

# 北营铁尾矿动态沉降试验研究

张艺邺<sup>1</sup>, 崔宝玉<sup>1</sup>, 王小宇<sup>1,2</sup>, 马聪玉<sup>1</sup>, 宁琴<sup>3</sup>, 李强<sup>4</sup>

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
3. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000;
4. 烟台工程职业技术学院 安全与应急管理系, 山东 烟台 264006

中图分类号: TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0160-08  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.019

**摘要** 为了提高本溪北营铁尾矿的浓密效果,开展了以动态沉降试验为主、静态沉降试验为辅的试验研究。首先进行静态的絮凝剂优选试验,以澄清层界面高度、沉降速率和固体质量浓度为指标,探究絮凝剂类型、陈化时间、絮凝剂质量浓度对絮凝沉降的影响;再运用动态浓密装置,在连续入料和给药的情况下,以堆积速度、溢流含固量和底流质量浓度为指标,探究矿浆质量浓度、入料速度、加药速度对絮凝沉降的影响。研究表明:静态沉降试验中,在陈化时间 24 h、质量浓度 0.3‰时的阳离子型聚丙烯酰胺比工厂现场絮凝剂的絮凝效果好;在 3 min 时,尾矿沉降趋于稳定,此时的澄清层界面高度为 42 mm,沉降速率为 0.03 mm/min,固体浓度为 70.24%;在矿浆质量浓度 14%、入料速度 0.4 L/min、加药速度 12 mL/min 时,铁尾矿的动态沉降效果最好,此时的溢流含固量为 279 mg/L,底流质量浓度为 68.05%;相同条件下的工厂现场絮凝剂动态沉降效果较差,溢流含固量为 282 mg/L,底流质量浓度为 62.32%。

**关键词** 铁尾矿;絮凝沉降;动态浓密

铁尾矿含有多种有价金属,资源潜力巨大,随着选矿技术的发展,人们逐渐意识到其可回收利用的价值,在开发凝胶产品、细粒级料等领域都有极大潜力<sup>[1-3]</sup>。浓密铁尾矿浆、提高尾矿排放浓度既可以解决尾矿库水量过多的问题<sup>[4-5]</sup>,又可以通过回水利用节约选矿企业的用水成本,同时可回收选矿废水中的微细粒铁尾矿。絮凝法是工业处理提高铁尾矿矿浆浓密效率最主要的手段之一<sup>[6-7]</sup>,通过添加合适的絮凝剂加速尾矿颗粒的沉降,进而实现固液分离。梁效<sup>[8]</sup>将无机和有机絮凝剂进行复配,发现复配后产生的协同作用能够显著提高铁尾矿的沉降效果;龙国兵<sup>[9]</sup>利用三氯化铁作为絮凝剂,探究了药剂用量、矿浆 pH、分散时间和矿浆温度对细粒级铁尾矿絮凝沉降效果的影响,建立了拟合程度较好的细粒尾矿沉降速度模型;韩瑞<sup>[10]</sup>探究了非离子型絮凝剂的分子量和用量对微细粒级铁尾矿的絮凝沉降性能的影响,发现随着分子量的增加,尾矿的沉降速度增加,而絮凝剂的用量对细粒尾矿絮凝沉降的作用是分阶段的。但目前铁尾矿絮凝沉降试验都以静态沉降为主,静态沉降可以直观清楚地观察到絮凝沉降的变化,但在实际工业生产中,尾矿浆

在浓密过程中存在多种作用力的协同作用,静态沉降忽视了入料和加药环境对浓密的影响,无法准确描述浓密过程;在选矿现场,为了节约成本,往往使用固定的复配絮凝剂,但对于性状各异的尾矿,工厂现有的絮凝剂并不能达到最佳效果。因此本文运用动静结合的方式,先通过静态沉降试验优选出合适的絮凝剂,再采用动态浓密装置,在连续进料和加药的环境里探究不同条件下矿浆质量浓度、入料速度和絮凝剂单耗对浓密过程的影响,以期为本营铁尾矿的动态浓密过程提供依据。

## 1 试验部分

### 1.1 原料性质

试验所用铁尾矿取自本溪北营某尾矿库,其物性指标如表 1 所示,烘干精制后对其进行粒度分析,结果如图 1 所示。

由图 1 可知,粒径特征  $d_{10}$ 、 $d_{50}$ 、 $d_{90}$  分别为 20.1  $\mu\text{m}$ 、86.4  $\mu\text{m}$ 、194  $\mu\text{m}$ ,小于 74  $\mu\text{m}$  的颗粒约占 49%,小于 20  $\mu\text{m}$  的颗粒约占 11.5%,表示颗粒分布宽度的径距

收稿日期: 2022-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974066); 中央高校基本科研业务专项资金项目(N2201004)

作者简介: 张艺邺(1996—),男,山东淄博人,博士,主要从事铁尾矿絮凝沉降方面的研究工作, E-mail: zhangyiye1860@163.com。

通信作者: 崔宝玉(1982—),男,山东烟台人,博士,副教授,主要从事矿物加工技术方面的研究工作, E-mail: cuiyaoyu@mail.neu.edu.cn。

表 1 尾矿的物性指标

Table 1 Physical indexes of tailings

项目	含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	相对密度	孔隙比	孔隙率/%
含量	4.7	2.5	2.39	2.85	0.19	4.7

注: 1.密度即湿密度,是指天然状态下尾矿孔隙中含有水时的密度,可由尾矿的总质量(尾矿颗粒的质量和孔隙中天然水分的质量)除以尾矿的体积计算得到; 2.干密度,是指尾矿孔隙中完全没有水时的密度,可由湿密度除以(1+含水率)计算得到; 3.相对密度,是指物质的密度与参考物质的密度在各自规定的条件之下之比,可由比重瓶法测定得到。

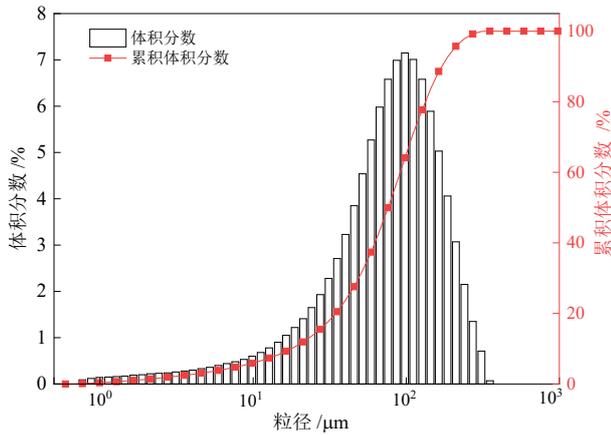


图 1 粒度曲线  
Fig. 1 Particle-size distributions of tailings

为 2.014, 表示粒径分布偏离中间的程度的一致性为 0.613, 比表面积为 200.4 m<sup>2</sup>/kg, 表示颗粒平均大小的面积平均径和体积平均径分别为 29.9 μm 和 98.7 μm。不均匀系数 *Cu* 表示组成尾矿的颗粒均匀程度的指标, *Cu* 越大, 粒组分布越广, 尾矿级配越好, 根据计算可得 *Cu* 为 5.14; 曲率系数 *Cc* 反映了尾矿颗粒粒径分布的曲线形态, 当  $Cu \geq 5$ 、 $1 \leq Cc \leq 3$  时为良好级配, 根据计算可得 *Cc* 为 1.48, 累积曲线较缓, 说明粒径齐全, 连续分布, 级配良好。

将铁尾矿样品进行 SEM 测试, 在 BSED 模式下突出成分衬度, 在 MIX 模式下(SE+BES)可同时呈现形貌信息和成分衬度差异, 图 2a 为铁尾矿在 BSED 模式下的 SEM 图谱, 图 2b 为铁尾矿在 MIX 模式下的 SEM 图谱。

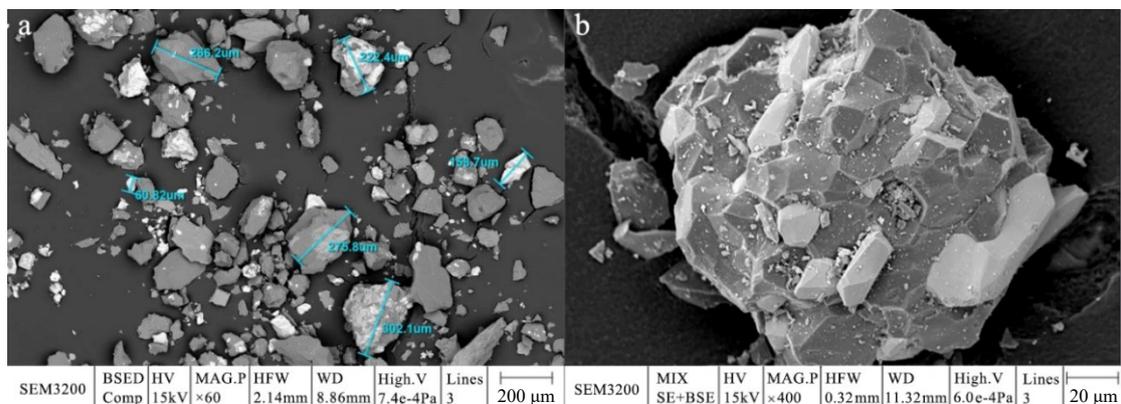


图 2 尾矿颗粒的 SEM 图谱: (a)BSED 模式; (b)MIX 模式  
Fig. 2 Micrographs of tailings particles: (a) BSED mode; (b) MIX mode

由图 2a 可知, 在加速电压 15 kV、放大倍数 60 倍的条件, 可以看到铁尾矿颗粒呈现相互分离状态, 这是因为颗粒比表面积较小, 吸附性较弱。由图 2b 可知, 在加速电压 15 kV、放大倍数 400 倍的条件, 可以看到铁尾矿呈现块状结构, 表面粗糙, 存在柱棒状的凸起和凹坑。

## 1.2 药剂和设备

### 1.2.1 絮凝剂

试验采用四种有机高分子絮凝剂<sup>[1]</sup>: 阴离子型聚丙烯酰胺(分子量 1 800 万, 以下简称 APAM)、阳离子

型聚丙烯酰胺(50 离子度, 以下简称 CPAM)、非离子型聚丙烯酰胺(分子量 1 200 万, 以下简称 NPAM)和工厂现有絮凝剂 65E。三种无机高分子絮凝剂: 聚合氯化铝(质量分数 30%, 以下简称 PAC)、聚合硫酸铁(质量分数 21%, 以下简称 PFS)、聚合硅酸铝铁(质量分数 36%, 以下简称 PSAF)。

### 1.2.2 试验设备

橡胶网孔搅拌器、#1 蔡恩杯、动态浓密装置、DHG-92 型电热恒温鼓风干燥箱、ZKYY-5L 型升降油浴锅、Mastersizer3000 型激光粒度分析仪、SEM3200 扫描电子显微镜。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 絮凝剂优选试验

静态沉降在一个由量筒模拟的沉降柱内进行,可以直观清楚地观察絮凝沉降变化,如图 3 所示。在量筒内配制一定质量浓度的矿浆,使用橡胶网孔搅拌器充分搅拌均匀;利用水浴设备在特定温度条件下配制絮凝剂溶液;将配制好的絮凝剂溶液按比例加入量筒,继续搅拌使其充分溶解;静置后观察澄清层界面高度,记录沉降时间。

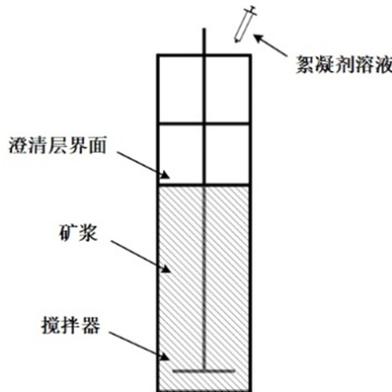


图 3 静态沉降柱示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of static settlement

#### 1.3.2 动态沉降条件优化试验

静态沉降试验简化了沉降过程,忽视了矿浆在流体中的剪切力和入料环境的影响。为了进一步探究生产实际中的沉降规律,采用动态浓密装置进行单因素试验,装置原理示意图如图 4 所示。将配制好的絮凝剂倒入 500 mL 烧杯,在搅拌桶中配制一定质量浓度的矿浆,用电动搅拌机搅拌均匀,通过调节蠕动泵改变入料速度和加药速度,调节电机的电流和电压改变耙架转速,使其均匀连续进入动态浓密装置,保持

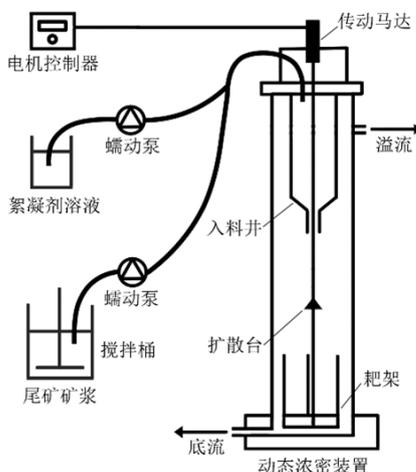


图 4 动态浓密装置  
Fig. 4 Dynamic sedimentation device

沉积物层的高度稳定在 100 mm 刻度时,接取溢流和底流并记录沉降时间,在过滤烘干后计算溢流含固量和底流质量浓度。

### 1.4 试验指标

(1) 固体质量浓度和沉降速率。根据 Coe-Clevenger 提出的静态沉降模型和 Kynch 的沉降理论<sup>[12]</sup>,可以计算出沉降曲线上任意点的固体质量浓度和沉降速率,由式 (1) 和式 (2) 计算:

$$\phi_i = \frac{\phi_0 H_0}{H_i} \quad (1)$$

$$v(\phi) = \frac{H}{T} \quad (2)$$

式中:  $\phi_i$  为过沉降曲线任意点  $i$  的固体质量浓度,%;  $v(\phi)$  为此点的沉降速率, mm/min;  $\phi_0$  为悬浮液的初始质量浓度,%;  $H_0$  为悬浮液的初始高度, mm;  $H$ 、 $T$  为过  $i$  点的切线在横坐标与纵坐标上的截距。

(2) 黏度。絮凝剂溶液倒入 500 mL 烧杯中,将蔡恩杯浸入烧杯 3 min,使杯体内外达到热平衡后垂直提起,当杯体上端离开液面时开始计时,出现第一个断点时停止计时,此时的流出时间表示的黏度值,可由式 (3) 计算得到:

$$V = K(t - c) \quad (3)$$

式中:  $V$  为液体的运动黏度,  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $t$  为液体的流出时间, s;  $K$  和  $c$  为蔡恩杯对应型号的常数。

(3) 堆积速度。记录沉积物层的高度稳定在 100 mm 刻度时的时间。

(4) 底流质量浓度。当沉积物层的高度稳定在 100 mm 刻度时,接取 500 g 左右底流,称取盆重和底流质量,烘干后再次称重,底流质量浓度可由式 (4) 得到:

$$C_{\text{底}} = \frac{W_1 - W_{\text{盆}}}{W_2 - W_{\text{盆}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $C_{\text{底}}$  为底流质量浓度,%;  $W_1$  为烘干后总质量, g;  $W_2$  为烘干前总质量, g;  $W_{\text{盆}}$  为盆的质量, g。

(5) 溢流含固量。当沉积物层的高度稳定在 100 mm 刻度时,接取 500 mL 溢流,称量滤膜质量后再用抽滤机抽滤,对滤膜在 100 °C 下进行烘干,取出称重,溢流含固量可由式 (5) 得到:

$$C_{\text{溢}} = \frac{W_3 - W_4}{0.5} \quad (5)$$

式中:  $C_{\text{溢}}$  为溢流含固量, mg/L;  $W_3$  为烘干后膜和固体的质量, mg;  $W_4$  为膜的质量, mg。

## 2 结果和讨论

### 2.1 絮凝剂优选试验

#### 2.1.1 絮凝剂类型对絮凝沉降的影响

在矿浆质量浓度为 10% 的条件下,选用 APAM、CPAM、NPAM、65E、PAC、PFS、PSAF 进行对比试验,并与自然沉降(Null)进行对比。其中 APAM、CPAM、

NPAM、65E 在 20 ℃ 条件下配制成质量浓度为 0.2% 的絮凝剂溶液, 静置 24 h, 絮凝剂单耗为 20 g/t; PAC、PFS、PSAF 在 20 ℃ 条件下配制成质量浓度为 5% 的絮凝剂溶液, 静置 24 h, 絮凝剂单耗为 40 g/t。澄清层界面高度变化见图 5a, 沉降速率曲线见图 5b。

由图 5a 和图 5b 可知, 有机高分子絮凝剂对促进该矿絮凝沉降效果明显, 无机高分子絮凝剂作用效果不佳。在沉降初期, 沉降速率较快并达到最大值, 随

着沉降时间的增加, 速度逐渐下降并趋于稳定。从图中可知, 沉降效果由大到小分别为 CPAM>NPAM>65E>APAM>>PSAF≈PAC>PFS≈无添加。CPAM 是线性高分子化合物, 延展度高, 更容易与胶体颗粒接触; 其分子链上的铵盐基团显阳离子特性, 由于电中和作用与带负电的胶体颗粒反应, 压缩胶体颗粒的双电层结构, 使其失去稳定性, 从而起到加速絮凝沉降的效果<sup>[13]</sup>。因此选用 CPAM 作为后续试验絮凝剂。

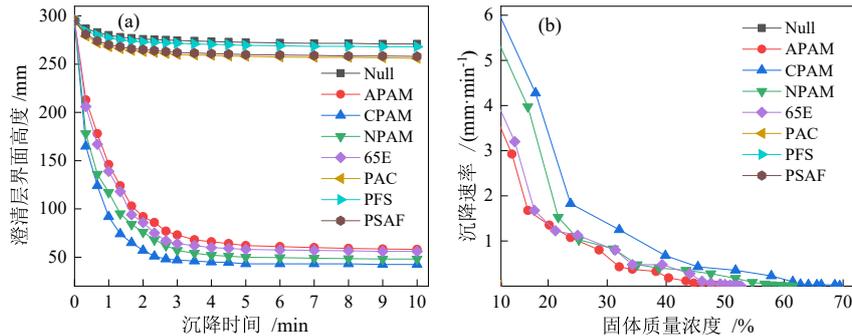


图 5 絮凝剂类型对絮凝沉降的影响: (a)澄清层界面高度变化; (b)沉降速率变化  
Fig. 5 Influence of flocculant type on flocculation sedimentation: (a) clarification area height change; (b) sedimentation rate change

### 2.1.2 絮凝剂陈化时间对絮凝沉降的影响

有机高分子絮凝剂难溶于水, 配制完成后需要静置一段时间待其完全溶解。为了观察陈化时间对絮凝沉降的影响, 每隔 8 h 进行一次沉降试验并测量絮凝剂黏度。黏度曲线见图 6, 陈化时间对絮凝沉降的效果见图 7a 和图 7b。

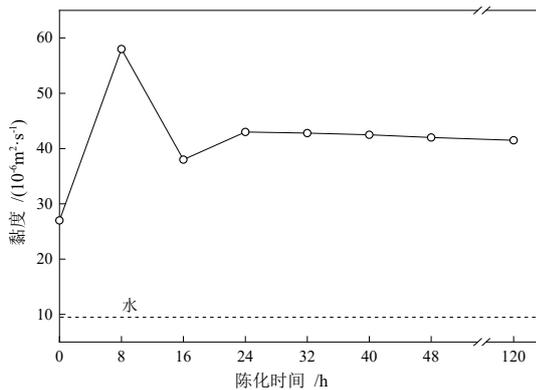


图 6 陈化时间对黏度的影响  
Fig. 6 Effect of aging time on viscosity

由图 6 可知, 絮凝剂的黏度在 0~8 h 内增加至最大值, 随后在 8~16 h 内快速下降, 在 16~24 h 内缓慢上升至第二峰值, 24~48 h 内黏度逐渐降低并趋于稳定。这是因为高分子聚合物初期难以溶解, 无法溶解的部分相互纠缠形成大体积结块导致黏度骤增; 随后结块分解, 释放出多余的聚合物链导致黏度快速下降; 这部分聚合物溶解后又导致黏度回升<sup>[14]</sup>。由图 7a 和图 7b 可知, 陈化时间越长, 絮凝效果越好, 但 24 h 后的絮凝

效果趋于相同, 综合考虑选用 24 h 作为后续试验所用絮凝剂的陈化时间。

### 2.1.3 絮凝剂质量浓度对絮凝沉降的影响

对于有机高分子絮凝剂来说, 质量浓度过高或过低都会影响絮凝效果。因此在矿浆质量浓度为 10%、絮凝剂配制温度 20 ℃、陈化时间 24 h、絮凝剂单耗 20 g/t 的条件下, 改变 CPAM 质量浓度, 探究絮凝剂质量浓度对该矿絮凝沉降的影响。澄清层界面高度变化见图 8a, 沉降速率曲线见图 8b。

由图 8a 和图 8b 可知, 随着絮凝剂质量浓度的增加, 沉降效果先变好后变差, 在 0.3‰ 时效果最好, 并且过高质量浓度的絮凝剂比低质量浓度的絮凝剂效果更差。这表明超过絮凝剂最佳质量浓度时, 其黏度会变大, 导致难以溶解, 进而影响絮凝过程<sup>[15-16]</sup>。因此选用 0.3‰ 作为后续试验的絮凝剂质量浓度。

## 2.2 动态沉降条件优化试验

### 2.2.1 入料矿浆质量浓度对絮凝沉降的影响

配制 0.3‰ 的 CPAM, 静置 24 h 后开展动态沉降试验。在入料速度为 0.4 L/min、加药速度为 8 mL/min 时, 铁尾矿动态沉降指标(堆积速度、底流质量浓度和溢流含固量)随入料矿浆质量浓度的变化曲线如图 9a 和 9b 所示。

由图 9a 和图 9b 可知, 随着入料矿浆质量浓度的增加, 铁尾矿的堆积速度、底流质量浓度和溢流含固量都呈现上升趋势。当矿浆质量浓度超过 14% 时, 溢

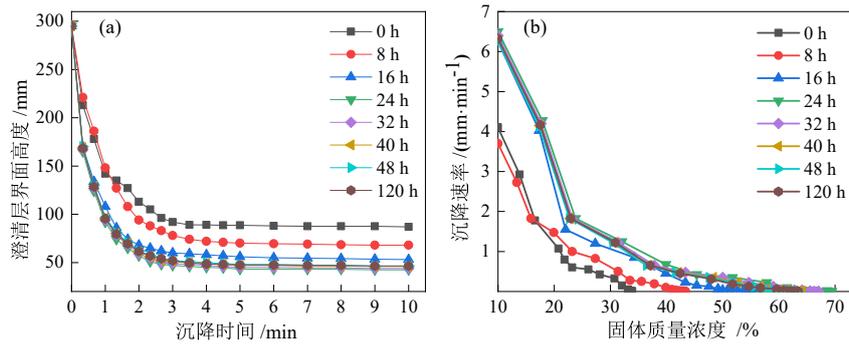


图 7 絮凝剂陈化时间对絮凝沉降的影响: (a)澄清层界面高度变化; (b)沉降速率变化  
 Fig. 7 Influence of aging time on flocculation sedimentation: (a) clarification area height change; (b) sedimentation rate change

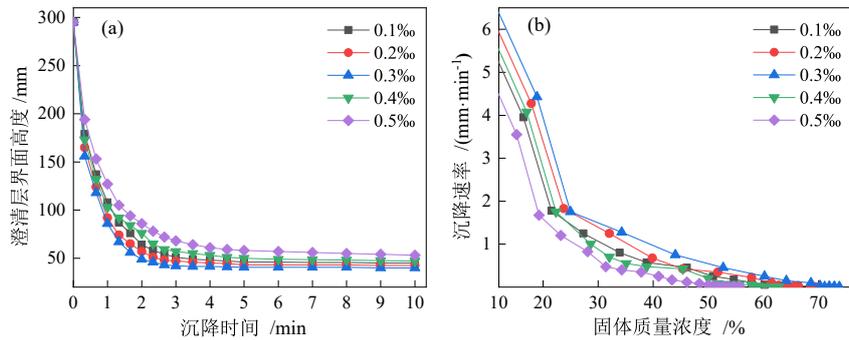


图 8 絮凝剂质量浓度对絮凝沉降的影响: (a)澄清层界面高度变化; (b)沉降速率变化  
 Fig. 8 Influence of flocculant concentration on flocculation sedimentation: (a) clarification area height change; (b) sedimentation rate change

流含固量超过铁矿采选工业水污染悬浮物排放标准<sup>[7]</sup>。经综合考虑,当矿浆质量浓度为 14% 时,铁尾矿动态沉降效果较好,此时堆积速度为 12.5 mm/min,底流质量浓度为 65.99%,溢流含固量为 288.4 mg/L。

当矿浆质量浓度较低时,底流质量浓度和溢流含固量整体都较低,颗粒之间的碰撞次数很少,导致无法形成更大的絮团,堆积速度较慢;随着矿浆质量浓度的增加,颗粒之间的碰撞概率增大,絮凝效果变好,堆积速度和底流质量浓度都逐渐增加,过高的矿浆质量浓度也使矿浆中固体颗粒与絮凝剂分子的接触难度提高,许多微细颗粒难以被絮凝剂分子吸附,从而导致溢流含固量增加。

### 2.2.2 入料速度对絮凝沉降的影响

在矿浆质量浓度为 14%、加药速度为 8 mL/min 时,铁尾矿动态沉降指标(堆积速度、底流质量浓度和溢流含固量)随入料速度的变化曲线如图 10a 和 10b 所示。

由图 10a 和 10b 可知,随着入料速度的增加,堆积速度和溢流含固量呈现上升趋势,底流质量浓度呈下降趋势。当入料速度超过 0.4 L/min 时,溢流含固量超过铁矿采选工业水污染悬浮物排放标准。经综合考虑,当入料速度为 0.4 L/min 时,铁尾矿动态沉降效果最好,此时堆积速度为 12.5 mm/min,底流质量浓度为 65.99%,溢流含固量为 288.4 mg/L。

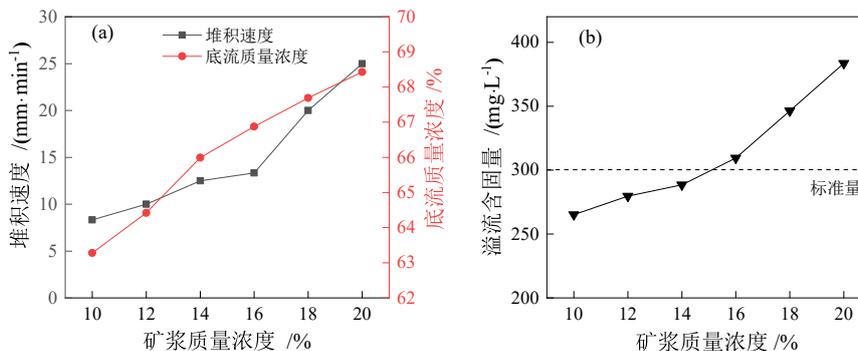


图 9 矿浆质量浓度对动态沉降指标的影响: (a)堆积速度和底流质量浓度变化; (b)溢流含固量变化  
 Fig. 9 Influence of slurry concentration on dynamic settlement index: (a) accumulation rate and underflow density change; (b) overflow solid content change

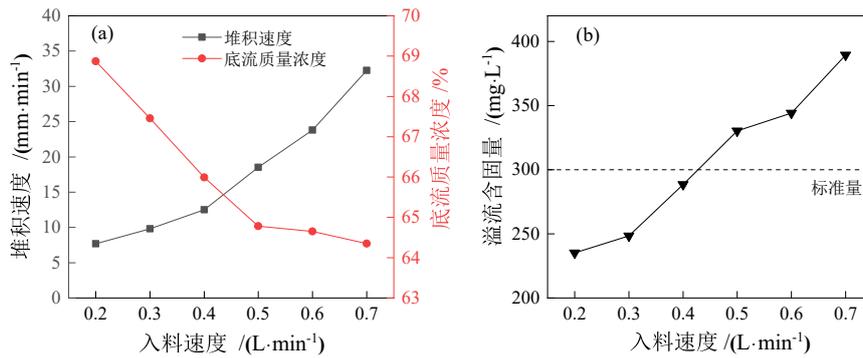


图 10 入料速度对动态沉降指标的影响: (a) 堆积速度和底流质量浓度变化; (b) 溢流含固量变化  
 Fig. 10 Influence of feed velocity on dynamic settlement index: (a) accumulation rate and underflow density change; (b) overflow solid content change

当入料速度较低时, 矿浆颗粒与絮凝剂分子反应时间延长, 絮凝效果较好, 表现在底流质量浓度较高, 溢流含固量较低; 随着入料速度的增加, 沉积物的堆积速度大于沉积物的压缩速度, 沉积物稳定在目标刻度的时间变快, 导致堆积速度变快, 底流质量浓度减小; 随着入料速度的进一步增加, 过量的矿浆颗粒无法与絮凝剂分子反应, 部分微细颗粒随水流排出, 导

致溢流含固量增加。

### 2.2.3 加药速度对絮凝沉降的影响

在矿浆质量浓度为 14%、入料速度为 0.4 L/min 时, 铁尾矿动态沉降指标 (堆积速度、底流质量浓度和溢流含固量) 随着加药速度的变化曲线如图 11a 和 11b 所示。

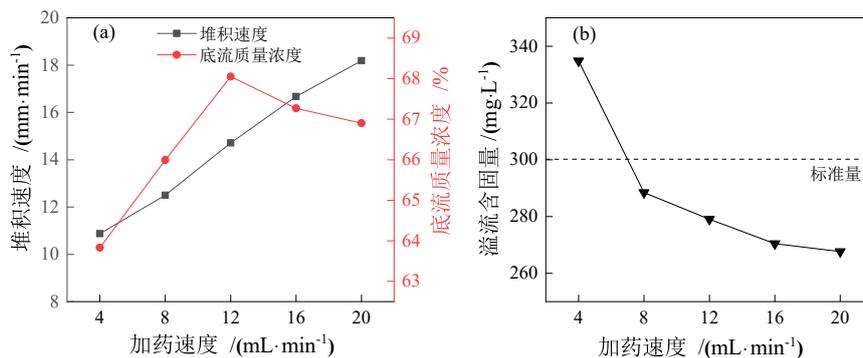


图 11 加药速度对动态沉降指标的影响: (a) 堆积速度和底流质量浓度变化; (b) 溢流含固量变化  
 Fig. 11 Influence of drug velocity on dynamic settlement index: (a) accumulation rate and underflow density change; (b) overflow solid content change

由图 11a 可知, 随着加药速度的增加, 堆积速度呈现上升趋势, 底流质量浓度呈现先升高后降低的趋势, 当加药速度为 12 mL/min 时, 底流质量浓度最高为 68.05%, 此时堆积速度为 14.71 mm/min。由图 11b 可知, 随着加药速度的增加, 溢流含固量呈现下降趋势。当加药速度大于 7 mL/min 时, 溢流含固量小于铁矿采选工业水污染悬浮物排放标准。综合考虑, 当加药速度为 12 mL/min 时, 铁尾矿动态沉降效果最好, 此时堆积速度为 14.71 mm/min, 底流质量浓度为 68.05%, 溢流含固量为 279 mg/L。在相同条件下, 工厂现场絮凝剂沉降效果较差, 底流质量浓度为 62.32%, 溢流含固量为 282 mg/L。

当加药速度较低时, 多余的矿浆颗粒无法与絮凝剂分子反应形成絮团, 导致堆积速度和底流质量浓度较低; 微细颗粒难以下沉, 随水流排出, 导致溢流含固

量较高。随着加药速度的增加, 矿浆颗粒与絮凝剂分子充分反应, 形成较大絮团加速下沉, 这些大絮团在下沉过程中网捕、卷扫微细颗粒, 导致堆积速度和溢流含固量升高; 底部沉积物孔隙较小, 包裹的水分较少, 导致底流质量浓度升高; 随着加药速度的继续增加, 絮凝剂分子紧密包裹住矿浆颗粒, 形成结构牢固的絮团, 絮团内部和絮团之间积聚大量水分, 导致底流质量浓度开始降低。

## 3 结论

(1) 本试验中絮凝剂的黏度受陈化时间的影响, 呈现先骤升后骤降再上升再下降的趋势, 8 h 时黏度最高, 但絮凝效果较差, 24 h 时黏度和絮凝效果都较好。

(2) 北营铁尾矿矿浆中添加絮凝剂后产生明显分界面, 通过絮凝剂优选试验, 结果表明在陈化时间 24 h、

质量浓度 0.3‰ 的条件下的 CPAM 比工厂现有的絮凝剂絮凝沉降效果要好;在 3 min 时,尾矿沉降趋于稳定,此时的澄清层界面高度为 42 mm,沉降速率为 0.03 mm/min,固体浓度为 70.24 %。

(3)通过动态沉降试验,发现试验中北营铁尾矿的底流质量浓度随入料矿浆质量浓度的增加而增加,随入料速度的增加而减小,随加药速度的增加先增加后减小;溢流含固量随入料矿浆质量浓度和入料速度的增加而增加,随加药速度的增加而减小。

### 参考文献:

- [1] 徐彪,李肖,陈焯年,等.本溪某铁选矿厂尾矿综合利用研究[J].矿冶工程,2018,38(1):67-70.  
XU B, LI X, CHEN X N, et al. Comprehensive utilization of tailings from iron concentrator in Benxi[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(1): 67-70.
- [2] 李玉凤,包景岭,张锦瑞.铁尾矿资源开发利用现状分析[J].中国矿业,2015,24(11):77-81+121.  
LI Y F, BAO J L, ZHANG J R. Status analysis of iron tailings comprehensive utilization[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(11): 77-81+121.
- [3] 张彪,姜春志.铁尾矿资源综合利用及研究进展[J].中国金属通报,2020(11):68-69.  
ZHANG B, JIANG C Z. Comprehensive utilization and research progress of iron tailings resources[J]. China Metal Bulletin, 2020(11): 68-69.
- [4] 刘昊,刘延安.尾矿处理的新方法—膏状尾矿堆场技术[J].矿业工程,2003,1(6):25-31.  
LIU H, LIU Y A. New method of tailings disposal—overground stockpiling of pasted tailings[J]. Mining Engineering, 2003, 1(6): 25-31.
- [5] 胡博,黄凌云,孙鑫,等.矿山废水处理技术研究进展[J].矿产保护与利用,2021,41(1):46-52.  
HU B, HUANG L Y, SUN X, et al. Research progress of mine wastewater treatment technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(1): 46-52.
- [6] 石竹,袁江,邵伟.典型历史遗留无主尾矿库环境治理工程实例[J].矿冶工程,2021,41(3):158-161.  
SHI Z, YUAN J, SHAO W. Case study—environmental treatment for a typical abandoned tailings pond[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(3): 158-161.
- [7] 蒋文利.铁选矿高悬浮物循环水处理与回用研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.  
JIANG W L. Study on treatment and reuse of high suspended solids circulating[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [8] 梁效,王勇海,吴天骄,等.无机和有机絮凝剂复配对铁尾矿沉降特性研究[J].金属矿山,2020(11):129-133.  
LIANG X, WANG Y H, WU T J, et al. Study on the settlement characteristics of iron tailings by combination of inorganic and organic flocculants[J]. Metal Mine, 2020(11): 129-133.
- [9] 龙国兵,张红梅,石肖,等.三氯化铁对细粒铁尾矿絮凝沉降的影响研究[J].矿业研究与开发,2022,42(9):110-115.  
LONG G B, ZHANG H M, SHI X, et al. Study on the effect of ferric chloride on flocculation and settlement of fine iron tailings[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(9): 110-115.
- [10] 韩瑞,吕宪俊,李琳,等.非离子絮凝剂对微细粒尾矿絮凝沉降的影响[J].中国矿业,2016,25(5):97-101.  
HAN R, LV X J, LI L, et al. The impact of non-ionic flocculant on the settling performance of micro-fine tailings[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(5): 97-101.
- [11] 崔宝玉,王小宇,张云海,等.聚丙烯酰胺在矿物加工领域的应用现状及策略[J].中国矿业,2022,31(4):109-115+123.  
CUI B Y, WANG X Y, ZHANG Y H, et al. Application status and strategy of polyacrylamide in mineral processing[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(4): 109-115+123.
- [12] GJ K. A theory of sedimentation[J]. Transactions of the Faraday society, 1952, 48: 166-176.
- [13] 何丽莉.煤矸石制备复合絮凝剂聚合氯化铝铁钙(PAFCC)的研究[D].沈阳:东北大学,2014.  
HE L L. Study on the synthesis of a new complex coagulant polyaluminum ferric calcium chloride with gangue[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [14] AT O, PD F, JD S, et al. The impact of polyacrylamide flocculant solution age on flocculation performance[J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 67(1/2/3/4): 123-144.
- [15] 彭乃兵,吴爱祥,王洪江,等.全尾砂絮凝沉降工艺研究[J].矿业研究与开发,2015,35(7):35-38.  
PENG N B, WU A X, WANG H J, et al. Research on flocculation sedimentation technology of unclassified-tailings[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(7): 35-38.
- [16] 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 Z J, YANG X B, LI L T, 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.
- [17] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局.铁矿采选工业污染物排放标准:GB 28661—2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.  
MEP, AQSIQ. Emission standard of pollutants for mining and mineral processing industry: GB 28661—2012[S]. Beijing: China Environmental Press, 2012.

## Experimental Dynamic Settlement of Beiyong Iron Tailings

ZHANG Yiye<sup>1</sup>, CUI Baoyu<sup>1</sup>, WANG Xiaoyu<sup>1,2</sup>, MA Congyu<sup>1</sup>, NING Qin<sup>3</sup>, LI Qiang<sup>4</sup>

1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110003, Liaoning, China;

2. BGRIMM Technology Group Co., Ltd., Beijing 100160, China;

3. Institute of mining technology, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

4. Department of Safety and Emergency Management, Yantai Engineering and Technology College, Yantai 264006, Shandong, China

**Abstract:** Dynamic settling experiments were carried out assisted with static settling experiments to improve the thickening performance of Benxi Beiyong iron tailings. The static optimizing experiments of flocculant were firstly carried out to explore the effects of flocculant type, aging time, and mass concentration of flocculant on flocculation settling performance, taking the height of clear layer, settling rate and solid mass concentration as indicators. Then experiments in the dynamic thickening device were carried out to investigate the effect of mass concentration of slurries, feed rate and dosing rate of flocculant on the flocculation settling under the continuous feed of slurries and flocculant. The accumulation rate, solid mass in the overflow and mass concentration of the underflow were used to evaluate the above experiments. Results shows that the cationic polyacrylamide (PAM) with aging time of 24 h and mass concentration of 0.3‰ had better flocculation performance than the on-site flocculant in the static settling experiment. At the 3 min of static settling experiments, the settling of tailings tended to stabilize. In this case, the height of clear layer was 42 mm, the settling rate was 0.03 mm/min and the solid mass concentration was 70.24%. The iron tailings achieved best dynamic settling effect, when the feed concentration of slurries was 14%, the feeding rate was 0.4 L/min, and the dosing rate was 12 mL/min. In this case, the solid mass in the overflow was 279 mg/L and the mass concentration of the underflow was 68.05%. Under the same conditions, the dynamic settling effect in the plant site was poor, with the solid mass of 282 mg/L in the overflow and the mass concentration of 62.32% of the underflow.

**Keywords:** iron tailings; flocculation settling; dynamic thickening

引用格式: 张艺邺, 崔宝玉, 王小宇, 马聪玉, 宁琴, 李强. 北营铁尾矿动态沉降试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 160-167.

ZHANG Yiye, CUI Baoyu, WANG Xiaoyu, MA Congyu, NING Qin, LI Qiang. Experimental dynamic settlement of Beiyong iron tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 160-167.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)



### 作者简介:

张艺邺(1996—), 男, 山东淄博人, 博士研究生。现就读于东北大学矿业工程专业, 师从崔宝玉副教授, 主要从事微细粒矿物高效絮凝沉降方面的研究工作。



### 通信作者简介:

崔宝玉(1982—), 男, 山东烟台人, 东北大学副教授、博士生导师, 矿物工程系副主任。围绕“重力选矿”和“矿物加工数值仿真与过程强化”研究方向, 主持科研项目30余项, 授权发明专利16项、发表高水平SCI论文30余篇。研究成果获教育部自然科学二等奖1项、绿色矿山科学技术一等奖1项、中国黄金协会科学技术奖二等奖1项。主持研究的微细粒矿物特异化精细分级装备已在鞍钢集团、大冶有色集团等多家大型矿山企业实现工业应用。