

# 基于 NSGA-II 算法的尾砂动态浓密半工业实验及其多目标优化

杨莹, 王国立, 董立波, 解志远, 刘伟涛

金诚信矿业管理股份有限公司, 北京 101500

中图分类号: TD853.34; TD926.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)02-0039-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.02.005

**摘要** 尾砂浓密工艺是一种多输入、多输出、高时滞的复杂系统, 探究不同因素影响下尾砂浓密多目标优化问题具有重要意义, 为推进尾砂浓密工艺的精准控制和智能化发展提供参考。研制了一套尾砂动态浓密半工业智能实验装置, 开展了尾砂动态浓密正交实验, 考察泥层高度、进料流量和耙架转速对尾砂浓密多目标的影响; 结合尾砂动态浓密半工业正交实验结果, 建立了底流质量浓度、溢流浊度和耙架扭矩的多元回归模型, 利用 MATLAB 软件的通讯模块, 实现了对尾砂动态浓密半工业实验效果的实时预测; 结合矿山对尾砂浓密的实际需求, 构建了基于 NSGA-II 算法的尾砂动态浓密多目标优化模型, 获得了优化后的尾砂动态浓密参数和浓密效果。研究结果表明: 泥层高度和进料流量对尾砂浓密效果具有显著影响, 泥层高度是影响浓密效果的最主要因素; 尾砂浓密多元回归模型的预测差异在 4.53% 以内, 模型拟合效果良好; 多目标优化后的尾砂动态浓密参数为泥层高度 0.30 m、进料流量 0.91 m<sup>3</sup>/h、耙架转速 3.80 r/min, 优化后的尾砂浓密效果为底流质量浓度 69.57%, 溢流浊度 40.41 NTU、耙架扭矩 11.53 N·m。

**关键词** 尾砂; 动态浓密半工业实验; 正交实验; 方差分析; 多元回归; 目标优化

## 引言

近年来, 膏体充填采矿因其安全、环保、经济、高效等显著优势<sup>[1-2]</sup>, 已成为金属矿绿色开采的重要变革性技术<sup>[3-4]</sup>。尾砂浓密是膏体充填技术的首要环节, 对后续工艺环节具有显著影响, 也是保证膏体充填质量的技术基础<sup>[5-6]</sup>。

尾砂浓密工艺过程复杂、影响因素众多<sup>[7-9]</sup>。相关学者在影响因素、室内实验、预测模型和目标优化等方面进行了研究。王贤情等<sup>[10]</sup>采用山东某金矿全尾砂进行静态和动态絮凝沉降实验, 考察砂浆质量浓度、絮凝剂单耗、给料速度等对浓密效果的影响。结果表明: 全尾砂浆质量浓度与絮凝剂单耗之间基本不存在交互作用, 全尾砂浆质量浓度对固体通量值影响显著性水平高于絮凝剂单耗; 浓密机给料速度与底流浓度和屈服应力呈负相关关系, 与溢流水含固量呈正相关关系。杨纪光等<sup>[11]</sup>通过尾砂浓密半工业实验, 探究了泥层高度和固体通量对尾砂浓密效果的影响。结果

表明: 底流质量分数与泥层高度呈非线性关系; 溢流水含固量与固体通量正相关, 底流质量分数与固体通量线性负相关。张钦礼等<sup>[12-13]</sup>通过建立 SVM、BP 神经网络等多种预测模型, 探究入料质量浓度、絮凝剂质量浓度和单耗等不同因素对尾砂浓密效果的影响, 并推荐出参数最优值。王晓军等<sup>[14]</sup>采用响应面法, 构建二次多项式回归模型, 探究不同因素对尾砂浓密效果的影响, 根据 Numercial 模块优化, 确定尾砂絮凝沉降的最优实验参数。吴再海<sup>[15]</sup>开展了超细尾砂絮凝沉降实验, 探索不同给料速度、给料浓度和絮凝剂单耗对料浆浓密效果的影响, 建立各因素与絮凝度值之间的非线性关系模型, 以絮凝度为指标, 分析不同元素的影响作用, 获得最优匹配。然而, 现阶段尾砂浓密半工业实验及其同步预测和多目标优化问题的进展还较为缓慢, 亟待进一步缩小实验室研究和现场需求的差异, 实现尾砂浓密智能化的现场应用。

因此, 本文自行研制一套尾砂动态浓密半工业智能实验装置, 开展尾砂动态浓密正交实验, 考察泥层

收稿日期: 2024-03-06

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2021M701516)

作者简介: 杨莹(1992—), 女, 辽宁沈阳人, 博士后, 高级工程师, 主要从事膏体充填、智能矿山等研究工作, E-mail: 18810607452@163.com。

通信作者: 王国立(1963—), 男, 北京人, 正高级工程师, 从事膏体充填、工程爆破等研究工作, E-mail: wangguoli@jchxmc.com。

高度、进料流量和耙架转速对尾砂浓密多目标的影响;构建底流质量浓度、溢流浊度和耙架扭矩的多元回归模型,实现尾砂动态浓密半工业实验效果的实时预测;结合矿山对尾砂浓密的实际需求,构建基于 NSGA-II 算法的尾砂动态浓密多目标优化模型,优化尾砂动态浓密参数和浓密效果。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验尾砂来自于国内某铜矿,尾砂比重为  $3.182 \text{ t/m}^3$ ,实验尾砂的粒度组成曲线见图 1。其中,  $-37 \mu\text{m}$  颗粒的累积分布为 49.01%,  $-74 \mu\text{m}$  颗粒的累积分布为 73.56%,属于中粒级尾砂。实验尾砂不均匀系数 11.71, 曲率系数 1.52, 级配良好。

絮凝剂: 根据前期絮凝沉降实验结果, 从 6 种不同类型絮凝剂中, 筛选出最优絮凝剂为阴离子絮凝剂艾森 6003s。

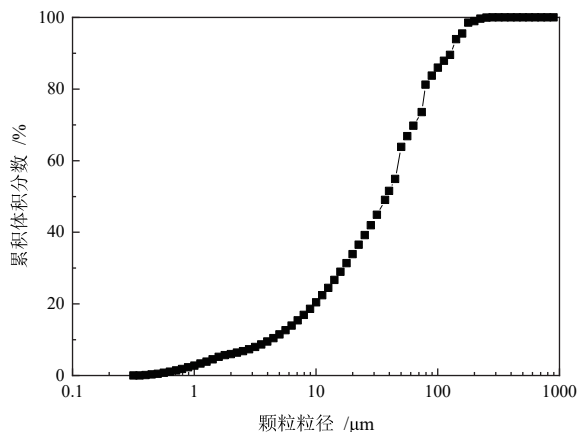


图 1 实验尾砂样品粒度分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of experimental tailings sample

实验基础参数: 根据前期尾砂静态絮凝沉降实验, 筛选出的最佳实验参数为: 尾砂进料质量浓度 15%, 絮凝剂最优单耗  $30 \text{ g/t}$ 、絮凝剂溶液质量浓度 0.01%, 为进行尾砂动态浓密半工业实验提供技术基础。

### 1.2 实验装置

自行研制一套尾砂动态浓密半工业智能实验装置(见图 2), 为开展尾砂动态浓密实验提供研究条件。整套实验装置放置在一个小型集装箱内, 便于移动和运输。实验装置以底部传动式浓密机模型为主体, 辅以尾砂浆制备与添加系统、絮凝剂制备与添加系统, 用于进行尾砂动态浓密和高效脱水的半工业实验; 在线监测与控制系统依托安装在浓密机模型上的浓度计、流量计和浊度仪等仪器, 进行尾砂浓密过程的实时监测, 将多源异构信息传递给智能多目标优化系统, 借助基于 NSGA-II 算法的尾砂浓密多目标优化模型, 实现尾砂动态浓密的智能多目标优化。

### 1.3 实验方法

半工业正交实验采用三因素三水平正交表  $L_9(3^3)$  进行方案设计, 其中因素 A 是泥层高度, 因素 B 是进料流量, 因素 C 是耙架转速。正交实验因素水平见表 1。

具体实验过程如下:

配制 2 桶约 600 kg 质量分数 15% 的尾砂浆体, 搅拌速度  $190 \text{ r/min}$ , 搅拌时间 30 min; 配制 2 桶约 60 kg 质量分数 0.01% 的絮凝剂溶液, 搅拌速度  $120 \text{ r/min}$ , 搅拌时间 24 h; 按照实验方案中的尾砂浆进料流量, 计算对应的絮凝剂溶液流量, 将配制好的尾砂浆和絮凝剂溶液泵送至浓密机模型, 按照实验方案中的耙架转速运行浓密机模型, 观测泥层高度; 依据物料平衡原则, 计算对应的底流流量; 继续进料, 待泥层高度值达到实验方案设计值(表 2), 按照计算的底流流量开始排料, 待泥层高度恢复稳定, 读取底流质量分数、溢

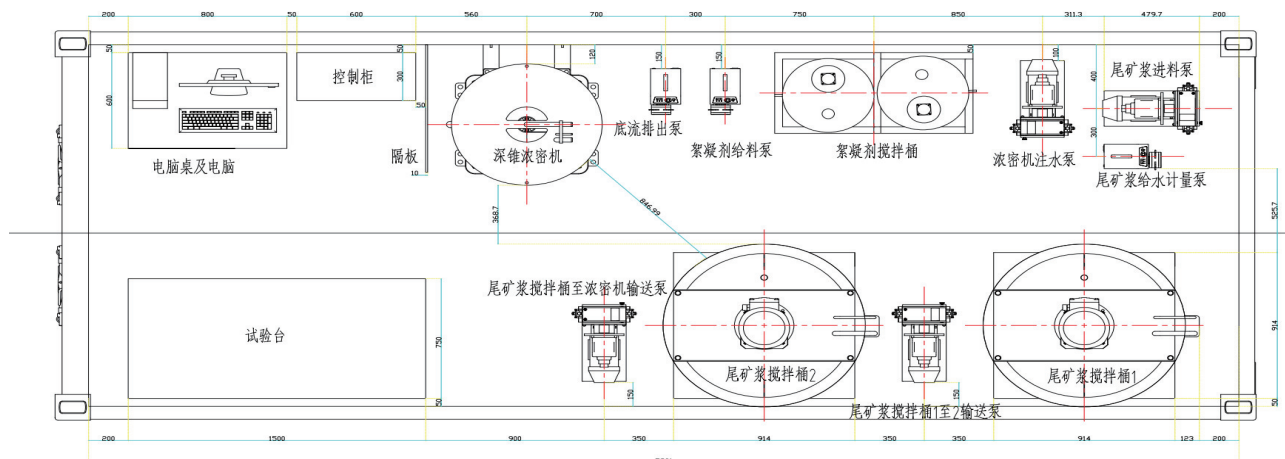


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram and photo of the experimental setup

表 1 正交实验因素水平

Table 1 Factor levels of orthogonal experiments

| 水平 | 因素      |                                          |                              |
|----|---------|------------------------------------------|------------------------------|
|    | A泥层高度/m | B进料流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | C耙架转速/(r·min <sup>-1</sup> ) |
| 1  | 0.15    | 0.97                                     | 1.50                         |
| 2  | 0.20    | 1.08                                     | 2.00                         |
| 3  | 0.30    | 1.19                                     | 2.50                         |

流浊度和耙架扭矩的在线监测值;通过底流取样口和溢流槽人工取样,分别测量底流质量分数和溢流浊度,与在线监测值进行对比;采集和保存实验过程的全部数据,为后续实验提供数据基础。

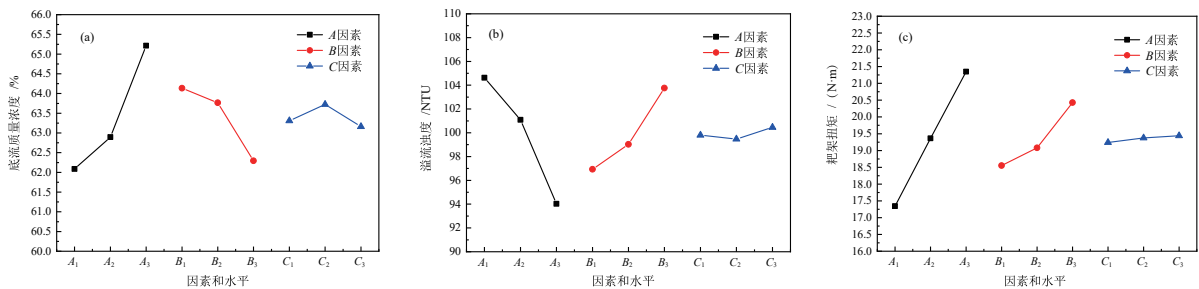
2 结果与讨论

2.1 正交实验结果分析

根据实验方案,进行尾砂动态浓密半工业正交实验,实验结果见表 2。由表 2 可知,底流质量浓度的范围是 60.58%~65.66%,溢流浊度的范围是 90.52~110.91 NTU,耙架扭矩的范围是 16.19~22.21 N·m。

2.1.1 极差分析

对尾砂浓密的底流质量浓度、溢流浊度和耙架扭矩进行极差分析,绘制出不同尾砂动态浓密效果的敏感性因素分析图(图 3)。图中 A<sub>1</sub> 代表因素 A 的第一水平, A<sub>2</sub> 代表因素 A 的第二水平, A<sub>3</sub> 代表因素 A 的第三水平, B、C 同理。



(a—底流质量浓度; b—溢流浊度; c—耙架扭矩)

图 3 不同浓密效果的敏感因素分析

(a—underflow concentration; b—overflow turbidity; c—rake frame torque)

Fig. 3 Analysis of sensitive factors for different thickening effects

采用极差分析方法,直观展现出影响尾砂动态浓密效果的主次因素,结合简单对比,即可获得最优水平的搭配<sup>[16-17]</sup>。在影响底流质量浓度的因素中,最优水平搭配是 A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>,即泥层高度 0.30 m,进料流量 0.97 m<sup>3</sup>/h,耙架转速 2.00 r/min;在影响溢流浊度的因素中,最优水平搭配是 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>,即泥层高度 0.15 m,进料流量 1.19 m<sup>3</sup>/h,耙架转速 2.50 r/min;在影响耙架扭矩的因素中,最优水平搭配是 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>,即泥层高度 0.30 m,进料流量 1.19 m<sup>3</sup>/h,耙架转速 2.50 r/min。

表 2 尾砂动态浓密半工业正交实验结果

Table 2 Results of semi-industrial orthogonal test for dynamic thickening of tailings

| 编号 | 因素     |                                         |                             | 指标       |          |            |
|----|--------|-----------------------------------------|-----------------------------|----------|----------|------------|
|    | 泥层高度/m | 进料流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 耙架转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 底流质量浓度/% | 溢流浊度/NTU | 耙架扭矩/(N·m) |
| 1  | 0.15   | 0.97                                    | 1.50                        | 62.95    | 100.71   | 16.19      |
| 2  | 0.15   | 1.08                                    | 2.00                        | 62.73    | 102.24   | 17.18      |
| 3  | 0.15   | 1.19                                    | 2.50                        | 60.58    | 110.91   | 18.66      |
| 4  | 0.20   | 0.97                                    | 2.00                        | 63.79    | 99.57    | 18.74      |
| 5  | 0.20   | 1.08                                    | 2.50                        | 63.24    | 99.93    | 18.94      |
| 6  | 0.20   | 1.19                                    | 1.50                        | 61.65    | 103.75   | 20.41      |
| 7  | 0.30   | 0.97                                    | 2.50                        | 65.66    | 90.52    | 20.72      |
| 8  | 0.30   | 1.08                                    | 1.50                        | 65.33    | 94.93    | 21.12      |
| 9  | 0.30   | 1.19                                    | 2.00                        | 64.65    | 96.62    | 22.21      |

由图 3 可以看出,对底流质量浓度影响最大的是泥层高度,最小的是耙架转速。尾砂动态浓密的底流质量浓度随着泥层高度的增加而增大,随着进料流量的增大而减小,随着耙架转速的变化先增大后减小;对溢流浊度影响最大的是泥层高度,最小的是耙架转速。溢流浊度随着泥层高度的增大而减小,随着进料流量的增大而增大,随着耙架转速的变化先减小后增大。在浓密机耙架扭矩的分析中,泥层高度的极差最大,表明控制浓密机耙架扭矩的主要因素是泥层高度,其次是进料流量。耙架扭矩随着泥层高度、进料流量和耙架转速的增大而增大。

2.1.2 方差分析

极差分析原理简单,直观易懂,但在确定不同因素对尾砂动态浓密效果的影响程度方面具有明显的局限性<sup>[18]</sup>。因此,采用方差分析方法,探究不同因素对尾砂动态浓密半工业实验结果影响显著程度。

由表 3 可知,在底流质量浓度的影响因素中, A 和 B 的 P 值均小于 0.05,说明泥层高度和进料流量对底流质量浓度的影响显著; C 的 P 值大于 0.05,说明耙

架转速对底流质量浓度的影响不显著。同理可得,三因素对溢流浊度的影响不显著;泥层高度和进料流量对耙架扭矩的影响显著,耙架转速对耙架扭矩的影响不显著。

表 3 正交实验的方差分析

Table 3 Analysis of variance in orthogonal experiments

| 指标     | 方差来源 | 离差平方和  | 自由度 | 均方    | F值    | P值   |
|--------|------|--------|-----|-------|-------|------|
| 底流质量浓度 | A    | 15.81  | 2   | 7.90  | 69.23 | 0.01 |
|        | B    | 5.69   | 2   | 2.85  | 24.92 | 0.04 |
|        | C    | 0.51   | 2   | 0.26  | 2.24  | 0.31 |
|        | D空白  | 0.23   | 2   | 0.11  |       |      |
| 溢流浊度   | A    | 174.64 | 2   | 87.32 | 10.75 | 0.08 |
|        | B    | 73.35  | 2   | 36.68 | 4.52  | 0.18 |
|        | C    | 1.49   | 2   | 0.74  | 0.09  | 0.92 |
|        | D空白  | 16.24  | 2   | 8.12  |       |      |
| 耙架扭矩   | A    | 24.08  | 2   | 12.04 | 91.16 | 0.01 |
|        | B    | 5.62   | 2   | 2.81  | 21.26 | 0.04 |
|        | C    | 0.06   | 2   | 0.03  | 0.24  | 0.81 |
|        | D空白  | 0.26   | 2   | 0.13  |       |      |

## 2.2 多元回归分析与预测

根据上述正交实验结果,将泥层高度、进料流量和耙架转速设置为自变量,分别记为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ ,将底流质量浓度、溢流浊度和耙架转速设置为因变量,分别记为  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ ,建立尾砂动态浓密半工业实验的多元非线性回归分析模型。为了验证模型的可靠度,计算出不同尾砂动态浓密效果指标回归模型预测值与实验值的相对误差。

### 2.2.1 回归分析模型

底流质量浓度模型可表示为:

$$f_1 = 39.74 - 142.13x_1 + 46.11x_2 + 17.16x_3 + 149.51x_1^2 - 23.37x_2^2 + 0.31x_3^2 + 104.43x_1x_2 - 11.19x_1x_3 - 14.20x_2x_3 R^2 = 0.999 \quad (1)$$

溢流浊度模型可表示为:

$$f_2 = 163.31 + 771.66x_1 - 145.26x_2 - 78.54x_3 - 687.48x_1^2 + 47.42x_2^2 - 8.59x_3^2 - 516.94x_1x_2 + 30.34x_1x_3 + 95.45x_2x_3 R^2 = 0.999 \quad (2)$$

耙架扭矩模型可表示为:

$$f_3 = 8.18 + 215.97x_1 - 25.60x_2 - 5.96x_3 - 219.79x_1^2 + 15.52x_2^2 - 2.23x_3^2 - 96.46x_1x_2 + 9.07x_1x_3 + 11.50x_2x_3 R^2 = 0.999 \quad (3)$$

采用正交实验结果验证尾砂动态浓密半工业实验的多元回归模型的预测精度。经计算,底流质量浓度、溢流浊度和耙架转速的相对误差均在 1.00% 以内,可见预测值与实验值具有良好的匹配性。

### 2.2.2 预测效果评估

为了实现对尾砂动态浓密半工业实验效果的实时预测,利用 MATLAB 软件将其多元回归分析模型编写成 M 文件。借助西门子通讯协议与 Simulink OPC 模块,实现浓密机传感器、PLC、MATLAB 软件之间的数据传输,在线监测模块将泥层高度、进料流量和耙架转速的监测结果实时传递给 MATLAB 软件, MATLAB 软件将预测结果实时传输并同步显示,实现尾砂动态浓密半工业实验的实时预测。通过对比尾砂动态浓密半工业实验的底流质量分数、溢流浊度和耙架扭矩的监测值与预测值的差异,进一步验证预测模型的实时计算精度。

在泥层高度 0.20 m、进料流量 1.19 m<sup>3</sup>/h、耙架转速 1.50 r/min 的动态连续浓密实验中,待泥层高度稳定后,底流质量分数实时监测值与预测值分布规律如图 4 所示。监测时间为 1 h,共计采集 7 200 个数据,其监测值在 60.09%~62.31% 范围波动,预测值基本保持在 61.31% 附近,预测误差在 2.03% 左右。

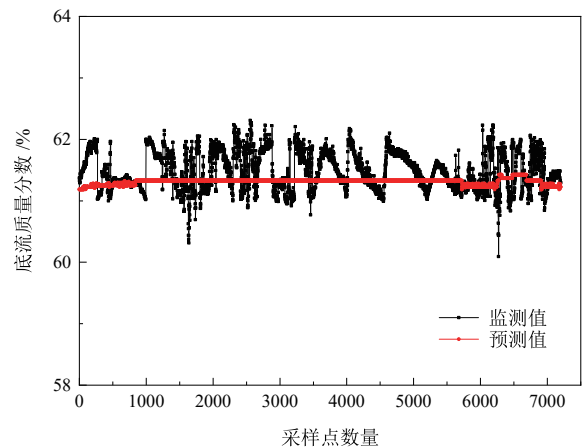


图 4 连续动态浓密底流质量分数的监测与预测

Fig. 4 Monitoring and prediction of continuous dynamic dense underflow concentration

在同一组实验中,待泥层高度稳定后,溢流浊度实时监测值与预测值分布规律如图 5 所示。监测时间为 1 h,共计采集 7 200 个数据,其监测值在 102.09~104.31 NTU 范围波动,预测值基本保持在 103.91 NTU 附近,预测误差在 1.78% 左右。

在同一组实验中,待泥层高度稳定后,耙架扭矩实时监测值与预测值分布规律如图 6 所示。监测时间为 1 h,共计采集 7 200 个数据,其监测值在 20.57~22.35 N·m 范围波动,预测值基本保持在 21.34 N·m 附近,预测误差在 4.53% 左右。

## 2.3 多目标优化

多目标优化旨在找到一组解决方案,使得多个相互竞争的目标都能在一定程度上得到满足,而不是只专注于优化单一目标<sup>[19]</sup>。结合矿山对尾砂浓密的实际需求,尾砂浓密效果的目标是底流质量浓度要尽可能

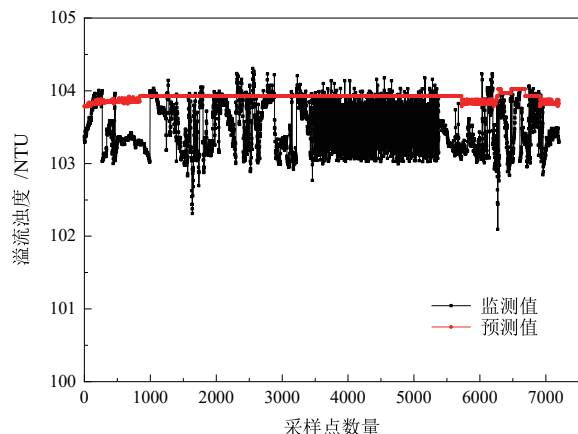


图5 连续动态浓密溢流浊度的监测与预测

Fig. 5 Monitoring and prediction of continuous dynamic dense overflow turbidity

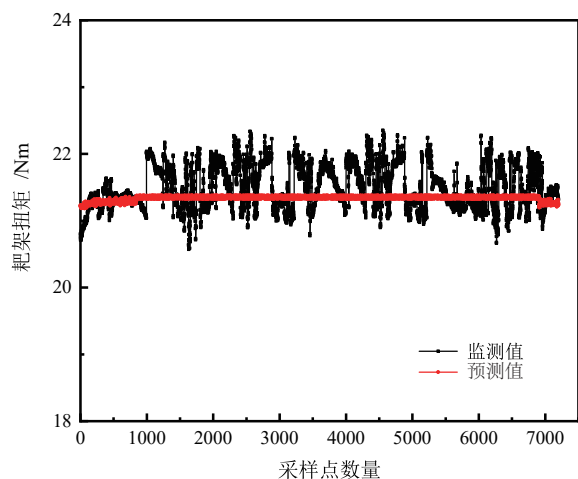


图6 连续动态浓密耙架扭矩的监测与预测

Fig. 6 Monitoring and prediction of continuous dynamic dense rake frame torque

提高,溢流浊度和耙架扭矩尽可能最小;其约束条件是泥层高度在0.10~0.50 m,进料流量在0.80~1.30 m<sup>3</sup>/h,耙架转速在1~4 r/min。因此,多目标优化问题如下:

$$\min[-(f_1), f_2, f_3] \quad (4)$$

约束条件为:

$$\begin{cases} 0.1 \leq x_1 \leq 0.5 \\ 0.8 \leq x_2 \leq 1.3 \\ 1 \leq x_3 \leq 4 \end{cases} \quad (5)$$

NSGA-II算法(带精英策略的快速非支配排序遗传算法)是一种多目标优化算法,相比传统算法,其具有收敛速度快、种群多样性高、参数简单、适用广泛、并行性好等诸多优点,对于解决多目标优化问题具有良好的性能<sup>[20]</sup>。

采用MATLAB软件进行基于NSGA-II算法的尾砂动态浓密半工业实验的多目标优化(图7),算法的具体参数设置为:最优前端系数0.30,种群大小100,遗传代数100,停止代数100,适应度函数偏差为0.0001。

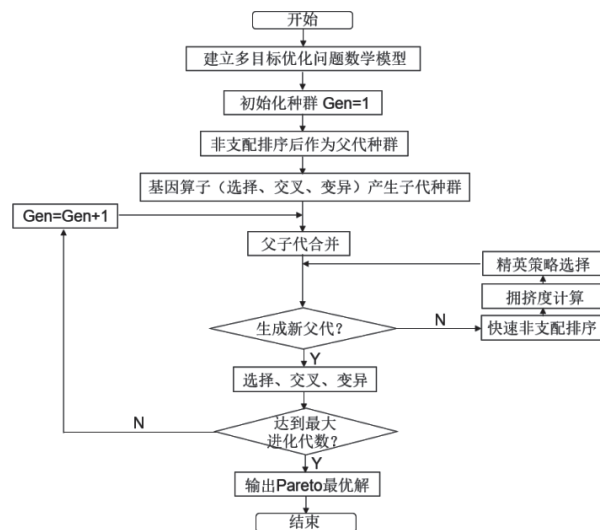


图7 基于NSGA-II算法的尾砂动态浓密多目标优化步骤  
Fig. 7 Multi objective optimization steps for dynamic thickening of tailings based on NSGA-II algorithm

经过基于NSGA-II算法的尾砂动态浓密半工业实验的多目标优化,获得优化后的尾砂动态浓密参数为泥层高度0.30 m、进料流量0.91 m<sup>3</sup>/h、耙架转速3.80 r/min,优化后的尾砂浓密效果为底流质量浓度69.57%、溢流浊度40.41 NTU,耙架扭矩11.53 N·m。

### 3 结论

基于NSGA-II算法的尾砂动态浓密半工业实验及其多目标优化采用正交试验手段,解析了多种因素对尾砂浓密等的影响;建立了尾砂浓密效果指标的多元回归模型,利用MATLAB软件,实现了对尾砂动态浓密试验的智能实时预测;基于NSGA-II算法,优化建立的模型,获取到优化后的尾砂动态结果,可进行尾砂浓密的自适应优化控制。探究不同因素影响下尾砂浓密多目标优化问题,为推进尾砂浓密工艺的精准控制和智能化发展提供了参考。

(1)自行研制一套尾砂动态浓密半工业智能实验装置,真实模拟现场浓密机工作状态。开展了尾砂动态浓密正交实验,考察泥层高度、进料流量和耙架转速对尾砂浓密多目标的影响。由极差分析和方差分析结果可知,泥层高度和进料流量对尾砂浓密效果具有显著影响,泥层高度是影响浓密效果的最主要因素。

(2)结合尾砂动态浓密半工业正交实验结果,建立了底流质量浓度、溢流浊度和耙架扭矩的多元回归模型。利用MATLAB软件的通讯模块,实现了对尾砂动态浓密半工业实验效果的实时预测,将尾砂浓密效果的预测值与实验值进行对比,差异均在4.53%以内,模型拟合效果良好。

(3)结合矿山对尾砂浓密的实际需求,构建了基于NSGA-II算法的尾砂动态浓密多目标优化模型,获得优化后的尾砂动态浓密参数为泥层高度0.30 m、

进料流量 0.91 m<sup>3</sup>/h、耙架转速 3.80 r/min, 优化后的尾砂浓密效果为底流质量浓度 69.57%、溢流浊度 40.41 NTU、耙架扭矩 11.53 N·m。

### 参考文献:

- [1] CAI M, LI P, TAN W, et al. Key engineering technologies to achieve green, intelligent, and sustainable development of deep metal mines in China[J]. *Engineering*, 2021, 7(11): 1513–1517.
- [2] 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.  
WU A X, YANG Y, CHENG H Y, et al. Status and prospects of paste technology in China[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(5): 517–525.
- [3] 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/OL]. *中国有色金属学报*, 1–19[2024-02-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20240123.1128.001.html>.  
WU A X, ZHANG J J, WANG Y M, et al. Cemented paste backfill: a transformative technology for green mining in metal mines[J/OL]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1–19[2024-02-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20240123.1128.001.html>.
- [4] QI C, FOURIE A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: review and future perspectives[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 144(9): 106025.
- [5] 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 Z E, WU A X, JIAO H Z, 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.
- [6] 王洪江, 彭青松, 杨莹, 等. 金属矿尾砂浓密技术研究现状与展望[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(6): 971–980.  
WANG H J, PENG Q S, YANG Y, et al. Research status and prospect of thickening technology for metal tailings[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(6): 971–980.
- [7] 王辉镜. 基于静态浓密试验的全尾砂絮凝沉降规律研究[J]. *现代矿业*, 2023, 39(2): 84–87+91.  
WANG H J. Study on flocculation and sedimentation law of unclassified tailings based on static and dynamic thickening test[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(2): 84–87+91.
- [8] 肖崇春. 基于全尾砂深度浓密演绎机理的智能预测模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.  
XIAO C C. Research on intelligent prediction model based on depth thickening deductive mechanism of unclassified tailings[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [9] 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 L Y, YANG P, LYU W S. Experimental study on influencing factors of flocculation sedimentation and thickening of unclassified tailings[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(8): 59–64.
- [10] 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): 1358–1366.  
WANG X Q, WAN W, WANG G, et al. Study on flocculation and sedimentation characteristics of unclassified tailings in gold mine[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2023, 19(4): 1358–1366.
- [11] 杨纪光, 吴再海, 寇云鹏, 等. 某金矿两段分级超细尾砂静态沉降与半工业浓密试验研究[J]. *金属矿山*, 2022(9): 37–42.  
YANG J G, WU Z H, KOU Y P, et al. Experimental study on static settlement and semi industrial thickening of two-stage classification ultrafine tailings in a gold mine[J]. *Metal Mine*, 2022(9): 37–42.
- [12] 张钦礼, 王石, 王新民. 絮凝剂单耗对全尾砂浆浑液面沉速的影响规律[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(2): 318–324.  
ZHANG Q L, WANG S, WANG X M. Influence rules of unit consumptions of flocculants on interface sedimentation velocity of unclassified tailings slurry[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(2): 318–324.
- [13] 张钦礼, 刘奇, 赵建文. 全尾砂絮凝沉降参数预测模型研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(6): 875–879.  
ZHANG Q L, LIU Q, ZHAO J W. Study on the parameters prediction model of flocculating sedimentation of crude tailings[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2016, 37(6): 875–879.
- [14] 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.  
WANG X J, MA X X, SUN Y F, et al. Multi-factor coupling analysis on flocculation and sedimentation effect of whole tailings based on RSM-BBD[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(6): 62–67.
- [15] 吴再海. 基于超细尾砂絮凝沉降浓密试验及应用分析[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(10): 117–125.  
WU Z H. Study and application of flocculation sedimentation thickening experiment based on ultrafine tailings[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022, 12(10): 117–125.
- [16] 张美道, 饶远章, 徐文峰, 等. 全尾砂膏体充填配比优化正交试验[J]. *黄金科学技术*, 2021, 29(5): 740–748.  
ZAHNG M D, RAO Y Z, XUN W F, et al. Orthogonal experiment for optimizing the filling ratio of unclassified tailings paste[J]. *Gold Science and Technology*, 2021, 29(5): 740–748.
- [17] 黄仁东, 李哲. 基于正交试验的细尾砂-分级尾砂充填体强度研究[J]. *黄金科学技术*, 2021, 29(2): 256–265.  
HUANG R D, LI Z. Research on the strength of fine tailings-graded tailings filling body based on orthogonal experiment[J]. *Gold Science and Technology*, 2021, 29(2): 256–265.
- [18] 李志强, 张轩硕, 卜娜蕊, 等. 基于正交实验金尾矿砂再生混凝土实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(6): 73–78+83.  
LI Z Q, ZHANG X S, BU N R, et al. Research on orthogonal test of mixture ratio of gold tailings recycled concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(6): 73–78+83.
- [19] 袁士宝, 白玉, 蒋海岩, 等. 基于遗传算法的割缝衬管防砂多目标优化[J]. *数学的实践与认识*, 2021, 51(2): 113–119.  
YUAN S B, BAI Y, JIANG H Y, et al. Multi-objective optimization of sand control for slotted lining pipes based on genetic algorithm[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(2): 113–119.
- [20] 高峰, 艾浩泉, 梁耀东, 等. 基于 NSGA-II 算法的废石及尾砂混合充填料配比优化[J]. *黄金科学技术*, 2022, 30(1): 46–53.  
GAO F, AI H Q, LIANG Y D, et al. Optimization of proportioning of waste rock and tailings mixed filling materials based on NSGA-II algorithm[J]. *Gold Science and Technology*, 2022, 30(1): 46–53.

## Semi-industrial Experiment of Dynamic Thickening of Tailings Based on NSGA-II Algorithm and Its Multi-objective Optimization

YANG Ying, WANG Guoli, DONG Libo, XIE Zhiyuan, LIU Weitao

JCHX Mining Management Co., Ltd., Beijing 101500, China

**Abstract:** The tailings thickening process is a complex system with multiple inputs, multiple outputs, and high time delay. Exploring the multi-objective optimization problem of tailings thickening under different factors is of great significance, which provides reference for promoting precise control and intelligent development of tailings thickening process. A semi-industrial intelligent testing device for dynamic thickening of tailings was developed to conduct orthogonal experiments on dynamic thickening of tailings, and investigate the effects of mud layer height, feed flow rate, and rake speed on the multi-objective thickening of tailings; A multiple regression model was established for underflow concentration, overflow turbidity, and rake torque based on the results of semi-industrial orthogonal experiments for dynamic thickening of tailings. Using the communication module of MATLAB software, the real-time prediction of the semi-industrial test effect of dynamic thickening of tailings was achieved; Taking into account the actual demand of mines for tailings thickening, a multi-objective optimization model for dynamic tailings thickening based on NSGA-II algorithm was constructed. The optimized parameters and thickening effects of dynamic tailings thickening were obtained. The research results indicate that the height of the mud layer and the feed flow rate had a significant impact on the thickening effect of tailings. The height of the mud layer was the most important factor affecting the thickening effect. The prediction difference of the multiple regression model for tailings thickening process was within 4.53%, and the model fitting effect was good; The optimized parameters for tailings thickening after multi-objective optimization were mud layer height of 0.30 m, feed flow rate of 0.91 m<sup>3</sup>/h, and rake speed of 3.80 r/min. The optimized tailings thickening effect parameters were underflow mass concentration of 69.57%, overflow turbidity of 40.41 NTU, and rake torque of 11.53 N·m.

**Keywords:** tailings; semi-industrial test of dynamic thickening; orthogonal experiment; analysis of variance; multiple regression; target optimization

引用格式: 杨莹, 王国立, 董立波, 解志远, 刘伟涛. 基于 NSGA-II 算法的尾砂动态浓密半工业实验及其多目标优化[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(2): 39-45.

YANG Ying, WANG Guoli, DONG Libo, XIE Zhiyuan, LIU Weitao. Semi-industrial experiment of dynamic thickening of tailings based on nsga-ii algorithm and its multi-objective optimization[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(2): 39-45.

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

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