

突扩圆管内液-固两相流固体颗粒运动特性的 DPM 数值模拟

李国美¹ 王跃社¹ 亢力强²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049
2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要 采用考虑颗粒碰撞的欧拉-拉格朗日数值模拟方法 (DPM), 对水平突扩圆管中液固两相流固体颗粒的碰撞过程进行了数值计算。在模型中, 对液相采用欧拉法建立控制方程, 对离散颗粒采用拉格朗日方法模拟。采用硬球模型描述颗粒间的碰撞作用。计算结果表明, 该模型可以真实地模拟液固两相流中固体颗粒运动的动态变化过程以及颗粒的非均匀分布特征, 从单颗粒层次上提供颗粒的运动信息, 这有助于深入研究液固两相流中固体颗粒的运动规律。

关键词 欧拉-拉格朗日方法; 硬球模型; 液固两相流; 碰撞

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)12-2061-04

NUMERICAL SIMULATION ON SOLID PARTICLE MOVEMENT CHARACTERS OF LIQUID-SOLID TWO PHASE FLOW IN SUDDEN EXPANSION PIPE BY DISCRETE PARTICLE MODEL

LI Guo-Mei¹ WANG Yue-She¹ KANG Li-Qiang²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190)

Abstract Numerical simulation of solid particle collision process of liquid-solid two phase flow in horizontal sudden expansion pipe was performed with Eulerian-Lagrangian model(DPM). In this model, governing equations of liquid were established with Eulerian approach, and discrete particle phase was simulated through Lagrangian method. The hard sphere model was used to describe inter-particle collisions. The results showed that the model could really simulate the dynamic process of particles and their unequal distribution characteristics. At the same time, the model can provide detailed moving information of each particle. These may be helpful to reveal the movement characters of solid particle in liquid-solid two phase flow.

Key words Eulerian-Lagrangian approach; hard sphere model; liquid-solid two phase flow; collision

0 前 言

液固两相流是工业中最常见的多相流动之一。在高速流动条件下, 固体颗粒所携带的动量远大于单相流动, 它是引起石油、化工、水利电力、机械等行业中各种泵、阀门、管道等过流部件大量损坏的重要原因之一^[1,2]。因此, 研究液固两相流中固体颗粒运动特性, 日益受到研究者的重视。

Nesic^[3]等采用欧拉-拉格朗日方法, 研究了变截面通道内的液固两相流固体颗粒的运动及破坏情况, 连续相采用 SIMPLE 方法求解, 颗粒相的运动采用拉格朗日随机-确定性 (LSD) 模型预测, 获得了不少有价值的结论, 但是该模型忽略颗粒对流体的影响以及颗粒之间的相互碰撞。张政^[4]等对 Nesic 的方法进行了适当的改进, 研究了突扩圆管内液固

收稿日期: 2008-01-16; 修订日期: 2008-10-31

基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体基金资助 (No.5052160450323001); 国家自然科学基金委重点资助 (No.50536020)

作者简介: 李国美 (1981-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事石油工程中的多相流动与传热研究。

两相流的碰撞破坏过程,连续相采用 SIMPLER 方法求解,颗粒相运动则通过拉格朗日坐标系下的随机轨道模型获得。该模型虽然考虑了颗粒-流体之间的双向耦合作用,但是仍然忽略了颗粒间的相互碰撞。刘永兵^[5]等运用双流体模型模拟了较大固相体积分条件下管道内的液固两相流动,但无法直接获得单个颗粒的运动信息。

本文采用考虑颗粒碰撞的欧拉-拉格朗日数值模拟方法(DPM),以水平突扩圆管为例,对液-固两相流中固体颗粒的碰撞过程进行了数值计算。该模型克服了以上模型的不足,不仅考虑了流体与颗粒间的双向耦合作用,还考虑了颗粒之间的相互碰撞,可以从单颗粒层次上揭示颗粒的运动规律。

1 数学模型

采用考虑了颗粒碰撞的欧拉-拉格朗日方法模拟液固两相流中颗粒的碰撞过程。在欧拉坐标系下描述流体相流动,在拉格朗日坐标系下计算颗粒的运动轨迹、速度、角速度等。颗粒间的相互碰撞采用硬球模型^[6]描述。

1.1 流体相控制方程

流体相的动力学控制方程通过体平均的两相流动的 Navier-Stokes 方程描述,其考虑了流体体积分数和流体与颗粒相间阻力的影响。连续方程和动量守恒方程分别表示如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f u_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u_f u_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_f \tau_f) + \alpha_f \rho_f g - f_{\text{drag}} \quad (2)$$

式中, α_f 为流体体积分数, f_{drag} 为体平均的颗粒流体阻力,分别表示为

$$\alpha_f = 1 - \sum_{i=1}^n V_{pi} / \Delta V, \quad f_{\text{drag}} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n F_{\text{drag},i} \quad (3)$$

式中, ΔV 和 V_{pi} 分别为计算控制体的体积和颗粒 i 在该控制体中的体积。 F_{drag} 为单颗粒所受的流体粘性阻力, n 为控制体中的颗粒数。流体相湍流方程采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

1.2 颗粒运动方程

颗粒运动方程可以表示为

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p g + F_{\text{drag}} \quad (4)$$

式中, m_p 和 u_p 分别为颗粒 i 的质量和速度, F_{drag} 为单颗粒所受的流体粘性阻力。

1.3 相间流体阻力

流体颗粒间的耦合作用也通过单颗粒所受流体粘性阻力 F_{drag} 的表达式来体现。本模型采用 Di Felice 修正的流体阻力表达式计算单颗粒所受的流体粘性阻力,表示为^[7]

$$F_{\text{drag}} = \frac{C_{d0}}{8} \pi d_p^2 \rho_f \alpha_f^2 |u_f - u_p| (u_f - u_p) \alpha_f^{-\chi} \quad (5)$$

式中, $\chi = 3.7 - 0.65 \exp[-(1.5 - \lg Re_p)^2 / 2]$, C_{d0} 为流体阻力系数, Re_p 为颗粒雷诺数,分别表示为:

$$C_{d0} = \left(0.63 + \frac{4.8}{Re_p^{0.5}}\right)^2, \quad Re_p = \frac{\alpha_f \rho_f d_p |u_f - u_p|}{\mu_f}$$

1.4 颗粒碰撞模型

本文采用离散颗粒硬球模型描述颗粒间的碰撞。硬球模型基于准二元的瞬时碰撞,不考虑颗粒碰撞的变形过程,具有较高的计算效率。当两个颗粒碰撞时,如图 1 所示。

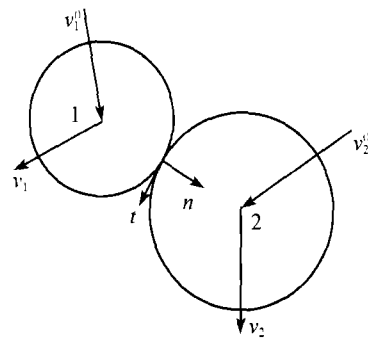


图 1 两颗粒碰撞示意图

Fig.1 Sketch map of two particles collision

颗粒碰后的平动速度和角速度表示如下:

(1) 对于滑移碰撞

$$V_1 = V_1^0 - (n + \mu_s t)(n \cdot G^0)(1 + e) \frac{m^2}{m_1 + m_2}$$

$$V_2 = V_2^0 + (n + \mu_s t)(n \cdot G^0)(1 + e) \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

$$\omega_1 = \omega_1^0 - \frac{5}{2R_1} (n \cdot G^0)(n \times t) \mu_s (1 + e) \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

$$\omega_2 = \omega_2^0 - \frac{5}{2R_2} (n \cdot G^0)(n \times t) \mu_s (1 + e) \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

(2) 对于无滑移碰撞

$$V_1 = V_1^0 - \left[(1 + e)(n \cdot G^0)n + \frac{2}{7} |G_{ct}^0| t \right] \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

$$V_2 = V_2^0 + \left[(1 + e)(n \cdot G^0)n + \frac{2}{7} |G_{ct}^0| t \right] \frac{m_1}{m_1 + m_2}$$

$$\omega_1 = \omega_1^0 - \frac{5}{7R_1} |G_{ct}^0| (n \times t) \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

$$\omega_2 = \omega_2^0 - \frac{5}{7R_2} |G_{ct}^0| (n \times t) \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (6)$$

式中, 上标 0 表示碰前量, μ_s 为摩擦系数, e 为颗粒恢复系数, n 为从颗粒 1 中心指向接触点的单位矢量, G_0 为碰前两颗粒接触点相对速度, G_{ct}^0 为碰前相对速度切向分量, t 为接触点处的单位切向量。

2 求解方法

采用传统的 SIMPLEC 方法求解流体相的控制方程, 扩散项离散应用二阶中心差分格式, 动量方程对流项应用具有三阶精度的 QUICK 格式离散。采用显示时间积分法求解颗粒运动方程。对于硬球模型系统, 本文采用主动搜索方法, 直接判断两颗粒发生碰撞的时刻。假设经过 Δt_c 时间, 两颗粒 i 、 j 发生碰撞, 则有 $R_{ij} = r_{ij} + v_{ij}\Delta t_c$, 故 Δt_c 可按下列式计算:

$$\Delta t_c = \frac{-r_{ij} \cdot v_{ij} - \sqrt{(r_{ij} \cdot v_{ij})^2 - |v_{ij}|^2 (|r_{ij}|^2 - |R_{ij}|^2)}}{|v_{ij}|^2} \quad (7)$$

式中, $r_{ij} = r_i - r_j$, $v_{ij} = v_i - v_j$, $R_{ij} = -(R_i + R_j)n$, r 为颗粒的位置矢量, R 为颗粒半径。如果 $\Delta t_c < 0$, 两颗粒不会发生碰撞; 若 $r_{ij} \cdot v_{ij} > 0$, 即两颗粒远离, 也不发生碰撞。

3 计算问题描述

选取突扩圆管沿对称轴下方的一半作为计算区域, 其示意图如图 2 所示。它是高为 $H = 30$ mm, 长为 $L = 200$ mm 的矩形区域, 入口半径 $R = 25$ mm, 进出口边界采用周期性边界描述。

连续相流体为水, 密度 1000 kg/m^3 , 动力粘度 $1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。管道流动为湍流, 初始圆管界面上速度遵循 1/7 幂率分布^[8], 本文取湍流中心流速为 5 m/s 。

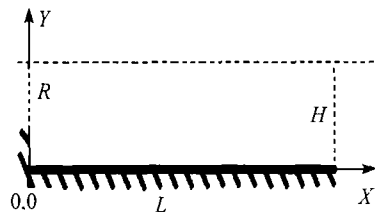


图 2 计算区域和坐标系示意图

Fig.2 Calculation region and coordinate system

颗粒直径 0.4 mm , 密度 2650 kg/m^3 , 摩擦系数 0.4 , 恢复系数 0.9 。计算空间布置 3000 个静止的初始颗粒, 在突扩管入口 ($X=0$) 界面, 沿半径方

向均匀布置 100 个起动颗粒, 速度与颗粒所在位置处的流体流速相同, 如图 3 所示。

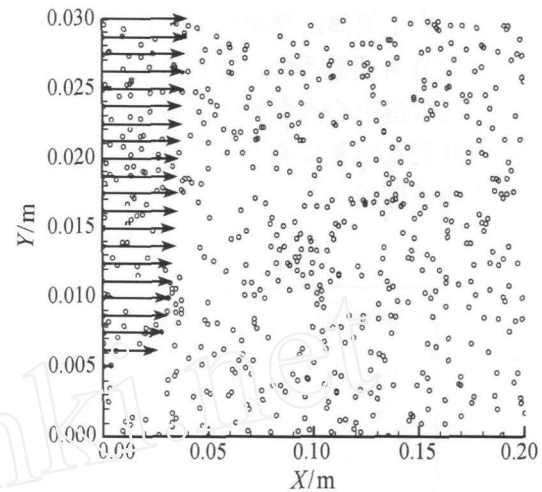


图 3 颗粒的初始分布图 (坐标单位 m)

Fig.3 Initial distribution of particles/m

4 计算结果与分析

4.1 颗粒的空间分布

图 4 为计算时间为 8.82×10^{-2} 时突扩管通道中颗粒的空间及其速度分布。从图中可以看出, 在突扩截面之后的旋流产生区和靠近壁面区域颗粒密集, 而靠近管道中心线区域颗粒稀疏, 这反映了湍流条件下颗粒相非均匀分布的特征。同时, 在旋流产生区和壁面附近区域, 连续相的湍流强度较高, 说明颗粒的分布与连续相湍流强度有关, 即连续相湍流强度越高, 颗粒相也越浓, 这与文献 [3] 给出的结论相吻合。从图 4 还可以看出, 颗粒运动过程中, 颗粒之间的碰撞在液固两相流中扮演重要角色, 因此, 液固两相流模型需要考虑颗粒之间的碰撞。

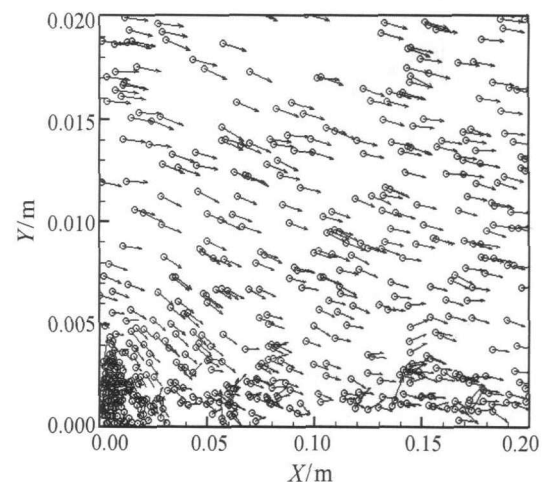


图 4 颗粒的空间及速度分布 (坐标单位 m)

Fig.4 Spatial and velocity distribution of particles/m

4.2 颗粒轨迹的跟踪

图5、图6分别为100个起动颗粒和随机分布的50个初始颗粒(任意取的)的运动轨迹,从图中可以看出,由于流体的携带作用,起动颗粒与初始颗粒的运动具有相似特性:颗粒沿着流体流动方向运动,靠近管道中心的颗粒速度大于壁面附近颗粒速度,但靠近壁面和旋流产生区颗粒浓度变大,颗粒之间的碰撞增强。

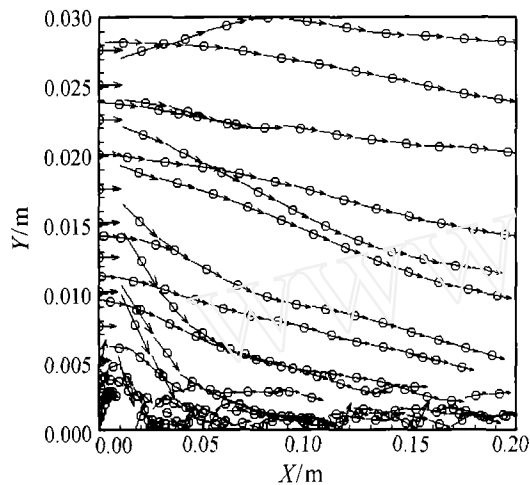


图5 起动颗粒的运动轨迹

Fig.5 Track of the startup particles

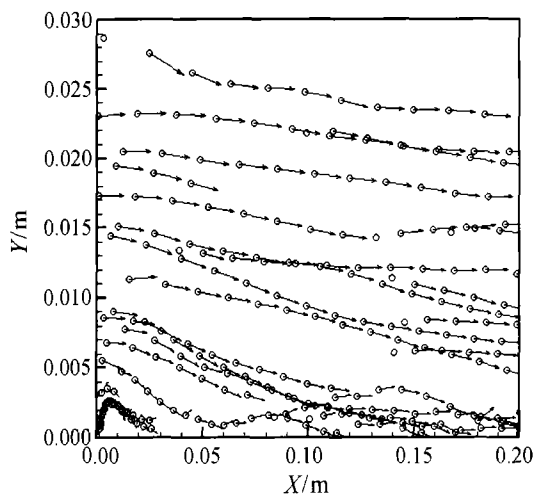


图6 初始颗粒的运动轨迹

Fig.6 Track of the initial particles

对某一时刻起动颗粒和50个初始颗粒的空间及速度分布进行研究可以看出,起动颗粒的速度在管道半径方向上遵循幂率分布,由于重力的作用,颗粒相在随流体向前运动的同时向管壁沉降,与管壁产生碰撞;而初始颗粒的分布则具有很大的随机性,

表明流体对初始颗粒的携带效应较强。考虑到初始颗粒与流体存在较大的滑移速度(初始颗粒起动速度为零),进一步证实了流体携带效应随滑移速度增大而增强^[7]。

5 结论

考虑颗粒碰撞的欧拉-拉格朗日数值模拟方法(DPM),可以真实地模拟液固两相流中固体颗粒运动的动态变化过程及颗粒的非均匀分布特征,在单颗粒层次上提供颗粒的速度、碰撞角度、碰撞频率等详细的运动信息。颗粒空间分布不均匀,靠近壁面附近区域颗粒稠密、碰撞剧烈,流体相的湍流强度越高,颗粒相也越稠密,这与已有文献的结论基本一致。本文模型有助于进一步研究液固两相流中固体颗粒的运动规律。

参考文献

- [1] 郑玉贵,姚志铭,柯伟. 流体力学因素对冲刷腐蚀的影响机制. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(1): 36-40
ZHENG Yu-Gui, YAO Zhi-Ming, KE Wei. Review on the Effects of Hydro-Dynamic Factors on Erosion-Corrosion. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12(1): 36-40
- [2] J A C Humphrey. Fundamentals of Fluid Motion in Erosion by Solid Particle Impact. Int. J. Heat and Fluid Flow. 1990, 11(3): 170-195
- [3] Neisic S, Postlethwaite J. Relationship Between the Structure of Disturbed Flow and Erosion/Corrosion. Corrosion, 1990, 46: 874-880
- [4] 张政,程学文,郑玉贵,等. 突扩圆管内液固两相流冲刷腐蚀过程的数值模拟. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(2): 89-95
ZHANG Zheng, CHENG Xue-Wen, ZHENG Yu-Gui, et al. Numerical Simulation of Erosion-Corrosion in Liquid-Solid Two-Phase Flow. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(2): 89-95
- [5] 刘永兵,陈纪忠,阳永荣. 管道内液固浆液输送的数值模拟. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(5): 858-863
LIU Yong-Bing, CHEN Ji-Zhong, YANG Yong-Rong. Numerical Simulation of Liquid-Solid Two-Phase Flow in Slurry Pipeline Transportation. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(5): 858-863
- [6] Crowe C T, Sommerfeld M, Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. CRC Press, Boca Raton, 1998
- [7] Di Felice R. The Voidage Function for Fluid-Particle Interaction Systems. Int. J. Multiphase Flow, 1994, 20: 153-159
- [8] W Blatt, T Kohley, U Lotz, et al. The Influence of Hydrodynamics on Erosion-Corrosion in Two-Phase Liquid-Particle Flow. Corrosion, 1989, 45: 793-804