

研究简报

边界条件和结构尺寸对提升管内气固流动特性的影响

周新宇, 高金森, 徐春明, 蓝兴英

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249)

关键词: 快速流化床; 两相流; 边界条件; 床层直径; 能量最小多尺度

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.05.011

中图分类号: TQ 021.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2012) 05-1398-07

Effect of boundary condition and system structure on gas-solids flow characteristics in riser

ZHOU Xinyu, GAO Jinsen, XU Chunming, LAN Xingying

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: A drag model based on energy minimization multi-scale (EMMS) approach was used in the numerical simulation for fast fluidized bed (FFB) containing Geldart A particles. The Johnson and Jackson boundary conditions (BCs) were used for solids phase. The experimental conditions of Li and Kwauk were adopted in the simulation and two inlet BCs were used to evaluate its impact on the predicted gas-solids two-phase flow characteristics in term of axial voidage profile, outlet solids flux and solids holdup. Axial voidage profile was also investigated with different bed diameters and outlet constraints. It was found that it needed less simulation time, and could diminish the cost of simulation for cycle inlet BC than velocity inlet BC. Increasing bed diameter could result in weakened wall influence, and decrease in bed density and heterogeneity of axial profile. The enhancement of outlet constraint could lead to an increase in bed density.

Key words: fast fluidized bed; two-phase flows; boundary condition; bed diameter; energy minimization multi-scale

引 言

提升管是非均匀结构显著的气固两相流动体系, 其流动特性主要表现为轴向空隙率的 S 形分布、径向的“环-核”结构以及团聚物的生成和破

碎等。近年来, 有关数值计算方法的研究增多, 其中双流体模型的应用最为广泛, 颗粒动力学则是目前封闭控制方程的最合理有效的方法。

气固快速流态化体系中存在底部颗粒聚集的密相和顶部流体聚集的稀相。颗粒的碰撞是颗粒聚集

2011-09-20 收到初稿, 2012-02-13 收到修改稿。

联系人: 蓝兴英。**第一作者:** 周新宇 (1982—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB226906); 国家杰出青年基金项目 (20725620)。

Received date: 2011-09-20.

Corresponding author: LAN Xingying, lanxy@cup.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2010CB226906) and the National Natural Science Foundation of China through the Program for Distinguished Young Scholar (20725620).

的主要原因。颗粒聚集能够形成各种团聚物, 并显著影响气固相间的动量传递。团聚物则主要存在于壁面附近。因此, 如何处理颗粒间的碰撞行为、气固相间作用以及颗粒-壁面相互作用是深入认识提升管内气固流动特性的关键, 也是采用数值计算方法改善循环流化床设计和放大工艺的基础。颗粒动力学中, 采用碰撞恢复系数 e_{ss} 描述颗粒间的碰撞行为。一些研究者^[1-3] 建议采用 $e_{ss}=0.9$ 处理颗粒间的碰撞。针对气固相间作用, 有研究者^[3-5] 采用粗网格计算大尺度团聚物的流体动力学行为, 同时结合适宜的亚格子封闭方程求解更小结构的影响, 模拟结果和实验值的吻合度很高。其中, 具有代表性的是 Yang 等^[6-7] 基于能量最小多尺度 (energy minimization multi-scale, EMMs) 方法提出的曳力模型。颗粒-壁面相互作用则表现为如何处理颗粒相壁面边界条件。现有处理方法中, Johnson 等^[8] 提出的壁面边界条件的应用最为广泛。Al-muttahar 等^[9]、Benyahia 等^[10] 和 Wang 等^[11] 均建议采用较小的壁面反射系数计算快速流化床内的流体动力学行为。

目前, 针对快速流态化体系, 数值模拟研究中存在两种颗粒相入口边界条件的处理方式, 考察两者区别的研究却未见报道。同时, 也有实验研究表明床层直径^[12] 和出口约束条件^[13] 对快速流化床内轴向空隙率分布均有影响, 但数值模拟研究中却未见报道。因此, 本文应用颗粒动力学封闭固相应力, 采用无滑移壁面条件处理气相, 全滑移壁面条件处理颗粒相, 比较了采用两种颗粒相入口条件对于模拟快速流化床内的气固两相流动行为的影响, 预测了不同床层直径和出口尺寸对提升管内轴向空隙率分布的影响。

1 模拟工况和边界条件

模拟对象为文献 [4] 的中试冷态实验装置, 其主要由提升管、沉降式分离器、旋风除尘器和伴床组成, 提升管内径为 90 mm、高为 10.5 m, 伴床直径为 120 mm, 提升管和伴床由内径为 80 mm 的斜管连接。固相为 FCC 颗粒, 其密度和粒径分别为 $930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $54 \text{ } \mu\text{m}$ 。流化介质为空气, 其密度和黏度分别为 $1.1795 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.8872 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。模拟工况的表现气速和颗粒循环量分别为 $1.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $14.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文采用商业软件 FLUENT 6.3.26, 体系划分为 2.25

$\text{mm} \times 35 \text{ mm}$ 的均匀网格。颗粒-颗粒碰撞恢复系数为 0.9。气相入口采用给定速度的方式处理。颗粒相入口体积分数是 0.25。顶部出口为压力出口。边壁采用无滑移壁面条件处理气相, 采用 Johnson 和 Jackson 壁面条件处理颗粒相, 壁面反射系数 ϕ 为 0 (全滑移壁面条件), 颗粒-壁面碰撞恢复系数 e_w 为 0.99。初始时, 气体和颗粒速度均为零。计算时间步长为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}$, 最大迭代步数为 20 步。

2 数学模型

目前, 针对气固流动体系, 应用最广泛的仍是双流模型, 其主要由两相流基本方程组、封闭方程、边界条件和初始条件 4 部分组成。其中, 两相流基本方程组的表达式如式(1)~式(4) 所示。

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s) = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = & -\epsilon_g \nabla p_g + \\ & \epsilon_g \rho_g \mathbf{g} + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_g + \beta(\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_g) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{u}_s \mathbf{u}_s) = & -\epsilon_s \nabla p_g + \\ & \epsilon_s \rho_s \mathbf{g} + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \beta(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) - \nabla \cdot \mathbf{p}_s \end{aligned} \quad (4)$$

上述 4 个方程共包括: 两个已知的物理量 ρ_g 和 ρ_s , 5 个求解的物理量 p_g 、 ϵ_g 、 ϵ_s 、 $\mathbf{u}_g$ 和 $\mathbf{u}_s$, 4 个需要封闭的物理量 β 、 $\bar{\bar{\tau}}_g$ 、 $\bar{\bar{\tau}}_s$ 和 $\mathbf{p}_s$ 。本文选用 Yang 等^[6-7] 基于能量最小多尺度方法提出的曳力模型处理相间作用力。此外, 两相流基本方程组中的气相应力 $\bar{\bar{\tau}}_g$ 和固相应力 $\bar{\bar{\tau}}_s$ 的表达式分别如式(5) 和式(6) 所示; $\bar{\bar{\tau}}_s$ 的表达式中引入了体积黏性系数 λ_s 和剪切黏性系数 μ_s 的概念。

$$\bar{\bar{\tau}}_g = \epsilon_g \mu_g (\nabla \mathbf{u}_g + \nabla \mathbf{u}_g^T) - \frac{2}{3} \epsilon_g \mu_g \nabla \cdot \mathbf{u}_g \bar{\mathbf{I}} \quad (5)$$

$$\bar{\bar{\tau}}_s = \epsilon_s \mu_s (\nabla \mathbf{u}_s + \nabla \mathbf{u}_s^T) - \epsilon_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \cdot \mathbf{u}_s \bar{\mathbf{I}} \quad (6)$$

目前, 颗粒动力学理论是用于计算 λ_s 、 μ_s 和 $\mathbf{p}_s$ 的最有效的封闭方法。本文采用 Gidaspow 等^[14] 的偏微分方程处理颗粒“拟温度” Θ , Lun 等^[15] 的表达式处理固相压力 p_s 、体积黏性系数 λ_s 和径向分布函数 $g_{0,ss}$, Gidaspow 等^[16-17] 的表达式处理剪切黏性系数 μ_s ^[16], 颗粒脉动动能扩散系数

k_θ ^[17], 忽略颗粒间的摩擦应力。颗粒动力学理论中的其他表达式详见文献 [16]。

此外, 边界条件也是双流体模型的重要组成部分。现有的颗粒相壁面边界条件的处理方式以 Johnson 等^[8]提出的壁面边界条件的应用最为广泛, Johnson 等^[8]引入壁面反射系数 ϕ 反映颗粒和壁面因碰撞所产生的动量传递的百分比, 其设置范围是 0~1; 同时引入颗粒-壁面碰撞恢复系数 e_w 来处理颗粒和壁面碰撞时的能量耗散 γ_w 。

3 计算结果与讨论

3.1 颗粒相入口条件的影响

由于数值计算中省略了伴床等结构, 导致颗粒相入口条件存在两种处理方式, 如图 1 所示。其中, H 为提升管高度, D 为直径, H_{out} 为出口高度。图 1(a) 为速度入口 (velocity inlet) 方式, 图 1(b) 为循环入口方式 (cycle inlet)。两者的区别如下。

(1) 速度入口方式 颗粒相入口速度为定值, 根据工况中给定颗粒循环量 G_s 计算求得。初始化时体系内的颗粒相体积分数为零。

(2) 循环入口方式 颗粒相入口速度通过监测出口处颗粒相的质量流率计算求得。初始化时体系内填充一定体积分数 $\bar{\epsilon}_s$ 的颗粒相。

图 2 为快速流化床内典型的轴向空隙率分布,

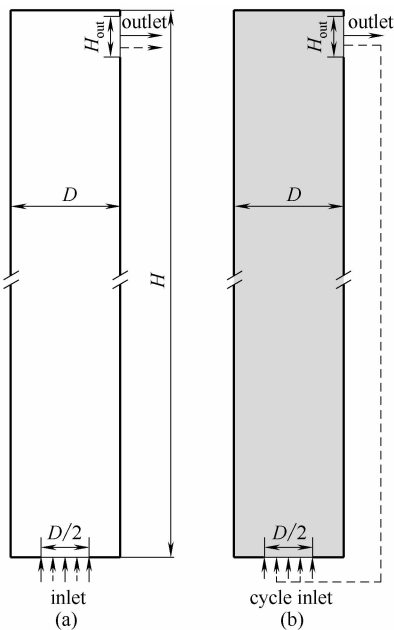


图 1 模拟对象的二维结构

Fig. 1 Schematic diagram of simulation system

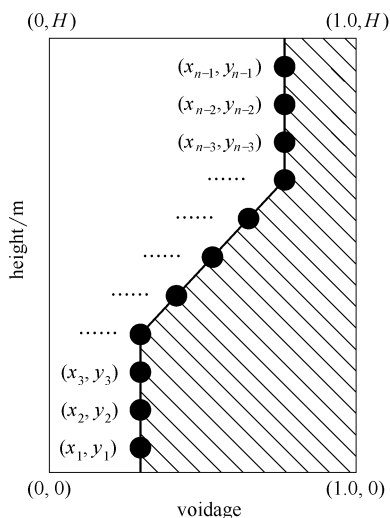


图 2 快速流化床内轴向空隙率分布

Fig. 2 Axial voidage profile in fast fluidization regime

图 2 中阴影的面积 A 为全床平均固含率 $\bar{\epsilon}_s$ 和床高 H 之积, 可由式(7)求得。其中, $x_0 = x_1$, $y_0 = 0$; $x_n = x_{n-1}$, $y_n = H$ 。这表明, 轴向空隙率分布曲线能够同时体现提升管内稀密两相的分布状态和全床固含率两种气固流动特性。结合图 1 可知, 颗粒相采用速度入口方式时, 稀密两相的分布状态和全床固含率均为预测特性; 颗粒相采用循环入口方式时, 仅稀密两相的分布状态为预测特性。因此, 本文考察了两种颗粒相入口条件对于预测提升管内气固流动特性的影响。

$$A = \bar{\epsilon}_s H = \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{(x_n + x_{n-1})}{2} \right] (y_n - y_{n-1}) \quad (7)$$

图 3 表示了颗粒相入口条件对时均轴向空隙率分布的影响, 同时与实验数据进行了对比。由图 3 可见, 模型在两种颗粒相入口条件下, 时均轴向空隙率分布曲线基本都呈现 S 形分布。当颗粒相采用速度入口的方式时, 与实测值相比, 计算值底部吻合极好, 而中部和顶部则略微偏小。当颗粒相采用循环入口方式时, 和实测值相比, 计算值顶部吻合极好, 中部偏小, 底部略微偏大。数值计算的结果表明, 模型在两种颗粒相入口条件下都能够较准确地预测床内底部为密相、顶部为稀相、中部为过渡相的总体规律。

图 4 表示了颗粒相入口条件对颗粒浓度全床瞬时和时均分布的影响。图 4(a) 为颗粒相入口为速度入口时的全床颗粒浓度瞬时和时均分布。图 4(b) 为颗粒相入口为循环入口时的全床颗粒浓度瞬时和时均分布。由图 4 可见, 两种入口方式均能

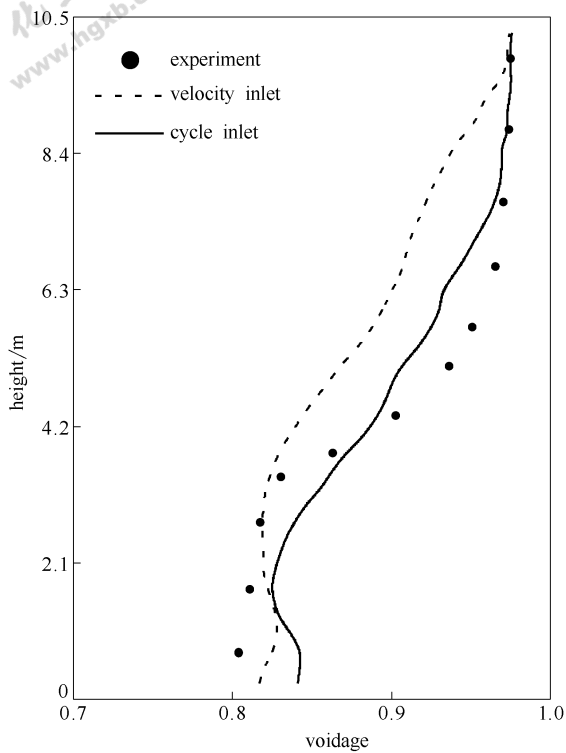


图 3 颗粒相入口条件对时均轴向空隙率分布的影响

Fig. 3 Effect of solids inlet condition on time-averaged axial voidage profile

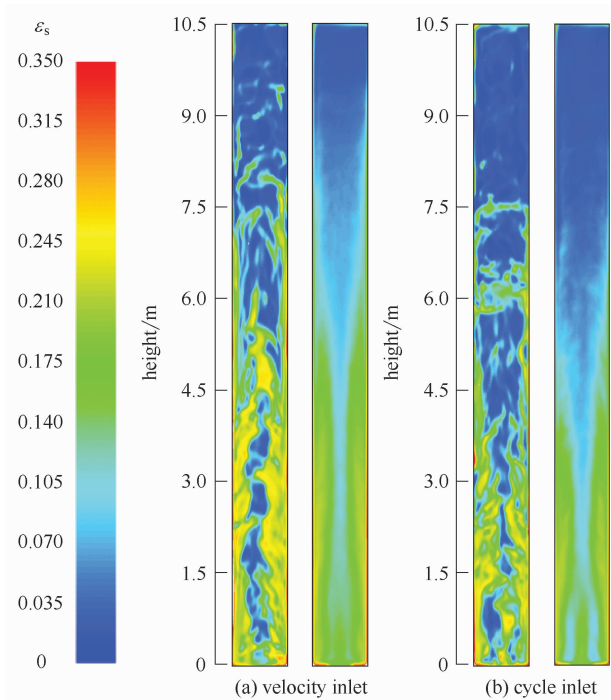


图 4 颗粒相入口条件对颗粒浓度全床瞬时

和时均分布的影响

Fig. 4 Effect of solids inlet condition on instantaneous and time-averaged profiles of solids concentration

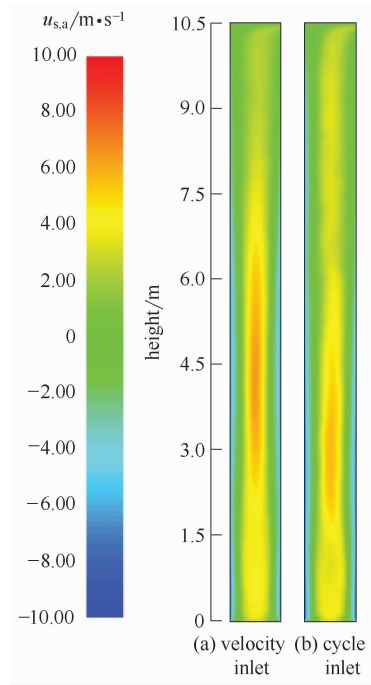


图 5 颗粒相入口条件对颗粒轴向速度

全床时均分布的影响

Fig. 5 Effect of solids inlet condition on time-averaged profiles of solids axial velocity

清晰捕获床内多尺度及多形态分布的非均匀结构，分别包括顶部的絮状物和带状物，中部和底部的簇状物和片状物；时均颗粒浓度则表现为边壁浓中心稀的分布状态。图 5 给出了两种颗粒相入口条件下颗粒轴向速度的全床时均分布。轴向速度为正值表示颗粒向上流动，为负值表示颗粒向下流动。由图 5 可见，在床中心区域颗粒为向上流动，而在壁面区域颗粒为向下流动，从而形成颗粒在床内的循环流动。图 4 和图 5 的计算结果表明，提升管内气固流动的模拟结果呈现典型的“环-核”流动结构。

图 6 分别为两种颗粒相入口条件下全床固含率和出口颗粒循环量随时间的变化。由图 6 可见，当颗粒相采用速度入口的方式时，全床固含率随计算时间的增长而不断增加；计算 18 min 后，提升管内颗粒的储量基本达到稳定状态，其时均全床固含率为 0.1185，大于实验值 0.0947。当颗粒相采用循环入口的方式时，出口颗粒循环量随计算时间的增长而不断减小；计算 5 s 后，提升管出口颗粒循环量呈现周期性振荡状态，其时均出口颗粒循环量为 $12.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，小于实验值 $14.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。数值计算的结果表明，颗粒循环入口

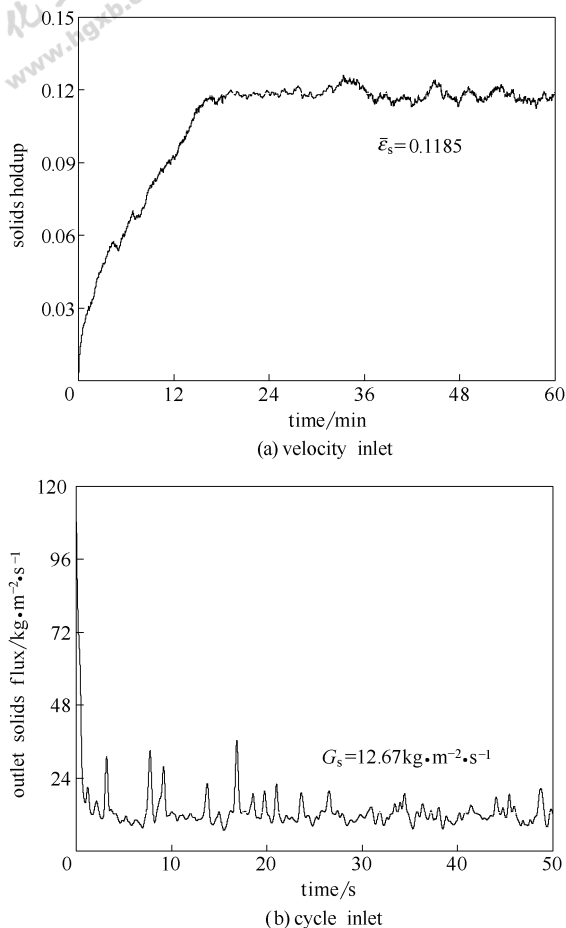


图 6 全床固含率和出口循环量随时间的变化

Fig. 6 Solids holdup and outlet solids flux with time

方式相对于速度入口方式能够很大程度地缩短计算时间,降低时间成本。

3.2 床层直径和出口尺寸的影响

图 7 表示了床层直径对时均轴向空隙率分布的影响。颗粒相入口方式如图 1(a) 所示。由图 7 可见,在表观气速和颗粒循环量分别为 $1.52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $14.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的操作条件下,当床层直径由 $D=0.045 \text{ m}$ 增大至 $D=0.090 \text{ m}$ 时, S 形时均轴向空隙率分布曲线的拐点由 8 m 处下降至 4 m 处。当床层直径继续增大至 $D=0.186 \text{ m}$ 时,时均轴向空隙率分布曲线由 S 形转变为直线形,全床呈现稀相气力输送状态。图 8 表示两种床层直径的不同床高处的时均颗粒相轴向速度的量纲 1 径向分布,图 1(a) 中出口处的量纲 1 位置为 $r/R=1$ 。轴向速度为正值表示颗粒向上流动,轴向速度为负值表示颗粒向下流动。由图 8 可见,在床中心区域颗粒为向上流动,而在壁面区域颗粒为向下流动,从而形成颗粒在床内的循环流动。当床层直径由 $D=$

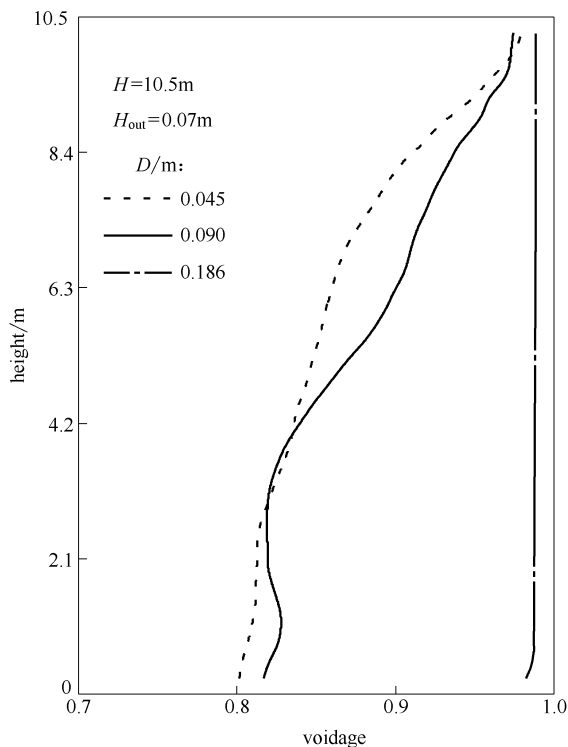


图 7 床层直径对时均轴向空隙率分布的影响

Fig. 7 Effect of bed diameter on time-averaged axial voidage profile

0.090 m 增大到 $D=0.186 \text{ m}$ 时, $H=2 \text{ m}$ 和 $H=7 \text{ m}$ 处截面出口侧颗粒向下流动的量纲 1 范围分别由 $0.65 \sim 1.0$ 和 $0.75 \sim 1.0$ 缩小至 $0.8 \sim 1.0$ 和 $0.8 \sim 1.0$ 。数值计算的结果表明,床径增大,导致边壁效应减弱,从而床层密度降低,轴向分布的不均匀性减弱。

图 9 和表 1 分别表示了出口尺寸对时均轴向空隙率分布和提升管顶部截面时均颗粒速度的影响。由图 9 和表 1 可知,当提升管出口尺寸 H_{out} 由 0.07 m 减小至 0.035 m 时,床层顶部颗粒浓度明显增加,截面时均颗粒速度增大。模拟计算中,颗粒相入口方式如图 1(a) 所示,全床颗粒浓度为预测值。当提升管出口颗粒通量和入口给定颗粒通量相等时,模拟体系达到稳定状态。其中,出口颗粒通量 W_s 是颗粒密度 ρ_s 、颗粒相浓度 ϵ_s 、出口颗粒法向速度 $u_{s,n}$ 和出口尺寸 H_{out} 的函数,可由式(8)表示

$$W_s = \epsilon_s \rho_s u_{s,n} H_{\text{out}} \quad (8)$$

由式(8)可知,对于恒定的入口颗粒通量,出口尺寸的减小使得出口约束增强,导致出口处及其附近区域颗粒浓度和速度的略微增大,从而维持模拟体系的稳定。

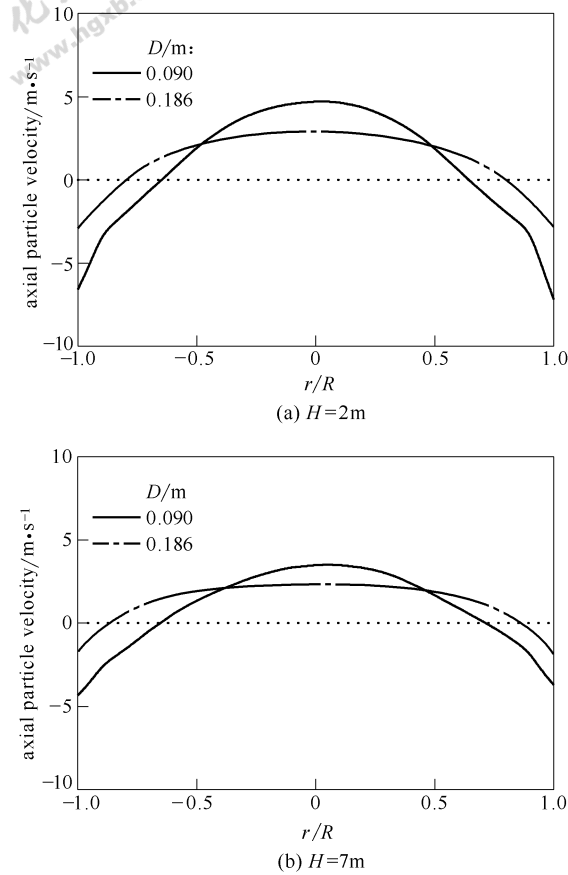


图8 床层直径对不同截面上时均轴向颗粒速度分布的影响

Fig. 8 Effect of bed diameter on time-averaged axial particle velocity profile at two cross sections

表1 出口尺寸对提升管顶部截面时均颗粒速度的影响
Table 1 Effect of outlet constraint on time-averaged particle velocity profile

H/m	H_{out}/m	Time-averaged particle velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
9.00	0.07	1.37
	0.035	1.83
9.25	0.07	1.31
	0.035	1.74
9.50	0.07	1.23
	0.035	1.65
9.75	0.07	1.22
	0.035	1.56
10.00	0.07	1.25
	0.035	1.45

4 结 论

综合考虑非均匀结构和颗粒相壁面边界条件，应用颗粒动力学理论，建立了耦合能量最小多尺度(EMMS)方法的双流体模型，数值模拟快速流化床内气固两相流动过程。考察了两种颗粒相入口方

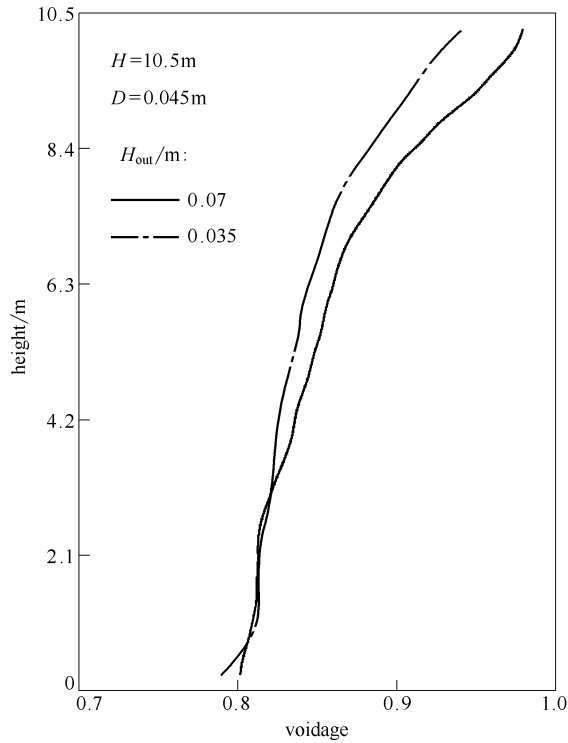


图9 出口尺寸对时均轴向空隙率分布的影响
Fig. 9 Effect of outlet constraint on time-averaged axial voidage profile

式的影响，得到了轴向空隙率分布、出口颗粒循环量以及全床颗粒相平均浓度；预测了不同床层直径和出口尺寸对提升管内轴向空隙率分布和颗粒相时均轴向速度量纲1径向分布的影响。主要结论如下：

- (1) 当颗粒相分别采用速度入口和循环入口时，均能实现对提升管内S形轴向空隙率分布的准确预测，其不同主要体现在循环入口相对于速度入口能够很大程度地降低计算成本；
- (2) 相同表观气速和颗粒循环量的条件下，床径增大会导致边壁效应减弱，颗粒向下流动的量纲1径向范围缩小，从而床层密度降低，轴向分布的不均匀性减弱；
- (3) 出口结构尺寸的改变会引起出口约束程度的改变，出口约束的增强则会导致床层密度的增加。

符 号 说 明

- D ——床层直径，m
- H ——床层截面高度，m
- H_{out} ——出口尺寸，m
- u ——速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

β ——微元体曳力系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

ϵ_g ——空隙率

Θ ——颗粒“拟温度”, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

ρ ——密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

下角标

g——气相

s——颗粒相

References

- [1] Goldschmidt M J V, Kuipers J A M, van Swaaij W P M. Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds using the kinetic theory of granular flow: effect of coefficient of restitution on bed dynamics [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2001, **56** (2): 571-578
- [2] Taghipour F, Ellis N, Wong C. Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2005, **60** (24): 6857-6867
- [3] Jiradilok V, Gidaspow D, Damronglerd S, Kovacs W J, Mostofi R. Kinetic theory based CFD simulation of turbulent fluidization of FCC particles in a riser [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2006, **61** (17): 5544-5559
- [4] Li J, Kwauk M. Particle-fluid Two-phase Flow: The Energy-minimization Multi-scale Method [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1994
- [5] Lu B, Wang W, Li J. Searching for a mesh-independent sub-grid model for CFD simulation of gas-solid riser flows [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2009, **64** (15): 3437-3447
- [6] Yang N, Wang W, Ge W, Li J. CFD simulation of concurrent-up gas-solid flow in circulating fluidized beds with structure-dependent drag coefficient [J]. *Chem. Eng. J.*, 2003, **96** (1/2/3): 71-80
- [7] Yang N, Wang W, Ge W, Wang L, Li J. Simulation of heterogeneous structure in a circulating fluidized-bed riser by combining the two-fluid model with the EMMS approach [J]. *Ind. Chem. Eng. Res.*, 2004, **43** (18): 5548-5561
- [8] Johnson P C, Jackson R. Frictional-collisional constitutive relations for granular materials, with application to plane shearing [J]. *J. Fluid Mech.*, 1987, **176**: 67-93
- [9] Almuttahir A, Taghipour F. Computational fluid dynamics of high density circulating fluidized bed riser: study of modeling parameters [J]. *Powder Technology*, 2008, **185** (1): 11-23
- [10] Benyahia S, Syamlal M, O'Brien T J. Evaluation of boundary conditions used to model dilute, turbulent gas/solids flows in a pipe [J]. *Powder Technology*, 2005, **156** (2/3): 62-72
- [11] Wang X F, Jin B S, Zhong W Q, Xiao R. Modeling on the hydrodynamics of a high-flux circulating fluidized bed with Geldart group a particles by kinetic theory of granular flow [J]. *Energy Fuels*, 2010, **24** (2): 1242-1259
- [12] Bi H T, Zhu J. Static instability analysis of circulating fluidized bed and the concept of high density risers [J]. *AIChE J.*, 1993, **39**: 1272-1280
- [13] Jin Y, Yu Z, Qi C, Bai D. The influence of exit structures on the axial distribution of voidage in fast fluidized bed// Kwauk M, Kunii D. Fluidization '88: Science and Technology [C]. Beijing: Science Press, 1988
- [14] Ding J, Gidaspow D. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow [J]. *AIChE J.*, 1990, **36** (4): 523-538
- [15] Lun C K K, Savage S B, Jeffrey D J, Chepur N. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield [J]. *J. Fluid Mech.*, 1984, **140**: 223-256
- [16] Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions [M]. Boston: Academic Press, 1994
- [17] Gidaspow D, Bezburuah R, Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds: kinetic theory approach// Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization [C]. 1992: 75-82