

响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降试验研究^①

牛福生¹, 武佳慧¹, 于晓东¹, 石肖², 张亚强², 郭建波³, 张宝宏³

(1.华北理工大学矿业工程学院,河北唐山063200; 2.唐山市斯瑞尔化工有限公司,河北唐山063000; 3.迁西县中兴矿业有限公司,河北唐山064300)

摘要:针对细粒铁尾矿浆难以沉降的特点,采用响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降条件。根据 Design-Expert 8.0 软件中的 Box-Behnken 试验方法设计三因素三水平试验,得到细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型的回归方程,结果表明,适宜的絮凝沉降条件为:无机絮凝剂 FeCl₃ 用量 113.44 mg/L、有机絮凝剂 PAM 用量 0.61 mg/L、搅拌速度 440.57 r/min,在该条件下进行絮凝沉降,预测矿浆浊度 11.45NTU,实测矿浆浊度 12.38NTU,结果误差较小,模型准确度较好。结合模型方差分析、可信度分析、因素相互作用分析,证实采用响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降条件合理可行,可为细粒铁尾矿浆的高效处理提供理论依据。

关键词: 响应曲面法; 絮凝沉降; 细粒铁尾矿浆; 浊度

中图分类号: TD926.4

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.011

文章编号: 0253-6099(2023)03-0047-05

Optimization of Flocculation Settlement Parameters of Fine Iron Tailings Slurry by Response Surface Methodology

NIU Fusheng¹, WU Jiahui¹, YU Xiaodong¹, SHI Xiao², ZHANG Yaqiang², GUO Jianbo³, ZHANG Baohong³

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063200, Hebei, China; 2. Tangshan 3R Chemical Co Ltd, Tangshan 063000, Hebei, China; 3. Qianxi County Zhongxing Mining Co Ltd, Tangshan 064300, Hebei, China)

Abstract: Response surface methodology (RSM) was used to optimize the flocculation settlement parameters of fine iron tailings slurry. According to the Box-Behnken test method in Design-Expert 8.0 software, a three-factor and three-level test was designed to obtain a regression equation of turbidity model for flocculation settlement of fine-grained iron tailings slurry. The results show that with the following favorable flocculation settlement parameters, including addition of inorganic flocculant FeCl₃ at an amount of 113.44 mg/L, organic flocculant PAM at an amount of 0.61 mg/L and stirring speed of 440.57 r/min, the slurry turbidity is predicted to be 11.45NTU, while the measured value is 12.38NTU, indicating that the model has a good accuracy with a small error. Based on the model variance analysis, reliability analysis and factor interaction analysis, it can be verified that RSM is reasonable and feasible to be used for optimizing the flocculation settlement parameters of fine iron tailings slurry, which can provide theoretical basis for its efficient treatment.

Key words: response surface methodology (RSM); flocculation settlement; fine-grained iron tailings pulp; turbidity

我国铁矿平均入选品位约 25.54%,总体低于国外平均入选铁品位^[1]。选矿过程中大量的细粒铁尾矿浆颗粒粒度细小,具有浊度高、自然沉降速度慢、上清液悬浮物含量高的特点,难以处理,对生态环境和尾矿库的安全运行造成威胁^[2-3]。絮凝沉降对降低铁尾矿浆浊度起主要作用,其中影响细粒铁尾矿浆絮凝沉降

效果的主要因素包括絮凝剂用量、矿浆性质、水力条件 3 个方面^[4-8]。本文针对细粒铁尾矿浆难以沉降的特性,采用单因素试验探索不同种类絮凝剂用量及搅拌速度对矿浆浊度的影响,并在此基础上通过响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降条件,为细粒铁尾矿浆的高效处理提供理论参考。

① 收稿日期: 2022-12-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874135); 河北省自然科学基金(E202209108)

作者简介: 牛福生(1974—),男,河北临漳人,博士,教授,博士研究生导师,主要从事金属、非金属矿产资源综合利用、复杂细粒矿的选矿工艺、设备、药剂研究开发等方面的教学与研究工作。

通信作者: 武佳慧(1996—),女,辽宁辽阳人,硕士研究生,主要研究方向为复杂细粒矿的选矿工艺、设备、药剂研究开发。

1 原料性质及试验材料

1.1 矿浆性质

铁尾矿浆取自河北某选厂,矿浆浓度 4.5%,浊度大于 400NTU。对矿浆烘干所得铁尾矿采用 X 射线荧光光谱仪进行化学成分分析,结果如表 1 所示。由表 1 可知,矿浆中主要成分为 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Al_2O_3 ,其中 SiO_2 含量高达 64.630%, Fe_2O_3 含量次之,该铁尾矿为高硅鞍山式铁尾矿。

表 1 铁尾矿化学成分分析结果(质量分数) %

SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	P_2O_5	Na_2O	TiO_2
64.630	10.524	8.365	7.630	3.841	2.124	0.828	0.817	0.607

采用 NKT6100-D 全自动激光粒度分析仪分析了铁尾矿的粒度组成,结果如表 2 所示。

表 2 铁尾矿粒度组成

粒度/ μm	累计含量/%
<10	38.29
<20	57.89
<40	80.35
<60	90.69
<80	95.83
<100	98.46
<120	99.62

由表 2 可知,铁尾矿浆中 99.62% 的固体悬浮物粒度小于 120 μm ,铁尾矿粒度主要分布在 0~60 μm 粒级,60~120 μm 粒级占比较小。铁尾矿粒度细,在矿浆胶体中形成稳定的分散系,导致铁尾矿浆自然沉降速度慢、浊度高,不利于铁尾矿浆的高效处理^[9]。

1.2 试验设备及材料

试验所用絮凝药剂为无机絮凝剂三氯化铁(FeCl_3)和有机絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM),其中 PAM 为分子质量 1 000 万的阴离子型聚丙烯酰胺。

试验主要设备为 X 射线荧光光谱仪、NKT6100-D 全自动激光粒度分析仪、SGZ-400A 浊度计、双数显恒温磁力搅拌器等。试验所用软件为 Design-Expert 8.0 响应曲面分析软件。

2 细粒铁尾矿浆絮凝沉降单因素试验

采用单因素试验研究了无机絮凝剂用量、有机絮凝剂用量以及搅拌速度对细粒铁尾矿浆浊度降低效果的影响,在 20 $^\circ\text{C}$ 、矿浆 pH 值 7 条件下采用阶段加药的

方式进行试验,先投加无机絮凝剂 FeCl_3 (浓度 30%)再投加有机絮凝剂 PAM(浓度 0.1%),搅拌 30 s 絮凝,静置沉降 2 min 后取上清液放入 SGZ-400A 浊度计中测量浊度。单因素试验结果表明,在无机絮凝剂 FeCl_3 用量 120 mg/L、有机絮凝剂 PAM 用量 0.60 mg/L、搅拌速度 400 r/min 条件下,细粒铁尾矿浆絮凝沉降后的矿浆浊度可降至 13NTU~14NTU。单因素试验结果不仅为后续响应曲面法的优化提供了参数选择,也成为对比验证响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降条件的依据之一。

3 响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降

响应曲面法是在数学与统计学基础上结合计算机科学的试验优化方法,以多元线性回归法为基础设计试验的因素并得到相应的响应值,通过 Design-Expert 8.0 软件对试验因素及响应值进行优化。根据 Box-Behnken 试验设计方法将试验所得响应值进行拟合得到适用于该系统的数学模型,根据 ANOVA 分析得出各因素与响应值的关系、模型的复相关系数(R^2)、修正决定系数($\text{Adj-}R^2$)、变异系数(CV)、信噪比等模型信息,根据模型的可信分析可以看出模型预测值与实际值的拟合程度,根据 3D 曲面与等高线对因素交互作用进行评估^[10]。响应曲面法在工艺优化中应用广泛,具有简化试验流程、预测结果精确度高、加速试验进程等优势,可为高效处理细粒铁尾矿浆提供合理可行的优化方案^[11]。

3.1 响应曲面模型的建立

根据单因素试验结果,采用 Box-Behnken 试验设计方法设计三因素三水平试验,三因素为 FeCl_3 用量、PAM 用量和搅拌速度,响应值为矿浆浊度,响应曲面法优化试验的因子编码及水平如表 3 所示。

表 3 试验设计因子编码与水平

变量	编码	编码水平		
		-1	0	1
FeCl_3 用量(mg/L)	X_1	80	120	160
PAM 用量(mg/L)	X_2	0.4	0.6	0.8
搅拌速度(r/min)	X_3	300	400	500

根据试验因子编码与水平,采用 Design-Expert 8.0 软件设计了各因素在不同水平交互条件下的试验方案,方案及结果如表 4 所示。

对表 4 结果进行回归分析可得细粒铁尾矿浆絮凝沉降的浊度模型,模型中细粒铁尾矿浆浊度的响应范围为 13.22NTU~45.98NTU。

表4 试验方案及结果

编号	X_1	X_2	X_3	浊度(NTU)
1	160.00	0.40	400.00	38.79
2	120.00	0.60	400.00	13.56
3	120.00	0.80	500.00	17.78
4	160.00	0.60	300.00	45.98
5	120.00	0.60	400.00	13.34
6	120.00	0.40	500.00	20.21
7	120.00	0.60	400.00	13.26
8	160.00	0.60	500.00	23.57
9	120.00	0.60	400.00	13.22
10	120.00	0.60	400.00	13.38
11	80.00	0.60	300.00	30.50
12	80.00	0.80	400.00	27.50
13	80.00	0.40	400.00	15.34
14	160.00	0.80	400.00	18.13
15	120.00	0.40	300.00	34.57
16	120.00	0.80	300.00	29.50
17	80.00	0.60	500.00	19.50

3.2 响应曲面模型分析

3.2.1 模型方差分析

Box-Behnken 试验设计方法中三因素三水平试验的回归方程表达式为^[12]：

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2 + A_{33}X_3^2 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 \quad (1)$$

式中 A_0 为常数项； A_1 、 A_2 、 A_3 均为线性系数； A_{11} 、 A_{22} 、 A_{33} 为二次项系数； A_{12} 、 A_{13} 、 A_{23} 为交叉项系数。各回归系数数值和符号表达了不同因素对响应值的响应程度及正负影响。经过软件 ANOVA 分析，细粒铁尾矿浆絮凝沉降后浊度的数学模型为：

$$Y = 13.35 + 4.20X_1 - 2.00X_2 - 7.44X_3 - 8.20X_1X_2 - 2.85X_1X_3 + 0.66X_2X_3 + 7.98X_1^2 + 3.61X_2^2 + 8.56X_3^2 \quad (2)$$

细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型的 ANOVA 分析结果如表 5 所示。

表5 细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型方差分析结果

来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
模型	1 614.37	9	179.37	117.88	<0.000 1
X_1	141.37	1	141.37	92.91	<0.000 1
X_2	32.00	1	32.00	21.03	0.002 5
X_3	442.38	1	442.38	290.73	<0.000 1
X_1X_2	269.29	1	269.29	176.98	<0.000 1
X_1X_3	32.55	1	32.55	21.39	0.002 4
X_2X_3	1.74	1	1.74	1.15	0.320 1
X_1^2	268.14	1	268.14	176.22	<0.000 1
X_2^2	54.80	1	54.80	36.02	0.000 5
X_3^2	308.18	1	308.18	202.53	<0.000 1
残差	10.65	7	1.52		
失拟	10.58	3	3.53	201.32	<0.000 1
纯误差	0.070	4	0.018		
总离差	1 625.02	16			
R^2	0.993 4	Adj- R^2	0.985 0	CV	5.4%
				信噪比	32.796

由表 5 可知，细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型的 F 值为 117.88、 P 值小于 0.000 1，表示模型高度显著。 R^2 为 0.993 4、Adj- R^2 为 0.985 0，表明模型拟合程度较高、误差较小。变异系数(CV)与信噪比反映了模型的精确度，CV 值越低、信噪比越高表明模型的准确度越好^[13]，细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型的 CV 值为 5.4%，小于 10%，信噪比为 32.796，大于 4，模型准确度较高。由 F 值可看出，因素对细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度影响的显著性大小依次为： $X_3 > X_3^2 > X_1X_2 > X_1^2 > X_1$ 。

3.2.2 模型可信度分析

通过 Design-Expert 8.0 软件的 Diagnostics 功能对细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型的预测值与实际值进行诊断可以获得模型的可信度。细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型的预测值与实际值关系如图 1 所示。由图 1 可知，细粒铁尾矿浆絮凝沉降后浊度的预测值与实际值相关性较好，数据分布趋近于一条直线，拟合后 $R^2 = 0.991 9$ ，拟合程度高。证实采用响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降条件是可信的。

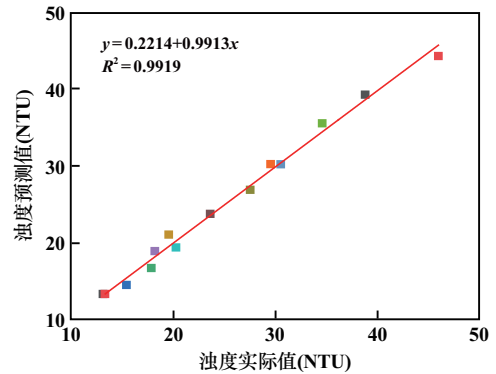


图1 矿浆浊度预测值与实际值关系

通过系统模型的残差分布可以进一步体现模型预测值与实际值之间的误差。细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型的残差分布如图 2 所示。由图 2 可知，模型残差分布均匀且基本满足正态分布规律，矿浆浊度预测值与实际值之间误差较小，浊度模型预测准确度高，表

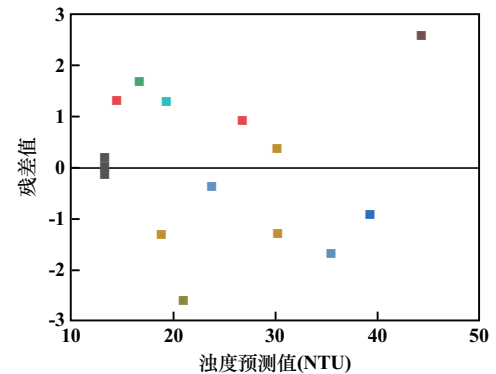


图2 矿浆浊度残差分布

明采用响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降后的浊度模型可信度高。

3.2.3 因素交互作用分析

通过 Design-Expert 8.0 软件的 Model Graph 功能查看细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度模型的响应曲面图和等高线图,根据 3D 曲面图和等高线图分析无机絮凝剂 FeCl₃ 用量、有机絮凝剂 PAM 用量、搅拌速度这三个因素交互作用的显著性。等高线为椭圆或曲面曲率较大说明因素交互作用显著^[13]。

无机絮凝剂 FeCl₃ 用量与有机絮凝剂 PAM 用量交互作用的响应曲面与等高线如图 3 所示。由图 3 可知,无机絮凝剂 FeCl₃ 用量与有机絮凝剂 PAM 用量交互作用的 3D 响应曲面曲率大,等高线呈椭圆形,表明无机絮凝剂 FeCl₃ 用量与有机絮凝剂 PAM 用量的交互作用对矿浆浊度的影响显著。随着无机絮凝剂 FeCl₃ 用量增加,矿浆浊度呈先下降后上升的趋势;随着有机絮凝剂 PAM 用量增加,矿浆浊度呈先下降后上升的趋势;在 FeCl₃ 与 PAM 投加比例固定时矿浆浊度

随两种絮凝剂用量增加呈先降低后上升趋势。无机絮凝剂主要通过吸附电中和与压缩双电层原理产生絮凝作用,随着 FeCl₃ 投加量增加,矿浆胶体中离子浓度升高,扩散层厚度减小,异号电荷相互吸引导致颗粒间斥力减小,有利于细粒铁尾矿的絮凝;但 FeCl₃ 用量过多会导致矿浆胶体中离子浓度过高,吸附电中和作用达到极限后颗粒间产生新的斥力,不利于絮凝^[14]。有机絮凝剂主要通过吸附架桥和网捕卷扫原理产生絮凝作用,随着 PAM 投加量增加,有机高分子长链吸附的颗粒越多、絮团体积越大、沉降速度越快;但 PAM 用量过多会导致吸附作用过强产生分散稳定作用,不利于细粒铁尾矿的絮凝沉降^[15]。

有机絮凝剂 PAM 用量与搅拌速度交互作用的响应曲面与等高线如图 4 所示。由图 4 可以看出,有机絮凝剂 PAM 用量与搅拌速度交互作用的 3D 响应曲面曲率较大,等高线形状较椭圆,表明有机絮凝剂 PAM 用量与搅拌速度的交互作用对矿浆浊度的影响较显著。在絮凝药剂用量一定的情况下,随着搅拌速

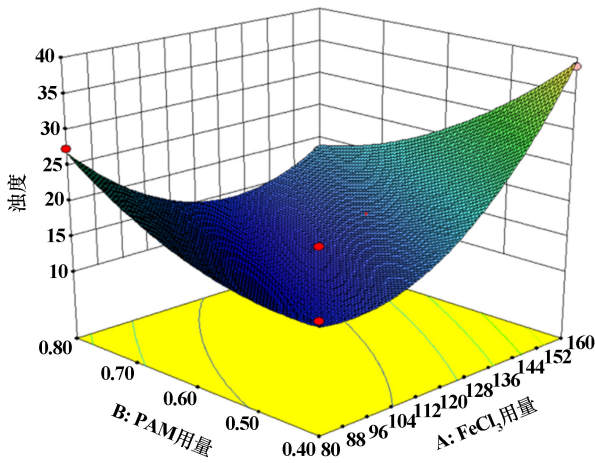


图 3 FeCl₃ 用量与 PAM 用量交互作用响应曲面与等高线

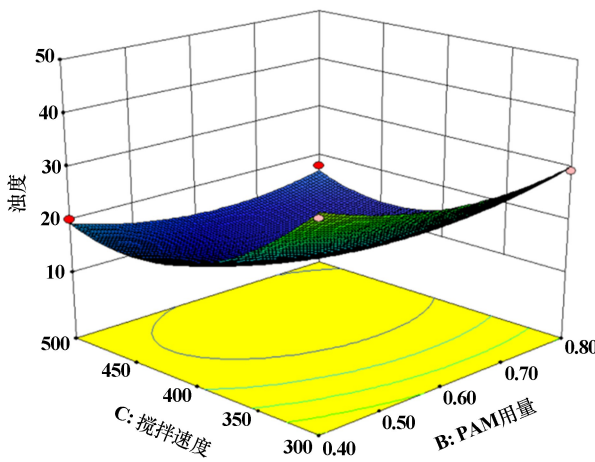
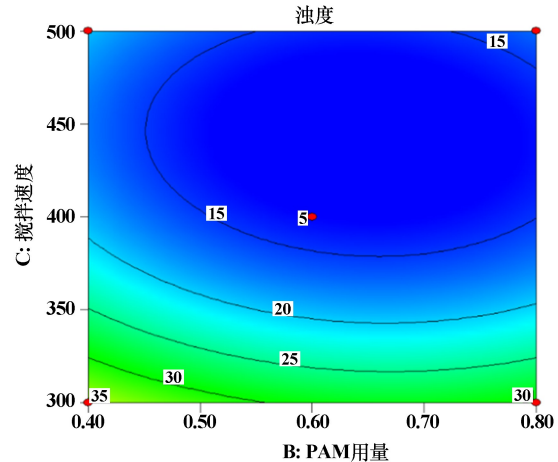
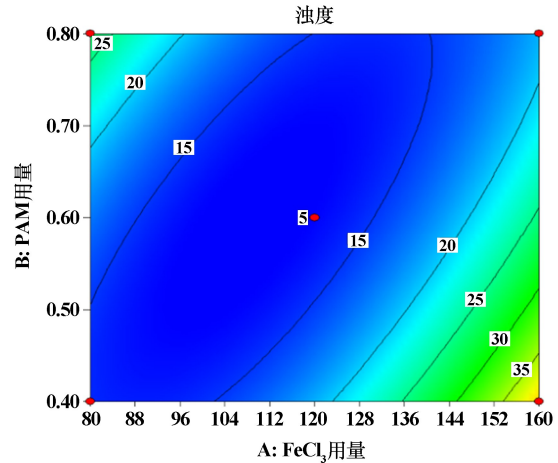


图 4 PAM 用量与搅拌速度交互作用响应曲面与等高线



度增大,矿浆浊度呈先下降后上升的趋势。

无机絮凝剂 FeCl_3 用量与搅拌速度交互作用的响应曲面与等高线如图 5 所示。由图 5 可知,无机絮凝剂 FeCl_3 用量与搅拌速度交互作用的 3D 响应曲面曲率较大,等高线形状较椭圆,表明无机絮凝剂 FeCl_3 用

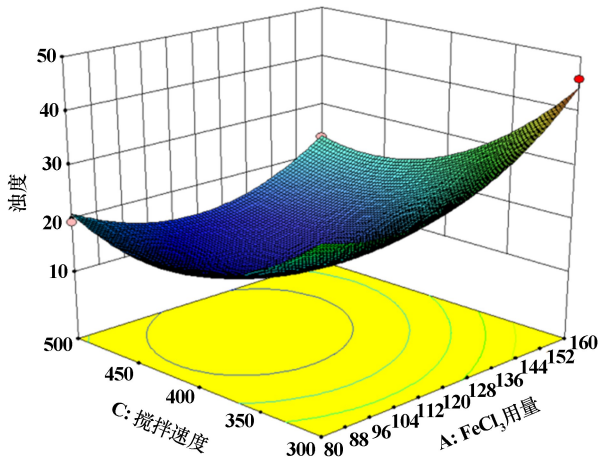


图 5 FeCl_3 用量与搅拌速度交互作用响应曲面与等高线

3.3 优化试验结果与试验验证

通过 Design-Expert 8.0 的 Optimization 功能对细粒铁尾矿浆絮凝沉降的浊度模型进行优化和较佳条件预测,扩大浊度响应模型的预测范围至 0~50NTU,经分析得出较佳的细粒铁尾矿浆絮凝沉降条件如表 6 所示。

表 6 优化试验结果与验证

数据类别	FeCl_3 用量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	PAM 用量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	搅拌速度/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	上清液浊度 (NTU)
预测值	113.44	0.61	440.57	11.45
实测值	113.44	0.61	441	12.38

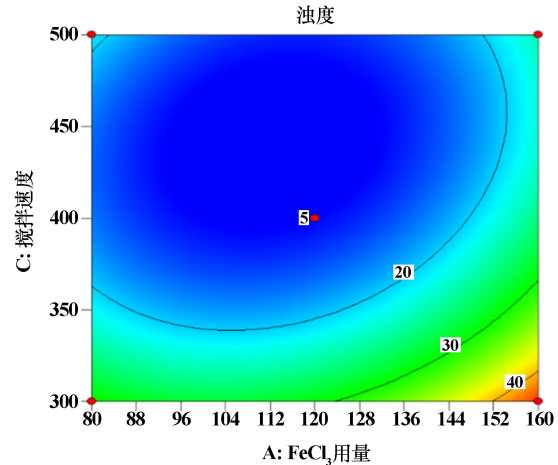
由表 6 可知,采用响应曲面法优化后的细粒铁尾矿浆絮凝沉降试验与优化前相比,无机絮凝剂 FeCl_3 用量减少了 6.56 mg/L ,所得上清液浊度更低,絮凝沉降效果更佳。试验结果与预测结果的上清液浊度指标误差较小,表明采用响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降条件合理可行。

4 结 论

1) 单因素试验结果表明。在 20 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{pH} = 7$ 、无机絮凝剂 FeCl_3 用量 120 mg/L 、有机絮凝剂 PAM 用量 0.60 mg/L 、搅拌速度 400 r/min 条件下,絮凝沉降后矿浆浊度为 13NTU~14NTU。

2) 通过 Design-Expert 8.0 软件中的 Box-Behnken 试验设计方法,设计无机絮凝剂 FeCl_3 用量、有机絮凝

量与搅拌速度的交互作用对矿浆浊度的影响较显著。絮凝药剂投加后需要一定的水力条件加速药剂与胶体颗粒的碰撞,使药剂与胶体颗粒充分接触,但搅拌速度过高会打散已经絮凝的絮团,不利于细粒铁尾矿的絮凝沉降。



剂 PAM 用量、搅拌速度与矿浆浊度响应值的三因素三水平试验,得到细粒铁尾矿浆絮凝沉降浊度响应的回归模型。模型方差分析、可信度分析、因素相互作用分析结果表明,模型拟合度高、可信度高、因素交互作用显著。

3) 经响应曲面法优化后,细粒铁尾矿浆絮凝沉降较佳条件为:无机絮凝剂 FeCl_3 用量 113.44 mg/L 、有机絮凝剂 PAM 用量 0.61 mg/L 、搅拌速度 440.57 r/min ,絮凝沉降后预测矿浆浊度为 11.45NTU,实测絮凝沉降后矿浆浊度为 12.38NTU,误差较小,表明采用响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降条件合理可行。

参考文献:

- [1] 张亮,杨卉芃,冯安生,等. 全球铁矿资源开发利用现状及供需分析[J]. 矿产保护与利用, 2016(6):57-63.
- [2] 华娟娟. 梅山微细粒铁尾矿浓缩絮凝沉降试验研究[J]. 现代矿业, 2021,37(6):147-149.
- [3] 赵德贵,朱磊,孙志飞,等. 微细粒铁尾矿深度浓缩絮凝沉降试验[J]. 现代矿业, 2018,34(11):144-146.
- [4] 赵于杰. 龙岩市某矿业有限公司选铁尾矿浆絮凝沉降试验研究[J]. 福建冶金, 2018,47(2):4-6.
- [5] 周靓,吴爱祥,彭乃兵,等. 基于响应曲面法优化全尾砂絮凝沉降实验研究[J]. 矿业研究与开发, 2016,36(7):26-30.
- [6] Dubey A, Patra A S, Sarkar A N, et al. Synthesis of a copolymeric system and its flocculation performance for iron ore tailings[J]. Minerals Engineering, 2021,165(37):65-77.
- [7] 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.

(下转第 60 页)

在难免金属 Fe^{3+} 存在的弱碱性十二胺浮选体系中,随着石英含量增加,各粒级红柱石、蓝晶石、硅线石精矿品位不断降低,粗粒级(45~106 μm)红柱石、蓝晶石、硅线石回收率不断增加,而18~45 μm 和-18 μm 粒级红柱石、蓝晶石、硅线石回收率变化不大。

2) 浮选交互影响机理研究表明,在难免金属 Fe^{3+} 存在的弱碱性十二胺浮选体系中,各粒级红柱石、蓝晶石、硅线石与石英颗粒间总 EDLVO 势能随着颗粒间距离变小而呈现出负值变大,说明颗粒之间存在黏附罩盖作用。通过显微镜观察进一步验证了红柱石、蓝晶石、硅线石与石英之间确实发生了黏附现象。可见,颗粒之间的黏附是造成红柱石、蓝晶石、硅线石与石英浮选过程中交互影响的主要原因。

3) 混合矿物吸附作用力从大到小的顺序依次为:红柱石与石英、蓝晶石与石英、硅线石与石英,说明在难免金属 Fe^{3+} 存在的弱碱性十二胺浮选体系中,红柱石与石英混合矿的浮选分离相对困难。

参考文献:

- [1] 林彬荫. 蓝晶石 红柱石 硅线石[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
- [2] Kucera M. Industrial minerals and rocks[M]. Elsevier, 2013.

(上接第51页)

- [8] 吴爱祥,周 靛,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):439-446.
- [9] 姜亚雄,黄丽娟,刘刚明,等. 微细粒尾矿絮凝沉降试验及絮凝剂高效使用模式研究[J]. 矿冶, 2017(1):42-55.
- [10] 张晋霞,牛福生. 响应曲面法优化赤铁矿絮凝体浮选行为研究[J]. 矿产综合利用, 2021(3):22-26.
- [11] 刘 伟,刘子龙,刘 畅. 响应曲面法优化低品位铜钼矿生物浸出工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(9):3111-3120.
- [12] 梁逸扬,梁瑛杰,麦榆敏,等. 响应曲面法优化羧甲基壳聚糖复合

(上接第55页)

可行。“分支处理-分质回用”新工艺可为类似矿山选矿废水循环利用提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] 胡岳华,冯其明. 矿物资源加工技术与设备[M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [2] 杨 玮,李文香,王 倩,等. 某铅锌矿选矿废水回用于铅锌浮选的效果研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):53-56.

- [3] 金俊勋. 红柱石族同质多象体矿物浮选行为与机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学资源与环境工程学院, 2016.
- [4] Namiranian A, Kalantari M. Beneficiation and mullitization of mshdovan andalusite[J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2014, 55(4):295-303.
- [5] ZHANG W, QIAN M, DAI W Y. Research on application of kyanite in plastic refractory[J]. Science Press and Institute of Geochemistry, CAS and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013,32:326-330.
- [6] 印万忠,罗溪梅,姚 金,等. 浮选体系中矿物交互影响的研究现状[C]//中国采选技术十年回顾与展望. 北京:冶金工业出版社, 2012:158-163.
- [7] 印万忠,马英强,王乃玲,等. 基于矿物浮选交互影响的铁矿石分散浮选技术研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(S1):146-150.
- [8] 邓陈雄. 基于矿物交互影响的低品位铁钛矿浮选分离基础研究[D]. 沈阳:东北大学资源与土木工程学院, 2015.
- [9] 罗溪梅. 含碳酸盐铁矿石浮选体系中矿物的交互影响研究[D]. 沈阳:东北大学资源与土木工程学院, 2014.
- [10] 姚 金. 含镁矿物浮选体系中矿物的交互影响研究[D]. 沈阳:东北大学资源与土木工程学院, 2014.
- [11] ZHANG M Q, LIU Q, LIU J G. Extended DLVO Theory Applied to Coal Slime-Water Suspensions[J]. J Cent South Univ, 2012(19): 3558-3563.

引用本文: 许洪峰,牛艳萍. 阳离子浮选体系中蓝晶石族矿物与石英的交互影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):56-60.

- 絮凝剂处理金橙黄模拟废水[J]. 印染助剂, 2021,38(3):45-49.
- [13] 马致远,刘 勇,周吉奎,等. 响应曲面法优化废催化剂中微波浸出钒的工艺[J]. 中国有色金属学报, 2019,29(6):1308-1315.
- [14] 姜盛基,王 刚,严亚萍,等. 絮凝剂对水中污染物去除性能和机理的最新研究进展[J]. 应用化工, 2021,50(5):1348-1354.
- [15] 董 琦. 多种絮凝剂协同作用的实验[D]. 唐山:华北理工大学建筑工程学院, 2019.

引用本文: 牛福生,武佳慧,于晓东,等. 响应曲面法优化细粒铁尾矿浆絮凝沉降试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):47-51.

- [3] 陈文胜,刘 旭,薛 珂,等. 混凝沉淀-吸附法处理萤石选矿废水的正交试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):68-70.
- [4] 黄俊文. 铅锌选矿废水净化处理与循环回用试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):64-67.
- [5] 黄伟秦,顾帼华,王艳红,等. 含水杨羟膦酸捕收剂废水对铅铋锌硫化矿浮选行为的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):16-20.

引用本文: 冯章标,阳华玲,王长福,等. 某钨铜矿选矿废水处理与分质回用工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):52-55.