

菱镁矿及其主要伴生矿物白云石的浮选动力学研究*

孙浩然¹, 印万忠^{1,2,3}, 唐远¹, 付亚峰¹, 刘佳⁴

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省矿物加工技术重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 3. 东北大学基因矿物加工中心, 辽宁 沈阳 110819; 4. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:为了研究不同浓度的调整剂(碳酸钠、氯化钙和氯化镁)对菱镁矿和白云石单矿物浮选回收率及浮选速率的影响,在矿浆pH值为12、油酸钠浓度为0.25 mmol/L的浮选体系下,针对-74+38 μm粒级的菱镁矿和白云石,进行了分批刮泡浮选试验,并总结出二者最佳浮选分离流程。结果表明,氯化镁(2.0 mmol/L)为调整剂时菱镁矿与白云石的浮游特性差异较显著,通过两次粗选,粗选1时间为1.0 min,粗选2时间为4.0 min的浮选流程实现二者浮选分离。对氯化镁(2.0 mmol/L)为调整剂时单矿物浮选过程模拟分析可知,分选浮选模型可较好地模拟菱镁矿和白云石的浮选过程。

关键词:菱镁矿;白云石;调整剂;分离流程;浮选动力学

中图分类号:TD973+.7;TD91 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2019)01-0010-07

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.01.003

Flotation Kinetics of Magnesite and Its Associated Minerals Dolomite

SUN Haoran¹, YIN Wanzhong^{1,2,3}, TANG Yuan¹, FU Yafeng¹, LIU Jia⁴

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Mineral Processing Technology, Shenyang 110819, China; 3. Northeastern University Genetic Mineral Processing Research Center, Shenyang 110819, China; 4. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to study the effects of different concentrations of modifiers (sodium carbonate, calcium chloride and magnesium chloride) on flotation recovery and flotation rate of magnesite and dolomite single minerals the batch bleb flotation test was summarized. For -74+38 μm particles of magnesite and dolomite, set the pulp pH value to 12, the concentration of sodium oleate to 0.25 mmol/L during the flotation test, and the optimum separation process flotation is obtained. The results show that the difference of floatation characteristics between magnesite and dolomite is significant when magnesium chloride (2.0 mmol/L) as a regulator. The flotation separation of two groups is realized by two coarse selection, 1 time for coarse selection is 1.0 min, and 2 time for coarse selection is 4.0 min. The flotation process of magnesite and dolomite can be well simulated by the simulation analysis of the single mineral flotation process of magnesium chloride (2.0 mmol/L) as a regulator.

Key words: magnesite; dolomite; regulator; separation process; flotation kinetics

引言

我国天然菱镁矿资源丰富,但由于过度开采,高

品位菱镁矿逐渐减少,无法满足生产需要。而低品位菱镁矿无法用于高档产品生产,并且由于大量的低品位菱镁矿无法有效利用,使菱镁矿资源产生巨

* 收稿日期:2018-10-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51874072);国家自然科学基金项目(51504053);中央高校基本科研资金(N170107013)

作者简介:孙浩然(1994-),男,河南商丘人,东北大学博士研究生。

通信作者:印万忠(1970-),男,浙江临安人,东北大学教授,博士生导师。

大的浪费,因此菱镁矿的提纯工作越来越受到重视^[1-2]。

在菱镁矿选矿提纯过程中,降低 CaO 含量是提高菱镁矿品质的关键^[3]。菱镁矿中的 CaO 主要包含在杂质矿物白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)中^[4]。现如今,菱镁矿与白云石的浮选分离试验较多,但针对矿物本身在不同浮选影响因素支配下浮选动力学的研究却很少,对其矿物内部主要离子 CO_3^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等因素支配下浮选速率的研究更加微乎其微。基于此,本文以浮选动力学为基础,研究不同内部离子影响下,两种矿物可浮性和浮选速率的差异,得出菱镁矿与其主要含钙脉石矿物白云石之间浮选分离流程,为现场低品位菱镁矿选矿提供参考。

1 试验主要材料与与方法

1.1 原料与试剂

试验所用的菱镁矿和白云石分别取自辽宁宽甸水洞沟菱镁矿和辽宁丹东金巷白云石矿,矿样 XRD 分析结果如图 1 所示,多元素分析结果如表 1 所示。菱镁矿和白云石的纯度分别为 96.18% 和 99.03%。采用手工破碎,振动筛分,针对两种矿物分别制备粒级为 $-74 + 38 \mu\text{m}$ 的矿样用于浮选试验研究。

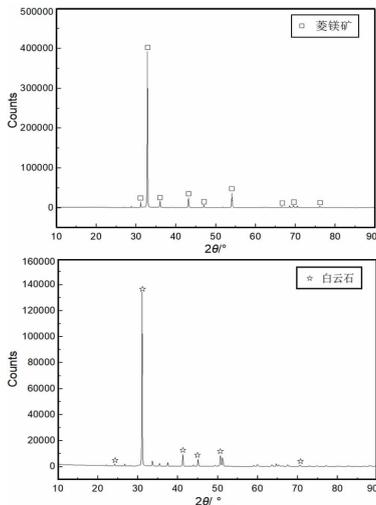


图 1 矿物 X 射线衍射图

Fig. 1 X-ray diffraction of minerals

表 1 矿物化学多元素分析 /%

Table 1 Chemical multielement analysis of pure mineral

名称	CaO	MgO	SiO ₂	TFe	Al ₂ O ₃	样品纯度
菱镁矿	1.24	45.80	0.27	-	-	96.18
白云石	30.34	21.36	1.50	0.078	0.25	99.03

试验所用捕收剂油酸钠为化学纯,调整剂氢氧

化钠、盐酸、碳酸钠、氯化钙和氯化镁均为分析纯。试验中所用的试剂在试验时均用去离子水配制成相应浓度的水溶液备用。

1.2 试验方法

每次试验矿样为 2 g,在挂槽式浮选机(浮选槽容积 30 mL)中进行,试验首先搅拌矿浆 2.0 min,按照加入调整剂、调节 pH 值、加入捕收剂油酸钠(0.25 mmol/L)的顺序加药后,开始分段、连续刮泡 0.1、0.2、0.3、0.4、1.0、1.5、1.5 min。分别得到精矿 1、精矿 2、精矿 3、精矿 4、精矿 5、精矿 6、精矿 7。试验过程中,设定浮选机转速 1 800 r/min,去离子水 20 mL。试验完成后烘干各个精矿并称重,得出各个时段的浮选回收率。

2 矿物浮选试验结果

2.1 碳酸钠用量对矿物浮选行为的影响

针对粒级 $-74 + 38 \mu\text{m}$ 的菱镁矿和白云石,设定矿浆 pH 值为 12、油酸钠浓度为 0.25 mmol/L,得出不同碳酸钠浓度条件下矿物的累计回收率随浮选时间变化的曲线如图 2 所示。

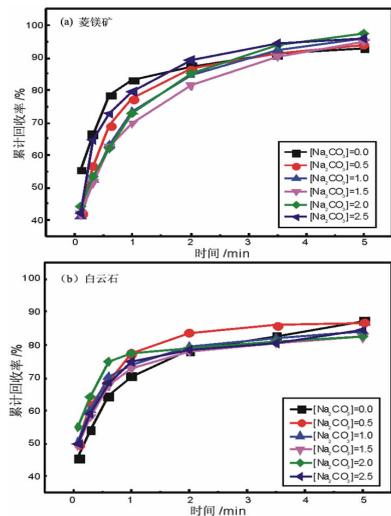


图 2 不同碳酸钠浓度下矿物累计回收率与浮选时间的关系 ($[\text{Na}_2\text{CO}_3]$ 单位为 mmol/L)

Fig. 2 Relationship between the cumulative recovery rate of mineral and the flotation time under different sodium carbonate concentrations

由图 2 可知,两种矿物的浮选累计回收率随着碳酸钠浓度的增加无明显变化,菱镁矿均保持在 92.50% ~ 96.50% 之间,白云石均保持在 83.50% ~ 87.50% 之间。不同浓度的碳酸钠条件下,菱镁矿和白云石浮选累计回收率趋于稳定的时间分别为

3.5 min 和 2.0 min。综上可得,碳酸钠对两种单矿物的总体累计回收率影响较小,添加一定浓度的碳酸钠能提高白云石的浮选速率,而对菱镁矿的浮选速率则起到抑制作用。当碳酸钠浓度为 2.0 mmol/L(菱镁矿:97.40%、白云石:82.45%)时,菱镁矿与白云石的上浮差最大,可作为浮选分离的选择点。

2.2 氯化钙用量对矿物浮选行为的影响

针对粒径 -74 + 38 μm 的菱镁矿和白云石,设定矿浆 pH 值为 12、油酸钠浓度为 0.25 mmol/L,得出不同氯化钙浓度条件下矿物的累计回收率随浮选时间变化的曲线如图 3 所示。

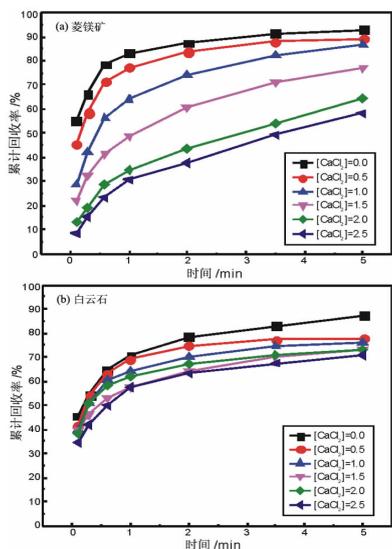


图 3 不同氯化钙浓度下矿物累计回收率与浮选时间的关系 ([CaCl₂]单位为 mmol/L)

Fig. 3 Relationship between the cumulative recovery rate of mineral and the flotation time under different calcium chloride concentrations

由图 3 可知,菱镁矿和白云石的浮选累计回收率随着氯化钙浓度的增加逐渐降低,无氯化钙添加时累计回收率最高,氯化钙浓度为 2.5 mmol/L 时累计回收率最低。对于菱镁矿,氯化钙浓度为 0~1.0 mmol/L 时浮选累计回收率趋于平稳的时间均为 2.0 min,氯化钙浓度为 1.5~2.5 mmol/L 时浮选累计回收率趋于平稳的时间均为 3.5 min;对于白云石,不同氯化钙浓度条件下浮选累计回收率趋于平稳的时间均为 2.0 min。综上可得,随着氯化钙浓度的增高,对菱镁矿和白云石的浮选起到抑制作用逐渐增大,且对菱镁矿的抑制作用大于白云石。当氯化钙浓度为 2.0 mmol/L(菱镁矿:64.15%、白云石:73.30%)时,菱镁矿与白云石的上浮差最大,故可

作为浮选分离的选择点。

2.3 氯化镁用量对矿物浮选行为的影响

针对粒径 -74 + 38 μm 的菱镁矿和白云石,设定矿浆 pH 值为 12、油酸钠浓度为 0.25 mmol/L,得出不同氯化镁浓度条件下矿物的累计回收率随浮选时间变化的曲线如图 4 所示。

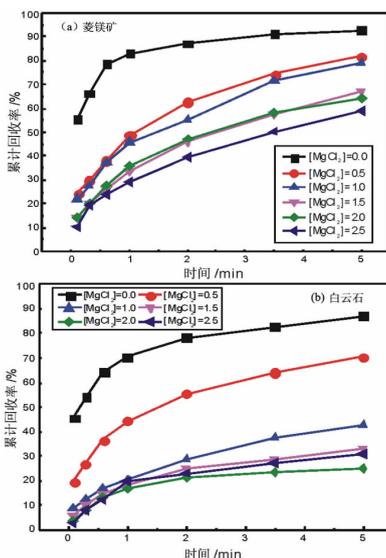


图 4 不同氯化镁浓度下矿物累计回收率与浮选时间的关系 ([MgCl₂]单位为 mmol/L)

Fig. 4 Relationship between the cumulative recovery rate of mineral and the flotation time under different concentrations of magnesium chloride

由图 4 可知,两种矿物的浮选累计回收率随着氯化镁浓度的增加逐渐降低,无氯化镁添加时,菱镁矿和白云石的矿物累计回收率最高分别为 92.85% 和 87.30%,在氯化镁浓度为 2.5 mmol/L 时菱镁矿和白云石的累计回收率最低分别为 59.20% 和 24.83%。对于菱镁矿,浮选 5.0 min 内,氯化镁浓度为 0 mmol/L 时,在浮选 2.0 min 时菱镁矿累计回收率趋于稳定,其余氯化镁浓度条件则未出现菱镁矿累计回收率趋于稳定。对于白云石,浮选 5.0 min 内,氯化镁浓度小于 1.5 mmol/L 时,均在浮选 3.5 min 时累计回收率趋于平稳;氯化镁浓度为 1.5 mmol/L 时,在 2.0 min 时累计回收率趋于平稳;氯化镁浓度大于 1.5 mmol/L 时,均在浮选 1.0 min 时累计回收率趋于平稳。综上可得,氯化镁对两种矿物浮选均起到抑制作用,且随着氯化镁浓度的增加抑制作用逐渐增大。当氯化镁浓度 2.0 mmol/L(菱镁矿:70.50%、白云石:25.10%)时,菱镁矿与白云石的上浮差最大,故可作为浮选分离的选择点。

3 最佳浮选试验条件的研究

矿物浮选速率是浮选动力学的重要特性,通常用浮选速率常数表示(简称 K 值)。为描述浮选过程中 K 值的大小及变化情况引入浮选速率常数平均值和平方差 SD 得^[5-6]:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i K_i}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i} \quad (1)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}{n}} \quad (2)$$

式(1)中,表示在整个浮选时间段内矿物 K 值的统计平均值; K_i 表示在第 i 个时间间隔内矿物的 K 值; ε_i 表示在第 i 个时间间隔矿物浮选回收率。式(2)中, SD 表示浮选过程矿物 K 值标准差。

由上述试验表明,添加调整剂会对两种矿物的浮选回收率及浮选速率产生一定的影响。综上所述可知,当碳酸钠、氯化钙、氯化镁的浓度均为 2.0 mmol/L 时两种矿物之间能产生有效地分离。表 2 是添加调整剂 2.0 mmol/L、浮选 5.0 min 内各个时段矿物的浮选速率常数。

由表 2 可知,在不同种类的调整剂下菱镁矿和白云石各个时段精矿的浮选速率(K 值)呈现总体

表 2 矿物浮选速率常数
Table 2 Flotation rate constants of minerals

调整剂	矿物	Time/min 序号	浮选速率常数 K/min^{-1}							平均值 \bar{K}	标准差 SD
			0.1	0.2	0.3	0.4	1.0	1.5	1.5		
碳酸钠	菱镁矿	1	5.81	0.93	0.69	0.82	0.60	0.62	0.55	3.02	2.39
	白云石	2	8.00	1.14	1.16	0.28	0.16	0.08	0.05	5.53	4.79
氯化钙	菱镁矿	1	1.43	0.36	0.41	0.22	0.14	0.14	0.17	0.48	0.43
	白云石	2	4.81	1.16	0.52	0.24	0.14	0.08	0.06	2.79	2.40
氯化镁	菱镁矿	1	1.55	0.65	0.45	0.32	0.25	0.17	0.15	0.55	0.46
	白云石	2	0.38	0.20	0.10	0.05	0.06	0.04	0.05	0.10	0.11

逐渐降低的趋势,两种矿物均在浮选初始 0.1 min 时, K 值最大,浮选速率最快。在碳酸钠做调整剂时,白云石平均浮选速率最高为 5.53 min^{-1} ,菱镁矿平均浮选速率为 3.02 min^{-1} ;氯化钙做调整剂时,菱镁矿上浮受到的抑制作用较大,平均浮选速率仅为

0.48 min^{-1} ,远小于白云石的平均浮选速率;氯化镁做调整剂时,菱镁矿的浮选速率为 0.55 min^{-1} ,大于白云石的 0.10 min^{-1} 。

图 5 和图 6 分别为添加调整剂为 2.0 mmol/L 时,矿物的累计回收率和浮选速率常数随浮选时间

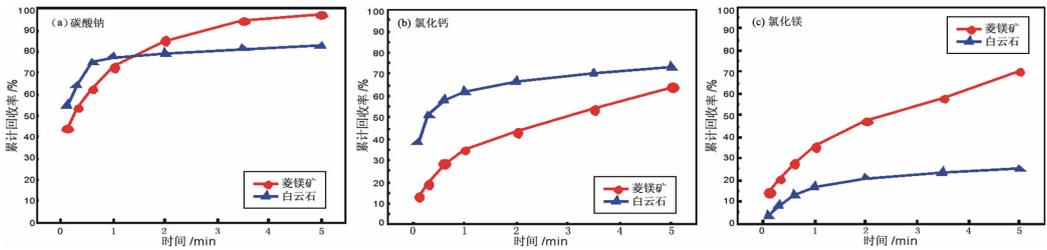


图 5 调整剂浓度 2.0 mmol/L 时矿物浮选回收率与时间关系曲线

Fig. 5 Relationship between recovery rate of mineral flotation and time under regulators concentration of 2.0 mmol/L

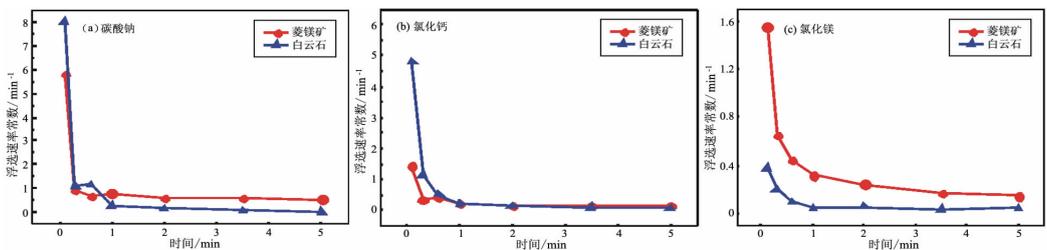


图 6 调整剂浓度 2.0 mmol/L 时矿物浮选速率常数与时间关系曲线

Fig. 6 Relationship between mineral flotation rate of mineral flotation and time under regulators concentration of 2.0 mmol/L

变化的曲线。

由图 5 和图 6 可知,在碳酸钠浓度为 2.0 mmol/L 时两种矿物的累计回收率相差较小,浮选 5.0 min 内两种矿物的浮选速率相近;在氯化钙为 2.0 mmol/L 时,菱镁矿的累计回收率最低为 64.15%,白云石累计回收率为 73.30%,白云石与菱镁矿的回收率差值为 9.15%,且浮选前期白云石的浮选速率大于菱镁矿,浮选后期菱镁矿和白云石的浮选速率相近;在氯化镁为 2.0 mmol/L 时,菱镁矿的浮选累计回收率为 70.50%,白云石的浮游性较差,回收率为 25.10%,菱镁矿与白云石的回收率差值为 45.40%,且浮选 5.0 min 内,菱镁矿的浮选速率均大于白云石。

综上可得,氯化镁浓度为 2.0 mmol/L 时,菱镁矿与白云石的浮游特性差异显著,在该条件下可以实现菱镁矿和白云石之间的浮选分离。

4 浮选动力学特性分析

4.1 浮选速度常数分布

本文根据积分复原法^[7-8]对两种矿石在添加氯化镁(2.0 mmol/L)时,浮选过程 K 值的分布情况进行了分析,得出图 7 所示的 K 值分布图。

由图 7 可知,菱镁矿 K 值分布在区间 0~0.25 min⁻¹的量较多,在 0.96~1.55 min⁻¹区间分布的量较少;白云石的 K 值分布在区间 0~0.19 min⁻¹的量较多,在其他区间分布的量较少。

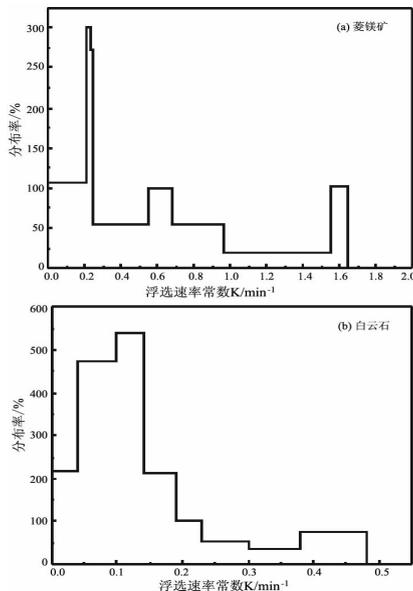


图 7 矿物浮选速率常数分布图

Fig. 7 Distribution diagram of mineral floatation rate constant

4.2 浮选动力学模型的建立

准确求解浮选模型参数,可为浮选过程的控制提供一定的理论指导^[9]。MATLAB^[10-12] 软件是 Math Works 公司开发的一款数学软件,主要非线性最小化、方程求解、曲线拟合和二次规划等大型课题的求解方法^[13-14]。本文选择传统经典一级模型、二级矩阵分布模型、分速浮选模型^[15-17]对两种矿物进行浮选动力学研究,应用 MATLAB 数学软件,建立两种矿物的浮选动力学模型,结果见表 3。

表 3 矿物浮选模型的建立

Table 3 Establishment of single mineral flotation model

模型代码	M1	M2	M3
模型名称	经典一级模型	二级矩形分布模型	分速浮选模型
菱镁矿	$\varepsilon = 66.36(1 - e^{-0.99t})$	$\varepsilon = 87.55 \left\{ 1 - \frac{\ln(1 + 2.245t)}{2.24t} \right\}$	$\varepsilon = 75.49 - [16.05e^{-12.39t} + 59.44e^{-0.47t}]$
白云石	$\varepsilon = 27.74(1 - e^{-0.40t})$	$\varepsilon = 45.15 \left\{ 1 - \frac{\ln(1 + 0.58t)}{0.58t} \right\}$	$\varepsilon = 47.78 - [3.55e^{-21.05t} + 44.23e^{-0.13t}]$

4.3 模型性能分析

为检测模型的模拟效果,将浮选累计回收率的模型计算值与试验值进行线性拟合,拟合结果如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可知,菱镁矿浮选累计回收率 M1、M2、M3 模型的计算值与试验值的拟合相关性分别为 0.962、0.981、0.999,模型拟合精度顺序为 M3 > M2 > M1;白云石浮选累计回收率 M1、M2、M3 模型计算值与试验值的拟合相关性分别为 0.974、

0.975、0.998,拟合精度顺序为 M3 > M2 > M1。综上可得,分速浮选模型对菱镁矿和白云石的浮选过程模拟效果较好。这也证明,在菱镁矿和白云石同种矿物浮选过程中,其浮游性并不是相同的,往往存在易浮矿物和难浮矿物,易浮矿物的浮游速度较快,在浮选过程的初期快速浮出,而难浮矿物的浮游速度较慢,在浮选过程的中后期逐步浮出。因此,可通过数据分析得出两种矿物上浮速度差异,通过控制浮选时间实现二者混合矿的分离。

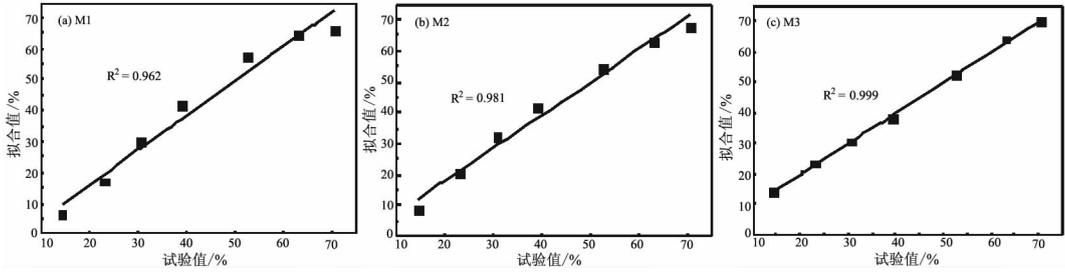


图 8 菱镁矿浮选回收率模型拟合值与试验值的分析

Fig. 8 Analysis of the fitting value and test value of the model of the accumulative recovery rate of magnesite flotation

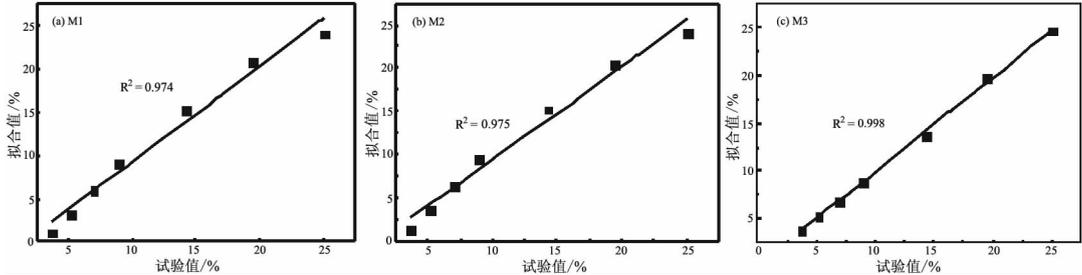


图 9 白云石浮选回收率模型拟合值与试验值的分析

Fig. 9 Analysis of the fitting value and test value of the model for the cumulative recovery of dolomite flotation

5 混合矿浮选试验

5.1 试验流程的确定

由单矿物分批刮泡浮选试验得出,添加氯化镁(2.0 mmol/L)做调整剂时,菱镁矿与白云石的浮游差最显著,可实现二者之间的浮选分离。

由图 5 可知,添加氯化镁(2.0 mmol/L)做调整剂时,浮选 5.0 min 内,菱镁矿的浮选累计回收率一直显著增加,白云石浮选前期累计回收率逐渐增大,在浮选 1.0 min 时累计回收率趋于平稳。由图 6 可知,添加氯化镁(2.0 mmol/L)做调整剂时,浮选 5.0 min 内,菱镁矿的浮选速率逐渐降低,白云石浮选前期浮选速率逐渐降低,在浮选 1.0 min 时浮选速率趋于平稳。综上可得,针对二元混合矿浮选试验,以浮选 1.0 min 为时间节点,进行粗选 1(1.0 min)、粗选 2(4.0 min)两次刮泡浮选,可达到菱镁矿和白云石之间的分离。

二元混合矿中,试验原矿 2.0 g,由单矿物按质量 1:1 配比均匀混合而成,针对粒级 - 74 + 38 μm 的菱镁矿和白云石,设定矿浆 pH 值为 12、油酸钠浓度为 0.25 mmol/L,并按图 10 所示试验流程及药剂制度进行浮选试验。

5.2 菱镁矿—白云石二元混合矿浮选试验结果与分析

添加氯化镁(2.0mmol/L)为调整剂时,菱镁矿

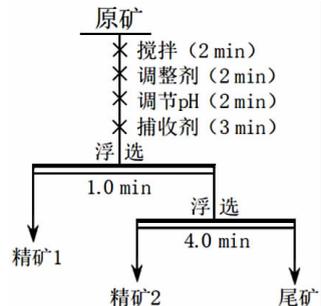


图 10 添加氯化镁为调整剂时二元混合矿浮选试验流程
Fig. 10 Flotation test process of binary - mixed ore when adding magnesium chloride as a regulator

—白云石二元混合矿的浮选试验结果如表 3 所示。

由表 4 可知,菱镁矿和白云石在浮选过程中的总浮选回收率分别为 66.60% 和 26.90%。在浮选精矿 1 过程中,菱镁矿和白云石的浮选回收率分别为 43.20% 和 12.90%,相差 30.30%。在浮选精矿 2 过程中,菱镁矿和白云石的浮选回收率分别为 23.40% 和 14.00%,相差 9.40%。其中,精矿 1、精

表 4 菱镁矿—白云石二元混合矿浮选试验结果
Table 4 Flotation test results of magnesite dolomite binary - mixed ore

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		CaO	MgO	菱镁矿	白云石
精矿 1	28.05	7.06	41.61	43.20	12.90
精矿 2	18.70	11.50	37.85	23.40	14.00
尾矿	54.25	21.26	29.54	33.40	73.10
原矿	100.00	15.17	33.58	100.00	100.00

矿2均以菱镁矿为主,白云石为辅。可见,在氯化镁的作用下通过控制浮选时间可以实现菱镁矿和白云石之间的浮选分离。

6 结论

(1)碳酸钠对两种矿物的回收率影响较小,一定浓度的碳酸钠对白云石的浮选速率有促进作用,而对菱镁矿的浮选速率则具有抑制效果;随着氯化钙浓度的增高,对菱镁矿和白云石上浮的抑制作用则逐渐增大,且对菱镁矿的抑制作用大于白云石;氯化镁对两种矿物的浮选速率均起到了抑制的作用,但对白云石的抑制作用更大。

(2)对比碳酸钠、氯化钙和氯化镁的最佳分离点的相关数据得出:在粒级 $-74+38\ \mu\text{m}$ 、矿浆 $\text{pH}=12$ 、捕收剂浓度为 $0.25\ \text{mmol/L}$ 的浮选条件下,添加氯化镁($2.0\ \text{mmol/L}$)为调整剂时,可实现菱镁矿与白云石之间的浮选分离。

(3)分速浮选模型对菱镁矿和白云石的浮选过程的模拟效果优于经典一级动力学模型及二级矩阵分布模型。菱镁矿和白云石的分速浮选模型浮选累计回收率的拟合值与试验值之间的相关性 R^2 分别为 0.999 和 0.998 。

(4)在菱镁矿-白云石二元混合矿浮选试验中,添加氯化镁($2.0\ \text{mmol/L}$)时,菱镁矿和白云石均起到抑制作用,且白云石的抑制作用较大。在氯化镁的作用下控制浮选时间可实现菱镁矿和白云石之间的浮选分离。

参考文献:

- [1] 印万忠,唐远,姚金,等. 矿物浮选过程中的交互影响[J]. 矿产保护与利用,2018(3):55-60.
- [2] 刘文刚,姚广铮,卢位,等. 十二胺体系中金属离子对菱镁矿和白云石浮选行为的影响[J]. 矿产保护与利用,2018(3):67-70,76.
- [3] Anastassakis G N. A study on the separation of magnesite fines by magnetic carrier methods[J]. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 1999, 149(1/2/3):585-593.
- [4] Botero A E C, Torem M L, Mesquita LMS, et al. Surface chemistry fundamentals of biosorption of rhodococcus opacus and its effect in calcite and magnesite flotation [J]. Minerals engineering, 2008, 21(1):83-92.
- [5] Asghar Azizi, Ahmad Hassanzadeh, Behnam Fadaei, et al. Investigating the first-order flotation kinetics models for sarcheshmeh copper sulfide ore[J]. International journal of mining science and technology, 2015, 25(5):849-854.
- [6] Cilek E C. Estimation of flotation kinetic parameters by considering interactions of the operating variables[J]. Minerals engineering, 2004, 17(1):81-85.
- [7] 陈子鸣,吴多才. 浮选动力学研究之一——矿物浮选速率模型[J]. 有色金属(冶炼部分),1978(10):27-34.
- [8] 陈子鸣. 浮选动力学研究之二——浮选速率常数分布密度函数的复原[J]. 有色金属(冶炼部分),1978(11):29-35.
- [9] Paula Moraga, Jorge Cano, Rebecca F. Baggaley, et al. Modelling the distribution and transmission intensity of lymphatic filariasis in sub-saharan Africa prior to scaling up interventions: integrated use of geostatistical and mathematical modelling[J]. Parasites & vectors, 2015, 8(1):149-160.
- [10] Tiago Priolli Monteiro, Antonio Carlos Canale. Development of a direct-dynamic model for a passenger vehicle on MATLAB simulink[J]. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2017, 39(2):385-400.
- [11] Yeimy Morales, Gabriel Bosque, Josep Vehí, et al. PFA toolbox: a MATLAB tool for metabolic flux analysis [J]. BMC systems biology, 2016, 10(1):1145-1164.
- [12] Sripriya R, Rao P V T, Choudhury B R, et al. Optimization of operating variables of fine coal flotation using a combination of modified flotation parameters and statistical techniques [J]. International journal of mineral processing, 2003, 64(1/2/3/4):109-127.
- [13] 李俊旺,孙传尧. 基于 EXCEL 和 MATLAB 求解浮选动力学模型的研究[J]. 矿冶,2011,20(4):1-2.
- [14] Xiaodong Zhang, Huiping Lu, Bo Li, et al. Structure design and optimization of deep cavity rollers of rotary steering spindle system[J]. Journal of failure analysis and prevention, 2016, 16(5):783-789.
- [15] Mehdi Rahimi, Fahimeh Dehghani, Bahram Rezai, et al. Influence of the roughness and shape of quartz particles on their flotation kinetics[J]. International journal of minerals metallurgy and materials. 2012, 13(4):783-789.
- [16] 尹蒂,李松仁. 选矿数学模型[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1993.
- [17] 李俊旺. 会泽铅锌硫化矿浮选过程分流分速的动力学研究[D]. 沈阳:东北大学,2012:86-90.

引用格式:孙浩然,印万忠,唐远,等. 菱镁矿及其主要伴生矿物白云石的浮选动力学研究[J]. 矿产保护与利用,2019,39(1):10-16.

SUN Haoran, YIN Wanzhong, TANG Yuan, et al. Flotation kinetics of magnesite and its associated minerals dolomite[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(1):10-16.