

文章编号:1672-3961(2025)02-0114-11

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.040

# 基于 CFD-DEM 耦合的泥水平衡盾构排浆管卵石滞排研究

童里<sup>1,3</sup>, 李达<sup>2\*</sup>, 李树忱<sup>1</sup>, 彭科峰<sup>1,3</sup>, 陈祎<sup>1,3</sup>

(1.山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2.中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 3.山东大学岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061)

**摘要:**针对泥水盾构的弯曲管路进行三维建模,利用 CFD-DEM 耦合进行数值模拟,揭示泥浆携带卵石的运移规律,分析卵石沉积滞排的原因,探究卵石沉积对管道内流场的影响,为现场施工解决滞排问题提供优化指导。结果表明:滞排问题是由于低流速的泥浆提供的拖曳力太低,大量颗粒在管道弯曲处发生了沉积。管道内颗粒进入速度和排出速度将会达到动态平衡,管道弯曲度越大,颗粒生成速度和排出速度达到动态平衡的临界点越晚,说明颗粒滞排越严重,滞排颗粒数量就越多。颗粒沉积导致有效过流面积变小,泥浆流速发生了明显分层,流场的分层更加不利于底部沉积颗粒的运移,加剧滞排问题。泥浆黏度越大,颗粒和泥浆发生剪切流动时的拖曳力越大,颗粒的平均运移速度越大。泥浆密度对颗粒的水平运移影响不大,但颗粒向上运输时,密度大的泥浆能够提供更高的浮力,有利于防治颗粒的滞排。

**关键词:**泥水盾构;滞排;CFD-DEM;卵石运移**中图分类号:**TU94 **文献标志码:**A**引用格式:**童里,李达,李树忱,等.基于 CFD-DEM 耦合的泥水平衡盾构排浆管卵石滞排研究[J].山东大学学报(工学版),2025,55(2):114-124.

TONG Li, LI Da, LI Shuchen, et al. Research on pebble slagging stagnation of slurry balance shield drain pipe based on CFD-DEM coupling[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(2):114-124.

## Research on pebble slagging stagnation of slurry balance shield drain pipe based on CFD-DEM coupling

TONG Li<sup>1,3</sup>, LI Da<sup>2\*</sup>, LI Shuchen<sup>1</sup>, PENG Kefeng<sup>1,3</sup>, CHEN Yi<sup>1,3</sup>

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China; 2. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China; 3. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

**Abstract:** Three-dimensional modeling was carried out for the curved pipeline of slurry balance shield, and numerical simulation was carried out using CFD-DEM coupling to reveal the migration law of pebbles carried by slurry, analyze the causes of the slagging stagnation of pebbles, explore the influence of pebble deposition on the flow field in the pipeline, and provide optimization guidance for the solution of the delayed drainage problem in field construction. The results showed that the problem of slagging stagnation was due to the low drag force provided by the low flow rate slurry, and a large number of particles were deposited at the bend of the pipeline. The larger the curved pipe was, the later the critical pointed at which the particle formation velocity and slagging velocity reached the dynamic equilibrium, indicating that the more the number of deposit particles. Particle deposition made the effective flow area smaller, the slurry flow rate was obviously stratified, and the stratification of flow field was more unfavorable to the migration of sediment particles at the bottom, which aggravated the problem of hysteresis. The larger the viscosity of the slurry, the greater the drag force of the particles between slurry, and the larger the average migration velocity of the particles. Slurry density had little effect on the horizontal movement of particles, but when particles were transported upward, slurry density could provide higher buoyancy, which was conducive to preventing the stagnation of particles.

**Keywords:** slurry balance shield; slagging stagnation; CFD-DEM; pebble transport

收稿日期:2024-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51879150,41831278);济南市“高校20条”资助项目(2020GXRC046)

第一作者简介:童里(1999—),男,湖北恩施人,硕士研究生,主要研究方向为岩土工程。E-mail: tongli19990909@163.com

\*通信作者简介:李达(1990—),男,陕西宝鸡人,工程师,硕士,主要研究方向为隧道工程设计。E-mail: lida\_csu@qq.com

## 0 引言

目前,盾构法施工技术凭借其机械化程度高、安全可靠、施工效率优越等特点,已经成为城轨地铁建设的主流工法。泥浆是泥水盾构的“血液”,发挥着运输开挖渣石和平衡开挖面水土压力的作用。泥水盾构所谓滞排,就是刀盘切削下来的土体在刀盘处、泥水仓和泥浆管道内沉积,无法顺畅排出现象。开挖渣土的滞排导致许多严重的工程事故,如排浆管道堵塞,管道压力过大导致破损等。因此,研究泥浆的携渣运移规律,防治渣土颗粒发生沉积滞排对保障泥水盾构高效掘进有重要意义。

工程中泥水盾构常面临无法将大颗粒卵石排出的问题,文献[1]总结了泥水盾构掘进至含大颗粒的砾卵石地层和孤石等地层中时,切削下来的砾卵石和岩石块体不能随时排出或滞后排出,导致“滞排”现象的发生,并将滞排问题分类,总结了防治滞排的手段。文献[2]针对泥水平衡盾构掘进施工过程中易出现刀盘结泥饼、仓内滞排、卸渣槽堵塞、刀盘扭矩大、掘进速度慢等问题,从泥浆指标控制、刀盘冲刷系统优化、掘进参数控制、刀筒刀具优化等方面,提出大直径泥水平衡盾构在复合地层条件下掘进的防滞排对策。

数值计算方面,文献[3]基于 CFD-DEM 耦合计算方法,发现泥浆输送速度随泥浆的密度减小呈线性增大,泥浆的黏度越大,倾斜直管内输送速度越快。文献[4]建立泥水盾构环流系统模型,分析管道内泥浆的压力损失和分布情况,发现压力损失与泥浆密度的增大近乎成正比。文献[5]采用 CFD-DEM 耦合方法研究颗粒形状对渗流的影响,从宏观角度研究了运移过程中细粒的损失质量、中部细粒的分布以及颗粒形状对流场的影响。文献[6]利用 CFD-DEM 耦合方法分析泥水盾构管道系统反循环对颗粒沉积滞排的影响,研究了刀盘转速、料浆入口速度和料浆流变特性对滞排的处理效果。文献[7]研究了水合物颗粒和岩屑被钻井泥浆输送过程,颗粒的黏附力可以提高水合物颗粒与岩屑混合物的临界沉积速度,颗粒的团聚和黏聚加剧了水合物碎屑和岩屑在管底的聚集和沉积,沉积减少了管道的有效流通面积,增加了堵塞的风险。

室内试验方面,文献[8]分别通过流变试验和三维扫描技术考虑了浆料的流变特性和大型不规则卵石的形状,研究了泥浆对不规则卵石的运移作

用,不同的卵石在不同的管道中具有不同的迁移模式。文献[9]基于质量守恒定律和伯努利方程,建立了堵塞对浆体速度和压力以及工作面变形的影响分析方法,发现环流系统的反循环有助于清除堵塞。文献[10]以兰州地铁跨河隧道施工为研究背景,研究了进口浆体流速、石料体积浓度和管道倾角对管道压降和输送能力的影响,发现石块主要分布在管道底部,压降和输送能力随入口浆体流速和石料体积浓度的增加呈指数增长。文献[11]对环流管道渣石和泥浆的运动规律及分布状态进行研究,渣石在斜管中运动时出现明显的堆积和速度分层现象,发现渣石在斜管角度为 $45^\circ$ 左右时沉积滞排比较严重。文献[12]开展了室内试验,观察大粒径卵石在泥浆循环系统中的输送性能,分析了卵石输运的临界速度。

基于上述研究发现,目前在 CFD-DEM 耦合进行固体颗粒的水力运输模拟时,仅分析了不同参数的流体对颗粒的运移规律,很少研究大颗粒卵石的滞排问题。泥水盾构的排浆管内固相质量占比较大,耦合计算时固相对液相的影响也很大,大部分学者仅单向研究了流场对颗粒的运移作用,但忽略了颗粒对管道内流场的影响。本研究针对泥水盾构实际的弯曲管路排布进行三维建模,利用 CFD-DEM 耦合进行数值模拟,揭示泥浆参数对卵石的运移规律的影响,分析卵石发生沉积滞排的机理,研究颗粒沉积对管道内流场的影响,为现场施工解决滞排问题提供优化指导。

## 1 数值模拟基础理论

CFD-DEM 耦合方法是计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 和离散元方法 (discrete element method, DEM) 耦合的计算模型,被用于模拟流体与固体或颗粒相互作用。在离散固体或颗粒相的运动通过离散元法模拟,该方法将牛顿运动定律应用于每个颗粒,而连续流体的流动由局部平均 Navier-Stokes 方程模拟,该方程可以使用传统的计算流体动力学方法求解。流体相和固体相之间的相互作用用牛顿第三定律来模拟。本次数值计算采用 FLUENT 模拟流体相,利用 Rocky DEM 模拟离散的卵石。

### 1.1 流体相基础理论

数值计算中膨润土泥浆简化为均匀流体,泥浆的流动过程遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能

量守恒定律,流体相的控制方程分别为连续性方程:

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{U}_f) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \mathbf{U}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{U}_f) = -\nabla p_f + \nabla \cdot \alpha_f \boldsymbol{\tau} + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} + F_{pf}, \quad (2)$$

式(1)是均匀流体的质量守恒方程,  $\alpha_f$ 、 $\rho_f$ 、 $\mathbf{U}_f$  和  $p_f$  分别为流体相的体积分、密度、速度矢量和压力,  $\boldsymbol{\tau}$  为黏性应力张量,  $F_{pf}$  为各颗粒对流体施加的力。式(2)是均匀流体的动量守恒方程,即 Navier-Stokes 方程。

膨润土泥浆是一种非牛顿流体。其流变性能适用于宾汉模型<sup>[13]</sup>,宾汉流体只有在达到一个最小剪应力的临界值才开始流动,其数学形式描述为

$$\boldsymbol{\tau} = \tau_0 + \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}, \quad (3)$$

式中,  $\boldsymbol{\tau}$  为剪应力,  $\tau_0$  为屈服应力,  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $\mu$  为泥浆黏度。泥浆的流变模型,其密度、黏度等参

数可以输入 FLUENT 中计算。大直径泥水盾构中泥水仓空间很大,泥浆输送管道也较粗、泥浆流速大,再加上输送的大块卵石的影响,泥浆的流动是典型的湍流。建议采用文献[14]提出的两方程  $k-\varepsilon$  湍流模型来模拟湍流,该模型在工程实例中得到了广泛应用。方程为

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{\kappa} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa}, \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_u \frac{\kappa^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

式中,  $\kappa$  为湍流能量,  $\varepsilon$  为湍流耗散率,  $\mu_t$  为湍流黏度,  $G_k$  为平均速度梯度引起的湍流动能生成项,  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_u$  为经验常数,本研究流体相各参数的取值如表 1 所示。

表 1 流体相相关参数  
Table 1 Parameters of fluid phase

泥浆初始流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	泥浆密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	湍流动能 $\kappa$ / ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )	湍流耗散率 $\varepsilon$ / ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ )	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_u$
2, 3, 4, 5	1 100, 1 150, 1 200, 1 250, 1 300	0.03	0.061 5	1.44	1.92	0.09

## 1.2 颗粒离散元基础理论

泥浆中较大的卵石视为离散颗粒相,卵石与输送管道产生的碰撞符合牛顿经典运动定律,泥浆中卵石受到的作用力为自身重力、与管道内壁碰撞产生的接触应力、泥浆与卵石剪切流动的拖曳力。卵石的运动和碰撞可由牛顿第二运动定律用离散元法求解。每个粒子在任意时刻  $t$  的控制方程<sup>[15]</sup>可描述为

$$m_i \frac{dU_{p,i}}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^n (F_{c,ij} + F_{d,ij}) + (F_{c,iw} + F_{d,iw}) + F_{f,i}, \quad (7)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^n T_{ij} + T_{iw}, \quad (8)$$

式中,  $m_i$ 、 $U_{p,i}$ 、 $I_i$  和  $\omega_i$  分别为质点  $i$  的质量、速度、惯性运动和旋转速度,  $F_{c,ij}$ 、 $F_{d,ij}$  和  $T_{ij}$  分别为粒子间接触力、黏性阻力力和粒子  $i$  与  $j$  之间的扭矩,  $F_{c,iw}$ 、 $F_{d,iw}$ 、 $T_{iw}$  分别为颗粒  $i$  与管壁之间的接触力、黏性阻力力和扭矩,  $F_{f,i}$  是通过流体作用在粒子  $i$  上的力。

泥浆流经渣土颗粒时给予颗粒的作用力,就是泥浆的拖曳力,其方向和流体流动一致,该力和颗粒给予水流的阻力互为反作用力。这种拖曳力是由于颗粒表面粗糙,具有一定黏性的流体和颗粒发生剪切的摩擦力。泥水盾构排浆管内的含固率很

高,曳力模型建议采用适合稠密颗粒流动的 Ergun 方程<sup>[16]</sup>,流体对颗粒拖曳力可表示为

$$F_p = m_p D (v_f - v_p), \quad (9)$$

$$D = 0.5 \left( \frac{180 \theta_p}{Re} + 2 \right) \frac{\rho_f |v_f - v_p|}{r_p \rho_p}, \quad (10)$$

式中,  $m_p$  为颗粒质量,  $D$  为曳力参数,  $v_f$ 、 $v_p$  分别是液体速度和颗粒速度,  $\rho_p$  为颗粒密度,  $\rho_f$  为流体密度,  $\theta_p$  为颗粒质量分数,  $r_p$  为颗粒直径。

## 1.3 CFD-DEM 耦合理论

本研究利用 FLUENT 求解流场方程,利用 Rocky DEM 计算粒子系统的运动和应力条件,实现了 CFD-DEM 的耦合。流场和粒子之间的质量、动量和能量的传递是通过特定的模型来实现的。液相和固相通过交换质量、动量和能量等相互作用。因此,它们之间的交互需要使用双向耦合来描述。在本研究中,流体与颗粒之间的多相耦合过程考虑如下:在每个时间步长内,利用 FLUENT 求解连续流场的相关参数,将得到的数据传递给 Rocky DEM 求解器计算粒子间的相互作用,将力与粒子运动方程耦合,计算离散相粒子的数量、位移和速度。FLUENT 求解器从 Rocky DEM 求解器获取数据,进一步求解含颗粒流场并更新流区,这些操作在下一个时间步重复,CFD-DEM 耦合流程如图 1 所示。

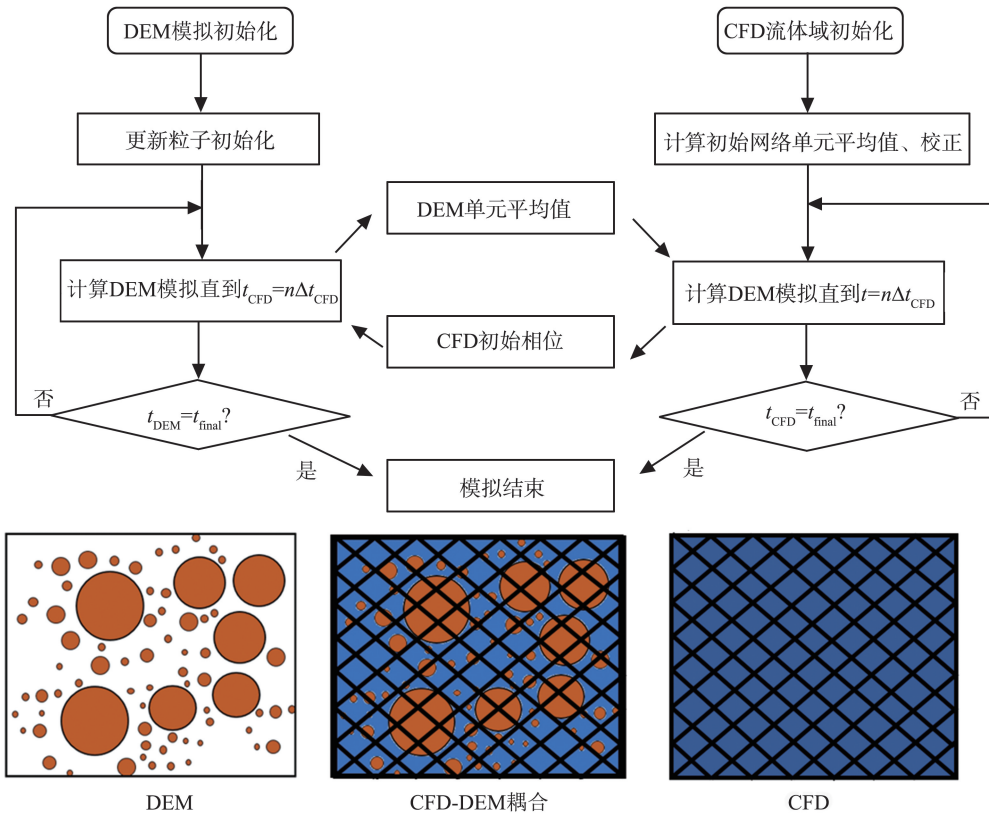


图 1 CFD-DEM 耦合流程  
Fig.1 CFD-DEM coupling process

## 2 建模及边界条件、初始条件

### 2.1 建模

管道流场以芜湖大直径盾构的排浆管道作为参考,盾构直径 15.07 m,盾构的最大掘进速度  $v_{max}$  为 20 mm/min,进浆管、排浆管直径为 0.5 m,每环 2 m,卵石地层土密度约为  $\rho_s = 2.10 \text{ g/cm}^3$ 。进浆管的膨润土泥水密度约为  $\rho_{in} = 1.20 \text{ g/cm}^3$ ,进浆管的携渣泥浆的平均速度约为 3.02 m/s。开挖渣土中部分颗粒溶于水后,排浆管的混合泥浆密度约为  $\rho_{out} = 1.30 \text{ g/cm}^3$ ,盾构排浆管口处的泥浆密度约为  $1.3 \text{ g/cm}^3$ ,根据盾构施工过程中泥浆流量折合的排浆管内平均速度约为 3.41 m/s,为了研究泥浆流速对颗粒运移的影响,设置泥浆流速分别为 2、3、4、5 m/s。

运用 ANSYS 软件进行建模,在管道前后添加合适的直管道,从而最终得到相应的组合管道,管道直径  $d=0.5 \text{ m}$ ,弯曲管道左侧水平直管长度  $L_1 = 2 \text{ m}$ ,弯曲管道右侧倾斜直管长度  $L_2 = 2 \text{ m}$ ,弯曲角度为  $60^\circ$ (增加了  $30^\circ$ 和  $90^\circ$ 的弯曲管道),曲率半径  $r=0.5 \text{ m}$ ,排浆管网格模型如图 2 所示。

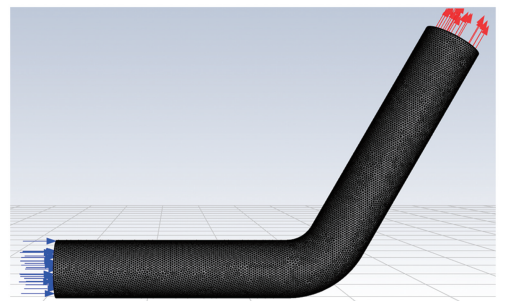


图 2 排浆管网格模型  
Fig.2 Grid model of slurry pipe

### 2.2 初始条件及边界条件

流场的模拟中的边界条件如下,将进口边界设置为速度入口,按照盾构开挖过程中实际的泥浆速度进行模拟,标准组盾构排浆管泥浆流速取 3 m/s,将出口边界设置为压力出口,改变排浆管内的泥浆黏度、密度和初始速度,分析颗粒的运移和滞排规律。进行含重力效应的瞬态三维仿真,重力加速度设为  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 。在 DEM 模型中,在入口处设置一个圆形颗粒工厂,连续不断产生颗粒。按照盾构直径 15.07 m,盾构的最大掘进速度  $v_{max}$  为 20 mm/min,密度为  $2100 \text{ kg/m}^3$ ,折合的颗粒产生速度为 156.00 kg/s,计算式为

$$Q_s = \frac{\pi d^2}{4} v_{max} = 4.46 \text{ m}^3/\text{min}, \quad (11)$$

$$m_s = Q_s \rho_s = 156.00 \text{ kg/s}, \quad (12)$$

式中,  $Q_s$  为盾构每分钟开挖体积,  $d$  为盾构开挖直径,  $v_{\max}$  为盾构最大掘进速度,  $\rho_s$  为颗粒密度,  $m_s$  为盾构每秒开挖质量。

### 2.3 数值计算模型验证

颗粒的半径都为 0.1 m, 泊松比为 0.3, 弹性模量为 1 000 MPa。离散元模拟颗粒单元的运动时, 采用常用的 Hertz-Mindlin 无滑动模型, 卵石较为坚硬, 卵石和管道内壁都较为光滑, 颗粒之间、颗粒-管壁之间的接触力学参数已有成熟的研究<sup>[17]</sup>, 离散元模型相关参数如表 2 所示。

表 2 离散元模型相关参数

Table 2 Parameters of discrete element model

物理参数	静摩擦系数	动摩擦系数	碰撞恢复系数
颗粒-颗粒	0.2	0.05	0.3
颗粒-管壁	0.3	0.10	0.3

颗粒在流体中的运动主要受曳力控制, 其特征时间为颗粒弛豫时间<sup>[18]</sup>, 颗粒的半径越小, 其弛豫时间越小。颗粒直径为 0.1 m, 其特征时间约在  $10^{-3}$  s 量级。根据文献<sup>[19]</sup>的研究, 流体相的时间步长可以是颗粒相时间步长的 10~100 倍。在本研究中, 流体相时间步长设置为 0.02 s, 颗粒相时间步长设置为 0.002 s。

运用 ANSYS 软件对弯曲的排浆管划分网格, 弯曲管道数值模型采用四面体网格, 在确保网格质量的前提下, 四面体网格能更精确地计算控制体的梯度, 进而提高了计算的精度与效率。CFD 模型的网格密度对计算耗时和计算结果的准确性有较大影响。不同网格密度下计算耗时和颗粒最大迁移速度的对比如图 2 所示, 随着网格数量的增加, 耗时大幅增加, 颗粒最大迁移速度逐渐接近于泥浆的初始速度。当网格密度较小时(单元数为 7 914), 数值模拟结果与网格加密结果相比误差较大。与本研究的 954 196 个网格数相比(四面体的边长为 2 cm), 3 404 939 个网格数的模拟时间要长得多, 但精度的提高并不明显。当网格更加细致时, 颗粒的最大迁移速度更加接近泥浆的初始速度, 验证了数值模型的准确性。本研究数值模型的网格密度既要满足精度要求, 又消耗较小的时间成本, 网格分布如图 3 所示。

利用芜湖城南跨江隧道大直径盾构施工参数以验证 CFD-DEM 计算结果的准确性, 现场的泥浆管道如图 4 所示。模拟结果与现场监测数据对比如图 5 所示, 对比排浆管道体积流量和 CFD-DEM 模

型计算结果发现, CFD-DEM 模拟结果与现场数据差异较小, 数值计算结果与现场监测数据吻合较好。

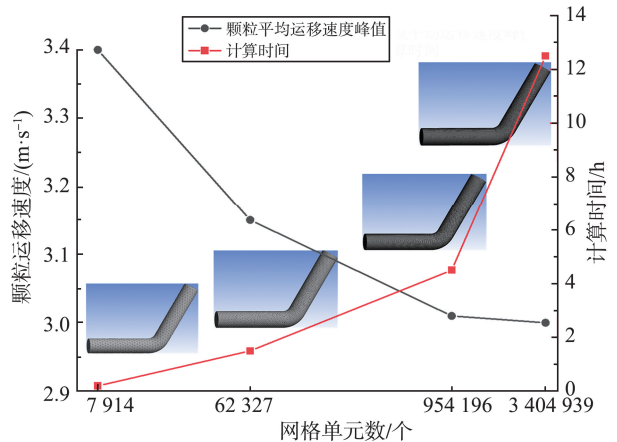


图 3 不同网格密度下计算耗时和颗粒最大迁移速度  
Fig.3 The calculation time and maximum particle migration velocity were calculated at different mesh densities



图 4 现场泥浆管路  
Fig.4 Slurry pipeline

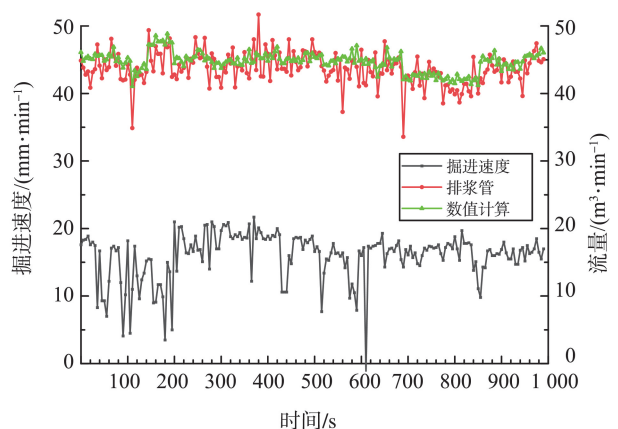


图 5 泥浆体积流量对比  
Fig.5 Slurry volume flow comparison

## 3 颗粒运移规律数值模拟研究

### 3.1 颗粒滞排及流场分析

利用 FLUENT 软件计算初始化的流场, 入口初始速度为 3 m/s, 流场的速度分布截面图如图 6(a)

所示,直管处的横截面的流场速度分布如图 6(b) 所示。在水平管道中,管道中心的泥浆流速高于四周。通过弯曲处后,泥浆的流速发生明显分层,如

图 6(c) 所示。由于泥浆的流动惯性,泥浆的高流速区域集中在管道底部,高流速的泥浆能为颗粒提供更大的拖曳力。

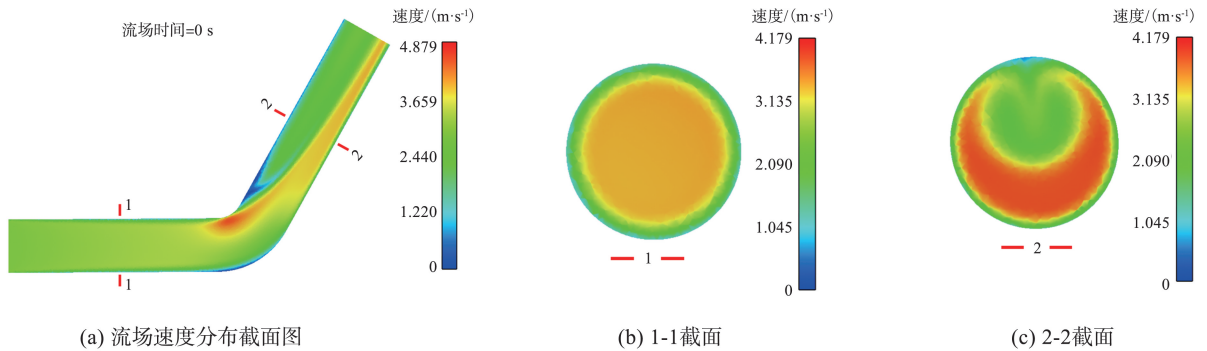


图 6 泥浆初始流场

Fig.6 Initial slurry flow field

在初始速度为 3 m/s 的泥浆(泥浆密度为 1 200 kg/m<sup>3</sup>,黏度为 0.02 Pa·s)的拖曳下,颗粒的运移速度云图如图 7 所示。颗粒生成时具有 2.55 m/s 的初速度,在泥浆的拖曳下进行加速,同时在自重的作用下发生沉降,颗粒之间或者与管道底部发生碰撞,都会导致颗粒动能的降低,速度降低的颗粒在管道的弯曲处发生沉积。由图 7 可见,低流速的泥浆提供的拖曳力较低,颗粒集中分布于管道的底部,大量颗粒发生了沉积滞排。

他颗粒发生碰撞。

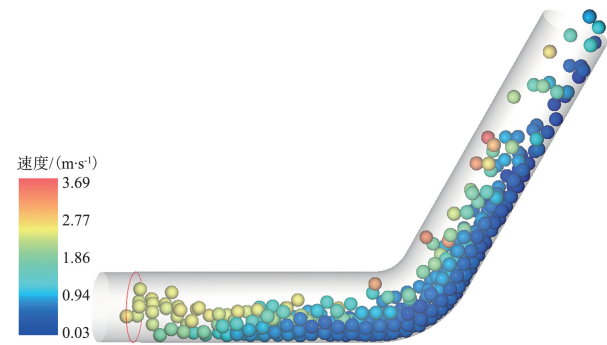
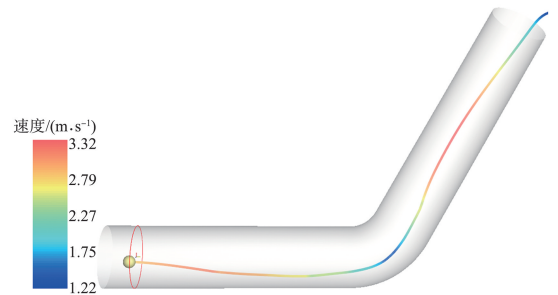


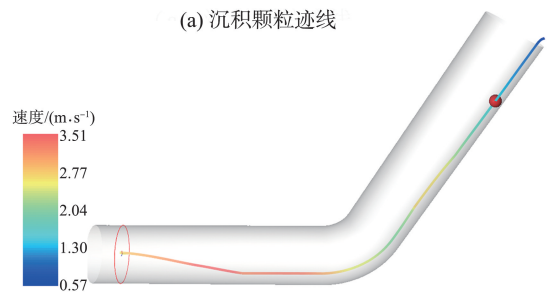
图 7 颗粒分布及运移速度云图

Fig.7 Cloud map of particle distribution and migration velocity

沉积颗粒和未沉积颗粒的运移速度和运移有很大的区别,颗粒的运移迹线如图 8 所示,运移速度如图 9 所示。颗粒生成后在自重作用下迅速下沉并与管壁发生碰撞减速,在管底部滚动运移,速度在弯曲处大幅降低,最终排出管道外。沉积颗粒经过初始加速阶段后,运移速度在弯曲处大幅降低,经历多个小幅的加速,总体来说运移速度越来越小。由于颗粒间的相互碰撞,沉积颗粒的速度曲线比较波折,沉积颗粒经过小幅的加速就会发生碰撞,耗费了颗粒的动能。未沉积颗粒凭借泥浆的浮力和拖曳力悬浮于泥浆中,能够克服自身重力进行跃迁,其速度也会在跃迁过程中快速增长,很少与其



(a) 沉积颗粒迹线



(b) 未沉积颗粒迹线

图 8 颗粒运移迹线

Fig.8 Particle migration trace

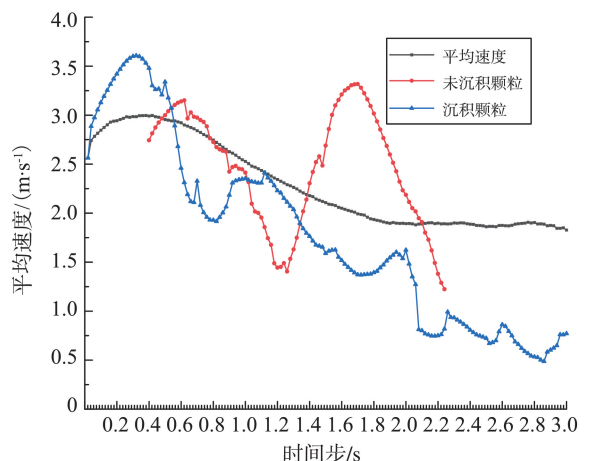


图 9 颗粒运移速度曲线

Fig.9 Particle migration velocity curve

颗粒发生滞排后,沉积的颗粒导致流场发生分层,管道截面的速度分布如图10所示。水平管道内泥浆流速较为均匀,管道底部的泥浆流速稍低于管道上部。倾斜管道内管道底部泥浆流速很低,沉积颗粒导致有效过流面积变小,泥浆高流速区域集中

在管道上部。仅少部分颗粒能够在管道上部高速运移,而大部分颗粒在低流速区域沉积,斜管处发生滞排后会加剧流场的分层,分层的流场更加不利于颗粒的运移,形成恶性循环。

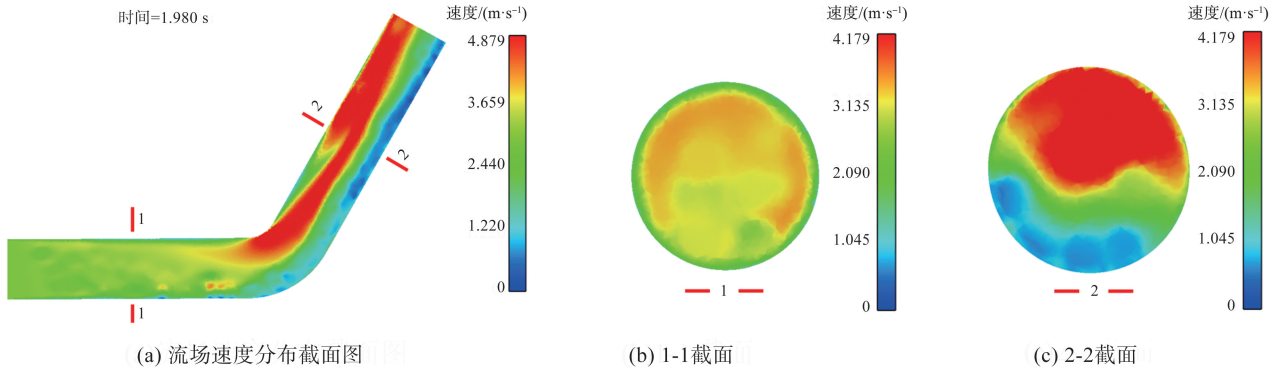


图10 滞排后流场速度云图

Fig.10 Velocity cloud image of flow field after stagnation

### 3.2 不同管道弯曲度数对颗粒滞排影响

为了研究泥浆管道的弯曲度对颗粒运移速度的影响,本研究设置了30°、60°和90°的弯曲管道,各弯曲管道弯曲处的曲率都为0.5 m。泥浆初始速度都为3 m/s,密度为1 200 kg/m<sup>3</sup>,黏度为0.02 Pa·s的情况下,不同弯曲度数的管道内颗粒运移速度云图如图11所示。

不同弯曲度数的管道内流场的速度云图如图12所示,水平管道内泥浆的流速约为3 m/s,速度分布较为均匀,泥浆通过弯曲处后速度明显分层,泥浆流速最高处达到5 m/s。60°的管道内泥浆流速分层最明显,颗粒的沉积滞排加剧了泥浆流速的分层,管道底部的低流速泥浆也难以运输颗粒。

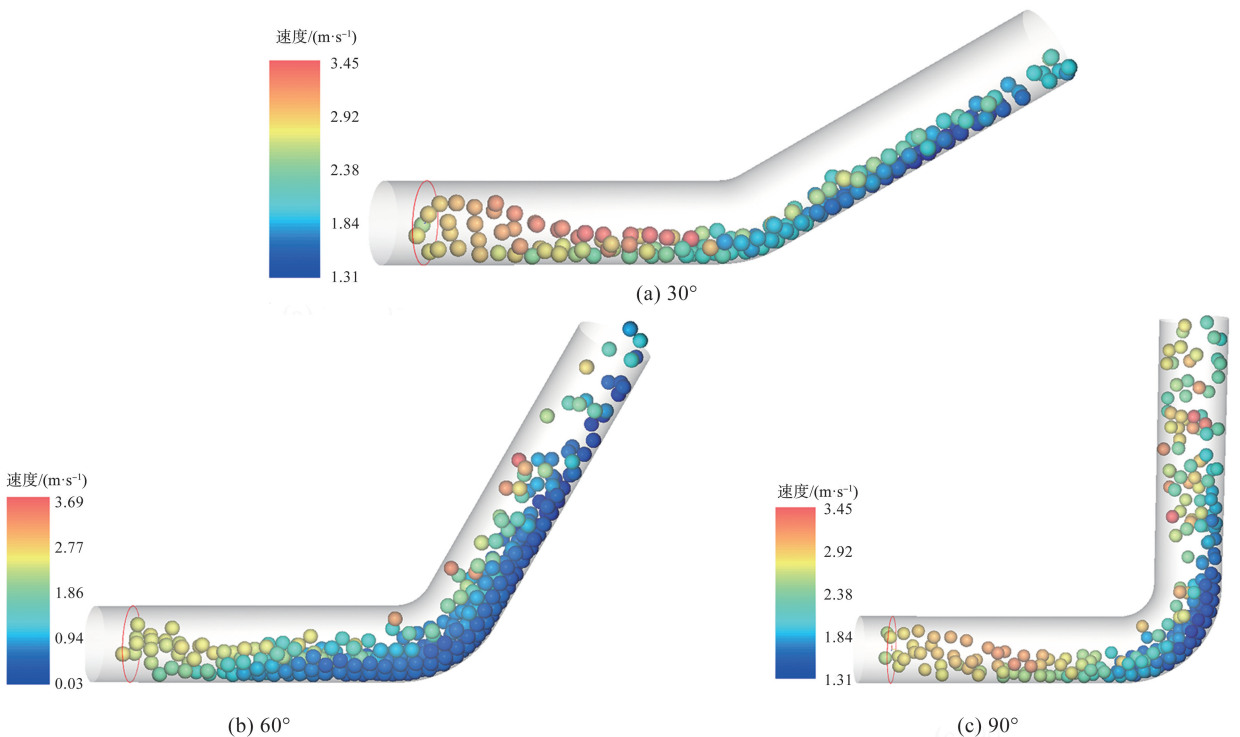


图11 不同弯管内颗粒分布及速度云图

Fig.11 Particle distribution and velocity cloud images in different bends

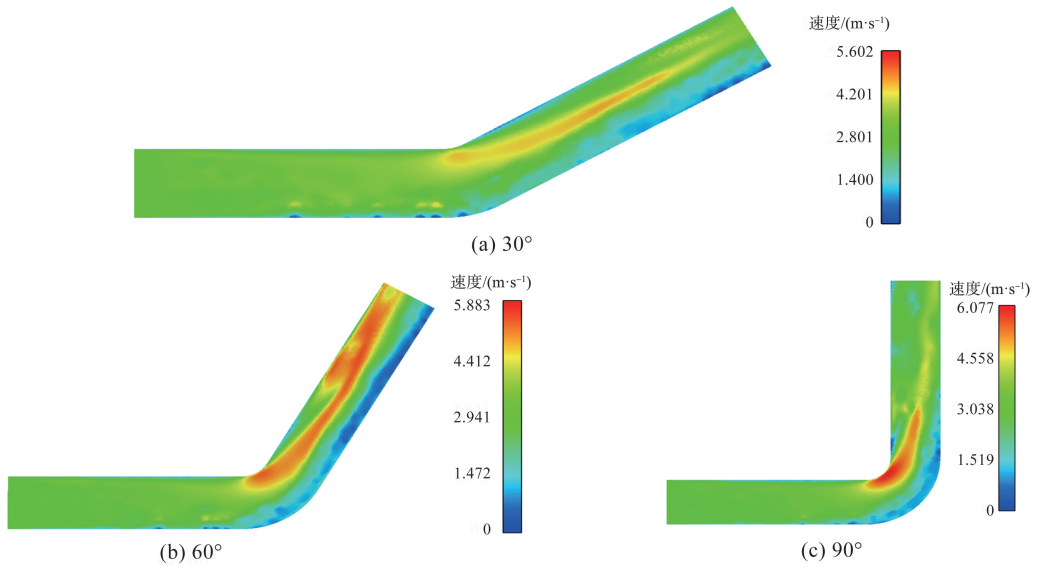


图 12 不同弯管内流场速度云图

Fig.12 Velocity cloud image of flow field in different bends

密度为  $1\ 200\ \text{kg/m}^3$ , 黏度为  $0.02\ \text{Pa}\cdot\text{s}$  的情况下, 不同管道弯曲度数的颗粒平均速度曲线如图 13 所示。泥浆初始速度为  $3\ \text{m/s}$  时, 大约  $0.6\ \text{s}$  的时间步后, 最先生成的颗粒运移至弯曲处, 颗粒与管壁发生碰撞减速。由图 12 可见,  $90^\circ$  的弯曲管道内颗粒减速幅度最大,  $60^\circ$  的弯曲管道次之。泥浆初始速度为  $2\ \text{m/s}$  时, 大约  $1.0\ \text{s}$  的时间步后, 最先生成的颗粒运移至弯曲处, 颗粒与管壁发生碰撞减速。但是泥浆的流速太低, 3 种弯管内颗粒的

平均速度都很低, 颗粒生成过后速度迅速降低, 颗粒无法顺畅的运移。泥浆初始速度大于  $4\ \text{m/s}$  时, 颗粒运移速度较快, 颗粒能够顺畅的运移,  $30^\circ$  的弯曲管道内颗粒与管壁碰撞减速最小, 其平均速度明显高于  $60^\circ$  和  $90^\circ$ 。综上所述, 泥浆的初始速度保持在  $4\ \text{m/s}$  左右较为合理, 可见相较于提高泥浆的黏度、密度等参数等手段, 提高泥浆泵的功率, 加大流场速度对颗粒的拖曳力是防治滞排问题的重要手段。

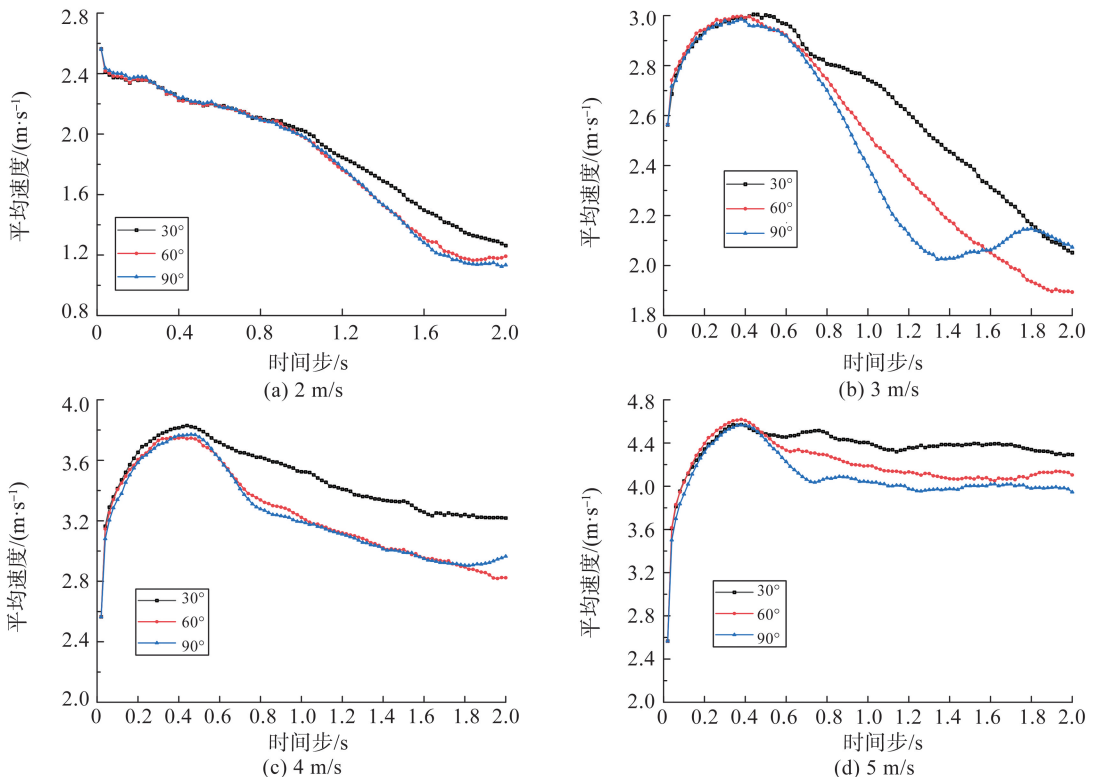


图 13 不同泥浆初始速度的颗粒平均运移速度

Fig.13 Average particle transport velocity at different initial slurry velocities

不同弯曲管道内颗粒数如图 14 所示,可见在颗粒生成速度维持恒定,管道内的颗粒数不断增加直至达到峰值,这是由于颗粒生成速度和排出速度达到动态平衡,滞留在管道内的颗粒数就是滞排颗粒数。泥浆初始速度为 3 m/s 时,管道弯曲度数越大,

颗粒生成速度和排出速度达到动态平衡的临界点越晚,说明颗粒滞排越严重。不同工况下滞排颗粒数如图 15 所示,管道的弯曲度数越大,泥浆的初始速度越小,颗粒的滞排数量越大。

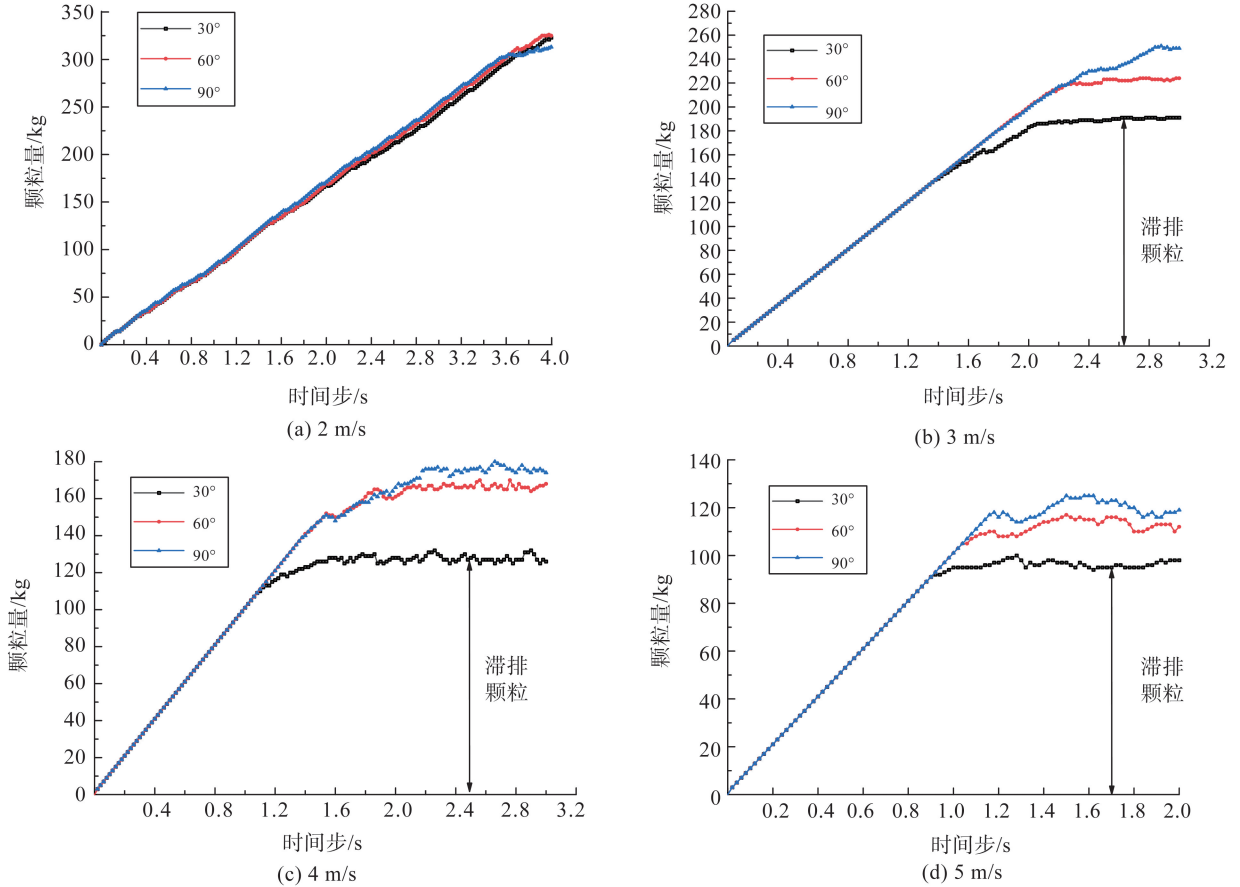


图 14 不同泥浆初始速度的管道内颗粒量  
Fig.14 The amount of particles in the pipe at different initial slurry velocities

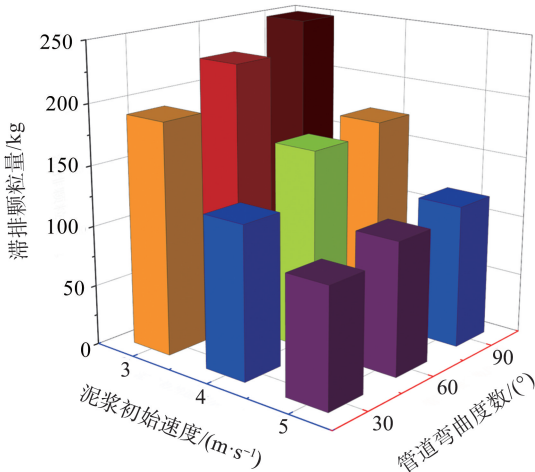


图 15 管道内颗粒滞排数量

Fig.15 The amount of particles hysteresis in the pipe

### 3.3 泥浆黏度对颗粒运移速度影响

不同黏度的泥浆对颗粒的运移速度的影响如图 16 所示,可见泥浆黏度越大,泥浆和颗粒发生剪

切产生的拖曳力越大,使颗粒具有更快的运移速度。颗粒的平均速度在前 0.5 s 内加快,达到峰值。在 60°的弯曲管道内(见图 16(b)),泥浆黏度提升到 0.04 Pa·s 以上后,再提高泥浆的黏度,颗粒运移速度的提升并不明显。过大的泥浆黏度会增加盾构的施工负荷和泥浆的处理难度,也增大了渣土中黏土颗粒的黏附堵塞效应。可见,泥浆的黏度不宜过大,也不宜过小,工程中维持在 0.04 Pa·s 左右为宜。

在 30°的弯曲管道内(见图 16(a)),不同黏度的泥浆对颗粒运移速度影响更明显,这说明在泥浆流动方向上,泥浆黏度对颗粒拖曳力的影响很大,泥浆黏度越大,泥浆和颗粒发生剪切产生的拖曳力越大。在 90°的弯曲管道内(见图 16(c)),当泥浆黏度大于 0.04 Pa·s 后,颗粒平均速度的变化不明显。

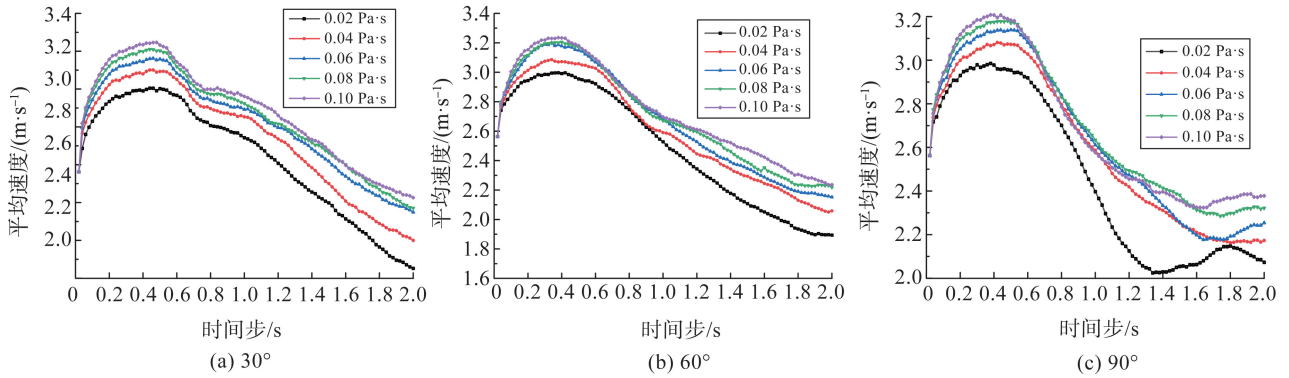


图16 不同泥浆黏度的颗粒平均运移速度

Fig.16 Average particle transport velocity at different initial slurry velocities

### 3.4 泥浆密度对颗粒运移速度影响

当泥浆初始速度为 3 m/s, 黏度为 0.02 Pa·s 的情况下, 不同的泥浆密度对颗粒运移速度的影响如图 17 所示, 可见在前 0.8 s 的时间步内, 不同密度泥浆的颗粒速度几乎相同, 这是由于在前 0.8 s 的时间步, 颗粒仅在水平管道内运移, 而高密度的泥浆仅提供更高的浮力, 这对颗粒的水平运移影响不大。

在 0.8 s 后的时间步内, 部分颗粒在倾斜的管道内运移, 高密度泥浆使颗粒在倾斜管道内运移速度增大。实际工程中, 泥浆密度过高会导致盾构的掘进负荷较高, 泥浆的密度不宜高于 1 300 kg/m<sup>3</sup>, 当泥浆循环时间较长时, 泥浆密度缓慢升高。为了减轻盾构掘进的负荷, 应该通过筛分、离心和压滤等手段及时处理高密度的泥浆。

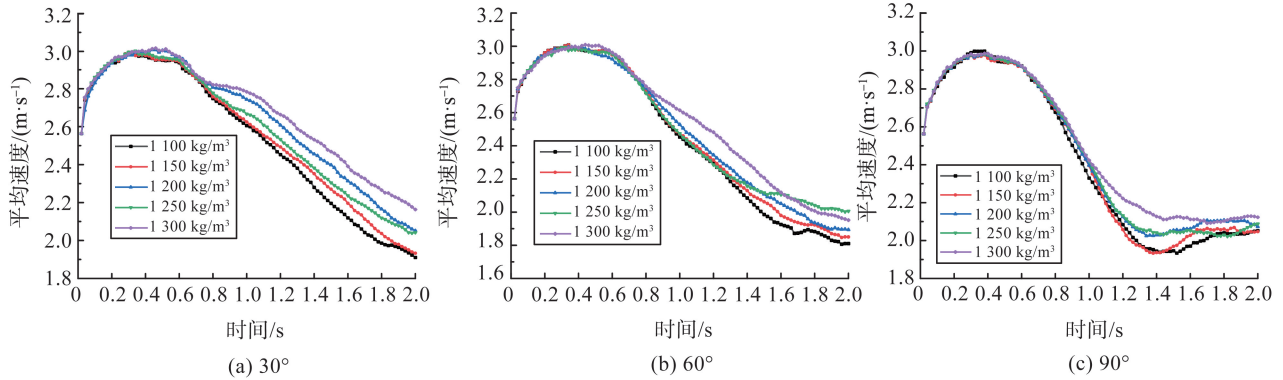


图17 不同泥浆密度的颗粒平均运移速度

Fig.17 Average particle transport velocity of different slurry densities

## 4 结论

综合以上模拟计算结果, 通过分析颗粒的平均运移速度以及流场的变化, 可以得出以下几点结论。

(1) 滞排问题是由于低流速的泥浆提供的拖曳力太低, 大量颗粒沉积于管道弯曲处的底部。颗粒生成速度和排出速度达到动态平衡, 管道弯曲度数越大, 颗粒生成速度和排出速度达到动态平衡的临界点越晚, 说明颗粒滞排越严重, 滞排的颗粒数量就越多。

(2) 颗粒滞排沉积导致管道的有效过流面积变小, 泥浆高流速区域集中在管道上部, 大部分颗粒在低流速区域沉积。颗粒的滞排会加剧流场的分层, 管道顶部的流速远大于底部, 分层的流场更

加不利于底部沉积颗粒的运移, 加剧颗粒的滞排问题。

(3) 泥浆黏度越大, 颗粒和泥浆发生剪切流动时的拖曳力越大, 颗粒的平均运移速度越大, 盾构施工过程中可以适当添加增黏剂提高泥浆黏度, 黏度控制在 0.04 Pa·s 左右为宜。泥浆密度对颗粒的水平运移影响不大, 但颗粒向上运输时, 密度大的泥浆能够提供更高的浮力, 高密度有利于防治颗粒的滞排, 但也会增加盾构施工负荷。工程上提高泥浆泵的功率, 保持泥浆流速在 4 m/s 左右, 能够有效防治滞排问题。

### 参考文献:

[1] 竺维彬, 钟长平, 黄威然, 等. 盾构施工“滞排”成因分析和对策研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 23-32.

- ZHU Weibin, ZHONG Changping, HUANG Weiran, et al. Cause analysis and countermeasures for “hindered” mucking in shield construction [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2014, 51(5):23-32.
- [2] 陈慧超.大直径常压刀盘泥水平衡盾构掘进防滞排技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2023, 52(3):132-139.  
CHEN Huichao. Anti-stagnation and drainage technology of mud-water balance shield tunneling with large diameter atmospheric pressure cutter head [J]. *Construction Technology*, 2023, 52(3):132-139.
- [3] 贾连辉, 肖艳秋, 赵驰, 等.基于CFD-DEM方法的泥水盾构环流系统泥浆携渣特性研究[J]. *机械设计*, 2023, 40(12):126-132.  
JIA Lianhui, XIAO Yanqiu, ZHAO Chi, et al. Study on mud-water shield circulation system's slurry slag-carrying characteristics based on CFD-DEM method[J]. *Journal of Machine Design*, 2023, 40(12):126-132.
- [4] 陈健, 薛峰, 赵合全, 等.大直径泥水盾构环流系统管路压力损失及携渣特性[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2020, 2(2):83-91.  
CHEN Jian, XUE Feng, ZHAO Hequan, et al. Pressure loss and slag carrying characteristics of large diameter mud shield circulation system [J]. *Tunnel and Underground Engineering Disaster Control*, 2019, 2(2):83-91.
- [5] XIONG H, WU H, BAO X H, et al. Investigating effect of particle shape on suffusion by CFD-DEM modeling[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 289:123043.
- [6] GUO Y D, LI X G, JIN D L, et al. Assessment on the reverse circulation performance of slurry shield pipeline system assisted with CFD-DEM modeling under sandy cobble stratum [J]. *Powder Technology*, 2023, 425:118573.
- [7] WANG J A, LI Y, ZHAO J F, et al. Simulation of the effect of hydrate adhesion properties on flow safety in solid fluidization exploitation [J]. *Petroleum*, 2023, 9(3):403-411.
- [8] GUO Y D, LI X G, SUN Y, et al. Investigation into the flow characteristics of slurry shield pipeline system under sandy pebble stratum: model test and CFD-DEM simulation[J]. *Powder Technology*, 2023, 415:118149.
- [9] LIU M B, LIAO S M, SHI Z H, et al. Analytical study and field investigation on the effects of clogging in slurry shield tunneling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 133:104957.
- [10] YANG D, XIA Y M, WU D, et al. Numerical investigation of pipeline transport characteristics of slurry shield under gravel stratum [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2018, 71:223-230.
- [11] 任振, 贾连辉, 王少萍, 等.卵石地层泥水盾构环流管道排渣特性研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(增刊1):171-177.  
REN Zhen, JIA Lianhui, WANG Shaoping, et al. Study on slag discharge characteristics of slurry shield circulating pipeline in pebble stratum [J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(Suppl.1):171-177.
- [12] CUI J, FANG Y, XU G Y, et al. Transportation performance of large-sized pebbles in slurry circulation system: a laboratory study [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(11):10519-10539.
- [13] BINGHAM E C. An investigation of the laws of plastic flow[J]. *Bulletin of the Bureau of Standards*, 1916, 13(2):309.
- [14] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1990:269-289.
- [15] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Géotechnique*, 1979, 29(1):47-65.
- [16] ERGUN S. Fluid flow through packed columns [J]. *Engineering Chemistry Materials Science*, 1952, 48:89-94.
- [17] 谢永辉.砂卵石力学参数确定方法研究[D].成都:西南石油大学, 2017, 29(1):23-65.  
XIE Yonghui. Study on determination method of mechanical parameters of sandy pebble [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017, 29(1):23-65.
- [18] ALOBAID F, BARAKI N, EPPLER B. Investigation into improving the efficiency and accuracy of CFD/DEM simulations[J]. *Particuology*, 2014, 16:41-53.
- [19] TSUJI Y, KAWAGUCHI T, TANAKA T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 1993, 77(1):79-87.

(编辑:宋艳)