

变截面流化床理论模型及数值模拟

傅源方, 刘大有

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要:基于双流体模型,在一定假设的条件下推导得到了用于描述变截面床流化过程的局部平衡模型。对于局部平衡模型,空间导数项的离散采用五阶精度的 WENO 有限差分格式,时间导数项的离散采用 TVD Runge-Kutta 型的离散格式,对流量突变后的瞬态过程进行了模拟,得到固相体积分数在整个变化过程中沿床高的分布以及床高变化规律和床层表面颗粒速度变化曲线。对于流量突增过程,在床内不同位置形成了一系列的连续波,当所有的连续波到达床面整个变化过程结束。而对于流量突然减小过程,将会有固相体积分数间断在分布板处形成,当所有间断到达床面时,塌落过程结束。

关键词:流态化;变截面流化床;固相体积分数分布;数值模拟

中图分类号: TQ 051.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9954(2008)03-0031-04

Theoretical model and numerical simulation of variable section fluidized bed

FU Yuan-fang, LIU Da-you

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Based on the Two-Fluid Model, under some hypotheses, the Local Equilibrium Model (LEM) was developed. Using the model, the bed height and concentration distributing in liquid-solid variety section bed were studied by numerical simulation method. The fifth-order WENO scheme was used for spatial derivative and third-order TVD Runge-Kutta method for time derivative. The laws of the bed height change, the particle velocity, the particle volume fraction distributing were gotten. The simulation results show that during the process of expansion, there always exists a progressively broadening and upward-propagating continuous transition zone, but during the collapse process a solid-phase volume fraction discontinuity propagating upward from the distributor appears.

Key words: fluidization; variable section fluidized bed; particle volume fraction distributing; numerical simulation

流态化具有固体物料混合良好,液固二相之间的相对速度较大,传质、传热效率高,固体物料易于处理等优点^[1-2]。随着对流态化技术的应用,出现了许多新型的流化床,其中锥形流化床就是其中很重要的一种。锥形流化床在颗粒干燥、悬浮、包涂以及选矿等领域得到了广泛应用^[3-4],人们对其流化性质也进行了广泛的研究^[3-9]。由于锥形流化床中表观气速在轴向上存在速度梯度,使得其具有独特的流化特性。Kwauk^[4]主要研究了锥形流化床的不同流化状态以及用于描述以上各个状态下稳态参数的计算公式。Peng^[5]针对液固锥形流化特征进行了

研究,而其余的研究者对气固锥形流化床的特性进行了广泛的研究^[6-9],以上研究给出了锥形床稳态流化时床内各参数关系。刘大有研究员^[10-12]所带领的小组开展了等截面流化床在流量突变后瞬态过程的研究,得到各参数的变化规律以及床层内浓度波的传播和衰减规律。本文将给出用于描述变截面流化床流化瞬态过程的局部平衡模型,利用该模型数值求解了入口为长方形的变截面流化床在流量突增或突减时的床层高度变化、床面颗粒层速度、固相体积分数随时间变化规律以及床内固相体积分数波传播方程。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20376083)

作者简介:傅源方(1975—),男,博士生,讲师,主要从事二相流及流态化过程研究,电话:(0771)5815226, E-mail: fuyf@imech.ac.cn

1 理论模型

本文主要研究完全流化的流化床在流量突变后的流化过程,不考虑有颗粒堆积或有固相体积分数等于 0 的流化现象。假设流动为一维的且二相不可压缩,忽略由于颗粒碰撞和乱运动引起的固相压力、壁面阻力、附加质量力和 Basset 力以及流体的粘性应力,可得一维无相变变截面双流体模型的基本形式^[13-15]:

$$A \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f u_f A)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$A \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_p u_p A)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$A \rho_f \frac{\partial u_f}{\partial t} + \rho_f \frac{\partial(A \rho_f u_f^2)}{\partial x} =$$

$$A \left(-\rho_f \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_f g - F_{p1} \right) \quad (3)$$

$$A \rho_p \frac{\partial u_p}{\partial t} + \rho_p \frac{\partial(A \rho_p u_p^2)}{\partial x} =$$

$$A \left(-\rho_p \frac{\partial p}{\partial x} - \rho_p g + F_{p1} \right) \quad (4)$$

$$\rho_p + \rho_f = 1 \quad (5)$$

式(1)和(2)相加,并对 x 积分,可得到如下的混合物连续性方程以替代方程(2):

$$A(x) (\rho_f u_f + \rho_p u_p) = q(t) \quad (6)$$

式中, x 是床高坐标, $A(x)$ 是位置 x 处的床层截面积, ρ_p 和 ρ_f 分别为固相和液相的体积分数, ρ_p 和 ρ_f 分别为固相和液相密度, u_p 和 u_f 分别为固相和液相的速度, p 为床内压降, F_{p1} 为相间阻力, g 为重力加速度, q 为流量, t 为时间。由方程(3)和(4)消去压力项可得如下的等价方程:

$$\rho_f \left[\frac{\partial(\rho_p u_p)}{\partial t} + \frac{\partial(A \rho_p u_p^2)}{A \partial x} \right] - \rho_p \rho_f \times$$

$$\left[\frac{\partial(\rho_f u_f)}{\partial t} + \frac{\partial(A \rho_f u_f^2)}{A \partial x} \right] = (\rho_f - \rho_p) \rho_f \rho_p g + F_{p1} \quad (7)$$

相间阻力公式采用 Richardson-Zaki 型公式,考虑了颗粒体积分数对相间阻力的影响^[16],

$$F_{p1} = \frac{(\rho_p - \rho_f) g \rho_p \rho_f^{(2-n)}}{u_T} (u_f - u_p) \quad (8)$$

式中, n 为 Richardson-Zaki 指数, u_T 为颗粒沉降速度,利用式(6), (7)和(8)可得:

$$\frac{q(t)}{A(x)} - u_p = \left[1 + \frac{1}{(\rho_p - \rho_f) g} \left(\rho_p \frac{du_p}{dt} - \rho_f \frac{du_f}{dt} \right) \right] \times$$

$$u_T \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (9)$$

式(9)中中括号内第 2 项表示固液二相惯性力之差与颗粒相(水下)重力的相对大小,对于流化过程中的绝大部分时间,下式成立:

$$\frac{q(t)}{A} - u_p(t, x) = [1 + O(1)] u_T \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (10)$$

即得到用于描述变截面流化的 Richardson^[17] 推广

公式 $\frac{q(t)}{A(x)} - u_p(t, x) = u_T \frac{\rho_p}{\rho_f}$ 将方程(10)代入固相连续性方程中,并消去 u_p , 可得关于固相体积分数 ρ_p 守恒形式的波动方程:

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial f(\rho_p)}{\partial x} =$$

$$\left[\frac{u_T \rho_p (1 - \rho_p)^n}{A} - \rho_p \frac{q(t)}{A^2} \right] \frac{dA(x)}{dx} \quad (11)$$

其中: $f(x, \rho_p) = \left[\frac{q(t)}{A(x)} - u_T (1 - \rho_p) \right]^n \rho_p$

2 数值求解

对空间导数采用五阶精度 WENO^[18] 有限差分格式,对时间导数项的离散采用三阶精度的 TVD-Runge-Kutta 方法^[19]。

2.1 定解条件

方程(11)的初始条件和边界条件为

$$t = 0: \rho_p(0, x) = 1 - \left[\frac{q(0)}{A(x) u_T} \right]^{\frac{1}{n}}, h(t) = h(0);$$

$$x = 0: \rho_p(t, 0) = 1 - \left[\frac{q(t)}{A_0 u_T} \right]^{\frac{1}{n}};$$

$$x = h(t): u_{p,s} = u_p(t, h) = \frac{dh}{dt} \quad (12)$$

式中, $u_{p,s}$ 为床层表面颗粒相速度, h 为床层高度。

2.2 计算方法

由式(12)可知,上边界是一个自由边界,因此物理计算域 $[0, h(t)]$ 是随时间变化的。为求解方便,通过边界固定方法^[20] (Crank, 1984) 将其转化为计算坐标系 (z, t) 内的固定求解区域。方程(11)在计算坐标 (z, t) 中可以表示为

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \frac{\partial f(\rho_p)}{\partial z} = \left[\frac{u_T \rho_p (1 - \rho_p)^n}{A(z)} - \rho_p \frac{q(t)}{A(z)^2} \right] \times$$

$$\frac{h(0)}{h(t)} \frac{dA(z)}{dz} - \frac{u_{p,s-p}}{h(t)} \quad (13)$$

式中, $f(\rho_p) = \rho_p \frac{h(0)}{h(t)} \left[\frac{q(t)}{A(z)} - u_T (1 - \rho_p) \right]^n$

$\frac{u_{p,s} z_p}{h(t)}$, z 的定义域为 $[0, h(0)]$ 。时间项采用最优三

阶 TVD-R-K 方法, 空间项采用五阶精度 WENO 有限差分格式, 计算步骤如下: 给定前一时刻颗粒体

积分分数分布 $p_p(t_k, z_i)$ 和床高 $h(t_k)$ 和流化速度

$u(t_k)$; 用 WENO 格式计算数值流量

$g_{i+1/2}$; 用 $u_{p,s}(t_k) = \frac{q(t)}{A(z)} - u_T(1 - p_{p,s})^n$ 和

$h(t_{k+1}) = h(t_k) + \Delta t \cdot u_{p,s}(t_k)$ 分别计算床层表面

速度及下一时刻的床面高度; 用 TVD Runge-Kutta 方法求下一时刻的颗粒体积分

数 $p_p(t_{k+1}, z_i)$, 回到 N 为时间步数, i 为空间步数。

2.3 结果讨论

按入口处流速的不同变化进行讨论, 变截面流化床入口为 20 mm × 15 mm, 顶角为 5°; 计算时 z 方

向取 1 500 个网格。玻璃珠颗粒 $d_p = 1.45 \text{ mm}$, $\rho_p = 2.58 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

2.3.1 流速突然增加情况下的瞬态过程

入口处流化速度 $v(t)$ 从 $u_1 = 0.03105 \text{ m/s}$ 变化到 $v_2 = 0.1062 \text{ m/s}$, 见图 1(a)。计算的初值为: 初始床高 $h(0) = 0.207 \text{ m}$, 入口处和床层表面固相体积分分数分别为 $p_{p01} = 0.5$ 和 $p_{p01} = 0.61$ 。当流化速度突然增加, 在分布板处立即形成逐渐拓宽连续波沿床高向上传播, 直到所有连续波到达床面, 此时, 床内的状态又重新恢复到一个新的稳定状态。图 1(b) 表示在整个流量突然增加过程中床高变化规律, 图 1(c) 表示床层表面颗粒的速度在流量突然增加过程中的变化规律, 图 1(d) 表示在流量突然增加过程中不同时刻固相体积分分数沿床高分布情况。

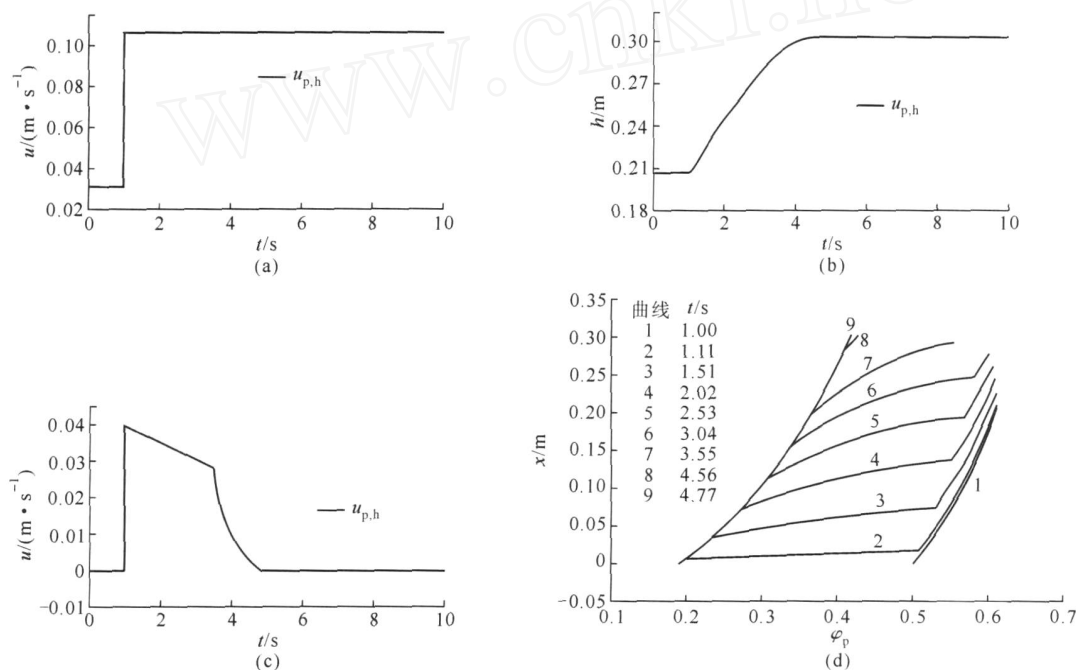


图 1 膨胀时床内各参数随时间分布规律

Fig 1 Parameters during expansion varying with time

2.3.2 流速突然减小情况下的瞬态过程

入口处流化速度 $u(t)$ 从 $u_2 = 0.1062 \text{ m/s}$ 变化到 $u_1 = 0.03105 \text{ m/s}$, 见图 2(a)。计算的初值为: $h(0) = 0.3028 \text{ m}$, 此时入口处和床层表面固相体积分分数分别为 $p_{p02} = 0.19$ 和 $p_{p02} = 0.42$ 。当流化速度突然减小时, 在分布板以上床高各处立即形成固相体积分分数间断, 固相体积分分数间断沿床高向上传

播, 在传播的过程中间断厚度逐渐减小, 当所有间断都到达床面, 床层塌落过程结束, 床内的状态又恢复到稳定状态。图 2(b) 表示在整个流量突然减小过程中床高变化规律, 图 2(c) 给出的是床层表面颗粒的速度在流量突然减小过程中的变化规律, 图 2(d) 显示了在流量突然减小过程中不同时刻固相体积分分数沿床高分布情况。

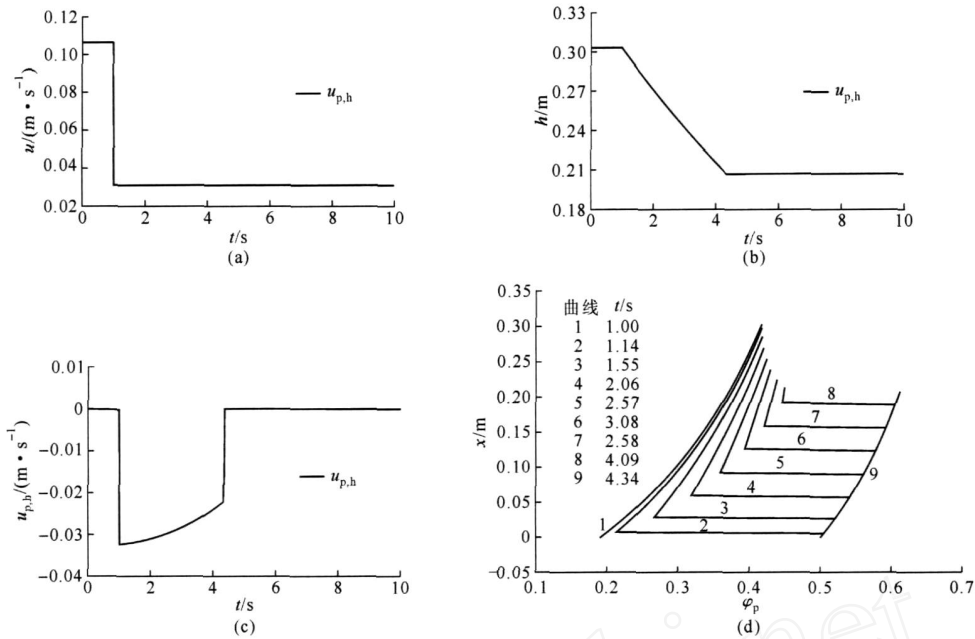


图 2 塌落时床内各参数随时间分布规律

Fig 2 Parameters during collapse varying with time

3 结论

在一定假设基础上从基本双流体模型推导出了描述变截面流化过程的局部平衡模型,得到了变截面流化床中固相体积分数波速方程。对流量突增或突减的工况进行了模拟计算,求得了固相体积分数在整个变化过程中沿床高的分布规律。对于流量突增过程,在流量增加的瞬间就在床内不同位置形成了很多的连续波,当所有的连续波到达床面整个变化过程结束,恢复新的稳定流化状态。在流量突然减小过程,在床内形成固相体积分数间断,间断逐渐向上传播,当间断到达床面时,流化过程结束。对于局部平衡模型,空间导数离散采用五阶精度的 WENO 格式,时间导数离散采用三阶精度的 TVD Runge-Kutta 方法,利用 Visual Fortran 语言编写了计算软件进行了数值模拟。

参考文献:

- [1] Renzo Di Felice. Hydrodynamics of liquid fluidization[J]. Chemical Engineering Science, 1995, 50(8): 1213—1218.
- [2] Needham D J, Merkin J H. The propagation of voidage disturbance in a uniformly fluidized bed[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 131(2): 427—430.
- [3] Deiva Venkatesh R, Chaouki J, Klvana D. Fluidization of cryogels in a conical column[J]. Powder Technology, 1996, 89(3): 179—186.
- [4] Kwauk M. Fluidization [M]. Beijing: Science Press,

1992 91—100.

- [5] Peng Y, Fan L. Hydrodynamic characteristics of fluidization in liquid-solids tapered beds[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(14): 2277—2290.
- [6] Olazar M, San Jose M J, Aguayo A T J, et al. Stable operation conditions for gas solids contact regimes in conical spouted beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1992, 31(7): 1784—1792.
- [7] Olazar M, San Jose M J, Aguayo A T, et al. Pressure drop in conical spouted beds[J]. Chemical Engineering Journal, 1993, 51(1): 53—58.
- [8] Olazar M, San Jose M J, Llamas R, et al. Hydrodynamics of sawdust and mixtures of wood residues in conical spouted beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1994, 33(4): 993—1000.
- [9] Bi H T, Macchi A, Chaouki J, et al. Minimum spouting velocity of conical spouted beds[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1997, 75(2): 460—465.
- [10] Liu D Y, Jin G D. Modeling two-phase flow in pulsed fluidized bed[J]. China Particology, 2003, 1(3): 95—104.
- [11] Jin G D, Nie Y S, Liu D Y. Numerical simulation of pulsed liquid fluidization and its experimental validation[J]. Powder Technology, 2001, 119(2—3): 153—162.
- [12] 晋国栋. 液固脉冲流化过程的数值模拟和实验验证[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2002 31—77.
- [13] 刘大有. 二相流体动力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993 106—156.

【下转第 42 页】

料循环是对撞流反应器甲醇合成所特有,因此着重进行了考察,在其他操作条件相同的情况下,增加浆料循环量时空产率和出口甲醇体积分数都有所增加,这可能是由于增加循环量增强了喷嘴雾化时催化剂浆料与合成气之间的相互作用,强化了气液传质性能所致;喷嘴个数作为对撞流反应器的结构参数也对其进行了考察,结果表明采用对置式二喷嘴和对置式四喷嘴比单喷嘴在时空产率和出口甲醇体积分数方面都有所提高。

参考文献:

- [1] Gandhi B, Prakash A, Bergougnou M A. Hydrodynamic behavior of slurry bubble column at high solids

concentrations[J]. Powder Technology, 1999 (3): 80—94.

- [2] Mareto C, Krishna R. Modelling of a bubble column slurry reactor for Fischer-Tropsch synthesis [J]. Catalysis Today, 1999, (52): 279—289.
- [3] Vijayaraghavan P, Conrad J, Kulik M. Mass transfer comparison between mechanically agitated slurry reactor and liquid entrained reactor in the methanol synthesis process[J]. Fuel Science and Technology Int, 1993, 11 (11): 1597—1609.
- [4] Lefebvre A H. Atom Sprays[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [5] 宋维端,肖任坚,房鼎业. 甲醇工学 [M]. 北京:化学工业出版社, 1991. 200—210.

【上接第 37 页】

(3)反萃反应表观平衡常数 $k = 10^{27.5}$ ($t = 30$), $H = -8.6$ kJ/mol, $G = -159.4$ kJ/mol, $S = 497.4$ J/(mol·K)。反萃反应为放热反应,降低温度有利于反应的进行。

参考文献:

- [1] Edison Li N N, Cahn R P, Shrier A L. Removal of organic compound[P]. US Pat. 17546, 1971-11-02
- [2] Cahn R P, Lin N. Separation of phenol from waste water by liquid membrane technique [J]. SCP Sci, 1974, 9 (6): 505—505.
- [3] Kulkarni P S, Tiwari K K, Mahajani V V. Recovery of nickel via liquid emulsion membrane process using methane sulfonic acid as a strippant [J]. Separation Science and Technology, 2001, 36 (3): 639—656.
- [4] Szejner G, Mamur A. Cadmium removal from aqueous solutions by an emulsion liquid membrane the effect of

resistance to mass transfer at the outer oil-water interface [J]. Colloids and Surfaces, 1999, (151): 77—83.

- [5] 姚淑华,石中亮,扬波,等. 乳状液膜法处理废水 Cr(VI)的研究 [J]. 沈阳化工学报, 2001, 15 (1): 31—34.
- [6] 李玉萍,李莉芬,王献科. 液膜法除去工业废水中的 Cr(VI) [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2002, (3): 30—32.
- [7] 史艳丰,董红星,于善猛. 乳状液膜法去除水溶液中的 Cr(VI) [J]. 化工科技, 2006, 14 (2): 28—31.
- [8] 罗建洪,费德君,党亚固,等. 液膜法的新型载体杯芳烃 [J]. 四川化工, 2006, 9 (5): 1—3.
- [9] 罗建洪,费德君,党亚固,等. 对叔丁基杯 [4]芳烃乙酸萃取 Cr^{3+} 的反应研究 [J]. 化学工程, 2007, 35 (10): 5—8.
- [10] 李声崇,危胜宏,戴冈夫,等. HTTA-P350协同萃取三价稀土离子的热力学研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 1986, (6): 44—51.

【上接第 34 页】

- [14] Tsinontides S C, Jackson R. The mechanics of gas fluidized beds with an interval of stable fluidization[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 255 (1): 237—274.
- [15] Kawaguchi T, Tanaka T, Tsuji Y. Numerical simulation of two-dimensional fluidized beds using discrete element method (comparison between the two- and three models) [J]. Powder Technology, 1998, 96 (2): 129—138.
- [16] Glasser B J, Kevrekidis I G, Sundaresan S. Fully developed traveling wave solutions and bubble formation in fluidized beds[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 334 (2): 157—188.

- [17] Richardson J F, Zaki W N. Sedimentation and fluidization: part I [J]. Trans Instn Chem Engrs, 1954, 32 (1): 35—53.
- [18] Jiang G S, Shu C W. Efficient implementation of weighted ENO schemes [J]. Journal of Computational Physics, 1996, 126 (1): 202—228.
- [19] Shu C W, Osher S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock capturing schemes [J]. Journal of Computational Physics, 1988, 77 (2): 439—471.
- [20] Crank J. Free and Moving Boundary Problems [M]. Oxford: Clarendon Press, 1984. 187—216.