

水平 90°弯管内固液两相流动的数值模拟

马晓阳, 武传宇, 陈洪立, 窦华书

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 为研究 90°弯管内固液两相流动特征,采用多相流混合模型对水平 90°弯管内水和沙粒固液两相流动进行数值模拟,分析弯管典型横截面上二次流现象,讨论其发展变化对沙粒浓度分布的影响。模拟结果显示:当 $Re=5 \times 10^4$ 时,随着入口沙粒浓度升高,弯管出口横截面中心区域混合流体速度趋于更均匀分布,随着入口沙粒直径增大,沙粒快速积聚于管道下侧,形成堆积;当 Re 数增大到 2×10^5 时,在相同沙粒直径下,弯管出口横截面混合流体速度分布变化不大,除管道下侧区域外,沙粒浓度分布变得更均匀。与实验结果对比表明,该模型可用于弯曲管道内固液两相流动特性的有效计算。

关键词: 固液两相流; 90°弯管; 数值模拟; 二次流; 混合模型

中图分类号: TH31 **文献标志码:** A

0 引言

固液两相流是由固相颗粒和液相载流体组成的一种混合流体。在流动中,固相颗粒和液相载流体有着密切的联系,在运动中相互影响、相互制约。受管道几何弯曲的影响,固液两相流动呈现出非常复杂的流动特征^[1-3]。固液两相流管道水力输送技术始于 20 世纪初,现已广泛应用于能源、化工、矿业、石油、水利、冶金及环保等各工业领域^[4]。因此,开展管道内固液两相流动特征研究对于输送系统的安全运行非常重要。

早期固液两相流的运动特征研究大都基于宏观实验,这些实验没有从本质上揭示两相流运动规律,同时对测量技术要求苛刻。近年来,随着固液两相流理论及计算机模拟技术的日趋成熟,采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法研究管道内固液两相流运动规律具有成本低和周期短的优点^[5-6]。Taylor 等^[7]采用激光多普勒测速仪对 90°弯管内发展的层流和湍流进行测量,得到

了时均速度和脉动速度分布情况及弯曲段壁面压力分布等重要物理量的实验数据。Lyne^[8]首次强调弯管中充分发展的分层振荡流的复杂性,提出在稳定情况下,管道内会出现一对涡。这些实验都是在单相流体条件下进行。Skudarnov 等^[9]通过实验绘制了水平直管道中单种颗粒和水及双种颗粒和水的混合流动的压力梯度曲线。胡晓玮等^[10]利用 ASM(algebraic slip model)模型模拟了光催化剂反应器中催化剂颗粒和液体的混合流动,得出了混合流体速度和滑移速度分布情况。张宏兵等^[11]运用混合模型对水平直圆管内两相流运动进行了研究,获得挟沙油混合流体速度大于挟沙水混合流体速度的结论。目前涉及水平 90°弯管内固液两相流动特征的研究尚不多见,而且研究尚处于起步阶段。

本文运用多相流混合模型,模拟了水平 90°弯管内水和沙粒两相混合流动特征。首先将模拟结果与实验结果进行对比验证,然后运用验证了的模型来求解水和沙粒两相混合流动,得出了弯管出口横截面混合流体速度和沙粒浓度分布特征。

收稿日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(51205363);浙江理工大学科研启动基金(11130032241201)

作者简介: 马晓阳(1990-),男,浙江东阳人,硕士研究生,研究方向为两相流和流体机械。

通信作者: 窦华书,电子邮箱: huashudou@yahoo.com

1 弯管模型和数值方法

1.1 水平 90°弯管几何模型

计算模型包括上游入口直管段、弯管段和下游出口直管段三部分,如图 1(a)所示。上游入口直管长度 $L_1=1\ 000\ \text{mm}$,下游出口直管长度 $L_2=1\ 000\ \text{mm}$,管道内径 $D=100\ \text{mm}$,弯管的曲率半径 $R_c=300\ \text{mm}$ 。坐标系原点位于弯管的曲率中心,用不同的 θ 角度代表弯管各个典型横截面的位置。利用 GAMBIT 软件对模型计算域进行网格划分,采用六面体网格,横截面上网格划分采用“古钱币”形式,如图 1(b)所示。

本文以图 1(a)所描述的水平 90°三维弯管内水和沙粒两相混合流体流动过程为研究对象。液相为水,密度 $\rho=998.2\ \text{kg/m}^3$;固相为沙粒,密度 $\rho=2\ 650\ \text{kg/m}^3$,沙粒直径分 0.1 mm 和 0.2 mm 两种,入口处沙粒初始体积分分数分 4 种,分别为 5%、10%、15%和 20%。管道 z 轴负向重力加速度 $g=9.81\ \text{m/s}^2$ 。文中 Re 简化为单相水流的雷诺数,定义为:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1)$$

式(1)中, ρ 为水的密度, v 为水流速度, D 为管道内径, μ 为水的动力黏度。

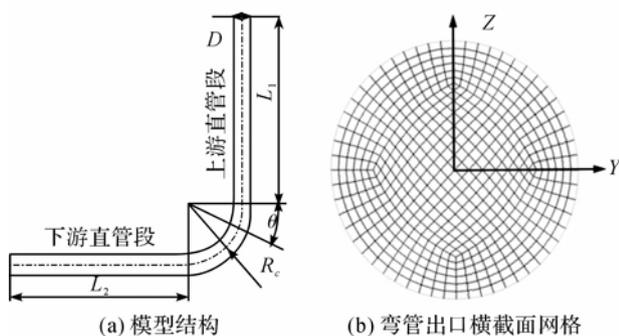


图 1 计算模型及横截面网格划分

1.2 控制方程和数值方法

本文采用无相变过程的多相流混合模型,该模型可用连续性方程、动量方程和第二相体积分数方程表示^[12-13]。

1.2.1 连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (2)$$

式(2)中, ρ_m 为混合流体密度, $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$, ρ_k 为第 k 相的密度, α_k 为第 k 相的体积分数, \mathbf{v}_m 为质量平均速度, $\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m}$ 。

1.2.2 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = \\ -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \\ \mathbf{F} + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k}) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, \mathbf{F} 为体积力, μ_m 为混合流体黏度, $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$, $\mathbf{v}_{dr,k}$ 为第二相 k 的漂移速度, $\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m$ 。

1.2.3 沙粒体积分数方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) \quad (4)$$

本文利用 FLUENT6.3.26 软件,采用有限体积法离散守恒方程,积分方程离散选用 Second Order Upwind,流场数值计算选用压力解法中的 SIMPLE 算法。迭代收敛标准为各个变量的相对残差小于 10^{-6} ,且监测的进出口流量差值小于 0.1%。

为简化流动条件,假设水平 90°弯管内为充分发展的稳态湍流流动,液相水不可压缩(密度为常数),流动为等温流动。入口为速度入口边界,给定入口速度的大小和方向;出口为自由出流边界。管壁为壁面边界,指定壁面为无滑移边界条件,壁面附近采用标准壁面函数来处理。湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 模型,给定“湍流强度”和“水力直径”。

1.3 网格无关性验证

在水和沙粒混合流体入口平均速度 $u_m=0.95\ \text{m/s}$ 、沙粒浓度 $\alpha=10\%$ 、沙粒直径 $d=0.1\ \text{mm}$ 工况下进行网格无关性验证。分别作了总数为 23 万、31 万、35 万、43 万、48 万、53 万 6 种大小网格,并在弯管出口横截面水平直径方向上(图 1(b)中 y 轴方向)设置 9 个监测点,监测其静压变化情况。如图 2 可知,网格总数在 31 万以上时,各监测点的静压变

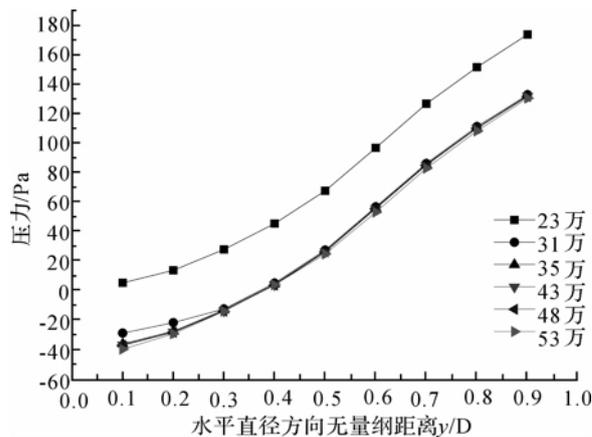


图 2 网格无关性验证

化已经很小,误差在1%以下。图2结果表明即使网格总数继续增加也将不会引起计算数据的显著变化,而计算时间和计算资源将会大大的增加,所以计算采用总数为35万的网格。

1.4 模型验证

为确保多相流混合模型的计算可靠性,将混合模型用于求解水平直管内水和沙粒两相混合流动特征。以一个水平直管路水和沙粒两相输送系统为研究对象,管道直径 $D=0.103\text{ m}$,管长 $L=10\text{ m}$,水和沙粒混合流体入口平均速度 $u_m=3\text{ m/s}$,入口沙粒体积分数 $\alpha=24\%$,沙粒直径 $d=90\text{ }\mu\text{m}$ 。模拟结果与Gillies等^[14]文献中实验结果进行对比。本文混合模型中考虑了拖拽力、重力,忽略了升力、虚拟质量力、Magnus力等对流动影响很小的其他力。

图3给出了直管出口横截面竖直直径方向沙粒浓度分布对比情况。由图3可见,数值模拟结果与实验结果基本符合。在管道中间区域,实验值和模拟值非常接近,但是模型忽略了管壁粗糙度,所以在靠近弯管上侧和下侧区域,模拟结果与实验结果出现了偏差。

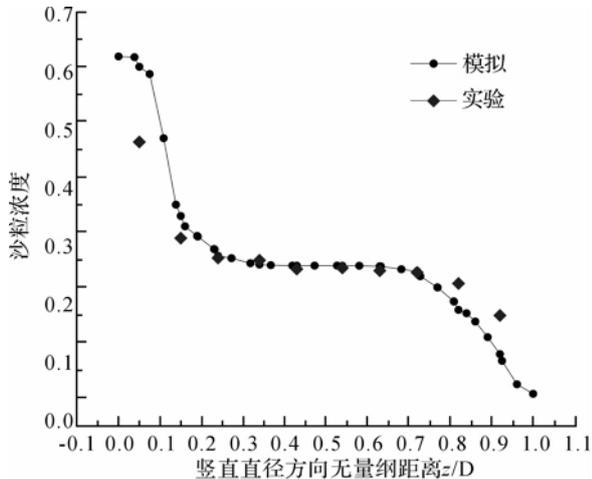


图3 数值模拟结果与实验结果比较

2 数值模拟结果和分析

2.1 弯管 45°横截面混合流体速度分布分析

弯管横截面混合流体速度分布主要受混合流体入口速度以及混合流体沙粒浓度两个参数的影响。如图4-6所示,与水平直管单相水流横截面上的速度分布相比,弯管中间横截面($\theta=45^\circ$)上混合流体速度表现出不同的分布特征。在 $Re=5\times 10^4$ 时,水平直管横截面上水流速度极大值在圆心附近,受管道几何弯曲的影响,混合流体速度极大值向弯管内侧偏移,且随着沙粒浓度升高,速度极大值有向下偏

移趋势。当 Re 数增大到 2×10^5 时,混合流体速度分布主要受管道几何弯曲的影响,受沙粒浓度影响较小。如图6所示,混合流体速度基本处于同一分布状态。

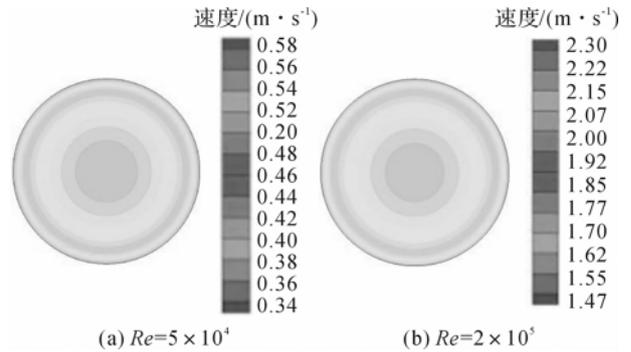


图4 水平直管单相水流横截面速度分布

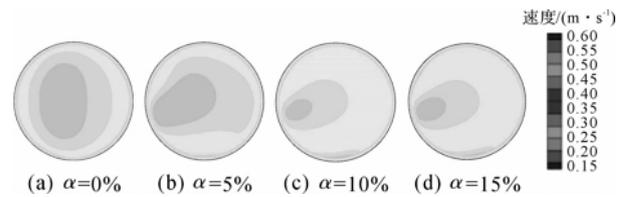


图5 弯管中间横截面($\theta=45^\circ$)混合流体速度分布
($Re=5\times 10^4, d=0.1\text{ mm}$)

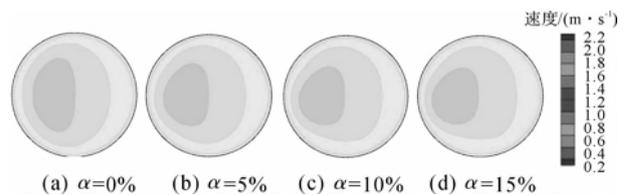


图6 弯管中间横截面($\theta=45^\circ$)混合流体速度分布
($Re=2\times 10^5, d=0.1\text{ mm}$)

2.2 弯管内二次流现象分析

当水和沙粒混合流体通过弯管时,沿弯管轴线方向流动的混合流体受到离心力作用,迫使其改变原先的流动方向,被挤压到弯管外侧。但是由于流动连续性,其它方位的流体迅速向管中心补充。混合流体刚进入弯管时,流动受管道几何弯曲影响还不是很大,随着混合流体深入到弯管以后,混合流体的总压分布变得不均匀。如图7所示,总压高的区域逐渐向弯管外侧移动。

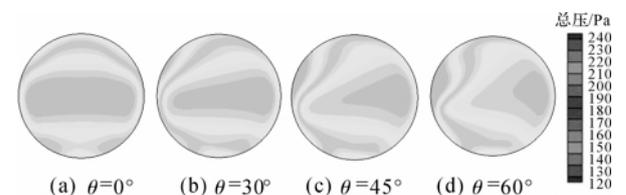


图7 弯管典型横截面上混合流体总压分布
(右侧为弯管外侧)

图 8 给出了在 $Re=5 \times 10^4$ 时弯管典型横截面上水和沙粒混合流体流动情况。从图 8 可以清晰地看到二次流的发生,这和单相流通过弯管时得到的特征是相似的。弯管中总压高的外侧流体沿着弯管上侧壁面和下侧壁面向总压低的内侧流动,同时管中心流体受离心力作用不断向外侧流动,二次流由此形成。随着 θ 角度的增加,弯管典型横截面上上下两个涡心位置不断变化。在 $\theta=0^\circ$ 到 $\theta=60^\circ$ 之间,上涡心不断向弯管内侧移动,下涡心逐渐向管中心移动。在传热传质领域,二次流可以提高换热系数;但在管道输送中,二次流的产生会造成混合流体的总压和能量损失。

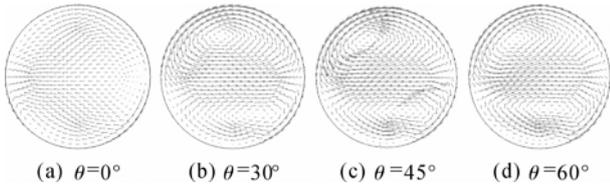


图 8 弯管典型横截面上混合流体速度矢量图分布
($Re=5 \times 10^4, \alpha=10\%, d=0.1 \text{ mm}$)

图 9 给出了在 $Re=5 \times 10^4$ 时弯管典型横截面上沙粒浓度的分布情况。在弯管入口横截面 ($\theta=0^\circ$) 上沙粒浓度呈不均匀分布,分层现象非常明显。弯管内二次流加强了水和沙粒的混合作用,但是由于此时流速较低,二次流混合作用效果并不明显。

2.3 弯管出口横截面混合流体速度和沙粒浓度分布

图 10 给出了不同入口速度和沙粒浓度条件下,弯管出口横截面 ($\theta=90^\circ$) 混合流体速度和沙粒浓度分布情况。图 10 中 y/D 表示弯管出口横截面水平直径方向无量纲距离, z/D 表示竖直直径方向无量纲距离,见图 1(b) 所示。图 10(a) 和 (b) 显示出在弯管出口横截面水平直径方向上混合流体速度分布不再关于管轴线对称分布。在较小入口速度 $u_m=0.5 \text{ m/s}$ ($Re=5 \times 10^4$) 时,靠近弯管内侧的速度随着入

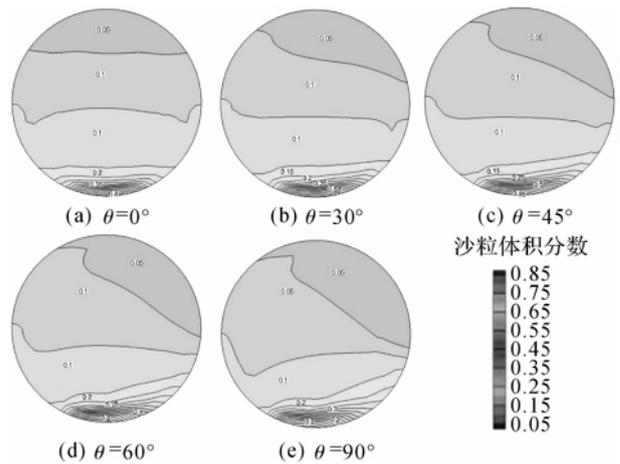
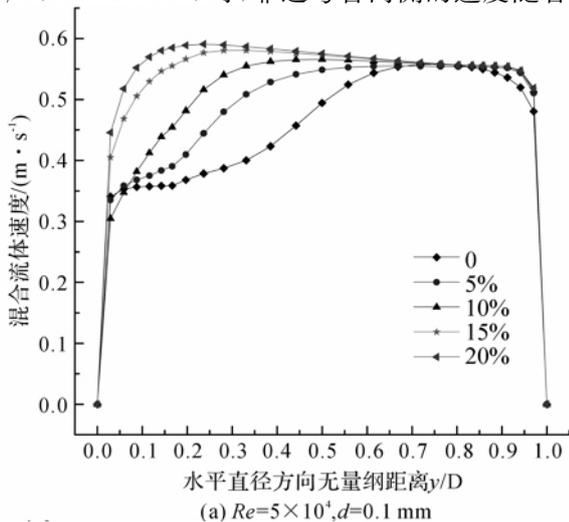
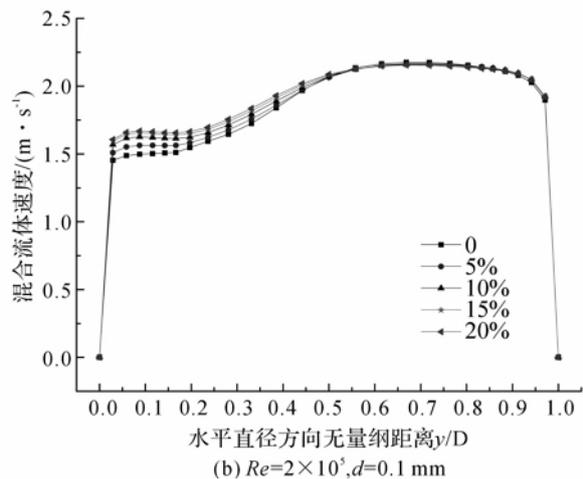


图 9 弯管典型横截面上沙粒浓度分布
($Re=5 \times 10^4, \alpha=10\%, d=0.1 \text{ mm}$)

口沙粒浓度的升高而增大,此时出现了类似“塞状流”特征,即管中心某个半径圆柱内流速保持不变。当入口速度增大到 $u_m=2 \text{ m/s}$ ($Re=2 \times 10^5$) 时,混合流体速度分布随沙粒浓度升高变化不明显,基本处于同一分布状态。只在靠近弯管内侧区域,混合流体速度随着入口沙粒浓度升高有略微增大。

图 10(c) 和 (d) 给出了弯管出口横截面竖直直径方向上沙粒浓度分布情况。在较小入口速度 $u_m=0.5 \text{ m/s}$ ($Re=5 \times 10^4$) 时,弯管出口横截面沙粒浓度分布大致可以分为 3 个区域:管道上侧附近的低浓度区域,管道中心的均匀分布区域和管道下侧附近的高浓度区域。由于固液两相存在密度差,受重力的影响,因而在管道上侧区域浓度低,下侧区域浓度高。随着入口速度增大到 $u_m=2 \text{ m/s}$ ($Re=2 \times 10^5$),除靠近管道下侧区域外,其它区域沙粒浓度趋于均匀分布。此时管道内水流速度足以托举沙粒,使其悬浮于管道中,使得沙粒能够很好地跟随载流体水流动。



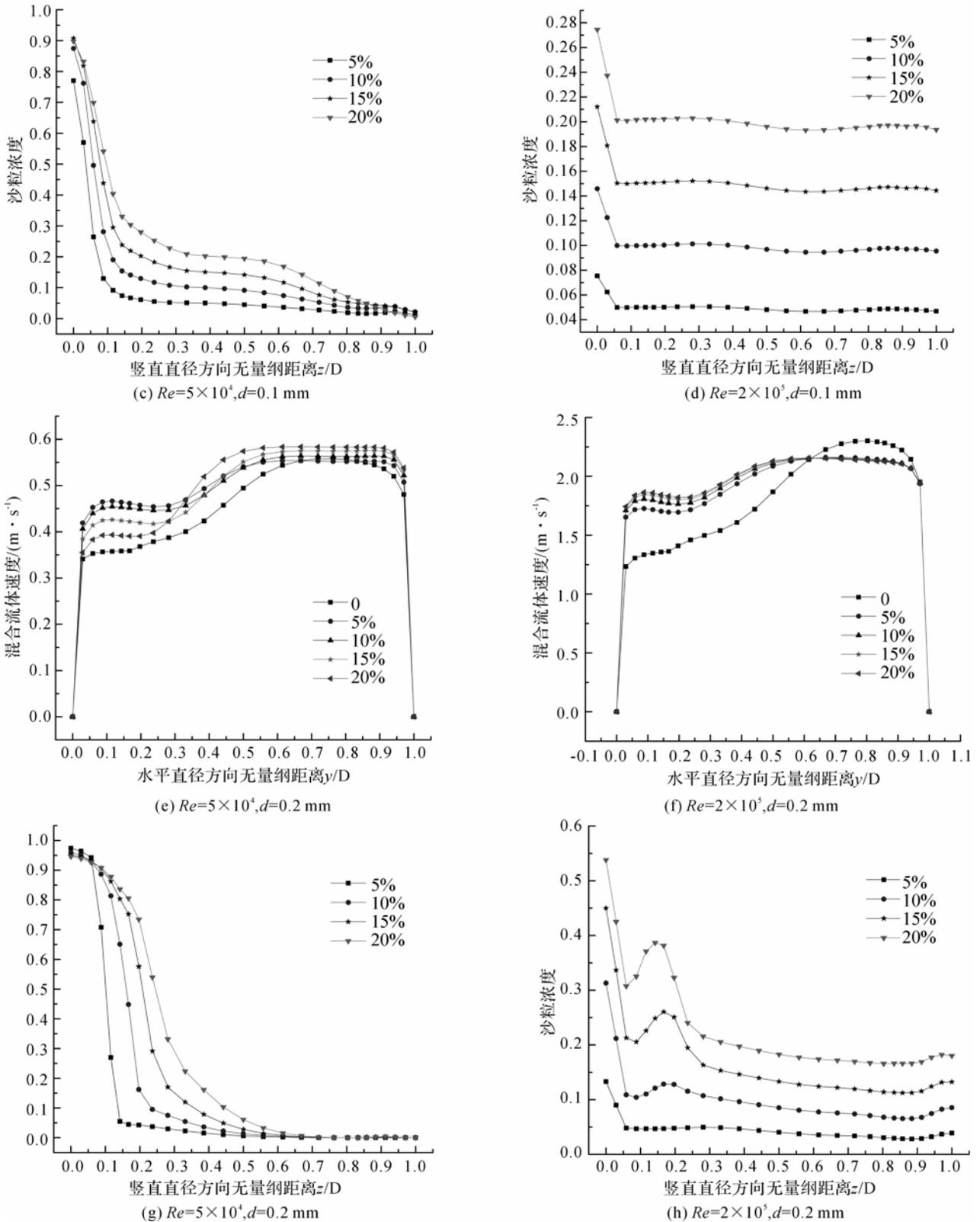


图 10 弯管出口横截面水平直径方向混合流体速度分布和竖直直径方向沙粒浓度分布

由图 10(c)和(g)可知,在 $u_m=0.5 \text{ m/s}(Re=5 \times 10^4)$ 时,随着沙粒直径增大到 $d=0.2 \text{ mm}$,弯管出口横截面竖直直径方向上沙粒浓度分布变得越来越不均匀。从管中心到管上侧某些区域出现无沙粒

区,而靠近管道下侧区域沙粒浓度则迅速增大。这种输送条件很可能引起沙粒堆积,形成不能移动的沙粒层床,进而减小有效流动面积,引起管道堵塞,对沙粒输送非常不利。如图 10(h)可知,当入口流

速增大到 $u_m = 2 \text{ m/s}$ ($Re = 2 \times 10^5$) 时, 上述情况消失, 管中心区域沙粒浓度又趋于相对均匀分布。

同时由图 10(h) 可以发现在离管底附近区域 ($z/D = 0.15$) 的沙粒浓度突然发生了变化, 而在图 10(d) 中则没有出现。图 10(h) 和 (d) 的对比说明在沙粒较小直径和较低浓度时, 该区域沙粒浓度突变不会发生, 这可能是由于该区域急剧变化的速度梯度和较高的沙粒浓度引起了沙粒间的碰撞而造成, 这个解释的正确性需要后续工作进一步验证。

3 结 论

本文采用无相变过程的多相流混合模型, 研究了水平 90°弯管内水和沙粒两相混合流动特征。数值模拟结果给出了水和沙粒混合流动过程中一些重要的流动参数, 结果表明: 混合流体速度在 90°弯管典型横截面上的分布, 与单相水流明显不同。在弯管 $\theta = 45^\circ$ 横截面上, 速度极大值向弯管内侧偏移, 且在 Re 较小时, 如 $Re = 5 \times 10^4$, 混合流体速度的极大值随着沙粒浓度的升高, 呈下移趋势。受管道几何弯曲的影响, 所受离心力大的流体向弯管外侧运动, 导致外侧总压升高, 使得混合流体沿着管道上下两侧从弯管外侧向总压低的内侧流动, 呈现出类似于单相流体经过弯管时出现的二次流现象。在 $Re = 5 \times 10^4$ 和 $d = 0.1 \text{ mm}$ 时, 弯管出口中心区域混合流体速度在水平直径方向上分布随着沙粒浓度的升高而趋于更均匀分布; 竖直直径方向上沙粒浓度分布呈明显的分层现象。随着沙粒直径增大到 $d = 0.2 \text{ mm}$, 沙粒浓度分布变的极不均匀。当 Re 增大到 2×10^5 时, 混合流体速度分布受沙粒浓度影响变小, 沙粒浓度在弯管出口横截面中心区域分布更均匀。

研究结果可为管道水力输送系统局部设计提供参考, 也可以对水力输送过程中固相颗粒在管道中的堆积程度进行预测。实际工程中很多管道都是运动着的, 后续工作将对旋转弯管内固液两相流动特征进行研究。

参考文献:

- [1] 倪晋仁, 王光谦. 固液两相流研究的两种方法之比较[J]. 泥沙研究, 1992(3): 95-102.
- [2] Ling J, Skudarnov P V, Lin C X, et al. Numerical investigations of liquid-solid slurry flows in a fully developed turbulent flow region[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(3): 389-398.
- [3] Lin C X, Ebadian M A. A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe [J]. Computers & Fluids, 2008, 37(8): 965-974.
- [4] 白晓宁, 胡寿根. 浆体管道的阻力特性及其影响因素分析[J]. 流体机械, 2000, 28(11): 26-29.
- [5] 宋文吉, 肖 睿, 冯自平, 等. 潜热输送介质颗粒沉降速度的固-液两相流模拟[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1693-1696.
- [6] Chen L, Duan Y, Pu W, et al. CFD simulation of coal-water slurry flowing in horizontal pipelines[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2009, 26(4): 1144-1154.
- [7] Taylor A, Whitelaw J H, Yianneskis M. Curved ducts with strong secondary motion-velocity measurements of developing laminar and turbulent flow [J]. ASME Transactions Journal of Fluids Engineering, 1982, 104: 350-359.
- [8] Lyne W H. Unsteady viscous flow in a curved pipe[J]. Journal Fluid Mech, 1971, 45: 13-31.
- [9] Skudarnov P V, Kang H J, Lin C X, et al. Experimental investigation of single-and double-species slurry transport in a horizontal pipeline[C]//The Proceedings of ANS 9th International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems. Seattle, WA, 2001: 4-9.
- [10] HU X, GUO L. Numerical investigation of catalyst-liquid slurry flow in the photocatalytic reactor for hydrogen production based on algebraic slip model[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(13): 7065-7072.
- [11] 张宏兵, 陈露露, 谢荣华, 等. 水平圆管固液两相稳态流动特性数值模拟[J]. 化工学报, 2009, 60(5): 1162-1168.
- [12] Wang J, Wang S, Zhang T, et al. Numerical investigation of ice slurry isothermal flow in various pipes[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 36: 70-80.
- [13] Raisee M, Alemi H, Iacovides H. Prediction of developing turbulent flow in 90°-curved ducts using linear and non-linear low-Re $k-\epsilon$ models [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2006, 51(12): 1379-1405.
- [14] Gillies R G, Shook C A, Xu J. Modelling heterogeneous slurry flows at high velocities[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2004, 82(5): 1060-1065.

Numerical Simulation of Solid-liquid Two-phase Flow in a Horizontal 90° Elbow Pipe

MA Xiao-yang, WU Chuan-yu, CHEN Hong-li, DOU Hua-shu

(School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To study solid-liquid two-phase flow feature in 90° elbow pipe, this paper uses multiphase flow mixture model for numerical modeling of water and sand solid-liquid two-phase flow in horizontal 90° elbow pipe, analyzes secondary flow phenomenon on typical cross section of elbow pipe and discusses the influence of its development and change on concentration distribution of sand. The simulation result shows that, when $Re=5\times 10^4$, with the increase of sand concentration at the entrance, the speed of mixed fluid in the central area of cross section of elbow pipe at the exit tends to more uniform distribution; with the increase of sand diameter at the entrance, sand accumulates in the underside of pipe rapidly and forms stacking; when Re increases to 2×10^5 , under the same sand diameter, the distribution of speed of mixed fluid on the cross section of elbow pipe at the entrance does not change a lot; except the underside area of pipe, sand concentration distribution becomes more uniform. The comparison with the experimental result shows that this model can be used for effective calculation of solid-liquid two-phase flow characteristics in bent pipe.

Key words: solid-liquid two-phase flow; 90° elbow pipe; numerical simulation; secondary flow; mixture model

(责任编辑: 康 锋)

(上接第 227 页)

Modeling and Simulation Analysis of Controlling Distribution of Critical Speed of Flexible Rotor with Electromagnetic Bearing

FANG Peng, JIANG Ke-jian

(The School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper proposes to use electromagnetic bearing to support flexible rotor and change the distribution location of critical speed of each order of flexible rotor through the adjustment of supporting characteristics, thus making flexible rotor realize supercritical operation smoothly, incorporates the modeling of supporting characteristics of electromagnetic bearing into the modeling theory of finite element of flexible rotor of classic rotor dynamics and establishes flexible rotor system model of electromagnetic bearing support for simulation. The simulation result shows that the adjustment of equivalent stiffness of electromagnetic bearing can significantly change translational and conical critical speed of flexible rotor and has little influence on first-order and second-order bending critical speed. The adjustment of equivalent damping can significantly reduce the vibration of rotor when it passes the critical point.

Key words: electromagnetic bearing; flexible rotor; magnetic levitation; finite element; critical speed

(责任编辑: 陈和榜)