

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.03.009

U形管内浆体输送特性研究

栗涛杰¹, 肖兰兰¹, 杨兆霞², 刘学文^{1*}

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 中国人民解放军95958部队, 上海 200120)

摘要:为了探究通过U形管路输送不同质量分数颗粒的浆体流变特性,课题组对其内部流场进行了研究。通过计算流体动力学软件FLUENT对水平U形管内浆体的流动进行了数值模拟,获得了入口段、出口段及弯头等5个截面处颗粒的速度和体积分数分布情况,并且通过计算分析了速度、颗粒质量分数和管径对弯管压降的影响。研究表明:在弯头处二次流的存在,导致弯头局部流动情况变得复杂,使得截面内侧颗粒体积分数高于外侧;管道沿线的压降受流速和颗粒质量分数的影响很大,随着颗粒质量分数的增加,剪切应力和剪切黏度的增加导致压降增大。课题组的研究有助于了解颗粒质量分数和流速对浆体流变的影响。

关键词:U形管;浆体;流变特性;计算流体动力学;FLUENT

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)03-0054-06

Study on Slurry Transport Characteristics in U-Shaped Pipe

LI Taojie¹, XIAO Lanlan¹, YANG Zhaoxia², LIU Xuwen^{1*}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Unit 95958 of the PLA, Shanghai 200120, China)

Abstract: In order to explore the rheological properties of slurry with different particle mass fraction transported through U-shaped pipeline, the internal flow field was studied. The flow of slurry in horizontal U-shaped pipe was numerically simulated by computational fluid dynamics software FLUENT, and the distribution of particle velocity and volume fraction at 5 sections including inlet section, outlet section and elbow were obtained. The influence of velocity, particle mass fraction and pipe diameter on pressure drop of elbow were analyzed by calculation. The results show that the existence of secondary flow at the elbow complicates the local flow in the elbow, which makes the volume fraction of particles on the inner side of the cross-section higher than that on the outer side, and the pressure drop along the pipe is greatly affected by the velocity and the mass fraction of particles; with the increase of particle mass fraction, the pressure drop increases with the increase of shear stress and shear viscosity. The study is helpful to understand the influence of particle mass fraction and flow rate on the rheological behavior of slurry.

Keywords: U-shaped pipe; slurry; rheological property; CFD(Computational Fluid Dynamics); FLUENT

因为地理环境的影响,结构简单且能改变方向的U形管广泛应用于各种管线中^[1]。对于浆体来说水力运输是一种好的选择,但管道中砂粒的存在会影响浆体的运输,如砂粒在管道中的沉积会造成管道流通的有效面积减小,从而出现压力损失增加、局部高速及部

分或全部堵塞等情况,造成产量下降或管道损坏,导致需要昂贵的清洗作业^[2-3]。学者们研究了流体中的颗粒杂质在管道中的流动形式,Ntow O T等^[4]对各种湍流模型如 κ -epsilon(κ - ϵ)、 κ -omega(κ - ω)、SSG雷诺应力、剪切应力输运和涡动黏度输运的鲁棒性进行了

收稿日期:2021-12-21;修回日期:2022-03-16

基金项目:上海市地方能力建设基金(19030501100);新能源汽车振动噪声测试与控制专业技术服务平台资助项目(18DZ2295900)。

第一作者简介:栗涛杰(1995),男,山西大同人,硕士研究生,主要研究方向为管道冲洗。通信作者:刘学文(1978),男,上海人,博士,高级工程师,主要研究方向为CAE软件开发与应用。E-mail:2697141030@qq.com

测试,以预测颗粒体积分数分布的实验数据对压降的影响。徐鹏飞等^[5]研究得到一个合适的水流速度能有效的提高矿石的开采率,大于这个水流速度会降低效率,低于这个水流速度则导致砂粒堆积。马光飞等^[6]研究得出颗粒密度影响能量损失的结论。孙贤等^[7]研究得出浆体的速度与颗粒的粒径都会影响水合物的最大体积分数,当管径大于 200 mm 时,颗粒直径对水合物的最大体积分数影响几乎不变。曹斌等^[8]研究得出颗粒的受力情况由颗粒速度与流体速度共同决定。寇子超^[9]建立了浆体运输模型,研究不同的浆体浓度对压力损失的影响,得出管内浆体固体体积分数的分布对压力损失有很大的影响。吴优等^[10]通过研究摩擦阻力与管径的关系,得出管道管径越小摩擦阻力越大。牛骏等^[11]研究得出随流速的增加,能带出更大范围颗粒直径,提升了携出效果。张好林等^[12]研究得出岩屑运动所需要的速度与冲砂洗井临界速度与岩屑的直径成正相关。

随着计算技术的发展,计算流体动力学(CFD)得到广泛应用^[13-14],与实验相比,计算不仅周期短而且成本低。CFD 模拟为解决复杂的流体流动问题提供了一种经济有效的方法。李安等^[15]研究了临界速度与浆体内颗粒体积分数的关系,得出临界速度随浆体内颗粒体积分数的变化基本不变。张自超等^[16]研究得出固相速度、体积分数的分布受进口速度和固体体积分数变化的影响。浆体管道内的流动不同于单相管道流动,因为固相的存在会导致其流动特性发生极端变化。当浆体速度与颗粒体积分数发生改变时,将加剧对弯头的冲击磨损,同时会影响管道沿程阻力损失。课题组针对不同质量分数浆体在 U 形弯管内的流动情况,采用多相流混合模型对三维弯管进行数值模拟,探究浆体的流动特性以及参数改变对压降损失的影响。

1 模型的建立

1.1 物理模型

图 1(a) 所示为 U 形管物理模型,模型包括入口段、弯头段和出口段 3 部分。其中管道的水力直径为 40 mm,弯管的曲率半径为 300 mm,入口段的长度 L_1 为 1 800 mm,出口段的长度 L_2 为 1 800 mm。通过

Mesh 软件对模型进行网格划分,弯头的网格划分如图 1(b) 所示。选取密度为 998.2 kg/m^3 的水作为液相,颗粒密度为 $2 218 \text{ kg/m}^3$ ^[17],颗粒质量分数 C_w 为 30% ~ 60%;颗粒的粒径为 $40 \text{ }\mu\text{m}$ 、颗粒质量分数为 30%、流速为 2.5 m/s ;重力加速度方向为沿 z 轴的负方向。

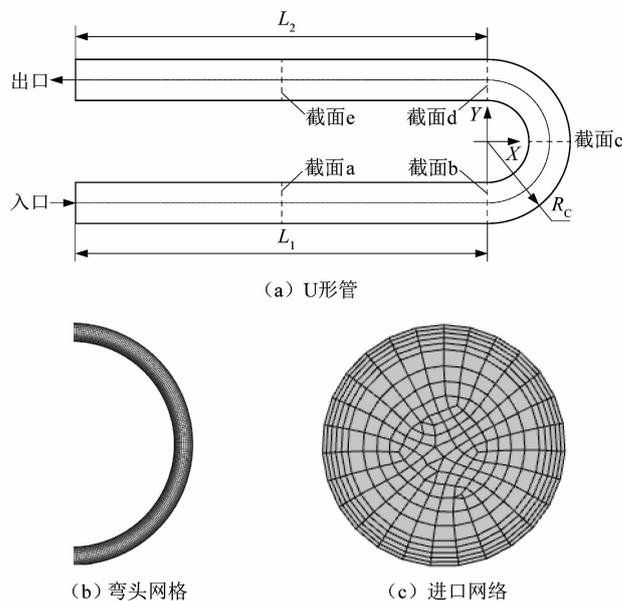


图 1 物理模型与网格划分

Figure 1 Physical model and meshing

1.2 控制方程

课题组采用多相流混合模型求解,该模型的连续方程、动量守恒方程如下:

1) 连续性方程

根据质量守恒定律,可得混合模型的连续方程:

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m v_m) = \dot{m}. \quad (1)$$

式中: v_m 为质量的平均速度, $v_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_k}{\rho_m}$; ρ_m 为

混合密度, $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$, α_k 为第 k 相的密度; \dot{m} 为质量传递。

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho_m v_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla v_m +$$

$$\nabla v_m^T)] + \rho_m g + F + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{dk} v_{dk}). \quad (2)$$

式中: n 为相数; F 为流体的质量力; μ_m 为混合黏度, $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \nu_{dk}$; ν_{dk} 为第 k 相的飘移速度, $\nu_{dk} = v_k - v_m$ 。

1.3 数值模拟

以速度入口定义管道入口条件,管道的出口为自由出流边界,壁面为无滑移边界条件。基于压力基求解,湍流模型选取了计算速度快、易于收敛的标准 $\kappa-\epsilon$ ^[18] 模型,近壁面区域的流动采用标准壁面函数进行求解,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,在整个区域内实现了较高的数值解精度。

1.4 网格的无关性验证

图2所示为网格无关性验证。图2中对6种不同数量的网格进行计算,结果发现当网格数达到17万时,继续增加网格的数量,c截面处水平直径方向上的静压几乎没有变化,而且网格继续增加对结果影响不明显。为了保证计算结果的准确性,同时又能节约计算资源,选择居于中间的25万的网格进行计算。

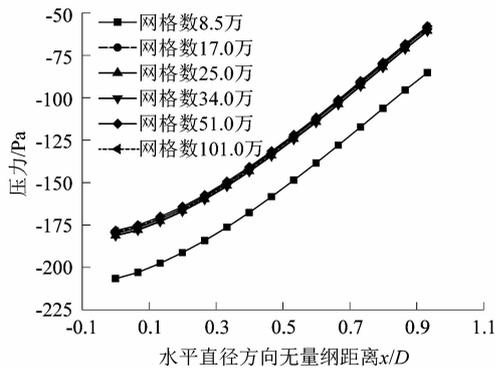


图2 网格无关性验证

Figure 2 Independence validation of grid

2 结果与分析

2.1 弯头处二次流现象分析

图3所示为弯管不同截面压强分布(右侧为弯管

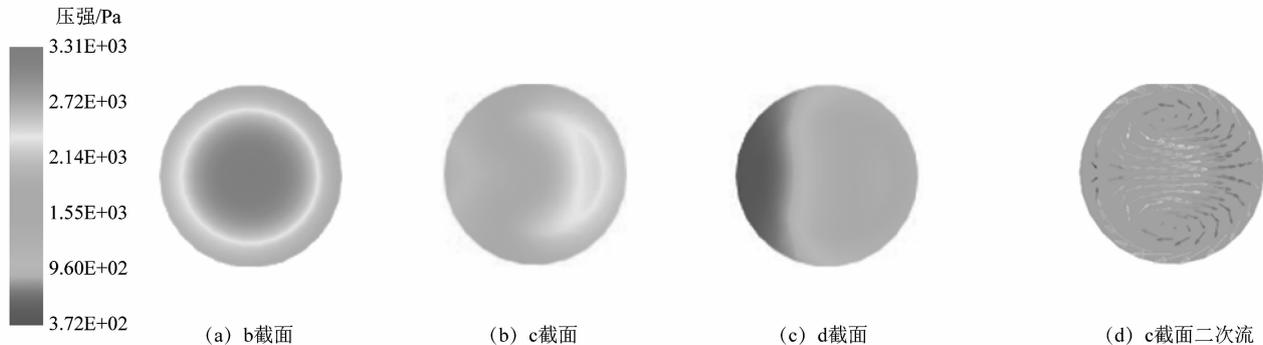


图3 弯管不同位置处横截面总压分布

Figure 3 Total pressure distribution of cross section at different positions of elbow

的外侧),由图3(a)可得入口段管内总压分布为中间大外侧小,由3(b)和(c)可以得到流经弯头时,由于浆体受到离心力的作用,弯头中心的浆体不断向外侧运动,弯管总压高的外侧流体同时向弯头的内侧行补充从而形成图3(d)的二次流。

2.2 颗粒速度和体积分分数分布

2.2.1 颗粒体积分分数分布

图4所示为弯管不同截面处颗粒体积分分数分布,在入口段管内颗粒体积分分数在水平方向上几乎呈对称分布,由于重力的作用在管内呈现上侧颗粒的体积分分数小于下侧的体积分分数,随着流体的运动,b截面处底部颗粒的体积分分数明显大于a截面处颗粒的体积分分数。当流体进入弯头,受离心力的作用颗粒向外侧运动,在c和d截面处二次流形成漩涡,进而带动固体颗粒向弯头的内侧运动,使得底部内侧的颗粒体积分分数高于外侧的颗粒体积分分数。当流体进入出口段时,由于受二次流作用而逐渐减弱,但颗粒体积分分数分布与直管中相比仍表现出一定程度的倾斜。

2.2.2 颗粒速度分布

图5所示为弯管不同截面颗粒速度分布,在直管入口段处,颗粒速度沿管道中心线近似对称,表现为中间大于壁面速度。受二次流的影响,由原来的中心对称变为一定程度偏离中心截面,截面内侧颗粒体积分分数高于外侧的体积分分数,颗粒的质量分数大导致颗粒速度减小。当流体进入弯管的出口段,由于没有离心力的作用,因而颗粒的速度慢慢恢复到对称分布。

2.2.3 不同速度下c截面颗粒体积分分数分布

图6所示为不同速度下c截面颗粒体积分分数分

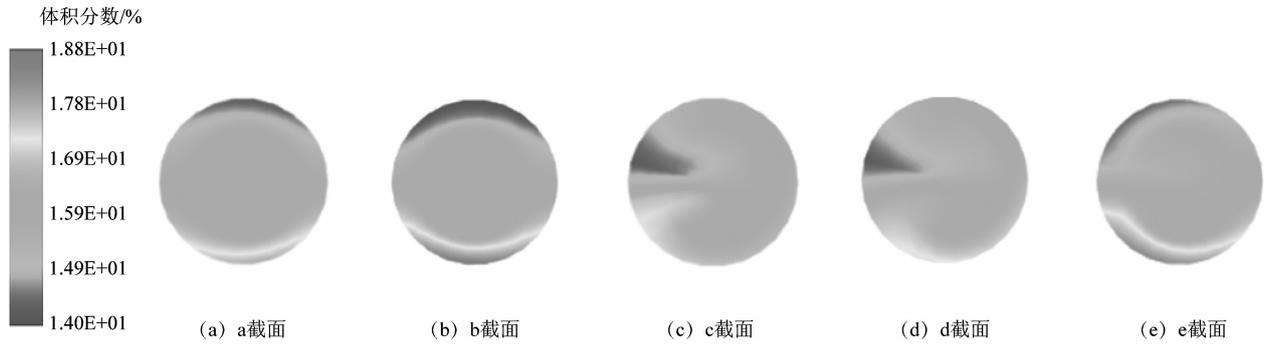


图4 弯管不同位置处横截面颗粒体积分数分布

Figure 4 Cross-sectional particle volume fraction distribution at different positions of elbow

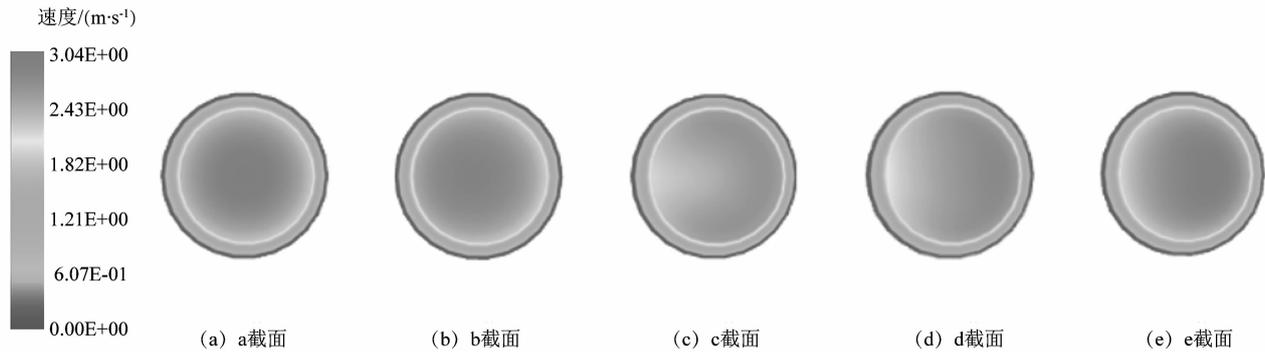


图5 弯管不同位置处横截面颗粒速度分布

Figure 5 Cross-sectional velocity distribution of particles at different positions of elbow

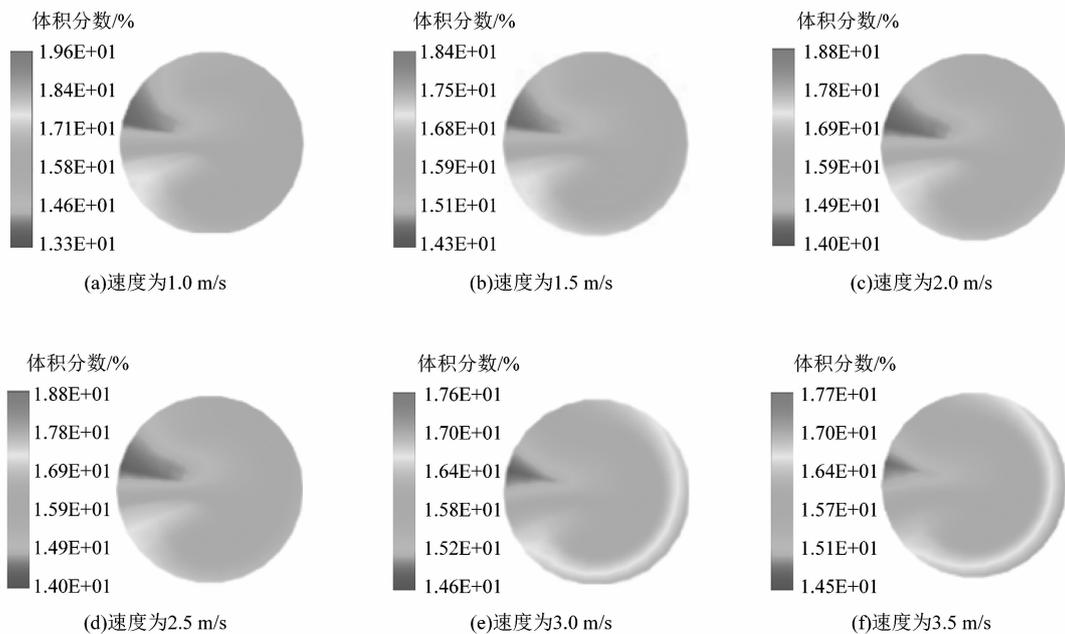


图6 不同速度下颗粒体积分数分布

Figure 6 Particle volume fraction distribution at different velocities

布,图中不同流速下管道内颗粒体积分数的分布。浆体中颗粒受离心力作用向外侧运动,同时由于二次流的作用使得底部内侧的颗粒体积分数高于外侧的颗粒体积分数。随着水流速度逐渐增大,且浆体中颗粒受到自身重量影响,水流速度越小,外侧颗粒越少,随着速度增大,受二次流影响,管外侧颗粒的体积分数高于管内侧颗粒的体积分数。

2.3 压降特性

2.3.1 进出口压降与颗粒质量分数和速度的关系

图 7 所示为进出口压降与速度和质量分数关系分布情况,当颗粒质量分数为 30% ,40% ,50% 和 60% 时,浆体流速为 1.0 ~3.5 m/s,可以观察到在任何给定的颗粒质量分数,压降随速度的增加而增加,在速度较高时,压降的增加速度更明显。研究还发现,颗粒质量分数较大时压降的增加速度比颗粒质量分数增加要快,而且直接取决于浆体悬浮液的流动性质。

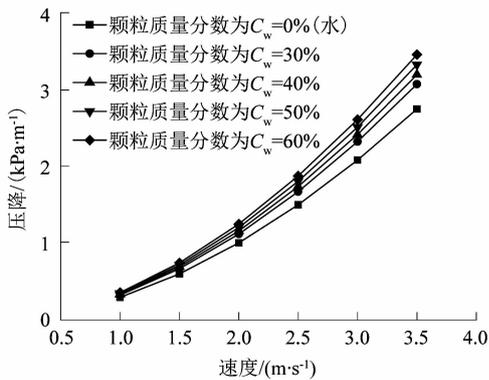


图 7 不同质量分数下压降和速度的关系

Figure 7 Relationship between pressure drop and velocity under different mass fractions

2.3.2 进出口压降与管径关系

压降损失为:

$$\Delta P = \rho \lambda (L/d) u^2 / 2. \quad (3)$$

式中: ΔP 为压降; ρ 为流体密度; λ 为沿程阻力系数, $\lambda = 0.316 Re_d^{-1/4}$; u 为流体速度; L 为管路长度; d 为管道直径。

图 8 所示为进出口压降与管径关系分布。为了进一步了解管道进出口压降与管道直径的关系,选取颗粒质量分数为 60% 和直径分别为 30,40,50 和 60 mm 4 种工况进行计算。由流体力学知识可得管道沿程阻

力损失随管径的增加而减小。图 8 中压降随管径的增加呈减小的趋势符合沿程阻力损失规律。

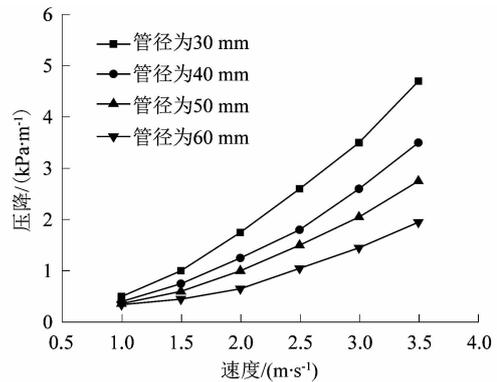


图 8 不同管径下压降和速度的关系

Figure 8 Relationship between pressure drop and velocity under different pipe diameters

3 结论

课题组采用 FLUENT 软件对 U 形管内部流场进行模拟,研究了管内颗粒体积分数和速度的分布,以及颗粒体积分数、速度和管径对管内压降的影响,得出了以下结论:

1) 对于 U 形管流型而言,在入口段颗粒体积分数分布均匀,进入弯管段颗粒体积分数表现出一定的梯度;同时进入弯头靠近管道内侧的高速流区域,沿着流动方向逐渐向管道外侧移动。浆体流过弯头后,管内颗粒速度与体积分数分布状态很快恢复原来状态。

2) 在一定工况下,管内浆体在运送过程中的压降受管径、颗粒的质量分数和速度共同作用。管内压降随管径增大而变小;相同颗粒速度条件下,管内压降随颗粒质量分数变化波动小;相同颗粒质量分数条件下,管内压降随颗粒速度增大呈线性分布;颗粒的质量分数和速度同时增大,会引起管内压降明显变化。

课题组通过动力学仿真及分析,为管内流型变化提供了参考,其他条件对浆体运输压降的影响仍需进一步开展。

参考文献:

[1] 吕彤,胡琼,肖红,等. U 形弯管内大颗粒固液两相流的输送特性研究[J]. 矿冶工程,2019,39(4):6-10.
 [2] 王红红,刘国恒. 中国海油海底管道事故统计及分析[J]. 中国海上油气,2017,29(5):161-164.