

微细粒选钨尾砂伴生铜资源浮选动力学

胡海祥^{1,2}, 李瑞光³, 余策恩³, 杨博皓³

(1. 赣南科技学院科技处, 江西 赣州 341000; 2. 崇义章源钨业股份有限公司, 江西 赣州 341000; 3. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 江西赣南地区某微细粒选钨尾砂在经浮选实验获得较优药剂制度(酯类药剂为 Z-200、组合黄药捕收剂为异戊基+Y89 黄药(9:1)、起泡剂为 MIBC)的条件下探究铜上浮率随时间的变化规律, 采用双曲线函数、S 形曲线函数及负指数函数进行回归拟合计算, 推导出三种铜浮选动力学模型, 并对四种常用动力学模型进行拟合。结果表明: 双曲线函数回归计算更贴近实验效果, 误差平方和为 1.380 0, 浮选铜过程符合全混合反应动力学、气液吸附动力学及二级动力学, 拟合度 R^2 达 0.99 以上。

关键词: 微细粒; 选钨尾砂; 伴生铜; 浮选动力学

doi:10.12476/kczhly.202503240044

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2025)05-0080-06

引用格式: 胡海祥, 李瑞光, 余策恩, 等. 微细粒选钨尾砂伴生铜资源浮选动力学[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(5): 80-85+113.

HU Haixiang, LI Ruiguang, YU Ce'en, et al. Flotation kinetics of copper resources associated with micro-fine particle tungsten tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(5): 80-85+113.

赣南地区某钨选厂经重力选矿(跳汰—摇床—毛毯等工序)回收钨后产生大量微细粒选钨尾砂($-0.038\text{ mm}\geq 70.00\%$), 其中金属矿物主要以黄铜矿、黑白钨矿、闪锌矿、辉钼矿为主; 脉石矿物主要以石英、黑白云母、绿泥石、斜长石等为主, 该尾砂中仅有铜具有回收价值。微细粒矿物^[1-4]多受体积小、质量小、比表面积大等物态特征^[5-6]影响致使难以分选。

浮选动力学^[7]基于多级动力学发展而来, 旨在对浮选过程进行数量化模拟, 利于提高选矿自动化程度^[8]。浮选动力学主要受矿物自身(矿物组成、颗粒粒度、晶格结构等)和浮选条件(工艺条件、药剂制度、设备参数等)两类因素影响^[9-10], 有研究表明^[11]铜矿物浮选符合二级动力学。浮选过程往往受多种因素影响, 很难以单一

且标准的公式模型来进行规范界定, 随着国内外选矿学者的不断努力, 提出了许多具有代表性的浮选动力学模型^[12-13], 如陈子鸣、许长连、哥利科夫、吴亦瑞三重逼近模型等。本文从数学回归计算角度出发, 以双曲线函数、S 形曲线函数及负指数函数为基础对微细粒选钨尾砂浮选铜进行回归拟合计算, 推导出三种不同的浮选动力学模型, 与四种常用的浮选动力学模型拟合对比, 探究浮选过程属于何种动力学范畴, 为处理此类尾砂提供一定的理论指导。

1 材料与药剂

1.1 实验材料

样品取自江西赣南某钨矿山, 重力选钨后微

收稿日期: 2023-04-24

基金项目: 江西省自然科学基金面上项目(20202BAB204014); 赣州市重点研发计划(赣市科发【2019】60号)

作者简介: 胡海祥(1979-), 博士后, 教授, 主要从事磨矿分级理论与装备、矿物加工与岩矿测试等。

通信作者: 李瑞光(1997-), 硕士研究生, 研究方向为矿物加工工程。

细选钨尾砂，其中-0.038 mm 72.08%，含铜为0.081%，主要脉石矿物为石英、云母等，石英含量为62.440%。粒度组成、粒级分析见表1、2，主要元素化学分析见表3。

1.2 药剂制度及实验条件

选钨尾砂经浮选铜实验获得较优药剂制度为酯类药剂Z-200用量25 g/t，组合黄药捕收剂异戊基+Y89黄药（9:1）总用量25 g/t，起泡剂MIBC用量20 g/t；在浮选机转速为1 992 r/min时进行分槽粗选实验，浮选时长共5 min，每次刮泡30 s所得粗精矿装一槽，粗精矿共盛10槽装，浮选流程见图1，浮选结果见图2。

表1 粒级占比分析

Table 1 Analysis of the percentage of grain size			
粒级/mm	粒级质量/%	百分比/%	筛下累计/%
+0.074	84.53	8.50	100.00
-0.074+0.045	120.63	12.13	91.50
-0.045+0.038	72.50	7.29	79.37
-0.038	716.82	72.08	72.08
合计	994.48	100.00	

表2 粒级元素分析结果

Table 2 Grain level elemental analysis					
粒级/mm	元素含量/%				
	Cu	Pb	Zn	Mo	Li ₂ O
+0.074	0.018 0	0.003 9	0.015 0	0.003 6	0.110 0
-0.074+0.045	0.043 0	0.006 1	0.043 0	0.005 2	0.110 0
-0.045+0.038	0.086 0	0.004 0	0.055 0	0.013 0	0.120 0
-0.038	0.095 0	0.006 4	0.058 0	0.013 0	0.180 0

表3 主要元素化学分析

单位: %

Table 3 Chemical analysis of major elements

Cu	WO ₃	Al	Zn	SiO ₂	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Fe	MnO	Pb	Bi	S
0.081	0.344	5.650	0.052	62.440	2.550	3.230	0.911	0.547	3.130	0.191 0	0.006	0.010	0.331

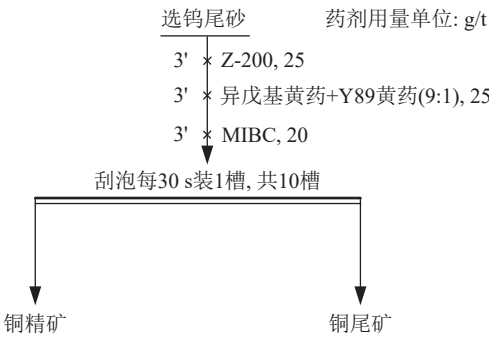


图1 分槽粗选实验流程

Fig.1 Flow of split-slot roughing test

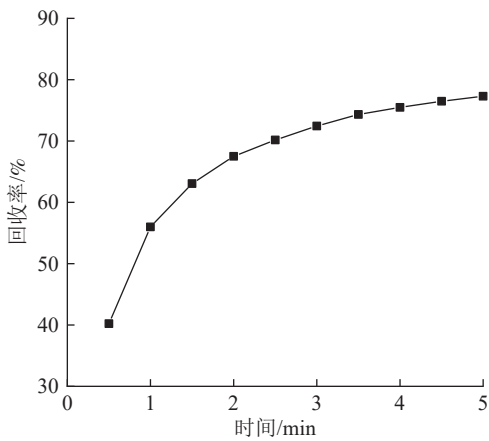


图2 浮选过程中时间与回收率关系

Fig.2 Relationship between time and recovery in the flotation process

2 实验结果与分析

由图2可知，在分段时间浮选过程中，回收率与时间存在正相关关系，随着时间进行，回收率逐渐增加，并在若干时刻后趋于定值： $t \rightarrow \infty$ ， $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\infty}$ ，而回收率曲线的水平渐近线是为极限回收率，即 $\varepsilon = \varepsilon_{\infty}$ 。

2.1 数据拟合函数方程的选择

对粗选分槽实验数据以双曲线函数、负指数函数、S形曲线函数为基础进行回归拟合计算，并根据其误差比较得出极限回收率 ε_{∞} 及最大速率值 $v_{(t)\max}$ 。

(1) 双曲线函数

方程式为： $\frac{1}{y} = a + \frac{b}{x}$ ，其中 $a > 0$ ， $b > 0$ ；
 $y' = v_{(x)} = v_{(t)} = \frac{b}{(ax + b)^2} > 0$ ，证明函数 y 单调递增；
 $y'' = v'_{(t)} = \frac{-2ab}{(ax + b)^3} < 0$ ，证明函数 $v_{(t)}$ 单调递减。

对回收率数据进行双曲线回归拟合计算结果见表4。

通过表4数据计算 a 与 b 的值：

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2} = 0.006\ 58;$$
$$a = \bar{Y} - b \bar{X} = 0.011\ 56$$

表 4 双曲线回归拟合计算结果
Table 4 Calculated results of hyperbolic regression fitting

n	真实值		二乘法				预测值
	时间 x_i/min	累计回收率 $y_i/\%$	$X_i=1/x_i$	$Y_i=1/y_i$	$X_i Y_i$	X_i^2	$\frac{1}{y_i} = 0.01156 + \frac{0.00658}{x_i}$
1	0.50	40.22	2.000 0	0.024 9	0.049 7	4.000 0	40.451 93
2	1.00	55.99	1.000 0	0.017 9	0.017 9	1.000 0	55.121 72
3	1.50	63.06	0.666 7	0.015 9	0.010 6	0.444 4	62.701 20
4	2.00	67.50	0.500 0	0.014 8	0.007 4	0.250 0	67.330 30
5	2.50	70.17	0.400 0	0.014 3	0.005 7	0.160 0	70.451 06
6	3.00	72.44	0.333 3	0.013 8	0.004 6	0.111 1	72.697 41
7	3.50	74.33	0.285 7	0.013 5	0.003 8	0.081 6	74.391 69
8	4.00	75.48	0.250 0	0.013 2	0.003 3	0.062 5	75.715 15
9	4.50	76.48	0.222 2	0.013 1	0.002 9	0.049 4	76.777 52
10	5.00	77.30	0.200 0	0.012 9	0.002 6	0.040 0	77.649 13

$\bar{X}_i = 0.5858$, $\bar{Y}_i = 0.0154$, $\sum_{i=1}^n X_i Y_i = 0.1085$, $\sum_{i=1}^n X_i^2 = 6.1991$

由双曲线函数回归拟合计算可得回收率与时间呈正相关, 浮选速度与时间呈负相关。其中当时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 极限回收率 $\varepsilon_\infty = \frac{1}{a}$; 当时间 $t \rightarrow 0^+$ 时, 浮选最大速率 $v_{(t)\max} = \frac{1}{b}$; 浮选过程中平均速率 $\bar{v}_{(t)} = \frac{1}{at+b}$ 。

(2) S 形曲线函数

方程式为: $y = \frac{1}{a + be^{-x}}$, 其中 $a > 0$, $b > 0$ 。
 $y' = v_{(x)} = v_{(t)} = be^{-x}(a + be^{-x})^{-2} > 0$, 证明函数 y 单调递增; $y'' = v'_{(t)} = \frac{-be^{-x}(a - be^{-x})}{(a + be^{-x})^3}$, 当 $x < -\ln \frac{a}{b}$ 时, 函数 $v_{(t)}$ 单调递减; 当 $x > -\ln \frac{a}{b}$ 时, 函数 $v_{(t)}$ 单调递增。

对回收率数据进行 S 形曲线回归拟合计算结果见表 5。

通过表 5 数据计算 a 与 b 的值:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2} = 0.018\ 21;$$

$$a = \bar{Y} - b \bar{X} = 0.012\ 63$$

由 S 形曲线函数回归拟合计算可得回收率与时间呈正相关, 浮选速度与时间呈负相关。其中, 当时间 $t \rightarrow \infty$, 极限回收率 $\varepsilon_\infty = \frac{1}{a}$ 。当时间

表 5 S 形曲线回归拟合计算结果
Table 5 Calculated results of S-curve regression fitting

n	真实值		二乘法				预测值
	时间 x_i/min	累计回收率 $y_i/\%$	$X_i=e^{-x_i}$	$Y_i=1/y_i$	$X_i Y_i$	X_i^2	$y_i = \frac{1}{0.01263 + 0.01821e^{-x_i}}$
1	0.50	40.22	0.606 53	0.024 86	0.015 08	0.367 88	42.242 21
2	1.00	55.99	0.367 88	0.017 86	0.006 57	0.135 34	51.740 13
3	1.50	63.06	0.223 13	0.015 86	0.003 54	0.049 79	59.910 41
4	2.00	67.50	0.135 34	0.014 81	0.002 00	0.018 32	66.256 25
5	2.50	70.17	0.082 08	0.014 25	0.001 17	0.006 74	70.805 13
6	3.00	72.44	0.049 79	0.013 80	0.000 69	0.002 48	73.881 70
7	3.50	74.33	0.030 20	0.013 45	0.000 41	0.000 91	75.881 52
8	4.00	75.48	0.018 32	0.013 25	0.000 24	0.000 34	77.148 10
9	4.50	76.48	0.011 11	0.013 08	0.000 15	0.000 12	77.937 13
10	5.00	77.30	0.006 74	0.012 94	0.000 09	0.000 05	78.423 61

$\bar{X}_i = 0.1531$, $\bar{Y}_i = 0.0154$, $\sum_{i=1}^n X_i Y_i = 0.0299$, $\sum_{i=1}^n X_i^2 = 0.5820$

$t \rightarrow 0^+$ 时，浮选速率 $v_{(t)} = \frac{b}{(a+b)^2}$ ；当时间 $t \rightarrow -\ln \frac{a}{b}$ ，浮选最大速率 $v_{(t)\max} = \frac{1}{4a}$ 。证明初始时刻速率并非最大，存在一个后滞时间 $t = -\ln \frac{a}{b}$ 。浮选过程中平均速率 $\overline{v_{(t)}} = \frac{1}{t(a+b^{-1})}$ 。

(3) 负指数函数

方程式为： $y = ae^{\frac{b}{x}}$ ，其中 $a > 0$ ， $b < 0$ 。

$y' = v_{(x)} = v_{(t)} = \frac{x^2}{abe^x} > 0$ ，证明函数 y 单调递增； $y'' = v'_{(t)} = \left(\frac{b+2x}{x^4}\right)abe^{\frac{b}{x}}$ ，当 $x > -\frac{b}{2}$ 时，函数 $v_{(t)}$ 单调递减；当 $x < -\frac{b}{2}$ 时，函数 $v_{(t)}$ 单调递增。

对回收率数据进行负指数回归拟合计算结果见表6。

通过表6数据计算 a 与 b 的值：

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \overline{X} \overline{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \overline{X}^2} = -0.3629;$$

$$a = e^{\overline{Y} - b \overline{X}} = 81.8791$$

由负指数函数回归拟合计算可得回收率与时间呈正相关，浮选速度与时间呈负相关。其中，当时间 $t \rightarrow \infty$ 时，极限回收率 $\varepsilon_{\infty} = a$ ；当时间 $t \rightarrow -\frac{b}{2}$ 时，浮选最大速率 $v_{(t)\max} = -\frac{4a}{be^2}$ ；浮选过程中平均速率 $\overline{v_{(t)}} = \frac{a}{t} e^{\frac{b}{t}}$ 。

对上述三个拟合方程进行误差分析见表7。

由表7可知，双曲线拟合误差小于负指数拟

表6 负指数回归拟合计算结果
Table 6 Negative exponential regression fitting calculations

n	真实值		二乘法				预测值
	时间 x_i/min	累计回收率 $y_i/\%$	$X_i = 1/x_i$	$Y_i = \ln y_i$	$X_i Y_i$	X_i^2	$y_i = 81.8791e^{-\frac{0.3629}{x_i}}$
1	0.50	40.22	2.000 0	3.694 4	7.388 7	4.000 0	39.623 64
2	1.00	55.99	1.000 0	4.025 2	4.025 2	1.000 0	56.959 17
3	1.50	63.06	0.666 7	4.144 1	2.762 7	0.444 4	64.283 58
4	2.00	67.50	0.500 0	4.212 1	2.106 1	0.250 0	68.291 75
5	2.50	70.17	0.400 0	4.250 9	1.700 4	0.160 0	70.815 63
6	3.00	72.44	0.333 3	4.282 8	1.427 6	0.111 1	72.549 84
7	3.50	74.33	0.285 7	4.308 5	1.231 0	0.081 6	73.814 49
8	4.00	75.48	0.250 0	4.323 9	1.081 0	0.062 5	74.777 43
9	4.50	76.48	0.222 2	4.337 0	0.963 8	0.049 4	75.535 06
10	5.00	77.30	0.200 0	4.347 7	0.869 5	0.040 0	76.146 68

$\overline{X_i} = 0.5858$, $\overline{Y_i} = 4.1927$, $\sum_{i=1}^n X_i Y_i = 23.5559$, $\sum_{i=1}^n X_i^2 = 6.1991$

表7 误差分析
Table 7 Error analysis

n	实验真实值		双曲线拟合 数值	S曲线拟合 数值	负指数拟合 数值	双曲线拟合 误差	S曲线拟合 误差	负指数拟合 误差
	时间 x_i/min	累计回收率 $y_i/\%$						
1	0.50	40.22	40.451 93	42.242 21	39.623 64	-0.231 9	-2.022 2	0.596 4
2	1.00	55.99	55.121 72	51.740 13	56.959 17	0.868 3	4.249 9	-0.969 2
3	1.50	63.06	62.701 20	59.910 41	64.283 58	0.358 8	3.149 6	-1.223 6
4	2.00	67.50	67.330 30	66.256 25	68.291 75	0.169 7	1.243 8	-0.791 7
5	2.50	70.17	70.451 06	70.805 13	70.815 63	-0.281 1	-0.635 1	-0.645 6
6	3.00	72.44	72.697 41	73.881 70	72.549 84	-0.257 4	-1.441 7	-0.109 8
7	3.50	74.33	74.391 69	75.881 52	73.814 49	-0.061 7	-1.551 5	0.515 5
8	4.00	75.48	75.715 15	77.148 10	74.777 43	-0.235 2	-1.668 1	0.702 6
9	4.50	76.48	76.777 52	77.937 13	75.535 06	-0.297 5	-1.457 1	0.944 9
10	5.00	77.30	77.649 13	78.423 61	76.146 68	-0.349 1	-1.123 6	1.153 3
误差平方和						1.380 0	44.674 9	6.830 2

合和 S 形曲线拟合，证明双曲线函数方程拟合结果更优，其中：

极限回收率 $\varepsilon_{\infty} = \frac{1}{a} = 86.486$;

最大速率值 $v_{(t)\max} = \frac{1}{b} = 151.9981$ 。

2.2 浮选动力学模型的推导

对双曲线函数、S 形曲线函数及负指数函数三个方程进一步推导可获得三个动力学模型，模型汇总见表 8，模型浮选速率常数值见表 9，模型数据拟合曲线见图 3。

表 8 三种动力学模型汇总

Table 8 Summary of the three kinetic models

序号	模型类别	模型方程
1	双曲线模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left[\frac{t}{t + k_1 \varepsilon_{\infty}} \right]$
2	S 形曲线模型	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} \right) + k_2 e^{-t} \right]^{-1}$
3	负指数模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} e^{\frac{k_3}{t}}$

注：式中 t 为时间； ε 为 t 时刻回收率，%； ε_{∞} 为极限回收率，%；k 为浮选速率常数， min^{-1} 。

表 9 浮选模型速率常数

Table 9 Values of flotation model rate constants

模型类别	双曲线模型	S 形曲线模型	负指数模型
k 值	0.006 56	0.017 07	-0.366 27

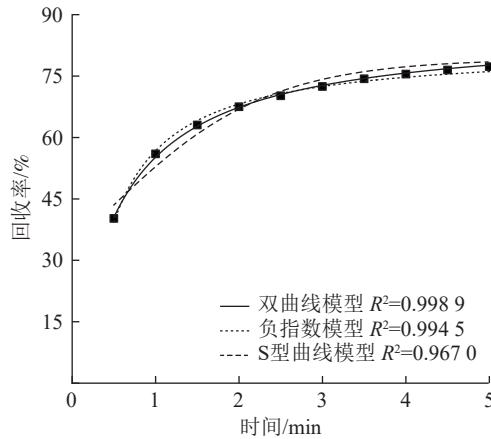


图 3 三种动力学模型拟合曲线

Fig.3 Fitting curves of the three kinetic models

(1) 双曲线动力学模型

在双曲线函数方程中：令 $\varepsilon = y$ ， $\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} = a$ ，

$t = x$ ， $k_1 = b$ ；

获得： $\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left[\frac{t}{t + k_1 \varepsilon_{\infty}} \right]$

(2) S 形曲线动力学模型

在 S 形曲线函数方程中：令 $\varepsilon = y$ ， $\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} = a$ ，

$t = x$ ， $k_2 = b$ ；

获得： $\varepsilon = \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_{\infty}} \right) + k_2 e^{-t} \right]^{-1}$

(3) 负指数动力学模型

在负指数函数方程中：令 $\varepsilon = y$ ， $\varepsilon_{\infty} = a$ ，

$t = x$ ， $k_3 = b$ ；

获得： $\varepsilon = \varepsilon_{\infty} e^{\frac{k_3}{t}}$

分析图 3 发现，双曲线模型拟合度较优， R^2 为 0.998 9；其次是负指数模型拟合度 R^2 为 0.994 5；S 型曲线模型拟合度较差， R^2 为 0.967 0。证明双曲线模型更贴近浮选铜实验过程。

2.3 常用动力学模型拟合对比

以误差平方和最小的双曲线函数计算所得的极限回收率对四种常用的浮选动力学模型进行拟合，常用模型见表 10，浮选速率常数见表 11，常用模型拟合曲线见图 4。

表 10 四种常用的浮选动力学模型^[14]

Table 10 Four commonly used flotation kinetic models

序号	模型类别	模型方程
1	全混合反应动力学模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left(1 - \frac{1}{1 + t/k_1} \right)$
2	气液吸附动力学模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left(\frac{k_2 t}{1 + k_2 t} \right)$
3	二级动力学模型	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\infty}^2 k_3 t}{1 + \varepsilon_{\infty} k_3 t}$
4	可浮性均匀分布二级动力学模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left\{ 1 - \frac{1}{k_4 t} [\ln(1 + k_4 t)] \right\}$

注：式中 t 为时间； ε 为 t 时刻回收率，%； ε_{∞} 为极限回收率，%；k 为浮选速率常数， min^{-1} 。

表 11 浮选模型速率常数

Table 11 Values of flotation model rate constants

模型序号	1	2	3	4
k 值	0.567 25	1.762 9	0.020 38	5.363 31

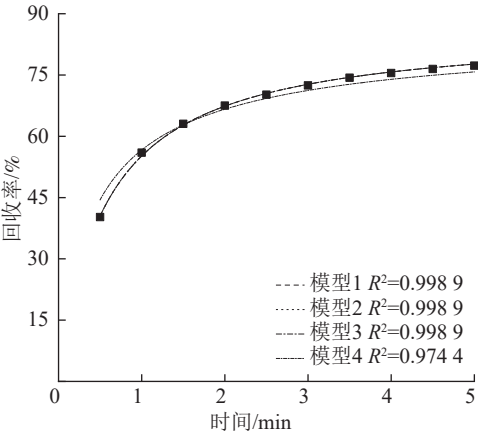


图 4 常用模型拟合曲线

Fig.4 Common model fitting curves

由图 4 四种模型拟合对比结果可知，模型 1，2，

3 拟合度较优, R^2 为 0.998 9; 模型 4 拟合度较差, R^2 为 0.974 4。表明选钨尾砂浮选铜实验过程符合全混合反应动力学、气液吸附动力学及二级动力学。

3 结 论

(1) 选钨尾砂浮选铜分槽粗选实验发现回收率随时间呈正相关, 且在一分钟内急剧增加, 之后随时间增加而趋于稳定。

(2) 利用双曲线、S 形曲线、负指数三种函数方程进行浮选铜数据回归拟合计算, 得出双曲线函数方程为: $\frac{1}{y_i} = 0.01156 + \frac{0.00658}{x_i}$; S 形曲线函数方程为: $y_i = \frac{1}{0.01263 + 0.01821e^{x_i}}$; 负指数函数方程为: $y_i = 81.8791e^{\frac{-0.3629}{x_i}}$; 双曲线函数方程拟合误差平方和最小为 1.380 0, 所得极限回收率最贴近实验真实回收率。

(3) 经函数方程推导获得双曲线模型、S 形曲线模型、负指数模型, 即: $\varepsilon = \varepsilon_\infty \left[\frac{t}{t + k_1 \varepsilon_\infty} \right]$ 、 $\varepsilon = \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_\infty} \right) + k_2 e^{-t} \right]^{-1}$ 、 $\varepsilon = \varepsilon_\infty e^{\frac{k_3}{t}}$, 拟合计算证明双曲线模型拟合度最优, 拟合度 R^2 为 0.998 9。

(4) 以双曲线函数方程计算得出的极限回收率进行拟合对比四种常用的浮选动力学模型, 表明选钨尾砂浮选铜实验过程符合全混合反应动力学、气液吸附动力学及二级动力学, 拟合度 R^2 在 0.99 以上。

参考文献:

- [1] 杜凤梅, 王金玮, 齐晓娜. 微细粒矿物分选技术研究进展[J]. 世界有色金属, 2021, 575(11):178-179.
DU F M, WANG J W, QI X N. Research progress on separation technology of fine minerals[J]. World Nonferrous Metals, 2021, 575(11):178-179.
[2] 汪泰, 胡真, 李汉文. 微细粒锡石浮选药剂筛选及选矿工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2020(2):96-101.
WANG T, HU Z, LI H W. Research on flotation agent screening and mineral processing technology for fine-grained cassiterite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(2):96-101.
[3] 代典, 梁欢, 何东升, 等. 湘西地区微细粒级难选菱锰矿浮选实验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(4):76-81.
DAI D, LIANG H, HE D S, et al. Experimental study on the flotation of a micro-grained refractory rhodochrosite in western Hunan area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(4):76-81.

- [4] 杨耀辉, 惠博, 严伟平, 等. 攀西微细粒钛铁矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2020(3):131-135.
YANG Y H, HUI B, YAN W P, et al. Research on process mineralogy of fine ilmenite in Panxi Area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):131-135.
[5] 顾帼华, 李青柯, 巫鑫东, 等. 微细粒矿物浮选技术在磨矿-调浆-分选体系的研究进展[J/OL]. 矿冶工程, 1-4[2023-03-10].
GU G H, LI Q K, WU L D, et al. Progress in research of micro-fine mineral flotation technology in terms of grinding, pulping and separation system[J/OL]. Mining and Metallurgical Engineering, 1-4[2023-03-10].
[6] CHENG G, ZHANG M N, LI Y L, et al. Improving micro-fine mineral flotation via micro/nano technologies[J]. Separation Science and Technology, 2023, 58(3):520-537.
[7] 朱志波, 朱书全, 陈慧昀, 等. 浮选动力学模型研究进展及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(2):20-24.
ZHU Z B, ZHU S Q, CHEN H Y, et al. Research progress and prospect of flotation kinetic model[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2):20-24.
[8] 马强, 李育彪, 李万青, 等. 矿物浮选动力学模型及影响因素研究进展[J]. 金属矿山, 2021, 545(11):74-80.
MA Q, LI Y B, LI W Q, et al. Research progress on mineral flotation kinetic model and influencing factors[J]. Metal Mine, 2021, 545(11):74-80.
[9] 罗仙平, 何丽萍, 周晓文, 等. 浮选动力学研究进展[J]. 金属矿山, 2008(4):71-74.
LUO X P, HE L P, ZHOU X W, et al. Progress in flotation kinetics research[J]. Metal Mine, 2008(4):71-74.
[10] 桂夏辉, 刘炯天, 陶秀祥, 等. 难浮煤泥浮选速率实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11):1895-1900.
GUI X H, LIU J T, TAO X X, et al. Studies on flotation rate of a hard-to-float fine coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11):1895-1900.
[11] 胡海祥. 中矿选择性分级再磨新技术磨—浮新工艺机理及应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
HU H X. Mechanism and applications of milling-floating technology on selective regrinding of flotation middlings[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
[12] 于洋, 李俊旺, 孙传尧, 等. 白钨矿与黑钨矿分选分速异步浮选过程中的模拟研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(S2):246-251.
YU Y, LI J W, SUN C Y, et al. Simulation studies of asynchronous flotation on different floatability and floating rate of scheelite and wolframite[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(S2):246-251.
[13] 夏青, 岳涛. 浮选动力学研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(2):46-51.
XIA Q, YUE T. The research progress of flotation kinetics[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2012, 3(2):46-51.
[14] LIU W, JIE Z, WANG W, et al. Flotation behaviors of ilmenite, titanite, and forsterite using sodium oleate as the collector[J]. Minerals Engineering, 2015, 72(5):1-9.

[11] ZHU D Q, ZHAO Q, QIU G Z, et al. Magnetizing roasting-magnetic separation of limonite ores from Anhui Province in east China[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(6):713-718.

Keywords: micro-fine particle; tungsten tailings; associated copper; flotation kinetics