

垂直管内固-液两相流全耦合 CFD-DEM 模型研究

张德胜<sup>1</sup> 周游<sup>1</sup> 赵睿杰<sup>1</sup> 施卫东<sup>2</sup>

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 南通大学机械工程学院, 南通 226019)

**摘要:** 针对传统两相流 CFD-DEM 模型中忽略一些次要力以及颗粒-湍流作用导致计算精度不高的问题, 建立了考虑 Loth 升力、虚拟质量力、压力梯度力以及湍流调制等多种机制的全耦合模型, 分析了进口颗粒体积分数、输送速度和颗粒直径对固-液两相流动的影响。研究表明, 升力驱使颗粒向管道中心聚集, 且 Loth 升力比传统 Saffman 和 Magnus 升力预测的颗粒分布更接近实验。随着进口颗粒体积分数的增加, 各相的轴向速度均明显减小, 同时颗粒对湍流的调制作用导致流体均方根速度降低。随着输送速度的增加, 颗粒在管道中心更加聚集, 而流体均方根速度快速增加。随着颗粒直径的增加, 颗粒在管道中的分布更加不均匀, 而对流体均方根速度的影响很小。输送速度对压降影响最大, 进口颗粒体积分数次之, 颗粒直径对其影响最小。

**关键词:** 垂直管; 固-液两相流; 湍流调制; 计算流体动力学; 离散元法

中图分类号: O359; U171 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0212-11

OSID:



Solid-liquid Two-phase Flow Based on Fully Coupled CFD-DEM Method in Vertical Pipe

ZHANG Desheng<sup>1</sup> ZHOU You<sup>1</sup> ZHAO Ruijie<sup>1</sup> SHI Weidong<sup>2</sup>

(1. National Research Center of Pumps and Pumping System, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Traditional CFD-DEM model for solid-liquid two-phase flow usually ignored some minor forces and complex particle-turbulence interaction, which led to the insufficient computational accuracy and failure to capture certain important phenomena. A fully coupled CFD-DEM model considering the Loth lift force, virtual mass force, pressure gradient force and turbulence modulation was established to overcome these problems for solid-liquid two-phase flow. This fully coupled CFD-DEM model well predicted the particle distribution, two-phase velocity and turbulent kinetic energy in the pipe and can be used for the numerical study of solid-liquid two-phase flow. This model was used to analyze the effects of particle volume fraction at the pipe inlet, conveying speed and particle diameter on the characteristics of solid-liquid two-phase flow in the vertical pipe. The results showed that the lift force drove the particles towards the center of the pipe, and the distribution of particles predicted by the Loth lift force was more consistent with the experiment than that of the traditional Saffman and Magnus lift force. With the increase of the particle volume fraction at the pipe inlet, the axial velocity of each phase was decreased obviously in the pipe, and the effect of turbulence modulation from particles on turbulence led to the decrease of the fluid root mean square (RMS) velocity. With the increase of conveying speed, particles gathered more in the center of the pipe, and the RMS velocity of the fluid was increased rapidly. With the increase of particle diameter, the distribution of particles in the pipe was more uneven, but the effect on the RMS velocity of fluid was very small. The pressure drop was increased gradually with the increase of the particle volume fraction at the pipe inlet, and increased sharply with the increase of conveying speed. Coarse particle diameter had little effect on the pressure drop.

**Key words:** vertical pipe; solid-liquid two-phase flow; turbulence modulation; computational fluid dynamics; discrete element method

收稿日期: 2022-02-15 修回日期: 2022-04-02

**基金项目:** 国家自然科学基金联合重点项目(U2106225)、国家自然科学基金项目(52176038)、江苏省杰出青年基金项目(BK20211547)、江苏省重点研发计划项目(BE2021073)和江苏省高校优秀科技创新团队项目(苏教科[2021]1号)

**作者简介:** 张德胜(1982—),男,研究员,博士生导师,主要从事流体机械设计理论及流动特性研究,E-mail: zds@ujs.edu.cn

**通信作者:** 赵睿杰(1984—),男,副研究员,主要从事水力机械多相流流动及磨损腐蚀研究,E-mail: rjzhao@ujs.edu.cn

0 引言

随着我国城市化发展越来越快,基础设施中排污设施的建设也越来越多<sup>[1-3]</sup>。污水管网作为城镇、工业和农业区的重要排污设施,对当地生活 and 经济发展起着重要的保障作用。

生活污水和工业废水中往往含有纤维杂质、纸屑和颗粒等固体物,其中较轻的固体漂浮在水面并随污水漂流,较重的固体分布在水流断面上并呈悬浮状态流动,造成固体物之间发生缠绕、摩擦和碰撞,或者与管道壁面发生摩擦碰撞,导致管道的磨损和堵塞,使得整个排污系统无法正常工作<sup>[4-6]</sup>。因此,对污水污物的两相流动展开研究,可对排污系统的设计、安全可靠的运行以及后期的维护起到重要的指导作用。

固-液两相输送系统的流态极其复杂,受各工况参数影响<sup>[7-10]</sup>,其中流体的流动特性、固体物的运动特性以及流体-固体之间复杂的耦合机制受到广泛关注。目前在固-液两相流领域的主要研究方法包括实验研究和数值模拟。过去,许多学者基于实验数据将压降或者其他过程参数与操作参数(如颗粒体积分、输送速度和颗粒直径)关联起来<sup>[11-13]</sup>,但这种方法只在特定条件下才具有适用性。此外,这种分析结果一般为流体的宏观信息,无法通过其深入了解固-液两相流中的微观信息。随着计算机技术的发展,数值模拟已经成为研究固-液两相流的另一个重要手段。数值模拟方法可以分为 Euler - Euler 方法<sup>[14-17]</sup>和 Euler - Lagrange<sup>[8-9,18]</sup>方法。在前者中,液相和颗粒相均被视为连续介质,求解时均 Navier - Stokes 方程,但该方法很大程度上依赖于本构关系,不能获得足够的关于颗粒-颗粒/壁面碰撞的信息。而在 Euler - Lagrange 方法中,流体被视为连续相,直接求解时均 Navier - Stokes 方程,而颗粒被视为离散相,通过计算流场中每个颗粒的运动,从而在仿真过程中能够很好地捕捉颗粒的碰撞信息。流体和颗粒之间的相互作用通过在各个方程中添加源项实现。

在实验方面,文献[7]利用激光多普勒测速仪(LDA)测量了垂直管道内固-液两相的速度分布,并且发现重颗粒趋向于集中在管道中心,而轻颗粒趋向于集中在管壁附近。在数值模拟方面,文献[8]以 NaCl 颗粒和盐水为载体进行了参数化研究,考察操作条件对水平管中 NaCl 颗粒两相流动的影响。文献[9]采用 CFD - DEM (Computational fluid dynamics - discrete element method)方法,对垂直管内不同参数对颗粒水力输送的影响进行研究,

但未考虑颗粒对湍流的影响。文献[16]利用 Euler - Euler 方法对颗粒-液浆流动进行模拟,结果表明,随着颗粒尺寸增大,摩擦压力损失减小,颗粒体积分数的径向分布增大,且管道底部颗粒体积分数增高。文献[19]比较具有不同叶轮型式潜水排污泵的通过性能,发现双流道污水泵内颗粒速度更快,颗粒聚集程度更小,泵的通过性能强于双叶片污水泵。文献[20]对后掠式双叶片污水泵固液两相流场进行数值模拟,分析了固相颗粒的分布情况和泵内过流部件的磨损情况,并探讨了颗粒体积分及颗粒大小对泵水力性能的影响规律。

目前大部分模型采用传统 Saffman 和 Magnus 升力模型,且忽略其他次要力以及颗粒-湍流的相互作用。本文提出一种全耦合 CFD - DEM 模型,考虑所有次要力和颗粒-湍流的相互作用,分析进口颗粒体积分、输送速度和颗粒直径对固-液两相流动的影响。

1 数学模型

1.1 流体控制方程

流体被视为连续相,其控制方程是质量守恒和动量守恒方程,通过在动量方程中添加源项  $F_{p-f}$  来考虑颗粒对流体的影响,公式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \bar{\mathbf{v}}_f) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \bar{\mathbf{v}}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \bar{\mathbf{v}}_f \bar{\mathbf{v}}_f) = \\ &-\nabla p + \nabla \cdot [\alpha_f (\mu_f + \mu_t) (\nabla \bar{\mathbf{v}}_f + \nabla \bar{\mathbf{v}}_f^T)] + \\ &\alpha_f \rho_f \mathbf{g} + F_{p-f} \end{aligned} \tag{2}$$

其中 
$$F_{p-f} = -\frac{1}{V_{cell}} \sum_{i=1}^n F_{f-p} \tag{3}$$

- 式中
- $\rho_f$ ——流体密度, kg/m<sup>3</sup>
  - $\bar{\mathbf{v}}_f$ ——流体平均速度, m/s
  - $t$ ——时间, s
  - $p$ ——压力, Pa
  - $\mu_f$ ——流体动力粘度, Pa·s
  - $\mu_t$ ——流体湍流粘度, Pa·s
  - $g$ ——重力加速度, m/s<sup>2</sup>
  - $F_{p-f}$ ——颗粒对流体的力源项, N/m<sup>3</sup>
  - $F_{f-p}$ ——流体对颗粒的总作用力, N
  - $V_{cell}$ ——流体网格体积, m<sup>3</sup>
  - $n$ ——流体网格内颗粒数
  - $\alpha_f$ ——流体体积分, %

颗粒被划分为 64 个部分,计算流体网格中的流体体积分,公式为

$$\alpha_f = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^k V_{i,part}}{V_{cell}} \right) \times 100\% \tag{4}$$

式中  $k$  ——与该网格重叠的颗粒数  
 $V_{i,part}$  ——颗粒  $i$  与该网格重叠的总体积,  $\text{m}^3$   
采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型来封闭方程,通过在方程中添加湍动能源项和湍流耗散源项来考虑颗粒对湍流的影响<sup>[21]</sup>,公式为

$$S_k = \frac{1}{V_{cell}} \sum 3\pi\mu_f d_p f_p |v_f - v_p|^2 \tag{5}$$

$$S_\varepsilon = \rho_f C'_{\varepsilon 3} \frac{v_f^2}{V_{cell}} \sum f_p \frac{|v_f - v_p|^2}{d_p} \tag{6}$$

其中  $f_p = 1 + 0.15 Re_p^{0.687} \tag{7}$

$$C'_{\varepsilon 3} = C'_{\varepsilon 2} C_{\varepsilon p} Re_p^{1.416} \tag{8}$$

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p (\bar{v}_f - v_p)}{\mu_f} \tag{9}$$

式中  $S_k$  ——湍动能源项,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$   
 $S_\varepsilon$  ——湍流耗散源项,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^4)$   
 $v_f$  ——流体瞬时速度,  $\text{m}/\text{s}$   
 $v_p$  ——颗粒速度,  $\text{m}/\text{s}$   
 $d_p$  ——颗粒直径,  $\text{m}$   
 $v_f$  ——流体运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $f_p$  ——颗粒雷诺数有关的系数  
 $Re_p$  ——颗粒雷诺数  
 $C'_{\varepsilon 3}$  ——颗粒雷诺数有关的系数

其中  $C'_{\varepsilon 2} = 1.92, C_{\varepsilon p} = 0.085$ 。

1.2 颗粒运动方程

颗粒运动采用离散元法 (DEM) 求解,粒子的运动由牛顿第二定律描述,公式为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_g + F_{drag} + F_{loth} + F_p + F_{vm} + \sum F_c \tag{10}$$

$$I_p \frac{d\omega_p}{dt} = \sum T_c + T_f \tag{11}$$

式中  $m_p$  ——颗粒质量,  $\text{kg}$   
 $F_g$  ——重力,  $\text{N}$   
 $F_{drag}$  ——Dif 曳力<sup>[22]</sup>,  $\text{N}$   
 $F_{loth}$  ——Loth 升力<sup>[23]</sup>,  $\text{N}$   
 $F_p$  ——压力梯度力,  $\text{N}$   
 $F_{vm}$  ——虚拟质量力,  $\text{N}$   
 $F_c$  ——颗粒-颗粒/壁面间相互作用力,  $\text{N}$   
 $I_p$  ——转动惯量,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$   
 $\omega_p$  ——颗粒角速度,  $\text{s}^{-1}$   
 $T_c$  ——颗粒接触力矩,  $\text{N}\cdot\text{m}$   
 $T_f$  ——流体作用力矩,  $\text{N}\cdot\text{m}$

许多因素都会导致升力的产生,而流体涡度和颗粒旋转是产生升力的两个主要机制。为表示流体

涡度和颗粒旋转对升力的影响,Loth 升力模型将升力系数考虑为剪切和旋转引起的升力系数的组合,这扩大了升力模型的适用范围。根据文献[23],升力表示为

$$F_{loth} = \frac{1}{8} C_l \rho_f \pi d_p^2 |v_f - v_p| \left[ (v_f - v_p) \times \frac{\omega_f}{|\omega_f|} \right] \tag{12}$$

式中  $C_l$  ——Loth 升力系数  
 $\omega_f$  ——流体涡度,  $\text{s}^{-1}$

为比较不同升力模型的效果,本文给出 Saffman 和 Magnus 升力的表达式。流体剪切运动引起的 Saffman 升力<sup>[24]</sup>  $F_{saf}$  表示为

$$F_{saf} = 1.615 d_p^2 \left( \frac{\rho_f \mu_f}{|\omega_f|} \right)^{\frac{1}{2}} C_{ls} [(v_f - v_p) \times \omega_f] \tag{13}$$

式中  $C_{ls}$  ——Saffman 升力系数  
根据文献[25],升力系数  $C_{ls}$  可表示为

$$C_{ls} = \begin{cases} (1 - 0.3314\beta^{1/2}) e^{Re_p/10} + 0.3314\beta^{1/2} & (Re_p \leq 40) \\ 0.0524 (\beta Re_p)^{1/2} & (Re_p > 40) \end{cases} \tag{14}$$

其中  $\beta = \frac{d_p |\omega_f|}{2 |v_f - v_p|} \tag{15}$

颗粒旋转引起的 Magnus 升力计算公式<sup>[26]</sup> 为

$$F_{mag} = \frac{1}{8} \pi \rho_f d_p^3 \frac{Re_p}{Re_r} C_{lm} [\omega_{f-p} \times (v_f - v_p)] \tag{16}$$

其中  $C_{lm} = 0.45 + \left( \frac{Re_r}{Re_p} - 0.45 \right) e^{-0.05684 Re_r^{0.4} Re_p^{0.3}} \tag{17}$

$$Re_r = \frac{\rho_f d_p^2 |\omega_{f-p}|}{\mu_f} \tag{18}$$

$$\omega_{f-p} = 0.5 \nabla \times v_f - \omega_p \tag{19}$$

式中  $Re_r$  ——颗粒旋转雷诺数  
 $\omega_{f-p}$  ——相对角速度,  $\text{s}^{-1}$

当颗粒密度远大于流体密度时 ( $\rho_f/\rho_p \ll 1$ ), 虚拟质量力和压力梯度力并不重要 (气-固流)。当  $\rho_f/\rho_p$  大于 0.1 时,虚拟质量力和压力梯度力变得显著,并且需要被考虑,即

$$F_p = -V_p \nabla p \tag{20}$$

$$F_{vm} = C_{vm} m_p \frac{\rho_f}{\rho_p} \left( v_p \nabla v_f - \frac{dv_p}{dt} \right) \tag{21}$$

式中  $V_p$  ——颗粒体积,  $\text{m}^3$   
 $C_{vm}$  ——虚拟质量系数,默认值为 0.5

1.3 离散随机游走模型

采用离散随机游走 (Discrete random walk, DRW) 模型<sup>[27]</sup> 模拟湍流对颗粒运动的随机影响。流体瞬时速度  $v_f$  由流体平均速度  $\bar{v}_f$  和脉动速度  $v'_f$

组成。其中流体平均速度由基于 RANS 方法的时均速度直接求得,而脉动速度服从高斯分布。公式为

$$\mathbf{v}_f = \bar{\mathbf{v}}_f + \mathbf{v}'_f \tag{22}$$

$$\begin{cases} u' = \xi_i \sqrt{(u')^2} \\ v' = \xi_j \sqrt{(v')^2} \\ w' = \xi_k \sqrt{(w')^2} \end{cases} \tag{23}$$

式中  $\xi_i, \xi_j, \xi_k$ —— $i, j, k$  方向的高斯分布随机数  
 $u', v', w'$ —— $i, j, k$  方向的脉动速度分量,  $\text{m/s}$   
由于 RANS 模型的简单性,假设湍流为各向同性,计算脉动速度的均方根为

$$\sqrt{(u')^2} = \sqrt{(v')^2} = \sqrt{(w')^2} = \sqrt{\frac{2}{3} k_f} \tag{24}$$

式中  $k_f$ ——流体湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$   
将上述流体的瞬时速度用于以上各种模型的计算中,所以在计算颗粒的运动时也考虑了湍流效应。

2 模型设置

2.1 数值格式

控制方程用有限体积法离散,采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型,采用 SIMPLE 算法处理速度-压力耦合。在 CFD-DEM 模拟中,颗粒时间步长  $\Delta t_p$  通常为 Rayleigh 时间步长  $\Delta t_R$  的 10%~40%,并且流体时间步长需为颗粒时间步长的 10~100 倍。综合考虑计算精度和时间成本,固体颗粒时间步长设为  $2 \times 10^{-5} \text{ s}$ ,流体时间步长设为  $2 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。 $\Delta t_R$  计算式为

$$\Delta t_R = \frac{\pi R_i}{0.163 \, 1 v_i + 0.876 \, 6 \sqrt{\frac{2 \rho_p (1 + v_i)}{Y_i}}} \tag{25}$$

式中  $R_i$ ——颗粒  $i$  半径,  $\text{m}$   
 $v_i$ ——颗粒  $i$  泊松比  
 $Y_i$ ——颗粒  $i$  杨氏模量,  $\text{Pa}$

2.2 模型设置及边界条件

建立与文献[7]实验相同的管道,并且进行网格划分,如图 1 所示。为更好捕捉壁面处流体信息,对边界层网格进行了细化,壁面第 1 层网格厚度为 0.26 mm,且满足  $30 < y^+ < 50$ 。流体域的进口设置为速度入口,出口设置为自由出流,而颗粒以相同的速度从进口注入。颗粒工厂生成的颗粒数是根据给定的进口颗粒体积分数和流体速度来确定的。当颗粒从管道出口流出时,直接从模拟中去除。颗粒和颗粒/壁面的接触采用 Hertz-Mindlin (no slip) 模型进行计算。

表 1 为模拟中的颗粒和流体属性<sup>[9]</sup>。表 2 为本文所有的模拟情况,研究了进口颗粒体积分数  $C_v$ 、

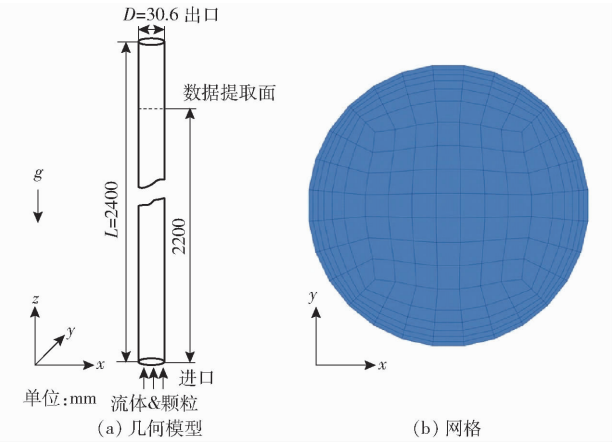


图 1 几何模型和网格

Fig. 1 Geometric model and mesh

表 1 颗粒和流体属性

Tab. 1 Particle and fluid properties

| 参数                                       | 数值              | 参数                                       | 数值                   |
|------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|----------------------|
| 颗粒密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 2 450           | 流体密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 998. 2               |
| 颗粒泊松比                                    | 0. 3            | 流体温度/ $^{\circ}\text{C}$                 | 25                   |
| 颗粒杨氏模量/ $\text{Pa}$                      | $1 \times 10^7$ | 流体粘度/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )      | $1.0 \times 10^{-3}$ |
| 颗粒恢复系数                                   | 0. 85           | 壁面恢复系数                                   | 0. 85                |
| 颗粒静摩擦因数                                  | 0. 1            | 壁面静摩擦因数                                  | 0. 2                 |

表 2 本文模拟中使用的参数

Tab. 2 Parameters used in this simulation

| 序号 | 进口颗粒体积分数<br>$C_v/\%$ | 输送速度<br>$U_f/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 颗粒直径<br>$d_p/\text{mm}$ |
|----|----------------------|----------------------------------------------|-------------------------|
| 1  | 1. 0                 | 4. 5                                         | 2. 0                    |
| 2  | 2. 5                 | 4. 5                                         | 2. 0                    |
| 3  | 5. 0                 | 4. 5                                         | 2. 0                    |
| 4  | 2. 5                 | 1. 5                                         | 2. 0                    |
| 5  | 2. 5                 | 3. 0                                         | 2. 0                    |
| 6  | 2. 5                 | 4. 5                                         | 2. 0                    |
| 7  | 2. 5                 | 4. 5                                         | 1. 0                    |
| 8  | 2. 5                 | 4. 5                                         | 1. 5                    |
| 9  | 2. 5                 | 4. 5                                         | 2. 0                    |

输送速度  $U_f$  和颗粒直径  $d_p$  对固-液两相流动的影响。

数值计算的总时间为 4 s(每 0.05 s 记录一次数据),在  $z = 2.2 \text{ m}$  处的横截面上提取颗粒体积分数、各相轴向速度和流体湍动能数据,压降取自  $z = 1.7 \text{ m}$  和  $z = 2.2 \text{ m}$  两个截面,即  $\Delta L = 0.5 \text{ m}$ ,数据取自模拟 2~4 s 之间,并且做时间和空间平均处理,得各物理量沿半径方向的分布,其中流体均方根速度  $u_{RMS} = \sqrt{2k_f/3}$ 。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

为检验模型的正确性,对直径为 2.32 mm 的球

形颗粒进行数值模拟,并将结果与文献[7]的实验进行比较,图2(图中 $r$ 表示测量点到管道中心的径向距离, $R$ 表示管道半径,并进行无量纲处理)所示为全耦合模型的验证。由图2可知,无升力的模型不能很好地预测管道中心处颗粒的分布,且管道壁面附近的颗粒体积分数略高于实验。传统的

Saffman 和 Magnus 升力模型预测的颗粒体积分数在管道中心和壁面处误差很大。而考虑 Loth 升力的模型能够较好地预测管道内颗粒体积分数的分布,同时各相轴向速度和流体均方根速度的模拟结果与实验吻合较好,表明考虑 Loth 升力和湍流调制的全耦合模型能够较好地预测颗粒的运动和流体的关键

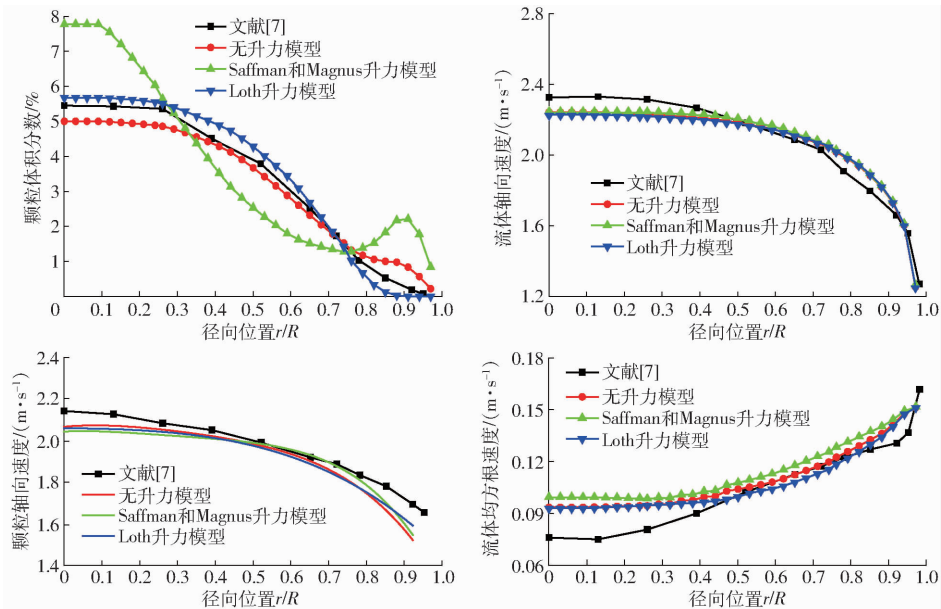


图2 模型验证  
Fig.2 Model validation

流动特性。

本文建立了网格数分别为  $6 \times 10^4$  (粗网格)、 $9 \times 10^4$  (中等网格) 和  $1.1 \times 10^5$  (细网格) 的 3 套模型,对比 3 套网格预测的颗粒体积分数及各相轴向速度分布,发现粗网格和细网格与参考网格的误差均小于 3.0%。通过对比不同模拟时间(4、5、6 s)下的计算结果,发现颗粒体积分数及各相轴向速度的误差均小于 2.5%。所以,综合考虑计算精度和成本,本文采用中等网格和总模拟时间为 4 s 的方案来进行数值计算。

3.2 进口颗粒体积分数对水力输送的影响

进口颗粒体积分数  $C_p$  是固-液两相排污系统中最重要的参数之一,其直接影响颗粒的运动以及流体的流动特性。研究  $C_p$  为 1.0%、2.5% 和 5.0% 的影响,分别对应表 2 中序号 1、2 和 3。

不同  $C_p$  下颗粒的分布情况如图 3 所示。从图 3 中看出,当  $C_p$  为 1.0% 时,颗粒集中在管道中心处,而管道半径方向的中部 ( $r/R = 0.5$ ) 和壁面附近 ( $r/R = 0.9$ ) 颗粒存在较少,甚至没有。当  $C_p$  增加到 5.0% 时,颗粒同样主要集中在管道中心,但半径方向的中部和壁面附近均存在一定的颗粒。这是因为随着进口颗粒体积分数的增加,管道内颗粒的数量急剧增加,颗粒更加分散,同时更多的颗粒由于升力

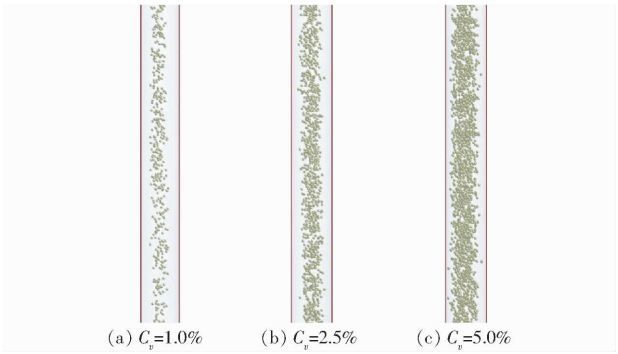


图3 不同  $C_p$  下颗粒分布  
Fig.3 Distribution of particles at different  $C_p$  values

作用向管道中心聚集。

碰撞次数可分为颗粒间和颗粒-壁面间碰撞次数,在  $z = 1.7 \sim 2.2$  m 区域内提取碰撞次数。不同  $C_p$  下,碰撞次数随时间变化如图 4 所示。可以看出,颗粒间碰撞从  $t = 0.37$  s 左右才开始,这是因为颗粒需要经过一定时间运动到所研究区域内,而在  $t = 0.5$  s 以后,颗粒间碰撞次数和颗粒-壁面间碰撞次数均已稳定,即颗粒两相流已经充分发展,考虑到稳定计算和其他工况,对 2 ~ 4 s 之间的数据进行平均处理(虚线所示)。从图 4a、4b 可以看出,颗粒间和颗粒-壁面间碰撞次数都随着  $C_p$  增加而增加,这是因为颗粒数量的增加使得更多颗粒向管道中心聚



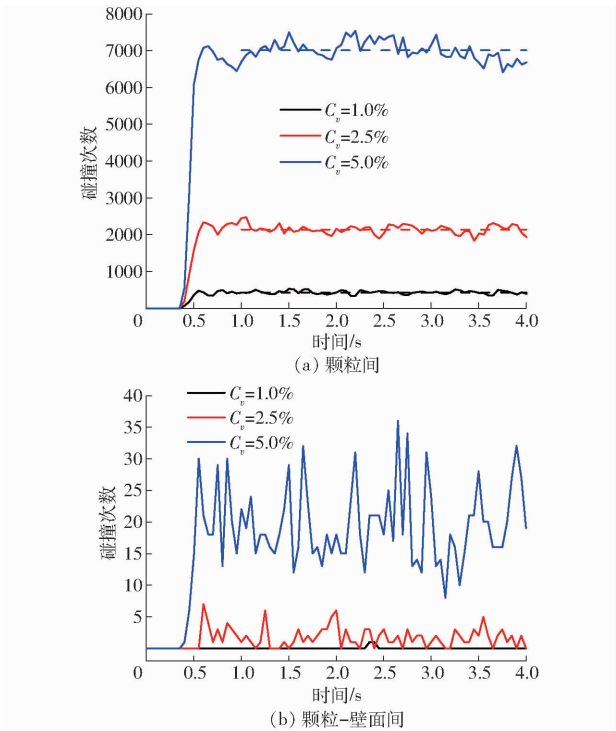


图 4 不同  $C_v$  下碰撞次数

Fig. 4 Number of collisions at different  $C_v$  values

集,管道内发生更加频繁的碰撞。同时,管壁附近颗粒体积分数有所增加,该处的颗粒开始与壁面发生一定次数的碰撞。但颗粒-壁面间碰撞次数远低于颗粒间碰撞次数,且颗粒-壁面间碰撞次数的波动幅度随  $C_v$  的增加而增加。

颗粒体积分数及各相的速度分布如图 5 所示。由图 5 可知,颗粒趋向于聚集在管道中心,颗粒体积分数在管道中心出现最大值,并沿管径向壁面逐渐

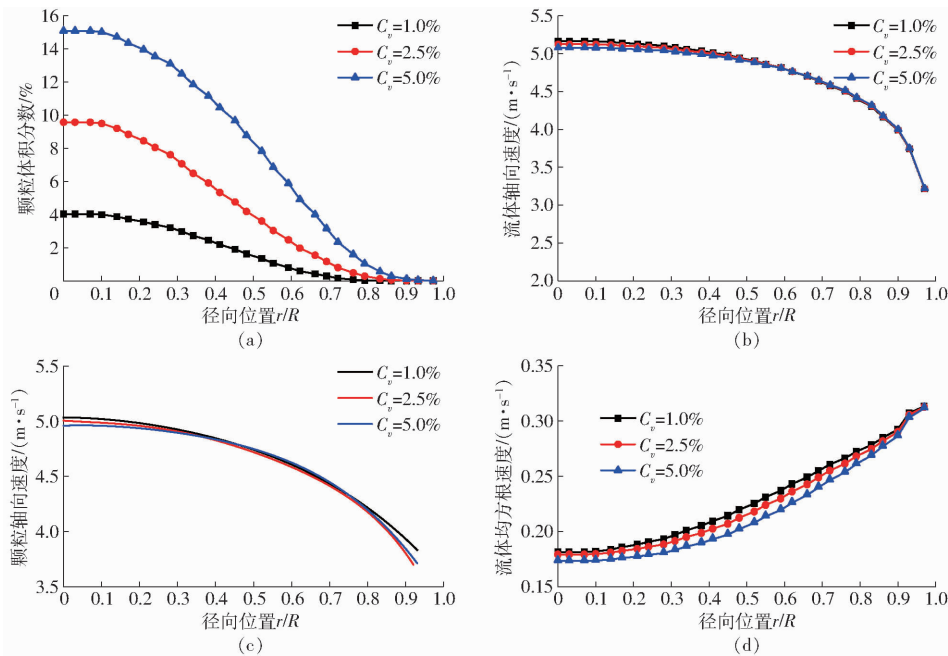


图 5 不同  $C_v$  下各物理量分布

Fig. 5 Distribution of various physical quantities at different  $C_v$  values

降低,在壁面减为零。流体和颗粒的轴向速度在管道中心存在最大值,并且沿管径向壁面降低,而流体均方根速度趋势相反,其在管道中心处最小,并沿管径向壁面逐渐增大,到壁面附近处增加到最大值。

由图 5a 可见,随着  $C_v$  增加,整个管道内颗粒体积分数都增大,且管道中心处颗粒体积分数增加最为明显。这是因为  $C_v$  增大直接导致颗粒数量增多,更多的颗粒在升力作用下向管道中心聚集。而颗粒间碰撞频率随着颗粒数量的增加而显著增加,更多的碰撞使得颗粒更加分散,这也能解释管道半径方向的中部和壁面附近颗粒体积分数的增加。

由图 5b、5c 可见,随着  $C_v$  增加,流体轴向速度有所降低,这种变化在管道中心区域更明显,在管壁附近忽略不计。这是因为随着  $C_v$  增加,流动状态从以流体为主导的流动模式转变为流体-颗粒作用和颗粒-颗粒作用为主导的流动模式,更多数量的颗粒使得流体-颗粒间的动量交换加剧,导致流体轴向速度降低,而靠近壁面区域颗粒较少,两相间动量交换较少使得靠近壁面区域的流体轴向速度几乎不变。随着  $C_v$  增加,颗粒轴向速度也出现了一定的降低,这是由于颗粒的动能被更加频繁的颗粒间相互作用所耗散。由图 5d 可以看出,颗粒对湍流的调制作用导致流体均方根速度有所降低,且调制作用随  $C_v$  增加更加明显。

压降与固-液两相流动的能耗密切相关,是实际应用中备受关注的的问题之一。无量纲压降  $I$  被广泛应用于颗粒水力输送系统<sup>[28]</sup>,  $I = \frac{\Delta p}{\Delta L} \frac{1}{\rho_f g}$ 。图 6 为压

降与  $C_p$  间的关系。由图 6 可知,随着  $C_p$  增加,管道内的压降增大,这与文献[29]中的实验和数值预测一致。这是因为输送的颗粒越多,更多的动量从流体相转移到颗粒相中,导致更多能量消耗,从而使得压降增加。与此同时,颗粒数量的增加使得颗粒间的接触更加频繁,其摩擦损失的加剧也是造成压降增加的另一个原因。

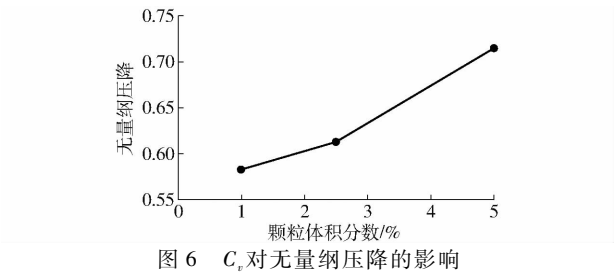


图 6  $C_p$  对无量纲压降的影响

3.3 输送速度对水力输送的影响

输送速度  $U_f$  与输送系统(管道、过滤系统和泵系统等)的流量和效率密切相关,是两相流动系统中另一重要的参数。本节研究了  $U_f$  为 1.5、3.0、4.5 m/s 对水力输送特性的影响,分别对应表 2 中序号 4、5 和 6。

不同  $U_f$  下颗粒分布情况如图 7 所示。从图 7 看出,在  $U_f = 1.5$  m/s 时,颗粒在整个管道内分布最均匀,并且壁面附近处存在较多的颗粒。当  $U_f$  增加到 3.0 m/s 时,颗粒的分布不均匀,在管道中心处较为集中,且管道壁面附近的颗粒数减少。当  $U_f$  继续增加到 4.5 m/s 时,颗粒的分布更加不均匀,大部分颗粒集中在管道中心,壁面附近几乎没有颗粒。因此,随着  $U_f$  增加,管道壁面附近的颗粒逐渐减少,更多的颗粒向管道中心聚集,颗粒在管道内的分布逐渐不均匀。

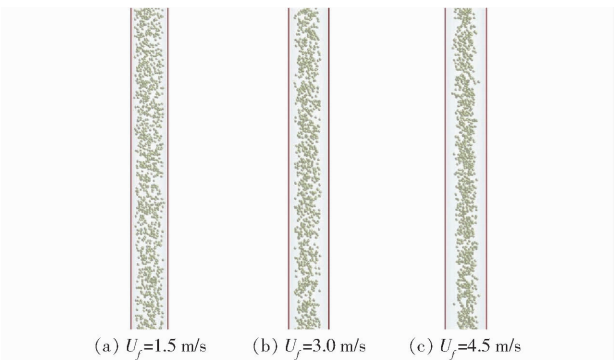


图 7 不同  $U_f$  下颗粒分布

Fig. 7 Distribution of particles at different  $U_f$  values

不同  $U_f$  下,碰撞次数随时间的变化如图 8 所示。可以看出,在不同  $U_f$  下,开始出现颗粒间碰撞和颗粒流达到稳定的时间不同。在较低的  $U_f$  下,开始出现颗粒间碰撞的时间和颗粒流达到稳定的时间

都较长,分别为 1.1 s 和 1.5 s。这是因为颗粒从管道入口运动到出口的时间由颗粒速度决定,较低的  $U_f$  导致颗粒速度较低,颗粒到达管道出口的时间就较长。从图 8 还可以看出,颗粒间碰撞次数和颗粒-壁面间碰撞次数都随  $U_f$  的增加而增加,这是因为随着  $U_f$  的增加更多的颗粒向管道中心聚集,中心区域内发生更为频繁和剧烈的碰撞,导致少部分颗粒在碰撞的作用下向管壁运动,并与管壁发生碰撞。同样,颗粒间碰撞次数远大于颗粒-壁面间碰撞次数,且颗粒-壁面间碰撞次数的波动幅度随  $U_f$  增加而增加。

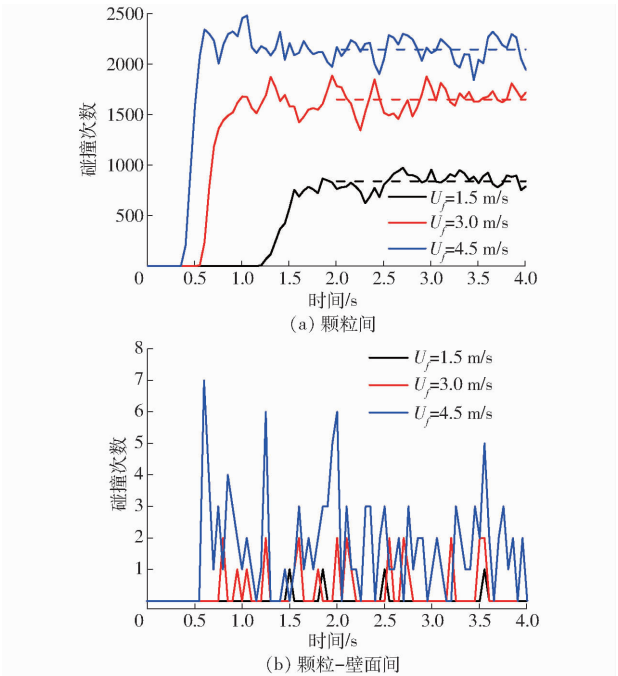


图 8 不同  $U_f$  下碰撞次数

Fig. 8 Number of collisions at different  $U_f$  values

图 9 为不同  $U_f$  下各物理量分布。由图 9a 可见,随着  $U_f$  增加,管壁附近颗粒体积分数逐渐降低,颗粒体积分数峰值逐渐向管道中心靠近且逐渐增加,当  $U_f$  为 4.5 m/s 时颗粒体积分数在中心存在最大值。这是因为随着  $U_f$  增加,壁面附近滑移速度增加,颗粒受到的升力变大,推动更多的颗粒向管道中心聚集。

由图 9b、9c 可见,随着  $U_f$  增加,流体和颗粒的轴向速度也随之增加,其径向梯度也随输送速度的增加变得更加陡峭,这在管壁附近更加明显。输送速度对流体均方根速度的影响如图 9d 所示。流体均方根速度随  $U_f$  增加而增加,且陡峭程度逐渐增加。这是因为随着  $U_f$  增大,管道内雷诺数增大,从而湍流强度总体变大。在壁面附近,流体均方根速度的增加更加明显。

由图 10 可见,随着  $U_f$  增加,管内压降也快速增

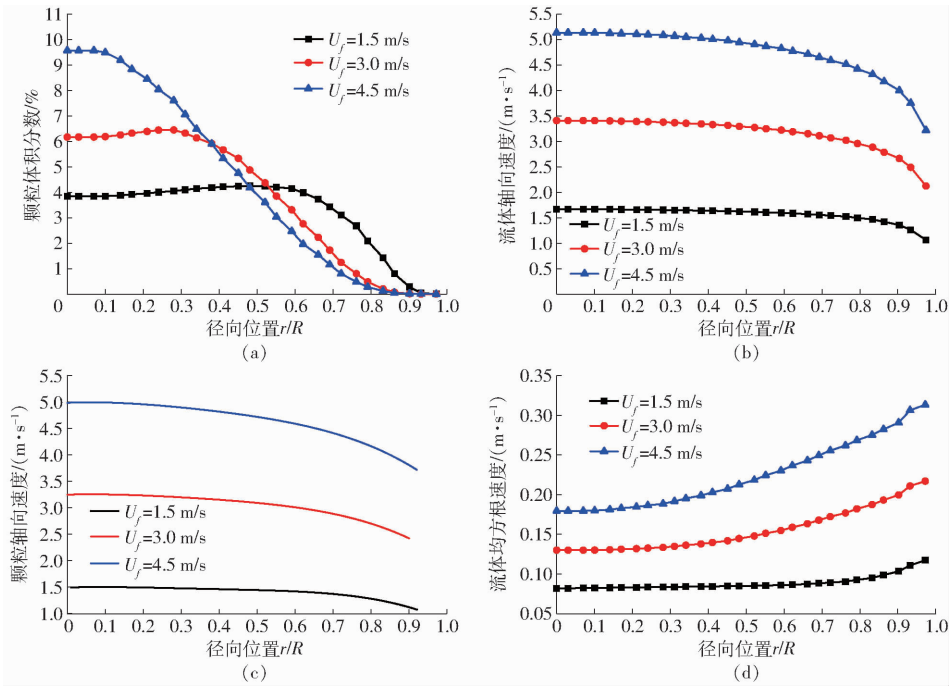


图 9 不同  $U_f$  下各物理量分布

Fig. 9 Distribution of various physical quantities at different  $U_f$  values

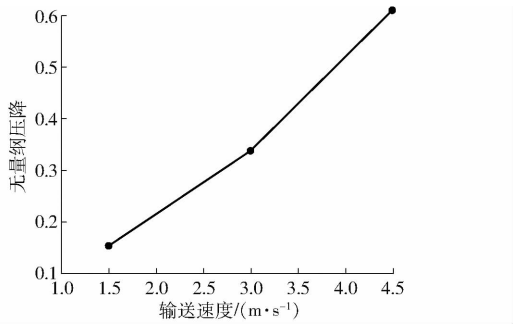


图 10  $U_f$  对无量纲压降的影响

Fig. 10 Effect of  $U_f$  on dimensionless pressure drop

加,这与文献[29]中的实验一致。这是因为随着  $U_f$  增加,流体-壁面的摩擦损耗加剧,以及更加频繁和剧烈的粒子间相互作用,导致更多的能量被耗散,从而造成更大的压降。

3.4 颗粒直径对水力输送的影响

在排污设施中,输送的固体污物往往大小各异。因此,研究不同粒径的颗粒对两相流动的影响具有重要的意义。对相对较粗的颗粒( $d_p$  为 1.0、1.5、2.0 mm)进行数值计算,研究颗粒直径对固-液两相流动的影响。

不同  $d_p$  下颗粒的分布情况如图 11 所示。从图 11 看出,当  $d_p$  较小( $d_p$  为 1.0 mm)时,颗粒在管道内分布非常均匀,并且壁面附近也存在一定量的颗粒。当增大颗粒直径到 1.5 mm 时,颗粒较为集中,管道壁面附近的颗粒减少。当  $d_p$  继续增加到 2.0 mm 时,颗粒分布极不均匀,大部分颗粒集中在管道中心,壁面附近几乎没有颗粒。因此,从颗粒的

分布可以看出,小颗粒在管道内分布均匀,而大颗粒在管道中心聚集,且壁面附近几乎不存在颗粒,表现出极不均匀性。

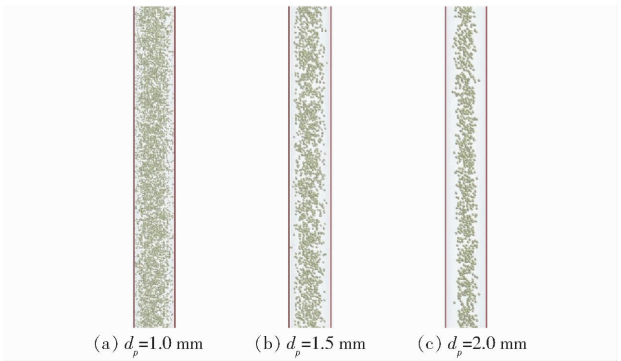


图 11 不同  $d_p$  下颗粒分布

Fig. 11 Distribution of particles at different  $d_p$  values

在不同  $d_p$  下,碰撞次数随时间的变化如图 12 所示。从图 12a 看出,颗粒间碰撞次数随  $d_p$  增加而减少。随着  $d_p$  增加,相同浓度下颗粒数量的急剧减少会降低颗粒间碰撞次数,而大颗粒在管道中心更加聚集会增加中心处颗粒间碰撞次数,由此可见,颗粒数量的急剧减少对颗粒间碰撞次数的影响大于颗粒向中心聚集带来的影响。从图 12b 中看出,在颗粒直径较小时,颗粒分布较为分散,颗粒-壁面间碰撞次数比颗粒间碰撞次数少,但未到可忽略的程度。在颗粒直径较大时,颗粒主要集中在管道中心处,颗粒-壁面间碰撞次数远小于颗粒间碰撞次数。

图 13 为不同  $d_p$  下各物理量的分布。由图 13a 可知,同浓度下,颗粒直径越小,在管道内的分布越分散。这是因为小颗粒在管道内的颗粒数量



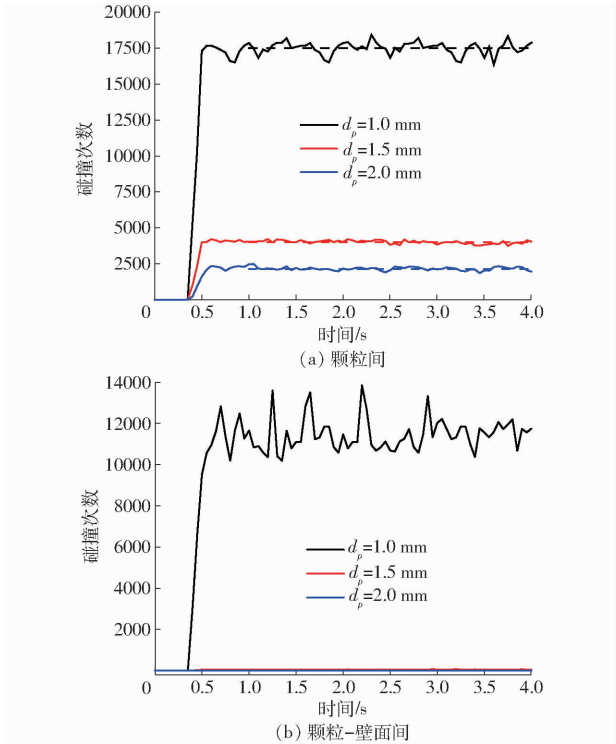


图 12 不同  $d_p$  下碰撞次数

Fig. 12 Number of collisions at different  $d_p$  values

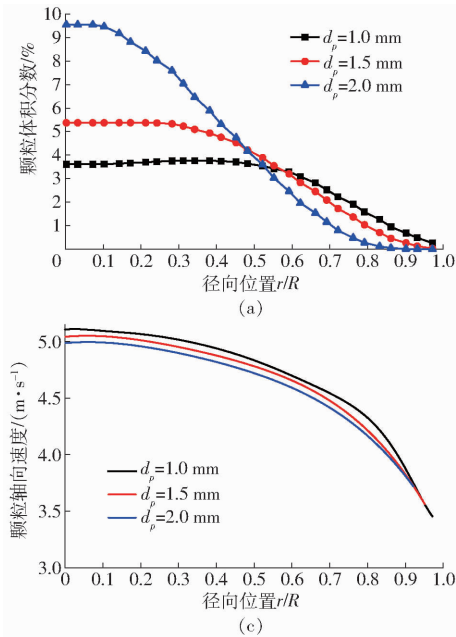


图 13 不同  $d_p$  下各物理量分布

Fig. 13 Distribution of various physical quantities at different  $d_p$  values

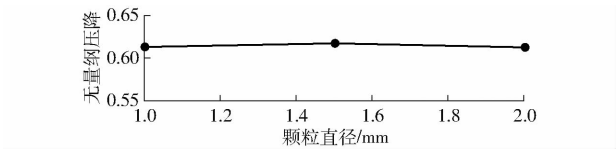


图 14  $d_p$  对无量纲压降的影响

Fig. 14 Effect of  $d_p$  on dimensionless pressure drop

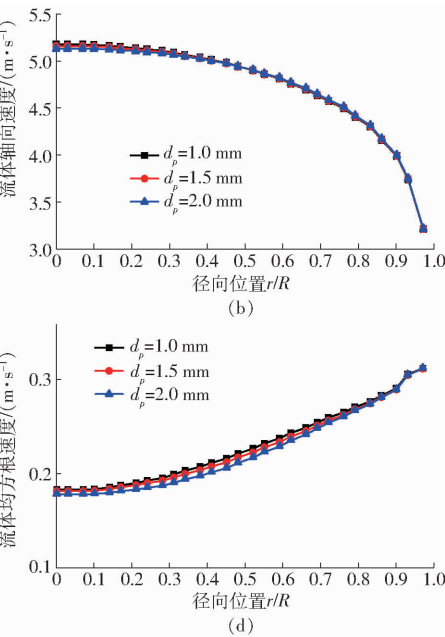
较大,管道中心处颗粒间的接触次数增加,使得颗粒更分散,导致近壁面处存在一定颗粒。当输送速度不变时,流体轴向速度径向梯度基本一致,但是大颗粒与流体滑移速度更大,颗粒受到的升力就更大,管道壁面处颗粒向中心聚集,这也能解释大颗粒更加向管道聚集的现象。

由图 13b、13c 可知,流体轴向速度随着  $d_p$  增加呈现略微降低的趋势,这种趋势在管道中心较为明显。同时发现,随着  $d_p$  增加,颗粒速度也存在一定量的降低。这是因为随着  $d_p$  增加,流体对大颗粒的夹带作用变小,即大颗粒的随动性较低,因此颗粒速度较低。由图 13d 可知,  $d_p$  对流体均方根速度的影响很小。

由图 14 可知,随着  $d_p$  增加,压降的变化不大,这在文献[30]的实验中也有相同的报道。因此,输送速度对压降的影响大于进口颗粒体积分数,而颗粒直径的影响最小。

4 结论

(1) 升力驱使颗粒向管道中心聚集,并且 Loth



好地预测颗粒的运动以及流体的流动特性。

(2) 随着进口颗粒体积分数增加,更多颗粒聚集在管道中心,颗粒分布更加分散,同时颗粒间碰撞次数急剧增加。在管道中心处,流体轴向速度和颗粒轴向速度随进口颗粒体积分数增加而逐渐减小,而管壁附近变化很小,并且流体均方根速度在整个管道范围内有一定的下降趋势。此外,压降随着进口颗粒体积分数的增加而增加。

(3) 随着输送速度增加, 管道中颗粒更加聚集, 颗粒间碰撞次数逐渐增加, 颗粒体积分数峰值逐渐向管道中心移动且峰值逐渐变大, 同时流体轴向速度、颗粒轴向速度以及流体均方根速度均增加, 且速度梯度在壁面附近更加陡峭。此外, 压降随着输送速度的增加而增加, 且影响比进口颗粒体积分数大。

(4) 在所研究的颗粒直径范围内, 随着颗粒直径增加, 颗粒分布逐渐不均匀, 颗粒体积分数在管道中心处存在的峰值逐渐升高且沿管径向壁面的下降幅度更大。颗粒直径对液体轴向速度和均方根速度分布的影响较小。颗粒轴向速度随颗粒直径的增加而降低。此外, 颗粒直径对压降的影响最小。

## 参 考 文 献

- [1] 李安, 宋文波, 刘达克. 2020 年城镇污水治理行业发展评述及展望[J]. 中国环保产业, 2021(4):29-31.  
LI An, SONG Wenbo, LIU Dake. Review and prospect of the development of municipal sewage treatment industry in 2020[J]. China Environmental Protection Industry, 2021(4):29-31. (in Chinese)
- [2] 李喆, 赵乐军, 朱慧芳, 等. 我国城镇污水处理厂建设运行概况及存在问题分析[J]. 给水排水, 2018, 44(4):52-57.  
LI Zhe, ZHAO Lejun, ZHU Huifang, et al. Analysis of construction and operation status and existing problems of municipal wastewater treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(4):52-57. (in Chinese)
- [3] 苑希民, 秦旭东, 张晓鹏, 等. 石家庄市暴雨内涝精细化水动力模型应用[J]. 水利水运工程学报, 2017(3):41-50.  
YUAN Ximin, QIN Xudong, ZHANG Xiaopeng, et al. Application and research of fine model for Shijiazhuang rainstorm waterlogging[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(3):41-50. (in Chinese)
- [4] 张德胜, 施卫东, 陈斌, 等. 高扬程潜水排污泵叶轮和蜗壳的匹配优化与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1):78-85.  
ZHANG Desheng, SHI Weidong, CHEN Bin, et al. Experiment and impeller and volute matching optimization of high-head submersible sewage pump[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1):78-85. (in Chinese)
- [5] 张德胜, 张磊, 施卫东, 等. 基于流固耦合的离心泵蜗壳振动特性优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9):40-45.  
ZHANG Desheng, ZHANG Lei, SHI Weidong, et al. Optimization of vibration characteristics for centrifugal pump volute based on fluid-structure interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9):40-45. (in Chinese)
- [6] 付瑶. 国土空间规划下的水环境保护与治理[J]. 东北水利水电, 2019(8):57-58.
- [7] ALAJBEGOVIC A, ASSAD A, BONETTO F, et al. Phase distribution and turbulence structure for solid/fluid upflow in a pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994, 20(3):453-479.
- [8] UZI A, AVI L. Flow characteristics of coarse particles in horizontal hydraulic conveying[J]. Powder Technology, 2018, 326(3):302-321.
- [9] ZHOU Mengmeng, WANG Shuai, KUANG Shibo, et al. CFD-DEM modelling of hydraulic conveying of solid particles in a vertical pipe[J]. Powder Technol., 2019, 354(8):893-905.
- [10] ZHOU Jiawei, LIU Yu, LIU Songyong, et al. Effects of particle shape and swirling intensity on elbow erosion in dilute-phase pneumatic conveying[J]. Wear, 2017, 380:66-77.
- [11] WILSON K C, CLIFT R, SELLEGREN A. Operating points for pipelines carrying concentrated heterogeneous slurries[J]. Powder Technol., 2002, 123(1):19-24.
- [12] MATOUSEK V. Research developments in pipeline transport of settling slurries[J]. Powder Technol., 2005, 156(1):43-51.
- [13] MIEDEMA S A, RAMSDELL R C. The limit deposit velocity model, a new approach[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015, 63(4):273-286.
- [14] MESSA G V, MALAVASI S. Improvements in the numerical prediction of fully suspended slurry-flow in horizontal pipes[J]. Powder Technol., 2015, 270(8):358-367.
- [15] SILVA R, GARCIA F A P, FAIA P M G M, et al. Particle distribution studies in highly concentrated solid-liquid flows in pipe using the mixture model[J]. Procedia Engineering, 2015, 102:1016-1025.
- [16] OFEI T N, ISMAIL A Y. Eulerian-Eulerian simulation of particle-liquid slurry flow in horizontal pipe[J]. Journal of Petroleum Engineering, 2016, 2016:5743471.
- [17] 刘辉, 龙俨丽, 刘萍, 等. 基于 CFD 的排污管道过滤器数值模拟及结构优化[J]. 广州化工, 2021, 49(1):97-99.  
LIU Hui, LONG Yanli, LIU Ping, et al. Numerical simulation and structure optimization of sewage pipeline filter based on CFD[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(1):97-99. (in Chinese)
- [18] 施卫东, 施亚, 高雄发, 等. 基于 DEM-CFD 的旋流泵大颗粒内流特性模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10):176-185.  
SHI Weidong, SHI Ya, GAO Xiongfa, et al. Simulation and experiment on flow characteristics of large particles in vortex pump based on DEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):176-185. (in Chinese)
- [19] 张丽丽, 马金星, 康灿, 等. 两种叶轮型式潜水排污泵的内流特征与通过能力[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(10):997-1002.

ZHANG Lili, MA Jinxing, KANG Can, et al. Inner flow characteristic and transport capability of two submersible sewage pumps with different impellers[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(10):997 – 1002. (in Chinese)

[20] 程成, 施卫东, 张德胜, 等. 后掠式双叶片污水泵固液两相流动规律的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(2):116 – 122.

CHENG Cheng, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow of swept-back double blades sewage pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(2):116 – 122. (in Chinese)

[21] CROWE C T, SOMMERFELD M, TSUJI Y. Multiphase flows with droplets and particles[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.

[22] FELICE R D. The voidage function for fluid-particle interaction systems[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994, 20(1):153 – 159.

[23] LOTH E, DORGAN A J. An equation of motion for particles of finite Reynolds number and size[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2009, 9(2):187 – 206.

[24] SAFFMAN P G. The lift on a small sphere in a slow shear flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1965, 22(2):385 – 400.

[25] MEI R. An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1992, 18(1):145 – 147.

[26] OESTERLE B, DINH T B. Experiments on the lift of a spinning sphere in a range of intermediate Reynolds numbers[J]. Experiments in Fluids, 1998, 25(1):16 – 22.

[27] GOSMAN A D, LOANNIDES E. Aspects of computer simulation of liquid-fueled combustor[J]. Journal of Energy, 1983, 7(6):482 – 490.

[28] RAVELET F, BAKIR F, KHELLADI S, et al. Experimental study of hydraulic transport of large particles in horizontal pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 45:187 – 197.

[29] BARTOSIK A S, SHOOK C A. Prediction of vertical liquid solid pipe flow using measured concentration distribution[J]. Particulate Science and Technology, 1995, 13(2):85 – 104.

[30] MATOUSEK V. Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6):693 – 702.

(上接第 192 页)

[27] 孙广明, 付志茹, 谢刚, 等. 气动输送系统设计计算[J]. 价值工程, 2015, 34(9):75 – 77.

SUN Guangming, FU Zhiru, XIE Gang, et al. Calculation of the design on the pneumatic transmission system[J]. Value Engineering, 2015, 34(9):75 – 77. (in Chinese)

[28] 温翔宇, 贾洪雷, 张胜伟, 等. 基于 EDEM – Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3):69 – 77.

WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM – Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):69 – 77. (in Chinese)

[29] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油葵籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12):36 – 44.

HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12):36 – 44. (in Chinese)

[30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 收获机械 联合收割机 试验方法: GB/T 8097—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 半喂入联合收割机 技术条件: GB/T 20790—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[32] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

[33] 张学军, 马少腾, 朱兴亮, 等. 正多杆变隙式油葵脱粒装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4):26 – 33.

ZHANG Xuejun, MA Shaoteng, ZHU Xingliang, et al. Design and test of oil-sunflower threshing device with variable clearance[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4):26 – 33. (in Chinese)