

非洲某锂辉石矿分选工艺

余利红^{1,2}, 高玉德², 张国范¹, 孟庆波², 吴迪², 李双棵²

(1. 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410000; 2. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510000)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的论文。非洲某伟晶岩锂矿中有用矿物以锂辉石为主, 原矿 Li_2O 含量为 0.87%, 属低品位锂矿, 开发利用相对困难。本研究通过详细的浮选实验, 采用“一粗二扫三精”的浮选工艺, 获得了产率为 10.15% 的锂辉石精矿, 含 Li_2O 6.03%, 锂回收率 70.14%。磁选除杂实验结果表明, 锂浮选精矿经 0.2 T 磁选可获得化工级-1 锂辉石精矿产品, 经 0.6 T 磁选可获得陶瓷级锂辉石精矿产品, 实现了该低品位锂矿的高质化利用。

关键词: 矿物加工工程; 锂辉石; 低品位; 浮选; 陶瓷级

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.05.005

中图分类号: TD955 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 05-0027-05

锂在 20 世纪初期开始商业化生产之后, 被广泛应用于电池、陶瓷、玻璃、润滑剂、制冷液、核工业和光电等行业领域, 是国防科技及民用工业发展的战略性资源^[1-3]。目前, 伟晶岩型锂矿和盐湖卤水型锂矿是锂资源主要的来源, 卤水中锂资源储量丰富但开发利用相对困难, 因此从赋存于伟晶岩型锂矿中的锂辉石等矿物中提取锂仍然是获取锂原料的重要途径^[4-5]。然而, 由于近年来对锂辉石矿的大量开发, 高品位易分选锂辉石矿已经越来越少, 目前可开发利用的锂辉石矿大多品位低, 含泥量高, 赋存状态复杂。因此, 对低品位难选锂辉石分选技术的研究对国民经济的发展尤为重要^[6-8]。

非洲某伟晶岩型锂辉石矿储量丰富, 开采容易, 具有较高的开发利用价值。但是原矿 Li_2O 品位仅有 0.87%, 属于低品位锂辉石矿, 同时原矿中含有绿泥石等泥质矿物, 矿物分选难度大。为了能够更好地实现该锂矿资源的综合利用, 本文采用组合捕收剂在不脱泥的情况下对其展开了选矿实验研究。

1 矿石性质

对原矿进行多元素分析, 结果见表 1。结果显示, 该矿样具有回收价值的金属元素主要为锂, 含量为 0.87%, 其次是锡和铌, 但是含量均很低未达到综合回收标准, 因此该矿石属于低品位含锂矿石。

表 1 原矿多元素分析结果/%

Table 1 Multi-elements analysis results of the ore sample

Li_2O	Sn	Ta_2O_5	Nb_2O_5	Na_2O	K_2O	Rb_2O	Cs_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	Fe	CaO
0.87	0.041	0.002	0.004	3.32	3.05	0.091	0.021	0.071	14.1	70.31	0.48	0.058

采用 MLA 矿物自动定量检测系统对原矿的矿物组成及含量进行测定, 结果见表 2。原矿中锂矿物以锂辉石为主, 同时含有少量锂云母及微量的磷锂锰矿, 锂辉石中的锂约占原矿中锂含量的 86.09%。脉石矿物以石英和钠长石为主, 其次为

钾长石和白云母。锂辉石是分选工艺回收的主要矿物, 理论含 Li_2O 量 8.03% 左右, 混有少量的钠和铁。通过扫描电镜观察可以发现锂辉石颗粒较粗, 呈板状或不规则状, 与白云母、钾长石、石英等脉石矿物连生, 见图 1。

收稿日期: 2022-02-23

作者简介: 余利红 (1996-), 男, 硕士研究生。研究方向为矿物加工工程。

表 2 原矿中主要矿物及含量 %
Table 2 Mineral composition and contents in the ore sample

锂辉石	锂云母	石英	长石	云母	绿柱石	高岭石	绿泥石	黑电气石	磁黄铁矿	褐铁矿	磷灰石	其他	合计
9.40	0.76	35.93	45.05	7.18	0.17	0.33	0.13	0.18	0.11	0.14	0.11	0.49	100.00

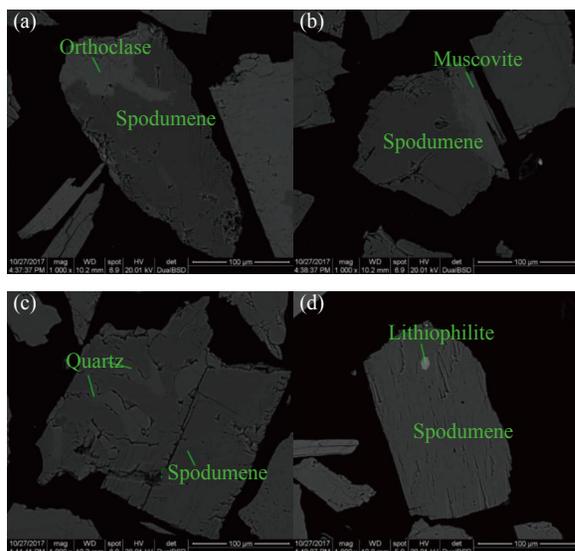


图 1 锂辉石工艺矿物学特征
Fig.1 Process characteristics of spodumene

2 结果与讨论

2.1 实验方法

目前对于锂辉石与脉石矿物的分选以正浮选为主，药剂制度经过不断发展也形成了“三碱两皂”的经典组合^[9]。根据本矿样的矿石性质，确定实验选用碱法不脱泥正浮选工艺，并通过磁选法对浮选获得的锂粗精矿进行提纯。使用 Na₂CO₃、NaOH 和 CaCl₂ 作为调整剂，YA-1 为主要捕收剂，YA-2、油酸皂和环烷酸皂作为辅助捕收剂，对该锂矿浮选药剂制度进行实验研究。实验条件探索流程见图 2。

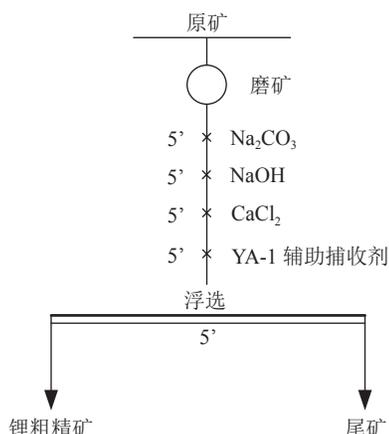


图 2 浮选实验条件探索流程
Fig.2 Flowsheet of flotation experiment

2.2 实验结果及分析

2.2.1 磨矿细度实验

合适的磨矿细度能促进目的矿物与脉石的解离，增大颗粒晶面的暴露程度和反应活性，是浮选分离的必要条件，但是磨矿细度过细时又会产生大量矿泥，阻碍浮选分离的进行^[10]。因此，确定合适的磨矿细度具有重要的意义。根据工艺矿物学研究结果，本矿石中有部分锂辉石与石英、长石和云母等脉石矿物连生，同时还有少量脉石矿物包含于锂辉石中，因此需要通过磨矿来使其分离以保证浮选粗精矿的品位和回收率。在粗选 Na₂CO₃ 用量 500 g/t、NaOH 用量 100 g/t、CaCl₂ 用量 100 g/t、主捕收剂 YA-1 和辅助捕收剂 YA-2 用量分别为 1600 g/t 和 800 g/t，扫选 YA-1 用量 800 g/t、YA-2 用量 400 g/t 条件下，对不同磨矿细度的原矿进行浮选实验，对浮选精矿进行分析，研究磨矿细度对锂辉石浮选的影响。

从图 3 可以发现，当磨矿粒度较粗时，锂辉石粗精矿的品位较高，但是由于粗粒矿物上浮困难，粗精矿产率较低，Li₂O 回收率只有 36.56%。随着-0.074 mm 粒级含量的增大，Li₂O 品位先快速降低然后在-0.074 mm 粒级含量占比达到 65% 左右时又迅速地升高。Li₂O 回收率随着磨矿细度的变细逐渐升高，并在-0.074 mm 粒级含量 75%~80% 时达到极大值。当磨矿细度继续增大到 80% 以上时，锂粗精矿泡沫矿化较差，泡沫上浮量大，矿泥夹带严重，不利于精选。故综合考虑，-0.074 mm 粒级占比 75% 时分选效果较佳。

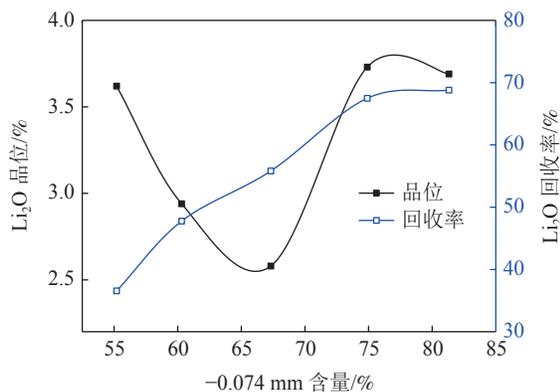


图 3 磨矿细度对锂辉石浮选的影响
Fig.3 Effect of grinding fineness on spodumene flotation

2.2.2 NaOH 用量实验

锂辉石在弱碱性环境中具有较好的可浮性，添加氢氧化钠能调节矿浆 pH 值，改善锂辉石的浮选，同时有研究表明氢氧化钠对锂辉石表面具有选择性溶蚀作用，能让锂辉石表面暴露出更多的金属离子活性质点强化与捕收剂的作用^[1]。在磨矿细度-0.074 mm 75% 条件下，调节 NaOH 用量研究其对锂辉石浮选的影响。从图 4 可以看出，随着氢氧化钠用量的增加，精矿 Li₂O 品位不断提高。在氢氧化钠用量为 0~40 g/t 时，锂浮选尾矿损失较少，但是浮选过程中泡沫矿化较差，矿泥夹带严重，粗精矿 Li₂O 品位较低不利于精选。粗精矿 Li₂O 品位随着 NaOH 用量的增加在逐渐增大，但是回收率逐渐降低。当 NaOH 用量为 100 g/t 时，锂粗精矿 Li₂O 品位为 3.54%，回收率为 65.65%，继续增大氢氧化钠用量，锂粗精矿产率降低至 10% 以下，扫选精矿产率大于锂粗精矿产率，锂辉石上浮滞后。综合考虑，NaOH 的用量 100 g/t 为宜。

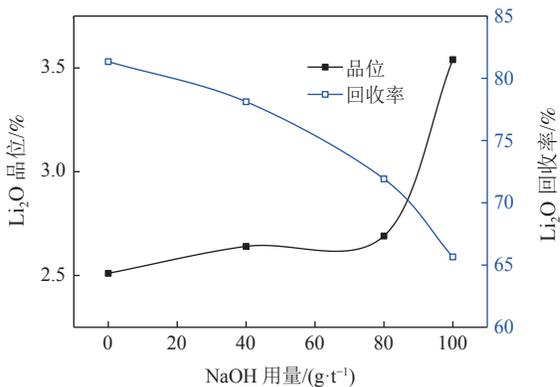


图 4 NaOH 用量对锂辉石浮选的影响

Fig.4 Effect of NaOH dosage on the flotation of spodumene

2.2.3 辅助捕收剂实验

在磨矿细度-0.074 mm 75%，Na₂CO₃用量 500 g/t，NaOH 用量 100 g/t，CaCl₂ 用量 100 g/t 的条件下，采用锂辉石常用捕收剂 YA-1 作为主捕收剂，分别选择环烷酸皂、油酸皂、脂肪皂类 YA-2 作为辅助捕收剂，进行辅助捕收剂种类探索实验。从图 5 可以看出，环烷酸皂与 YA-1 混合使用，选择性捕收能力较差；油酸皂和 YA-2 分别与 YA-1 混合使用，对本矿样锂辉石的浮选选择性捕收能力较强。在相同的药剂用量下，相较于油酸皂，YA-1 与 YA-2 混合使用对本矿样中锂辉石捕收能力更强。故针对本矿样选择 YA-2 作为辅助捕收剂。

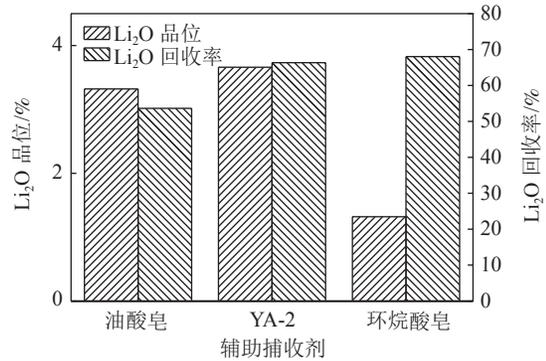


图 5 辅助捕收剂对锂辉石浮选的影响

Fig.5 Effect of auxiliary collectors on the flotation of spodumene

选择 YA-1 作为主捕收剂，YA-2 作为辅助捕收剂，在捕收剂总用量为 2400 g/t 的条件下，调整主捕收剂与辅助捕收剂的配比研究辅助捕收剂 YA-2 的用量对锂辉石浮选的影响，见图 6。由图 6 可以发现，随着辅助捕收剂 YA-2 用量的增大，锂精矿的品位降低，回收率则先增大然后又降低，当捕收剂配比达到 1:1 时达到了极大值。当辅助捕收剂用量为 800 g/t 时，锂精矿品位降低不大，而回收率已经接近极大值，继续增大用量会使得精矿 Li₂O 品位严重降低，不仅使得产品质量降低而且使得生产成本增加，因此确定辅助捕收剂用量为 800 g/t。

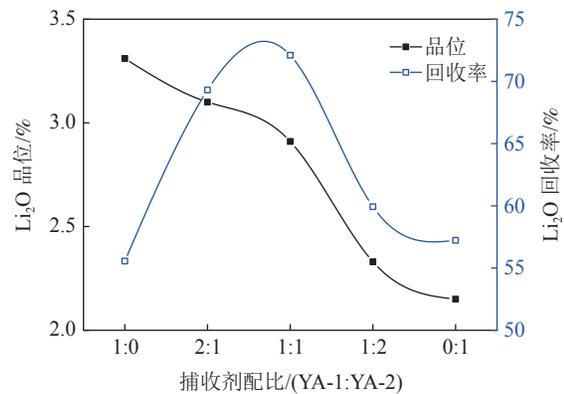


图 6 捕收剂对比对锂辉石浮选的影响

Fig.6 Effect of collector ratio on flotation of spodumene

2.3 浮选闭路实验

根据条件实验确定的药剂制度及工艺流程，使用 1:1 的 YA-1 和 YA-2 作为捕收剂进行一粗二扫三精的浮选闭路实验，闭路实验流程见图 7，闭路实验结果见表 3。最终实验获得 Li₂O 品位 6.03%，回收率 70.14% 的锂辉石精矿。

精矿 Li_2O 品位为 6.42%， Fe_2O_3 含量为 1.46%，符合化工级-1 产品要求；当磁场强度为 0.6 T 时，得到的锂辉石精矿 Li_2O 品位为 6.74%， Fe_2O_3 含量为 0.60%，符合陶瓷级产品要求。

参考文献：

- [1] 林大泽. 锂的用途及其资源开发[J]. 中国安全科学学报, 2004(9):76-80+98.
LIN D Z. Use of lithium and its resource development[J]. China Safety Science Journal, 2004(9):76-80+98.
- [2] 钱志博, 周少珍. 某低品位锂辉石矿石浮选实验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(6):62-68.
QIAN Z B, ZHOU S Z. Research on flotation of a low grade Spodumene ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(6):62-68.
- [3] 徐正震, 梁精龙, 李慧, 等. 含锂资源中锂的提取研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2021(5):32-37.
XU Z Z, LIANG J L, LI H, et al. Research status and prospects of lithium extraction from lithium containing resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):32-37.
- [4] 李成秀, 程仁举, 刘星. 我国锂辉石选矿技术研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2021(5):1-8.
LI C X, CHENG R J, LIU X. Research status and prospects of spodumene ore beneficiation technology in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):1-8.
- [5] 翁成钧, 温胜来. 赣南某低品位锂辉石沉降脱泥——浮选回收试验[J]. 现代矿业, 2017, 33(9):126-128+133.
WENG C J, WEN S L. Experimental study on sedimentation desliming and flotation recovery of a low grade spodumene in Southern Jiangxi[J]. Modern Mining, 2017, 33(9):126-128+133.
- [6] 刘若华, 孙伟, 冯牧, 等. 锂辉石浮选新型捕收剂作用机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(2):87-90+98.
LIU R H, SUN W, FENG M, et al. Acting machine of new collector for spodumene flotation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(2):87-90+98.
- [7] 陈超, 张裕书, 张少翔, 等. 川西九龙地区低品位锂辉石浮选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):55-58.
CHEN C, ZHANG Y S, ZHANG S X, et al. Flotation test of low-grade spodumene in the Jiulong area of west Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):55-58.
- [8] 黄子杰, 孙伟, 高志勇. 磨矿对矿物表面性质和浮选行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(11): 2671-2680.
HUANG Z J, SUN W, GAO Z Y. Effect of grinding on surface properties and flotation behavior of minerals [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 219, 29(11): 2671-2680.
- [9] 刘星, 李成秀, 程仁举, 等. 国外某锂多金属矿选矿实验[J]. 矿产综合利用, 2019(2):65-69.
LIU X, LI C X, CHENG R J, et al. Test of the beneficiation of one lithium polymetallic ore overseas[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(2):65-69.
- [10] 高跃升, 高志勇, 孙伟. 金属离子对矿物浮选行为的影响及机理研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2017(4):859-868.
GAO Y S, GAO Z Y, SUN W. Progress of research on the effect and mechanism of metal ions on mineral flotation behaviour[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017(4):859-868.
- [11] 程仁举, 李成秀, 刘星, 等. 川西某伟晶岩型锂辉石矿浮选实验研究. [J]. 矿产综合利用, 2020(6):148-152.
CHENG R J, LI C X, LIU X, et al. Experimental research on the flotation of a pegmatite type spodumene ore in Western Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):148-152.

Separation Technology of a Spodumene Ore in Africa

Yu Lihong^{1,2}, Gao Yude², Zhang Guofan¹, Meng Qingbo², Wu Di², Li Shuangke²

(1.School of Resource Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan, China;

2.Institute of Resource Utilization, Guangdong Academy of Sciences, State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals, Guangzhou, Guangdong, China)

Abstract: This is an essay in the field of mineral processing engineering. The useful mineral of a pegmatite lithium deposit in Africa is spodumene, and the raw ore contains 0.87% Li_2O . It belongs to low-grade lithium ore, which is relatively difficult to develop and use. In this study, a spodumene concentrate with a yield of 10.15%, containing 6.03% Li_2O and lithium recovery of 70.14% was obtained through detailed flotation tests and the flotation process of "one roughing, two scavengings and three cleanings". The magnetic separation test results show that chemical grade -1 spodumene concentrate can be obtained by 0.2 T magnetic separation of lithium flotation concentrate, and ceramic grade spodumene concentrate can be obtained by 0.6 T magnetic separation of lithium flotation concentrate, which realizes the high-quality utilization of this low-grade lithium ore.

Keywords: Mineral processing engineering; Spodumene; Low-grade; Flotation; Ceramic grade