

# 液固流化床颗粒速度场和固含率的数值模拟

吴琳 周昆颖

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 基于三维 N-S 方程同时选用标准  $k-\epsilon$  湍流模型, 采用通用流场分析软件 fluent 对液-固循环流化床的颗粒速度场和固含率的轴向分布情况进行了数值研究。结果表明流场的数值计算结果与文献中的试验值吻合较好, 对进一步研究具有指导意义和实用价值。

**关键词:** 液固循环流化床; 颗粒速度; 固含率

**中图分类号:** TQ051.13

与传统液固流化床相比, 液固循环流化床具有操作范围宽、颗粒可以外循环等优点, 具有广泛的应用前景, 并引起了研究者广泛重视<sup>[1]</sup>。目前, 大部分研究液固循环流化床的文献都是集中在采用实验室测量的方法, 例如, Roy<sup>[2]</sup>等利用放射性颗粒示踪技术和 CT 技术测量大颗粒液固循环流化床中颗粒的流动状况。但是放射性颗粒对实验人员有危害, 小粒径示踪颗粒的制备比较困难, 而且单颗粒也不能代表床层内部颗粒粒度的分布, 其它的一些测量方法也各有其局限性, 因此本文采用通用商业流场分析软件 fluent, 基于三维 N-S 方程, 标准湍流模型, 对液固循环流化床中颗粒速度场进行了数值研究, 通过与文献<sup>[3-4]</sup>中的试验值进行比较, 流场的计算结果与试验值吻合比较好, 并且得出固含率沿轴向的分布图, 对进一步研究具有指导意义和实用价值。

## 1 建立模型

液固循环流化床主要包括提升管和颗粒循环系统两部分。提升管的内径为 140 mm、高为 3 m, 提供液固两相流化的空间; 颗粒循环系统由液固一次分离的扩大段、固体颗粒储罐和颗粒输送部分组成, 主要功能是实现颗粒与水的分离以及颗粒的外循环。因此要研究液固流化床中颗粒的速度场, 则主要模拟提升管内的固体颗粒的速度分布情况, 建立模型时, 只须建立从分布板到提升管这一段的模型。

液固两相流体系的介质取室温下的水以及密度为  $2460 \text{ kg/m}^3$ 、平均粒径为 0.4 mm 的玻璃珠。

首先在 Fluent 的专用前处理软件 Gambit 中画出计算所需模型, 由于流化床结构的对称性, 只取其中的 1/4 作为计算区域来进行模拟。由于模型主体结构为圆柱体, 利用 Cooper 方法生成方向结构化的网格, 图 1 即为液固循环流化床的计算流体动力学

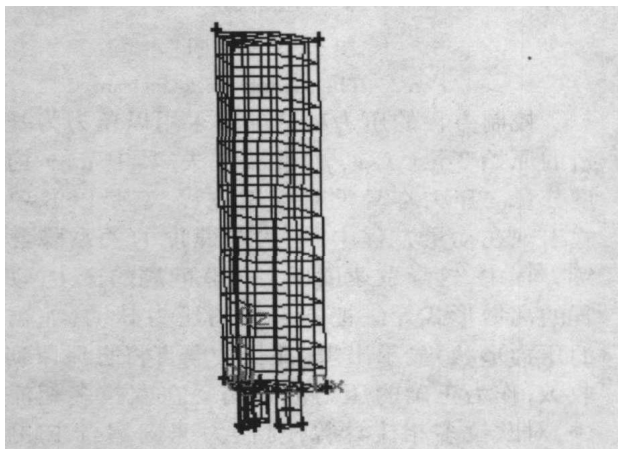


图 1 液固流化床的 CFD 模型

Fig. 1 Computational fluid dynamics (CFD) model of the liquid-solid circulating fluidized bed

(CFD) 模型示意图。然后定义各个边界的边界条件, 分别为速度入口边界条件、压力出口边界条件、对称边界条件和壁面边界条件。最后将输出的 \*.msh 文件导入 fluent 中进行计算。

## 2 数值方法

两相流体模型采用欧拉模型, 数值分析采用雷诺平均的 Navier-Stokes 方程作为控制方程, 湍流模型选用标准  $k-\epsilon$  模型。采用二阶精度迎风格式, 基

收稿日期: 2005-10-27

第一作者: 女, 1981 年生, 硕士生

E-mail: 235wl@163.com

于微元中心有限体积法空间离散。

基本控制方程:连续性方程和动量守恒方程<sup>[5]</sup>

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v v) = - \nabla p + f + \nabla \cdot S + S \tag{2}$$

式中,  $t$  为时间;  $f$  为外界体力(例如重力);  $v$  为压力张量;  $p$  为压力;  $S$  为源项。在数值计算中,所选取的湍流模型的对计算结果的影响很大。为了估计湍流尺度,因此将结果变量分解为平均值和脉动值,这样就建立起雷诺平均 N-S 方程。在本文的计算中,选取标准  $k-\epsilon$  模型,最终使方程封闭。

采用分离解法,求解框图如图 2。

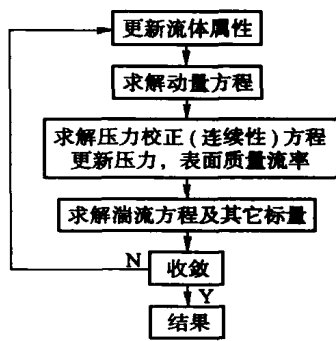


图 2 求解框图

Fig. 2 The solving block diagram

控制方程的压力项的求解采用以压力为基本变量的原始变量 ( $u, v, p$ ) 离散方法,其中  $u, v$  均为速度分量。压力本身没有控制方程,它是源项的形式出现在动量方程中,压力与速度的关系隐含在连续方程中,这导致速度压力关联问题的产生,动量方程的离散形式无法把不合理的压力脉动(如锯齿波的压力形状)显示出来,并且会一直将它保留到迭代收敛,作为正确的压力波输出。在欧拉多相流模型中,对欧拉多相流计算,对压力速度耦合 FLUENT 使用 Phase Coupled SIMPLE (PC-SIMPLE) 算法。PC-SIMPLE 是 SIMPLE 算法在多相流中的扩展。速度项的求解被相耦合,但是用分离的方式。耦合求解器采用的多重网格块代数方案同时求解各相速度分量形成的矢量方程。然后,压力修正方程基于总的体积连续建立起来。为了满足连续性的条件压力和速度都要被修正。

方程的离散采用二阶迎风格式,以提高计算结果的精确程度。

### 3 计算结果分析

在张欢等<sup>[3-4]</sup>的实验中,利用超声多普勒测速

仪测定液固循环流化床中的颗粒速度沿径向的分布情况,本文中速度场的计算结果就是与其实验测量结果进行比较。图 3(图中  $r$  为径向距离,  $m$ ;  $R$  为流化床半径,  $m$ )是在同一轴向位置 ( $H = 2.1 m$ ) 和表观液速 ( $U_1 = 0.072 m/s$ ) 处不同的颗粒循环速度下,颗粒速度  $U_p$  的径向分布情况,其中(a)图表观颗粒循环速度  $U_s = 0.0011 m/s$ , (b)图  $U_s = 0.0031 m/s$ 。

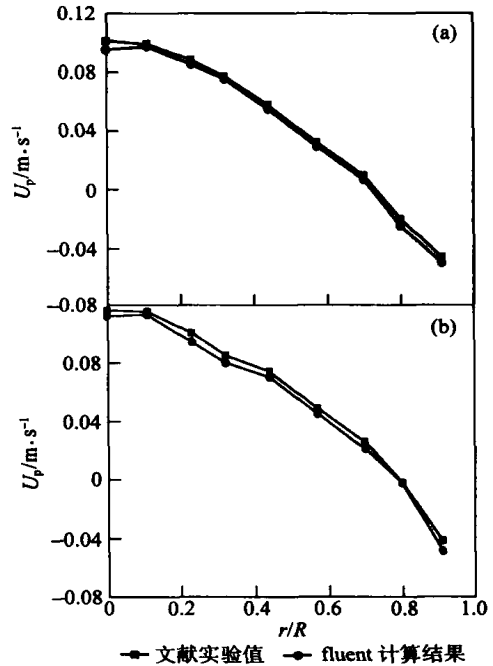


图 3 不同颗粒循环速率下颗粒速度的径向分布

Fig. 3 Mean radial velocity profiles at different particle circulating rates

图 4 表示在相同的表观液速 ( $U_1 = 0.072 m/s$ ) 和表观颗粒循环速度 ( $U_s = 0.0031 m/s$ ) 下,不同的轴向位置处 ((a) 图中  $H = 1.5 m$ , (b) 图中  $H = 2.5 m$ ) ,颗粒速度的径向分布情况。

由以上图示结果表明:速度总体呈现出中心区域大、边壁区域小的不均匀分布,而且在径向位置  $r/R = 0.7 \sim 0.8$  处开始出现负速度。说明近壁区域有涡流。结果与文献<sup>[3-4]</sup>中的实验值相接近。

图 5 表明,在确定的表观液速  $U_1$  下 ( $U_1 = 0.072 m/s$ ),随颗粒循环速度的增加,沿着各高度位置的颗粒浓度都将增大,同时颗粒浓度的轴向分布更不均匀。

### 4 结论

在相同的操作条件下,由模拟计算值和文献实

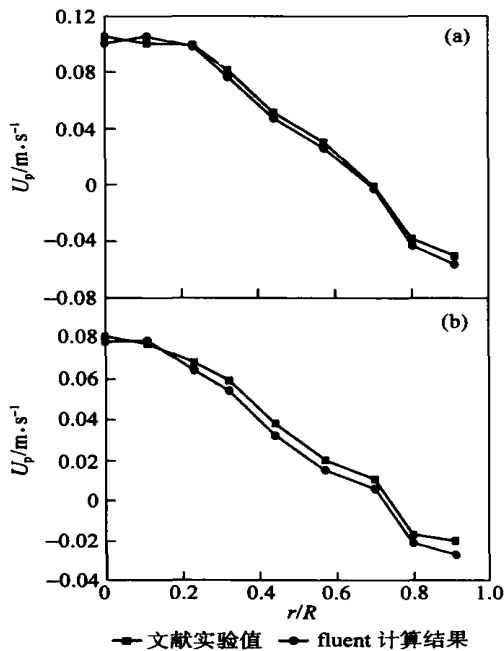


图 4 不同轴向位置处颗粒速度径向分布

Fig. 4 Particle velocity profiles at different axial position 验值的比较可以看出:

(1) 颗粒速度总体呈现出中心区域大、边壁区域小的径向分布特性,有明显的径向不均匀性,而且在  $r/R = 0.7 \sim 0.8$  开始出现负速度。

(2) 在各高度位置处,随颗粒循环速度的增加,颗粒浓度也会增大,而且颗粒浓度的轴向分布更不均匀。

(3) fluent 软件计算流场结果与试验值接近,因此可用于预测液固流化床的颗粒速度场和颗粒浓度的分布情况,并为以后的研究工作打下坚实的基础。

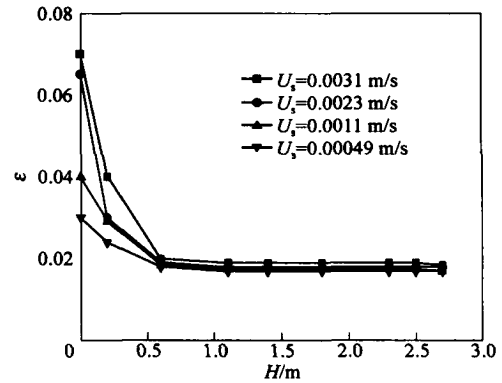


图 5 不同颗粒循环速度下固含率的轴向分布

Fig. 5 Axial distributions of particle density at different particle circulating rates

### 参 考 文 献

- [1] Liang W G, Zhu J X, Jin Y, *et al.* Radial nonuniformity of flows structure in a liquid-solid circulating fluidized bed[J]. Chem Eng Sci, 1996, 51: 2001 - 2010.
- [2] Roy S, Chen J W, Kumar S B, *et al.* Tomographic and particle tracking studies in a liquid-solid riser[J]. Ind Eng Chem Res, 1997, 36: 4666 - 4669.
- [3] 张欢,王铁峰,王金福,等.液固循环流化床中颗粒轴向速度的实验研究[J].高校化学工程学报,2002,16: 408 - 414.
- [4] 张欢,王铁峰,王金福,等.液固循环流化床中的颗粒速度场[J].化工学报,2003,54:1355 - 1360.
- [5] Depypere F, Pieters J G, Dewettinck K. CFD analysis of air distribution in fluidized bed equipment [J]. Powder Technology, 2004, 145: 176 - 189

## Simulation of particle velocity field and solid holdup in liquid-solid circulating fluidized beds

WU Lin ZHOU Kun-ying

(College of Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The particle velocity field and axial distribution of solid holdups in liquid-solid circulating fluidized beds have been simulated based on three-dimensional full Navier-Stokes (N-S) equations. Computational fluid dynamics (CFD) results implementing a Eulerian model with standard turbulence show that these type of simulations can give qualitatively reasonable agreement with experimental measurements.

**Key words:** liquid-solid circulating fluidized bed; particle velocity; solid holdup