

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2023.05.010

热活化过硫酸盐法去除独居石浮选精矿中有机药剂的试验

吕荣平¹, 支梅峰¹, 姜子奕², 袁作成³, 朱亮亮⁴, 余文⁴

(1. 中核资源发展有限公司, 北京 101100;

2. 湖南中核金原新材料有限责任公司, 湖南 衡阳 421010;

3. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;

4. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:针对独居石浮选矿中残留的油酸钠和椰子油脂脂肪酸二乙醇酰胺对后续的选别和湿法冶炼作业产生不良影响的问题,提出采用热活化过硫酸盐法去除独居石浮选矿中的有机药剂。系统研究了矿浆温度、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量、反应时间、矿浆 pH 值、搅拌速度对脱药效果的影响,结果表明提高矿浆温度、延长反应时间、增加 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量均有利于脱药;矿浆 pH 值和搅拌速度对脱药效果的影响较小,在 pH 值为 3~11、搅拌速度为 200~600 r/min 条件下,均可有效去除精矿中的有机药剂;矿浆浓度过高不利于脱药。确定最佳工艺参数为:反应温度为 90 °C、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为 8 kg/t、搅拌速度为 500 r/min、矿浆浓度为 33.33%、反应时间为 60 min,脱药反应后矿浆的 TOC 值可降低至 1 mg/L 以下,脱药后的独居石浮选精矿几乎没有起泡能力,脱药后的废水可以重复利用。

关键词:独居石;有机药剂;热活化;过硫酸盐;脱药

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2023)05-0068-07

Study on the Thermal Activation of Persulfate to Remove Organic Agents from Monazite Flotation Concentrates

LYU Rongping¹, ZHI Meifeng¹, JIANG Ziyi², YUAN Zuocheng³, ZHU Liangliang⁴, YU Wen⁴

(1. China Nuclear Resources Development Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. Hunan CNNC Jinyuan New Materials Co., Ltd., Hengyang 421010, China;

3. School of Architectural and Surveying and Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

4. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In view of the problem that the residual sodium oleate and coconut oil fatty acid diethanolamide in the monazite concentrate by flotation have adverse effects on the subsequent sorting and hydrometallurgy operations, a

收稿日期:2023-02-03

基金项目:江西省主要学科学术技术带头人培养计划项目(20212BCJL23051);江西省重点研发计划项目(20203BBGL73232);江西理工大学清江优秀青年人才计划项目(JXUSTQJYX2018006)

Fund: Supported by the Training Program for Academic and Technical Leaders of Major Disciplines in Jiangxi Province, China(20212BCJL23051); Key research and development program of Jiangxi Province, China(20203BBGL73232); and Program for Excellent Young Talents, Jiangxi University of Science and Technology, China(JXUSTQJYX2018006)

作者简介:吕荣平(1982—),男,硕士,高级工程师,主要从事构造地质及矿物加工方面的研究。

通信作者:袁作成(1998—),男,硕士研究生,主要从事废水处理研究。

引用格式:吕荣平,支梅峰,姜子奕,等.热活化过硫酸去除独居石浮选精矿中有机药剂的试验[J].有色金属工程,2023,13(5):68-74.

LYU Rongping, ZHI Meifeng, JIANG Ziyi, et al. Study on the Thermal Activation of Persulfate to Remove Organic Agents from Monazite Flotation Concentrates[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(5): 68-74.

thermal activation persulfate method is proposed to remove the organic reagents from the monazite. The effects of pulp temperature, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ dosage, reaction time, pulp pH, and stirring speed on removing of reagents were systematically studied. The results show that increasing the pulp temperature, prolonging the reaction time, and increasing the dosage of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ are all beneficial to the reagent removal. The pH of the pulp and the stirring speed have little effect on the reaction. When the pH value is 3—11, the stirring speed is 200—600 r/min, the organic chemicals in the concentrate can be effectively removed. If the slurry concentration is too high, it is not conducive to reagent removal. The optimal process parameters are determined as follows: the reaction temperature is 90 °C, the dosage of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ is 8 kg/t, the stirring speed is 500 r/min, the pulp concentration is 33.33%, and the reaction time is 60 min. After the reaction, the TOC value of the pulp can be reduced to less than 1 mg/L, and the resulting monazite ore has almost no foaming ability, and the wastewater can be reused.

Key words: monazite; organic agent; thermal activation; persulfate; reagent removal

独居石是重要的稀土矿物,也是最早被开发利用的稀土矿物。独居石矿床以砂矿为主,按照形成特征又可分为海滨砂矿、坡积砂矿、风化壳砂矿、冲击砂矿四大类,其中以海滨砂矿最为重要、经济价值最大^[1]。目前回收海滨砂矿中独居石的主要工艺为浮选、重选、磁选、电选的联合流程。通常以浮选或重选作为粗选工艺,粗精矿干燥后再通过磁选和电选,获得合格的独居石精矿。独居石浮选捕收剂主要是油酸钠和羟肟酸类捕收剂^[2-3]。为获得好的浮选指标,油酸钠的用量较大(2~5 kg/t),而且还可能加起泡剂。大量的有机药剂吸附在独居石精矿表面,对后续作业造成诸多不利影响,如残留在独居石表面的有机药剂导致独居石颗粒结团,不仅会增加干燥难度,而且会恶化后续的磁选和电选效果。即使获得了合格的独居石精矿,在冶炼过程中也会面临很多问题,如在碱浸和酸浸过程中都将产生大量泡沫,严重影响生产过程。因此,必须去除独居石浮选精矿中的有机药剂。有些企业采用碱水洗涤法去除独居石浮选精矿的药剂,即在独居石矿浆中加入纯碱并长时间搅拌,使有机药剂溶解在水中,然后过滤脱药,重复4~5次。该法存在作业时间长、脱药不彻底、成本高、废水量大等问题。因此,急需开发新工艺高效去除独居石浮选精矿的有机药剂。

目前对浮选精矿脱药的研究主要集中在硫化矿混合精矿脱药,为后续的浮选分离创造条件,常用的方法有擦洗脱药^[4-5]、硫化钠脱药^[6]、活性炭解吸脱药^[7]。对最终浮选精矿特别是氧化矿浮选精矿的脱药研究很少,孙瑞等^[8]采用过氧化氢氧化工艺脱除钛铁矿表面的油酸钠,对独居石浮选精矿的脱药方法则尚未见报道。

活化过硫酸盐法是一种近年来发展起来的处理难降解有机污染物的新型技术,通过热活化、过渡金

属活化和紫外活化等手段使过硫酸盐分解产生高活性的硫酸根自由基($\text{SO}_4 \cdot -$), $\text{SO}_4 \cdot -$ 可高效氧化分解废水中的偶氮染料、抗生素、农药、浮选药剂等多种有机污染物^[9-11]。本文提出采用热活化过硫酸盐法去除独居石浮选精矿中的有机药剂,从而消除精矿中有机药剂对后续作业的影响。

1 原料与方法

1.1 试验材料

独居石精矿取自湖南某稀土冶炼厂,该矿样源自海滨砂矿,选矿工艺为浮选—磁选—电选联合流程。浮选捕收剂为油酸钠和羟肟酸,起泡剂为椰子油脂肪酸二乙醇酰胺(6501)。采用该原料进行湿法冶炼时,在磨矿、碱浸、酸浸、过滤等各个阶段均产生严重的起泡行为,严重影响正常生产。

对独居石精矿进行X射线衍射分析(Uitima IV,日本株式会社理学公司),结果如图1所示。从图1中可以看出独居石精矿中除了独居石,未发现其他矿物,说明该精矿的纯度很高。

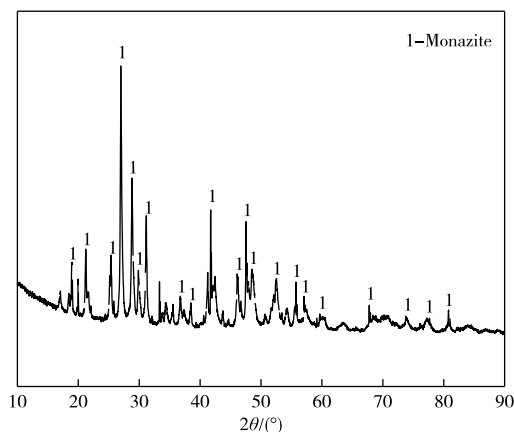


图1 独居石精矿的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of monazite concentrates

1.2 降解试验方法

取 100 g 独居石精矿加入 500 mL 的烧杯中,加热水和 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{NaOH}$ 调整设定的矿浆浓度和 pH 值,然后放入水浴锅中进行机械搅拌,用锡纸包裹烧杯口减少水汽蒸发,同时根据烧杯中水位的变化情况,在反应过程中适当补充清水至原始水位。待水浴锅温度达到设定温度后,加入 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 进行脱药反应,反应一定时间后取上清液过滤后进行总有机碳(TOC)分析(Multi N/C 3100,德国耶拿分析仪器股份公司)。因无法直接精确测试独居石中的有机物含量,所以以脱药后矿浆中的 TOC 值作为评价脱药效果的主要指标,同时根据脱药前后独居石颗粒的聚团情况和矿浆的起泡性能进行验证。

矿浆的起泡性能测试在单槽浮选机(XFD IV-1.5L,吉林省探矿机械厂)中进行,将独居石浮选矿脱药前后的矿浆加入浮选槽中观察起泡性能,矿浆浓度为 33.33%,浮选机转子转速为 1 992 r/min。

2 结果与讨论

矿浆温度、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量、脱药时间、矿浆 pH 值、搅拌速度等是影响热活化过硫酸盐法脱药效果的重要因素,同时这些因素也将影响生产成本。

因此开展条件试验,确定热活化过硫酸盐去除独居石浮选精矿中有机药剂的最佳的工艺参数。

2.1 矿浆温度对脱药效果的影响

在矿浆浓度为 33.33%、搅拌速度为 500 r/min、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为 8 kg/t(相对于独居石重量)、脱药时间为 60 min、矿浆初始 pH 值为 7.3(未调整)的条件下,考察矿浆温度对脱药效果的影响,结果如图 2、3 所示。

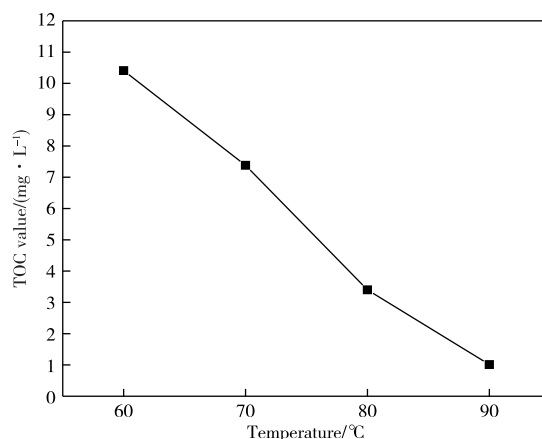


图 2 矿浆温度对脱药后矿浆 TOC 的影响

Fig. 2 Effects of pulp temperature on TOC of slurry after removing agent

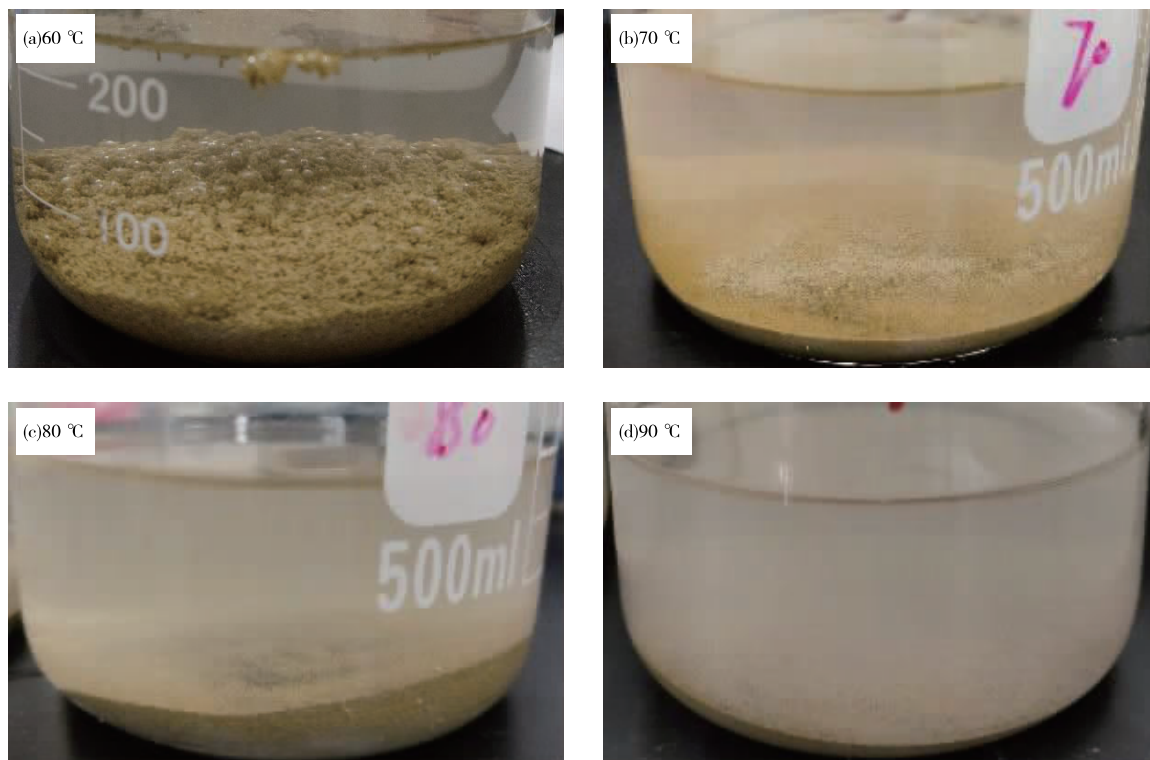


图 3 不同矿浆温度脱药后的照片

Fig. 3 Photos of pulp at different temperatures after removing agent

由图2可知,随着温度的上升,脱药后矿浆的TOC值不断下降。当矿浆温度从60℃增加到90℃时,矿浆的TOC值从10.41 mg/L降低到1.01 mg/L。从图3中独居石颗粒的聚团情况也可以看出,当矿浆温度为60℃时,独居石颗粒存在严重的聚团现象,说明矿物颗粒表面还吸附着较多的有机药剂;当溶液温度升高到70℃时,独居石颗粒聚团现象明显缓解,但表层还存在少量团聚颗粒;当矿浆温度升高到80℃和90℃时,独居石颗粒聚团现象消失,说明吸附在矿物颗粒表面的有机药剂大部分被去除。升高温度既有利于过硫酸盐分解产生活性自由基,也有利于有机药剂的溶解,从而加快降解过程^[12]。

2.2 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量对脱药效果的影响

在矿浆浓度为33.33%、搅拌速度为500 r/min、脱药时间为60 min、矿浆温度分别为70、80和90℃的条件下,研究了 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量对脱药效果的影响,结果如图4所示。

由图4可知,70、80、90℃矿浆的初始TOC值分别为20.47、21.58、22.58 mg/L,这是因为提高温度有利于有机药剂溶解。反应后矿浆的TOC值随着 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量的增加而下降,当 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量由0增加到10 kg/t时,70、80、90℃矿浆的TOC值分别降低至6.63、0.76和0.65 mg/L。相同 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量下,高温下的脱药效果均要优于低温。增加 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 的投加量,可以产生更多的活性自由基,从而有利于有机药剂的降解。当矿浆温度为90℃时, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为8 kg/t和10 kg/t时脱药效果差别不大。综合考虑脱药效果、加温和药剂成本,确定最佳的矿浆温度为90℃、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为8 kg/t。

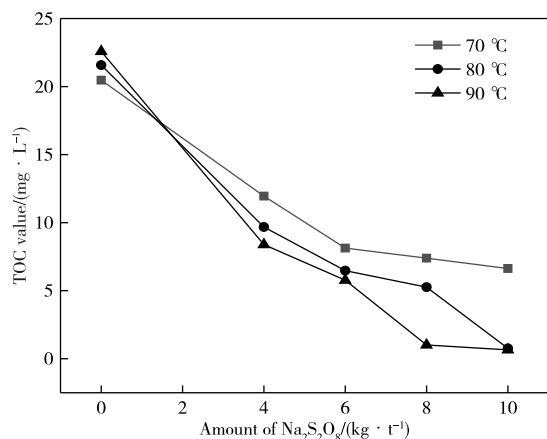


图4 不同温度下 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量对脱药后矿浆TOC的影响

Fig. 4 Effects of dosage of $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ on TOC of slurry after removing agent at different temperatures

2.3 脱药时间对脱药效果的影响

在矿浆浓度为33.33%、搅拌速度为500 r/min、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为8 kg/t、反应温度为90℃条件下,考察脱药时间对脱药效果的影响,结果见图5所示。

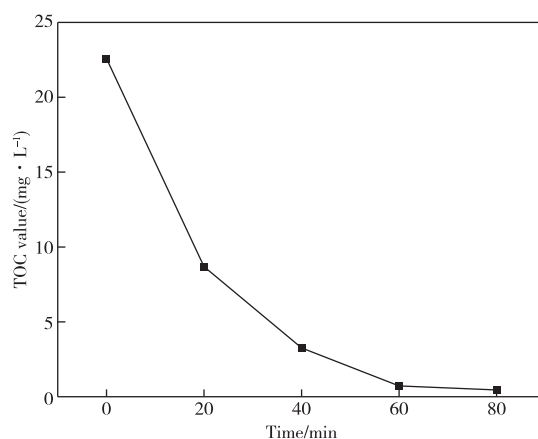


图5 脱药时间对脱药后矿浆TOC的影响

Fig. 5 Effects of agent removal time on TOC of slurry after removing agent

由图5可知,随着脱药时间的增加,反应后矿浆的TOC值不断下降。当反应时间由20 min增加到60 min时,反应后矿浆的TOC值从8.69 mg/L降至0.72 mg/L,继续延长时间TOC值变化不大,因此确定最佳反应时间为60 min。

2.4 矿浆初始pH值对脱药效果的影响

在矿浆浓度为33.33%、搅拌速度为500 r/min、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为8 kg/t、温度为90℃、脱药时间为60 min条件下,考察矿浆初始pH值对脱药效果的影响,结果如图6所示。

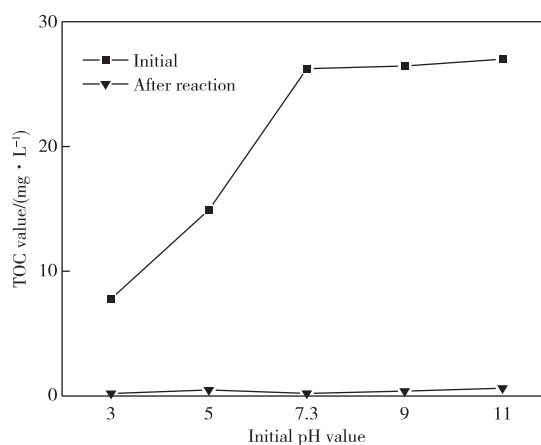


图6 矿浆初始pH值对脱药后矿浆TOC的影响

Fig. 6 Effects of initial pH value of pulp on TOC of pulp after removing agent

由图6可知,提高矿浆初始pH值导致矿浆初始TOC增加,这是因为油酸钠在碱性条件下的水

溶性要大于在酸性条件下^[13]。但矿浆初始 pH 值对脱药效果影响较小,当矿浆初始 pH 值分别为 3.0、5.0、7.3、9.0、11.0 时,反应后的矿浆的 TOC 值分别为 0.20、0.48、0.21、0.39、0.63 mg/L,且均未出现独居石颗粒聚团的现象,由此说明该工艺对矿浆 pH 值的适应能力很强,在很宽的 pH 值范围内均可有效降解精矿中的有机药剂。

2.5 矿浆浓度对脱药效果的影响

在搅拌速度为 500 r/min、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为 8 kg/t、温度为 90 °C、脱药时间为 60 min 条件下,考察矿浆浓度对脱药效果的影响,结果如图 7 所示。

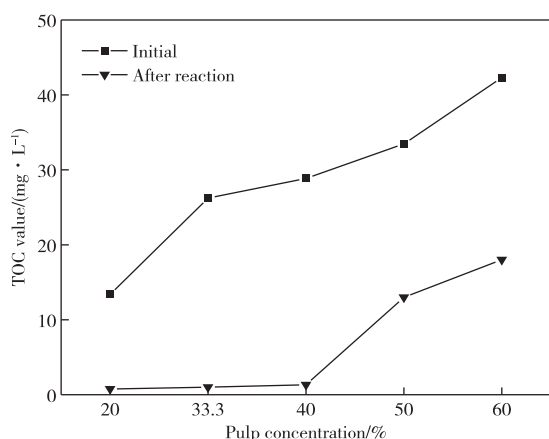


图 7 矿浆浓度对脱药后矿浆 TOC 的影响

Fig. 7 Effects of slurry concentration on TOC of slurry after removing agent

由图 7 可知,矿浆浓度对脱药效果有较大影响。当矿浆浓度由 20.0% 增加到 40.0% 时,脱药后矿浆的 TOC 值从 0.77 mg/L 增至 1.33 mg/L,变化不大;但是当矿浆浓度继续增加至 50.0% 和 60.0% 时,反应后的矿浆的 TOC 值分别急剧增加至 12.99 mg/L 和 18.01 mg/L。这是因为提高矿浆浓度导致溶液中的有机药剂浓度增加,有机药剂浓度过高时不利于脱药反应的进行。但是即使矿浆浓度在 50.0% 和 60.0% 时,反应后独居石颗粒也没有出现团聚现象,这说明吸附在独居石表面的有机药剂大部分解析了,但溶解的有机药剂没有被完全降解,导致 TOC 值较高。

2.6 搅拌速度对脱药效果的影响

在矿浆浓度为 33.33%、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为 8 kg/t、温度为 90 °C、脱药时间为 60 min 条件下,考察搅拌速度对脱药效果的影响,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,当搅拌速度由 200 r/min 增加到 600 r/min 时,脱药后的矿浆的 TOC 值从均在 1.00 mg/L 以下,且独居石颗粒均未团聚,说明在此

范围内搅拌速度对脱药反应的影响很小,热活化过硫酸盐均可有效去除精矿中的有机药剂。

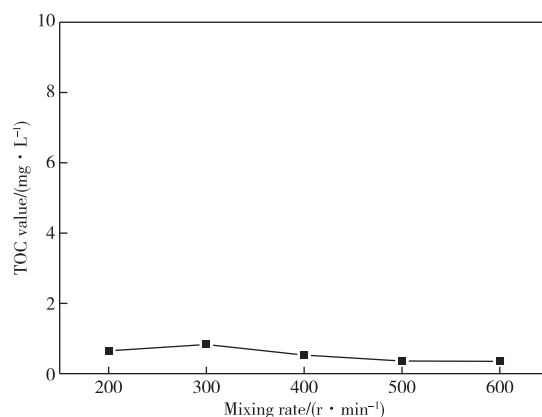


图 8 搅拌速度对脱药后矿浆 TOC 的影响

Fig. 8 Effects of stirring speed on TOC of slurry after removing agent

考虑到成本因素原因,确定最佳工艺参数为:温度为 90 °C、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为 8 kg/t、搅拌速度为 500 r/min、矿浆浓度为 33.33%、脱药时间为 60 min。

2.7 废水重复利用

为了节约用水,将最佳工艺条件下反应后的废水倒出,然后往里面重新加入 100 g 独居石浮选矿,并加入 8 kg/t 的 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$,其他条件不变,重复 8 次,结果如图 9 所示。

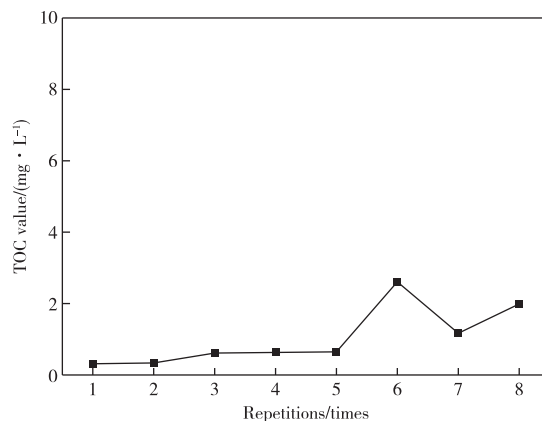


图 9 废水重复不同次数后的 TOC 值

Fig. 9 TOC of wastewater after different times of repetition

从图 9 中可以看出,废水重复利用 5 次后,对反应结果影响很小,反应后矿浆 TOC 均低于 1 mg/L,重复利用 6~8 次后,脱药后矿浆 TOC 略有上升,但也低于 3 mg/L,且独居石颗粒均未出现团聚。由此说明,脱药后的废水可以进行重复利用。

2.8 独居石脱药效果验证

脱药前独居石矿浆和最佳工艺下脱药后得到独居石矿浆的起泡性能如图 10 所示。



图 10 脱药前后独居石浮选矿在浮选机中的起泡性能
Fig. 10 Foaming performance of monazite in the flotation machine before and after removing agent

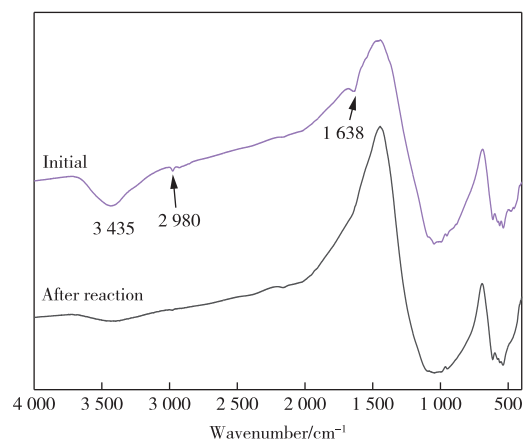
从图 10 中可以看出,原矿起泡性能很强,充气阀门打开一半,即产生大量带矿泡沫;而脱药后的独居石几乎没有起泡性,充气阀门完全打开时,也只会产生少量水泡,而且迅速破裂。由此说明,热活化过硫酸盐法可以有效消除独居石浮选矿的起泡能力。

2.9 傅里叶红外光谱和紫外-可见光光谱分析

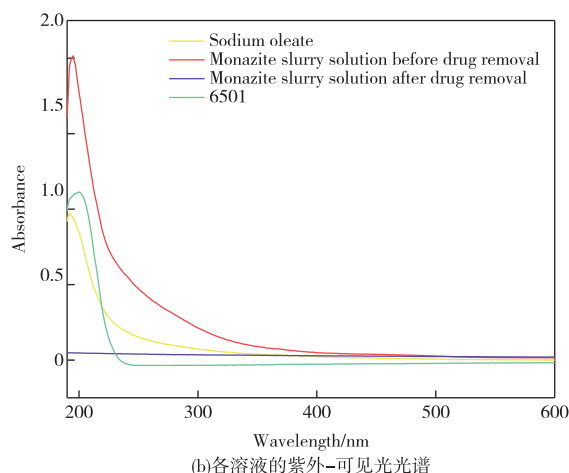
为查明热活化过硫酸盐法脱除独居石中浮选药剂的作用机理,对脱药前后的独居石进行傅里叶红外光谱分析,并对脱药前后的独居石矿浆溶液、油酸钠溶液和 6501 溶液进行紫外-可见光光谱分析,结果如图 11 所示。

由图 11(a)可知,在脱药前独居石的光谱中,除了独居石自身的特征吸收峰外,在 2980 、 1638 cm^{-1} 处出现特征吸收峰, 2980 cm^{-1} 可能为甲基和亚甲基中—CH 键的对称伸缩振动吸收峰,而 1638 cm^{-1} 处可能为羧基—COO—中 C=O 伸缩振动峰^[14]。在脱药后独居石光谱中,这些特征吸收峰消失,说明独居石表面的有机药剂被有效去除。由图 11(b)可知,油酸钠和 6501 的最大吸收峰分别在 192 nm 和 200 nm ,而脱药前的独居石矿浆溶液的最大吸收峰在 195 nm ,这可能是由两种药剂的叠加作用引起的。脱药反应后的溶液中未发现任何特性吸收峰,再结合 TOC 小于 1 的结果,说明溶液中的有机药剂都被彻底分解

了。吸附在独居石表面的油酸钠和 6501 在高温溶液中进行脱附进入液相,然后被高活性的 $\text{SO}_4 \cdot$ 氧化为小分子,最后降解为 CO_2 和 H_2O ,随着溶液中有机物不断被降解,吸附在独居石表面的药剂不断脱附,最后完全被降解。



(a)脱药前后的独居石精矿的红外光谱



(b)各溶液的紫外-可见光光谱

图 11 傅里叶红外光谱和紫外-可见光光谱分析结果

Fig. 11 Analysis results Fourier infrared spectroscopy and UV-visible spectrum

3 结论

1) 独居石浮选矿中的有机药剂为油酸钠和 6501,两者皆有良好的起泡性和稳定性,是导致独居石浮选矿起泡的原因。

2) 热活化过硫酸盐可有效降解独居石浮选精矿中的有机药剂。提高矿浆温度、延长脱药时间、增加 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量均有利于降解独居石浮选精矿中的有机药剂。矿浆 pH 值和搅拌速度对反应的影响较小,在 pH 值为 3~11,搅拌速度为 $200\sim600\text{ r/min}$ 条件下,均可有效去除精矿中的有机药剂。矿浆浓度过高不利于脱药。

3) 考虑到成本因素原因,确定最佳工艺参数为:温度为 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 投加量为 8 kg/t 、搅拌速度

为 500 r/min、矿浆浓度为 33.33%、脱药时间为 60 min。脱药后的独居石浮选矿几乎不起泡。

4) 脱药后的废水可以重复利用,重复利用 8 次后脱药效果依旧很好。

5) 吸附在独居石表面的油酸钠和 6501 在高温溶液中脱附进入液相,然后被高活性的 $\text{SO}_4 \cdot$ 一氧化为小分子,最后降解为 CO_2 和 H_2O 。

参考文献:

- [1] KUMARI A, PANDA R, JHA M K, et al. Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: a review[J]. Minerals Engineering, 2015, 79: 102-115.
- [2] 刘明宝, 裴丹, 李航, 等. 蓖麻油酸钠协同体系中独居石的浮选行为及机制研究[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(5): 696-705.
LIU Mingbao, PEI Dan, LI Hang, et al. Flotation characteristics and mechanisms of monazite in synergistic systems containing sodium ricinoleate[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2020, 38(5): 696-705.
- [3] 吴旭, 张艳清, 曹钊. 复合捕收剂与组合抑制剂对微细粒独居石与萤石浮选分离的作用机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(3): 1-7.
WU Xu, ZHANG Yanqing, CAO Zhao. Study on mechanism of composite collectors and combined inhibitors in flotation separation experiments of micro-fine monazite and fluorite [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(3): 1-7.
- [4] 梁溢强, 毛明发, 宋涛, 等. 新型抑制剂在某铅锌硫混合精矿浮选分离中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 109-115.
LIANG Yiqiang, MAO Mingfa, SONG Tao, et al. Application of a new depressant in the flotation separation of a lead-zinc-sulfur bulk concentrate[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(5): 109-115.
- [5] 周厚文, 解钊, 刘明实, 等. 低品位铜钼精矿三级流动性脱药铜钼分离试验研究[J]. 甘肃冶金, 2021, 43(5): 5-9.
ZHOU Houwen, XIE Zhao, LIU Mingshi, et al. Study on separation of copper molybdenum from low grade copper molybdenum concentrate with three-stage liquidity[J]. Gansu Metallurgy, 2021, 43(5): 5-9.
- [6] 高钦, 葛英勇, 刘顺兵, 等. 铜铅锌多金属混合精矿浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(3): 72-74.
GAO Qin, GE Yingyong, LIU Shunbing, et al. Flotation separation of copper-lead-zinc polymetallic bulk concentrate [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(3): 72-74.
- [7] 管晓颖, 宋永胜, 李文娟, 等. 铜钼混合精矿残余药剂测量及脱药试验研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(7): 810-815.
- GUAN Xiaoying, SONG Yongsheng, LI Wenjuan, et al. Quantitative measurement and removal of residual reagent in Cu-Mo bulk concentrate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(7): 810-815.
- [8] 孙瑞, 谢海云, 吴继宗, 等. 钛铁矿表面油酸钠的氧化脱除试验研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(10): 73-79.
SUN Rui, XIE Haiyun, WU Zizong, et al. Study on oxidative removal for sodium oleate on the surface of ilmenite [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(10): 73-79.
- [9] GAO C Q, YU W, ZHU Y C, et al. Preparation of porous silicate supported micro-nano zero-valent iron from copper slag and used as persulfate activator for removing organic contaminants[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142131. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.142131.
- [10] 张磊, 祝思频, 张青青, 等. 微波活化对过硫酸盐降解典型选矿药剂苯胺黑药的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(6): 88-95.
ZHANG Lei, ZHU Sipin, ZHANG Qingqing, et al. Effect of microwave activation on degradation of aniline aerofloat by persulfate[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(6): 88-95.
- [11] 张磊, 祝思频, 袁熙, 等. 微波活化过硫酸盐降解典型选矿药剂丁基黄药的研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(11): 93-100.
ZHANG Lei, ZHU Sipin, YUAN Xi, et al. Study on the degradation of butyl xanthate by microwave activated persulfate[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(11): 93-100.
- [12] ARVANITI O S, IOANNIDI A A, MANTZAVINOS D, et al. Heat-activated persulfate for the degradation of micropollutants in water: a comprehensive review and future perspectives[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 318: 115568. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115568.
- [13] 刘明宝. 水杨羟肟酸在独居石矿物表面的吸附特性研究[J]. 有色金属工程, 2017, 7(2): 53-58.
LIU Mingbao. Adsorption prosperities of salicylhydroxamic acid on the monazite surface[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(2): 53-58.
- [14] 孟庆有, 袁致涛, 马龙秋, 等. 油酸钠与微细粒黑钨矿的作用机理[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 599-603.
MENG Qingyou, YUAN Zhitao, MA Longqiu, et al. Interaction mechanism of sodium oleate with fine wolframite [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(4): 599-603.

(编辑 汪东芳)