

尾砂物理性质与固体通量的关系研究*

刘奇^{1,2}, 喻海根^{1,2}, 杨宁^{1,2}, 唐鸣东^{1,2}, 李晓辉^{1,2}

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012;

2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南长沙 410012)

摘要:为探究尾砂物理性质对固体通量的影响规律并优化浓密工艺参数,选取10座典型金属矿山全尾砂样本,系统研究了尾砂粒度、密度等参数与固体通量的定量关系。结合静态絮凝沉降与动态浓密试验数据,建立了基于粒径-密度复合参数的固体通量预测模型。结果表明:在静态絮凝沉降条件下,絮凝剂类型及单耗显著影响沉降速率与底流浓度,合理调控絮凝条件可有效提升沉降效率;固体通量与尾砂中值粒径平方根及密度修正值呈显著正相关($R^2 \geq 0.94$),基于非线性回归建立的粒径-密度复合参数预测模型,可精准表征尾砂物理性质与固体通量的定量关联;在动态浓密条件下,尾砂浆給料速度与固体通量成线性正相关,且溢流水含固量对通量阈值形成双重约束机制。对比试验表明,动态浓密工艺较静态沉降可使底流质量浓度提升10%~15%,充分验证了深锥浓密机在高浓度料浆制备中的技术优势。研究成果为矿山尾砂高效浓密与智能化充填提供了理论依据和技术支撑。

关键词:尾砂粒径;絮凝沉降;动态沉降;固体通量;回归分析

中图分类号:TD85

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2025)10-0102-10

Study on the Relationship Between Physical Properties of Tailings and Solid Flux

LIU Qi^{1,2}, YU Haigen^{1,2}, YANG Ning^{1,2}, TANG Mingdong^{1,2}, LI Xiaohui^{1,2}

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;

2.National Engineering Technology Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract:In order to explore the influence of physical properties of tailings on solid flux and optimize the thickening process parameters, the total tailings samples of 10 typical metal mines were selected, and the quantitative relationships between solid flux and tailings particle size or density was systematically studied. Combined with static flocculation sedimentation and dynamic thickening test data, a solid flux prediction model based on particle size-density composite parameters was established. The results show that under the condition of static flocculation sedimentation, the type and unit consumption of flocculant significantly affect the sedimentation rate and underflow concentration, and rational regulation of flocculation conditions can effectively improve sedimentation efficiency. The solid flux is significantly positively correlated with the square root of the median particle size and the density correction value of the tailings ($R^2 \geq 0.94$). The particle size-density composite parameters prediction model established based on nonlinear regression can accurately characterize the quantitative relationship between the physical properties of tailings and solid flux. Under dynamic thickening conditions, the feed rate of tailings slurry is linearly positively correlated with the solid flux, and the solid content of the overflow water forms a dual constraint mechanism on the flux threshold. The comparative test shows that the dynamic thickening process can increase the underflow concentration by 10%~15% compared with the static sedimentation, which fully verifies the technical advantages of the deep cone thickener in the preparation of high concentration slurry. The research results can provide theoretical basis and technical support for efficient thickening and intelligent filling of mine tailings.

Key words:Tailings particle size, Flocculation sedimentation, Dynamic sedimentation, Solid flux, Regression analysis

0 引言

在矿产资源日益紧缺与环保标准持续升级的双

重驱动下,充填采矿凭借其资源高效回采率与环境扰动最小化的显著优势,已成为金属矿山绿色开采的重要方法^[1-3]。充填料浆的制备是充填采矿法的

* 收稿日期:2025-04-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907404)

作者简介:刘奇(1987—),男,江西赣州人,博士,高级工程师,主要从事采矿与充填技术等方面的研究工作。E-mail:345926583@qq.com

通信作者:喻海根(1999—),男,江西南昌人,硕士,工程师,主要从事采矿与充填技术等方面的研究工作。E-mail:1902927495@qq.com

关键环节,而尾砂因其来源广泛、成本低廉,常被视为充填骨料的首选^[4-6]。然而,由于选矿厂排出的尾矿浓度普遍较低,无法满足当前高浓度充填甚至膏体充填的要求,因此必须进行浓缩脱水处理^[7-9]。固体通量作为尾砂浓密性能的关键技术参数之一,对料浆的输送可靠性和充填体的强度具有重要影响^[10-12]。

近年来,众多学者围绕尾砂浓密参数及其规律展开了深入研究。阮竹恩等^[13]全面梳理了近20年来我国全尾砂料浆浓密研究的丰硕成果,涵盖了絮凝行为、沉降规律、脱水机理及浓密机设计等多个方面,并展望了基于流变学和人工智能的未来发展方向。YIN S H等^[14]通过细致研究细粒级全尾砂的絮凝沉降特性、力学性能及影响因素,揭示了阴离子絮凝剂的优异效果,同时指出沉降参数受多重因素交互作用的复杂影响,并确定了静态沉降效果最佳的工艺条件。诸利一等^[15]运用正交试验方法,系统研究了尾砂浓度、絮凝剂类型等因素对絮凝沉降与浓密效果的影响,优化了工艺条件,提升了沉降效率。杨莹等^[16]则利用先进的图像处理技术,开发了尾砂絮凝沉降观测系统,实现了沉降过程的智能识别,优化了浓密机参数,提高了试验的精度和效率。JIAO H Z等^[17]借助高精度CT扫描和三维重建技术,深入探究了深锥浓密机底流浓度的提升策略,发现适当的剪切速率能显著提升充填料浆质量浓度,优化孔隙结构,促进尾砂料浆的增稠和高效利用。王石等^[18]研究了给料质量分数对尾砂浆沉降和水分迁移的影响机制,揭示了低质量分数对提升沉降速度和浓密效果的积极作用。王洪江等^[19]则探索了双重絮凝工艺对超细尾砂浓密脱水性能的提升效果,发现“阴离子+阳离子”组合效果最佳,显著提高了底流浓度和沉降速度。温震江等^[20]采用响应面法优化了全尾砂浆絮凝沉降参数,为浓密机参数设

计提供了坚实的理论依据。陈格仲等^[21]分析了絮凝条件对尾砂絮团结构及固液分离效率的影响,通过优化絮凝条件,提高了浓密机沉降区的固液分离效率。彭青松等^[22]则研究了超声波对尾矿底流浓密效果及流变性的影响,发现超声波能显著提升底流浓度,改善浓密效果。ZHU L Y等^[23]进一步探究了超声波参数对全尾砂底流浓度的影响,揭示了在最佳参数下,超声波能显著提升底流质量浓度至71.75%,且20 kHz超声波通过机械振动和空化作用促进尾砂料浆的致密化,效果显著。

尽管上述研究在尾砂浓密领域已取得显著进展,但多侧重于单一因素或特定条件下的分析,且关于尾砂物理性质(特别是粒径和密度)与固体通量之间的定量关系研究尚显薄弱。鉴于此,本研究选取10座典型金属矿山的全尾砂样本,通过系统的静态沉降与动态浓密试验,深入探究尾砂物理性质对固体通量的影响机制,旨在构建尾砂物理性质与固体通量的定量关系模型,为矿山尾砂浓密处理提供科学的理论依据和技术支撑,以期实现尾砂资源的高效利用和矿山开采的可持续发展。

1 静态沉降试验过程及结果分析

1.1 尾砂物理特性分析

基于马尔文激光衍射系统(Mastersizer系列),对10座矿山的全尾砂样本进行了粒度分布测试,主要表征参数包括中值粒径(d_{50})及特征粒径(d_{60}),并结合标准比重瓶法(三次平行试验取均值)测定真密度,获得基础物理参数数据集(见表1)。由表1可知,矿山1至矿山4的尾砂颗粒分布呈超细粉体特征($d_{50} < 50 \mu\text{m}$),矿山5至矿山8的尾砂样本呈现中等粒径分布($50 \mu\text{m} \leq d_{50} \leq 100 \mu\text{m}$),而矿山9至矿山10的尾砂样本则具有典型的粗粒级特性($d_{50} > 100 \mu\text{m}$)。

表1 各矿山絮凝沉降试验结果汇总

Table 1 Summary of flocculation sedimentation test results from different mines

矿山编号	密度 $\gamma / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	粒径/mm		最佳矿浆稀释质量浓度 $C_0 / \%$	静态沉降试验底流质量浓度 $C_1 / \%$	最佳絮凝剂类型	絮凝剂单耗/ $(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$	固体通量 $q_t / (\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$
		中值粒径 d_{50}	特征粒径 d_{60}					
矿山1	2.100	0.027 5	0.037 7	16.9	52.8	83376	20	2.96
矿山2	2.287	0.022 1	0.031 5	11.2	44.6	83376	30	3.59
矿山3	2.582	0.032 8	0.041 5	14.2	54.1	83376	20	4.18
矿山4	2.909	0.046 1	0.059 0	13.8	56.2	6013S	15	5.67
矿山5	2.904	0.050 1	0.063 1	16.7	59.9	83 376	10	6.11
矿山6	2.560	0.054 8	0.072 3	14.2	59.4	AG9020	10	4.76
矿山7	2.752	0.061 3	0.081 2	15.7	61.3	83376	15	5.95

续表

矿山 编号	密度 $\gamma /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	粒径/mm		最佳矿浆稀释 质量浓度 $C_0 / \%$	静态沉降试验底流 质量浓度 $C_1 / \%$	最佳絮凝剂 类型	絮凝剂单耗/ ($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	固体通量 $q_t /$ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)
		中值粒径 d_{50}	特征粒径 d_{60}					
矿山 8	3.009	0.084 7	0.105 5	16.7	63.8	83376	7.5	7.27
矿山 9	2.701	0.107 7	0.138 6	15.2	67.3	83376	10	6.69
矿山 10	2.510	0.102 1	0.129 9	14.1	65.3	AG6025	10	5.54

1.2 静态沉降试验流程分析

以矿山 8 所产的尾砂为研究对象,开展了沉降试验。在确保料浆质量浓度恒定的条件下,分别向尾砂中添加了用量为 20 g/t 的 83376 型、AG9020 型及 665V 型 3 种阴离子絮凝剂。通过综合评估沉降速率、上清液透明度及底流质量浓度等多项指标,最终确定 83376 型絮凝剂为处理矿山 8 尾砂的最优选择。

1.2.1 絮凝剂最佳单耗确定

为确定矿山 8 尾砂的最佳絮凝剂(83376 型絮凝剂)单耗,选取 20.9%、18.3%、16.6%、14.5% 这 4

种不同的料浆质量浓度,并分别按照 5.0 g/t、7.5 g/t、10.0 g/t 3 种絮凝剂添加量进行平行试验,试验结果如图 1 所示。

图 1 展示了矿山 8 尾砂在不同料浆质量浓度下的沉降效果随絮凝剂添加量的变化关系。观察发现,当絮凝剂单耗处于 5.0 g/t 至 10.0 g/t 区间内时,尾砂的沉降效果与絮凝剂添加量呈正相关关系,即随着絮凝剂单耗的增加,沉降效果也相应得到提升。当絮凝剂单耗超过 7.5 g/t 时,沉降效果的改善趋势放缓。因此,确定 83376 型絮凝剂的最佳单耗为 7.5 g/t。

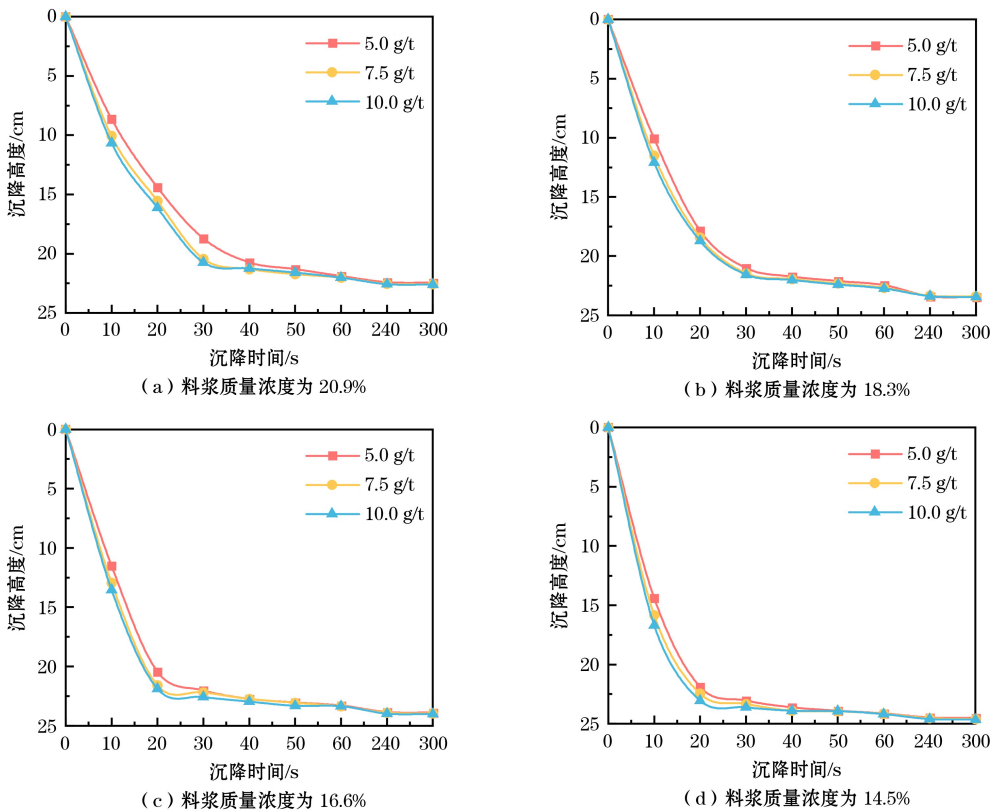


图 1 不同料浆质量浓度下的尾砂沉降曲线

Fig.1 Sedimentation curves of tailings under different slurry mass concentrations

1.2.2 最佳稀释浓度和静态沉降试验固体通量

静态沉降试验的固体通量是指:尾砂在量筒中,在自由沉降过程中(沉降曲线直线段)单位时间(1 h)、单位面积(m^2)内靠尾砂自重沉降的干尾砂质

量,固体通量与尾砂的自然沉降速度线性相关。通过分析固体通量和充填料浆质量浓度的关系曲线(见图 2),确定矿山 8 充填料浆的最佳质量浓度为 16.7%,此时固体通量达到最大值 $7.27 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

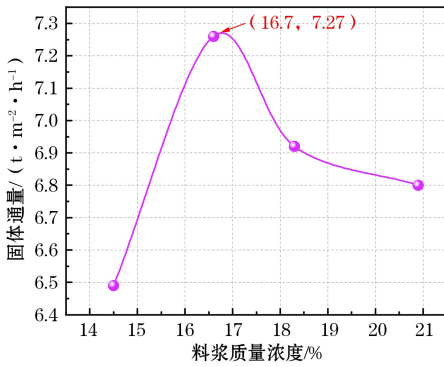


图2 静态沉降情况下固体通量与料浆质量浓度的关系

Fig.2 Relationship between solid flux and slurry mass concentration under static sedimentation

由此可知,将矿浆质量浓度稀释至16.7%,并选用83376型絮凝剂,且将其单耗控制在7.5 g/t,即可实现矿山8尾砂的最优絮凝沉降效果。

1.2.3 沉降试验结果汇总

表1全面汇总了10座矿山全尾砂的粒径分布、密度特性,以及各自所适用的最佳絮凝剂类型、絮凝剂单耗、矿浆稀释浓度和固体通量等相关参数数据。

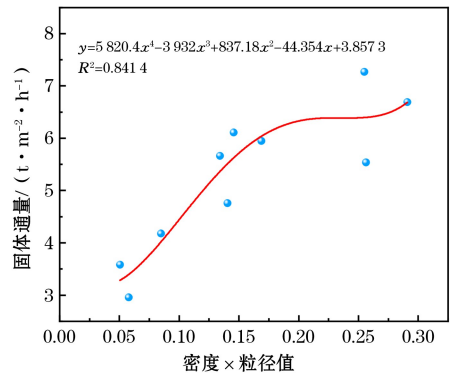
2 尾砂物理性质与固体通量的关联性探究

试验数据表明,尾砂的沉降行为与其粒度特征及物质密度具有显著相关性。根据表1的实测结果,较大粒径和高密度颗粒在流体介质中表现出更显著的沉降速度优势。为深入揭示其作用机理,本研究系统考察了粒径-密度复合参数与固体通量的定量关系。

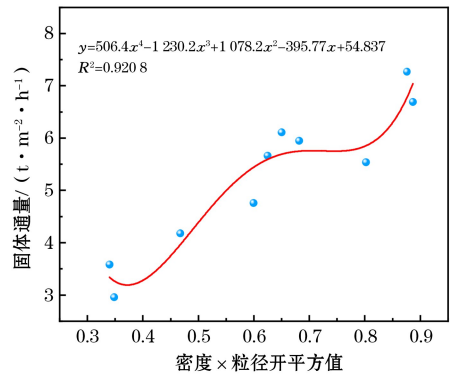
2.1 尾砂粒径、密度乘积与固体通量的关联性分析

如图3(a)所示,直接采用原始中值粒径与密度的乘积参数时,其与固体通量未形成显著的单变量关联规律,即使采用四次多项式模型,决定系数仅为0.8414。通过引入粒径参数的平方根校正,如图3(b)所示,复合参数的非线性响应特性明显改善,模型拟合优越度提升至0.9208。

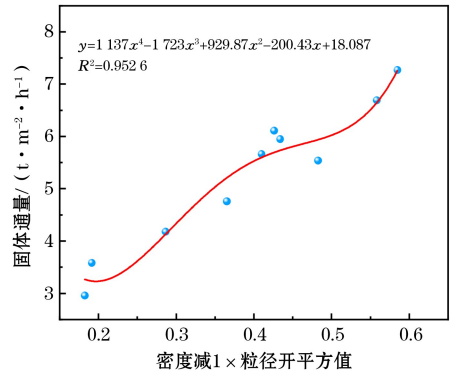
基于斯托克斯沉降理论中浮力作用的力学分析(流体密度取 1 g/cm^3),对密度参数进行浮力校正处理 $(\gamma-1)$ 。如图3(c)所示,校正后的复合参数与固体通量展现出更强的非线性关联,四次多项式模型的决定系数达到0.9526。值得注意的是,该参数组合同时呈现出良好的线性响应特性,如图3(d)所示,一元线性回归模型的决定系数达到0.9402,这为工程应用中的简化计算提供了理论依据。



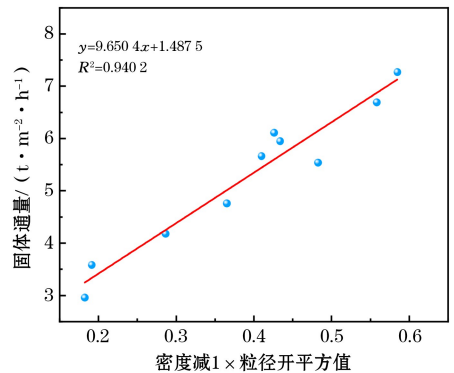
(a) 密度、粒径与固体通量的非线性关系



(b) 密度、粒径开平方与固体通量的非线性关系



(c) 密度减1、粒径开平方与固体通量的非线性关系



(d) 密度减1、粒径开平方与固体通量的线性关系

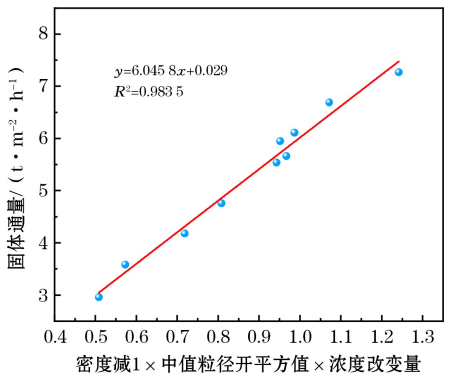
图3 尾砂中值粒径、密度与固体通量的关系

Fig.3 Relationship between median particle size, density and solid flux of tailings

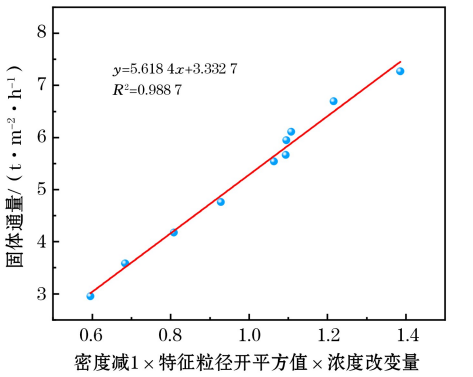
2.2 尾砂粒径、密度、料浆质量浓度乘积与固体通量的关联性分析

基于同源尾砂的絮凝沉降试验研究表明,在絮凝剂类型与絮凝剂单耗固定的条件下,矿浆初始质量浓度对沉降动力学过程有显著影响。试验数据显示,固体通量与浓度变化值之间通常呈负相关关系,具体表现为底流浓度与初始浓度的偏差值增大时,固体通量相应降低。

如图4所示,引入尾砂的中值粒径或特征粒径的开平方值、密度与料浆质量浓度的复合参数时,该参数与固体通量之间呈显著线性关系,其定量关系见式(1)和式(2)。从物理意义上分析:当体系不存在固体颗粒($d_{50}=0$)时,式(1)预测的底流质量浓度变化量仅为 -2.9% ,而式(2)在 $d_{60}=0$ 条件下得出底流质量浓度变化量为 -33.27% 。对比可知,式(1)的预测偏差较式(2)降低一个数量级,说明基于中值粒径 d_{50} 的多元线性回归模型具有更优的工程适用性。



(a) 密度、中值粒径、浓度改变量与固体通量的线性关系



(b) 密度、特征粒径、浓度改变量与固体通量的线性关系

图4 尾砂密度、粒径、浓度改变量与固体通量的线性关系
Fig.4 Linear relationship between variations in tailings density, particle size, concentration and solid flux

$$q_t = \frac{6.0458 \times (\gamma - 1) \times \sqrt{d_{50}}}{C_1 - C_0} - 0.029 \quad (1)$$

$$q_t = \frac{5.6184 \times (\gamma - 1) \times \sqrt{d_{60}}}{C_1 - C_0} - 0.3327 \quad (2)$$

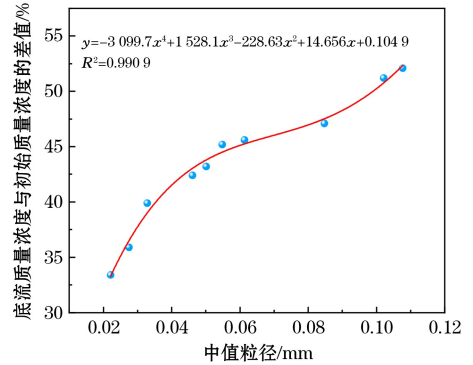
式中: q_t 为固体通量, $t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$; γ 为尾砂密度, $g \cdot cm^{-3}$; C_1 为静态絮凝沉降试验料浆底流浓度, $\%$; C_0 为料浆初始浓度(给料浓度), $\%$; d_{50} 为尾砂中值粒径, mm ; d_{60} 为尾砂特征粒径, mm 。

2.3 尾砂粒径与料浆质量浓度变化量的关系以及尾砂粒径、密度与固体通量的综合关系

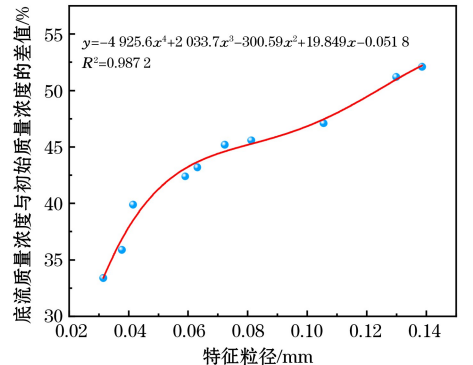
表1数据还表明,尾砂粒径越粗,其底流浓度越高。沉降试验进一步显示,料浆初始浓度越高,底流浓度也增大。因此,需要考虑料浆质量浓度变化量(底流浓度与初始浓度的差值)与尾砂粒径之间的关系。

试验数据表明,粒径分布特征与料浆质量浓度演变显著相关:粗颗粒尾砂具有更高的底流浓度(表1),且该趋势随初始浓度提高更为明显。这表明有必要建立粒径参数(d_{50} 、 d_{60})与料浆质量浓度变化量之间的定量关系模型。

图5展示了尾砂中值粒径 d_{50} 和特征粒径 d_{60} 与浓度变化量之间的函数关系,其拟合程度接近99%。结果表明,仅通过尾砂的中值粒径和特征粒径即可有效预测料浆质量浓度变化量。对应函数关系见式(3)和式(4)。



(a) 尾砂中值粒径



(b) 尾砂特征粒径

图5 尾砂粒径与质量浓度变化量的非线性关系
Fig.5 Nonlinear relationship between tailings particle size and mass concentration variation

非线性回归分析进一步证实,中值粒径与特征粒径分别与料浆质量浓度变化量呈强相关性(决定系数达0.99)。

从物理约束条件分析:当系统中不含固体颗粒时,理论上料浆质量浓度变化量应趋近于0。式(3)在 $d_{50}=0$ 时得出料浆质量浓度变化量为

$$C_1 - C_0 = -3\ 099.7d_{50}^4 + 1\ 528.1d_{50}^3 - 228.63d_{50}^2 + 14.656d_{50} + 0.104\ 9 \quad (3)$$

$$C_1 - C_0 = -4\ 925.6d_{60}^4 + 2\ 033.7d_{60}^3 - 300.59d_{60}^2 + 19.849d_{60} - 0.051\ 8 \quad (4)$$

$$q_1 = \frac{6.045\ 8 \times (\gamma - 1) \times \sqrt{d_{50}}}{-4\ 925.6d_{60}^4 + 2\ 033.7d_{60}^3 - 300.59d_{60}^2 + 19.849d_{60} - 0.051\ 8} - 0.029 \quad (5)$$

式中, $C_1 - C_0$ 为料浆质量浓度改变量,%。

3 动态浓密试验过程及结果

3.1 动态浓密试验装置与操作流程

动态浓密装置(见图6)仿照深锥浓密机设计,采用4个蠕动泵分别泵送稀释水、絮凝剂、尾矿矿浆进入给料系统,并从底部泵出底流矿浆。稀释水为自来水,絮凝剂添加量参考静态试验数据,矿浆配成10%~18%的质量浓度后搅拌均匀并泵入管道。通过调整蠕动泵转速,模拟不同工况下的浓密试验结果。泥层高度达到150 mm和240 mm时,分别取样测量溢流水和底流浓度。动态浓密装置试验所得的固体通量值和底流浓度,与深锥浓密机现场工业试验的结果高度一致。

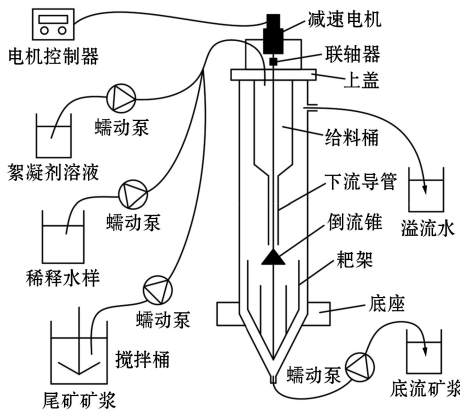


图6 动态浓密试验装置示意

Fig.6 Schematic diagram of dynamic thickening test apparatus

3.2 动态浓密试验

根据全尾砂静态絮凝沉降试验确定的最佳絮凝剂类型、单耗及矿浆稀释浓度,对来自10座不同矿山的尾砂,在不同给料速度下,分别研究了其对溢流水澄清度及动态浓密试验固体通量的影响,试验结果见表2。动态浓密沉降试验中的固体通量,又称

底流量,指动态浓密装置在单位时间(1 h)、单位面积(m^2)内处理尾砂的能力,即底部持续排出的高浓度砂浆的干重。该参数与尾砂的自然沉降速度、干涉沉降效应及挤压沉淀速率密切相关。由表2可知,随着给料速度的增加,底流量呈上升趋势,同时溢流水中的含固量也随之增加。这主要是因为给料速度的提高缩短了尾矿颗粒的絮凝反应时间,导致絮凝过程不够充分,进而使得溢流水中的含固量增加。

表2 动态浓密试验结果

Table 2 Results of dynamic thickening tests

矿山编号	给料速度 $v/$ (L/min)	给料质量浓度 $C_0/$ %	底流质量浓度 $C_2/$ %	底流量 $q_c/$ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	溢流水含固量 $f/$ (mg/L)
矿山1	0.129	16.9	70.0	0.182	47.98
	0.165	16.9	67.9	0.233	77.95
	0.192	16.9	67.8	0.272	95.88
	0.238	16.9	67.1	0.338	125.91
	0.274	16.9	66.9	0.388	155.72
	0.301	16.9	66.6	0.427	266.78
矿山2	0.330	16.9	66.4	0.468	353.01
	0.292	11.2	54.5	0.267	91.02
	0.403	11.2	54.1	0.368	96.73
	0.484	11.2	53.3	0.442	114.85
	0.614	11.2	52.8	0.561	194.87
矿山3	0.723	11.2	52.3	0.661	322.04
	0.311	14.2	67.9	0.369	57.95
	0.368	14.2	67.8	0.437	93.88
	0.441	14.2	67.1	0.525	125.73
	0.556	14.2	66.9	0.660	235.89
	0.695	14.2	64.4	0.826	373.05
矿山4	0.504	13.8	72.6	0.585	63.01
	0.588	13.8	71.9	0.682	100.88
	0.714	13.8	69.3	0.828	186.99
	0.748	13.8	67.8	0.867	216.13
	0.864	13.8	66.9	1.002	311.82
矿山5	0.427	16.7	73.0	0.612	74.08
	0.516	16.7	72.7	0.739	95.71
	0.613	16.7	72.2	0.878	195.92
	0.677	16.7	71.4	0.970	325.86

续表

矿山编号	給料速度 v / (L/min)	給料质量浓度 C_0 / %	底流质量浓度 C_2 / %	底流通量 q_c / (t · m ⁻² · h ⁻¹)	溢流水含固量 f / (mg/L)
矿山 6	0.438	14.2	72.5	0.520	64.96
	0.547	14.2	72.2	0.650	124.01
	0.623	14.2	71.9	0.740	194.23
	0.665	14.2	71.3	0.790	246.83
	0.715	14.2	70.8	0.850	341.68
矿山 7	0.480	15.7	74.9	0.639	56.51
	0.620	15.7	73.6	0.827	168.43
	0.680	15.7	72.9	0.907	225.86
	0.789	15.7	71.4	1.052	353.26
矿山 8	0.451	16.7	78.8	0.648	88.11
	0.493	16.7	78.7	0.709	91.00
	0.557	16.7	78.6	0.799	106.80
	0.662	16.7	77.1	0.951	194.86
	0.782	16.7	73.4	1.123	323.76
	矿山 9	0.250	15.2	81.7	0.321
0.310		15.2	81.1	0.398	79.85
0.515		15.2	80.8	0.662	125.73
0.652		15.2	79.4	0.838	155.84
0.777		15.2	78.6	0.998	290.93
0.898		15.2	77.5	1.153	462.12
矿山 10	0.451	14.1	78.1	0.531	71.74
	0.598	14.1	77.9	0.704	122.85
	0.689	14.1	77.4	0.812	190.03
	0.843	14.1	76.8	0.993	282.97
	0.977	14.1	76.4	1.151	368.13

4 尾砂物理性质与固体通量的关系

根据物质守恒定律,流入动态浓密装置的尾砂总量与排出的尾砂总量相等。根据溢流水排放标准,溢流水中的含固量不能超过 300 mg/L,因此溢流水中排出的尾砂质量可以忽略不计。由此可知,給料速度与底流通量成正比。以矿山 9 为例,该矿山給料速度与底流通量的关系见表 3 和图 7。在本次试验中,不同給料速度下试验对应的溢流水含固量范围为 50~400 mg/L。

表 3 各矿山給料速度与底流通量和溢流水含固量的关系

Table 3 Relationship between feeding rate, underflow flux, and solid content in overflow water for different mines

矿山编号	給料速度 v 与底流通量 q_c 的关系	給料速度 v 与溢流水含固量 f 的关系
矿山 1	$q_c=1.417 2v$	$f=69 569v^3-39 178v^2+7 823.3v-457.74$
矿山 2	$q_c=0.913 6v$	$f=2 077.7v^3-1 413.6v^2+267.91v+81.732$
矿山 3	$q_c=1.188 8v$	$f=-1 937.2v^3+3 827.4v^2-1 494.4v+213.99$
矿山 4	$q_c=1.159 8v$	$f=-1 825.2v^3+4 449.3v^2-2 773.1v+564.09$
矿山 5	$q_c=1.433 4v$	$f=7 688v^3-7 703.9v^2+2 366.3v-130.21$
矿山 6	$q_c=1.188 2v$	$f=8 899.3v^3-12 457v^2+6 314.7v-1 058.8$
矿山 7	$q_c=1.333 3v$	$f=1 350.8v^3-1 589.1v^2+1 311.5v-355.99$
矿山 8	$q_c=1.436 6v$	$f=-4 935v^3+11 128v^2-7 250v+1 548.5$
矿山 9	$q_c=1.284 8v$	$f=2 525v^3-3 102v^2+1 419.7v-135.72$
矿山 10	$q_c=1.177 6v$	$f=-1 430.6v^3+3 350.8v^2-1 934.7v+393.05$

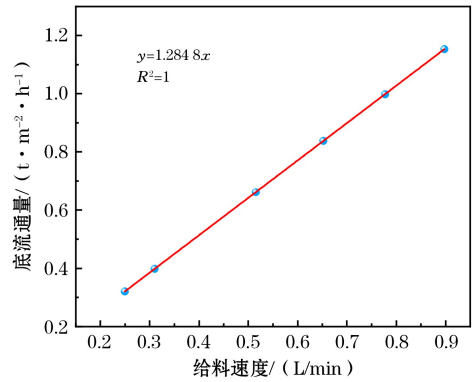


图 7 矿山 9 料浆給料速度与底流通量的关系

Fig.7 Relationship between the feeding rate of tailings slurry and underflow flux for mine 9

4.1 料浆給料速度与溢流水含固量的关系

料浆給料速度是影响选厂尾砂输送系统设计和深锥浓密机浓密能力的重要指标。給料速度主要根据浓密效果,尤其是溢流水含固量确定。以矿山 9 为例,该矿山的尾砂料浆給料速度与溢流水含固量关系见图 8。在图 8 中同时给出了給料速度与溢流水含固量的拟合曲线,以及用三次多项式拟合的曲线方程与拟合度。10 座矿山給料速度与溢流水含固量的关系见表 3。

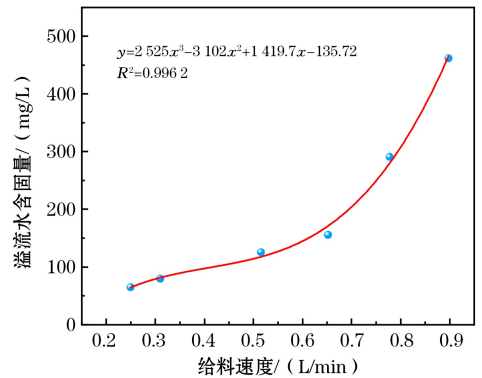


图 8 矿山 9 料浆給料速度与溢流水含固量关系图

Fig.8 Relationship between the feeding rate of tailings slurry and the solid content in overflow water for mine 9

4.2 固体通量和底流通量的关系及尾砂粒径、密度与固体通量的关系

固体通量是确定浓密机面积的主要参数,当溢流水中含固量分别为 200, 240, 270, 300 mg/L 时,静态沉降试验装置和动态浓密试验装置处理这 10 座矿山尾砂的能力(固体通量和底流通量)见表 4。

表4 固体通量与给料速度、溢流水含固量的关系

Table 4 Relationship between solid flux and feeding rate, solid content in overflow water

矿山名称	固体通量/ ($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	溢流水含固量 200 mg/L		溢流水含固量 240 mg/L		溢流水含固量 270 mg/L		溢流水含固量 300 mg/L	
		给料速度/ (L/min)	底流量/ ($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	给料速度/ (L/min)	底流量/ ($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	给料速度/ (L/min)	底流量/ ($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	给料速度/ (L/min)	底流量/ ($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)
矿山 1	2.96	0.285	0.404	0.299	0.424	0.309	0.437	0.317	0.449
矿山 2	3.59	0.620	0.566	0.660	0.603	0.685	0.626	0.708	0.647
矿山 3	4.18	0.521	0.619	0.563	0.669	0.593	0.705	0.623	0.741
矿山 4	5.67	0.729	0.846	0.778	0.902	0.813	0.943	0.849	0.985
矿山 5	6.11	0.615	0.882	0.638	0.914	0.653	0.935	0.666	0.955
矿山 6	4.76	0.629	0.748	0.659	0.783	0.678	0.806	0.695	0.826
矿山 7	5.95	0.654	0.872	0.694	0.925	0.721	0.961	0.747	0.996
矿山 8	7.27	0.668	0.960	0.706	1.014	0.733	1.053	0.760	1.092
矿山 9	6.69	0.695	0.893	0.741	0.952	0.769	0.988	0.794	1.020
矿山 10	5.54	0.716	0.843	0.781	0.920	0.827	0.974	0.864	1.017

结合表1、表2和表4可知,动态浓密沉降试验底流质量浓度要比静态絮凝沉降试验底流质量浓度高出10%~15%,这说明经过动态浓密装置(深锥浓密机)处理后料浆的底流浓度要比静态沉降装置(立式砂仓)处理后料浆的底流高,低浓度的砂浆经过动态浓密装置处理后可以稳定输出高浓度的砂浆,且溢流水含固量不会超标,这表明深锥浓密机可以更加有效地提高底流浓度、有利于提高井下充填体

强度、增强料浆高浓度输送的可靠性。

静态絮凝沉降试验与动态浓密试验固体通量的关系以及尾砂粒径、密度与固体通量的关系见图9及式(6)至式(9)。图9中给出了固体通量 q_t 与底流量 q_c 的拟合曲线及用二次多项式拟合的曲线方程与拟合度。由式(5)至式(9)可知,只要知道某矿山尾砂的粒径和密度,就能预测出静态絮凝沉降试验与动态浓密试验的固体通量,计算出该矿山深锥浓密机的面积大小。

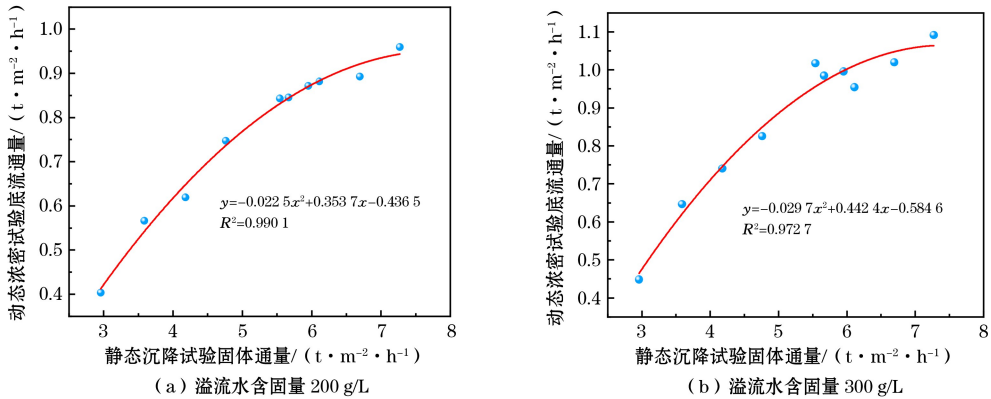


图9 固体通量与底流量的非线性关系

Fig.9 Nonlinear relationship between solid flux and underflow flux

$$q_c = -0.0225q_t^2 + 0.3537q_t - 0.4365 \quad (6)$$

(溢流水含固量 200 mg/L)

$$q_c = -0.0256q_t^2 + 0.3915q_t - 0.4987 \quad (7)$$

(溢流水含固量 240 mg/L)

$$q_c = -0.0278q_t^2 + 0.4193q_t - 0.5462 \quad (8)$$

(溢流水含固量 270 mg/L)

$$q_c = -0.0297q_t^2 + 0.4424q_t - 0.5846 \quad (9)$$

(溢流水含固量 300 mg/L)

4.3 深锥浓密机面积设计与稀释浓度协同控制策略

深锥浓密机面积设计与稀释浓度协同控制策略

是基于尾砂粒径、密度及料浆质量浓度变化量的综合考量而提出的。该策略的核心在于通过优化深锥浓密机的设计面积和初始料浆的稀释浓度,以实现最佳的浓密效果和经济效益。

(1) 首先,根据尾砂的粒径分布和真密度,利用已建立的粒径-密度复合参数预测模型,估算出在不同稀释浓度下可能达到的底流浓度和固体通量。

(2) 结合生产实际和浓密机处理能力,选择一个既能保证较高底流浓度,又能避免浓密机过载的初始料浆稀释浓度。

(3) 基于预计的固体通量和所需的底流浓度,

利用固体通量预测模型反算推出所需的深锥浓密机面积。同时,考虑浓密机的操作弹性和维护便利性,对设计面积进行适当调整。

(4) 在实际生产过程中,根据尾砂性质的波动和浓密效果的反馈,适时调整稀释浓度和深锥浓密机的操作参数,以实现协同控制,确保浓密效果的稳定性及浓密作业的高效率。

通过上述协同控制策略的实施,可有效提高尾砂浓密过程的效率和稳定性,降低生产成本,同时满足环保和安全生产的要求。

5 结论

(1) 基于 10 座典型金属矿山全尾砂样本的粒度分布与真密度参数测定,结合静态-动态联合试验体系,创新构建了尾砂物理性质与固体通量的定量关系模型。该模型表明,固体通量与尾砂中值粒径平方根及密度修正值之间成显著正相关($R^2 \geq 0.94$),为尾砂浓密过程提供了精准预测工具,显著提升了固体通量预测的科学性与可靠性。

(2) 在动态浓密条件下,研究发现尾砂浆給料速度与固体通量成线性正相关,而溢流水含固量对固体通量阈值具有明显约束作用。通过非线性回归分析建立的粒径-密度复合参数预测方程,不仅深化了对尾砂浓密机理的理解,也为深锥浓密机选型设计及工艺参数优化提供了理论依据,实现了理论模型与工程应用的有机结合。

(3) 对比试验表明,动态浓密装置可使底流质量浓度提高 10%~15%,显著增强了料浆输送的稳定性与充填体强度。基于粒径-密度复合参数与浓度变化量的耦合模型,创新提出了深锥浓密机面积设计与稀释浓度协同控制策略,为尾砂资源高效利用及矿山智能充填提供了关键技术支撑,可为推动矿山的可持续发展提供帮助。

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] 黄敏,王晓军,邱纪香,等.倾斜中厚矿体阶段空场嗣后充填采矿工艺优化研究[J].矿业科学学报,2024,9(4):483-492.

HUANG Min, WANG Xiaojun, QIU Jixiang, et al. Optimization of mining method for stage open-stopping with backfill of inclined medium-thick orebody [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(4):483-492.

[4] 李翠平,陈格仲,阮竹恩,等.尾砂浓密全过程的絮团结构动态演化规律[J].中国有色金属学报,2023,33(4):1318-1332.

LI Cuiping, CHEN Gezhong, RUAN Zhuen, et al. Dynamic evolution law of floc structure in whole process of tailings thickening[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(4):1318-1332.

[5] 刘娟红,周在波.细粒级金属尾砂的综合利用及在矿山充填中存在的问题和对策[J].金属矿山,2022(7):240-249.

LIU Juanhong, ZHOU Zaibo. Comprehensive utilization of ultra-fine metal tailings and its problems and countermeasures in the application of backfill materials[J]. Metal Mine, 2022(7):240-249.

[6] 王洪江,杨亚楠,郭佳宾.基于双重絮凝的超细尾砂浓密脱水性能及絮凝机制[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(9):3597-3608.

WANG Hongjiang, YANG Ya'nan, GUO Jiabin. Thickening dehydration performance and flocculation mechanism of ultrafine tailings based on dual flocculation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(9):3597-3608.

[7] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.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,2024,34(5):1652-1666.

WU Aixiang, ZHANG Jinjun, WANG Yiming, et al. Cemented paste backfill: transformative technology for green mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(5):1652-1666.

[8] 李勇明,乔登攀,杨天雨,等.基于响应面法的全尾砂浆絮凝沉降多因素交互影响及参数优化研究[J].有色金属科学与工程,2024,15(6):901-910.

LI Yongming, QIAO Dengpan, YANG Tianyu, et al. Study on multiple factor interaction and parameter optimization of flocculation sedimentation of unclassified tailings slurry based on response surface method[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024, 15(6):901-910.

[9] 史采星,郭利杰,陈新.全尾砂静态絮凝沉降特性[J].中国有色金属学报,2021,31(1):194-202.

SHI Caixing, GUO Lijie, CHEN Xin. Static and dynamic flocculation sedimentation characteristics of unclassified tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1):194-202.

[10] 徐帅,周兴龙,刘肖楚,等.浓密机发展历程、分类及其高效化改进研究现状[J].金属矿山,2021(5):167-176.

XU Shuai, ZHOU Xinglong, LIU Xiaochu, et al. Development process, classification and high efficiency modification status of the thickener[J]. Metal Mine, 2021(5):167-176.

- [11] 袁兆麟,何润姿,姚超,等.基于强化学习的浓密机底流浓度在线控制算法[J].自动化学报,2021,47(7):1558-1571.
YUAN Zhaolin, HE Runzi, YAO Chao, et al. Online reinforcement learning control algorithm for concentration of thickener underflow[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7):1558-1571.
- [12] 王勇,曹晨,吴爱祥.深锥固体通量与絮凝剂单耗和料浆浓度的数学关系[J].工程科学学报,2021,43(10):1269-1275.
WANG Yong, CAO Chen, WU Aixiang. Mathematical relationship between the solid flux of deep cone thickener, flocculant unit consumption, and slurry concentration[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(10):1269-1275.
- [13] 阮竹恩,吴爱祥,焦华喆,等.我国全尾砂料浆浓密研究进展与发展趋势[J].中国有色金属学报,2022,32(1):286-301.
RUAN Zhuen, WU Aixiang, JIAO Huazhe, et al. Advances and trends on thickening of full-tailings slurry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(1):286-301.
- [14] YIN S H, HOU Y Q, YANG S X, et al. 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, 2022, 17:e01525.
- [15] 诸利一,杨鹏,吕文生.全尾砂絮凝沉降与浓密影响因素试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(8):59-64.
ZHU Liyi, YANG Peng, LYU Wensheng. Experimental study on influencing factors of flocculation sedimentation and thickening of unclassified tailings[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(8):59-64.
- [16] 杨莹,吴爱祥,王先成,等.基于图像处理的尾砂絮凝沉降与浓密机关键参数研究[J].矿业研究与开发,2023,43(6):68-76.
YANG Ying, WU Aixiang, WANG Xiancheng, et al. Study on flocculation and sedimentation of tailings based on image processing and the key parameters of thickener[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6):68-76.
- [17] JIAO H Z, WU Y C, WANG H, et al. Micro-scale mechanism of sealed water seepage and thickening from tailings bed in rake shearing thickener [J]. Minerals Engineering, 2021, 173:107043.
- [18] 王石,刘武,宋学朋,等.基于水分迁移的不同质量分数全尾砂浆液液面沉降规律[J].中国矿业大学学报,2023,52(1):63-75.
WANG Shi, LIU Wu, SONG Xuepeng, et al. Settlement law of muddy liquid surface of unclassified tailings mortar with different mass fractions based on water migration[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1):63-75.
- [19] 王洪江,王小林,张玺,等.超细全尾砂深锥动态絮凝浓密试验[J].工程科学学报,2022,44(2):163-169.
WANG Hongjiang, WANG Xiaolin, ZHANG Xi, et al. Deep cone dynamic flocculation thickening of ultrafine full tailings[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(2):163-169.
- [20] 温震江,杨晓炳,李立涛,等.基于RSM-BBD的全尾砂絮凝沉降参数选择及优化[J].中国有色金属学报,2020,30(6):1437-1445.
WEN Zhenjiang, YANG Xiaobing, LI Litao, et al. Selection and optimization of flocculation sedimentation parameters of unclassified tailings slurry based on RSM-BBD [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(6):1437-1445.
- [21] 陈格仲,李翠平,阮竹恩,等.膏体充填中絮凝条件对絮团结构及固液分离效率的影响[J].中国有色金属学报,2022,32(10):3169-3182.
CHEN Gezong, LI Cuiping, RUAN Zhuen, et al. Influence of flocculation conditions on floc structure and solid-liquid separation in cemented paste filling [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(10):3169-3182.
- [22] 彭青松,王洪江,邢鹏,等.超声波作用对尾矿底流浓密效果及流变性的影响[J].中国有色金属学报,2021,31(5):1377-1387.
PENG Qingsong, WANG Hongjiang, XING Peng, et al. Influence of ultrasonic irradiation on thickening effect and rheology of tailings underflow[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(5):1377-1387.
- [23] ZHU L Y, LYU W S, YANG P, et al. Effect of ultrasound on the flocculation-sedimentation and thickening of unclassified tailings [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 66:104984.