基于ANSYS-FLUENT的云南某锡矿尾砂料浆管输状态数值模拟研究*

廉柏栋，乔登攀，杨天雨，王俊，李勇明，郑聪，高博，龙赣

（昆明理工大学 国土资源工程学院， 云南 昆明 650093）

摘要：尾砂料浆从选矿厂向充填制备站的管输过程中，改变进料参数会使管道内的尾砂固体颗粒空间分布发生变化，进而影响料浆管输的安全性与稳定性。以云南某锡矿选矿厂向充填制备站进行管道输送的硫化矿尾砂为研究对象，通过流变试验获得尾砂料浆的流变参数，采用ANSYS-FLUENT数值模拟软件对尾矿料浆管输进行模拟计算与结果分析，并对底床层相对高度与进料参数的关系进行拟合，建立了底床层相对高度与进料速度及体积浓度的三维关系模型。结果表明：底床层相对高度与进料速度及体积浓度的三维关系模型拟合效果良好；大部分+120目的较粗颗粒在底床层中有沉淤现象，120～200目之间的细颗粒在进料速度为1 m/s时，部分在管道底部有沉淤现象，在进料速度为2 m/s以上时分布于载体层中，-200目的更细颗粒均分布于载体层中；管道顶壁边界层中存在水以及部分极细颗粒与水形成的稀浆，共同形成边界层；尾砂料浆沿径向的体积浓度变化可分为4个区域，在管道底壁至载体-底床分界面处存在梯度递减效应，在载体-底床分界面至料浆径向体积浓度稳定不变处逐渐升高至稳定，在径向体积浓度稳定不变区达到最大值后保持稳定，径向体积浓度稳定不变处至管道顶壁处逐渐降低。

关键词：尾砂料浆；管道输送；底床层；载体层；数值模拟

中图分类号：TD853.34 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)01-0085-10

Numerical Simulation Study on Pipeline Transportation State of Tailings Slurry in a Tin Mine in Yunnan Based on ANSYS-FLUENT

LIAN Baidong, QIAO Dengpan, YANG Tianyu, WANG Jun, LI Yongming, ZHENG Cong, GAO Bo, LONG Gan

(Faculty of land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: In the process of pipeline transportation of tailings slurry from beneficiation plant to filling preparation station, changing the feed parameters will change the spatial distribution of tailings solid particles in the pipeline, which will affect the safety and stability of slurry pipeline transportation. Taking the sulfide ore tailings transported by pipeline from a tin ore beneficiation plant in Yunnan to filling preparation station as the research object, the rheological parameters of the tailings slurry were obtained by rheological test. The ANSYS-FLUENT numerical simulation software was used to simulate and analyze the pipeline transportation of the tailings slurry. The relationship between the relative height of the bottom bed layer and the feed parameters was fitted, and a three-dimensional relationship model between the relative height of the bottom bed layer and the feed speed and volume concentration was established. The results show that the three-dimensional relationship model between the relative height of the bottom bed layer and the feed speed and volume concentration has a good fitting effect. Most of the coarse particles with a size of +120 mesh have sedimentation in the bottom bed layer. Some of the fine particles with 120-200 mesh have sedimentation at the bottom bed layer of the pipeline when the feed speed is 1 m/s, and distributed in the carrier layer when the feed speed is above 2 m/s. More fine particles of -200 mesh are distributed in the carrier layer. There is water in the boundary layer of the top wall of the pipeline and the slurry formed by some very fine particles and water, which together form the boundary layer. The change of volume concentration of tailings slurry along the radial direction can be divided into four regions. There is a gradient decreasing effect from the bottom wall of the pipeline to the carrier-bottom bed interface,

* **收稿日期**：2024-02-23

基金项目：云南省基础研究专项青年项目(202301AU070185，202101AU070022)；昆明理工大学人培基金项目(KKZ3202021040)

作者简介：廉柏栋(1995—)，男，河南洛阳人，硕士研究生，主要从事现代采矿理论与技术研究。E-mail：1012255148@qq.com

通信作者：乔登攀(1969—)，男，甘肃白银人，博士，教授，博士生导师，主要从事现代采矿工艺及理论研究。E-mail：1215550723@qq.com

it gradually increases to stability from the carrier-bottom bed interface to the stable radial volume concentration of the slurry. It remains stable after reaching the maximum value in the stable constant region of radial volume concentration, the radial volume concentration gradually decreases from the stable point to the top wall of the pipe.

Key words: Tailings slurry, Pipeline transportation, Bottom bed layer, Carrier layer, Numerical simulation

0 引言

尾砂料浆是由选矿厂产生的尾砂固体颗粒与水形成的固-液两相混合物,尾砂料浆管道输送是地下采空区顺利进行充填作业的重要环节[1-2]。为确保安全稳定地料浆管输,需要合理设置尾砂料浆的进料参数,使管输阻力损失与成本最小化。目前,对尾砂料浆管道输送的研究主要采用理论计算[3-4]、数值模拟[5-6]和室内环形管道模拟试验[7-11]等方法。其中,理论计算较为繁琐复杂,室内环形管道模拟试验成本高、误差大,数值模拟方法因其建模和参数设置的便利性、准确性以及可视化的特点受到广泛青睐。针对固-液两相混合物管道输送研究,常用的数值模拟软件有 ANSYS-FLUENT、EDEM 和 PFC 等,通过在软件中设定尾砂固体颗粒物理参数以及料浆的流变参数等,设置不同进料速度与浓度条件,模拟尾砂料浆的管道输送,深入了解尾砂颗粒在不同进料参数下的分布规律。郝宇鑫等[12]利用 CRT 流变仪对充填料浆进行了流变参数测试,运用流体力学及粒状物料水力学等方法分析了矸石颗粒在似膏体料浆中的受力情况,结合 FLUENT 软件进行数值模拟,发现矸石颗粒的粒径和浓度均对管输临界流速产生影响。刘振等[13]通过流变试验和环管试验研究了三山岛金矿高浓度充填料浆的流动特性和管输阻力,认为随着料浆质量浓度的增加,料浆屈服应力、塑性黏度和流动阻力显著增大,导致输送倍线减小,当灰砂比为 1∶4、料浆质量浓度为 76%、流速约为 1.5 m/s 时,管道压力损失最大。侯永强等[14]通过尾矿膏体流变试验和坍落度试验,发现料浆的屈服应力和塑性黏度均与浓度成正相关,屈服应力与料浆浓度的关系为二次函数递增曲线,塑性黏度与料浆浓度的关系为指数函数曲线,并建立了基于料浆浓度的管道输送阻力计算模型。杨天雨等[15]基于数值模拟方法研究了废石-风砂的高浓度充填料浆进行自流输送的管道输送特性,发现充填料浆沿管径方向有明显的速度梯度,料浆质量浓度对管输阻力的影响非常大。刘志双等[16]认为充填管道内料浆的流态影响了管输阻力特性,采用 SWAMEE 修正方法得出过渡流速与实测回归值的相对误差较小,仅为 0.9%~6.4%。

以上学者采用了理论计算、数值模拟和环管试验等方法研究了尾砂料浆管道输送的状态和规律。然而,这些研究多采用不同物料组成的混合充填料浆,在高浓度下接近均质流体,并呈现出结构流的特性。在实际生产中,选矿厂向充填制备站输送的尾砂料浆为尾砂固体颗粒与水形成的固-液两相混合物,在不同的进料速度和浓度条件下呈现出均质流体、非均质流体或两种特征兼具的流态。在 20 世纪下叶,一些国外研究人员提出,固-液两相混合料浆在管道输送中可分为液相载体层和固相底床层,这两部分具有不同的运动状态和阻力计算方法。目前对于尾砂料浆管输过程中载体层和底床层的深入研究较少,费祥俊等[17]于 2015 年提出了一种判别矿浆稳定性的标准,即当管道内矿浆非均匀指数小于 0.01 时,矿浆近似于均质流;管道内煤浆非均匀指数小于 0.034 时,煤浆近似于非均质流。此外,针对细颗粒含量较高的尾砂料浆管输情况的研究也十分匮乏。

本文基于数值模拟方法,利用 ANSYS-FLUENT 软件进行了管输过程的模拟计算,对模拟结果及相关影响因素进行了深入分析,最终得出了云南某锡矿尾砂料浆管输状态及尾砂颗粒在管道中的分布规律,并建立了底床层相对高度与进料速度及体积浓度之间的关系模型。研究结果对尾砂料浆管道输送的理论和实践具有一定的指导意义,对于充填骨料中细颗粒含量较高的充填矿山具有推广应用的价值。

1 流变试验

1.1 试验材料

流变试验材料采用云南某锡矿选矿厂排放的硫化矿尾砂。尾砂的颗粒密度为 3 093 kg/m^3,松散密度为 1 335 kg/m^3,堆积密实度为 43.2%,孔隙率为 56.8%。尾砂的颗粒级配共分为<25 μm、25~38.5 μm、38.5~50 μm、50~75 μm、75~125 μm、125~250 μm、>250 μm 共 7 个粒级,各粒级对应

占比分别为 44.56%、8.18%、3.83%、11.22%、8.23%、16.57%,7.41%。可以看出,500 目以下的尾砂占比高达 44.56%,接近超细尾砂范畴(小于 20 μm),超细尾砂的自然沉降速度缓慢[18]。经化学成分的测定,硫化矿尾砂中的活性物质含量均较少,因此,尾砂料浆在管道输送过程中受化学特性的影响较小。

1.2 试验方法

流变试验采用了 RheoCAD500 型混凝土流变仪进行硫化矿尾砂料浆流变参数的测定。试验采用直接法,并选用专家方案和 1# 双螺旋转子进行剪切应力、剪切速率等流变参数的测定,采用斜坡加载方式,加载程序设置转速从 20 r/min 逐渐增加至 200 r/min,加载时间为 250 s,每隔 1 s 记录一个数据点,每 5 个数据点取平均值,共得到 50 个转速点的数据。

2 数值模拟基本原理

使用 ANSYS-FLUENT 软件进行尾砂料浆管道输送数值模拟时,考虑到实际料浆特性与数值模拟中的固-液两相混合物模型的关系,需要做出一系列基本假设,包括流体质点、连续介质、不可压缩流体、固体颗粒球体和恒温等。ANSYS-FLUENT 基于有限体积法,相比于有限单元法与有限差分法,具有控制方程对任意控制体积均遵循质量、动量和能量守恒定律的优点,适用于尾砂料浆流态的模拟。根据管道中尾砂颗粒的粒径与分布的复杂性,模拟设置为最适合的 Mixture(混合)模型和 Realizable(可实现的)k-ε 紊流模型。

2.1 尾砂料浆的连续性方程

在尾砂料浆管道输送过程中,其流体质点遵循如式(1)所示的连续性方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho v)=0 \tag{1}$$

式中:ρ 为尾砂料浆的密度,kg/m^3;t 为时间,s;∇为哈密顿算子;v 为管内尾砂料浆的平均速度,m/s。

2.2 尾砂料浆的动量方程

尾砂料浆的连续性方程主要体现料浆流动的质量守恒及运动学规律,还需要遵循如式(2) 所示的动量方程。

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\nabla(\rho v)=-\nabla p+\nabla[\mu(\nabla v+\nabla v^{\mathrm{T}})]+\rho v+F_x+F_y+F_z-\nabla\Big(\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\rho_i v_i v_{dr,i}\Big) \tag{2}$$

式中:p 为流体质点受到的面力合力,Pa;μ 为尾砂料浆的塑性黏度,Pa·s;v^{T} 为各相间的相对滑移产生的滑移速度,m/s;F_x、F_y、F_z 为沿 x、y、z 轴的三向面力分量,Pa;α_i 为各相的体积分数,%;ρ_i 为各相的密度,kg/m^3;v_i 为各相的平均速度,m/s;$v_{dr,i}$ 为次级相的滑移速度,m/s。

2.3 尾砂料浆的能量方程

根据前文提到的不可压缩和恒温假设,尾砂料浆需遵循如式(3) 所示的能量方程。

$$\frac{\partial}{\partial t}\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\rho_i W_i+\nabla\sum_{i=1}^{n}\alpha_i v_i(\rho_i W_i+p)=W_{\circ} \tag{3}$$

式中:W_i 为各相在某一位置的总能量,J;$W_{\circ}$ 为其他形式的能量,J。

2.4 紊流模型

在尾砂料浆的 Realizable k-ε 紊流模型中,紊流脉动动能 k 与耗散率 ε 的控制方程如式(4)、式(5)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\nabla(\rho k v)=\nabla\left[\left(v+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon+Y_c \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\nabla(\rho\varepsilon v)=\nabla\left[\left(v+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right]+\frac{\varepsilon}{k}(G_{\varepsilon1}G_k-G_{\varepsilon2}\rho\varepsilon+G_{\varepsilon1}G_{\varepsilon3}G_b) \tag{5}$$

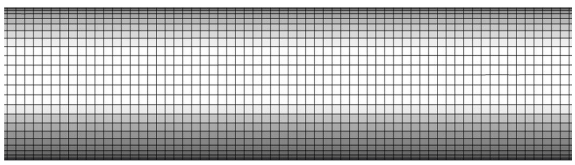
式中:k 为紊流脉动动能,J;μ_t 为紊流黏度,Pa·s;σ_k 为 k 方程的普朗特数;G_k 为料浆平均速度梯度引起紊流脉动动能的产生项,J;G_b 为料浆中的浮力引起的紊流脉动动能的产生项,J;ε 为紊流耗散率,%;Y_c 为紊流脉动动能的扩张贡献,J;σ_ε 为 ε 方程的普朗特数;$G_{\varepsilon1}$、$G_{\varepsilon2}$、$G_{\varepsilon3}$ 为经验常数。

3 管道模型建立与数值模拟设置

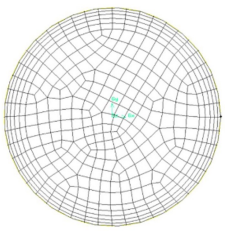
3.1 模型创建与网格划分

根据云南某锡矿选矿厂至充填制备站的实际管道参数,结合建模软件的特点,采用 Workbench 19.0 软件的 SpaceClaim 模块建立了管径为 0.2 m、长度为 100 m 的几何模型,然后利用 Meshing 模块对几何模型进行网格划分,并针对尾砂料浆管道输送的

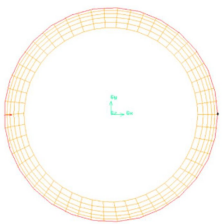
实际情况,设置了边界层网格。管道模型网格如图1所示,包含2 333 430个网格单元和2 578 635个节点,经检验得出网格质量良好。



(a)水平管道模型网格



(b)进料入口断面网格



(c)进料入口断面边界层网格

图1　管道模型网格

Fig.1　Pipeline model grid

3.2　边界条件

尾砂料浆输送管道的进料口断面位置设定为速度入口,出料口断面位置则设定为自由出口。在数值模拟环境中,操作压力设定为标准大气压(101.325 kPa),重力加速度设定为沿 y 轴的竖直方向(-9.8 m/s^2),操作密度设定为空气密度(1.225 kg/m^3)。

3.3　数值模拟方案

数值模拟的对象为云南某锡矿硫化矿尾砂料浆,针对不同进料质量浓度(10%、20%、30%、40%、50%)和进料速度(1 m/s、2 m/s、3 m/s、4 m/s、5 m/s),设定了25个方案进行模拟。在模拟设置中,所需的物理力学与流变参数均采用流变试验结果。数值模拟方案见表1。

表1　数值模拟方案及参数

Table 1　Numerical simulation scheme and parameters

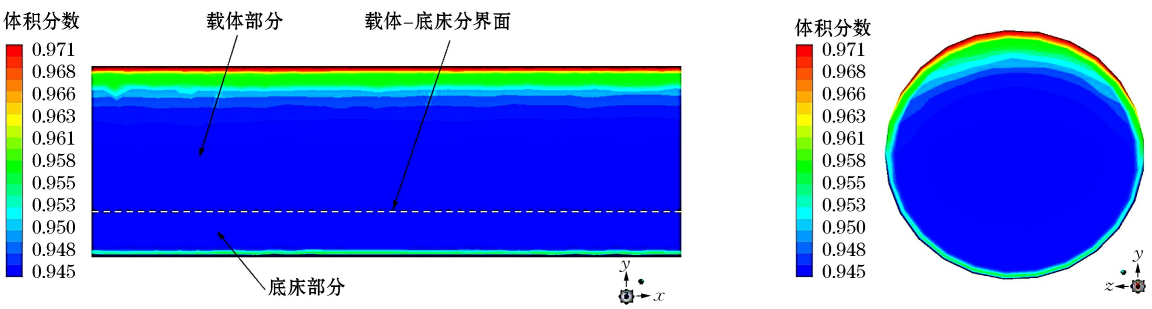
方案编号	进料质量浓度/%	进料体积浓度/%	进料速度/(m·s^{-1})	塑性黏度/(Pa·s)	屈服应力/Pa
A1～A5	10	3.47	1,2,3,4,5	0.006 77	0.077 82
B1～B5	20	7.48	1,2,3,4,5	0.010 97	0.179 66
C1～C5	30	12.17	1,2,3,4,5	0.014 43	0.297 17
D1～D5	40	17.73	1,2,3,4,5	0.017 93	0.325 45
E1～E5	50	24.43	1,2,3,4,5	0.023 47	0.737 24

4　尾砂料浆管输状态数值模拟结果分析

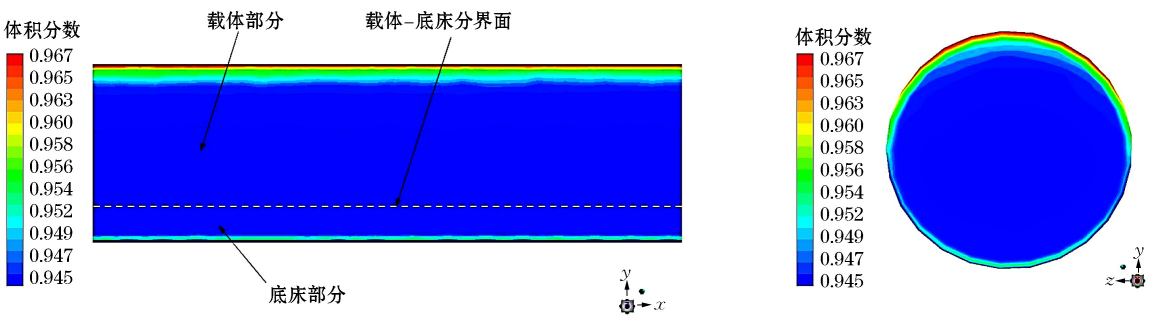
4.1　载体-底床分界面判定

较细的尾砂颗粒在一定的管输流速下悬浮在管道上部的水中,并进行悬移运动,与水共同形成液相载体层,这些颗粒从水的紊流作用中获得动能,导致颗粒基本与水等速流动。较粗的尾砂颗粒则在管道下部进行推移运动,形成固相底床层,由于颗粒受到颗粒间离散力的影响,导致其流速低于载体层流速。

鉴于篇幅有限,本文仅列出了C1至C5方案下数值模拟结果中尾砂料浆的水相体积分数云图,如图2所示。



(a)进料速度1 m/s



(b)进料速度2 m/s

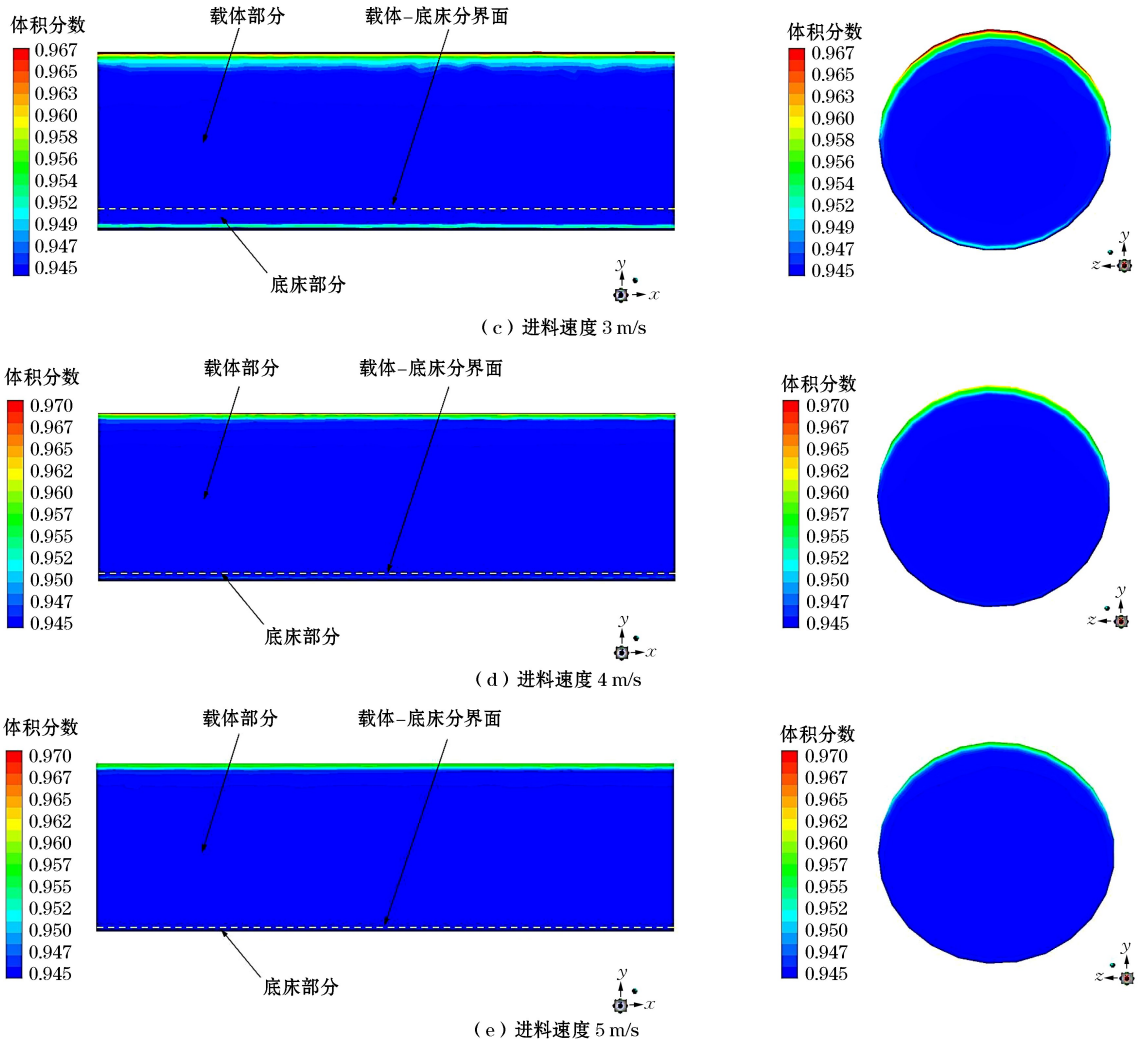


图 2 进料体积浓度为 12.17%时各进料速度下的尾砂料浆水相体积分数云图

Fig.2 Cloud maps of water phase volume fraction of tailings slurry at various feed speeds when the feed volume concentration is 12.17%

根据图 2 中底床层相对高度(底床层高度 h 与管径 D 的比值,体现为图中的分界线)的位置可以观察到,随着进料速度的增加,底床层相对高度呈现逐渐减小的趋势。底床层摩阻损失是由于进行推移运动的固体颗粒受颗粒间离散力而造成的,尽管底床层相对高度不大,但底床层摩阻损失占整体摩阻损失的比例较大,因此载体-底床分界面的判定(即底床层相对高度的变化规律)对管输摩阻损失的计算十分重要。

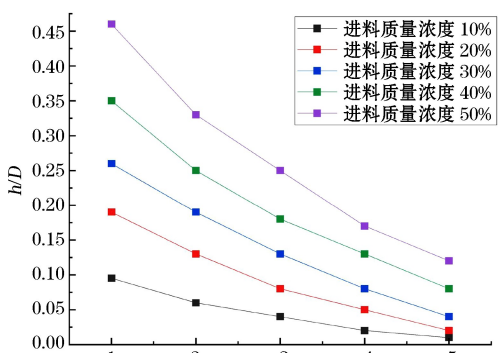
4.2 底床层相对高度与进料速度及体积浓度的关系

4.2.1 底床层相对高度与进料速度的关系

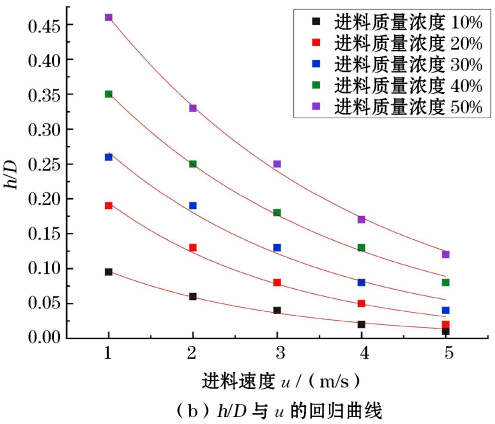
根据数值模拟结果绘制底床层相对高度与进料速度的关系折线,如图 3(a)所示。由图 3(a)可知,底床层相对高度随进料速度的增大呈现下降趋势,该关系近似指数函数模型。因此使用式(6)对底床层相对高度与进料速度之间的关系进行拟合,绘制的回归曲线如图 3(b)所示,回归方程见表 2。

$$h/D = A \cdot \exp(Bu) \tag{6}$$

式中:A、B 为拟合参数;u 为进料速度,m/s。



(a) h/D 与 u 的关系折线



(b) h/D 与 u 的回归曲线

图 3 底床层相对高度与进料速度的关系

Fig.3 The relationship between the relative height of the bottom layer and the feed speed

表 2 底床层相对高度与进料速度关系的回归方程

Table 2 Regression equation for the relationship between the relative height of the bottom layer and the feed speed

进料质量浓度/%	底床层相对高度 h/D 与进料速度 u 关系的回归方程	R^2
10	$h/D=0.156\ 66\exp(-0.488\ 81u)$	0.992 43
20	$h/D=0.306\ 57\exp(-0.457\ 72u)$	0.989 08
30	$h/D=0.395\ 51\exp(-0.393\ 52u)$	0.985 08
40	$h/D=0.496\ 05\exp(-0.344\ 07u)$	0.997 45
50	$h/D=0.639\ 00\exp(-0.326\ 57u)$	0.998 04

分析拟合后的回归方程发现,所有 R^2 均高于 0.95,表明采用指数函数模型进行拟合得到的结果具有较高的准确性。回归曲线的分析表明,随着进料速度的增加,进入载体层中进行悬移运动的固体颗粒含量增加,同时底床层中的固体颗粒含量减少,从而导致底床层相对高度减小。

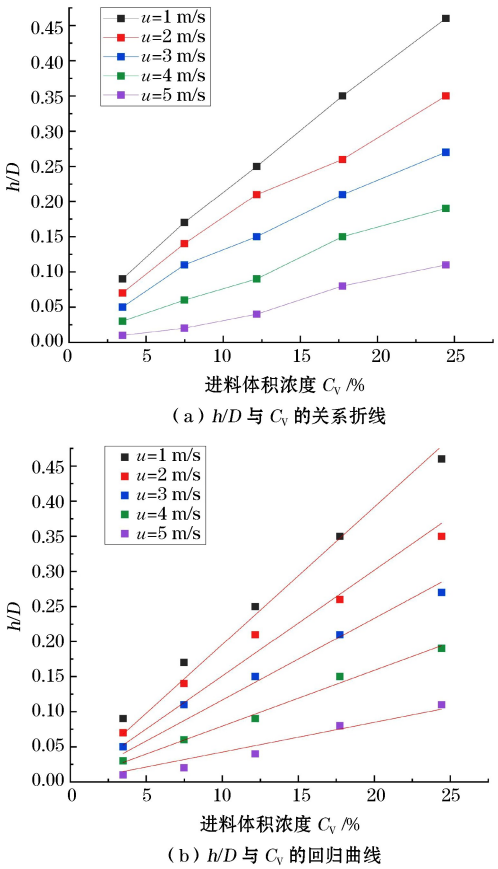
4.2.2 底床层相对高度与进料体积浓度的关系

根据数值模拟结果绘制底床层相对高度与进料体积浓度的关系折线,如图 4(a)所示。由图 4(a)可知,底床层相对高度随进料体积浓度的增加呈现上升趋势,当进料体积浓度为 0 时,底床层不存在,即纵轴截距为 0,该关系近似正比例函数模型。因此,使用式(7)对底床层相对高度与进料体积浓度之间的关系进行拟合,绘制的回归曲线如图 4(b)所示,回归方程见表 3。

$$h/D=C\cdot C_V \tag{7}$$

式中:C 为拟合参数;C_V 为进料体积浓度,%。

分析拟合后的回归方程发现,所有 R^2 均高于 0.95,表明采用正比例函数模型进行拟合得到的结果具有较高的准确性。回归曲线的分析结果表明,随着进料体积浓度的增加,管道中进入底床层进行推移运动的固体颗粒含量增加,同时载体层中的固体颗粒含量减少,从而导致底床层相对高度抬升。



(a) h/D 与 C_V 的关系折线

(b) h/D 与 C_V 的回归曲线

图 4 底床层相对高度与进料体积浓度的关系

Fig.4 The relationship between the relative height of the bottom layer and the feed volume concentration

表 3 底床层相对高度与进料体积浓度关系的回归方程

Table 3 Regression equation for the relationship between the relative height of the bottom layer and the feed volume concentration

进料速度/(m/s)	底床层相对高度 h/D 与进料体积浓度 C_V 关系的回归方程	R^2
1	$h/D=1.957\ 67C_V$	0.982 06
2	$h/D=1.508\ 50C_V$	0.953 77
3	$h/D=1.165\ 67C_V$	0.968 96
4	$h/D=0.793\ 85C_V$	0.991 17
5	$h/D=0.423\ 73C_V$	0.959 43

4.2.3 底床层相对高度与进料速度及体积浓度的三维关系

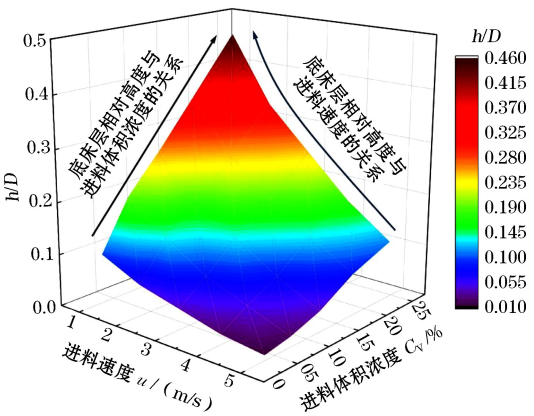
在实际尾砂料浆的管道输送中,给定的进料速度和体积浓度并非固定数值,因此需要建立底床层相对高度与进料速度及体积浓度的三维关系模型,以便在给定任意进料速度和体积浓度时,能够准确

得到对应的底床层相对高度。根据数值模拟结果，绘制了底床层相对高度与进料速度及体积浓度的三维关系曲面，如图 5(a)所示。根据曲面的变化趋势，结合底床层相对高度与进料速度及体积浓度的拟合模型，得到了如式(8)所示的三维关系曲面方程的拟合模型，绘制三维关系回归曲面如图 5(b)所示，拟合的三维关系回归方程见式(9)。

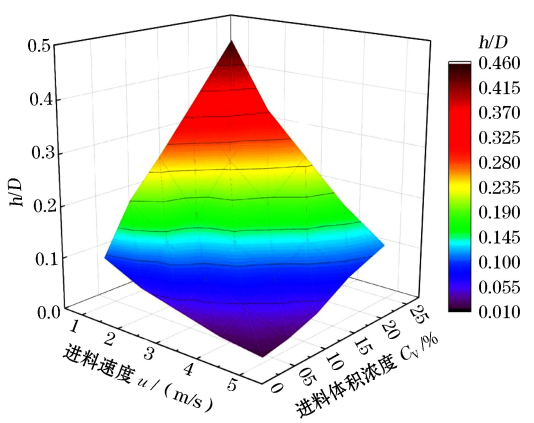
$$h/D=E\cdot\exp(Fu)\cdot C_V \tag{8}$$

式中，E、F 为拟合参数。

$$h/D=2.840\ 21\exp(-0.355\ 02u)C_V \tag{9}$$



(a) h/D 与 u 及 C_V 的关系曲面



(b) h/D 与 u 及 C_V 的回归曲面

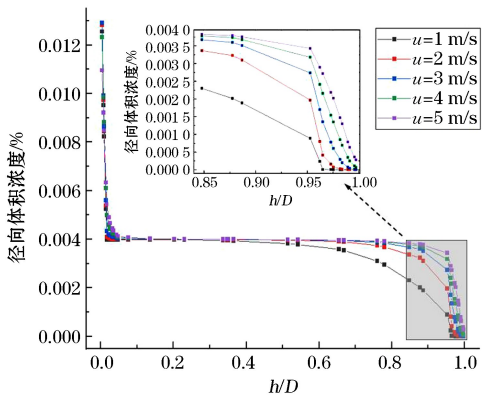
图 5　底床层相对高度与进料速度及体积浓度的三维关系

Fig.5　The three-dimensional relationship between the relative height of the bottom layer and the feed speed and volume concentration

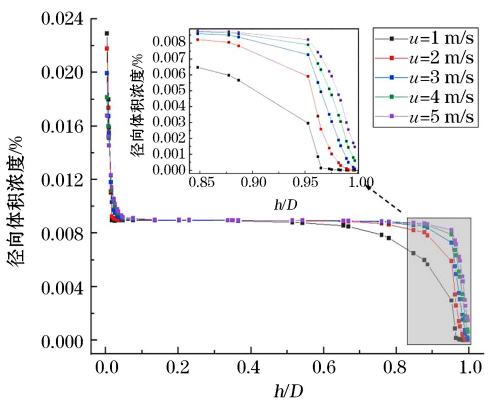
分析拟合后的回归方程发现，R^2 为 0.982 49，高于 0.95，表明采用三维关系模型进行拟合得到的结果具有较高的准确性。回归曲面的分析表明，在给定任意进料速度和体积浓度时，可以获得唯一对应的底床层相对高度值。这一结果为实际尾砂料浆管道输送中载体-底床分界面的判定以及两层的摩阻损失计算提供了依据，具有一定的普适性。

4.3　管道中尾砂颗粒的径向粒径分布规律

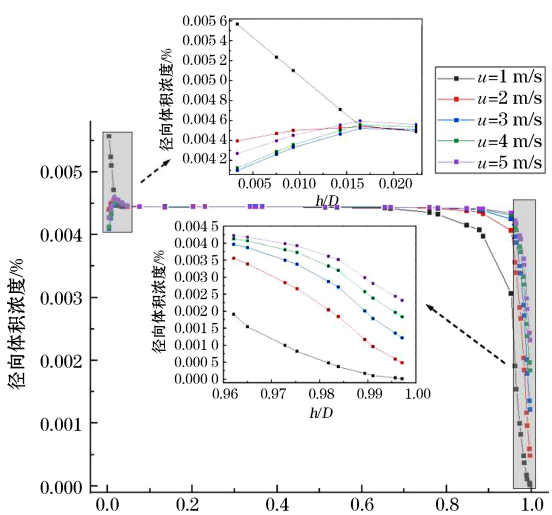
根据数值模拟结果进一步分析，发现在不同的进料体积浓度下，各级颗粒的径向体积浓度随着进料速度的变化规律相似，为深入了解这种趋势，以进料质量浓度为 30%为例，绘制了 C1 至 C5 方案的各级颗粒径向体积浓度与进料速度之间的关系折线，如图 6 所示。



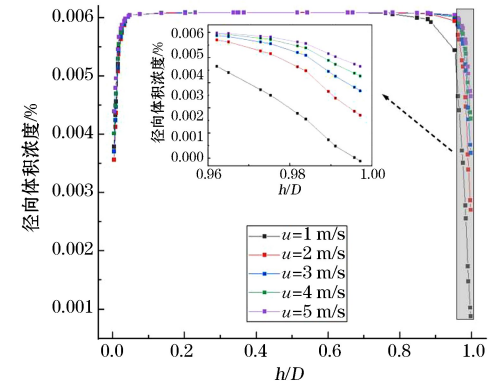
(a) +60 目



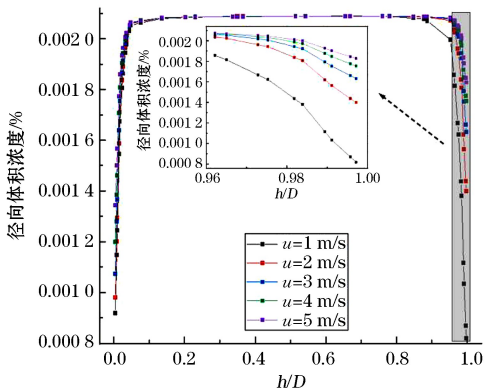
(b) 60~120 目



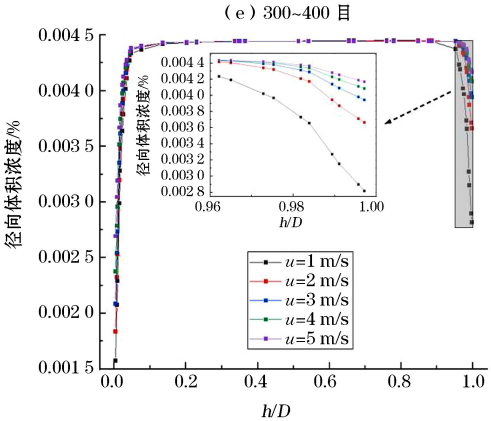
(c) 120~200 目



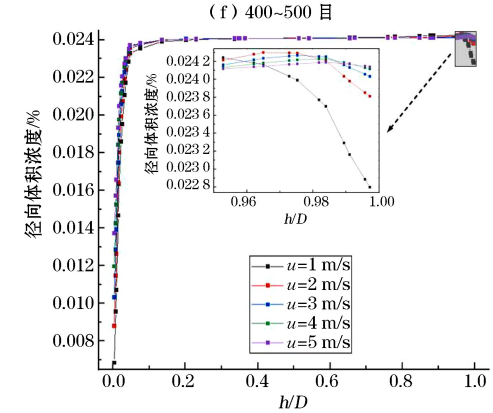
(d) 200~300 目



(e) 300~400 目



(f) 400~500 目



(g) -500 目

图 6 各级颗粒径向体积浓度与相对高度的关系

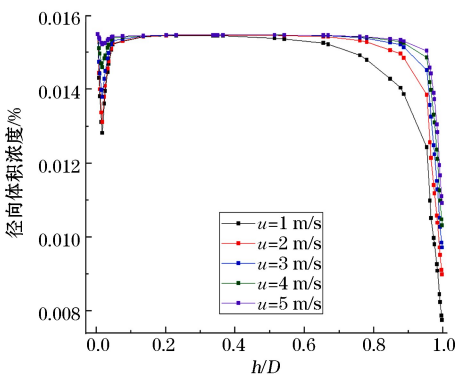
Fig.6 The relationship between radial volume concentration and relative height of particles at each levels

分析图 6(a)和图 6(b)可以得出,+120 目的颗粒较粗,导致大部分颗粒淤在管道下部底床层中。分析图 6(c)可以得出,120~200 目之间的细颗粒受进料速度变化的影响显著,当进料速度为 1 m/s 时,大部分颗粒仍然在管道底床层中;当进料速度超过 2 m/s 时,大部分颗粒已脱离底床层,进入载体层并进行悬移运动。分析图 6(d)至图 6(g)可以得出,-200目的颗粒更细,导致大部分颗粒在管道载体层中。另外从图 6(g)可以看出,在管道顶壁区域中,部分极细颗粒仍具有较高的体积浓度,表明管道顶壁边界层中不仅有水的存在,还存在部分极细颗粒与水形成的稀浆,共同形成了边界层。

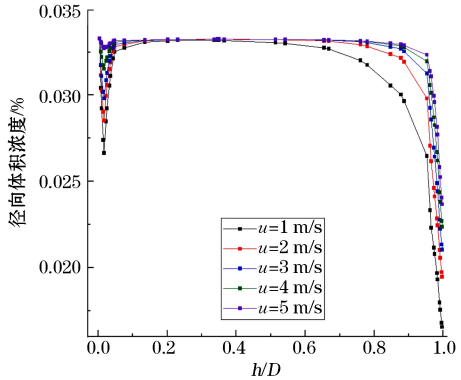
4.4 管道中尾砂料浆的径向体积浓度分布规律

根据数值模拟结果显示,在不同的进料速度下,尾砂料浆的径向体积浓度呈现出不同的变化趋势。因此绘制了不同进料质量浓度下尾砂料浆径向体积浓度与进料速度的关系折线,如图 7 所示。

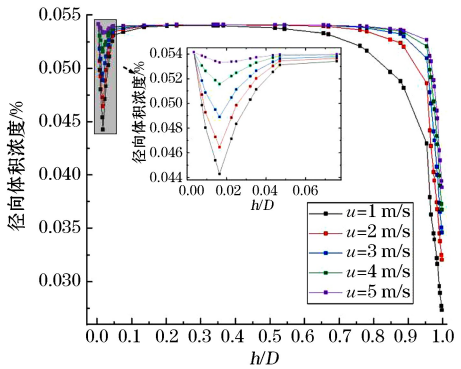
分析图 7(a)至图 7(e)可以得出,在不同进料质量浓度下,尾砂料浆的径向体积浓度随相对高度的变化趋势基本一致。从图 7(d)可以看出,尾砂料浆的径向体积浓度变化可划分为 4 个区域。在 a 区域,即管道底壁至载体-底床分界面处,底床层的存在限制了尾砂颗粒的自由移动,导致径向体积浓度降低,从而减缓了料浆流动。从图 7(c)的局部放大图中可以观察到,随着进料速度的增加,底床层对流动的阻碍作用呈梯度递减趋势。在 b 区域,即载体-底床分界面至料浆径向体积浓度稳定不变处,随着相对高度的增加,尾砂颗粒受到管道中心最大流速的影响,发生了分散现象。在 c 区域,即径向体积浓度稳定不变区,料浆在这一区域的流动稳定性较好。在 d 区域,即径向体积浓度稳定不变处至管道顶壁处,由于重力作用,粗颗粒含量降低,导致料浆径向体积浓度降低。



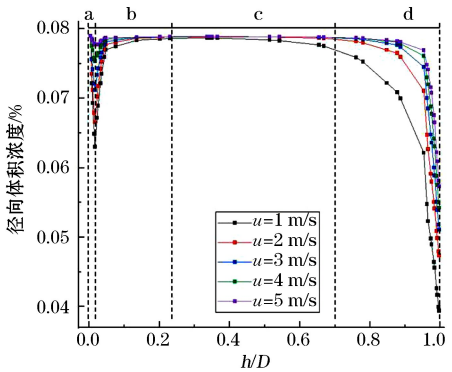
(a) 进料质量浓度 10%



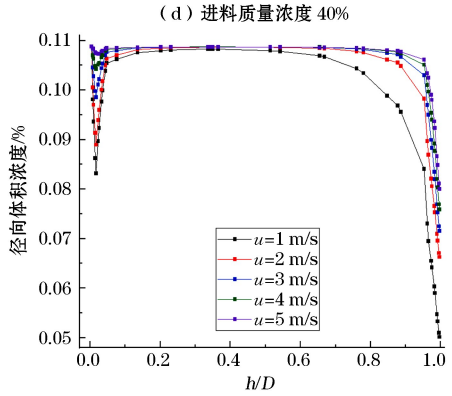
(b) 进料质量浓度 20%



(c) 进料质量浓度 30%



(d) 进料质量浓度 40%



(e) 进料质量浓度 50%

图 7　各质量浓度下尾砂料浆径向体积浓度与相对高度的关系

Fig.7　The relationship between radial volume concentration and relative height of tailings slurry under different mass concentrations

5　结论

(1) 分别构建了底床层相对高度与进料速度及体积浓度的关系模型，以及底床层相对高度与进料速度及体积浓度的三维关系模型，模型拟合效果均较好。其中，三维关系模型可为实际尾砂料浆管输过程提供有益指导，具有一定的普适性。

(2) 分析了各级颗粒径向体积浓度与进料速度的关系，结果表明，大部分+120 目的较粗颗粒淤在管道下部底床层中；120～200 目之间的细颗粒在进料速度为 1 m/s 时，部分在管道底部有沉淤现象，在进料速度为 2 m/s 以上时分布于载体层中；-200 目的更细颗粒均分布于载体层中。管道顶壁边界层中不仅有水的存在，还存在部分极细颗粒与水形成的稀浆，共同形成了边界层。

(3) 分析了不同进料质量浓度下尾砂料浆径向体积浓度与进料速度的关系，结果表明，尾砂料浆径向体积浓度变化共分 4 个区域。在管道底壁至载体-底床分界面处，径向体积浓度降低，且存在梯度递减效应；在载体-底床分界面至料浆径向体积浓度稳定不变处，尾砂颗粒逐渐发生分散；在径向体积浓度稳定不变区，料浆流动稳定性较好；在径向体积浓度稳定不变处至管道顶壁处，径向体积浓度降低。

参考文献(References)：

[1] 郭利杰，刘光生，马青海，等.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J].煤炭学报，2022，47(12)：4182-4200.
GUO Lijie，LIU Guangsheng，MA Qinghai，et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J]. Journal of China Coal Society，2022，47(12)：4182-4200.

[2] 程海勇，吴爱祥，吴顺川，等.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报，2022，44(1)：11-25.
CHENG Haiyong，WU Aixiang，WU Shunchuan，et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering，2022，44(1)：11-25.

[3] 常英杰，吴爱祥，阮竹恩，等.含粗骨料膏体输送管道磨损机理及参数优化[J].中南大学学报(自然科学版)，2024，55(1)：307-316.
CHANG Yingjie，WU Aixiang，RUAN Zhuen，et al. Wear mechanism and parameters optimization of coarse aggregate containing paste transport pipes[J]. Journal of Central South University(Science and Technology)，2024，55(1)：307-316.

[4] 于永纯，汪海峰，张增庆，等.金厂河多金属矿充填料浆长距离反坡输送研究[J].有色金属(矿山部分)，2022，74(4)：52-56.

YU Yongchun, WANG Haifeng, ZHANG Zengqing, et al. Study on long-distance reverse slope transportation of filling slurry in Jinchanghe polymetallic mine [J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2022,74(4):52-56.

[5] 文虎,黄剑,赵炬,等.基于 FLUENT 的气化灰渣灌浆输送特性模拟[J].煤炭技术,2023,42(9):119-124.
WEN Hu, HUANG Jian, ZHAO Ju, et al. Simulation of gasification ash grouting transport characteristics based on FLUENT[J]. Coal Technology,2023,42(9):119-124.

[6] 王春龙,程力.基于 FLUENT 的三山岛金矿深部通风降温系统数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2022,42(2):129-134.
WANG Chunlong, CHENG Li. Numerical simulation of deep ventilation and cooling system in Sanshandao Gold Mine based on FLUENT [J]. Mining Research and Development,2022,42(2):129-134.

[7] 刘伟涛,王莹莹,王国立.基于小型环管试验的膏体管道输送阻力特性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(9):12-16.
LIU Weitao, WANG Yingying, WANG Guoli. Study on resistance characteristics of paste pipeline transportation based on small-seale loop pipe test[J]. Mining Research and Development,2023,43(9):12-16.

[8] 杨鑫,郑伯坤,邓高岭,等.基于环管试验的尾矿水力输送性能研究[J].矿业研究与开发,2023,43(1):26-31.
YANG Xin, ZHENG Bokun, DENG Gaoling, et al. Study on hydraulic transportation properties of tailings based on loop pipe test[J]. Mining Research and Development,2023,43(1):26-31.

[9] 王勇,那庆,吴爱祥,等.粉煤灰-炉渣浆体环管实验和理论计算阻力对比研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(6):2234-2244.
WANG Yong, NA Qing, WU Aiiang, et al. Comparison of resistance between pipe loop test and theoretical calculations in fly ash-slag slurry[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(6):2234-2244.

[10] 杨晓炳,闫泽鹏,尹升华,等.基于环管试验的粗骨料膏体管输阻力模型及优化[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(5):181-191.
YANG Xiaobing, YAN Zepeng, YIN Shenghua, et al. Transportation pressure model and optimization of coarse aggregate paste backfill based on pipe loop test[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2022,49(5):181-191.

[11] 王洪江,王小林,寇云鹏,等.全尾砂高浓度胶结充填的环管试验[J].工程科学学报,2021,43(2):215-222.
WANG Hongjiang, WANG Xiaolin, KOU Yunpeng, et al. Loop test study on the high-concentration cemented filling of full tailings [J]. Chinese Journal of Engineering,2021,43(2):215-222.

[12] 郝宇鑫,黄玉诚,李育松,等.矸石似膏体充填料浆临界流速影响因素研究[J].煤炭工程,2022,54(4):128-133.
HAO Yuxin, HUANG Yucheng, LI Yusong, et al. Influencing factors of critical flow rate of gangue paste-like filler slurry[J]. Coal Engineering,2022,54(4):128-133.

[13] 刘振,李明,常宝孟,等.三山岛金矿高质量浓度充填料浆流动特性及管道阻力研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):125-129.
LIU Zhen, LI Ming, CHANG Baomeng, et al. Study on the flow characteristics and pipeline transport resistance of filling slurry with high mass concentration in Sanshandao Gold Mine[J]. Mining Research and Development,2022,42(3):125-129.

[14] 侯永强,尹升华,戴超群,等.尾矿膏体流变特性和管输阻力计算模型[J].中国有色金属学报,2021,31(2):510-519.
HOU Yongqiang, YIN Shenghua, DAI Chaoqun, et al. Rheological properties and pipeline resistance calculation model in tailings paste [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(2):510-519.

[15] 杨天雨,乔登攀,王俊,等.废石-风砂高浓度料浆管道输送数值模拟及管输阻力新模型[J].中国有色金属学报,2021,31(1):234-244.
YANG Tianyu, QIAO Dengpan, WANG Jun, et al. Numerical simulation and new model of pipeline transportation resistance of waste rock-aeolian sand high concentration slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(1): 234-244.

[16] 刘志双,郭利杰,史采星,等.高浓度充填料浆管道输送流态及其判别方法[J].中国矿业,2020,29(增刊 2):271-276.
LIU Zhishuang, GUO Lijie, SHI Caixing, et al. Study on flow regimes behavior and its assessing discrimination method of high-density backfill slurry [J]. China Mining Magazine,2020,29(Suppl.2):271-276.

[17] 费祥俊,马妍,韩文亮.固液两相非均质流管道输送稳定性评判标准的研究[J].水力采煤与管道运输,2014(3):1-3+12.
FEI Xiangjun, MA Yan, HAN Wenliang. Research on stability evaluation criteria for pipeline transportation of solid liquid heterogeneous flow[J]. Hydraulic Coal Mining & Pipeline Transportation,2014(3):1-3+12.

[18] 牛永辉,程海勇,吴顺川,等.动态剪切环境超细全尾砂絮凝沉降特性[J].有色金属工程,2022,12(8):139-148.
NIU Yonghui, CHENG Haiyong, WU Shunchuan, et al. Flocculation and sedimentation characteristics of ultra-fine full tailing sand in dynamic shear environment [J]. Nonferrous Metals Engineering,2022,12(8):139-148.