

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2020.10.014

# 碳酸根和硫酸根对蛇纹石和黄铜矿矿浆流变性和浮选的影响

胡家城<sup>1</sup>, 石 晴<sup>1,2</sup>, 荀骆冰<sup>1</sup>, 罗青云<sup>1</sup>

(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;  
2. 战略含钙矿物资源清洁高效利用湖南省重点实验室, 长沙 410083)

**摘 要:**从矿浆流变学的角度出发,通过对矿浆流变性测量及矿物浮选试验,考察在不同碳酸根和硫酸根浓度下矿浆流变性与矿物浮选速率的变化规律。结果表明:碳酸根和硫酸根随浓度的增加都能显著降低矿浆表观黏度和屈服应力值,对矿物颗粒起分散作用。碳酸根和硫酸根的加入对黄铜矿和蛇纹石的浮选回收均有一定的促进作用,但主要是通过加快黄铜矿的浮选速率,降低精矿中MgO的含量,从而达到相对抑制蛇纹石的效果。蛇纹石浮选速率与矿浆黏度间呈一定的负相关关系。

**关键词:**蛇纹石;碳酸根;硫酸根;流变性;浮选

**中图分类号:**TD923;TD97 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-1744(2020)10-0088-07

## Effects of Carbonate and Sulfate on Rheology and Flotation of Serpentine and Chalcopyrite Slurry

HU Jiacheng<sup>1</sup>, SHI Qing<sup>1,2</sup>, XUN Luobing<sup>1</sup>, LUO Qingyun<sup>1</sup>

(1. School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. Key Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium-containing Mineral Resources, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** From the perspective of pulp rheology, the trends of pulp rheology and mineral flotation rate in different carbonate and sulfate concentrations are investigated by measuring the rheology and related flotation tests. The results show that carbonate and sulfate can significantly reduce the apparent viscosity and yield stress of the pulp with the increase of concentration, and have a dispersing effect on the mineral particles. At the same time, the addition of carbonate and sulfate can promote the flotation recovery of chalcopyrite and serpentine. However, it mainly achieves the effect of relatively suppressing serpentine by accelerating the flotation rate of chalcopyrite and reducing the MgO content in the concentrate. There is a negative correlation between serpentine flotation rate and pulp viscosity.

**Key words:** serpentine; carbonate anion; sulfate anion; rheology; flotation

收稿日期: 2020-03-24

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019zzts994); 战略含钙矿物资源清洁高效利用湖南省重点实验室项目(2018TP1002)

Fund: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University(2019zzts994); Key Laboratory of Hunan Province for Clean and Efficient Utilization of Strategic Calcium-containing Mineral Resources(2018TP1002)

作者简介: 胡家城(1995—), 男, 在读硕士, 主要从事矿物加工研究。

通信作者: 石 晴(1986—), 男, 教授, 博士, 主要从事矿物加工研究。

引用格式: 胡家城, 石 晴, 荀骆冰, 等. 碳酸根和硫酸根对蛇纹石和黄铜矿矿浆流变性和浮选的影响[J]. 有色金属工程, 2020, 10(10): 88-94.

HU Jiacheng, SHI Qing, XUN Luobing, et al. Effects of Carbonate and Sulfate on Rheology and Flotation of Serpentine and Chalcopyrite Slurry[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(10): 88-94.

在浮选过程中,以蛇纹石为主的脉石矿物,因硬度低、易泥化及表面电性高等原因易与硫化矿产生异相凝聚,这不仅影响硫化矿的可浮性,降低精矿品位<sup>[1-2]</sup>,同时也容易导致药剂选择性下降、矿浆流变性变复杂(矿浆黏度高、泡沫夹杂现象严重)等问题<sup>[3]</sup>。

流变学是研究物质流动与形变的科学,通过研究流体在不同条件下应力、应变与黏度之间的联系,揭示流体内部颗粒间的相互作用及浆体的微观结构特性<sup>[4]</sup>。矿浆流变学的应用目前已经涉及到典型硫化矿<sup>[5]</sup>、氧化矿<sup>[6]</sup>、黏土矿物<sup>[7]</sup>和煤泥<sup>[8]</sup>等各方面。通过对矿浆流变性的测量,可探究矿浆流变性对气泡碰撞、颗粒悬浮、药剂作用及异相凝聚等浮选行为的影响。

矿浆中矿物溶解、药剂添加和水质影响等方式都能产生各种难免离子,如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  等,这些难免离子的存在对矿浆流变性和矿物浮选均能产生较大的影响。虽然难免离子对蛇纹石的影

响已进行过大量的研究,但大部分文献<sup>[9-11]</sup>报道的是金属阳离子对蛇纹石可浮性和矿浆流变性的影响,对于溶液中阴离子的影响却鲜有报道。因此,本文以蛇纹石为研究对象,研究  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  对矿浆流变性和蛇纹石浮选的影响。

## 1 试验

### 1.1 矿物样品与试剂

黄铜矿经手工除杂后用陶瓷球磨罐制备成  $-74\ \mu\text{m}$  的样品,蛇纹石纯矿物经振动磨磨至  $-0.15\ \text{mm}$  后用气流磨制备成  $-10\ \mu\text{m}$  的样品,其粒度分析见表 1。化学分析及 X 射线衍射分析均表明蛇纹石和黄铜矿矿样纯度均在 95% 以上,结果见表 2 及图 1。试验所用碳酸钠( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )、硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )、盐酸(HCl)和氢氧化钠(NaOH)均为分析纯,戊基黄原酸钾(PAX)和甲基异丁基甲醇(MIBC)为化学纯,试验用水为去离子水。

表 1 蛇纹石和黄铜矿粒径分析

| Table 1 Analysis of serpentine and chalcopyrite particle sizes |          |          |          |                  | /μm |
|----------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|------------------|-----|
| Size                                                           | $D_{10}$ | $D_{50}$ | $D_{90}$ | Average diameter |     |
| Serpentine                                                     | 2.08     | 4.23     | 9.12     | 5.07             |     |
| Chalcopyrite                                                   | 7.68     | 51.94    | 118.94   | 58.31            |     |

表 2 蛇纹石化学元素分析

| Table 2 Key elements of the serpentine |       |          |       |      |       |       |       | /%     |
|----------------------------------------|-------|----------|-------|------|-------|-------|-------|--------|
| Elements                               | Cu    | Total Fe | S     | Ca   | Si    | Mg    | O     | Others |
| Serpentine                             |       | 0.65     |       | 0.10 | 22.52 | 22.96 | 39.77 | 14.00  |
| Chalcopyrite                           | 33.88 | 29.45    | 36.67 |      |       |       |       |        |

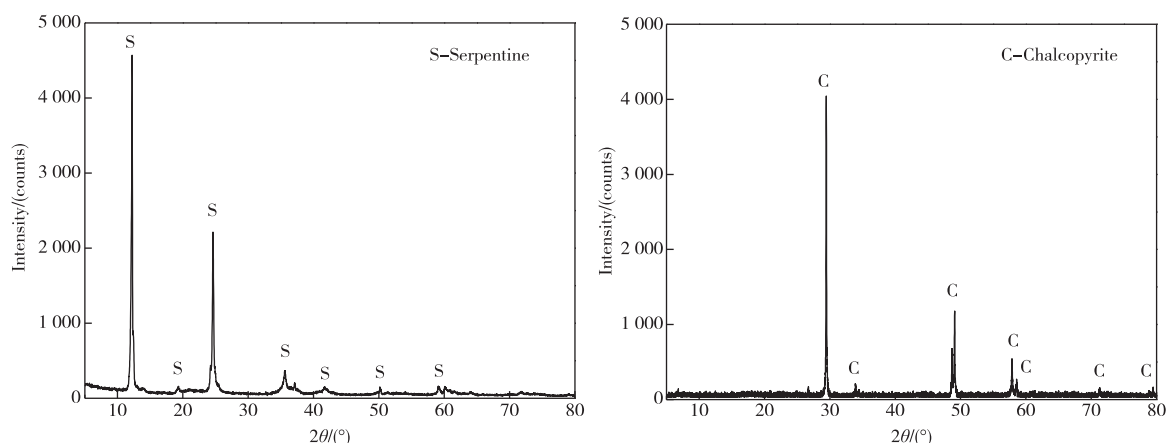


图 1 蛇纹石和黄铜矿 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of serpentine and chalcopyrite samples

## 1.2 流变性测试

流变性测试采用 Anton Paar MCR102 型(奥地利安东帕(中国)有限公司)旋转流变仪进行测定。具体步骤如下:根据浓度需求将矿样倒入 40 mL 样品杯中,依次加入碳酸钠或硫酸钠溶液和去离子水,保持总体积为 40 mL。用 HCl 或 NaOH 调节矿浆 pH 值使其维持在 10 左右,随后把样品杯放入旋转流变仪中进行矿浆流变性测试。测量时,剪切速率控制在  $0.01 \sim 400 \text{ s}^{-1}$ ,测量时间为 15 min。选用常规剪切速率的平均值  $100 \text{ s}^{-1}$  为特征点比较黏度相对值,屈服应力值则通过对剪切速率-剪切应力曲线进行 Herschel-Bulkley 模型拟合后得到。

## 1.3 浮选试验

浮选试验采用 40 mL XFGCII 型挂槽式浮选机。每次试验矿物用量根据浮选浓度确定(被氧化的黄铜矿先用去离子水超声 20 min,倒出上层清液将下层样品移入浮选槽中),浮选机转速为 1 992 r/min,加入浮选药剂并搅拌 3 min,调节矿浆 pH 值至 10 后,进行充气并手工刮泡,浮选时间每 0.5、1、2、3 和 5 min 时收集一次精矿,浮选总时长为 5 min,对所有样品烘干称重。试验结果需进行非线性拟合分析,找出最佳浮选动力学模型,确定最终参数指标。试验全程使用去离子水。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳酸根和硫酸根对单矿物矿浆流变性的影响

图 2(a)和图 2(b)分别为  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度对蛇纹石矿浆表观黏度和屈服应力的影响。由图 2 可知,随着  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度从 0 增至  $10 \text{ mmol/L}$ ,矿浆表观黏度由  $85.24 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  分别降至  $54.81$  和  $62.37 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,屈服应力从  $4.98 \text{ Pa}$  分别降至  $2.24$  和  $2.85 \text{ Pa}$ 。离子浓度为 0 时,矿浆具有一定的表观黏度和屈服应力值,且都远大于水溶液体系(表观黏度  $8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,屈服应力  $0 \text{ Pa}$ ),说明单矿物体系下蛇纹石颗粒间因相互凝聚增强了矿浆流变性。而随着离子浓度的升高, $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  通过与蛇纹石表面  $\text{OH}^-$  发生离子交换从而化学吸附在蛇纹石表面降低表面电位,导致颗粒间电斥力的增强,降低矿浆黏度和屈服应力<sup>[12-13]</sup>。表观黏度表示的是矿浆在一定剪切作用下颗粒间的内摩擦程度,表观黏度越低说明矿浆中蛇纹石颗粒间的相互作用越弱,矿浆越不“黏”。屈服应力值越小,意味着在矿浆中因蛇

纹石颗粒间相互作用所形成的网络状结构的强度越小,蛇纹石颗粒逐渐分散。

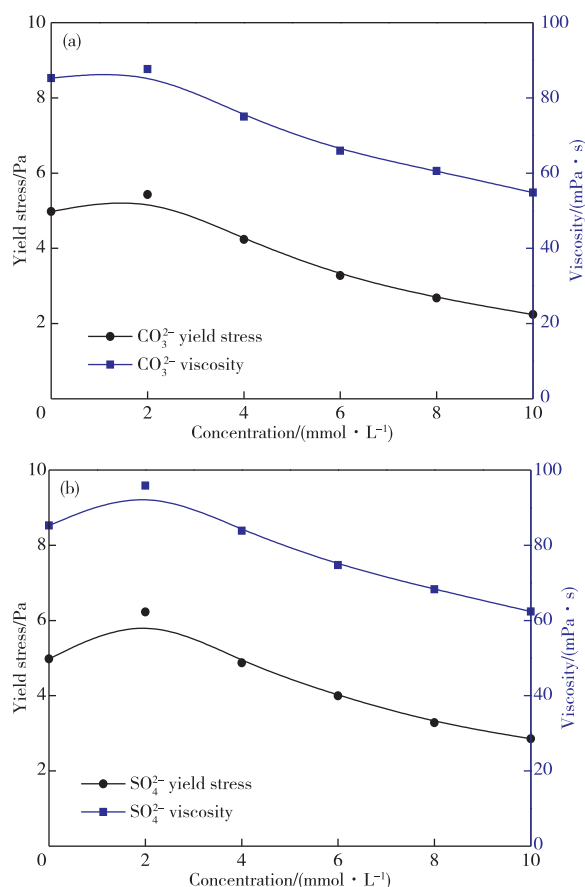


图2 离子浓度对蛇纹石矿浆流变性的影响

Fig. 2 Effects of different ions concentrations on rheological properties of serpentine pulp (Concentration; 30%, pH=10)

### 2.2 碳酸根和硫酸根对单矿物浮选行为的影响

在自然 pH=10 的条件下,以 PAX 为捕收剂, MIBC 为起泡剂,对不同离子浓度下的蛇纹石进行浮选速率试验,试验结果如图 3 所示。图 3(a)和图 3(b)分别为  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度对蛇纹石浮选速率和回收率的影响。从图 3 可以看出,随浮选时间和离子浓度含量的增加蛇纹石浮选累计回收率和浮选速率都增加,即离子对蛇纹石的浮选回收具有一定的促进作用<sup>[14-15]</sup>。蛇纹石作为一种亲水的脉石矿物,在浮选作业中通常以泡沫夹带的方式上浮进入精矿。因此在足量起泡剂的条件下,随浮选时间的增加蛇纹石累计上浮量也相应增大,二者呈正相关关系<sup>[16]</sup>。如在碱性条件下添加一定量的阴离子,阴离子可通过影响起泡剂起泡性显著降

低液相表面张力,改变泡沫量和泡沫稳定性,影响气泡的兼并、气泡直径和含水量,从而增大微细粒蛇纹石的浮选回收率<sup>[17]</sup>,二者间具有很强的正相关性。

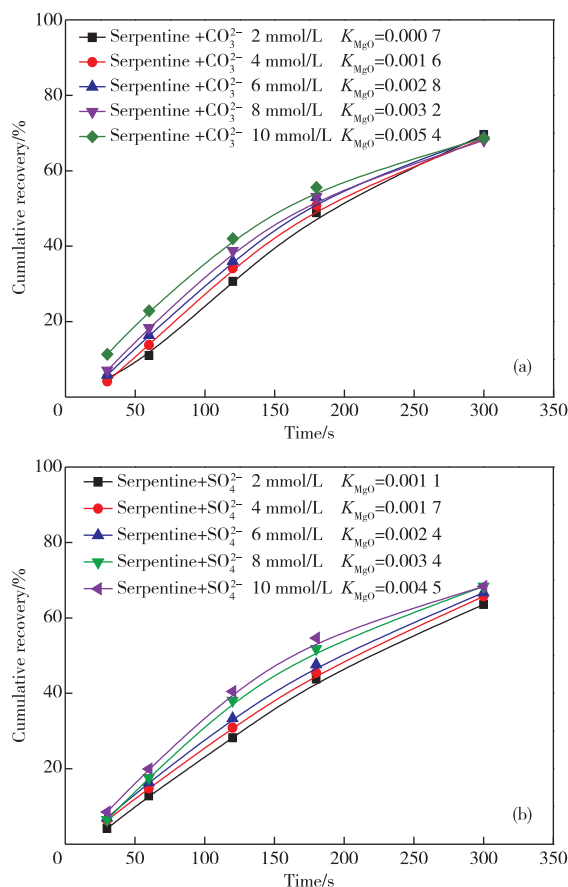


图 3 离子浓度对蛇纹石浮选行为的影响

Fig. 3 Effect of different carbonate ion concentration on serpentine flotation behavior ( $C_{(\text{PAX})} : 10^{-4} \text{ mol/L}$   
 $C_{(\text{MIBC})} : 30 \text{ mg/L}$ )

### 2.3 蛇纹石矿浆流变性与浮选速率的关系

图 4 为不同阴离子浓度下蛇纹石浮选速率随矿浆表观黏度变化关系曲线。由图 4 所示,在阴离子存在条件下,矿浆表观黏度与浮选速率间均呈负相关关系,即随着黏度的降低,蛇纹石浮选速率上升。在相同表观黏度条件下, $\text{SO}_4^{2-}$ 存在下的蛇纹石浮选速率值大于 $\text{CO}_3^{2-}$ 。即当蛇纹石颗粒间分散程度相同时, $\text{SO}_4^{2-}$ 比 $\text{CO}_3^{2-}$ 更能提高蛇纹石浮选速率。图中两种阴离子浓度下的变化关系曲线均可由 Logistic 函数拟合,其中 $\text{CO}_3^{2-}$ 浓度下对应的表达式为:

$$Y = -5.27 \times 10^{-5} + \frac{2.51}{1 + \left(\frac{X}{11.44}\right)^{3.92}}$$

$\text{SO}_4^{2-}$ 浓度下对应的表达式为:

$$Y = -5.82 \times 10^{-4} + \frac{0.01}{1 + \left(\frac{X}{57.45}\right)^{5.66}}$$

拟合曲线拟合度系数均大于 0.9,即拟合的曲线较符合实际曲线变化规律。

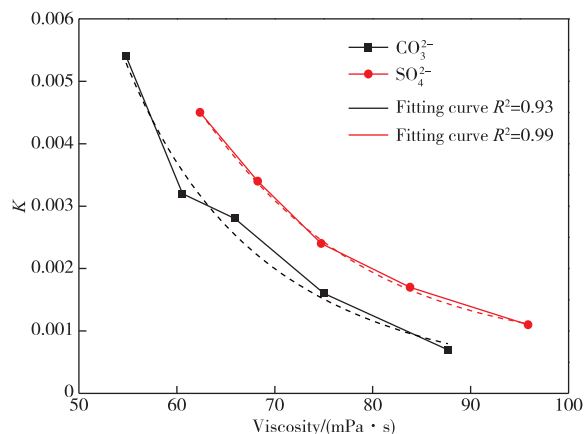


图 4 矿浆黏度与蛇纹石浮选速率的关系

Fig. 4 Relationship between pulp viscosity and serpentine flotation rate

### 2.4 碳酸根和硫酸根对混合矿浆流变性的影响

图 5 为混合矿体系下矿浆表观黏度和屈服应力随 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度的变化图。由图 5 可知,随着 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度由 0 升高至 10 mmol/L,混合矿浆表观黏度和屈服应力分别从 64.46 mPa·s 和 4.35 Pa 逐渐降低到 34.82 mPa·s、1.88 Pa 和 35.93 mPa·s、1.96 Pa。对比蛇纹石单矿物矿浆流变指标(表观黏度 85.24 mPa·s 和屈服应力值 4.98 Pa)后发现:在浓度为 30% 的蛇纹石矿浆中进一步加入 5% 的黄铜矿显著降低了矿浆的表观黏度和屈服应力,即黄铜矿对蛇纹石矿浆的流变特性具有一定的削弱作用,这主要是黄铜矿粒度分布及平均粒径远大于蛇纹石导致的。而 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 对混合矿浆表观黏度和屈服应力也有明显的降低,且随浓度的升高降低的程度越大。其中相同浓度下 $\text{CO}_3^{2-}$ 比 $\text{SO}_4^{2-}$ 对混合矿浆的分散程度更高,这与两种阴离子在蛇纹石单矿物矿浆的分散趋势相一致。

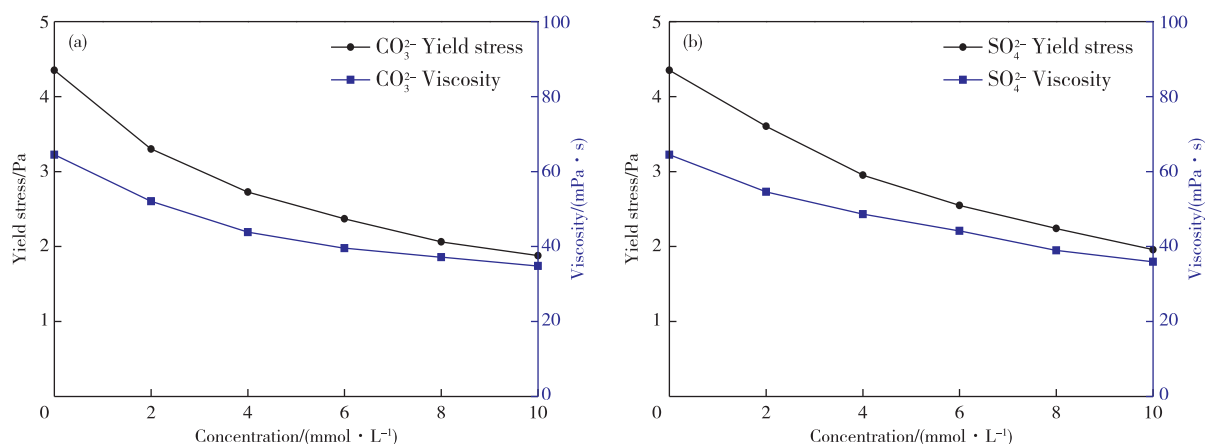


图 5 离子浓度对混合矿浆流变性的影响

Fig. 5 Effects of different ions concentrations on rheological properties of mixture pulp (Serpentine concentration: 30%, chalcopyrite concentration: 5%, pH: 9.7~10.2)

## 2.5 碳酸根和硫酸根对混合矿浮选行为的影响

同理,以 PAX 为捕收剂、MIBC 为起泡剂,对不同浓度 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 下的混合矿进行浮选速率试验,试验结果见图 6 和图 7。图 6 为离子浓度和浮选时间对蛇纹石和黄铜矿累计浮选回收率的影响,图 7 则是不同浮选时间和离子浓度条件下精矿中

MgO 含量的变化。由图 6 可知,随着 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度增大,黄铜矿和蛇纹石累计回收率和浮选速率都呈上升趋势。但从图 7 可以看出,随着离子浓度的增加,浮选精矿中 MgO 含量均逐渐下降,说明黄铜矿浮选速率快于蛇纹石浮选速率,导致精矿中蛇纹石含量降低。

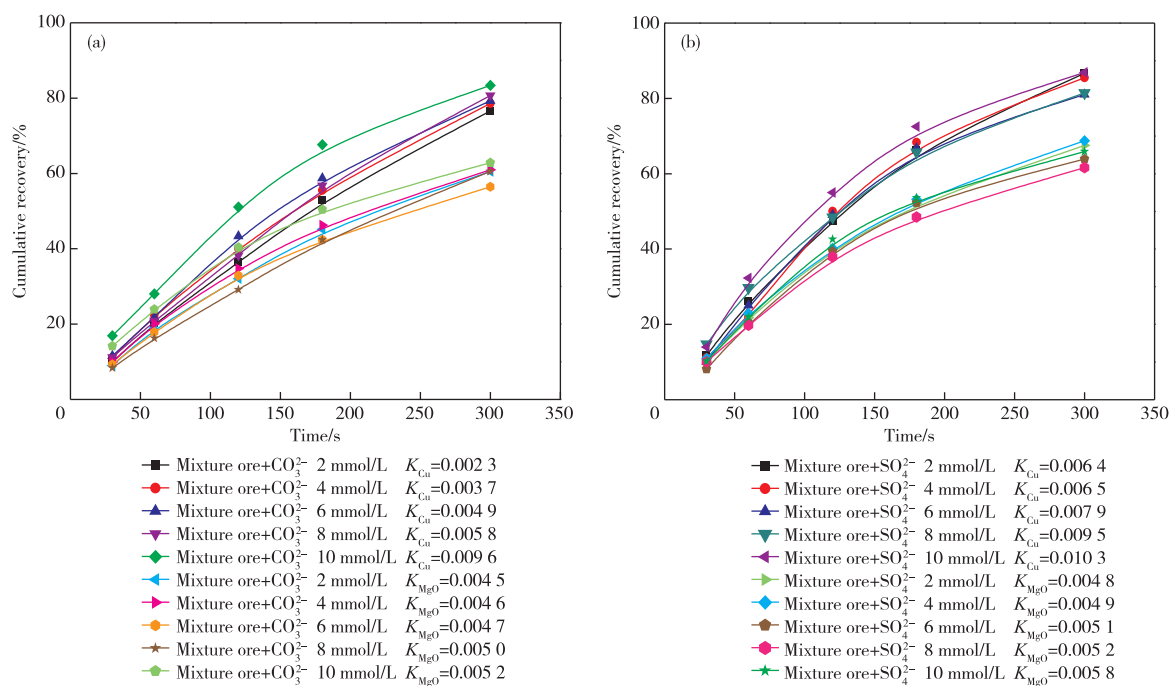


图 6 离子浓度对混合矿浮选行为的影响

Fig. 6 Effect of different carbonate ion concentration on mixture flotation behavior ( $C_{PAX}: 10^{-4}$  mol/L,  $C_{MIBC}: 30$  mg/L)

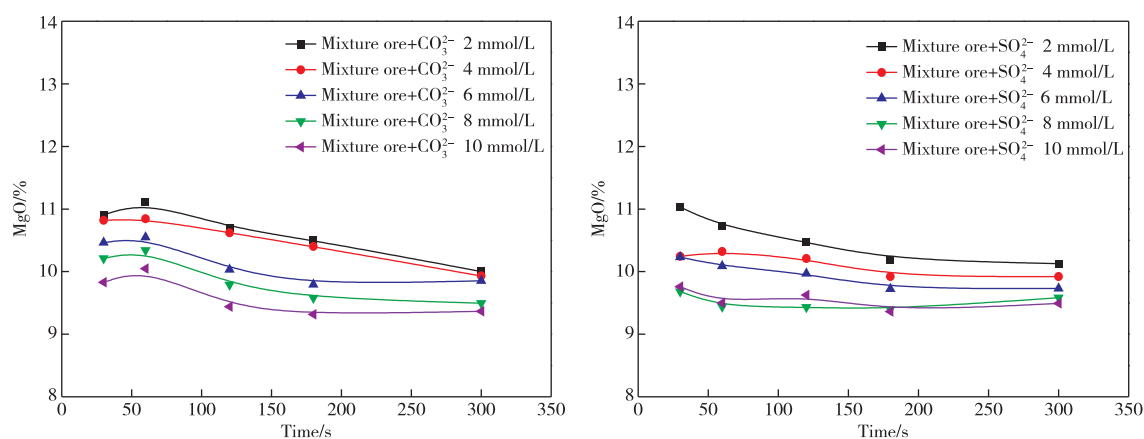


图 7 不同离子浓度下精矿 MgO 含量随时间变化曲线

Fig. 7 Varieties of MgO content in concentrate with time in different ion concentrations ( $C_{\text{PAX}}: 10^{-4} \text{ mol/L}$ ,  $C_{\text{MIBC}}: 30 \text{ mg/L}$ )

在碱性浮选矿浆中,蛇纹石与黄铜矿因表面电性差异及范德华引力的影响易产生“异相凝聚”,导致蛇纹石吸附在黄铜矿表面,并随黄铜矿一同进入精矿。由前一节单矿物试验可知, $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 不仅能通过化学吸附方式作用在蛇纹石表面使颗粒相互分散,促进黄铜矿的浮选回收,也能通过影响起泡剂的起泡性能略微增强对蛇纹石浮选回收(图 3)。另外黄铜矿在矿浆中溶解的 $\text{Cu}^{2+}$ 对蛇纹石的上浮也有一定的促进作用<sup>[11]</sup>。因此,在整个浮选过程中,黄铜矿和蛇纹石的回收率都随离子浓度的增加而增大。

## 2.6 混合矿浆流变性与蛇纹石浮选速率的关系

图 8 为不同阴离子浓度下蛇纹石浮选速率随混合矿浆表观黏度变化关系。由图 8 可知,在 $\text{CO}_3^{2-}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 存在条件下,蛇纹石矿浆表观黏度与浮选速率间均呈负相关关系,即随着黏度的降低,蛇纹石浮选速率上升。在相同表观黏度条件下, $\text{SO}_4^{2-}$ 存在下的蛇纹石浮选速率值大于 $\text{CO}_3^{2-}$ 。即当混合矿浆中颗

粒间的分散程度相同时, $\text{CO}_3^{2-}$ 比 $\text{SO}_4^{2-}$ 有更低的蛇纹石浮选速率和更高的黄铜矿浮选速率,该变化趋势与单矿物相一致。图中两种阴离子浓度下的变化关系曲线均可由 Logistic 函数拟合,其中 $\text{CO}_3^{2-}$ 浓度下对应的表达式为:  $Y = 0.004 + \frac{0.001}{1 + (\frac{X}{38.18})^{8.8}}$ ,

$\text{SO}_4^{2-}$ 浓度下对应的表达式为:  $Y = 0.005 + \frac{1.90}{1 + (\frac{X}{18.47})^{11.98}}$ 。拟合曲线拟合度系数均大于 0.9,即拟合的曲线较符合实际曲线变化规律。

## 3 结论

通过研究矿浆中碳酸根和硫酸根对蛇纹石矿浆流变性和浮选行为的影响,发现碳酸根和硫酸根作用下矿浆黏度与蛇纹石浮选速率间呈明显的负相关关系,即随离子浓度的增加,矿浆黏度和屈服应力显著降低。其中碳酸根比硫酸根更能有效分散矿物颗粒,降低精矿中 MgO 含量,更有利于黄铜矿的浮选回收。

## 参考文献:

- [1] 张明强. 蛇纹石与黄铁矿异相分散的调控机理研究[D]. 长沙:中南大学,2010:6-8.  
ZHANG Mingqiang. Regulation and control mechanism study on the heterogeneous dispersion of serpentine and pyrite [D]. Changsha: Central South University, 2010:6-8.
- [2] 陈文亮,方夕辉,张帅,等. 某低品位难选铜镍硫化矿高效降镁与铜镍分离[J]. 有色金属工程,2014,4(6): 48-52.  
CHEN Wenliang, FANG Xihui, ZHANG Shuai, et al.

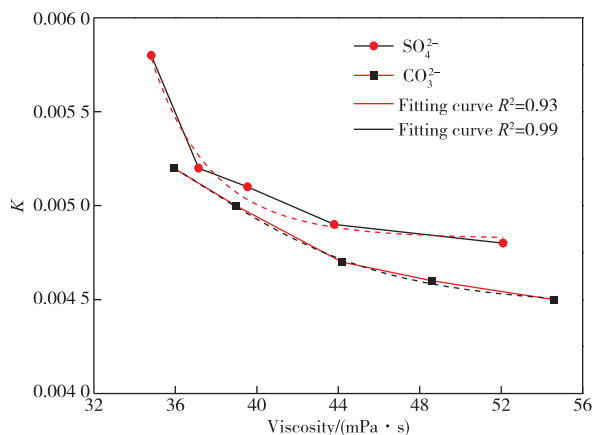


图 8 混合矿浆黏度与蛇纹石浮选速率的关系

Fig. 8 Relationship between viscosity and serpentine flotation rate

- Efficient magnesium reduction and separation of copper and nickel from a low-grade difficult-to-select copper-nickel sulfide ore[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2014, 4(6): 48-52.
- [3] 陈伟. 微细粒白钨矿浮选过程中矿浆流变性的影响及其调控[D]. 长沙: 中南大学, 2018: 8-9.  
CHEN Wei. Study on the effects and controlling of pulp rheology in the flotation process of fine scheelite[D]. Changsha: Central South University, 2018: 8-9.
- [4] 高雅温. 铜镍硫化矿浮选体系矿浆流变性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2019: 6-7.  
GAO Yawen. The rheological study on the flotation system of copper nickel sulfide[D]. Changsha: Central South University, 2019: 6-7.
- [5] MUSTER T H, PRESTIDGE C A. Rheological investigations of sulphide mineral slurries[J]. *Minerals Engineering*, 1995, 8(12): 1541-1555.
- [6] ZHOU Z W, PETER J S, DAVID V B. Chemical and physical control of the rheology of concentrated metal oxide suspensions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(9): 2901-2920.
- [7] RICHMOND W R, JONES R L, FAWELL P D. The relationship between particle aggregation and rheology in mixed silica-titania suspensions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 1998, 71(1): 67-75.
- [8] BOYLU F, DINÇER H, ATEŞOK G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water slurries[J]. *Fuel Processing Technology*, 2004, 85(4): 241-250.
- [9] NESTOR C, PENG Y J, ELAINE W. Interactions of clay minerals in copper-gold flotation, Part 2: Influence of some calcium bearing gangue minerals on the rheological behavior [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 141: 51-60.
- [10] 刘诚, 冯其明, 石晴, 等. 氯化钠在蛇纹石/黄铁矿浮选体系中的分散机理[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(8): 1715-1719.  
LIU Cheng, FENG Qiming, SHI Qing, et al. Dispersion mechanism on flotation system of serpentine and pyrite in presence of sodium chloride[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(8): 1715-1719.
- [11] 曹钊, 张亚辉, 孙传尧, 等. 铜镍硫化矿浮选中  $\text{Cu}(\text{II})$  和  $\text{Ni}(\text{II})$  离子对蛇纹石的活化机理[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(2): 506-510.  
CAO Zhao, ZHANG Yahui, SUN Chuanyao, et al. Activation mechanism of serpentine by  $\text{Cu}(\text{II})$  and  $\text{Ni}(\text{II})$  ions in copper-nickel sulfide ore flotation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(2): 506-510.
- [12] 孙传尧, 印万忠. 硅酸盐矿物浮选原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 283-285.  
SUN Chuanyao, YIN Wanzhong. Flotation principle of silicate minerals [M]. Beijing: China Science Publishing, 2001: 283-285.
- [13] 冯博, 卢毅屏, 翁存建. 碳酸根对蛇纹石/黄铁矿浮选体系的分散作用机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(4): 1085-1091.  
FENG Bo, LU Yiping, WENG Cunjian. Dispersion mechanism of carbonate on flotation system of serpentine and pyrite [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(4): 1085-1091.
- [14] 赵礼兵, 袁致涛, 韩跃新. 乙黄药体系中分散剂对利蛇纹石可浮性的影响[J]. *金属矿山*, 2011(7): 101-105.  
ZHAO Libing, YUAN Zhitao, HAN Yuexin. Influence of the dispersants to the flotation properties of lizardite in the system of ethyl xanthate [J]. *Metal mine*, 2011(7): 101-105.
- [15] 赵礼兵, 袁致涛, 韩跃新. 乙基黄药体系下分散剂对叶蛇纹石浮选特性影响研究[J]. *中国矿业*, 2011, 20(7): 81-85.  
ZHAO Libing, YUAN Zhitao, HAN Yuexin. Effect of dispersants on floatability of antigorite in ethyl xanthate solution[J]. *China Mining Magazine*, 2011, 20(7): 81-85.
- [16] 卢毅屏, 龙涛, 冯其明, 等. 微细粒蛇纹石的可浮性及其机理[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(8): 1493-1497.  
LU Yiping, LONG Tao, FENG Qiming, et al. Flotation and its mechanism of fine serpentine [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(8): 1493-1497.
- [17] 成朋飞, 孙伟, 胡岳华, 等. 起泡剂对细颗粒蛇纹石浮选的影响及其机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(2): 261-266.  
CHENG Pengfei, SUN Wei, HU Yuehua, et al. Effect and mechanism of frothers on flotation of fine serpentine [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(2): 261-266.