

焦家金矿全尾砂絮凝浓密试验研究

何潇亮¹,肖崇春¹,蔚登峰²,寇云鹏³,陈秋松⁴,邱剑辉^{5*}(1. 飞翼股份有限公司; 2. 山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿; 3. 山东黄金集团有限公司充填工程实验室;
4. 北京科技大学资源与安全工程学院; 5. 中南大学资源与安全工程学院)

摘要:针对焦家金矿全尾砂处理中絮凝剂单耗高、底流浓度不稳定等问题,通过静态絮凝沉降、动态浓密及半工业深锥浓密试验,系统研究了全尾砂絮凝浓密影响规律及优化工艺。结果表明:静态试验中,阴离子型絮凝剂K739在矿浆浓度12%、添加量15 g/t条件下沉降效果最优,底流浓度显著提升,絮凝剂过量会导致絮团蓬松化并增加沉降阻力;动态试验中,处理量为 $0.6 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,底流浓度达67.66%,溢流水含固量低于 200×10^{-6} ,延长压缩时间可进一步提高底流浓度;半工业试验验证了处理量与底流浓度的负相关关系,综合考虑溢流水含固量不高于 200×10^{-6} ,推荐浓密机处理量为 $0.7 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。通过优化矿浆浓度、絮凝剂用量及处理量,并增加浓密机高度以延长压缩时间,可实现底流浓度72%以上的稳定控制,为矿山尾砂膏体充填和资源化利用提供了理论与技术支持。

关键词:全尾砂;深锥浓密;絮凝沉降;动态浓密;膏体充填;资源化利用

中图分类号:TD926.4

文章编号:1001-1277(2025)08-0055-06

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250811

引言

随着矿产资源的不断开发,尾砂产生量逐年增加,如何高效、环保地处理尾砂成为矿山可持续发展的重要课题。全尾砂浓密沉降作为充填采矿技术的核心环节,对实现矿山绿色开采与固废资源化利用具有重要意义^[1-5]。近年来,国内外学者对全尾砂絮凝沉降技术进行了大量研究。王洪江等^[6]通过量筒沉降试验和小型动态浓密试验,探讨了超细全尾砂的浓密特性,发现分子量为1 200万的非离子型絮凝剂对尾砂沉降效果最佳,且底流浓度随泥层高度的增加呈DoseResp函数增长。王晓军等^[7]通过多因素交互分析,发现尾砂浓度与絮凝剂用量的协同效应最为显著。诸利一等^[8-9]通过多因素方差分析发现,尾砂入料浓度对沉降速度的显著性影响高于絮凝剂特性,提出20%入料浓度与分子量1 500万的絮凝剂协同优化方案。米智华等^[10-11]通过控温设备得到了不同温度下浆体絮凝过程中的沉降速度变化。阮竹恩等^[12]通过尾砂絮团的弦长演化出沉降速率模型,为浓密设备选型提供了理论指导。李翠平等^[13]通过计算流体动力学(CFD)方法,研究了细尾砂在浓密机内的沉降脱水规律,发现粒径对沉降速度和底流浓度有显著影

响。熊有为等^[14]基于离散元与光滑粒子流体力学耦合方法,模拟了高浓度尾砂的浓密过程,验证了仿真模型的准确性,为浓密工艺优化提供了新方法。王贤情等^[15-17]应用响应面中心复合设计优化静态浓密工艺,精确定关键工艺参数。杨莹等^[18]通过自主研发的智能观测系统,运用图像处理技术成功获取尾砂絮凝沉降最优参数组合。高志勇等^[19]通过小型连续浓密机模拟全尾砂动态浓密沉降过程,探讨了泥层高度、搅拌速度和料浆停留时间对底流浓度的影响,确定了最佳操作参数。吴凡等^[20]通过正交实验揭示了阴离子型絮凝剂(分子量1 500万)在砂浆浓度20%、单耗40 g/t条件下的最优沉降性能,并基于科-克莱文杰模型确定了深锥浓密机关键参数。

尽管上述研究在絮凝剂筛选、浓密机优化及沉降机理等方面取得了重要进展,但全尾砂絮凝沉降过程中仍面临诸多技术瓶颈。例如:絮凝剂的选择与投加量直接影响沉降速度与底流浓度,但目前针对不同矿山尾砂特性的精细化絮凝剂优化策略仍不完善,导致絮凝剂单耗较高,增加了处理成本。此外,尾砂颗粒组成及分布的不均一性,使得沉降过程中泥层结构复杂,底流浓度易发生波动,影响充填料浆的稳定性。同时,浓密机内部的流场特性受多种因素耦合作用,

收稿日期:2025-03-20;修回日期:2025-04-30

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52104156)

作者简介:何潇亮(1985—),男,工程师,研究方向为矿山充填与矿山机电;E-mail:251703699@qq.com

*通信作者:邱剑辉(1996—),男,博士研究生,研究方向为矿山充填与充填胶凝材料;E-mail:215501020@csu.edu.cn

传统经验模型难以准确描述其沉降机理,限制了工艺参数的进一步优化。因此,系统研究尾砂颗粒特性、流场演化及絮凝沉降的耦合机制,结合试验测试与数值模拟方法,构建精准的沉降预测模型,优化工艺参数,提高沉降效率和底流浓度的稳定性,是推动全尾砂絮凝沉降技术进一步发展的关键。

本文以焦家金矿全尾砂为研究对象,围绕全尾砂絮凝沉降展开系统研究。通过室内试验,分析不同絮凝剂类型、投加量及操作条件对尾砂沉降特性的影响,探究优化组合方案,以降低絮凝剂消耗并提升底流浓度。研究成果可为优化矿山尾砂处理工艺提供理论支持,并为提高尾砂膏体充填效率、推动矿山固废资源化利用提供技术指导。

1 原料、试剂与仪器

1.1 原料及试剂

尾砂为焦家金矿选矿厂全尾砂,真密度为 2.64 g/cm^3 ,松散堆密度为 1.15 g/cm^3 ,孔隙率为 56.44% 。采用激光粒度仪测定尾砂的粒径组成分布,结果如图1所示。由图1可知: $-37\text{ }\mu\text{m}$ 粒径占比 37.11% , $-74\sim+37\text{ }\mu\text{m}$ 粒径占比 28.61% ,全尾砂粒径呈现中间少两边多的特征,整体较细。

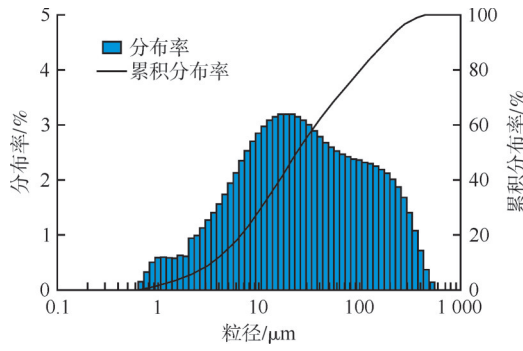


图1 全尾砂粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of ungraded tailings

絮凝剂选用山东偃尔生物科技有限公司生产的阴离子型絮凝剂K739和矿山现用絮凝剂ZC。

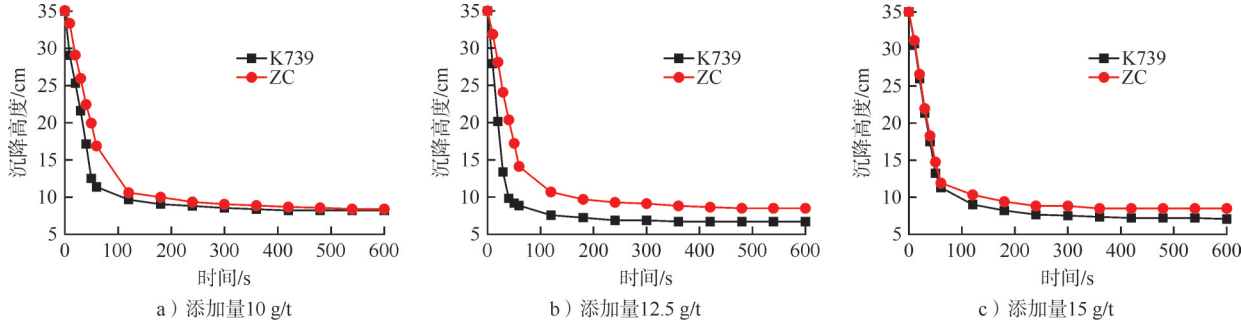


图2 不同絮凝剂的尾砂沉降曲线

Fig. 2 Tailings settling curves with different flocculants

试验用水为焦家金矿拌合水,pH值为7.14,含 SO_4^{2-} 为 479.32 mg/L 。

1.2 仪器

BT-300EA蠕动泵、DP-01真空抽滤机、JJ-100W电动搅拌机、 $\phi 1\text{ m}$ 半工业深锥浓密机、SDE2渣浆泵、SKLD电磁流量计、絮凝剂制备系统。

2 静态絮凝沉降试验

2.1 试验方案

静态絮凝沉降试验采用量筒($1\text{ }000\text{ mL}$)法。研究采用控制变量法,依次确定最佳的絮凝剂类型、矿浆浓度及絮凝剂添加量。首先,在固定矿浆浓度为 10% 的条件下,分别选用絮凝剂K739和絮凝剂ZC,并设定添加量为 10 g/t 、 12.5 g/t 、 15 g/t ,通过对比沉降效果筛选出最优絮凝剂类型。其次,在确定的最佳絮凝剂及添加量条件下,控制矿浆浓度分别为 7% 、 10% 、 13% 、 15% 、 18% 和 20% ,分析不同浓度矿浆的沉降特性,以确定最佳矿浆浓度。最后,在优化所得的最佳絮凝剂与矿浆浓度条件下,进一步调整絮凝剂添加量为 10 g/t 、 12.5 g/t 、 15 g/t 、 17.5 g/t 、 20 g/t ,考察其对沉降效果的影响,确定絮凝剂最佳添加量。本试验方案旨在系统研究不同变量对全尾砂絮凝沉降性能的影响,为优化工艺参数提供科学依据。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 絮凝剂类型

在矿浆浓度 10% ,2种絮凝剂添加量均为 10 g/t 、 12.5 g/t 、 15 g/t 条件下,不同絮凝剂的尾砂沉降曲线如图2所示。由图2可知:2种絮凝剂相同添加量条件下,絮凝剂K739的尾砂沉降速度均优于絮凝剂ZC,确定最佳絮凝剂型号为K739。

2.2.2 矿浆浓度

絮凝剂K739添加量 12.5 g/t 条件下,不同矿浆浓度的尾砂沉降曲线如图3所示。由图3可知:矿浆浓度越低,尾砂颗粒与絮凝剂作用效果越好,在沉降过程中絮团与絮团、絮团与尾砂颗粒间阻力越小,尾砂

沉降速度越快。但是,矿浆浓度低,矿浆中所含尾砂固体颗粒低,浓密设备处理效率随之降低。因此,在进行矿浆稀释时,要综合考虑尾砂沉降速度和浓密设备处理效率。

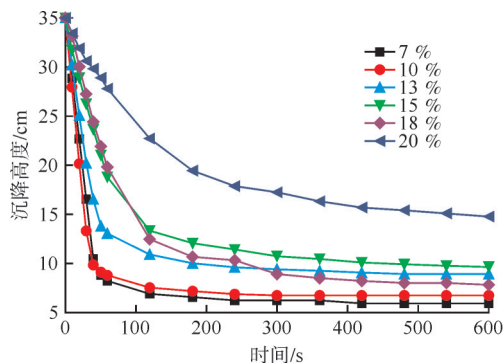


图3 不同矿浆浓度的尾砂沉降曲线

Fig. 3 Tailings settling curves under different slurry concentrations

固体通量是指单位时间内垂直通过单位面积的固体量,这一指标能够兼顾尾砂沉降速度和浓密设备处理效率,因此将其作为最佳矿浆浓度的考察指标。根据试验结果可得到固体通量与矿浆浓度之间的关系,如图4所示。

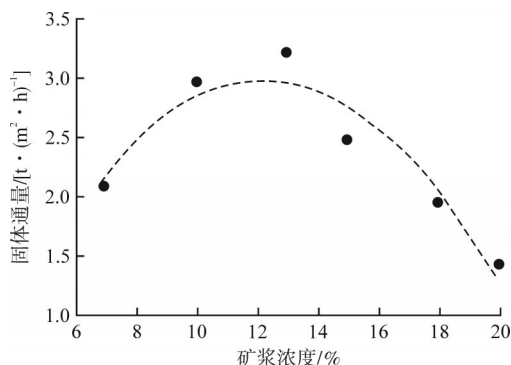


图4 固体通量随矿浆浓度变化曲线

Fig. 4 Variation curve of solids flux with slurry concentration

由图4可知:随着矿浆浓度的增加,固体通量先增加后减小。通过拟合分析得到矿浆浓度为12%时,固体通量最大,因此最佳矿浆浓度为12%。

2.2.3 絮凝剂添加量

在矿浆浓度为12%条件下,控制絮凝剂K739添加量分别为10 g/t、12.5 g/t、15 g/t、17.5 g/t和20 g/t。不同絮凝剂添加量的尾砂沉降曲线如图5所示。

由图5可知:随着絮凝剂添加量的增加,矿浆中尾砂颗粒沉降速度逐渐增加。当添加量超过15 g/t时,随着絮凝剂添加量的增加,矿浆中尾砂颗粒沉降速度增加并不显著,上清液澄清度与添加量15 g/t时相似。主要原因是过多絮凝剂会造成尾砂颗粒被层层包裹,

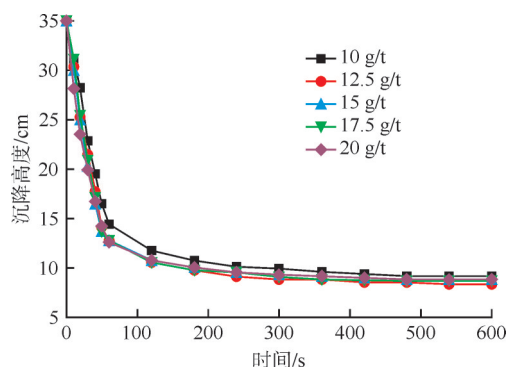


图5 不同絮凝剂添加量的尾砂沉降曲线

Fig. 5 Tailings settling curves under different flocculant dosages

使絮团“显著”增大,呈蓬松状态,增大了尾砂颗粒沉降时所受阻力,减缓了尾砂颗粒沉降速度。此外,絮凝剂大分子结构形成絮团的过程中还会包裹部分水分,使尾砂最终沉降高度降低。因此,确定絮凝剂K739最佳添加量为15 g/t。

3 动态浓密试验

3.1 试验方案

动态浓密试验装置如图6所示,采用直径0.18 m、高度1 m的定制玻璃钢沉降柱,搅拌后的料浆通过蠕动泵泵送至柱体上口,经耙架剪切导水,柱体下方排料,实现动态浓密过程。

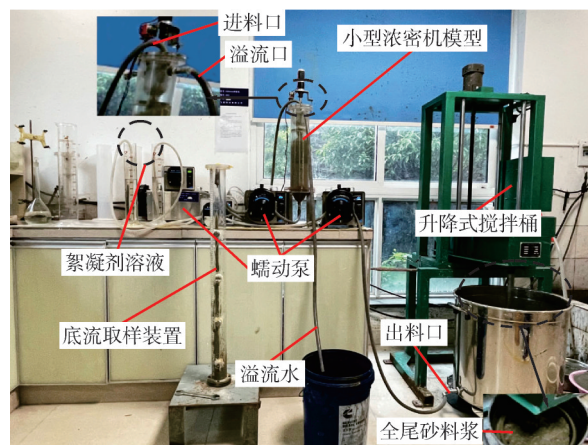


图6 动态浓密试验装置

Fig. 6 Dynamic thickening test device

以静态浓密试验为参考依据,配制适宜浓度的料浆加入桶内,电动搅拌机搅拌均匀后,泵入浓密装置中。通过调节蠕动泵转速,使矿浆浓度、絮凝剂添加量达到最佳,并模拟不同处理量下的浓密试验工况。当泥层高度为200 mm时,开始取样测定溢流水含固量,静止8 h和24 h后测定底流浓度。

3.2 试验结果与分析

动态浓密试验结果如表1所示。

表 1 动态浓密试验结果
Table 1 Dynamic thickening test results

处理量/[t·(m ² ·h) ⁻¹]	底流浓度/%				溢流水含固量/×10 ⁻⁶	
	进料中	进料完毕	静置 8 h	静置 24 h	进料中	进料完毕
0.5	45.03	51.28	57.44	67.66	61	133
0.6	42.74	48.24	54.31	65.04	115	176
0.7	42.45	46.82	54.27	64.31	159	219
0.8	40.67	46.05	52.69	62.82	205	256

注:进料中泥层高度 240 mm,进料完毕泥层高度 330 mm。

由表 1 可知:浓密机运行参数对溢流水含固量和底流浓度具有显著影响。当处理量由 0.5 t/(m²·h)增加至 0.8 t/(m²·h)时,溢流水含固量逐渐上升,而底流浓度逐渐降低,其主要原因在于进料速度的变化影响了溢流水上升速度,进而改变了絮团沉降条件。在较低处理量下,溢流水上升速度较慢,絮团沉降时间延长,沉降更彻底,从而降低了溢流水含固量并提高了底流浓度。适当延长静置时间有助于进一步提高底流浓度;静置沉降 24 h 后,底流浓度均可达到 60 % 以上。因此,在实际应用中,可通过增加浓密机高度来延长尾砂的压缩时间,从而有效提高底流浓度。在溢

流水含固量要求不高于 200×10⁻⁶ 条件下,浓密机的最佳处理量为 0.6 t/(m²·h)。工业试验结果表明,在浓密机实际泥层高度达到 4 m 以上的情况下,经充分沉降后,底流浓度可稳定控制在 72 %±2 %^[6],满足工程应用需求。

4 半工业深锥浓密试验

4.1 试验方案

半工业深锥浓密试验装置如图 7 所示,采用直径 1 m、高度约 12 m 的深锥浓密机,包含给料井与耙架,并配置絮凝剂制备添加系统,可模拟实际工况条件。

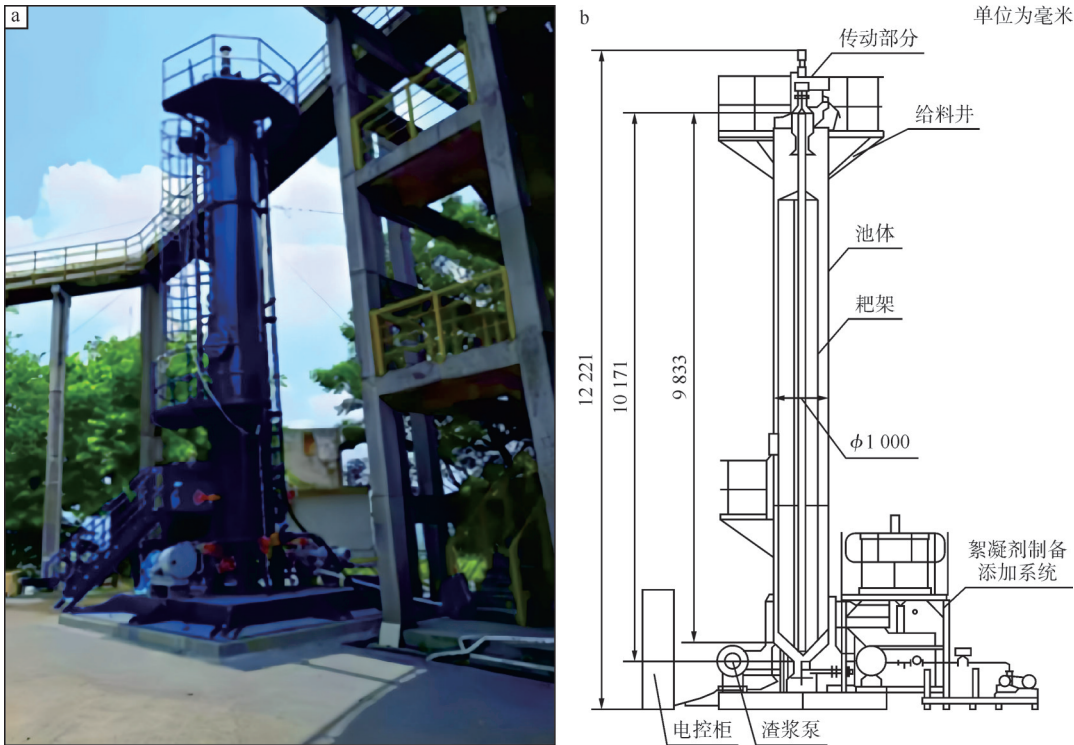


图 7 半工业深锥浓密试验装置

Fig. 7 Semi-industrial deep-cone thickening test device

根据动态浓密试验研究结果,浓密机处理量按 0.6 ~ 0.8 t/(m²·h)。每次试验前需清空半工业浓密试验机并注满清水,待泥层高度达到 4.5 m 时(给料井下

边缘)停止给料。为模拟工业深锥浓密机,弥补半工业浓密试验机高度不足,静置 10 h 以上测定底流浓度,而溢流水则在试验过程中用矿泉水瓶每隔 0.5 h

取一次,混合后进行含固量分析。

4.2 试验结果与分析

半工业深锥浓密试验条件如表 2 所示,结果如图 8 所示。

表 2 半工业深锥浓密试验条件

Table 2 Semi-industrial deep-cone thickening test results				
处理量/ [$t \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]	时间/ min	矿浆浓 度/%	给矿流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	絮凝剂添加 量/($L \cdot h^{-1}$)
0.58	0	41.0	0	0
	20	39.0	0.31	13
	80	40.0	1.24	63
	140	35.0	2.00	108
	200	32.0	3.13	161
	230	33.0	3.63	181
	平均值	36.6	0.92	46
0.71	0	40.5	0	0
	30	40.0	1.20	40
	60	35.0	2.00	69
	90	30.0	2.88	103
	120	36.5	3.49	125
	130	36.5	3.89	139
	150	32.0	4.24	154
	180	41.0	5.08	182
	平均值	36.4	1.69	61
0.79	0	37.0	0	0
	60	36.5	2.08	79
	90	36.5	3.32	114
	120	39.0	4.57	150
	150	39.0	5.87	188
	170	38.0	6.67	212
	平均值	37.5	2.36	74

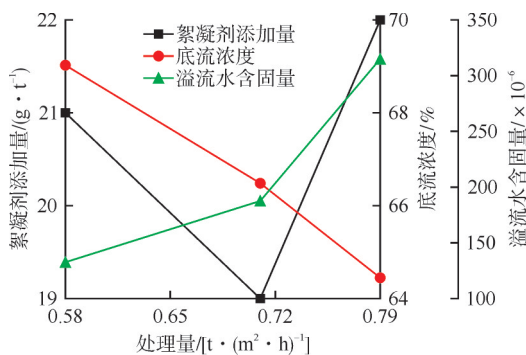


图 8 半工业深锥浓密试验结果

Fig. 8 Semi-industrial deep-cone thickening test results

由表 2 和图 8 可知:浓密机处理量、设备高度及絮凝剂用量对底流浓度和溢流水含固量均有显著影响。当处理量为 $0.58 t/(m^2 \cdot h)$ 时,底流浓度可达

69.5% ,溢流水含固量为 123×10^{-6} 。当处理量增加至 $0.71 t/(m^2 \cdot h)$ 时,底流浓度下降至 66.5% ,溢流水含固量升高至 187×10^{-6} 。当进一步增大处理量至 $0.79 t/(m^2 \cdot h)$ 时,底流浓度降低至 64.5% ,溢流水含固量则升高至 315×10^{-6} 。这表明随着处理量的增加,底流浓度逐渐降低,而溢流水含固量则呈上升趋势。通过降低处理量或增加浓密机高度均可有效提高底流浓度,这主要是由于较低处理量或较高设备高度能延长尾砂的沉降与压缩时间,从而促进固液分离效果的提升。此外,当底流浓度达到一定水平后,进一步降低处理量可改善沉降效果,但同时可能影响处理效率,因此需要结合深锥浓密机优化后续浓缩过程。在絮凝剂 K739 添加量为 $20 g/t$ 时,溢流水含固量可稳定控制在 200×10^{-6} 以下,符合循环水回用的水质要求,为工业应用提供了合理的絮凝剂添加参考。

5 结 论

研究通过系统试验优化了全尾砂絮凝沉降的关键工艺参数,为焦家金矿尾砂的高效处理和资源化利用提供了科学指导。

1)通过尾砂静态絮凝沉降试验,确定焦家金矿矿浆使用絮凝剂 K739 时沉降效果最佳。在此条件下,最佳矿浆浓度为 12% ,絮凝剂添加量为 $15 g/t$,可有效提高沉降速率和底流浓度,优化沉降性能。

2)通过动态浓密试验和半工业深锥浓密试验,推荐深锥浓密机处理量为 $0.70 t/(m^2 \cdot h)$ 。该参数可在保证沉降效果的同时提升处理效率,并确保浓密机的稳定运行,为工业应用提供优化依据。

3)在絮凝剂 K739 添加量为 $20 g/t$ 时,溢流水含固量可稳定控制在 200×10^{-6} 以下,满足矿山循环水利用的水质要求,为尾砂资源化利用和废水回用提供了可靠技术支撑。

[参 考 文 献]

[1] 吴爱祥,杨莹,程海勇,等.中国膏体技术发展现状与趋势[J].工程科学学报,2018,40(5):517-525.

[2] 陈秋松,吴爱祥.磷石膏充填技术研究进展[J].工程科学学报,2025,47(2):195-214.

[3] 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.

[4] 胡亚军,陈彦亭,赖伟,等.超细全尾砂似膏体绿色胶凝充填关键技术研究[J].黄金,2023,44(5):12-15,20.

[5] 吴爱祥,杨莹,王贻明,等.深锥浓密机底流浓度模型及动态压密机理分析[J].工程科学学报,2018,40(2):152-158.

[6] 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.

[7] 王晓军,马晓霞,孙燕飞,等.基于RSM-BBD的全尾砂絮凝沉降效果多因素耦合分析[J].矿业研究与开发,2023,43(6):62-67.

- [8] 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.
- [9] 谢佩,戴惠新,赵明珠.尾砂物理特性对其絮凝沉降性能影响规律的研究[J].黄金,2023,44(8):52-57.
- [10] 米智华.非恒温条件下全尾砂浆絮凝沉降规律研究[J].采矿技术,2023,23(3):149-154.
- [11] 李海波,朱纪朋,蒋忠涛,等.全尾砂微胶结充填性能研究[J].黄金,2024,45(10):54-58.
- [12] 阮竹恩,吴爱祥,王建栋,等.基于絮团弦长测定的全尾砂絮凝沉降行为[J].工程科学学报,2020,42(8):980-987.
- [13] 李翠平,侯贺子,阮竹恩,等.浓密机内细尾砂沉降脱水规律模拟研究[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(4):1 523-1 533.
- [14] 熊有为,刘福春,陈伟,等.基于离散元与光滑粒子流体力学耦合的高浓度尾砂浓密过程仿真[J].金属矿山,2021(11):19-24.
- [15] 王贤情,万文,王刚,等.金矿全尾砂浆动静态絮凝沉降规律研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(4):1 358-1 366.
- [16] 温震江,杨晓炳,李立涛,等.基于RSM-BBD的全尾砂浆絮凝沉降参数选择及优化[J].中国有色金属学报,2020,30(6):1 437-1 445.
- [17] 杨宫印,崔鹏艳,陈玉明.絮凝剂对溢流超细尾砂沉降特性影响的试验研究[J].黄金,2019,40(11):31-35.
- [18] 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.
- [19] 高志勇,吴爱祥,焦华喆,等.全尾砂动态浓密沉降规律研究[J].有色金属(矿山部分),2017,69(2):1-6.
- [20] 吴凡,张凌云,潘瑞凯,等.全尾砂浆絮凝沉降试验及深锥浓密机选型研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):46-52.

Experimental study on flocculation and thickening of ungraded tailings from the Jiaojia Gold Mine

He Xiaoliang¹, Xiao Chongchun¹, Wei Dengfeng², Kou Yunpeng³, Chen Qiusong⁴, Qiu Jianhui⁵

(1. Feiyi Co., Ltd.; 2. Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining (Laizhou) Co., Ltd.;

3. Backfilling Engineering Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd.;

4. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing;

5. School of Resources and Safety Engineering, Central South University)

Abstract: To address the issues of high unit consumption of flocculant and unstable underflow concentration in the treatment of ungraded tailings at the Jiaojia Gold Mine, a series of static flocculation-settling tests, dynamic thickening tests, and semi-industrial deep-cone thickening tests were conducted to systematically investigate the influencing factors and optimize the flocculation-thickening process. Results show that in static tests, the anionic flocculant K739 produced optimal settling performance at a pulp concentration of 12 % and a dosage of 15 g/t, significantly improving underflow concentration. However, overdosing led to loose floc structures and increased settling resistance. In dynamic tests, when the treatment rate was 0.6 t/(m²·h), the underflow concentration reached 67.66 %, with the overflow solid content below 200×10⁻⁶. Prolonging the compression time further improved the underflow concentration. Semi-industrial tests confirmed a negative correlation between treatment rate and underflow concentration. Considering the requirement that overflow solid content should not exceed 200×10⁻⁶, a recommended thickener throughput of 0.7 t/(m²·h) was proposed. By optimizing slurry concentration, flocculant dosage, and treatment rate, and by increasing thickener height to extend compression time, stable underflow concentrations above 72 % can be achieved. This provides both theoretical and technical support for paste backfilling and resource-based utilization of mine tailings.

Keywords: ungraded tailings; deep-cone thickening; flocculation and settling; dynamic thickening; paste backfilling; resource-based utilization