

# 快速浮选分离滑石与辉钼矿动力学研究<sup>①</sup>

陈帆帆<sup>1,2</sup>, 郑灿辉<sup>2,3,4</sup>, 卜显忠<sup>2</sup>

(1.兰州有色冶金设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2.西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 3.湖南云选矿业科技有限责任公司, 湖南 娄底 417000; 4.安宁市众力经贸有限公司广南县玉莫钛砂矿, 云南 文山 663000)

**摘要:** 采用快速浮选技术对滑石与辉钼矿单矿物进行高效分离试验研究。在矿物粒度 0.043~0.074 mm、起泡剂 MIBC 用量 20 g/t、浮选时间 60 s 条件下, 滑石回收率 76.64%, 辉钼矿回收率仅 19.72%, 实现了滑石与辉钼矿的高效分离。采用 MATLAB 软件对浮选速率动力学方程进行非线性拟合, 结果表明, 滑石浮选过程符合经典一级浮选动力学模型, 辉钼矿浮选过程符合修正后的经典一级浮选动力学模型。浮选时间对起泡剂 MIBC 在滑石和辉钼矿表面吸附量试验结果表明, 浮选前期, 滑石比辉钼矿更容易与药剂作用, 此时滑石表面起泡剂 MIBC 吸附量远大于辉钼矿表面。

**关键词:** 滑石; 辉钼矿; 快速浮选; 浮选动力学; 非线性拟合

中图分类号: TD923

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.05.014

文章编号: 0253-6099(2024)05-0070-05

## Flotation Kinetics Study for Efficient Separation of Talc and Molybdenite by Flash Flotation

CHEN Fanfan<sup>1,2</sup>, ZHENG Canhui<sup>2,3,4</sup>, BU Xianzhong<sup>2</sup>

(1.Lanzhou Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China; 2.School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3.Hunan Yunxuan Mining Technology Co., Ltd., Loudi 417000, Hunan, China; 4.Guangnan Yumo Titanium Placer Mine, Anning Zhongli Economic & Trade Co., Ltd., Wenshan 663000, Yunnan, China)

**Abstract:** An experimental study was performed on efficient separation of talc and molybdenite by adopting flash flotation. With grain fineness of 0.043–0.074 mm, 20 g/t of frother MIBC, and flotation time of 60 seconds, the talc recovery attains 76.64%, while the recovery of molybdenite is only 19.72%, resulting in an efficient separation between talc and molybdenite. According to the nonlinear fitting of flotation kinetic equation by MATLAB, talc flotation process conforms to the classic first-order flotation kinetic model, while molybdenite flotation conforms to the modified classic first-order flotation kinetic model. The following test on the influence of flotation time on adsorption of MIBC on talc and molybdenite shows that talc is more likely to interact with the agent than molybdenite at the early stage of flotation, and much more MIBC is adsorbed on talc than on molybdenite at that stage.

**Key words:** talc; molybdenite; flash flotation; flotation kinetics; nonlinear fitting

河南某高滑石型辉钼矿属于热液细脉充填型矿物,是一种嵌布粒度细、氧化率高的难选钼矿。已有研究成果表明,高滑石型辉钼矿难选的原因主要有两方面:一是滑石天然可浮性相对较好,极易伴随泡沫进入钼精矿,从而降低选矿指标<sup>[1-3]</sup>;二是滑石摩氏硬度仅 1.0,在磨矿作业中易泥化,从而使得滑石极易罩盖在辉钼矿表面、阻碍捕收剂与辉钼矿作用,不仅降低辉钼

矿回收率<sup>[4]</sup>,而且两种矿物难以分离<sup>[5-6]</sup>。本文作者已在前期对河南上房沟高滑石型辉钼矿进行了详细的浮选试验研究,发现快速浮选技术可有效处理高滑石型辉钼矿<sup>[7]</sup>,使滑石与辉钼矿得到有效分离。在前述研究基础上,本文采用浮选试验结合浮选动力学及药剂吸附量测试等,研究快速浮选技术有效分离滑石与辉钼矿的作用机理。

① 收稿日期: 2024-04-01

作者简介: 陈帆帆(1995—),男,陕西咸阳人,硕士,主要研究方向为矿物加工工程及选矿设计。E-mail:532247675@qq.com

通信作者: 郑灿辉(1986—),男,山东济宁人,硕士,高级工程师,主要从事选矿技术研究与管理。E-mail:zhengchchinamol@163.com

# 1 试 验

## 1.1 试验矿样与药剂

试验所用滑石单矿物为外购样本,取自辽宁海城,辉钼矿单矿物取自河南栾川三道庄钼矿。矿石经破碎、手选、筛分、三头玛瑙研磨等流程,取+0.147 mm 粒级、(-0.147+0.074) mm 粒级、(-0.074+0.043) mm 粒级、-0.043 mm 粒级 4 种产品作为单矿物浮选矿样。滑石和辉钼矿单矿物化学多元素分析结果分别见表 1 和表 2。滑石单矿物纯度达到 96.02%,辉钼矿单矿物纯度达到 96.18%,均能满足单矿物浮选试验要求。

表 1 滑石单矿物化学多元素分析结果(质量分数) %

SiO <sub>2</sub>	MgO	其他
64.89	31.13	3.98

表 2 辉钼矿单矿物化学多元素分析结果(质量分数) %

MoS <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	其他
96.18	2.51	1.31

试验所用药剂包括 MIBC(起泡剂)、硫酸(调整剂)、碳酸钠(调整剂)等,其中 MIBC 纯度不低于 99.00%,其余药剂均为工业级药剂。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 矿物浮选试验

采用槽体容积 50 mL 的 RK/FD 型挂槽式浮选机进行浮选试验。每次称取 2.0 g 单矿物于浮选槽中,加入 50 mL 去离子水,搅拌转速 1 920 r/min,并按照设定的浮选试验流程进行调浆并加入药剂。采用手动定频的刮泡方式进行浮选刮泡,刮泡次数为 20 次,最后将收集到的精矿与尾矿分别过滤和干燥、称重、记录、计算各产品回收率。

### 1.2.2 浮选动力学研究

选出 6 种典型的浮选动力学模型<sup>[8-9]</sup>,根据浮选速度试验,利用最小二乘法找出适合矿物浮选的动力学模型,选取的 6 种典型浮选动力学模型如表 3 所示,其中  $\varepsilon_{\infty}$  为最终回收率, $k$  为浮选速率常数。

为准确反映实际浮选过程,需准确求得各浮选动力学模型参数,通过 MATLAB 软件中非线性拟合命令对试验数据进行拟合,得到各个模型的  $\varepsilon_{\infty}$  和  $k$  值,再根据各模型拟合值和实际的试验值计算各模型的回归参数检验值,误差平方和  $E_{SSE}$  和相关系数平方和  $R^2$  计

表 3 典型浮选动力学模型

模型编号	模型名称	公式
1	经典一级动力学模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} [1 - \exp(-kt)]$
2	一级矩形分布模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left[ 1 - \frac{1 - \exp(-kt)}{kt} \right]$
3	经典二级动力学模型	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\infty}^2 kt}{1 + \varepsilon_{\infty} kt}$
4	二级矩形分布模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left[ 1 - \frac{\ln(1+kt)}{kt} \right]$
5	全粒级混合反应模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left( 1 - \frac{1}{1+t/k} \right)$
6	改进气固黏附模型	$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} \left( \frac{kt}{1+kt} \right)$

算公式如下:

$$E_{SSE} = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \hat{\varepsilon}_i)^2 \tag{1}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon})^2 + \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \tag{2}$$

误差平方和  $E_{SSE}$  越接近 0,表明模型拟合值与试验值越接近;相关系数平方和  $R^2$  的取值范围为[0,1],其数值越接近 1,表明模型对试验数据的拟合程度越高,所选择的模型对浮选过程的适应性越强。

### 1.2.3 药剂吸附量检测

称取 2.0 g 纯矿物,倒入 100 mL 烧杯中,加入 50 mL 去离子水,用碳酸钠调节矿浆 pH 值,加入药剂后用磁力搅拌器搅拌 30 min,再用离心机分离矿浆,取分离后的上清液进行化学分析检测,采用残留药剂量的方法检测药剂在矿物表面的吸附量:药剂总量减去矿浆中残留量即为药剂在矿物表面的吸附量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 起泡剂用量对矿物浮选效果的影响

不添加捕收剂,控制起泡剂 MIBC 用量,对不同粒级滑石和辉钼矿分别进行单矿物浮选试验,起泡剂用量对矿物浮选效果的影响见图 1。从图 1 可以看出:随着矿物粒度降低,同一种矿物浮选回收率不断增加,确定适宜的矿物浮选粒度为(-0.074+0.043) mm;同一粒度下,随着起泡剂 MIBC 用量增加,两种矿物回收率均增加,MIBC 用量 20 g/t 时两种矿物回收率取得最大差值(以(-0.074+0.043) mm 粒级为例,滑石回收率比辉钼矿回收率高 52.98 个百分点),MIBC 用量大于 20 g/t 后,辉钼矿回收率迅速增加,两种矿物回收率差异不断减小,起泡剂 MIBC 的适宜用量为 20 g/t。

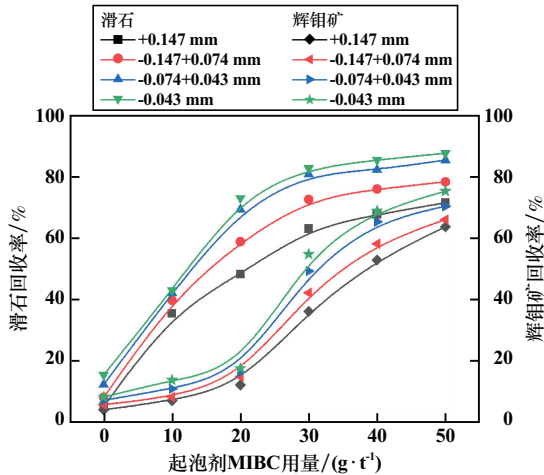


图1 起泡剂用量对矿物浮选效果的影响

## 2.2 浮选时间对矿物浮选效果的影响

不添加捕收剂,起泡剂 MIBC 用量  $20 \text{ g/t}$ ,对不同粒级滑石与辉钼矿分别进行单矿物浮选试验,浮选时间对矿物浮选效果的影响见图 2。从图 2 可以看出:随着矿物粒度降低,同种矿物浮选回收率增加;同一粒度条件下,两种矿物回收率均随着浮选时间增加而增加;浮选时间小于  $60 \text{ s}$  时,滑石回收率增长速度大于辉钼矿回收率增长速度,并在浮选时间  $60 \text{ s}$  时两种矿物回收率取得最大差值(以  $(-0.074+0.043) \text{ mm}$  粒级为例,滑石回收率比辉钼矿回收率高  $48.01$  个百分点);浮选时间大于  $60 \text{ s}$  后,辉钼矿回收率迅速增加,两种矿物回收率差异不断减小。本试验旨在确定 2 种矿物回收率差值最大时的浮选时间,该时间为  $60 \text{ s}$ 。

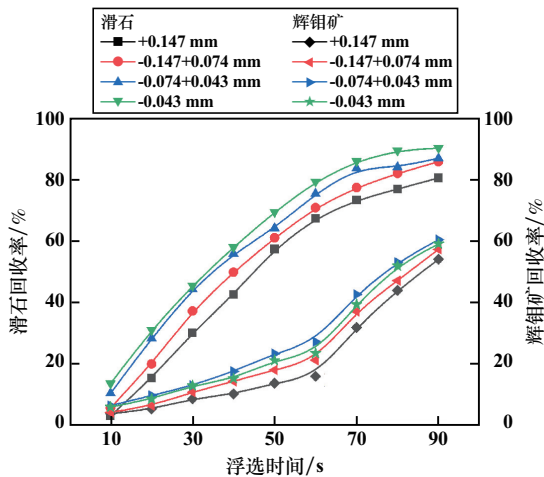


图2 浮选时间对矿物浮选效果的影响

## 2.3 浮选时间对滑石浮选的动力学研究

为进一步了解滑石浮选行为特征,建立了适用于滑石浮选的动力学模型,6种滑石浮选动力学模型拟合结果见图 3,6种滑石浮选动力学模型非线性拟合回

归参数与检验值分析结果见表 4。比较分析 6 种模型对试验结果拟合的回归参数与检验值,结果表明,模型 1(经典一级动力学模型)对滑石浮选过程拟合程度较好, $E_{\text{SSE}}$  最小, $R^2$  更接近 1。因此,滑石浮选过程更接近于经典一级动力学模型。

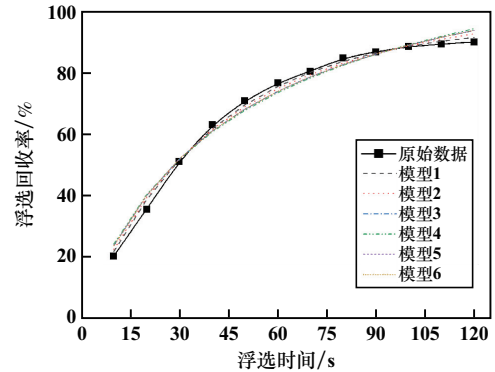


图3 6种滑石浮选动力学模型拟合结果

表4 6种滑石浮选动力学模型非线性拟合回归参数与检验值

模型编号	模型名称	$\varepsilon_{\infty}$	$k$	$R^2$	$E_{\text{SSE}}$
1	经典一级动力学模型	95.746	0.026	0.997	21.228
2	一级矩形分布模型	112.752	0.046	0.994	41.773
3	经典二级动力学模型	127.983	0.000	0.988	78.027
4	二级矩阵分布模型	146.053	0.042	0.984	99.947
5	全粒级混合反应模型	127.983	43.925	0.988	78.027
6	改进气固黏附模型	127.983	0.023	0.988	78.027

## 2.4 浮选时间对辉钼矿浮选的动力学研究

同理,建立了适用于辉钼矿浮选的动力学模型,6种辉钼矿浮选动力学模型拟合结果见图 4,6种辉钼矿浮选动力学模型非线性拟合回归参数与检验值分析结果见表 5。由图 4 和表 5 可见,6种模型对辉钼矿浮选拟合程度较差。

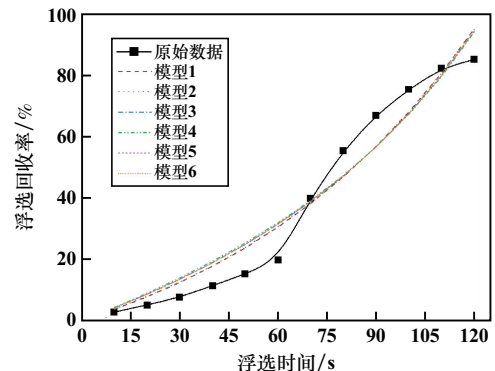


图4 6种辉钼矿浮选动力学模型拟合结果

观察图 4 发现,浮选时间  $60 \text{ s}$  以后辉钼矿回收率曲线呈上凸趋势,接近经典一级动力学模型。因此对该曲线进行修正,仅对该曲线浮选时间  $60 \sim 120 \text{ s}$  区间

进行动力学拟合。修正后的6种浮选动力学模型<sup>[10]</sup>见表6,其中 $\varepsilon_\infty$ 为最终回收率, $k$ 为浮选速率常数, $t^*$ 为修正的浮选时间。修正后辉钼矿浮选模型拟合对比结果见图5,对应的回归参数与检验值分析结果见表7。由图5和表7可见,模型1(修正后的经典一级动力学模型)对辉钼矿浮选过程拟合程度较好。因此,辉钼矿浮选过程更接近修正后的经典一级动力学模型,且浮选时间52.745 s后辉钼矿浮选过程接近于经典一级动力学模型。

表5 6种辉钼矿浮选动力学模型非线性拟合回归参数与检验值

模型编号	模型名称	$\varepsilon_\infty$	$k$	$R^2$	$E_{SSE}$
1	经典一级动力学模型	-27.130	-0.013	0.953	590.558
2	一级矩形分布模型	-40.808	-0.017	0.953	603.382
3	经典二级动力学模型	-93.932	0.000	0.950	662.439
4	二级矩阵分布模型	-150.797	-0.005	0.950	693.042
5	全粒级混合反应模型	-93.872	-239.402	0.950	662.439
6	改进气固黏附模型	-93.873	-0.004	0.950	662.439

表6 修正后的6种浮选动力学模型

模型编号	模型名称	公式
1	经典一级动力学模型	$\varepsilon = \varepsilon_\infty [1 - \exp(-k(t-t^*))]$
2	一级矩形分布模型	$\varepsilon = \varepsilon_\infty \left[ 1 - \frac{1 - \exp(-k(t-t^*))}{k(t-t^*)} \right]$
3	经典二级动力学模型	$\varepsilon = \frac{\varepsilon_\infty^2 k(t-t^*)}{1 + \varepsilon_\infty k(t-t^*)}$
4	二级矩阵分布模型	$\varepsilon = \varepsilon_\infty \left[ 1 - \frac{\ln(1+k(t-t^*))}{k(t-t^*)} \right]$
5	全粒级混合反应模型	$\varepsilon = \varepsilon_\infty \left[ 1 - \frac{1}{1 + (t-t^*)/k} \right]$
6	改进气固黏附模型	$\varepsilon = \varepsilon_\infty \left[ \frac{k(t-t^*)}{1+k(t-t^*)} \right]$

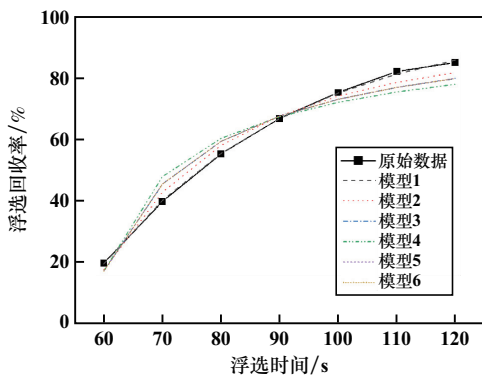


图5 修正后的6种辉钼矿浮选动力学模型拟合结果

结合浮选试验结果与浮选动力学模型可以得出,滑石浮选过程更接近经典一级动力学模型,辉钼矿浮选过

程更接近修正后的经典一级动力学模型。从浮选试验结果可以看出,浮选开始后的60 s内,滑石浮选回收率急剧增加,浮选时间60 s时回收率达到76.64%,而此时辉钼矿回收率仅19.72%。说明矿浆中同时存在滑石与辉钼矿两种矿物时,浮选开始时,可浮性高的滑石矿物会覆盖在辉钼矿表面,阻碍浮选药剂的作用,而并不影响滑石的浮选过程;浮选60 s后,由于矿浆中大量的滑石随泡沫提升到矿浆表面,矿浆内部滑石量急剧下降,此时伴随着矿浆的不断搅拌,辉钼矿表面的滑石同时受到矿浆内部液流的冲力以及表面药剂作用后产生的疏水力而不断脱离辉钼矿表面。此时辉钼矿表面裸露在矿浆中,经过浮选药剂的作用,辉钼矿浮选回收率开始急剧升高,说明快速浮选工艺可以实现滑石与辉钼矿的高效分离。

表7 修正后的6种辉钼矿浮选动力学模型非线性拟合回归参数与检验值

模型编号	模型名称	$\varepsilon_\infty$	$k$	$t^*$	$R^2$	$E_{SSE}$
1	经典一级动力学模型	98.74	0.030	52.745	1.000	1.643
2	一级矩形分布模型	100.00	0.085	55.269	0.988	46.912
3	经典二级动力学模型	100.00	0.001	56.712	0.971	114.878
4	二级矩阵分布模型拟	100.00	0.184	57.597	0.949	203.169
5	全粒级混合反应模型	100.00	15.933	56.712	0.971	114.878
6	改进气固黏附模型	100.00	0.063	56.712	0.971	114.878

### 2.5 浮选时间对MIBC在滑石和辉钼矿表面吸附量的影响

为印证上述猜想,对2种矿物进行了不同吸附时间下起泡剂MIBC的吸附量测试,结果见图6。由图6可以看出,随着浮选时间增加,起泡剂MIBC在滑石和辉钼矿表面的吸附量逐渐增加,浮选时间小于等于60 s时,起泡剂MIBC在滑石表面的吸附量远大于在辉钼矿表面的吸附量,浮选时间大于60 s后,起泡剂MIBC在滑石和辉钼矿表面的吸附量差距逐渐缩小,随着浮选时间不断延长,起泡剂MIBC在2种矿物表面的吸附量曲线不断接近。

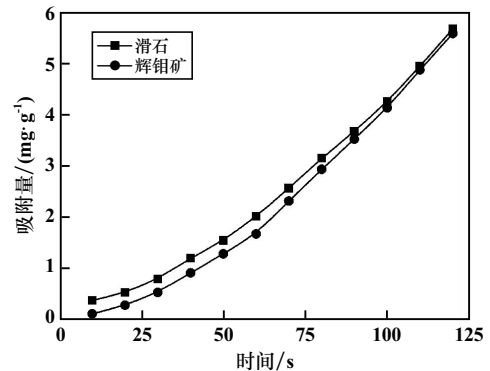


图6 起泡剂MIBC吸附量随时间的变化

这一结果进一步说明:浮选前期,滑石比辉钼矿更容易与药剂作用,此时滑石矿物表面的起泡剂 MIBC 吸附量远大于辉钼矿表面;伴随着滑石不断脱离辉钼矿表面,辉钼矿表面不断裸露出来,起泡剂 MIBC 与辉钼矿表面作用的机会增加,辉钼矿表面起泡剂 MIBC 吸附量也不断增加;浮选后期,2 种矿物表面的起泡剂 MIBC 吸附量接近。

### 3 结 论

1) 采用快速浮选技术,在矿物粒度 0.034~0.074 mm、起泡剂 MIBC 用量 20 g/t、浮选时间 60 s 条件下,滑石回收率 76.64%,辉钼矿回收率仅 19.72%,实现了滑石与辉钼矿的高效分离。

2) 滑石浮选过程更接近于经典一级动力学模型,辉钼矿浮选过程更接近于修正后的经典一级动力学模型。

3) 高滑石型辉钼矿浮选时,在开始阶段,可浮性好的滑石会覆盖在辉钼矿表面,阻碍浮选药剂的作用,而并不影响滑石的浮选过程。浮选 60 s 后,由于矿浆中大量的滑石随泡沫提升到矿浆表面,矿浆内部的滑石量急剧下降,伴随着矿浆不断被搅拌,辉钼矿表面的滑石同时受到矿浆内部液流的冲力以及表面药剂作用后产生的疏水力而脱离辉钼矿表面。此时辉钼矿表面裸露在矿浆中,经浮选药剂作用,辉钼矿回收率开始急

剧升高,说明快速浮选工艺可实现滑石与辉钼矿的高效分离。

### 参考文献:

- [1] 张其东,袁致涛,刘炯天,等. 葡聚糖对辉钼矿与滑石浮选分离的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016,26(4):884-890.
- [2] 冯其明,张程,张国范,等. 钙离子体系下羧化壳聚糖对滑石浮选行为影响[J]. 中国有色金属学报, 2018,28(6):1191-1195.
- [3] 张其东,袁致涛,刘炯天,等. 金属离子对滑石浮选行为的影响及机理研究[J]. 金属矿山, 2016(4):67-71.
- [4] 钟春晖,冯博,陈渊淦,等. 黄薯树胶为抑制剂和丁基黄药为捕收剂的辉钼矿与滑石浮选分离[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2021,31(12):3879-3890.
- [5] 张其东. 辉钼矿与滑石可浮性差异调控基础研究[D]. 沈阳:东北大学, 2016.
- [6] 钟春晖,冯博,严华山,等. 三种有机抑制剂在辉钼矿滑石浮选分离中的作用[J]. 中国有色金属学报, 2022,32(12):3843-3851.
- [7] 郑灿辉,卜显忠,王朝,等. 快速浮选技术在某高滑石型辉钼矿浮选中应用研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):70-72.
- [8] 白丽梅,刘忠义,韩跃新,等. 浮选动力学模型的应用与发展[J]. 矿产保护与利用, 2016(4):56-63.
- [9] 冉金城,邱显扬. 铜硫分离中银的选择性导向回收[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):33-38.
- [10] 柳泉洲. 低阶煤油泡浮选过程特征及其动力学研究[D]. 江苏:中国矿业大学, 2017.

引用本文: 陈帆帆,郑灿辉,卜显忠. 快速浮选分离滑石与辉钼矿动力学研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):70-74.

(上接第 69 页)

- [5] BONNIN A, DUVAUCHELLE P, KAFTANDJIAN V, et al. Concept of effective atomic number and effective mass density in dual-energy X-ray computed tomography[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2014,318:223-231.
- [6] 毛冬辉,叶文华,熊田忠,等. 双能 X 射线识别金属物料的 R 值曲线拟合算法[J]. 机械制造与自动化, 2017,46(5):160-162.
- [7] 王祺奥. 基于双能 X 射线透射的废金属识别与分离控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
- [8] 黄河,叶文华,熊田忠,等. 基于双能 X 射线透射的区域分块废有色金属识别算法[J]. 机械制造与自动化, 2019,48(4):26-29.
- [9] 李伟毅,叶文华,熊田忠. 基于 BP 神经网络的双能 X 射线透射的金属识别算法[J]. 有色金属工程, 2020,10(8):124-130.
- [10] 高航,王建英,张雪峰,等. 双能 X 射线透射矿物识别系统图像

处理设计[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1):101-106.

- [11] 李鹏祥. 矿石智能分选方法的研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2023.
- [12] 童郭贵,李解. 基于双能 X 射线高、低能曲线拟合识别稀土矿物[J]. 内蒙古科技大学学报, 2020,39(3):212-216.
- [13] 刘磊,赵兴华,张芑. X 射线厚度测量原理及影响因素[J]. 价值工程, 2023,42(20):108-110.
- [14] 葛学海,白云飞,陈鹏,等. 煤与矸石分离系统中 X 射线探测器的设计[J]. 选煤技术, 2017(6):64-67.
- [15] 王冬阳,张雄杰,胡斌,等. 基于曲线拟合的双能 X 射线透射的金属识别研究[J]. 有色金属工程, 2022,12(2):85-91.

引用本文: 余芷山,何剑锋,朱文松,等. 基于分段 T 值曲线拟合的双能 X 射线的铜矿分选研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):66-69.