三氯化铁对超细铁尾砂絮凝的影响

牛福生1,2,陈雨盈1,张晋霞1,2,刘飞1

华北理工大学 矿业工程学院,河北 唐山 063210;
 河北省矿业开发与安全重点试验室,河北 唐山 063210

中图分类号:TD926 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2024)06-0064-07 DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.08.004

摘要 随着细粒选矿技术的发展,尾砂的粒径逐渐减小,已经达到了超细级别。要实现选厂超细尾砂的高浓度充填,超细尾砂 絮凝沉降浓密是技术关键。为此以钢铁盐酸酸洗废液制得的三氯化铁为絮凝剂开展了某超细铁尾砂絮凝研究。采用工业 CCD 相机和计算机图像处理软件(Image-Pro Plus),考察了三氯化铁的用量、搅拌转速、搅拌时间对超细铁尾砂絮凝效果的影响。实验结果表明,在三氯化铁用量为2700 g/t、磁力搅拌器转速为800 r/min、搅拌时间为80 s 时,絮凝体的粒径为39.79 μm, 分形维数为1.92,取得了较好的指标。基于 Box-Behnken 原理,应用响应曲面法建立三氯化铁用量、搅拌转速及搅拌时间三者 之间的交互作用对超细铁尾砂絮凝影响的多元回归方程,并进行 ANOVA 分析,分析结果表明,其最佳条件为三氯化铁用量 2763.74 g/t,搅拌转速 832.76 r/min,搅拌时间 95.89 s 时模型预测絮凝体粒径为40.28 μm,分形维数为1.92,与实验结果基本相 符。通过对絮凝条件的探究,得出其对超细铁尾砂的作用规律,为指导超细铁尾砂的高效絮凝生产实践应用提供了理论支撑。本研究同时实现了废酸的综合利用,有利于节能减排,降低工业生产的成本。

关键词 铁尾砂;超细;絮凝;响应曲面法

引言

随着细粒矿物选矿技术不断进步,选矿产生的尾砂粒径逐渐减小,甚至达到了超细级别^[12]。超细尾砂 具有特殊的物化特性,如比表面积小、比重小、动量 小、难沉降、沉降速度慢等,导致尾砂的利用率低,处 理较为困难^[14]。

近年来,众多学者深入研究了超细尾砂的絮凝沉降。吴爱祥的研究了不同絮凝条件下超细尾砂的絮凝效果,实验结果表明,配制质量浓度为4%的尾砂料浆,调节pH至11,絮凝剂用量为20g/t,剪切速率为500s⁻¹时,尾砂的相对絮凝率最大。吴再海的探索了药剂用量、给料速度和浓度对料浆浓密效果的影响,实验结果表明,配制絮凝剂XS质量浓度0.1%,用量为30g/t,得到料浆质量浓度为6%时为最优浓密状态。

絮凝剂具有比表面积大、沉降性能好的特点,可 以将矿浆中的超细尾砂聚集,形成絮团,通过重力作 用加速尾砂沉淀,有效解决了超细尾砂沉降速度慢的 难题。基于化学成分和作用机理的差异性,主要划分 为无机絮凝剂、有机絮凝剂和生物絮凝剂三大类。三 氯化铁是一种常见的无机絮凝剂,其絮凝速度快、成 本低、易储存,可以由酸洗废液资源化可得,所以被广 泛应用于工业中^[78]。张晋霞等^[9]通过实验研究了三氯 化铁-淀粉复合絮凝剂的适宜制备条件和絮凝性能。 实验结果表明,利用该絮凝剂处理后的尾矿水浊度去 除率可达 98%。龙国兵^{10]}探索了絮凝剂三氯化铁的 用量对细粒尾砂絮凝沉降的影响。实验结果表明:当 三氯化铁用量为 30 mg/L 时,浊度最小为 16.25 NTU, 此时澄清层高度达到 159.7 mm,沉降效果最好。

在钢铁加工行业中,钢材表面氧化是一个常见的 问题。为了解决这个问题,通常采用盐酸对钢材进行 酸洗处理。然而,这一过程中会产生大量的酸洗废液, 这不仅给环境带来了压力,也增加了企业的处理成本。 以钢铁盐酸酸洗废液为原料,在填料塔中催化氧化制

收稿日期:2024-01-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52164018)

作者简介:牛福生(1974—),男,河北唐山人,博士,教授,博士生导师,主要从事复杂难选矿理论与工艺等方面的研究工作, E-mail: niufusheng@126.com。

通信作者:陈雨盈(1996—),女,河南沁阳人,在读博士研究生,主要从事复杂难选矿理论与工艺等方面的研究工作,E-mail: 13939191383@163.com。

备的三氯化铁不仅生产成本低,还能加速尾砂沉降速 度,实现废酸的综合利用。

本研究以某超细铁尾砂为研究对象,采用酸洗废 液制得的 FeCl,絮凝剂对其进行处理,应用工业 CCD 相机和图像处理软件 Image Pro Plus(IPP),探索三氯 化铁絮凝剂的用量、搅拌转速、搅拌时间等因素对超 细铁尾砂絮凝效果的影响。着眼于 FeCl,药剂用量、 搅拌转速、搅拌时间的交互作用,优化超细铁尾砂絮 凝条件,运用响应曲面法的 Box-Behnken 实验设计对 絮凝条件进行方案设计与优化,探究超细铁尾砂的最 佳絮凝条件,实现超细铁尾砂絮凝过程强化。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

实验使用唐山市斯瑞尔化工有限公司利用酸洗 废液生产的液体三氯化铁,其技术指标见表1。超细 铁尾砂性质和化学多元素分析结果见表2、表3,其体 积加权平均粒径为10.06 μm,粒度分析结果如图1所示。

表 1 FeCl₃ 技术指标

 Table 1
 Technical index of FeCl₃

FeCl₃含量/%	FeCl ₂ 含量/%	比重	游离酸/%	水不溶物/%
$30\sim40$	≪0.25	$1.30\!\sim\!1.50$	≪0.5	≪0.3

表 2 超细铁尾砂性质

Table 2	Ultra-	fine	tailings	proper	ties
---------	--------	------	----------	--------	------

分形维数	松散密度 /(g·cm⁻³)	真密度 /(g·cm ⁻³)	体积加权 平均粒径/µm		
1.70	1.19	2.82	10.06		
表3 超细铁	尾砂化学多元	素分析结果	/%		

 Table 3
 Results of chemical multielement analysis of superfine tailings

成分	${\rm SiO}_2$	$\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	P_2O_5	Na ₂ O	${\rm TiO}_2$	SO_3	其他
含量	64.63	10.52	8.37	7.63	3.84	2.12	0.83	0.82	0.61	0.37	0.26

1.2 分析设备与软件

实验所采用的观测装置如图2所示。超细铁尾



图 1 超细铁尾砂粒度分析结果 Fig. 1 Result of particle size analysis of tailings

砂经磁力搅拌器搅拌后,使用蠕动泵进行取样,通过 控制观察室与相机之间的距离调整相机的焦距,使其 达到最清晰的位置并进行观测,得到的絮体图像用 IPP软件进行处理并测定絮凝体的粒径和面积。

1.3 絮凝实验

超细铁尾砂经超声分散处理 10 min 后,加适量去离 子水放入磁力搅拌器搅拌 2 min,然后向烧杯中添加 FeCl₃溶液,继续搅拌一定时间,制得不同粒径的絮凝体。

1.4 分形维数

絮凝体的分形维数(D_f)可以用来表征絮凝物的 空隙率、密度和空间结构,描述分形不规则性、复杂 程度等,是反映絮体结构特征的重要参数^[11]。D_f值越 大,絮凝体结构越密实^[12]。本文采用图像分析法,1989 年 格里高利^[13]提出可以通过絮凝体的最大长度和投影面 积之间存在的关系进行分形维数的计算,如式(1)所示:

$$S = BL^{D_f} \tag{1}$$

通过对式(1)等号两边取对数,可得:

$$\ln S = \ln B + D_f \ln L \tag{2}$$

式中, *S* 为投影面积, µm²; *B* 为比例常数; *L* 为最大长度, µm; *D*_f 为分形维数。

根据絮凝体图像测量其最大长度 L 和投影面积 S, 通过公式(2)在双对数坐标系下画图, 拟合直线并检



图2 絮凝体观测装置

Fig. 2 Floc observation device diagram

验置信度,此时直线的斜率即为分形维数 D₁。

2 絮凝实验

2.1 FeCla用量对絮凝体粒径和分形维数的影响

搅拌转速为 400 r/min,搅拌时间 40 s 时,不同 FeCl₃用量的絮凝体粒径和分形维数分布情况如图 3 所示。



图 3 FeCl₃(FC)用量对絮凝体分形维数和粒径的影响 Fig. 3 Effect of FeCl₃ dosage on the fractal dimension and particle size of floc

图 3 可以看出,随着 FeCl₃用量的增加,絮凝体的 分形维数呈现出先增加后降低的趋势,粒径增加至最 大值后趋于稳定。当 FeCl₃用量为 2 700 g/t 时,絮凝 体的分形维数最大,此时粒径为 31.52 µm。絮凝体粒 径在 FeCl₃用量为 4 050 g/t 时达到最大值 33.07 µm。 这是由于 FeCl₃用量增加有利于细小悬浮颗粒团聚, 形成的絮凝体逐渐密实,使颗粒持续生长,粒径逐渐 增大。当 FeCl₃用量大于 2 700 g/t 时,絮凝剂加入过 量,絮凝体较大但结构松散,絮体分形维数逐渐减小。 综合考虑絮凝体的粒径和分形维数,选用 FeCl₃用量 为 2 700 g/t。

2.2 搅拌转速对絮凝体粒径和分形维数的影响

FeCl₃用量为 2 700 g/t、搅拌为时间 40 s 时,不同转速条件下絮凝体的粒径和分形维数分布情况如图 4 所示。

由图 4 可知,随着搅拌转速的增加,絮凝体的粒径和分形维数先大幅度增加再逐渐趋于平缓。转速为 800 r/min 时,絮凝体的分形维数达到最大值 1.85,再综合考虑粒径,转速采用 800 r/min。

2.3 搅拌时间对絮凝体粒径和分形维数的影响

液体 FeCl₃用量为 2 700 g/t、转速为 800 r/min 时, 不同搅拌时间下絮凝体的粒径和分形维数分布情况 如图 5 所示。







图 5 搅拌时间对絮凝体分形维数和粒径的影响 **Fig. 5** Effect of stirring time on the fractal dimension and particle size of floc

由图 5 可以看出, 絮凝体的粒径和分形维数随着 搅拌时间的增加都呈现先增加后降低的趋势。搅拌 时间为 80 s 时, 絮凝体的粒径增加到最大值 39.79 μm, 分形维数也达到最大值 1.92。搅拌时间为 200 s 时, 絮凝体的粒径减小到 35.78 μm, 分形维数降低到 1.86。 这是因为搅拌时间达到一定限度时, 产生的絮凝体较 为疏松, 易被搅拌产生的剪切力所破碎, 故采用 80 s 为最佳搅拌时间。

3 响应曲面模型优化与验证

3.1 响应曲面模型建立

影响因素选用 FeCl₃ 用量(*X*₁)、搅拌转速(*X*₂)和 搅拌时间(*X*₃),粒径(*Y*₁)、分形维数(*Y*₂)作为响应值, 进行三因素三水平 BBD 设计,实验因子编码及水平 见表 4。

在 Box-Behnken 设计中,三因素三水平所对应的 响应曲面数学模型结构详见式(3):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3$$
(3)

表 4 响应曲面设计因素及水平

Tal	ble 4	Factors	and	level	s of	response	surface	design
-----	-------	---------	-----	-------	------	----------	---------	--------

亦县和宪码	42.02	编码水平				
又里帕珊玛	의표 가수가	-1	0	1		
FeCl ₃ 用量/(g·t ⁻¹)	X_1	2 000	2 700	3 400		
搅拌转速/(r·min-')	X_2	600	800	1 000		
搅拌时间/s	X_3	40	80	120		

式中: β为各参数前系数; X₁为 FeCl₃ 用量, g/t; X₂为搅 拌转速, r/min; X₃为搅拌时间, s。

按照表 4 中的影响因素与水平值, Design-Expert 8.0 系统按照内部的计算而得出了 17 组测试点, 在不同的实验条件下所得粒径和分形维数见表 5。

表 5 BBD 实验设计方案与结果

 Table 5
 Design scheme and test results of BBD

伯旦	变	量编码值	Ĺ	响应值			
5)曲 5	X_1	X_2	X_3	粒径 Y ₁ /μm	分形维数Y ₂		
1	3 400	600	80	32.62	1.82		
2	2000	1 000	80	31.88	1.87		
3	2 700	800	80	39.79	1.92		
4	2 700	800	80	39.79	1.92		
5	2 700	1 000	40	31.88	1.87		
6	3 400	1 000	80	34.05	1.82		
7	2 700	800	80	39.79	1.92		
8	3 400	800	40	32.41	1.8		
9	2 700	600	120	32.41	1.86		
10	2 700	600	40	30.86	1.85		
11	2 700	1 000	120	37.13	1.89		
12	2000	600	80	29.91	1.82		
13	3 400	800	120	36.78	1.86		
14	2000	800	40	30.87	1.85		
15	2 700	800	80	39.79	1.92		
16	2 700	800	80	39.79	1.92		
17	2000	800	120	33.53	1.85		

由表 5 中设计的实验及结果可知, 粒径响应范围 在 29.91~39.79 μm 之间, 分形维数响应范围在 1.80~ 1.92。

3.2 模型方差分析

通过 Design-Expert 8.0 软件对表 5 数据完成响应 曲面拟合,由此得到粒径和分形维数的二次回归方程 模型,详见式(4)、(5):

$$\begin{split} Y_1 &= 39.79 + 1.21X_1 + 1.14X_2 + 1.73X_3 - 0.1350X_1X_2 + \\ & 0.4275X_1X_3 + 0.9250X_2X_3 - 3.67X_1^2 - 4.00X_2^2 - 2.72X_3^2 \\ & (4) \end{split}$$

$$Y_{2} = 1.92 - 0.0113X_{1} + 0.0125X_{2} + 0.0112X_{3} - 0.0125X_{1}X_{2} + 0.0150X_{1}X_{3} + 0.0025X_{2}X_{3} - 0.0575X_{1}^{2} - 0.0300X_{2}^{2} - 0.0025X_{3}^{2}$$
(5)

式中: Y1为絮凝体粒径, µm; Y2为分形维数。

根据回归方程模型(4)、(5)对粒径和分形维数进 行模型方差分析, 若 P ≤0.01 代表为高度显著项, 若 P ≤ 0.05 就可以判定是显著项[™]。最终的方差分析结果见 表 6 和表 7。

表 6 粒径的模型方差分析

 Table 6
 Model variance analysis of particle size

来源	平方和	自由度	均方差	F值	P值
模型	223.28	9	24.81	250.93	< 0.000 1
X_1	11.69	1	11.69	118.22	<0.000 1
X_2	10.44	1	10.44	105.62	<0.0001
X_3	23.91	1	23.91	241.82	< 0.000 1
X_1X_2	0.072 9	1	0.072 9	0.7373	0.4189
X_1X_3	0.731	1	0.731	7.39	0.029 8
X_2X_3	3.42	1	3.42	34.62	0.000 6
X_{1}^{2}	56.83	1	56.83	574.78	<0.000 1
X_2^2	67.41	1	67.41	681.82	<0.000 1
X_3^2	31.12	1	31.12	314.79	<0.000 1
残差	0.692 1	7	0.098 9		
失拟	0.692 1	3	0.2307		
纯误差	0	4	0.000 1		
总离差	223.97	16			
		$R^2 = 0.9969;$	$R_{\rm adj}^2$ =0.950 6		

表 7 分形维数的模型方差分析

 Table 7
 Model variance analysis of fractal dimension

来源	平方和	自由度	均方差	F值	P值
模型	0.026 5	9	0.002 9	165.03	< 0.000 1
X_1	0.001 0	1	0.001	56.70	0.000 1
X_2	0.001 3	1	0.001 3	70.00	<0.000 1
X_3	0.001 0	1	0.001	56.70	0.000 1
X_1X_2	0.000 6	1	0.000 6	35.00	0.000 6
X_1X_3	0.000 9	1	0.000 9	50.40	0.000 2
X_2X_3	0.000 0	1	0.000 0	1.40	0.275 3
X_{1}^{2}	0.013 9	1	0.013 9	779.58	< 0.000 1
X_{2}^{2}	0.003 8	1	0.003 8	212.21	< 0.000 1
X_{3}^{2}	0.002 1	1	0.002 1	119.37	< 0.000 1
残差	0.000 1	7	0.000 0		
失拟	0.000 1	3	0.000 0		
纯误差	0.000 0	4	0.000 0		
总离差	0.026 6	16			
		$R^2 = 0.9953;$	$R_{\rm adj}^2 = 0.9249$		

由表 6 可知, 絮凝体粒径模型的 F 值为 250.93, P 值<0.000 1, 证明这一回归方程高度显著, 且各实验因 子对响应值的影响具有非线性的特征。各因素及因 素间的交互作用对粒径的影响显著性依次为 X₂²>X₁²> X₃²>X₃>X₁>X₂。

由表 7 可知, 方程 R² 为 0.995 3, 校正系数 R²_{adj}为 0.924 9, 说明该模型可作为分析依据。分形维数模型的 F 值为 165.03, P<0.000 1, 证明这一回归方程高度显著。

3.3 因素间交互作用

FeCl₃用量、搅拌转速和搅拌时间这三个因素的 响应面由 Model Graph 功能绘制,其结果见图 6 和图 7。 因素间交互作用的显著性可以根据等高线的形状、曲 面的曲率判断,等高线为椭圆形或曲面的曲率较大时, 交互作用越明显^[15-16]。

由图 6(a)可以看出,等高线形状为偏心率很大的 椭圆,说明 X₁、X₂的交互作用很强。由图 6(b)可以看 出,在 FeCl₃用量为 2 700 g/t 的条件下,随着搅拌时间 的增加,絮凝体的粒径呈现出先增加后降低的趋势, 当搅拌时间为 80 s 时,絮凝体的粒径达到最大值。由 图 6(c)可以看出,随着搅拌时间和搅拌转速的增加, 絮凝体粒径呈先上升后下降的趋势。

由图 7 可知, 絮凝体分形维数的响应曲面颜色变 化较为明显且曲率较大, 等高线的形状为椭圆形, 表 明三者间的交互作用对絮凝体分形维数的影响比较 显著。随着 FeCl₃ 用量、搅拌转速和搅拌时间的增加, 絮凝体分形维数呈先上升后下降的趋势。

3.4 最佳工艺条件及模型验证

对超细铁尾砂进行絮凝实验,在稳定分形维数的 基础上令絮凝体粒径增加。选择粒径、分形维数最大 为最优条件,利用 Design Expert 8.0 的 Optimization 功 能板块完成进一步的优化,由此确定最终的最佳絮凝条 件为:液体 FeCl₃ 用量 2 763.74 g/t,搅拌转速 832.76 r/min, 搅拌时间 95.89 s 时模型预测絮凝体粒径为 40.28 μm, 分形维数为 1.92。为判断预测模型的准确性,基于最 优条件完成三组验证实验,具体结果详见表 8。

对上表中的内容进行分析可知,在最佳条件下, 絮凝体粒径分别为 40.29 µm、40.28 µm、40.27 µm,平 均为 40.28 µm;分形维数分别为 1.92、1.93、1.92,平均 为 1.92,实验结果与预期基本相符,说明采用响应曲 面法对超细铁尾砂的絮凝条件进行优化是合理可行的。

4 结论

(1)在 FeCl₃用量为 2 700 g/t、磁力搅拌器转速为
 800 r/min、搅拌时间为 80 s 时,絮凝体的粒径达到最
 大值 39.79 μm,分形维数达到最大值 1.92。

(2)Design-Expert 8.0 软件优化后的最佳絮凝条 件为: FeCl₃用量 2763.74 g/t, 搅拌转速 832.76 r/min, 搅 拌时间 95.89 s。絮凝体粒径预测值达到 40.28 μm, 分 形维数预测值为 1.92。在最佳参数条件下进行的 3 次 验证实验结果与响应曲面法的预测值无显著差异, 说



图7 絮凝体分形维数的响应曲面

Fig. 7 Response surface of the fractal dimension of the floc

表 8 响应曲面法的验证结果

Table 8	Verification resu	lts of the response	surface method
---------	-------------------	---------------------	----------------

		些汉	八正		
编号	FeCl ₃ 用量 /(g·t ⁻¹)	搅拌转速 /(r·min ⁻ⁱ)	搅拌时间 /min	粒径 /μm	分 形 维 数
1	2 763.74	832.76	95.89	40.29	1.92
2	2 763.74	832.76	95.89	40.28	1.93
3	2 763.74	832.76	95.89	40.27	1.92

明模型可信度高,实验设计合理。

(3)利用酸洗废液制备的 FeCl, 对超细铁尾砂进 行絮凝沉降, 节能减排, 是一种可行的资源再利用的 方法。

参考文献:

- [1] 阮竹恩, 吴爱祥, 王贻明, 等. 絮凝沉降对浓缩超细尾砂料浆屈服应力的影响[J]. 工程科学学报, 2021, 43(10): 1276-1282.
 RUAN Z E, WU A X, WANG Y M, et al. Effect of flocculation settlement on yield stress of concentrated ultrafine tailings slurry[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2021, 43(10): 1276-1282.
- [2] WANG X, LI S, et al. Fly-ash-based magnetic coagulant for rapid sedimentation of electronegative slimes and ultrafine tailings[J]. Powder Technology, 2016, 303(12): 20-26.
- [3] LI W, CHENG S, ZHOU L, et al. Enhanced iron recovery from magnetic separation of ultrafine specularite through polymer-bridging flocculation: A study of flocculation performance and mechanism[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 308: 122882.
- [4] 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 sedimentation and semi-industrial thickening of two-stage graded ultrafine tailings in a gold mine[J]. Metal Mine, 2022(9): 37-42.
- [5] 吴爱祥, 阮竹恩, 王建栋, 等. 基于超级絮凝的超细尾砂絮凝行为 优化[J]. 工程科学学报, 2019, 41(8): 981–986.
 WU A X, RUAN Z E, WANG J D, et al. Optimization of flocculation behavior of ultrafine tailings based on super flocculation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(8): 981–986.
- [6] 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. Test and application analysis of thickening based on flocculation settlement of ultrafine tailings[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(10):117-125.
- [7] 周解臻,王祎,石旭,等.三氯化铁絮凝沉淀和生化组合工艺处理 百菌清生产工艺废水[J].现代农药,2019,18(2):17-20+23.

ZHOU X Z, WANG Y, SHI X, et al. Treatment of chlorothalonil production process wastewater by ferric chloride flocculation and precipitation and biochemical combination process [J]. Modern Pesticide, 2019, 18(2): 17–20+23.

- [8] 何亮亮,黄春梅,邵燕. 三氯化铁在废水中絮凝性能研究[J]. 广东 化工, 2022, 49(18): 147–150.
 HE L L, HUANG C M, SHAO Y. Study on flocculation performance of ferric chloride in wastewater[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(18): 147–150.
- [9] 张晋霞, 王聪磊, 牛福生, 等. 三氯化铁-淀粉复合絮凝剂的制备及 性能[J/OL]. 矿产综合利用: 1-10[2024-03-14]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/51.1251. td. 20231107.1434. 020. html. ZHANG J X, WANG C L, NIU F S, et al. Preparation and performance of ferric chloride-starch composite flocculant[J/OL]. Comprehensive Utilization of Minerals: 1-10[2024-03-14]. http://kns.cnki.net/kcms/ detail/51.1251.td.20231107.1434.020.html.
- [10] 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. Effect of ferric chloride on flocculation and sedimentation of fine-grained iron tailings[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(9): 110–115.
- [11] 赵亚伟. 赤铁矿絮凝形态特征及演化规律[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
 ZHAO Y W. Hematite flocculation morphology and evolution[D].
 Tangshan: North China University of Technology, 2020.
- [12] OFORI P, NGUYEN A VFIRTH B, et al. Shear-induced floc structure changes for enhanced dewatering of coal preparation plant tailings[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(2): 914–923.
- [13] GREGORY J, O'MELIA C R. Fundamentals of flocculation[J]. Critical Reviews in Environmental Control, 1989, 19(3): 185–230.
- [14] 王铎,董佳甜,吴权佳,等. 电絮凝处理酸性矿山废水及响应面优 化[J]. 有色金属(治炼部分), 2023(12): 69-77.
 WANG D, DONG J T, WU Q J, et al. Electrocoagulation treatment of acidic mine wastewater and optimization of response surface[J]. Nonferrous Metals (Smelting Part), 2023(12): 69-77.
- [15] 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+60.
 NIUFS, WUJH, YUXD, et al. Experimental study on flocculation and sedimentation of fine-grained iron tailings slurry optimized by response surface method[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):47-51+60.
- [16] 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+38.
 ZHANG J X, NIU F S. Study on optimization of hematite floc flotation behavior by response surface method[J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2021(3): 22-26+38.

Flocculation Effect of Ferric Chloride on Ultra-fine Tailings

NIU Fusheng^{1,2}, CHEN Yuying¹, ZHANG Jinxia^{1,2}, LIU Fei¹

1. North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China;

2. Hebei Province Mining Industry Develops with Safe Technology Priority Laboratory mining industry develops with safe technology priority laboratory, Tangshan 063210, Hebei, China

Abstract: With the advancement of mineral processing technology, the diameter of tailings is getting smaller and smaller, even reaching the ultra-fine level. In order to realize the high concentration filling of ultrafine tailings in the concentrator, the flocculation settling and thickening of ultrafine tailings is the critical technology. Therefore, the flocculation of certain ultrafine iron tailings was studied with ferric chloride produced from iron and steel hydrochloric acid pickling waste liquor as a flocculant. The effects of ferric chloride dosage, stirring speed, and stirring time on the flocculation of ultra-fine iron tailings were investigated using an industrial CCD camera and image processing software (Image-Pro Plus). The experimental results show that when the amount of FeCl₃ was 2 700 g/t, the speed of the magnetic stirrer was 800 r/min, the stirring time was 80 s, the particle size of the floc was 39.79 µm, and the fractal dimension was 1.92. Based on the Box-Behnken principle, response surface methodology was used to establish the multiple regression equation of the interaction among the amount of flocculant FeCl₃, stirring speed, and stirring time on the flocculation of ultra-fine tailings, and ANOVA was used to analyse the experimental results. The results showed that the optimum conditions were 2763.74 g/t of ferric chloride, 832.76 r/min of stirring speed, 95.89 s of stirring time, and 40.28 µm of floc particle size, and 1.92 of fractal dimension predicted by the model, which were consistent with the experimental results. The effect law of superfine tailings is obtained by studying flocculation conditions, which provides theoretical support for the practice of highefficiency flocculation of superfine tailings. This study also realize the comprehensive utilization of waste acid, which is conducive to energy saving and emission reduction and reduces the cost of industrial production. Keywords: iron tailings; ultra-fine; flocculation; response surface method

引用格式:牛福生,陈雨盈,张晋霞,刘飞. 三氯化铁对超细铁尾砂絮凝的影响[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(6): 64-70. NIU Fusheng, CHEN Yuying, ZHANG Jinxia, LIU Fei. Flocculation effect of ferric chloride on ultra-fine tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(6): 64-70.

投稿网址: http://kcbhyly.xml-journal.net

E-mail: kcbh@chinajoumal.net.cn