

某金矿细粒级尾砂的絮凝沉降特性及其充填料浆流动性能研究

刘国栋¹, 贾涛¹, 孙铭骏¹, 杨凯^{2,3*}

1. 山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿, 山东 莱州 261417;

2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 102628;

3. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628



摘要:针对某金矿现有充填工艺中充填质量波动大并严重影响采场安全与生产效率的问题,以细粒径尾砂体系作为研究对象,开展膏体充填工艺的系统优化。通过综合考察尾砂的物理化学特性、探究其絮凝沉降行为、分析料浆流变特性,并结合管道输送过程的数值模拟,最终确定了关键工艺参数的优化方案。研究表明:溢流细砂属于典型细粒级尾砂,在入料浓度为12%、絮凝剂添加量为30 g/t的优化条件下,结合带耙架高效沉降,底流浓度可提升至61.35%;细粒级复合尾砂充填料浆在输送过程中分布均匀,无分层离析现象,其流变行为适于采用Bingham模型进行描述。进一步分析表明,料浆质量浓度、入口流量和管道内径是影响流动性能的关键因素。本研究可为矿山泵站选型与管网设计提供理论依据,有助于增强充填系统的可靠性与稳定性,为矿山安全高效生产提供支撑。

关键词:细尾砂;絮凝沉降;充填料浆;流动特性;数值模拟;管道输送

中图分类号:TD982 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-1039-13 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.111

引用格式:刘国栋,贾涛,孙铭骏,等.某金矿细粒级尾砂的絮凝沉降特性及其充填料浆流动性能研究[J].黄金科学技术,2025,33(5):1039-1051. LIU Guodong, JIA Tao, SUN Mingjun, et al. Study on the Flocculant Sedimentation Characteristics of Fine-Grained Tailings and the Flow Performance of Backfill Slurry in a Gold Mine[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(5): 1039-1051.

近年来,随着矿产资源开采强度持续加大,与之伴生的安全与环境问题也日益凸显(刘立顺等,2020;Cacciuttolo et al, 2023;于洋等,2024)。尾砂是金属矿山生产过程中必然产生的副产物,对其进行有效利用既可缓解资源浪费问题,又能降低环境污染风险,助力绿色矿山建设目标的实现(杨天鸿等,2022;胡松涛等,2024;任锦荣等,2024)。然而,目前部分矿山采用的高浓度分级尾砂充填工艺存在充填浓度不足、采场脱水量大和充填体离析分层严重等问题,导致充填质量波动大,严重影响作业

安全与效率(贾住平等,2022;纪芳等,2023;朱久隆等,2024)。

在此背景下,膏体充填技术逐渐成为研究热点。膏体料浆具有不离析、不脱水和高凝结强度等优势,可显著改善充填体成型质量与强度(吴爱祥等,2018,2024;杨纪光等,2023)。膏体充填技术的关键在于尾砂体系的高效浓缩脱水与稳定流动输送能力,对尾砂的颗粒组成、絮凝性能与流变特性提出了更高要求。已有研究从尾砂沉降、脱水机理和浆体流动性等方面展开了系统探讨,揭示了全尾

收稿日期:2025-03-11;修订日期:2025-07-10

基金项目:国家重点研发计划项目“深井采选固废高效充填技术与大能力充填装备研发”(编号:2022YFC2904103)资助

作者简介:刘国栋(1988—),男,山东泰安人,工程师,从事采矿技术研究工作。E-mail:415159345@qq.com

*通信作者:杨凯(1997—),男,山西大同人,工程师,从事矿山充填技术与固废资源化利用方面的研究工作。E-mail:yangkai@bgrimm.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

砂体系的沉降特征和多因素作用机制(史采星等, 2021; 吴再海, 2022), 并指出深锥浓密设备可显著提升尾砂脱水效率, 其性能受结构参数和操作条件的综合影响(Yin et al, 2022; Wang et al, 2024)。针对细粒级尾砂, 相关研究明确了其颗粒分布特性及在沉降和分级过程中的响应规律, 为优化工艺提供了科学依据(杨晴等, 2022; 黎梦圆等, 2024)。浆体流动性作为充填系统稳定运行的核心控制因素, 与粒度、浓度及流变性能密切相关(黄滔, 2018; 黎梦圆, 2018; de Hoog et al, 2021; 张雷等, 2023)。在此基础上, 已有研究通过综述的形式梳理了金属矿山充填技术的发展脉络与浆体流变行为的研究进展, 进一步明确了当前研究的重点方向和关键问题(程海勇等, 2022; 郭利杰等, 2022; 李永密等, 2024)。

针对某金矿分级尾砂在充填过程中存在浓度偏低、易发生离析和流动性较差等问题, 选取该金矿尾砂作为研究对象, 开展了细粒级尾砂膏体充填工艺的可行性研究。通过系统测试尾砂颗粒特性、絮凝沉降行为、浆体流变特性及管道输送特性, 并结合数值模拟手段, 提出适宜的料浆参数与优化工艺方案。本研究旨在为新建充填站系统的设计提供理论依据, 以期提升尾砂资源综合利用水平, 保障矿山充填系统的安全性与稳定性。

1 尾砂基本物化性能检测

研究尾砂来自山东某金矿, 将取样的全尾砂进行旋流分级, 收集溢流细砂作为本次试验的主要原材料。经测试, 溢流细砂相对密度为 2.651 g/cm³, 自然堆积密度为 0.967 g/cm³, 孔隙率为 63.51%。

1.1 粒度测试

采用激光粒度分析仪对溢流细砂粒径进行测试, 得到其粒径分布特征如图 1 所示。结果显示溢流细砂粒径在 200 目(74 μm)以下的颗粒占比为 71.33%, 粒径在 400 目(37 μm)以下的颗粒占比为 64.43%, 粒径在 625 目(20 μm)以下的颗粒占比为 56.65%, 属于典型的细粒级尾砂。进一步计算得到该尾砂的特征粒径参数 D_{10} 为 2.14 μm, D_{30} 为 6.17 μm, D_{60} 为 29.76 μm, 不均匀系数 $C_u=13.91>5$, 曲率系数 $C_c=0.60<1$, 表明尾砂级配不良, 颗粒组成不连续。由分计筛余曲线可进一步发现, 粒度分布并不均

匀, 粒径在 10~20 μm 的颗粒最多, 最高点对应的筛余百分量约为 9%。

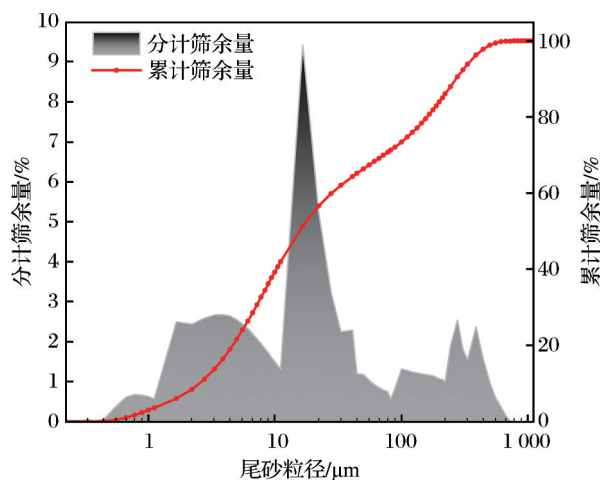


图 1 尾砂粒度分布曲线

Fig. 1 Distribution curve of tailings particle size

1.2 尾砂化学元素分析

本试验采用半定量方法对尾砂全元素进行分析, 采用定量分析方法对影响尾砂性能的主要元素进行分析, 化学元素的定量测试结果见表 1。由表 1 可知, 尾砂中 Si 含量最高, 约为 36.24%, 其次是 Al, 约为 6.78%。其他元素含量较低, 符合充填要求。

表 1 尾砂化学元素组成

Table 1 Chemical elements composition of tailings

检测元素	检测结果/%	检测元素	检测结果/%
Ca	0.96	P	0.019
Si	36.24	K	3.59
Al	6.78	Na	0.41
Fe	1.91	S	0.27
Ti	0.059		

2 尾砂絮凝沉降特性

尾砂沉降浓缩效果直接影响着充填浓度等工艺参数, 为确定溢流细砂最佳的浓缩方案, 开展尾砂沉降浓缩试验。

2.1 试验方法与过程

《金属非金属矿山充填工程技术标准》(GB/T51450-2022)(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2022)规定, 絮凝沉降行为通过静态与动态两类试验进行表征(图 2)。其中, 在静态试验中, 尾砂浆

浓度、絮凝剂添加量及溶液浓度等参数均设为固定值,探究合适的人料浓度和絮凝剂添加量;动态絮凝沉降试验根据静态絮凝试验筛选的人料浓度和絮凝剂添加量,研究尾砂絮凝体在剪切流场中的沉降行为演变,量化底流紊动对其压缩特性与澄清效率的抑制效应。耙架转速为 10 r/h ($T=2 \text{ Nm}$, $D_1=6.0 \text{ cm}$, $D_2=3.5 \text{ cm}$)。

首先,配制 0.5 g/L 的絮凝剂母液,按尾砂干料质量比计算投加量。然后,采用带网孔橡胶搅拌器搅拌使絮凝剂与尾砂浆充分混合,静置观测并采集沉降界面高度随时间变化的数据。试验完成后,绘制沉降曲线,基于式(1)和式(2)求解固体通量和底流浓度。

$$G = \rho v C_w \quad (1)$$

式中: G 为固体通量 [$\text{t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; ρ 为尾砂浆密度 (t/m^3); v 为固体颗粒沉降速度 (m/h); C_w 为尾砂浆的浓度 (%)。

$$C = m_1 l / (m_1 + m_2 - \pi \rho_w r^2 l) \quad (2)$$

式中: C 为底流浓度 (%); m_1 为试验尾砂质量 (g); m_2 为试验水质量 (g); ρ_w 为上部清水密度 (g/cm^3); r 为量筒内半径 (cm); l 为量筒内尾砂浆上部清水高度 (cm)。

2.2 结果与分析

(1) 絮凝剂选型

当人料浓度为 12%, 絮凝剂添加量为 25 g/t 时,絮凝剂型号与尾砂沉降特性的关系如图 3 所示。

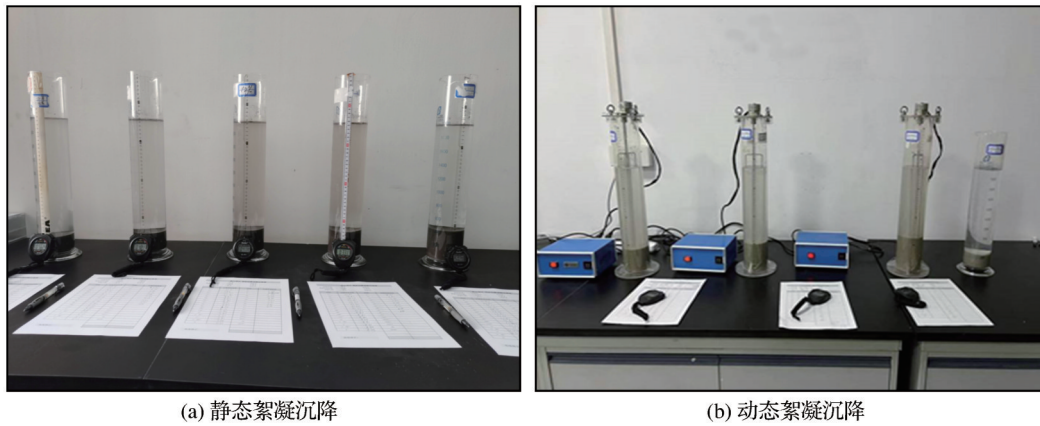


图 2 絮凝沉降试验

Fig. 2 Flocculation sedimentation test

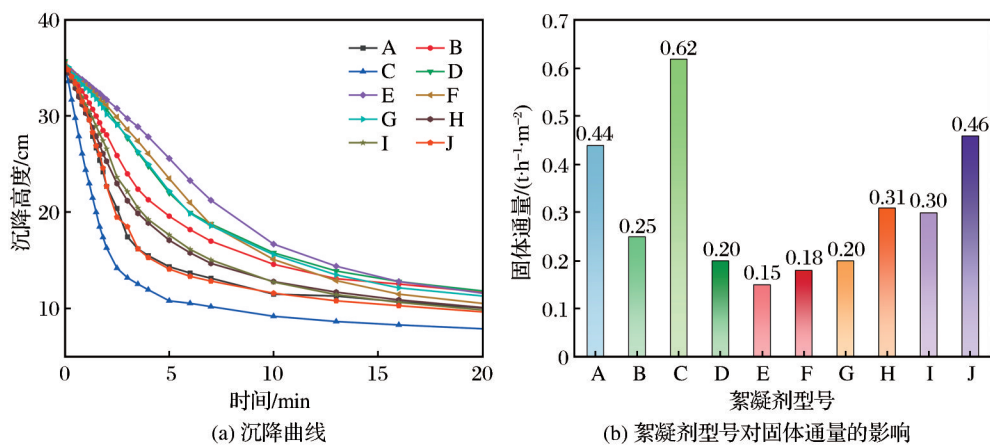


图 3 不同絮凝剂作用下尾砂的沉降过程对比

Fig. 3 Comparison of sedimentation processes of tailings under different flocculants

尾砂沉降可划分为自由沉降区、过渡区和压缩区,根据过渡点的尾砂沉降高度可以测算出该段时

间内尾砂的平均沉降速度,从而计算固体通量。在自由沉降阶段,絮凝作用显著提升了尾砂颗粒的聚

集效率,导致沉降界面以加速趋势下移,该过程通常持续时间不超过5 min。在尾砂的压缩区,尾砂逐渐变得更加密实,直至达到一个平衡的密实状态,此时沉降高度不再随时间变化。根据固体通量指标,最终优选C类絮凝剂作为后续试验的絮凝剂型号。

(2)最佳絮凝剂添加量研究

当入料浓度为12%时,不同絮凝剂用量(20~40 g/t)对尾砂沉降的影响如图4所示。在入料浓度为12%条件下,絮凝剂添加量对底流浓度、固体通量和沉降速率的影响各不相同。沉降速率和固体通量随

絮凝剂添加量的增加呈现相同的变化趋势,在絮凝剂添加量从20 g/t增加至30 g/t的过程中,沉降速率和固体通量均随絮凝剂添加量的增加而增大;在絮凝剂添加量从30 g/t增加至40 g/t的过程中,沉降速度与固体通量均呈现先增大后减小的变化规律。底流浓度随絮凝剂添加量的增加表现为先升高后降低,最高浓度为54.07%,对应絮凝剂添加量为25 g/t。工程应用中更多采用固体通量指标来评价尾砂沉降效果,故最终优选絮凝剂添加量为30 g/t,对应底流浓度为53.38%,只比同组别最高底流浓度低0.69%。

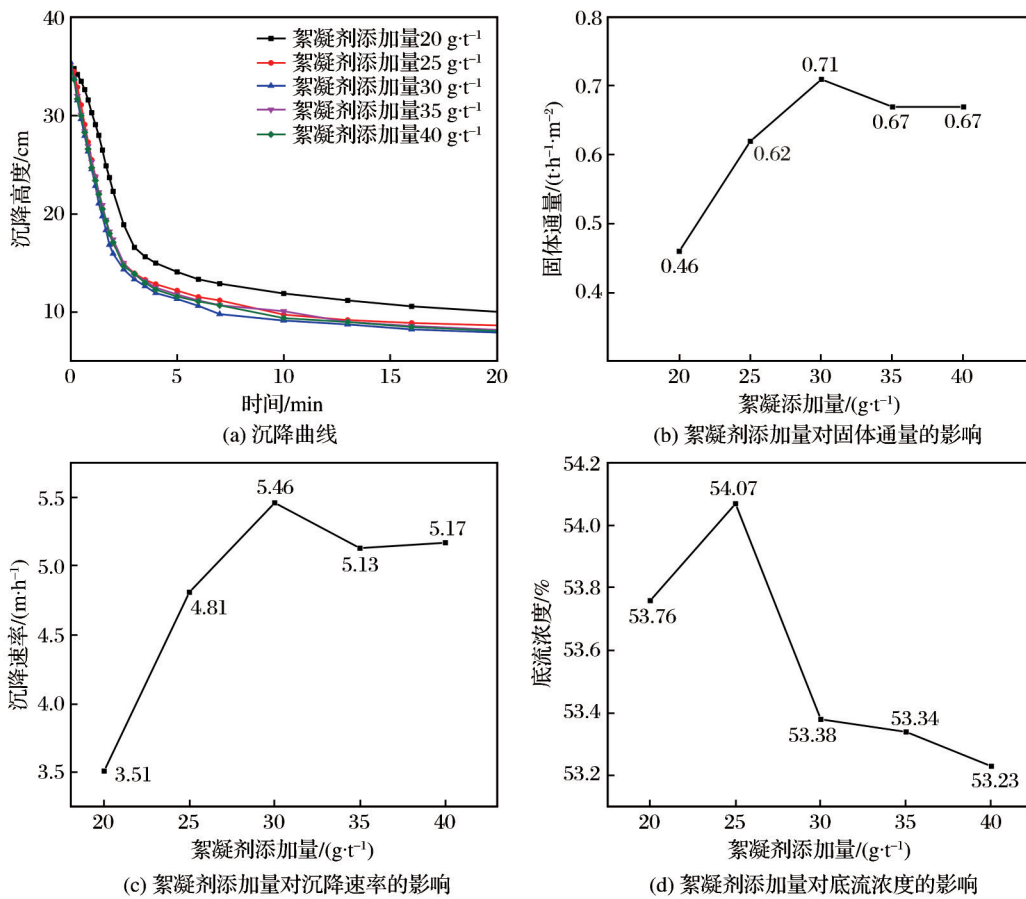


图4 絮凝剂用量对尾砂沉降效果的影响

Fig. 4 Effects of flocculant dose on tailings dewatering performance

(3)最佳入料浓度研究

图5显示了絮凝剂用量为30 g/t时,不同入料浓度(8%~16%)对尾砂沉降行为的影响。当絮凝剂添加量为30 g/t时,随着入料浓度的不断增大,尾砂的沉降高度随时间下降的速度逐渐减缓。这是因为随着入料浓度的增大,尾砂掺量增加,而絮凝

剂添加量保持不变,导致絮凝剂与尾砂的质量比降低,从而使得絮凝效果减弱,即随着入料浓度的增大,尾砂沉降速率逐渐降低。从图5(a)可以看出,随着入料浓度的增大,尾砂沉降压缩过程时间也增加,压缩区延长。

低浓度砂浆虽然沉降速率较高,但从制备总体

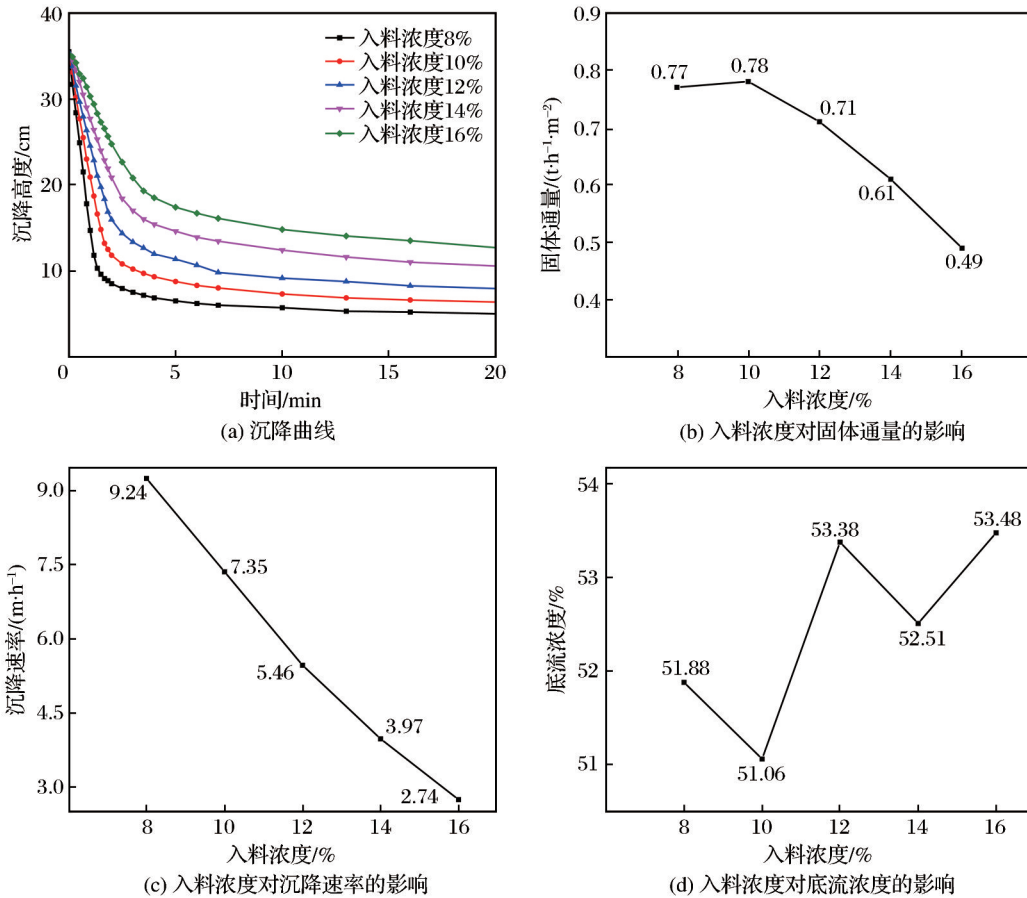


图5 入料浓度对沉降特性的影响

Fig. 5 Effects of feed concentration on sedimentation efficiency

效率来看不一定最佳。从图5(b)可以看出,固体通量随入料浓度的升高呈现先增大后减小的变化趋势,在入料浓度为10%时达到峰值,当入料浓度超过12%时,固体通量急剧下降,说明入料浓度超过一定范围时,絮凝剂的处理能力下降。结合矿山实际情况和底流浓度需求,最终优选尾砂入料浓度为12%,对应底流浓度为53.38%,只比同组别最高底流浓度低0.1%。

(4) 动态絮凝沉降研究

在入料浓度为12%和絮凝剂为30 g/t条件下,耙架对尾砂沉降特性的影响如图6所示。图6对比了无耙架和有耙架2种不同情况对底流浓度的影响。可以发现,带耙架的沉降装置其底流浓度显著高于无耙架装置,沉降2 h时底流浓度可高出7.01%,沉降24 h时可高出7.97%。这是因为耙架在运转过程中,可将尾砂底部絮团破坏,使其内部

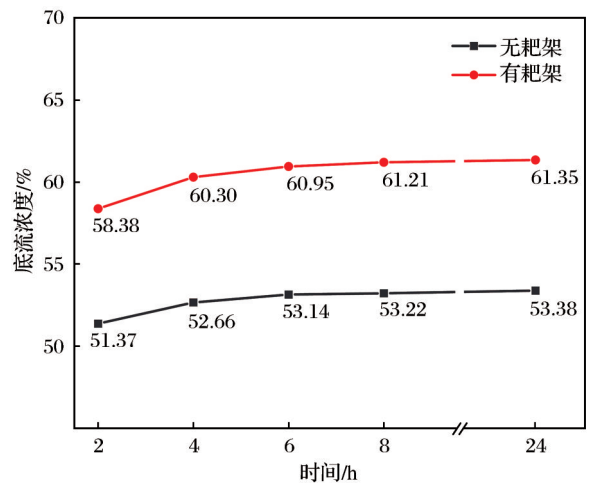


图6 耙架对尾砂沉降特性的影响

Fig. 6 Effects of rake mechanism on the sedimentation characteristics of tailings

“包裹水”排出,从而提高底流浓度。无论是否带耙架,在沉降4 h后,底流浓度增长逐渐减缓。综上所述

述,在最佳入料浓度和最佳絮凝剂添加量情况下,带耙架设备沉降效果更好。

3 充填料浆流动性能研究

根据本研究前期的室内试验结果,若单独采用分级细尾砂作为充填骨料,其形成的充填体强度难以满足工程稳定性要求。因此,本研究所采用的试验尾砂为分级细尾砂与分级粗尾砂按质量比3:7混合而成的复合尾砂。

为了研究该细粒级复合尾砂充填料浆在充填管道中的流动特性,开展了相关流动性测试,包括扩展度试验和流变参数测试(图7)。

3.1 试验方法与过程

依据《金属非金属矿山充填工程技术标准》(GB/T 51450-2022)(中华人民共和国住房和城乡建设部,2022),进行充填料浆扩展度测试。

采用Brookfield的RST-SST型软固体流变仪测试充填料浆流变性能,通过计算机程序自动控制剪切速率。首先,使用高剪切速率对充填料浆进行预剪切处理,之后设定剪切速率从0增加到 150 s^{-1} ,程序自动记录每秒数据。分别对充填浓度为65%、

67%、69%、71%和73%,灰砂比为1:4、1:6、1:8和1:10的充填料浆开展扩展度和流变参数测试。

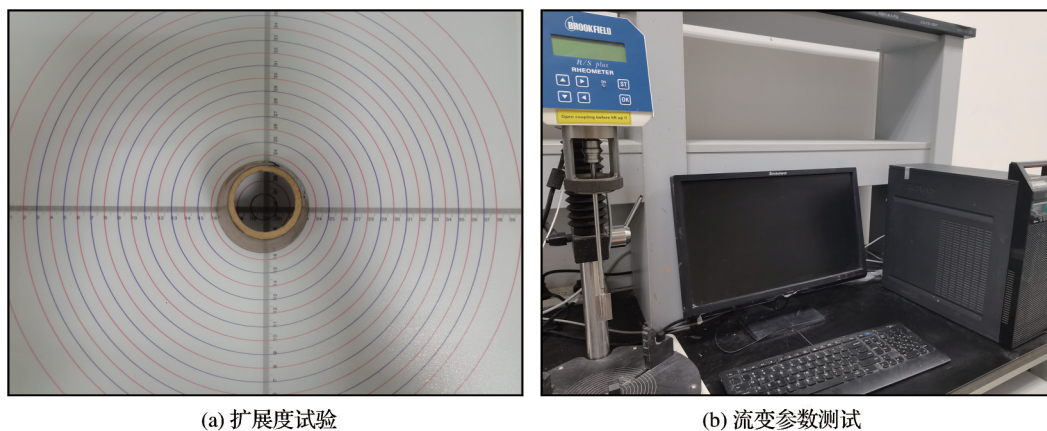
3.2 试验结果与分析

(1)扩展度试验

充填料浆浓度与灰砂比对扩展度的影响如图8所示。结果显示,料浆扩展度随质量浓度的升高而明显减小。而灰砂比对充填料浆扩展度的影响较小,灰砂比对充填料浆扩展度的影响程度远低于质量浓度对扩展度的影响程度。当灰砂比为1:4,充填料浆质量浓度为65%时,扩展度为171 mm;当料浆质量浓度增加至69%和73%时,扩展度分别降低了25.4%和44.4%。当灰砂比为1:10,充填质量浓度为65%时,扩展度为175 mm;当质量浓度增加到69%和73%时,扩展度分别降低了22.0%和40.9%。当充填料浆质量浓度高于71%时,扩展度普遍较低,已经不适合进行长距离管道输送(Li et al, 2024)。

(2)流变试验

根据流变测试结果,发现充填料浆存在“屈服效应”,可用Bingham模型进行描述。对流变曲线进行拟合分析,得到充填料浆质量浓度和灰砂比对流变参数的影响如图9所示。



(a) 扩展度试验

(b) 流变参数测试

图7 充填料浆流动性试验

Fig. 7 Flow ability test of backfill slurry

由图9(a)可知,屈服应力和黏度系数均随料浆质量浓度的增加而增大。当灰砂比为1:4,质量浓度为65%时,充填料浆的屈服应力为9.387 Pa,黏度系数为 $0.137\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。当质量浓度增加到67%、69%和71%时,屈服应力分别增加了62.05%、204.61%和506.34%,黏度系数分别增加了11.74%、

16.78%和40.48%。屈服应力随质量浓度变化增加显著,而黏度系数变化不明显,且最大黏度系数不超过 $0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}$,这说明黏度系数对流动性的影响明显小于屈服应力。由图9(b)可知,屈服应力和黏度系数随料浆灰砂比的减小变化不明显。随着灰砂比的减小,料浆的黏度系数缓慢减小,而屈服应力

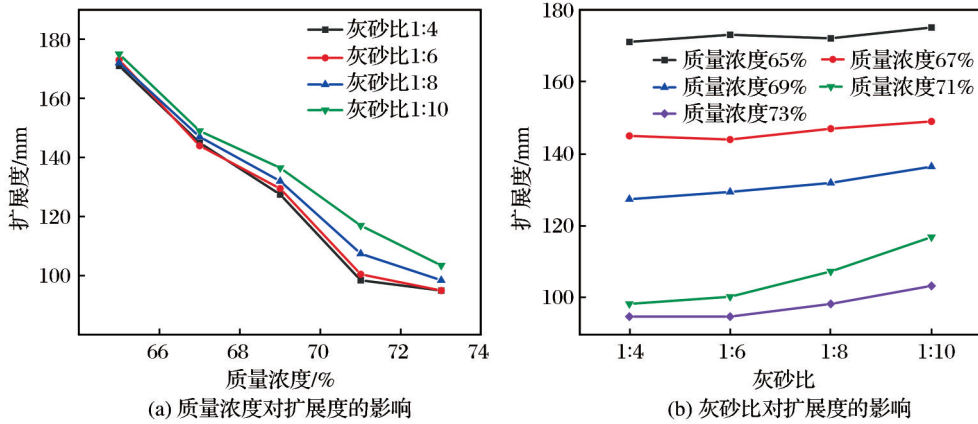


图8 充填料浆质量浓度和灰砂比对扩展度的影响

Fig. 8 Effects of slurry concentration and sand-to-cement ratio on spread diameter

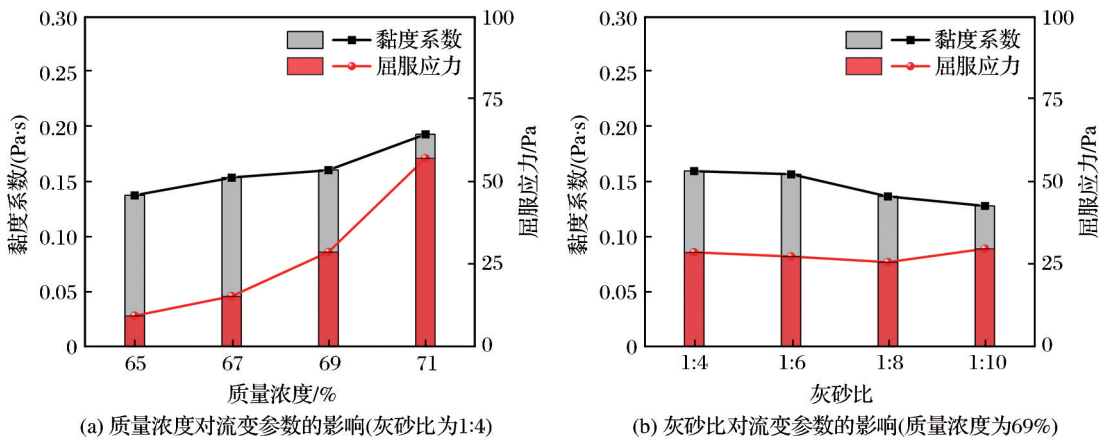


图9 充填料浆质量浓度和灰砂比对流变参数的影响

Fig. 9 Effects of slurry concentration and sand-to-cement ratio on rheological parameters

呈现先减小后增大的变化趋势。整体而言,黏度系数主要受灰砂比的影响,而非料浆质量浓度;屈服应力主要受料浆质量浓度的影响,而非灰砂比。

4 管道输送数值模拟研究

本次试验与数值模拟工作,旨在为后续料浆管道输送的阻力计算提供参考,进而为充填系统中泵的选型和管路布置方案设计提供技术依据。为了探究细粒级复合尾砂充填料浆长距离充填输送的流动特性,采用CFD手段对管道输送过程进行数值模拟分析,计算不同工况下充填输送的阻力损失。

结合矿山充填管路,分别对水平管路和弯管段进行局部建模,采用ANSYS Fluent进行数值模拟,Fluent Meshing进行网格划分。网格划分模型如

图10所示。

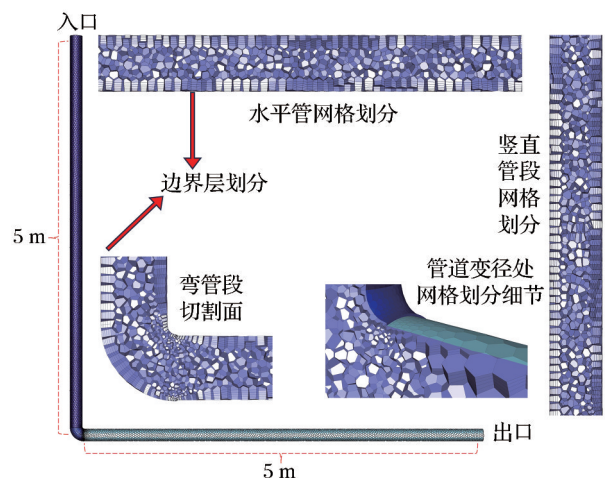


图10 网格划分模型

Fig. 10 Grid division model

弯管段模型竖直管和水平管内径不同,于弯头段进行变径,管道壁面设置五层边界层,采用多面体单元划分网格,该划分方法可以较好地处理边界层和管道变径处网格,提升整体网格质量,数值计算前进行网格独立性验证(杨凯等,2023;陈剑等,2024;史采星等,2024)。

4.1 方案设计及参数设置

充填料浆质量浓度范围为 65%~71%,充填输送流量范围为 100~120 m³/h,竖直管内径为 150 mm,水平管内径为 142 mm,流体模型选用 Herschel-Bulkley 模型,其剪切速率和剪切应力对照曲线如图 11 所示。图中 τ_0 为屈服应力, $\dot{\gamma}_0$ 为临界剪切速率,数值计算时幂律指数 n 设置为 1,屈服应力和黏度系数设置为流变试验测试结果,选用流量入口,压力出口,模拟方案和参数设置见表 2。

4.2 结果与分析

(1)质量浓度和灰砂比对料浆流动特性的影响

首先,考察质量浓度对料浆流动特性的影响。以入口流量为 100 m³/h、灰砂比为 1:4 为例,模拟不同质量浓度下的料浆输送情况。质量浓度对料浆流动特性的影响如图 12 所示。

由图 12(a)分析可知,相同条件下,不同质量浓度充填料浆输送时所能达到的最大流速不同,当质量浓度为 65% 时,最大输送流速为 2.837 m/s,对应位置为管道弯头段。从弯头进出口截面速度云图

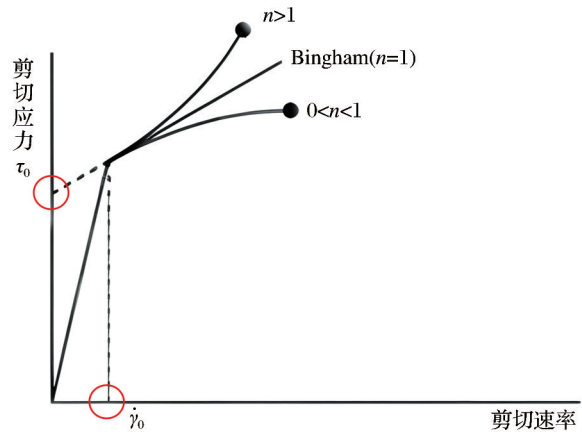


图 11 Herschel-Bulkley 模型
Fig. 11 Herschel-Bulkley model

也可以看出,料浆流经弯头时方向明显发生改变,弯头入口截面云图显示靠近竖管左侧料浆速度偏大,弯头出口截面云图显示靠近水平管下侧料浆速度偏大。当充填料浆质量浓度增加到 67%、69% 和 71% 时,对应最大流速分别降低为 2.816 m/s、2.767 m/s 和 2.711 m/s,最大降幅为 4.44%。此外,通过线积分卷积分图可以看出,当前浓度条件下,料浆输送时分布均匀,无分层离析现象。管道径向位置速度分布曲线也验证了该结论,曲线图表明,料浆流速在管道的不同位置存在较大差异,在管道中心区域,流速较大,在靠近管壁区域,流速较小,符合典型的流体动力学特征。

表 2 模拟方案和参数设置

Table 2 Simulation schemes and parameter settings

方案编号	充填料浆质量浓度/%	灰砂比	管道内径/mm	入口流量/(m ³ ·h ⁻¹)	屈服应力/Pa	黏度/(Pa·s)	密度/(g·cm ⁻³)
A1	65	1:4	150 变径 142	100/110/120	9.387	0.1371	1.700
A2	67	1:4	150 变径 142	100/110/120	15.212	0.1532	1.738
A3	69	1:4	150 变径 142	100/110/120	28.594	0.1601	1.777
A4	71	1:4	150 变径 142	100/110/120	56.917	0.1926	1.818
B1	65	1:10	150 变径 142	100/110/120	6.321	0.1101	1.689
B2	67	1:10	150 变径 142	100/110/120	11.317	0.1352	1.726
B3	69	1:10	150 变径 142	100/110/120	29.658	0.1283	1.764
B4	71	1:10	150 变径 142	100/110/120	52.481	0.1532	1.804

由图 12(b)分析可知,相同条件下,充填料浆质量浓度越高,输送时阻力损失越大,数值模拟计算结果普遍高于理论计算值,这可能是由于理论计算时未能考虑弯头段损失和重力加速度影响,最小误

差为 8.14%,最大误差为 25.03%。

其次,考察灰砂比对料浆流动特性的影响。以入口流量为 100 m³/h、质量浓度为 69% 为例,模拟不同灰砂比下的料浆输送情况。灰砂比对料浆流

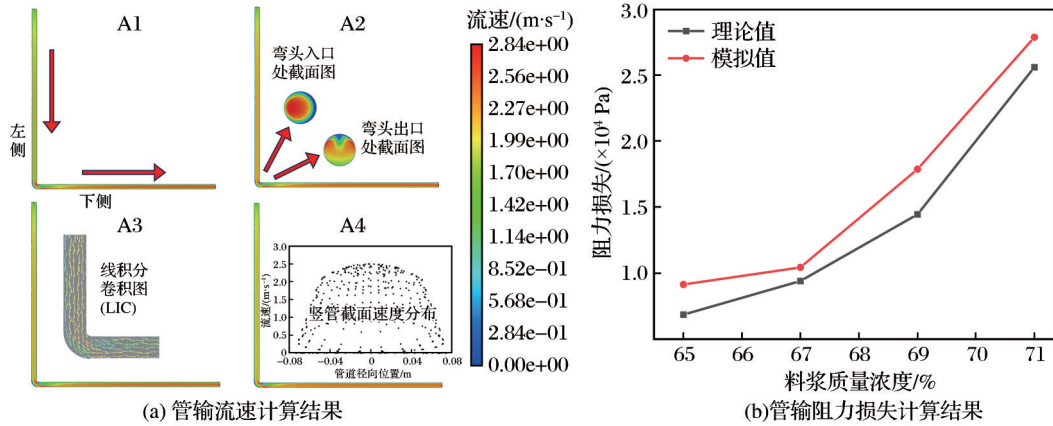


图 12 质量浓度对料浆流动性能的影响

Fig. 12 Effects of concentration on the flow performance of backfill slurry

动特性的影响如图 13 所示。

由图 13 分析可知,相同条件下,不同灰砂比对充填料浆流动特性影响较小。当灰砂比为 1:4 时,料浆达到的最大流速为 2.77 m/s;当灰砂比为 1:10 时,料浆达到的最大流速为 2.73 m/s,相差不到 1.5%。

(2)入口流量和管径对料浆流动性能的影响

首先,考察入口流量对流动性能的影响。选取质量浓度为 69% 和灰砂比为 1:4 的料浆,模拟分析不同入口流量下的输送特性。入口流量对料浆流动特性的影响如图 14 所示。

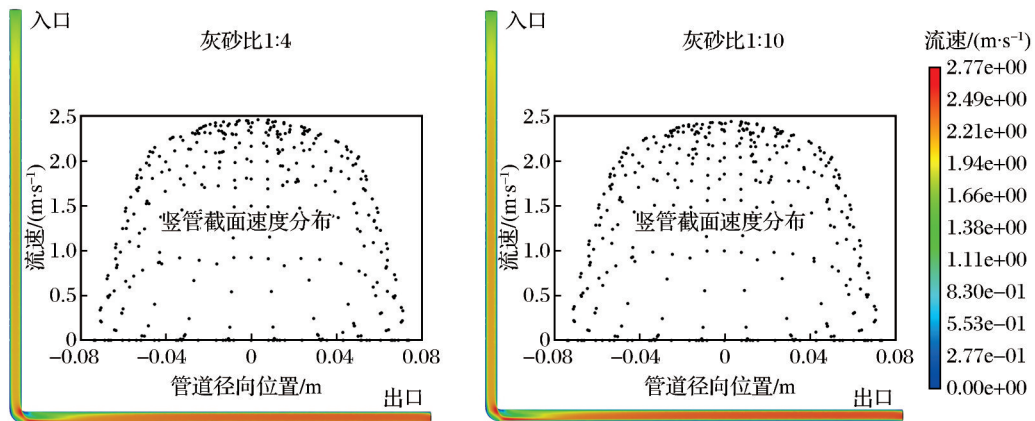


图 13 灰砂比对料浆流动性能的影响

Fig. 13 Effects of sand-to-cements ratio on the flow performance of backfill slurry

由图 14(a)速度云图可知,不同入口流量料浆输送速度有明显差异,充填料浆输送时所能达到的最大流速不同,当入口流量为 100 m³/h 时,最大输送流速为 2.767 m/s,对应位置为管道弯头段。当入口流量增加到 110 m³/h 和 120 m³/h 时,对应的最大流速分别增加为 3.050 m/s 和 3.331 m/s,最大增幅为 20.38%。由图 14(b)分析可知,相同条件下,入口流量越大,输送时阻力损失越大,这是因为流速增加导致的。

其次,考察管道内径对料浆流动特性的影响。

以质量浓度为 69%、灰砂比为 1:4、入口流量为 100 m³/h 为例,数值计算竖直管段(内径 150 mm)和水平管段(内径 142 mm)阻力损失。为避免重力势能对结果产生影响,计算过程中重力加速度设置为 0(排除重力项对阻力损失结果的干扰)。管道内径对料浆流动特性的影响如图 15 所示。

由图 15 分析可知,相同条件下,管道内径越小,输送时阻力损失越大,数值模拟计算结果比理论计算值高,最大误差为 10.46%,这是因为数值仿真自身计算误差导致的。

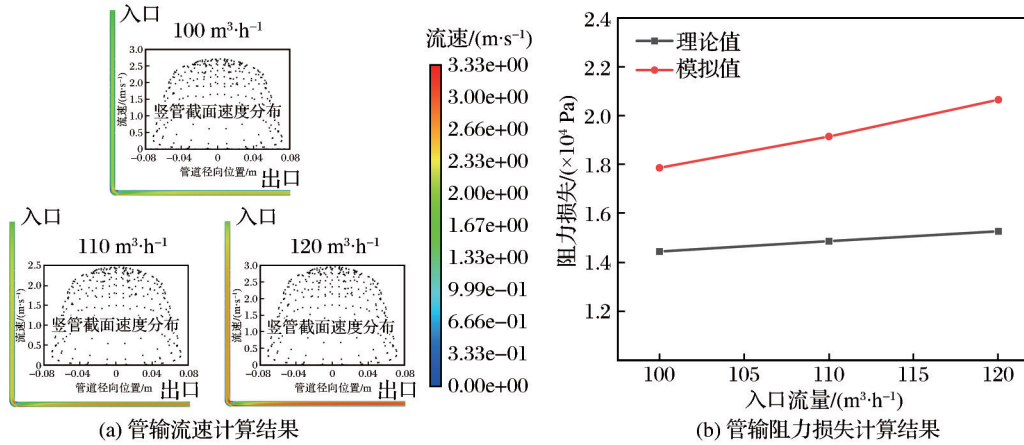


图 14 入口流量对料浆流动特性的影响

Fig. 14 Effects of inlet flow rate on the flow performance of backfill slurry

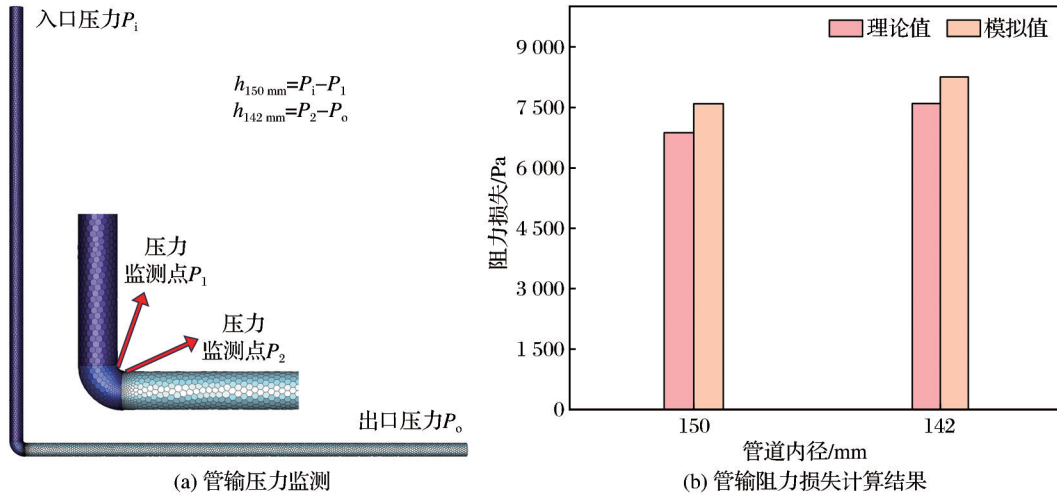


图 15 管道内径对料浆流动特性的影响

Fig. 15 Effects of pipeline diameter on the flow performance of backfill slurry

5 结论

基于某金矿细粒级尾砂,进行了尾砂的基本物理化学性能研究、尾砂絮凝沉降特性研究、充填料浆流动特性研究和管道输送数值模拟研究。根据研究结果,得出以下结论:

(1)该矿溢流尾砂为典型细粒级尾砂(粒径 74 μm 以下占比为 71.33%,相对密度为 2.651 g/cm³),适用于膏体充填工艺。通过优化入料浓度(12%)和絮凝剂添加量(30×10⁻⁶),并配置耙架设备,底流浓度最高提升至 61.35%,显著增强了尾砂脱水效率。

(2)细粒级复合尾砂料浆表现为宾汉姆流体特性,流动性受质量浓度影响显著,受灰砂比影响较

小;当料浆质量浓度超过 65% 时,输送过程中浆体分布均匀,无分层离析,验证了其适用于稳定膏体输送。

(3)数值模拟表明,质量浓度、入口流量和管道内径对流动阻力的影响显著,即质量浓度越高,入口流量越高,管径越小,则阻力损失越大。

本研究为该矿尾砂膏体充填工艺的可行性评估和参数选型提供了理论依据和技术参考,具有良好的推广应用前景。

参考文献(References):

Cacciuttolo C, Marinovic A, 2023. Experiences of underground mine backfilling using mine tailings developed in the Ande-

- an Region of Peru: a green mining solution to reduce socio-environmental impacts[J].Sustainability, 15(17):12912.
- de Hoog E, Talmon A, van Rhee C, 2021.Unstable transients affecting flow assurance during hydraulic transportation of granular two-phase slurries[J].Journal of Hydraulic Engineering, 147(9):04021029.
- Li P F, Xie S D, Lu J J, et al, 2024.Research on the flow characteristics of blasthole stemming slurry in open-pit mining[J].Frontiers in Earth Science, 12: 1430046.
- Wang L M, Cheng L, Yin S H, et al, 2024.Flocculation, dewatering and sedimentation behaviour of mine backfill slurry in deep cone thickener (DCT)[J].Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(2):112168.
- Yin S H, Hou Y Q, Yang S X, et al, 2022.Study on static and dynamic flocculation settlement characteristics of fine tailings slurry and influence of flocculant on strength of fine tailings backfill[J].Case Studies in Construction Materials, 17:e01525.
- 卞继伟,王新民,肖崇春,2017.全尾砂动态絮凝沉降试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),48(12):3278-3283.
- Bian Jiwei, Wang Xinmin, Xiao Chongchun, 2017. Experimental study on dynamic flocculating sedimentation of unclassified tailings[J].Journal of Central South University(Science and Technology), 48(12):3278-3283.
- 陈剑,李聪,王俊,等,2024.大屯锡矿尾砂膏体环管管输数值模拟研究[J].有色金属(矿山部分),76(2):26-34,44.
- Chen Jian, Li Cong, Wang Jun, et al, 2024.Numerical simulation study on the pipeline transportation of tailings paste in Datun tin mine[J].Nonferrous Metals (Mining Section), 76(2):26-34,44.
- 程海勇,吴爱祥,吴顺川,等,2022.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报,44(1):11-25.
- Cheng Haiyong, Wu Aixiang, Wu Shunchuan, et al, 2022. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J].Chinese Journal of Engineering, 44(1):11-25.
- 郭利杰,刘光生,马青海,等,2022.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J].煤炭学报,47(12):4182-4200.
- Guo Lijie, Liu Guangsheng, Ma Qinghai, et al, 2022. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine[J].Journal of China Coal Society, 47(12):4182-4200.
- 胡松涛,朱庚杰,张军童,等,2024.胶东地区黄金矿山细尾砂胶结充填应用研究[J].黄金科学技术,32(3):425-436.
- Hu Songtao, Zhu Gengjie, Zhang Juntong, et al, 2024. Application research on cemented fine tailings backfill of gold mines in the Jiaodong area[J].Gold Science and Technology, 32(3):425-436.
- 黄滔,2018.新拌石膏浆体的流变性能研究[D].重庆:重庆大学.
- Huang Tao, 2018. Research on the rheological properties of fresh gypsum paste and plaster[D].Chongqing: Chongqing University.
- 纪芳,郎永忠,张骥,等,2023.某铁矿全尾砂和分级尾砂对胶结充填强度的影响[J].现代矿业,39(8):233-236.
- Ji Fang, Lang Yongzhong, Zhang Ji, et al, 2023. The influence of whole tailings and graded tailings on the cemented filling strength in an iron mine[J].Modern Mining, 39(8): 233-236.
- 贾住平,郑禄璟,胡亚飞,等,2022.贵州锦丰金矿胶固粉—分级尾砂充填技术研究与应用[J].金属矿山,51(9):43-48.
- Jia Zhuping, Zheng Lujing, Hu Yafei, et al, 2022. Research and application of filling technology with glue powder and graded tailing in Jinfeng gold mine, Guizhou Province[J].Metal Mine, 51(9):43-48.
- 黎梦圆,2018.新拌水泥基材料非线性流变模型的研究与应用[D].北京:清华大学.
- Li Mengyuan, 2018. Nonlinear rheological modeling of fresh cementitious materials[D]. Beijing: Tsinghua University.
- 黎梦圆,李航空,郭利杰,等,2024.基于超细磷尾砂的絮凝沉降特性及其胶结膏体充填材料性能研究[J].有色金属(矿山部分),76(5):28-39.
- Li Mengyuan, Li Hangkong, Guo Lijie, et al, 2024. Study on flocculation sedimentation characteristics and cemented paste backfill materials properties based on ultrafine phosphorus tailings[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 76(5):28-39.
- 李永密,金爱兵,2024.尾砂粒级、灰砂比和料浆浓度对充填体力学性质影响研究[J].中国安全生产科学技术,20(11):21-29.
- Li Yongmi, Jin Aibing, 2024. Influence of tailings particle size, cement-sand ratio, and slurry concentration on mechanical properties of tailings backfill[J].Journal of Safety Science and Technology, 20(11):21-29.
- 刘立顺,余斌,吴春平,等,2020.我国绿色矿山建设现状及案例分析[J].有色金属工程,10(9):98-103.
- Liu Lishun, Yu Bin, Wu Chunping, et al, 2020. Current situation and case analysis of green mine construction in China[J].Nonferrous Metals Engineering, 10(9):98-103.
- 任锦荣,王浩,闫纪帆,等,2024.内蒙古某矿山开采主要污染物治理与环境保护研究[J].中国矿业,33(3):51-56.
- Ren Jinrong, Wang Hao, Yan Jifan, et al, 2024. Research on the treatment of main pollutants and environmental protec-

- tion in a mine in Inner Mongolia [J]. China Mining Magazine, 33(3): 51-56.
- 史采星, 郭利杰, 陈新, 2021. 全尾砂静动态絮凝沉降特性 [J]. 中国有色金属学报, 31(1): 194-202. Shi Caixing, Guo Lijie, Chen Xin, 2021. Static and dynamic flocculation sedimentation characteristics of unclassified tailings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 31(1): 194-202.
- 史采星, 杨凯, 郭利杰, 等, 2024. 料浆温度对超细尾砂充填料浆流动性影响研究 [J]. 有色金属 (矿山部分), 76(5): 58-67. Shi Caixing, Yang Kai, Guo Lijie, et al, 2024. Study on influence of slurry temperature on the flow performance of ultrafine tailings backfill slurry [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 76(5): 58-67.
- 吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等, 2018. 中国膏体技术发展现状与趋势 [J]. 工程科学学报, 40(5): 517-525. Wu Aixiang, Yang Ying, Cheng Haiyong, et al, 2018. Status and prospects of paste technology in China [J]. Chinese Journal of Engineering, 40(5): 517-525.
- 吴爱祥, 张晋军, 王黎明, 等, 2024. 膏体充填: 金属矿绿色开采的变革性技术 [J]. 中国有色金属学报, 34(5): 1652-1666. Wu Aixiang, Zhang Jinjun, Wang Yiming, et al, 2024. Cemented paste backfill: transformative technology for green mining in metal mines [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 34(5): 1652-1666.
- 吴再海, 2022. 超细尾砂充填料浆絮凝沉降特性与浓密机理研究 [D]. 北京: 北京科技大学. Wu Zhaihai, 2022. Study on flocculation settling characteristics and thickening mechanism of ultrafine tailing slurry [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing.
- 杨纪光, 王辉, 王增加, 等, 2023. 某金矿膏体料浆流变特性研究与神经网络分析 [J]. 有色金属工程, 13(11): 117-125. Yang Jiguang, Wang Hui, Wang Zengjia, et al, 2023. Research on rheological characteristics of a gold mine paste slurry and neural network analysis [J]. Nonferrous Metals Engineering, 13(11): 117-125.
- 杨凯, 黎梦圆, 2023. 基于 CFD-DEM 耦合方法的研石—粉煤灰充填料浆在竖直弯管中的磨损研究 [J]. 煤矿安全, 54(12): 116-122. Yang Kai, Li Mengyuan, 2023. Research on wear of gangue-fly ash filling slurry in vertical bending pipe based on CFD-DEM coupling method [J]. Safety in Coal Mines, 54(12): 116-122.
- 杨柳华, 王洪江, 吴爱祥, 等, 2016. 絮凝沉降对全尾砂料浆流变特性的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 47(10): 3523-3529. Yang Liuhua, Wang Hongjiang, Wu Aixiang, et al, 2016. Effect of flocculation settling on rheological characteristics of full tailing slurry [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 47(10): 3523-3529.
- 杨晴, 杨仕教, 张冉玥, 2022. 基于上澄清液浊度的超细尾砂絮凝沉降试验 [J]. 黄金科学技术, 30(6): 948-957. Yang Qing, Yang Shijiao, Zhang Ranyue, 2022. Flocculation sedimentation test of ultrafine tailings based on turbidity of supernatant liquid [J]. Gold Science and Technology, 30(6): 948-957.
- 杨天鸿, 孙东东, 胥孝川, 等, 2022. 新疆大型露天矿绿色安全高效开采存在问题及对策 [J]. 采矿与安全工程学报, 39(1): 1-12. Yang Tianhong, Sun Dongdong, Xu Xiaochuan, et al, 2022. Problems and countermeasures in green, safe and efficient mining of large-scale open-pit mines in Xinjiang [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 39(1): 1-12.
- 于洋, 陈炳乾, 花奋奋, 等, 2024. 矿山地质环境灾变与保护修复研究现状与展望 [J]. 金属矿山, 53(3): 1-18. Yu Yang, Chen Bingqian, Hua Fenfen, et al, 2024. Research status and prospect of mining-induced geo-environmental hazards and geological environment protection [J]. Metal Mine, 53(3): 1-18.
- 张雷, 李凡, 郭利杰, 等, 2023. 减水剂类型对细尾砂充填料浆流动性及强度的影响 [J]. 有色金属工程, 13(9): 110-120. Zhang Lei, Li Fan, Guo Lijie, et al, 2023. Effect of different water reducers on fluidity and strength of fine tailings filling slurry [J]. Nonferrous Metals Engineering, 13(9): 110-120.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2022. 金属非金属矿山充填工程技术标准: GB/T 51450—2022 [S]. 北京: 中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2022. Technology standard for backfill engineering in metallic and non-metallic mines: GB/T 51450—2022 [S]. Beijing: China Planning Press.
- 朱久隆, 李帅, 袁作军, 等, 2024. 粗粒径分级尾砂级配改性与似膏体充填新思路 [J]. 世界有色金属, (10): 185-187. Zhu Jiulong, Li Shuai, Yuan Zuojun, et al, 2024. New idea of grading modification and paste filling of coarse particle size graded tailings [J]. World Nonferrous Metals, (10): 185-187.

Study on the Flocculant Sedimentation Characteristics of Fine-Grained Tailings and the Flow Performance of Backfill Slurry in a Gold Mine

LIU Guodong¹, JIA Tao¹, SUN Mingjun¹, YANG Kai^{2,3}

1.Sanshandao Gold Mine of Shandong Gold Mining(Laizhou) Co., Ltd., Laizhou 261417, Shandong, China;

2.BGRIMM Technology Group, Beijing 102628, China;

3.National Centre for International Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China

Abstract: High-quality and stable backfill is a crucial technical requirement for ensuring safe and efficient mining operations. This study addresses the issue of unstable backfill quality in a gold mine, which adversely impacts stope safety and production efficiency, by exploring the feasibility and optimization of paste backfill utilizing fine-grained tailings. Through comprehensive testing of the tailings' fundamental physical and chemical properties, flocculation settling behavior, slurry flow characteristics, and numerical simulation of pipeline transportation, optimal backfill process parameters were identified. The test results indicate that the tailings possess a specific gravity of 2.651 g/cm³, a natural bulk density of 0.967 g/cm³, with particles smaller than 74 μm comprising 71.33%, categorizing them as typical fine-grained tailings. Flocculation settling tests reveal that a feed concentration of 12% and a flocculant dosage of 30 g/t yield optimal settling performance, achieving a bottom flow concentration of 53.38%. The incorporation of a rake mechanism further enhances the bottom flow concentration to 61.35%. Rheological assessments reveal that the fine-grained composite tailings slurry behaves as a non-Newtonian fluid characterized by yield stress, aptly described by the Bingham model. The findings indicate that the slurry's mass concentration substantially influences its flowability, with increased concentration correlating with decreased flowability, whereas the ash-to-sand ratio exerts a comparatively minor influence. Furthermore, numerical simulations of pipeline transport demonstrate that when the slurry concentration surpasses 65%, the slurry maintains uniform flow within the pipeline, devoid of stratification or segregation. The velocity profile displays typical fluid dynamic characteristics, exhibiting higher velocities at the pipe center and lower velocities near the pipe wall. Mass concentration, inlet flow rate, and pipe diameter significantly impact resistance loss, while the ash-to-sand ratio has a lesser effect. Specifically, reducing the mass concentration, enhancing the inlet flow rate, or decreasing the pipe diameter results in increased resistance loss within the pipeline. These research outcomes furnish a theoretical foundation and practical guidance for optimizing fine-grained tailings paste backfill processes and pipeline system design, improving backfill quality and system stability, and supporting safe and efficient mine production.

Key words: fine tailings; flocculant sedimentation; backfill slurry; flow performance; numerical simulation; pipeline transport