

阴阳离子捕收剂高效浮选锂辉石的选矿试验研究^①

荆正强, 金凯, 张政军, 李建辉
(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019)

摘要:为解决脂肪酸类捕收剂浮选锂辉石时选择性差、泡沫黏稠、药剂用量大的问题,进行了阴、阳离子捕收剂浮选锂辉石、石英、长石的试验研究。结果表明,阴离子捕收剂和阳离子捕收剂组合可以增加药剂组分间的协同作用,提高精矿品位或回收率。以阴、阳离子捕收剂组合的CFLH-18为捕收剂对四川金川某花岗伟晶岩型锂辉石矿进行浮选闭路试验,获得了Li₂O品位4.62%、回收率78.54%的锂辉石精矿,与现场脂肪酸类捕收剂生产指标相比,锂辉石精矿Li₂O品位提升了0.10个百分点,回收率提升了5.93个百分点,精矿富集比从3.77提高到了4.57。

关键词: 锂辉石; 伟晶岩型锂矿; 组合捕收剂; 长石; 石英; 浮选; 阴离子捕收剂; 阳离子捕收剂

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.015

文章编号: 0253-6099(2025)01-0080-06

High-Efficiency Flotation of Spodumene with Anionic-Cationic Collectors

JING Zhengqiang, JIN Kai, ZHANG Zhengjun, LI Jianhui

(Changsha Non-ferrous Metallurgical Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha 410019, Hunan, China)

Abstract: To solve problems of poor selectivity, thick foaming and large reagent consumption in recovering spodumene with fatty acid collectors, anionic and cationic collectors were introduced to flotation tests of spodumene, feldspar and quartz. According to the results of pure mineral tests, a anionic-cationic collector can enhance the synergistic effect of reagents, and improve the grade and recoveries of concentrates. CFLH-18, a combination of anionic and cationic collectors, was introduced in a close-circuit flotation test of granite pegmatite-type spodumene from Jinchuan County of Sichuan Province, and a spodumene concentrate with Li₂O grade of 4.62% was collected at 78.54% recovery. Compared with the on-site practice using fatty acid collectors, Li₂O grade and recovery are improved by 0.10 percentage points and 5.93 percentage points. Meanwhile, the concentrate enrichment ratio is raised from 3.77 to 4.57.

Key words: spodumene; pegmatite-type lithium ore; combined collector; feldspar; quartz; flotation; anionic collector; cationic collector

锂辉石普遍赋存于伟晶盐矿物中,共生的脉石矿物(长石、石英)与锂辉石表面性质相似。受风化、侵蚀作用影响,矿石普遍严重细泥化,导致磨矿时大量难免金属阳离子溶于矿浆中活化锂辉石和脉石矿物,使得锂辉石与脉石矿物浮选分离困难^[1]。采用传统阳离子捕收剂十二胺,在广泛pH值范围内,锂辉石、长石和石英等矿物均大量上浮^[2-3]。阴离子型捕收剂,如脂肪酸及其皂类、烷基硫酸盐及磺酸盐等,也常用于锂辉石矿浮选,但其选择性较差^[4-5]。单一的阴离子、阳离子捕收剂难以有效分离锂辉石和脉石矿物,且存在选择性差、泡沫黏稠、药剂用量大等问题,将几种浮选药剂组合使用往往可以取得较好的浮选效果,研究组

合捕收剂是锂辉石浮选的重要方向^[6-8]。

本文通过纯矿物试验探讨阴离子、阳离子组合捕收剂对锂辉石和主要脉石矿物(石英、长石)的浮选行为,并基于纯矿物试验结果,研发了一种阴阳离子组合捕收剂CFLH-18,用于四川省金川县某花岗伟晶岩型锂辉石矿浮选,试验指标与现场生产指标对比结果证实其具备推广价值。

1 试验矿样与药剂

1.1 纯矿物矿样

锂辉石纯矿物矿样来自新疆某矿床,长石纯矿物矿样来自山东某矿床,石英纯矿物矿样来自湖南某矿

① 收稿日期: 2024-08-16

作者简介: 荆正强(1983—),男,山西运城人,硕士,高级工程师,主要从事铜、钼、锂、铅、锌等有色金属矿选矿研究和设计。E-mail: 94300420@qq.com

床。纯矿物主要化学成分见表1。3种纯矿物样品纯度均在98%以上,其中锂辉石($\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$)的 Li_2O 品位为7.278%,长石中 Al_2O_3 和 SiO_2 品位分别为18.918%和67.522%,石英纯度98.524%,其他杂质矿物极少,符合纯矿物试验纯度要求。

表1 纯矿物主要化学成分分析结果(质量分数)

Table 1 Analysis results of main chemical composition of pure minerals %

矿物名称	Al_2O_3	SiO_2	Li_2O	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
锂辉石	24.505	62.759	7.278	0.284	0.283	0.324
长石	18.918	67.522	—	9.913	0.101	0.103
石英	—	98.524	—	—	—	—

1.2 实际矿样

实际矿样取自某钠长石-锂辉石花岗伟晶岩型矿床,主要矿物为锂辉石、锂云母,脉石矿物为石英、微斜长石、钠长石、金红石、锆石等;矿石结构为粗粒包晶结构,还见细粒结构和文象结构,为块状构造和浸染状构造。该矿样主要含锂矿物为锂辉石,常呈他形或半自形晶体产出,晶面常有纵纹。锂辉石在矿石中与石英、长石紧密相嵌交错,常以细针状包含于石英或长石颗粒中。矿石主要矿物组成为锂辉石、长石、石英。实际矿样主要化学成分分析结果见表2,矿物组成见表3。

表2 实际矿样主要化学成分分析结果(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of ore sample %

Li_2O	Ta_2O_3	Nb_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2
1.02	0.005 2	0.009 2	76.80	7.20	1.00	0.027
Mg	Ca	Mn	BeO	Cu	Pb	
0.24	0.28	0.24	0.037	0.001 7	0.008 0	

表3 实际矿样主要矿物组成(质量分数)

Table 3 Main mineral composition of ore sample %

锂辉石	钽铌铁矿	磁铁矿	赤铁矿	褐铁矿	钛铁矿
15.22	微量	0.06	0.02	少量	少量
方铅矿	黄铁矿	锡石	石榴子石	绿帘石	磷灰石
微量	少量	0.05	0.01	少量	少量
锆石	白云母	黑云母	石英	长石	
少量	1.95	0.05	43.18	38.76	

1.3 试验药剂

试验所用药剂主要包括分析纯药剂十二胺、咪唑、丁酰肼、十二烷基磺酸钠、氢氧化钠、氯化钙,工业纯药剂氧化石蜡皂,化学纯药剂油酸钠、盐酸等。

1.4 试验内容与方法

纯矿物矿样经破碎、干式磨矿后筛分, -0.074 mm 粒级产品作为纯矿物试验所用矿样。实际矿样经破碎筛分后, -2.5 mm 粒级用于后续实际矿物浮选试验。

纯矿物试验采用单因素实验法,考察浮选pH值、捕收剂种类、捕收剂用量、活化剂用量、药剂配比对锂辉石、长石、石英浮选行为的影响,试验流程如图1所示。实际矿物浮选试验流程同图1。

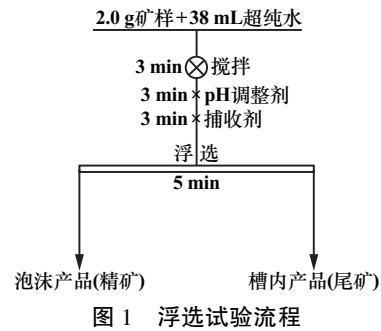


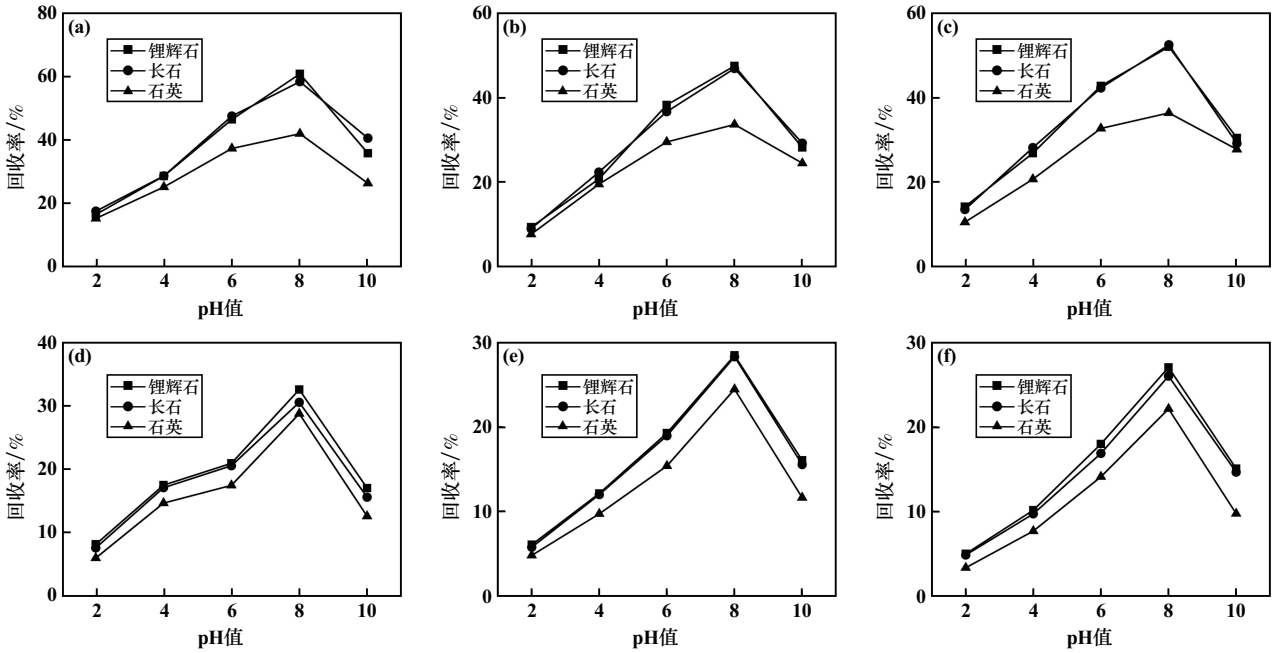
图1 浮选试验流程

Fig. 1 Flowchart of flotation test

2 试验结果与讨论

2.1 单一捕收剂体系 pH 值试验

矿浆质量分数5%,浮选温度 $(25\pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$,阳离子捕收剂用量40 mg/L、阴离子捕收剂用量200 mg/L、不添加活化剂 CaCl_2 ,考察了不同pH值条件下阳离子捕收剂十二胺、咪唑、丁酰肼和阴离子捕收剂油酸钠、氧化石蜡皂、十二烷基磺酸钠对锂辉石、长石和石英纯矿物浮选指标的影响,结果见图2。由图2可知,使用阳离子捕收剂十二胺、咪唑和丁酰肼时,随着矿浆pH值升高,3种纯矿物回收率均呈现先增加后减少的趋势,强酸性和强碱性矿浆环境下3种阳离子捕收剂浮选效果均较差。在试验pH值范围内,因锂辉石和长石矿物表面性质极为相近,锂辉石和长石回收率差别很小,而石英回收率整体较低,说明阳离子捕收剂可有效分离锂辉石和石英。采用十二胺为捕收剂,矿浆pH值8时,锂辉石回收率达到峰值60.63%,此时长石回收率为58.17%,石英回收率为41.86%。阳离子捕收剂最佳浮选pH值为 8 ± 0.5 。使用阴离子捕收剂时浮选效果较差,在试验pH值范围内,锂辉石、长石和石英回收率均较低,主要原因在于阴离子捕收剂靠物理吸附使矿物表面疏水,选择性差、药剂用量大。强酸性环境下3种纯矿物回收率均小于10%,随着pH值逐渐升高,锂辉石、长石和石英回收率小幅上升。pH值8时,使用氧化石蜡皂为捕收剂,锂辉石回收率32.51%、长石回收率30.50%、石英回收率28.73%。



(a) 十二胺; (b) 咪唑; (c) 丁酰胺; (d) 氧化石蜡皂; (e) 油酸钠; (f) 十二烷基磺酸钠

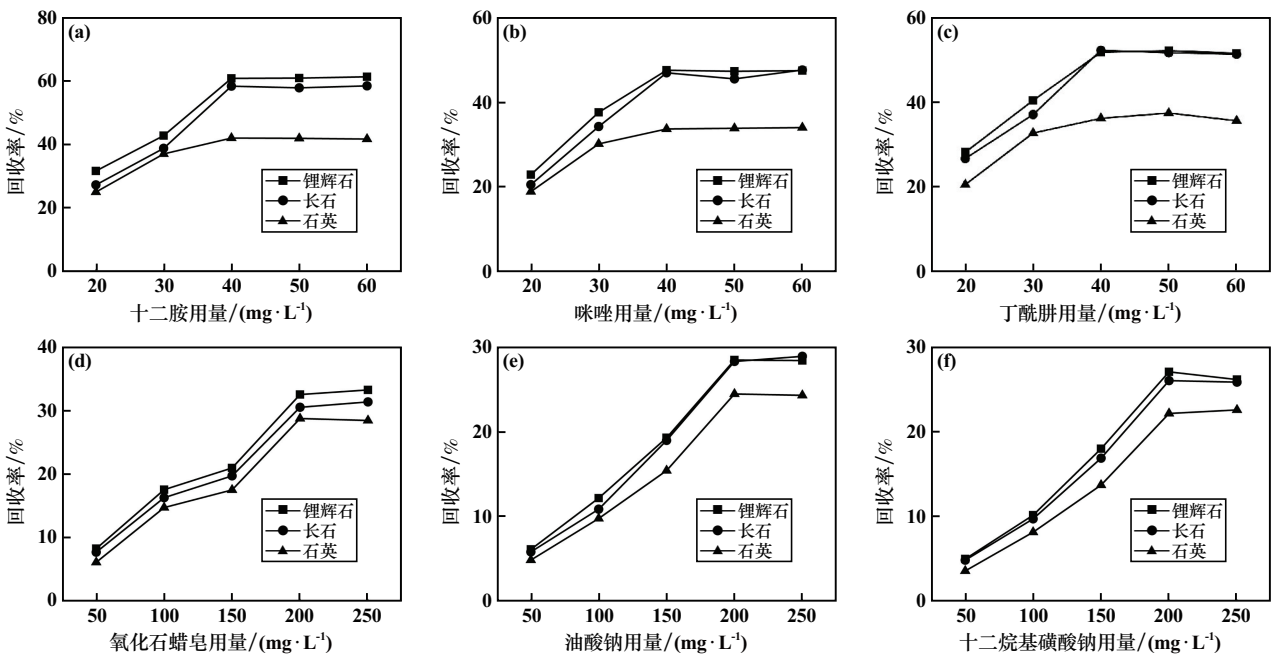
图2 不同捕收剂作用下 pH 值对纯矿物浮选指标的影响

Fig.2 Effect of pH value on flotation index of pure minerals with different collector systems

2.2 单一捕收剂用量试验

矿浆质量分数 5%、浮选温度 (25 ± 1) °C、矿浆 pH 值 8.5 ± 0.1 、活化剂 CaCl_2 用量 75 mg/L ，考察了捕收剂用量对纯矿物浮选指标的影响，结果见图 3。由图 3 可知，随着捕收剂用量增加，3 种纯矿物的浮选回收率均

先增加后趋于稳定。3 种阳离子捕收剂的捕收能力从大到小顺序为：十二胺 > 丁酰胺 \approx 咪唑，阳离子捕收剂用量 40 mg/L 时回收率趋于稳定，此时浮选回收率从大到小排序为：锂辉石 > 长石 > 石英。阴离子捕收剂用量 200 mg/L 时，3 种纯矿物回收率有微小差异，其中锂



(a) 十二胺; (b) 咪唑; (c) 丁酰胺; (d) 氧化石蜡皂; (e) 油酸钠; (f) 十二烷基磺酸钠

图3 捕收剂用量对纯矿物浮选指标的影响

Fig.3 Effect of collectors dosage on flotation index of pure minerals

辉石回收率最高、石英回收率最低。

2.3 活化剂用量试验

锂辉石浮选中常用的活化剂有 CaCl_2 、 FeCl_3 等。由于采用阴离子捕收剂时锂辉石回收率过低,这里研究阴离子捕收剂体系下活化剂 CaCl_2 用量对锂辉石、长石和石英浮选的影响。试验条件为:矿浆质量分数 5%、浮选温度 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 值 8.5 ± 0.1 、阴离子捕收

剂用量 200 mg/L,试验结果如图 4 所示。由图 4 可知, CaCl_2 用量从 0 增至 80 mg/L,锂辉石、长石和石英回收率均逐渐升高, CaCl_2 用量 60~80 mg/L 时矿物回收率较高,表明矿浆环境中引入 Ca^{2+} 对矿物起到了一定的活化作用, CaCl_2 对锂辉石、长石和石英的活化能力排序为:锂辉石 \approx 长石>石英。 CaCl_2 用量过多,多余的 Ca^{2+} 会消耗捕收剂,导致矿物回收率降低。

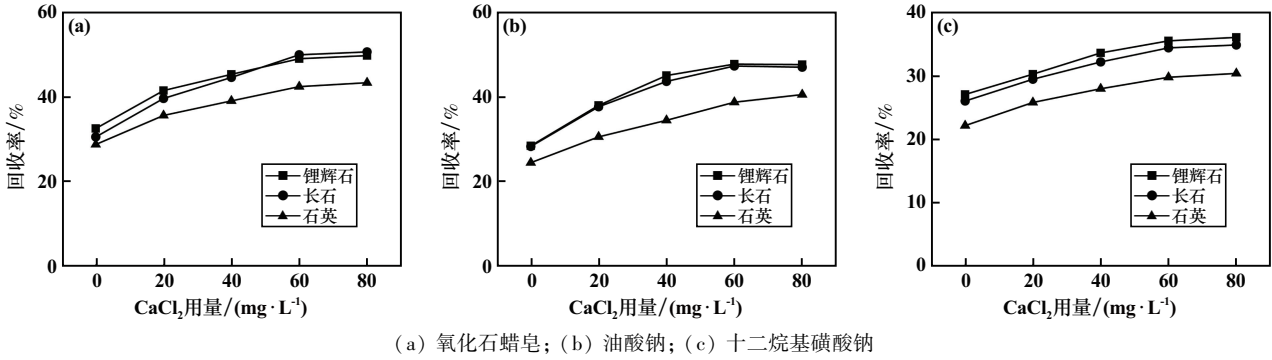


图 4 不同阴离子捕收剂作用下 CaCl_2 用量对纯矿物浮选指标的影响

Fig.4 Effect of CaCl_2 dosage on flotation index of pure minerals with different anionic collector systems

2.4 组合捕收剂对锂辉石浮选效果的影响

纯矿物浮选试验结果表明,阳离子捕收剂中十二胺浮选效果较好,适宜的用量为 40 mg/L,此时锂辉石、长石、石英回收率分别为 60.63%、58.17%、41.86%; CaCl_2 用量 80 mg/L 时,阴离子捕收剂氧化石蜡皂浮选效果较好,此时锂辉石、长石、石英回收率分别为 49.73%、50.60%、43.33%。

阴离子捕收剂在矿物表面的吸附为物理吸附,它能提高阳离子捕收剂的选择性及吸附量,因此可将阴离子捕收剂与阳离子捕收剂组合用药,使两种或两种以上药剂间发生交互作用,有望实现锂辉石和脉石矿物(长石、石英)的高效浮选分离。交互作用包括乳化、分散、增溶、润湿、发泡、消泡、胶束、协同及增效等^[9-10]。

基于纯矿物试验结果,以十二胺、油酸钠和氧化石蜡皂按质量比 1:5:5 组合,并分别以短单链醇、聚酯、长链醇、羟基聚醚为乳化剂,制得捕收剂 CFLH-5~CFLH-8,固定捕收剂用量 200 mg/L,在矿浆质量分数 5%,浮选温度 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 值 8.0、不添加活化剂 CaCl_2 条件下进行了不同乳化剂所得组合捕收剂对纯矿物浮选回收率的影响,结果见表 4。结果表明,不添加 Ca^{2+} 时,锂辉石与长石、石英呈现浮选差异性,效果较好的捕收剂为 CFLH-6,即以聚酯为乳化剂,此时锂辉石、长石、石英回收率分别为 61.56%、53.68%、40.67%。

以聚酯为乳化剂,以咪唑、油酸钠、氧化石蜡皂、环

表 4 乳化剂种类对纯矿物浮选回收率的影响

Table 4 Effect of emulsifier type on flotation recovery of pure minerals

乳化剂种类	捕收剂名称	纯矿物回收率/%		
		锂辉石	长石	石英
短单链醇	CFLH-5	30.68	26.85	14.73
聚酯	CFLH-6	61.56	53.68	40.67
长链醇	CFLH-7	42.67	34.28	27.56
羟基聚醚	CFLH-8	57.94	48.83	31.94

烷酸皂按质量比 1:4:6:1 组合制得捕收剂 CFLH-13,以油酸钠、氧化石蜡皂、环烷酸皂按质量比 4:5:1 制得捕收剂 CFLH-14,以十二胺、油酸钠、苯甲羟肟酸、氧化石蜡皂、环烷酸皂按质量比 1:3:1:5:1 制得捕收剂 CFLH-15。在矿浆质量分数 5%,浮选温度 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 值 8.0、捕收剂用量 200 mg/L、不添加活化剂 CaCl_2 条件下进行了组合捕收剂种类试验,结果见表 5。结果表明,捕收剂 CFLH-14 效果较好,此时锂辉石、长石、石英回收率分别为 69.92%、61.40%、45.18%。

表 5 组合捕收剂种类对纯矿物浮选回收率的影响

Table 5 Effect of combined collector type on flotation recovery of pure minerals

捕收剂种类	纯矿物回收率/%		
	锂辉石	长石	石英
CFLH-13	31.64	24.38	18.73
CFLH-14	69.92	61.40	45.18
CFLH-15	29.34	22.16	16.29

在矿浆质量分数5%、浮选温度(25±1)℃、pH值8.0、CaCl₂用量80 mg/L条件下,考察了捕收剂CFLH-14用量对纯矿物浮选指标的影响,结果如图5所示。由图5可见,CaCl₂可大幅提高矿物回收率,捕收剂CFLH-14用量50 mg/L时锂辉石与石英、长石便开始呈现浮选差异,此时3种纯矿物的回收率分别为64.28%、44.10%、18.04%,说明此药剂对锂辉石选择性较好,CFLH-14用量200 mg/L时锂辉石回收率达到98.87%。

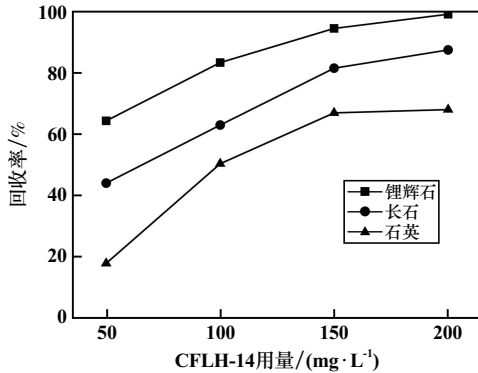


图5 捕收剂CFLH-14用量对纯矿物浮选指标的影响

Fig. 5 Effect of CFLH-14 dosage on flotation index of pure minerals

2.5 组合捕收剂工业应用试验

基于纯矿物试验与药剂组分配比试验结果,对组合药剂CFLH-14各组分进行加成改性,研发了一种新型组合捕收剂CFLH-18,其主要成分为十二胺、改性油酸、脂肪酸皂。采用CFLH-18为捕收剂对四川省金川县某锂辉石矿进行浮选试验,结果见表6,试验流程见图6。试验中用到的云母捕收剂CF-16主要成分为脂肪胺类与磺酸盐类,有机抑制剂CF-17主要成分为木质素与单宁,均为市购药剂。在磨矿细度-0.074 mm粒级占75%条件下,原矿经云母预浮选除杂后再经一粗二精二扫锂辉石浮选,最终可获得Li₂O品位4.62%、回收率78.54%的锂辉石精矿。以CFLH-18为捕收剂和现场使用脂肪酸类捕收剂的生产指标对比结果见表7。以CFLH-18为捕收剂,锂辉石精矿Li₂O品位提升了0.10个百分点,回收率提升了5.93个百分点,精矿富集比提高了0.80。

表6 实际矿物浮选试验结果

Table 6 Test results of ore flotation

产品名称	产率/%	Li ₂ O品位/%	Li ₂ O回收率/%
云母	6.20	0.89	5.44
锂辉石精矿	17.10	4.62	78.54
尾矿	76.70	0.21	16.02
原矿	100.00	1.01	100.00

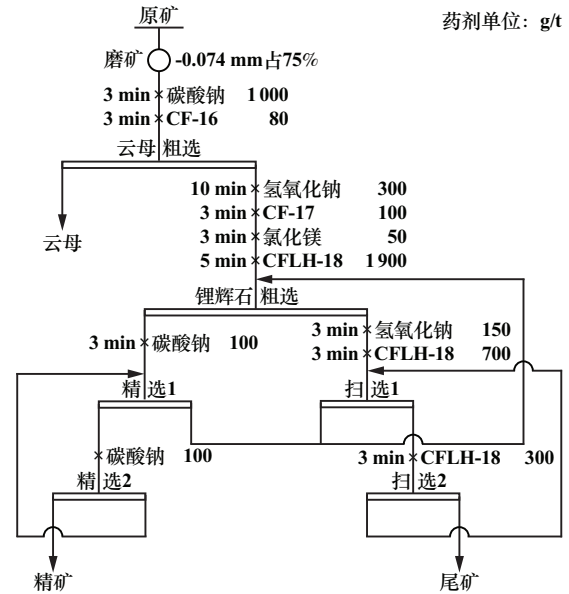


图6 实际矿物浮选试验流程

Fig. 6 Flowchart for ore flotation

表7 不同捕收剂体系的实际矿物浮选试验结果对比

Table 7 Test results of ore flotation with different collectors

捕收剂体系	Li ₂ O品位/%			精矿回收率/%	精矿富集比
	精矿	尾矿	原矿		
脂肪酸类	4.52	0.41	1.20	72.61	3.77
CFLH-18	4.62	0.21	1.01	78.54	4.57

3 结论

1) 纯矿物浮选试验结果表明,阳离子捕收剂回收率高,但由于锂辉石和长石矿物表面性质极为相近,锂辉石和长石浮选回收率差别很小;阴离子捕收剂靠物理吸附使矿物表面疏水,但用量高、浮选效果较差;单一阴离子和阳离子捕收剂难以有效分离有用矿物和脉石矿物,且存在选择性差、泡沫黏稠、药剂用量大等问题。

2) 阴离子捕收剂和阳离子捕收剂组合,可以增加药剂组分间的协同作用,提高精矿品位或回收率。以CFLH-18为捕收剂的实际矿物浮选试验结果表明,在磨矿细度-0.074 mm粒级占75%条件下,原矿经云母预浮选除杂后再经一粗二精二扫锂辉石浮选,最终可获Li₂O品位4.62%、回收率78.54%的锂辉石精矿,与现场脂肪酸类捕收剂相比,锂辉石精矿Li₂O品位提升了0.10个百分点、回收率提升了5.93个百分点,精矿富集比提升了0.80。

参考文献(References):

- [1] 聂轶苗,裴广超,刘淑贤,等. 难选阳离子对石英和长石浮选行为的影响及机理研究进展[J]. 金属矿山, 2023(4): 146-157.

- NIE Yimiao, PEI Guangchao, LIU Shuxian, et al. Research progress of influence and mechanism of unavoidable cations on the flotation behavior of quartz and feldspar[J]. *Metal Mine*, 2023(4):146-157.
- [2] 魏鹏刚,任浏祯,邱航,等. 阳离子捕收剂对石英分粒级浮选行为的影响[J]. *矿冶工程*, 2018,38(6):64-67.
- WEI Penggang, REN Liuyi, QIU Hang, et al. Influence of cationic collectors on flotation behavior of quartz with different particle size[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2018,38(6):64-67.
- [3] 刘旭,缪亚兵,彭泽友,等. 河南某长石矿选矿试验研究[J]. *矿冶工程*, 2021,41(5):58-62.
- LIU Xu, MIAO Yabing, PENG Zeyou, et al. Experimental study on beneficiation of feldspar ore from Henan[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2021,41(5):58-62.
- [4] 王萍,刘建,郝佳美,等. 锂辉石晶体结构及浮选药剂作用机理综述[J]. *矿产保护与利用*, 2023,43(2):1-10.
- WANG Ping, LIU Jian, HAO Jiamei, et al. Crystal structure of spodumene and mechanism of flotation reagents: A review[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023,43(2):1-10.
- [5] 冯海强,王毓华. 锂辉石浮选捕收剂及其构效关系研究综述[J]. *稀有金属*, 2022,46(8):1083-1096.
- FENG Haiqiang, WANG Yuhua. Review on flotation collectors and structure-activity relationship of spodumene[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2022,46(8):1083-1096.
- [6] 巫侯琴,方帅,徐龙华,等. 伟晶岩型锂辉石矿石浮选药剂及工艺研究现状[J]. *金属矿山*, 2018(7):1-6.
- WU Houqin, FANG Shuai, XU Longhua, et al. Research situation of pegmatite spodumene flotation reagents and process[J]. *Metal Mine*, 2018(7):1-6.
- [7] 刘若华,孙伟,冯木,等. 组合捕收剂浮选锂辉石的作用机理[J]. *中国有色金属学报*, 2018,28(3):612-617.
- LIU Ruohua, SUN Wei, FENG Mu, et al. Mechanism on flotation of spodumene with combined collector[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018,28(3):612-617.
- [8] 胡阳,吴港生,褚浩然,等. 锂辉石矿浮选理论与药剂研究的新进展[J]. *有色金属工程*, 2021,11(11):10-19.
- HU Yang, WU Gangsheng, CHU Haoran, et al. New development in the flotation theory and reagents of spodumene ore[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021,11(11):10-19.
- [9] 乔笑笑. 基于十二胺与仲辛醇的多元混溶药剂浮选性能及机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- QIAO Xiaoxiao. Flotation performance and mechanism of reagents based on dodecylamine and 2-octanol[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [10] 张良柱. 有机抑制剂对锂辉石和钠长石、石英浮选分离的影响及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- ZHANG Liangzhu. Effect and mechanism of organic depressants on flotation separation of spodumene, albite and quartz[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- 引用本文: 荆正强,金凯,张政军,等. 阴阳离子捕收剂高效浮选锂辉石的选矿试验研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(1):80-85.
- JING Zhengqiang, JIN Kai, ZHANG Zhengjun, et al. High-efficiency flotation of spodumene with anionic-cationic collectors[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(1):80-85.
- (上接第79页)
- [7] 胡志凯,肖婉琴,于洋,等. 西藏某特大型铜铅矿矿石选矿试验[J]. *金属矿山*, 2015(11):82-86.
- HU Zhikai, XIAO Wanqin, YU Yang, et al. Mineral processing of ore from a super-huge copper-molybdenum mine in Xizang[J]. *Metal Mine*, 2015(11):82-86.
- [8] 宋翔宇,张红涛,许来福,等. 铜铅分离工艺研究现状与展望[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2022(6):92-101.
- SONG Xiangyu, ZHANG Hongtao, XU Laifu, et al. Research status and prospect of Cu-Mo separation technology[J]. *Nonferrous Metals (Minerals Processing Section)*, 2022(6):92-101.
- [9] 胡献立,潘瑞桃. 采用新药剂提高铜铅锌浮选指标试验[J]. *现代矿业*, 2013,29(1):38-41.
- HU Xianli, PAN Ruitao. Experiments on improvement of Cu-Pb-Zn flotation index with new pharmacy[J]. *Morden Mining*, 2013,29(1):38-41.
- [10] 窦源东,王涛,刘念国. 某复杂铜铅锌多金属硫化矿石工艺矿物学研究[J]. *黄金*, 2021,42(7):82-85.
- DOU Yuandong, WANG Tao, LIU Nianguo. Process mineralogy of a complex copper-lead-zinc polymetallic sulfide ore[J]. *Gold*, 2021,42(7):82-85.
- [11] 程平轩. 某大型铜铅矿提高微细粒铜回收率试验研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(2):78-80.
- CHENG Pingxuan. Improving flotation recovery of fine copper minerals in large copper-molybdenum mine[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023,43(2):78-80.
- [12] 林清泉,戴智飞,曾令明,等. 江西某难选铜铅矿浮选试验研究[J]. *矿冶工程*, 2022,42(2):73-76.
- LIN Qingquan, DAI Zhifei, ZENG Lingming, et al. Experimental study on flotation of refractory copper-molybdenum ore from Jiangxi[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022,42(2):73-76.
- 引用本文: 车文芳,王丞,牛南南,等. 河南某难选铜、钼多金属矿新型药剂浮选试验研究[J]. *矿冶工程*, 2025,45(1):76-79.
- CHE Wenfang, WANG Cheng, NIU Nannan, et al. New reagents for flotation of complex molybdenum-copper polymetallic ore in Henan Province[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(1):76-79.