2m、0.3~0.4m、0.7~0.8m、1.1~1.2m、1.5~1.6m、1.9~2.0 m 6 区域段流场中平均空隙率沿径向的分布，图 3 所示则为各径向平均空隙率沿床高方向的分布。由此 3 图可明显看出，颗粒在循环流化床内的分布是极不均匀的：沿床高方向，床下部颗粒多，浓度高，上部颗粒明显减少，浓度稀；沿床径向方向，床中心颗粒少，浓度稀，而近壁处颗粒浓度急剧增高。这一分布规律正是循环流化床内稠密气固两相流动不均匀性的基本特征，本文数值模拟的结果明显揭示了这一特征。

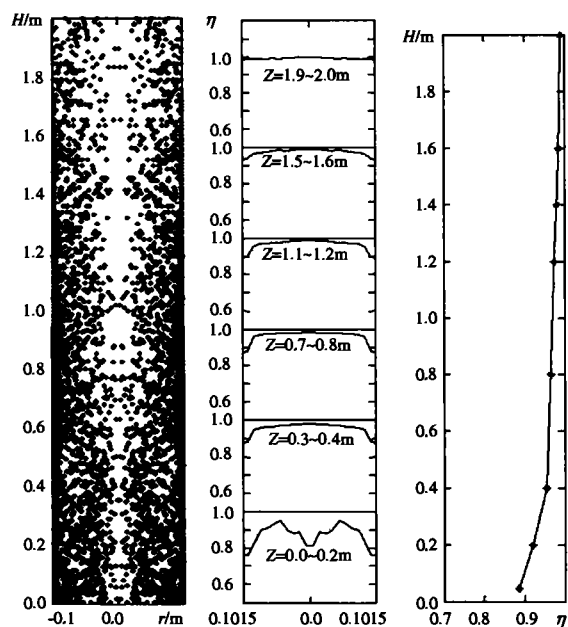


图 1 床内颗粒团分布图

图 2 空隙率沿径向的分布

图 3 空隙率沿床高的分布

图 1 Cluster structure in the bed  
图 2 Radial distribution of bed voidage  
图 3 Voidage profile along the bed height

图 4 所示为计算所得床内气相速度矢量图，图 5 所示为高度分别为 0.005 m、0.4 m、0.8 m、1.2 m、1.6 m、2.0 m 6 截面上气相轴向速度沿径向的分布，此两图所示表明，在床高 0.3 m 以上，床内气相流场的分布规律是：中心气流速度高，两侧近壁处流速低，有一小的负速度区。

另外，图 4、图 5 所示还表明，在床下部(0.0~0.3m)，速度分布较为复杂，沿径向波动明显，有多个回流区出现，这是由于此区域颗粒浓度大，颗粒分布不均匀、波动大(见图 1、2)所造成的。

图 6 所示为计算所得高度分别为 0.0~0.2 m、0.3~0.4 m、0.7~0.8 m、1.1~1.2 m、1.5~1.6 m、1.9~2.0m 6 区域段内颗粒轴向平均速度沿径向的分布，颗粒相的速度分布与气相的速度分布相一致：中心速度高，两侧低，壁面处的颗粒以较小的速度向下流动，中心区的颗粒则在气流的携带下以较大速度向上运动，床内两相流场呈明显的核心-环形流动结构。

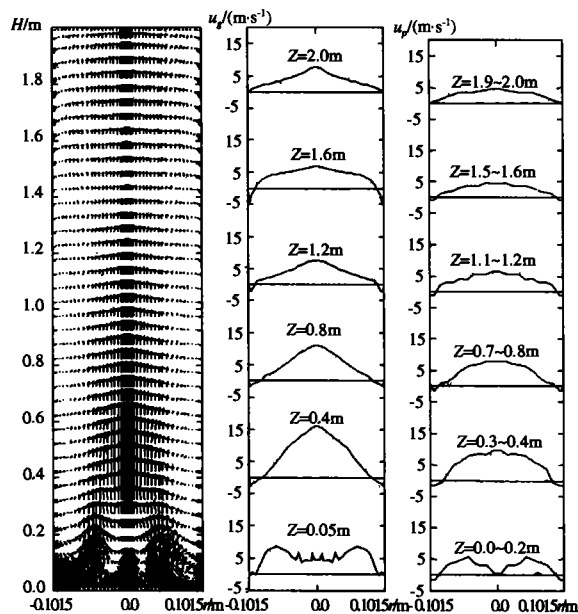


图 4 床内气相速度矢量图

图 5 气相速度沿径向的分布

图 6 颗粒速度沿径向的分布

图 4 Velocity vectors in the bed  
图 5 Radial distribution of gas velocity  
图 6 Radial distribution of particle velocity

图 7 所示为计算所得床内颗粒团粒径的统计结果。初始状态下取每个颗粒团的直径均为 8.1692×10<sup>-4</sup>m，喷入床内后，颗粒在气流及其他颗粒(团)的作用下，发生破碎或合并生成更大的

颗粒团，采用本文的聚合力模型，最后计算所得颗粒团的粒径范围为  $2.466 \times 10^{-4} \text{m} \sim 1.1782 \times 10^{-3} \text{m}$ ，仅有 8.9% 的颗粒团直径保持为  $8.1692 \times 10^{-4} \text{m}$ ，仍含 400 个颗粒。计算试验表明，采用不同的聚合力的表达式，计算所得颗粒团粒径的统计分布是不同的。要想得到更准确的颗粒团大小的分布，尚需进一步的实验和理论研究。

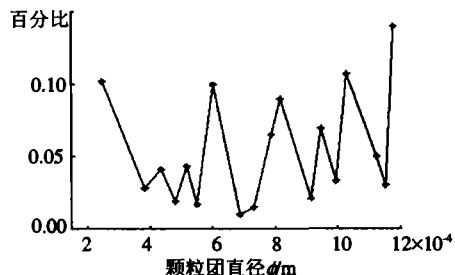


图 7 床内颗粒团粒径的统计结果  
Fig. 7 Statistical distribution of cluster size

图 8、图 9 所示为前人实验所得气相轴向速度、颗粒轴向速度沿径向的分布<sup>[12]</sup>，与图 5、图 6 比较可看出，本文的计算结果与前人实验结果相符，所揭示的气固两相流动的速度分布规律是一致的。这说明采用本文的模型和算法模拟流化床内稠密气固两相流动的宏观流动特性是合理、正确的。

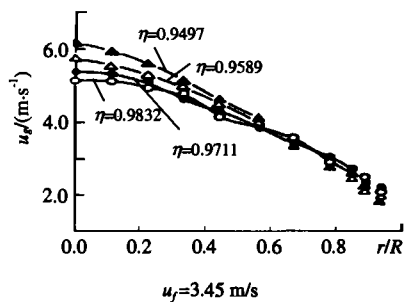


图 8 实验所得气相速度沿径向的分布  
Fig. 8 Measured radial distribution of gas velocity

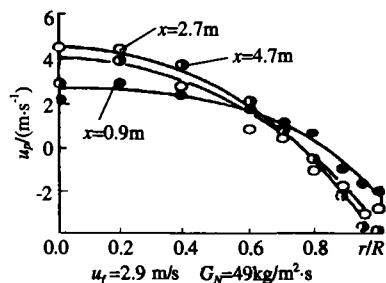


图 9 实验所得颗粒速度沿径向的分布  
Fig. 9 Measured radial distribution of particle velocity

## 6 结论

本文采用颗粒团聚力的概念表征稠密气固两相流动中颗粒所受到的团聚效应，将颗粒团视

为离散相，数值模拟了循环流化床内的稠密气固两相流动，得到了床内颗粒床内颗粒团分布、颗粒团大小、床内空隙率、气相速度、颗粒相速度的详细分布，计算结果合理，揭示了循环流化床内两相流场的核心-环形流动结构，与前人实验结果相符。结果表明，采用本文的模型和算法模拟工程意义上的稠密气固两相流动是可行的。

## 参考文献

- [1] 王勤辉, 骆仲泱, 倪明江, 等 (Wang Qinhui, Luo Zhongyang, Ni Mingjiang, et al). 循环流化床锅炉炉内颗粒分布平衡模型 (Particle population model for circulation fluidized bed boiler furnace) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2001, 21 (9): 110-115.
- [2] 徐旭, 池涌, 李斌, 等 (Xu Xu, Chi Yong, Li Bin, et al). 内旋流化床床内颗粒运动特性的试验研究 (Experimental study on particle motion characteristic in the internal circulating fluidized bed) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2001, 21 (11): 9-13.
- [3] Lourenco L, Tiethmuller M L, Essers J A. The kinetic model for gas particle flow and its numerical implementation [A]. International conference on the physical modelling of multi-phase flow [C]. Coventry, England, 1983, (4): 19-21, 501-525.
- [4] Owsterle B, Petitjean A. Simulation of particle-to-particle interactions in gas-solid flows [J]. Int. J. Multiphase Flow, 1993, 19(1): 199-211.
- [5] Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a vertical pipe: on the effect of inter-particle collision [J]. Gas-Solid Flows, ASME, 1991, 121: 123-128.
- [6] 刘向军, 徐旭常, 潘小兵 (Liu Xiangjun, Xu Xuchang, Pan Xiaobing). 循环流化床气固颗粒团运动的数值模拟 (Numerical study of cluster behavior in a gas-particle circulating fluidized bed) [A]. 中国工程热物理学会第十届燃烧学学术会议, 青岛, (Conference of the 10th Chinese Engineering Thermophysics [C]. Combustion, Qingdao, 2001.
- [7] 连桂森. 多相流流动基础 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.
- [8] 张楷, 由长福, 徐旭常 (Zhang Jian, You Changfu, Xu Xuchang). 循环床内气固两相流中稠密颗粒间碰撞的数值模拟 (Simulation of the particle-particle collision in a CFB) [J]. 工程热物理学报 Journal of Engineering Thermophysics. 1998, 19(2): 256-260.
- [9] Zhu C, Liang S C, Fan L S. Particle wake effects on the drag force of an interactive particle [J]. Int. J. Multiphase Flow. 1994, 20: 117-129.
- [10] 周涛, 李洪钟 (Zhou Tao, Li Hongzhong). 粘性颗粒流化床中团聚大小的计算模型 (Modelling the size of fluidized agglomerates of cohesive particles) [J]. 化学反应工程与工艺 Chemical Reaction Engineering and Technology. 1999, 15(1): 44-50.
- [11] Podvysotsky A M, Shraiber A A. Coalescence and break-up of drops in two-phase flows [J]. J. Multiphase Flow 1984, 10(2): 195-209.
- [12] Lim K S, Zhu J X, Grace J R. Hydrodynamics of gas-solid fluidization [J]. Int. J. Multiphase Flow 1995, 21(1): 141-193.

收稿日期: 2002-07-01.

作者简介:

刘向军(1965-), 女, 博士, 副教授, 主要从事流动与燃烧过程的数值模拟研究;

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。

(责任编辑 贾瑞君)