

信息技术应用

网格尺寸对循环流化床内 气固两相流动的影响

周新宇, 高金森, 徐春明, 蓝兴英

(中国石油大学重质油国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:将基于能量最小多尺度方法(EMMS)的曳力模型耦合到双流体模型中,并针对循环流化床内的气固两相流动进行了模拟研究。采用全滑移壁面边界条件处理颗粒相,考察了3种网格尺寸对轴向空隙率和出口颗粒循环量等气固流动特性的影响。计算结果表明,应用EMMS曳力模型处理相间作用力,同时在采用全滑移壁面边界条件处理颗粒相时,双流体模型能够正确预测轴向空隙率分布。采用网格尺寸为 $2.325\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 时,模拟结果和实测数据吻合较好,表明在循环流化床的数值模拟中选择恰当的网格尺寸是极为重要的。

关键词:循环流化床;气固流动;网格尺寸;计算流体力学

中图分类号:TQ021.1

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2012)01-0086-04

Effects of grid size on gas-solid flow in a circulating fluidized bed

ZHOU Xin-yu, GAO Jin-sen, XU Chun-ming, LAN Xing-ying

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

Abstract: A previous version of the energy minimization multiscale (EMMS) approach was incorporated into two-fluid model (TFM) to simulate the gas-solid flow in a circulating fluidized bed with Geldart A particles. The free-slip boundary condition (BC) was used for solid phase. Three grid sizes were performed to evaluate their influence on the gas-solid two-phase flow characteristics in term of axial voidage profile and outlet solid flux. It is found that the TFM can correctly predict the axial profile of voidage with EMMS approach and free-slip BC for solid phase. The outlet solid flux is in an agreement with the experimental data only for $2.325\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ grid. This suggests that it is important to adopt suitable grid size in the simulation of circulating fluidized bed.

Key words: circulating fluidized bed; two-phase flows; grid size; computational fluid dynamics (CFD)

循环流态化系统具有良好的气固接触、混合以及输送等特性,广泛应用于煤燃烧、煤汽化、冶金煅烧及催化裂化等工业领域。提升管是循环流态化系统最重要的组成部分。为深入认识循环流态化系统的流化型态、改善设计以及放大工艺,越来越多研究者采用数值模拟方法对提升管内气固流动行为进行研究。然而,对于固相为 Geldart A 类颗粒的循环流化床体系,采用双流体模型合理预测其流动特性仍是学术界的难题。Yang 等^[1]报道,曳力模型为 Gidaspow 经验关联式的标准双流体模型过度预测了提升管的出口颗粒循环量。Agrawal 等^[2]认为粗网格模拟由于忽略了亚网格尺度的非均匀流动结构导致曳力被高估。目前,大多数建立在平均化方法上的曳力关联式是基于微元控制体为均相结构的假设。这种假设意味着为描述流化床内的非均匀结构需采用足够细的网格尺寸。一些研究者^[3-5]认为模拟循环流态化系统时网格尺寸应该在 10 倍颗粒直

径的尺度上。然而,对于工业尺度的循环流态化系统,采用 10 倍颗粒直径的网格尺寸捕获团聚物显然是不合理。Lu 等^[6]的研究表明,即使网格尺寸足够小,标准双流体模型也无法准确预测颗粒循环量和轴向空隙率分布。而且,应用基于平均方法的经验关联式封闭物理模型,同样会导致忽略亚格子尺度的非均匀结构。现有文献报道中,多数学者认为亚格子尺度的非均匀结构显著影响相间作用力和固相应力。因此,一种简单实际的方法是采用粗网格模拟大尺度下团聚物的流体力学行为,同时采用合适的亚格子封闭方程计算更小尺度非均匀结构的影响^[3,7]。

鉴于提升管内的气固流动特性,本文选用杨宁曳力模型^[1,8],颗粒相应用全滑移壁面条件,考察 3 种网格尺寸的影响,从而确定合适的网格尺寸并将其应用于工业尺度循环流态化系统气固流动的数值模拟中。

收稿日期:2011-09-15

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)

作者简介:周新宇(1982-),男,博士生,010-89731773, zhou.xinyu@foxmail.com;蓝兴英(1977-),女,博士,副教授,从事化学工程与技术方面研究,通讯联系人,010-89731773, lanxy@cup.edu.cn.

1 模拟对象和数学模型

本文的模拟工况为范怡平^[9]的循环流化床冷态实验,实验装置主要由旋风分离器、伴床和提升管组成。本研究选取提升管作为模拟对象,图1为提升管的二维模拟结构示意图。流化介质为空气,表观气速为3.28 m/s;颗粒相为FCC催化剂,平均粒径为65 μm,密度为1 370 kg/m³,颗粒循环量为80 kg/(m²·s²)。

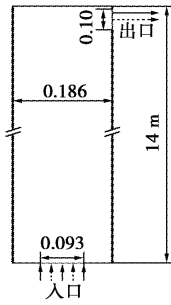


图1 提升管二维结构示意图

目前,针对循环流态化系统应用最广泛的仍是双流体模型,其描述冷态流化床内气相和固相的控制方程组为:

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s u_s) = 0 \quad (2)$$

(2) 动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g u_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g u_g) = \\ - \varepsilon_g \nabla p_g + \varepsilon_g \rho_g g + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \beta(u_s - u_g) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s u_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s u_s u_s) = \\ - \varepsilon_s \nabla p_s + \varepsilon_s \rho_s g + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \beta(u_g - u_s) - \nabla \cdot p_s \end{aligned} \quad (4)$$

式中, ε_g 为空隙率; u 为速度,m/s; β 为微元体曳力系数,kg/(m³·s)。

动量守恒方程中气固两相应力的表达式为:

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

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

固相应力采用颗粒动力学进行封闭。固相压力 p_s 、体积黏性系数 λ_s 和径向分布函数 $g_{0,ss}$ 采用Lun等^[10]的表达式;而剪切黏性系数 μ_s 则选用Gidaspow^[11]的表达式,忽略颗粒间的摩擦应力。颗粒温度方程采用Ding等^[12]的偏微分方程处理,其表达示为:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \Theta) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s u_s \Theta) \right] =$$

$$(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla u_s + \nabla \cdot (k_\Theta \nabla \Theta) - \gamma_\Theta - 3\beta\Theta \quad (7)$$

式中, Θ 为颗粒温度,m²/s²; γ_Θ 为碰撞耗散能,kg/(m·s³);其中,颗粒脉动动能扩散系数 k_Θ 为Gidaspow等^[13]的表达式,控制方程和本构方程中的其他表达式可见Gidaspow^[11]的著作,描述气固相间作用力的曳力系数 β 按下式计算:

$$\beta = \begin{cases} \frac{3}{4} C_d \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |u_g - u_s|}{d_p} \cdot \omega(\varepsilon_g) & \varepsilon_g > 0.74 \\ 150 \frac{\varepsilon_s (1 - \varepsilon_g) \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{\rho_s \varepsilon_s |u_g - u_s|}{d_p} & \varepsilon_g \leq 0.74 \end{cases} \quad (8)$$

$$\omega(\varepsilon_g) =$$

$$\begin{cases} -0.5760 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044} & 0.74 < \varepsilon_g \leq 0.82 \\ -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} & 0.82 < \varepsilon_g \leq 0.97 \\ -31.8295 + 32.8295 \varepsilon_g & \varepsilon_g > 0.97 \end{cases} \quad (9)$$

$$C_d = \begin{cases} \frac{24(1 + 0.15 Re_s^{0.687})}{Re_s} & Re_s \leq 1000 \\ 0.44 & Re_s > 1000 \end{cases} \quad (10)$$

$$Re_s = \frac{\varepsilon_s d_p |u_g - u_s| \rho_s}{\mu_g} \quad (11)$$

式中, C_d 为单颗粒曳力系数; d_p 为平均粒径,μm; ω 为修正因子。

气相采用无滑移壁面条件处理,颗粒相则采用Johnson-Jackson壁面条件^[14]处理,壁面反射系数 φ 为0,相当于全滑移壁面条件;颗粒-壁面碰撞恢复系数 e_w 取0.99。Johnson-Jackson壁面条件的具体表达式为:

$$\Theta_w = -\frac{k_\Theta}{\gamma_w} \frac{\partial \Theta_w}{\partial n} + \frac{\sqrt{3} \pi \varphi \rho_s \varepsilon_s u_{s,slip}^2 g_{0,ss} \Theta_s^{3/2}}{6 \varepsilon_{s,max} \gamma_w} \quad (12)$$

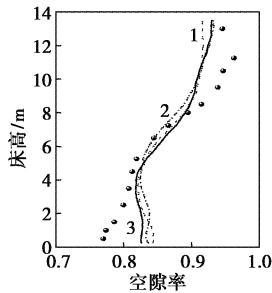
$$u_{s,w} = -\frac{6 \mu_s \varepsilon_{s,max}}{\sqrt{3} \pi \varphi \rho_s \varepsilon_s g_{0,ss} \sqrt{\Theta_s}} \frac{\partial u_{s,w}}{\partial n} \quad (13)$$

$$\gamma_w = \frac{\sqrt{3} \pi (1 - e_w^2) \varepsilon_s \rho_s g_{0,ss} \Theta_s^{3/2}}{4 \varepsilon_{s,max}} \quad (14)$$

模拟计算时,初始气体和颗粒速度均为零。气相入口处采用给定气体速度的方式处理。颗粒相入口则采用颗粒循环的边界条件处理,入口体积分数为25%顶部采用压力出口边界条件。初始全床颗粒相体积分数是13%,时间步长是 2×10^{-4} s。3种网格尺寸分别为9.3 mm × 20 mm,4.65 mm × 20 mm,2.325 mm × 20 mm。

2 结果和讨论

图2表示网格尺寸对空隙率轴向分布的影响,并与实验数据^[9]进行了对比。由图2可见,3种网格尺度下的计算结果均呈现典型的下部密相区、过渡区和上部稀相区。当网格尺寸为2.325 mm × 20 mm时,提升管底部的轴向空隙率的预测值更加接近实测值。模拟计算结果表明,径向网格尺寸对于提升管内的空隙率的轴向分布的影响较小,这可能是由于轴向空隙率属于截面平均化变量。



1—9.3 mm × 20 mm; 2—4.65 mm × 20 mm; 3—2.325 mm × 20 mm

图2 网格尺度对空隙率轴向分布的影响

为了进一步确定网格尺度对提升管内气固流动行为的影响,图3对比了3种网格尺度下的颗粒浓度的瞬时分布。由图可见,网格尺寸为9.3 mm × 20 mm时,捕获的非均匀结构比较模糊;网格尺寸为2.325 mm × 20 mm时,所揭示的非均匀结构更加清晰,并呈现多尺度及多形态分布,从顶部的絮状物(cluster)、带状物(streamer/strand)到中部和底部的簇状物(swarm)、片状物(sheet)。模拟结果表明,径向网格尺寸对于提升管内的局部非均匀结构具有显著的影响。

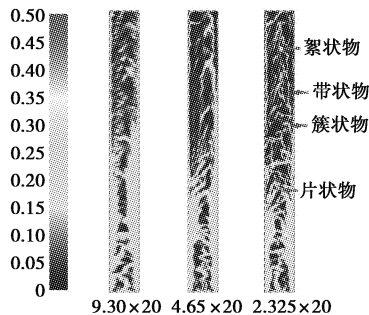


图3 网格尺度对瞬时颗粒相浓度的影响

表1对比了3种网格尺度下出口颗粒循环量的预测值和实测值及其相对误差。当网格尺寸为9.3 mm × 20 mm时,预测值比实测值大59.01%。随着径向网格的不断细化,出口颗粒循环量的预测值逐

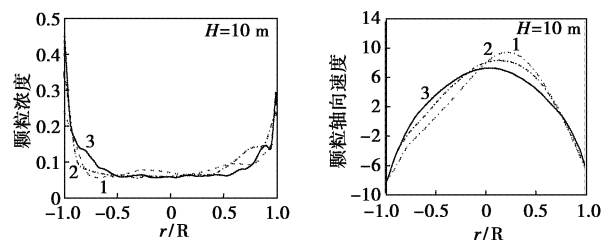
渐接近实测值。当网格尺寸为2.325 mm × 20 mm时,预测值和实测值之间的误差降至2.43%,吻合较好。模拟结果表明,细化径向网格尺寸能够提高循环流化床出口颗粒循环量的预测精度。

表1 3种网格尺度下的出口颗粒循环量的预测值

项目	颗粒循环量/kg·m ⁻² ·s ⁻¹		
网格尺度/mm × mm	9.3 × 20	4.65 × 20	2.325 × 20
实验值	80	80	80
模拟值	127.21	104.69	78.06
相对误差/%	59.01	30.86	2.43

Yang等^[1]和Lu等^[6]先后报道了采用Gidaspow曳力模型的双流体模型由于忽略了介观尺度结构的影响而无法准确预测提升管的出口颗粒循环量和轴向空隙率。结合图2和表1可知,由于本文所采用的杨宁曳力模型^[1,8]考虑了介观尺度团聚物的影响,网格尺寸为2.325 mm × 20 mm时能够准确预测相间作用力,从而正确预测轴向空隙率分布和出口颗粒循环量。径向2.325 mm的网格尺寸相当于35倍的颗粒粒径。这说明采用EMMS方法封闭双流体模型中的控制方程时网格尺度无需细化到10倍颗粒粒径的程度。

值得注意的是,细化径向网格尺寸对提升管顶部截面时均空隙率影响较小,对出口颗粒循环量却有显著影响。出口颗粒循环量是出口颗粒法向速度和出口颗粒浓度的函数。因此,为了进一步确定受径向网格尺寸影响最大的变量,本文对比了3种网格尺度下提升管顶部10 m处的截面时均局部颗粒相浓度分布和颗粒轴向速度分布。由图4(a)可知,颗粒呈现中心区域稀疏、边壁稠密的分布。3种网格尺度下的颗粒浓度分布仅仅表现为微弱的差别。由图4(b)可知,3种网格尺度下的局部轴向颗粒速度分布存在明显的不同。网格尺寸为2.325 mm × 20 mm时的最大颗粒向上速度比网格尺寸为9.3 mm × 20 mm时的最大颗粒向上速度大约低2 m/s。



1—9.3 mm × 20 mm; 2—4.65 mm × 20 mm; 3—2.325 mm × 20 mm

图4 网格尺度对10 m处截面时均颗粒浓度和颗粒轴向速度分布的影响

大量实验研究表明,环-核流动结构是提升管内气固流动的特征之一。颗粒在中心区域向上流动,在边壁区域向下流动。图4表明,细化网格尺度会导致颗粒轴向速度分布的显著变化,进而更为合理地预测出口颗粒循环量。

3 结语

针对循环流化床体系,应用基于能量最小多尺度(EMMS)方法的曳力模型处理相间作用力,同时采用全滑移壁面条件处理固相,合理预测了颗粒相为 Geldart A 类颗粒的提升管内的出口颗粒循环和轴向空隙率分布。主要结论如下:

(1) 细化网格的方法能够提高双流体模型预测气固流动特性的精度,增强捕捉非均匀结构的能力。细化径向网格对提升管时均空隙率轴向分布影响较小,对颗粒循环量影响显著。当径向网格尺寸细化到35倍颗粒直径(2.325 mm)时,颗粒循环量的预测值和实测值的误差为2.43%,吻合度很高。同时,细化径向网格能够更清晰地刻画体系内的絮状物、带状物、簇状物和片状物等介观尺度的非均匀结构。

(2) 径向网格尺寸对提升管顶部截面时均颗粒轴向速度分布的影响显著,对时均局部颗粒浓度分布影响较小,颗粒轴向速度分布是颗粒循环量预测准确度提高的主要原因。

参考文献

- [1] Yang N, Wang W, Ge W, *et al.* 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.
- [2] Agrawal K, Loezos P N, Syamlal M, *et al.* The role of meso-scale structures in rapid gas-solid flows[J]. *J Fluid Mech*, 2001, 445:

151 - 185.

- [3] Andrews IV A T, Loezos P N, Sundaresan S. Coarse-Grid Simulation of Gas-Particle Flows in Vertical Risers[J]. *Ind Chem Eng Res*, 2005, 44(16): 6022 - 6037.
- [4] Benyahia S, Syamlal M, O'Brien T J. Study of the ability of multi-phase continuum models to predict core-annulus flow[J]. *AICHE J*, 2007, 53(10): 2549 - 2568.
- [5] Igci Y, Andrews IV A T, Sundaresan S, *et al.* Filtered two-fluid models for fluidized gas-particle suspensions[J]. *AICHE J*, 2008, 54(6): 1431 - 1448.
- [6] Lu B N, Wang W, Li J H. 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.
- [7] Sundaresan S. Modeling the hydrodynamics of multiphase flow reactors: Current status and challenges[J]. *AICHE J*, 2000, 46(6): 1102 - 1105.
- [8] Yang N, Wang W, Ge W, *et al.* 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.
- [9] 范怡平. 催化裂化提升管内气固两相流动特性的研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2000.
- [10] Lun C K K, Savage S B, Jeffrey D J, *et al.* 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.
- [11] Gidaspow D. *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*[M]. Academic Press: Boston, 1994.
- [12] Ding J, Gidaspow D. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow[J]. *AICHE J*, 1990, 36(4): 523 - 538.
- [13] Gidaspow D, Bezburuah R, Ding J. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach[C]. *Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*, 1992: 75 - 82.
- [14] 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. ■

陶氏汽车系统业务部将在中国市场推出 AUTOTHANE™ 材料体系

2011年12月20日,陶氏汽车系统业务部表示将携手陶氏 Hyperlast 业务部(Dow Hyperlast)和位于马来西亚的 Kumpulan Jebco 公司于2012年初在中国汽车市场推出 AUTOTHANE™ 材料体系。AUTOTHANE™ 是一种高性能微孔聚氨酯材料体系,采用了陶氏 Hyperlast 业务部的混合多醇和 MDI 半预聚体技术。这种材料体系是专为汽车底盘和悬吊系统(包括弹力辅助装置和 NVH 零部件)而量身打造的,用以控制振动、碰撞和冲击对车体造成的影响。该技术将由陶氏的授权合作伙伴 Kumpulan Jebco 公司加工生产、陶氏汽车系统业务部进行全球推广。

Kumpulan Jebco 在江苏扬州新建生产工厂是该公司 800 万美元投资计划之一。这家工厂将于2012年2月正式投入运营,主要生产用于 AUTOTHANE 材料体系的 NVH(噪音、振动与舒适性)零部件。这种材料体系主要是一种自结皮闭孔结构,有助于为零部件赋予出色的抗摩擦性能、

优异的水解稳定性和抗微生物降解性、高阻尼特性以及较长的“车上”使用寿命。

多年以来,设计工程师们一直在探索高密度聚氨酯微孔弹性体独特的力学和动态性能的新用途。当这种材料被用于悬挂系统或振动隔离场合的时候,它们有助于改善车辆的操纵性能、舒适度以及行驶平顺性。AUTOTHANE 产品团队由陶氏汽车系统业务部和 Kumpulan Jebco 公司的专业人员共同组成,力求满足客户在产品的设计、原型制作、元件表征、耐用性测试和认证等方面的独特需求。

目前, AUTOTHANE 的生产基地分布于欧洲、北美洲、印度、韩国以及马来西亚。位于中国境内的新工厂的成立将进一步增强该产品的生产能力。这家新工厂将由 AUTOTHANE 的授权加工商 Kumpulan Jebco 公司经营。该公司在1996年即成功打入东盟(ASEAN)市场。