

# 某矿超细尾砂絮凝沉降特性实验研究

Experimental Study on Flocculation Settling Properties of Superfine Tailings of a Certain Mine

耿碧瑶, 温震江, 任海锋, 郭晓刚, 付建勋(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘要:**本文以某矿全尾砂为材料进行试验研究,通过对该矿全尾砂物化特性进行分析,得到该矿全尾砂粒径分布特征,确定该矿全尾砂为超细尾砂,级配较好但连续性不稳定。通过絮凝剂选型实验,得到645S型絮凝剂对尾砂沉降的效果最好;通过尾砂絮凝沉降实验,得到尾砂浓度为7.5%、10%、12.5%时的最佳絮凝剂单耗量为40 g/t、40 g/t、60 g/t,而尾砂浓度15%时不满足生产需要;通过多元线性回归分析,得到了具有较好统计学意义的尾砂浆浓度、絮凝剂单耗量与180 s内平均沉降速度的回归方程。综合实验结果,最佳沉降条件下,尾砂浆浓度越高,澄清层高度越低、平均沉降速度越低、压实层治理浓度越低,即尾砂的沉降效果越差。虽然自然沉降时24 h后压实层质量浓度较添加絮凝剂时更高,但自然沉降的所需时间更长,无法满足生产需要。因此添加合适量絮凝剂促进尾砂沉降是矿山充填过程中必要的措施。

**关键词:**超细尾砂; 絮凝沉降; 压缩沉降; 最佳沉降条件; 回归分析

**中图分类号:** TD989 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)06-0068-05

**Abstract:** This article conducts experimental research on a certain mine's tailings as material, by analyzing the physicochemical characteristics of the tailings in the mine, the particle size distribution characteristics of the tailings were obtained and determined that the tailings of the mine are superfine tailings with good gradation but unstable continuity. Through flocculants selection experiments, it was found that the 645S flocculants has the best effect on settling tailings; through tailings flocculation settling experiments, it was found that the optimal flocculants consumption for tailings with concentrations of 7.5%, 10%, and 12.5% were 40 g/t, 40 g/t, and 60 g/t, when the tailings concentration was 15%, it did not meet production requirements; through multiple linear regression analysis, regression equations with good statistical significance were obtained for the concentration of tailings, unit consumption of flocculants, and average settlement velocity within 180 seconds; Based on the comprehensive experimental results, under the optimal settlement conditions, the higher the concentration of tailings, the lower the height of the clarification layer, the average settlement speed, and the concentration of compacted layer treatment, that is, the worse the settlement effect of tailings. Although the mass concentration of the compacted layer is higher after 24 hours of natural settlement compared to the addition of flocculants, the required time for natural settlement is longer and cannot meet production needs. Therefore, adding an appropriate amount of flocculants to promote tailings settlement is a necessary measure in the mining filling process.

**Key words:** superfine tailings; flocculent settling; compression settlement; optimal settlement conditions; regressive analysis

## 1 前言

随着采矿技术的发展及政策、安全要求,充填采矿方法因其具有不但可以防止地表塌陷、保证井下作业安全、减少地表尾砂堆存等优势<sup>[1-2]</sup>,已逐渐成为各个矿山的主要采矿方法<sup>[3]</sup>。同时,我国矿产资源经过多年的开采,多数矿山矿石资源存在低品位

的问题,随着选矿技术的发展,为了避免资源浪费,矿石越磨越细,也就造成尾砂粒度越来越细<sup>[4]</sup>。尾砂作为矿山充填的主要充填骨料,由选厂进入充填站后需要经过沉降至一定浓度后才可制备成高浓度充填料浆充填至地下采空区<sup>[5-6]</sup>,而尾砂较细时,会带来沉降速度慢、溢流浓度高等一系列问题,因此,如何制备高浓度充填料浆以满足充填体强度要求成为矿山充填的关键问题。

目前,国内外多数矿山多采用絮凝沉降技术来实现尾砂的沉降浓缩,添加絮凝剂对尾砂的加速沉降效果尤为明显。尾砂絮凝沉降效果受进砂浓度、絮凝剂选型、絮凝剂单耗等多个因素的影响,近年来,国内外许多学者对尾砂的絮凝沉降规律进行了大量研究,张钦礼<sup>[7]</sup>等通过实验研究得到了沉降效

[作者简介] 耿碧瑶(1987—),男,工程师,主要从事矿山充填及大宗工业固废资源化设计研究工作。

[基金项目] 高应力下金属矿规模化低放热高强充填体的成型技术与装备(课题项目号“2023YFC2907203 冶”);山东省重点研发计划(编号:2022CXPT032)。

[引用格式] 耿碧瑶,温震江,任海锋,等.某矿超细尾砂絮凝沉降特性实验研究[J].中国矿山工程,2024,53(6):68-72.

果最好的絮凝剂单耗、尾砂浓度以及各因素对沉降速度的影响程度;陈达<sup>[8]</sup>等通过实验研究得到了絮凝剂类型、絮凝剂单耗、给砂浓度、絮凝剂配置浓度对尾砂沉速的影响规律;Eswaraiah 等<sup>[9]</sup>以铁尾砂为原料,通过试验研究发现阴离子絮凝剂的絮凝效果更好;吴爱祥<sup>[10]</sup>等应用 Design-Expert 软件分析并筛选影响全尾砂絮凝沉降的重要因素,探究了单位面积处理量最大时各重要影响因素的最优值。

本文以某矿使用全尾砂制备充填料浆充填井下采空区为背景,研究不同絮凝剂类型、不同絮凝剂单耗、不同给砂浓度对尾砂絮凝沉降效果的影响规律,

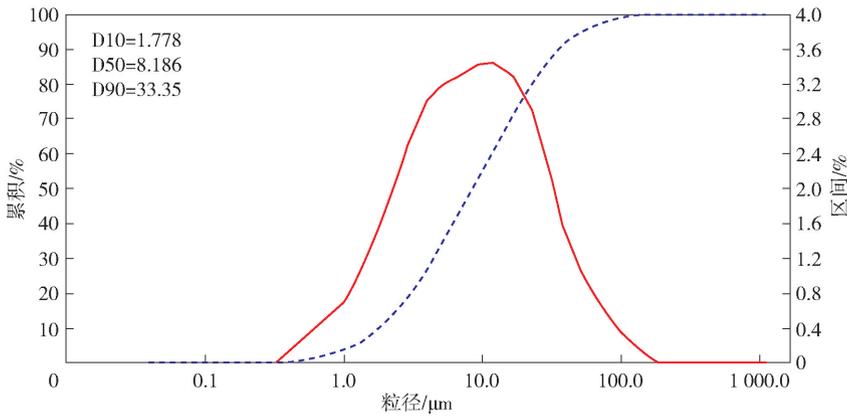


图1 尾砂粒级测试结果

分析表1及图1可知,该矿尾砂不均匀系数为 $6.25 > 5$ ,而曲率系数为 $0.92 < 1$ ,说明尾砂级配较好,但连续性不稳定;尾砂小于 $20 \mu\text{m}$ 的细粒级尾砂占 $78.5\%$ ,大于 $75 \mu\text{m}$ 的较粗尾砂占 $19.62\%$ ,说明该矿尾砂属于超细尾砂。

为充填系统设计提供依据。

## 2 尾砂物化特性分析

### 2.1 粒径分布测试

使用筛析法和激光粒度仪分析法对该矿全尾砂进行粒径分布测试,测得全尾砂特征参数见表1,测试结果如图1所示。

表1 尾砂特征参数表

| 粒径特征参数              | $d_{10}$ | $d_{30}$ | $d_{50}$ | $d_{60}$ | $d_{90}$ | $d_{av}$ |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 分布粒径/ $\mu\text{m}$ | 1.778    | 4.27     | 8.186    | 11.15    | 33.35    | 14.30    |

### 2.2 尾砂矿物成分分析

经测试分析,该矿全尾砂化学成分见表2。根据测试结果可知,该矿全尾砂的主要元素成分为Si、Al、K、Fe、Ca,有害元素S仅占 $0.33\%$ ,可忽略不计。对全尾砂进行XRD检测,检测结果显示全尾砂的主

表2 全尾砂化学成分含量表

| 组分 | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | CaO  | Fe   | $\text{K}_2\text{O}$ | MgO  | Mn    | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | S    | $\text{TiO}_2$ | Loss | 元素硫  |
|----|-------------------------|------|------|----------------------|------|-------|-----------------------|------------------------|------|----------------|------|------|
| 含量 | 13.99                   | 1.67 | 1.66 | 4.20                 | 0.64 | 0.098 | 0.91                  | 0.065                  | 0.33 | 67.26          | 0.15 | 4.28 |

要矿物成分为石英、云母、长石、石膏、方解石。

## 3 絮凝剂选型实验

本次实验拟使用的絮凝剂主要成分为聚丙烯酰胺,其按平均分子量可分为低分子量、中分子量和高分子量。按结构又可分为非离子型、阴离子型和阳离子型;根据已有研究及实际工程经验,不同型号的絮凝剂对尾砂的效果不尽相同。因此需要选择适合该矿全尾砂絮凝剂类型以最大程度提高沉降效果。

本次实验选择的絮凝剂型号有6000S,6003S,615S,625S,645S,655S,665S,695S,并分别将其制备为 $1 \text{ g/L}$ 的溶液,尾砂配置浓度为 $5\%$ ,絮凝剂添加量为 $60 \text{ g/t}$ ;同时设置未添加絮凝剂的尾砂料浆作

为对比实验组。

尾砂沉降可分为快速沉降和压缩沉降两个阶段,尾砂进入砂仓或浓密机后能否快速沉降是影响溢流浓度的主要因素,实验中快速沉降一般在 $180 \text{ s}$ 内完成,因此本实验只关注 $180 \text{ s}$ 内尾砂沉降情况。

实验结果显示,尾砂自然沉降速度缓慢且无法观察到明显的澄清层液面,添加各类型絮凝剂料浆沉降效果均优于自然沉降实验组。根据实验结果得到尾砂沉降高度随时间变化曲线如图2所示,不同絮凝剂尾砂沉降速度如图3所示。

由图2、图3可知,各实验组尾砂沉降规律基本

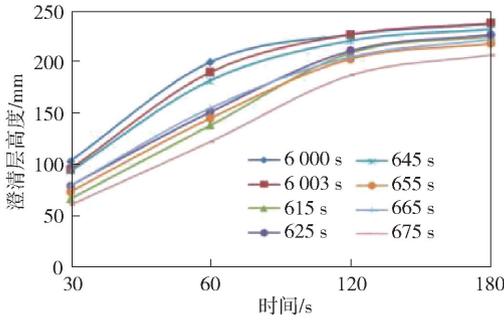


图2 尾砂沉降高度随时间变化曲线

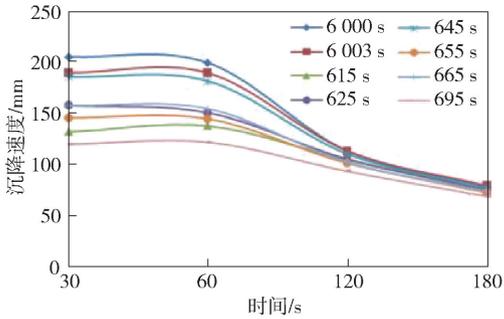


图3 尾砂沉降速度随时间变化曲线

相同,在60s内尾砂沉降速度最快,30s内沉降速度和60s内沉降速度基本相同;60s至120s时尾砂沉降速度急剧减小,澄清层高度随增长速率随之减小,120s至180s时沉降速度逐渐趋于稳定,澄清层高度变化不大,在180s时各实验组尾砂沉降速度基本相同。

结合料浆澄清层高度和速度结果,相同时间内澄清层高度最大、沉降速度最快的依次为6000S、

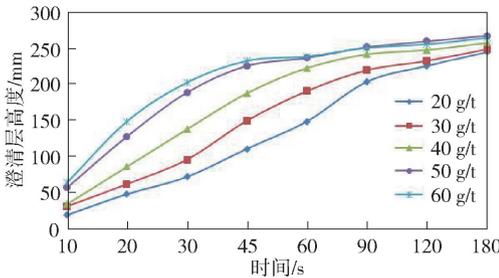
6003S、645S、665S、625S、65S5、615S、695S实验组;但料浆澄清层澄清度除645S实验组最好,695S实验组较好,655S、665S实验组一般外,其他实验组澄清层均较差;而645S实验组的澄清层高度和沉降速度与6000S、6003S相比相差无几,因此可以判断645S型絮凝剂对该矿尾砂的沉降效果更好。

## 4 尾砂絮凝沉降实验

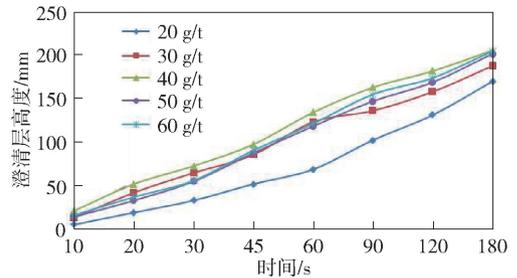
### 4.1 最佳沉降条件实验

根据絮凝剂选型实验结果,选用645S型絮凝剂作为实验用絮凝剂。分别配置浓度为7.5%、10%、12.5%、15%尾砂浆,其中7.5%和10%尾砂浆按照絮凝剂单耗20g/t、30g/t、40g/t、50g/t、60g/t,12.5%和15%尾砂浆按照絮凝剂单耗30g/t、40g/t、50g/t、60g/t、70g/t进行最佳沉降条件实验,探究不同尾砂浆浓度沉降效果最好的絮凝剂单耗量,实验仍以180s内尾砂沉降澄清层高度为评价指标。

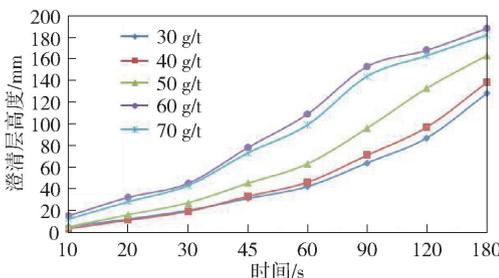
实验结果如图4所示。由图4(a)可知,各实验组尾砂前90s内澄清层高度增长较快,但增长速率逐渐减小,90s后澄清层高度变化趋于平缓,说明该浓度尾砂浆在添加各絮凝剂单耗量条件下,90s内基本完成了快速沉降过程。其中虽然添加50g/t、60g/t的实验组前期沉降速度较快,但90s后,添加40g/t的实验组澄清层高度与50g/t、60g/t实验组差距越来越小,且40g/t实验组的上清液澄清度优于50g/t、60g/t实验组,因此可以判断,尾砂浓度为7.5%时最优的絮凝剂单耗量为40g/t。由图4(b)可知,各实验组尾砂沉降规律与尾砂浓度7.5%各



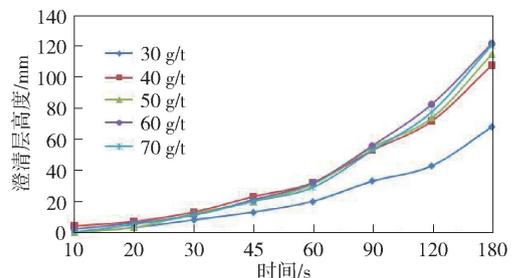
(a) 尾砂浓度7.5%



(b) 尾砂浓度10%



(c) 尾砂浓度12.5%



(d) 尾砂浓度15%

图4 尾砂浆澄清层高度随时间变化曲线

实验组沉降规律基本相同,90 s 内基本完成了快速沉降过程。当絮凝剂单耗为 40 g/t 时,澄清层高度在各时间点均最大,且上清液澄清度最优,说明此时尾砂沉降效果最好。

由图 4(c)可知,当絮凝剂单耗为 60 g/t、70 g/t,尾砂沉降规律与尾砂浓度 7.5% 各实验组沉降规律基本相同,90 s 内基本完成了快速沉降过程。当絮凝剂单耗为 30 g/t、40 g/t、50 g/t,前 60 s 内尾砂沉降速率较小,60 s 后尾砂沉降速率逐渐变大,但 180 s 内未完成快速沉降过程。分析图中曲线,絮凝剂单耗为 60 g/t,澄清层高度在各时间点均最大,且上清液澄清度最优,说明此时尾砂沉降效果最好。

由图 4(d)可知,各实验组尾砂 60 s 内沉降速率极低,澄清层高度变化不大,60 s 后沉降速率逐渐变大,但各实验组在 180 s 内均未完成快速沉降过程,结合上清液澄清度情况,除絮凝剂单耗为 60 g/t、70 g/t 实验组澄清度一般外,其他实验组澄清度均较差,因此可以判断,尾砂浓度为 15% 时无法满足生产需要。

### 4.2 最佳沉降条件对比分析

由最佳沉降条件实验结果得到各浓度尾砂浆最佳沉降曲线,具体如图 5 所示,最佳沉降条件下尾砂平均沉降速度如图 6 所示。

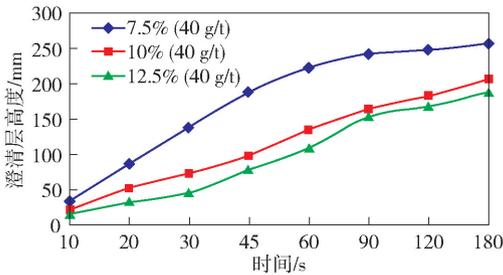


图 5 各浓度尾砂最佳沉降曲线

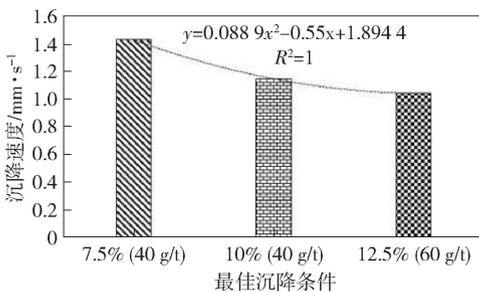


图 6 各浓度尾砂 180 s 平均沉降速度

分析图 5、图 6 可知:最佳沉降条件下,随着尾砂浆浓度的增加,澄清层高度及 180 s 内平均沉降速度逐渐降低,且絮凝剂单耗量逐渐增加,说明尾砂浆浓度越高,尾砂的沉降效果越差。

最佳沉降条件下各浓度尾砂浆 180 s 内平均沉降速度随浓度变化拟合曲线符合二次多项式, $R^2$  值接近 1,平均沉降速度预测效果较好。

### 4.3 平均沉降速度多元线性回归分析

以各尾砂浓度不同絮凝剂单耗条件下 180 s 内平均沉降速度为因变量,以尾砂浆浓度、絮凝剂单耗为自变量,进行多元线性回归分析,得到 180 s 内平均沉降速度回归方程:

$$v = 2.08 - 11.96X_1 + 0.0058X_2;$$

式中, $v$  为 180 s 内尾砂平均沉降速度,mm/s; $X_1$  为尾砂浆浓度; $X_2$  为絮凝剂单耗,g/t。

回归方程相关系数值 0.98,判定系数 0.95,显著性检验值为  $1.01 \times 10^{-8}$ ,回归方程中尾砂浆浓度 T 检验为  $2.42 \times 10^{-9}$ ,絮凝剂单耗量 T 检验为 0.000 1;回归方程计算得到的澄清层最大高度与实际值的平均误差为 4.17%,最大误差为 7.5%;说明回归方程具有较好统计学意义,预测模型效果较好。

由回归方程可知,尾砂浆浓度与平均沉降速度呈反向变化关系,而絮凝剂单耗与平均沉降速度呈同向变化关系。尾砂浆浓度系数值远大于絮凝剂单耗系数值,且尾砂浆浓度 T 检验值远小于絮凝剂单耗量 T 检验值,即尾砂浆浓度对平均沉降速度更加显著,因此可以判断,相较于絮凝剂单耗量,尾砂浆浓度对平均沉降速度的影响作用更大。

## 5 压缩沉降实验

按照最佳沉降条件配置 10%、12.5% 浓度尾砂浆并分别按照 40 g/t、60 g/t 絮凝剂单耗加入絮凝剂,同时配置 10%、12.5% 两组不添加絮凝剂的尾砂浆,分别记录 24 h 内尾砂浆压实层高度及压实层尾砂浆浓度,得到图 7、图 8 实验结果。

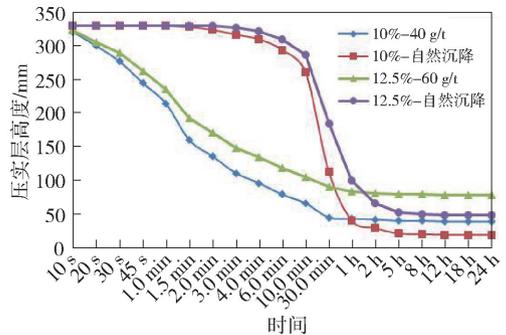


图 7 压实层高度随时间变化曲线

分析图 7、图 8 可知,

(1) 添加絮凝剂的实验组,前 1.5 min 内尾砂快速沉降,此时段为尾砂的快速沉降阶段,1.5 min 后

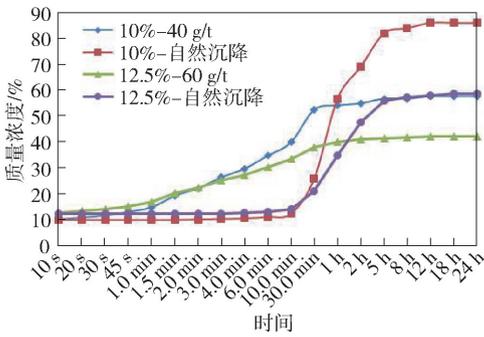


图8 压实层质量浓度随时间变化曲线

尾砂沉降速度较前期有所减小,此时尾砂沉降进入压缩沉降阶段。

(2)添加絮凝剂的实验组最佳沉降条件下压实层质量浓度及高度随时间变化规律基本相同,未添加絮凝剂的实验组最佳沉降条件下压实层质量浓度及高度随时间变化规律基本相同。添加絮凝剂的实验组,由于12.5%浓度尾砂浆沉降前质量浓度大于10%浓度尾砂浆,沉降开始后,12.5%浓度尾砂浆在一段时间内压实层质量浓度仍然大于10%浓度尾砂浆,但10%实验组尾砂沉降速度大于12.5%实验组,直至沉降2 min后,10%浓度尾砂浆压实层质量浓度反超12.5%浓度尾砂浆,两组实验均在30 min时压实层质量浓度达到峰值,此后压实层高度及质量趋于稳定。

(3)未添加絮凝剂的实验组,前10 min内,压实层高度及质量浓度基本无变化,10 min至5 h时段内,压实层高度及质量浓度迅速增加,并于30 min时10%实验组压实层质量浓度反超12.5%实验组,5 h后尾砂沉降速度再次变缓,压实层高度及质量浓度趋于稳定。

(4)由于添加絮凝剂的实验组,絮凝剂使尾砂絮结为团,虽然沉降速度增加,但颗粒间孔隙变大,因此最终沉降结束后,自然沉降实验组的质量浓度大于同浓度尾砂浆添加絮凝剂最佳沉降条件下的质量浓度。

(5)综合实验结果,虽然同浓度条件下自然沉降最终质量浓度大于添加絮凝剂时的质量浓度,但自然沉降时间过长,不满足生产需要,在生产过程中添加絮凝剂促使尾砂快速沉降便成为必要的措施。

## 6 结论

(1)该矿尾砂属于超细尾砂,级配较好,但连续性不稳定。

(2)通过絮凝剂选型实验得到对该矿尾砂沉降

效果最好的絮凝剂为645S型絮凝剂。

(3)尾砂浓度为7.5%、10%时的最佳絮凝剂单耗量为40 g/t;尾砂浓度为12.5%时的最佳絮凝剂单耗量为60 g/t;尾砂浓度为15%时无法满足生产需要。

(4)得到的180 s内尾砂浆浓度、絮凝剂单耗量与平均沉降速度的回归方程,具有较好的统计学意义,模型预测效果良好;尾砂浆浓度对平均沉降速度的影响程度大于絮凝剂添加量。

(5)尾砂浆添加最佳絮凝剂单耗时,在30 min内基本可完成沉降过程,自然沉降时,完成沉降过程至少需要5 h。

(6)尾砂浆最佳沉降条件下,尾砂浆浓度越高,澄清层高度越低、平均沉降速度越低、压实层治理浓度越低,即尾砂的沉降效果越差。

(7)虽然自然沉降压实层质量浓度更高,但由于沉降时间过长,无法满足生产需要,在生产过程中添加絮凝剂促使尾砂快速沉降是必要的措施。

### [参考文献]

- [1] 梁新民,王怀勇,江国建,等.高浓度全尾砂充填料浆流变特性及管路输送沿程阻力损失研究[J].中国矿山工程,2022,51(3):47-53.
- [2] 苏亮.用充填技术促进矿山资源开发与环境保护协调发展[J].矿冶工程,2013,33(3):117-121.
- [3] 侯永强,尹升华,赵国亮,等.聚丙烯纤维增强尾砂胶结充填体力学及流动性能研究[J].材料导报,2021,35(19):19030-19035.
- [4] 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):240-245.
- [5] 李冬青,杨承祥,施士虎.全尾砂料浆高浓度充填技术在深井矿山应用研究[J].金属矿山,2009(7):13-15.
- [6] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
- [7] 张钦礼,周登辉,王新民,等.超细全尾砂絮凝沉降实验研究[J].广西大学学报:自然科学版,2013,38(2):451-455.
- [8] 陈达,宋卫东,吴姗.全尾砂料浆絮凝沉降特性试验研究[J].有色金属(矿山部分),2016,68(4):42-44.
- [9] ESWARAI AH C, BISWAL S K, MISHRA B K. Settling characteristics of ultrafine iron ore slimes [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2012, 19(2): 95-99.
- [10] 吴爱祥,周靓,尹升华,等.全尾砂絮凝沉降的影响因素[J].中国有色金属学报,2016,26(2):439-445.