

复杂嵌布低品位锂辉石矿浮选工艺的方案比较^①

康金星^{1,2}, 王鑫^{1,2}, 姜志学^{1,2}, 刘志国^{1,2}, 王亚运^{1,2}

(1.中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038; 2.中国冶金科工集团有限公司,北京 100028)

摘要:以四川某低品位锂辉石矿为研究对象,探讨了浮选优化条件,在此基础上进行了4种浮选工艺流程试验,并对比分析了各流程的优劣。结果表明:相对于常规全粒级浮选-中矿顺序返回工艺,全粒级浮选-中矿再磨工艺和脱泥-浮选-中矿顺序返回工艺更具优势,所得锂精矿 Li₂O 回收率分别提高了 1.08 个百分点和 1.53 个百分点;其中脱泥-浮选-中矿顺序返回流程 Li₂O 回收率更高,为 86.7%;全粒级浮选-中矿再磨工艺所得锂精矿 Li₂O 品位更高,为 5.76%。

关键词: 锂辉石; 矿物嵌布特征; 浮选; 脱泥浮选; 锂精矿; 浮选方案; 方案优选; 中矿再磨

中图分类号: TD952; TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.018

文章编号: 0253-6099(2025)02-0102-06

Comparison of Flotation Schemes for Low-Grade Spodumene Ore with Complex Mineral Dissemination

KANG Jinxing^{1,2}, WANG Xin^{1,2}, JIANG Zhixue^{1,2}, LIU Zhiguo^{1,2}, WANG Yayun^{1,2}

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China; 2. China Metallurgical Group Corporation, Beijing 100028, China)

Abstract: Based on the optimization of flotation parameters of a low-grade spodumene ore from Sichuan, processing tests were conducted by adopting four flotation schemes to investigate their advantages and disadvantages. It is found that both the process of flotation with full-size range of ores followed by middling regrinding and the process of desliming followed by flotation and sequential returning of middlings are more advantageous than the conventional flowsheet of flotation with full size-range of ores followed by just sequential returning of middlings. It is shown that Li₂O recoveries by two processes can be increased correspondingly by 1.08 and 1.53 percentage points, and the second processing technique can bring a higher Li₂O recovery at 86.7%. However, the first processing technique can produce a higher quality lithium concentrate with a Li₂O grade of 5.76%.

Key words: spodumene; mineral dissemination characteristics; flotation; desliming and flotation; lithium concentrate; flotation scheme; configuration optimization; middling regrinding

锂作为高电化学活性的轻金属元素,已在新能源电池、原子能、航空航天等领域广泛应用^[1]。近年来,锂成为主要经济体竞相争夺的战略金属,也是保障我国产业升级和战略转型的关键金属之一^[2-4]。自然界中锂仅呈化合矿物或离子盐形式赋存。据统计,我国锂消耗量巨大,且需大量进口^[5]。锂的安全供应是我国急需解决的卡脖子重点问题之一。

目前虽已发现 150 余种含锂矿物,但相对具有工业开发价值的仍局限于锂辉石、锂云母、透锂长石、磷锂铝石等^[6]。我国锂矿物以锂辉石矿和锂云母矿为

主,但原矿 Li₂O 品位低^[7]。国内锂云母矿经济开发难度大,因此锂辉石矿的高效开发利用尤为重要。尽管锂辉石选矿技术在不断更新,但浮选法仍是主导工艺^[8-9]。现有锂辉石浮选技术研究多集中于浮选药剂的研发,而对不同流程方案对比分析研究相对较少^[10-11]。

本文以四川某复杂嵌布低品位锂辉石矿为研究对象,基于矿石性质,通过浮选药剂与工艺的协同优化,比较不同浮选方案的优缺点,从而找到具有优势的工艺流程,为该类型锂辉石矿的矿物浮选加工提供参考。

① 收稿日期: 2024-10-20

基金项目: 中冶集团“181 计划”重大研发项目(YG2474)

作者简介: 康金星(1988—),男,湖南衡阳人,博士,高级工程师,主要从事低品位金属资源选冶加工技术研究。E-mail: kangjx88@126.com

1 矿石性质及试验方法

1.1 矿石性质

试样取自四川某稀有金属矿床的伟晶岩型锂辉石矿,原矿化学多元素分析结果见表1,矿物组成及含量如表2所示,Li₂O在含锂矿物中的分布情况见表3。从表1可知,试样中Li₂O品位1.26%,伴生金属铍钽铌锡等含量不高,回收的目的金属主要是锂。由表2~3可知,锂主要以锂辉石形式存在;矿石中主要伴生金属矿物为绿柱石、褐铁矿等,脉石矿物主要为石英、长石类和云母类等。锂辉石矿物结构特征表明,锂辉石矿物大部分呈粗粒的板状、柱状,与钠长石、白云母和石英等脉石矿物紧密共生,有部分脉石矿物呈微细粒充填在锂辉石矿物颗粒内;另有少量锂辉石以微细粒不规则状嵌布于脉石矿物中。

表1 试样主要化学成分分析结果(质量分数)

Li ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Cs ₂ O	Rb ₂ O	MgO
1.26	15.63	72.55	0.42	2.73	3.66	0.007 3	0.080	0.12
Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	BeO	TFe	Mn	TiO ₂	Sn	S	P ₂ O ₅
0.005 8	0.006 5	0.050	1.03	0.10	0.047	0.015	0.013	0.27

表2 矿物组成及含量(质量分数)

锂辉石	锂绿泥石	磷锂铝石	绿柱石	褐铁矿	石英
15.12	1.02	0.21	0.30	0.60	30.20
钠长石	钾长石	白云母	黑云母	其他	合计
27.30	10.20	10.40	2.60	2.05	100.00

表3 Li₂O在含锂矿物中的分布情况

赋存方式	Li ₂ O含量(质量分数)%	Li ₂ O分布率/%
锂辉石中Li ₂ O	1.202	95.11
锂绿泥石中Li ₂ O	0.031	2.46
磷锂铝石中Li ₂ O	0.020	1.61
白云母中Li ₂ O	0.010	0.82

1.2 试验方法

将原矿破碎至-2 mm,混匀后,采用球磨机磨矿,每次磨矿试样500 g,磨矿浓度(质量分数)66%;浮选在XFD系列浮选机中进行。浮选产品经烘干、称重、制样后分析Li₂O品位,计算浮选回收率。试验用调整剂氢氧化钠、碳酸钠、氯化钙均为分析纯,其他药剂为

工业级药剂;EF1117为中国恩菲工程技术有限公司自主研发的药剂,它由多种不同链长脂肪酸及其盐为主要组分、辅以少量油-水乳化剂复合构效配制而成。试验设备包括XMQ系列球磨机、XFD系列浮选机等。

2 浮选条件试验

2.1 捕收剂种类及用量试验

锂辉石矿物的选择性浮选主要通过调整剂和捕收剂实现。采用碳酸钠+氢氧化钠+氯化钙组合调整剂,在磨矿细度-0.074 mm粒级占70%条件下,依序进行了各调整剂的单因素条件试验,经优化得到了碳酸钠用量2 500 g/t(加入磨机中)、氢氧化钠用量400 g/t、氯化钙用量100 g/t的药剂制度。而后,在此调整剂药剂制度条件下,考察了含羧基(氧化石蜡皂731、油酸)、磺酸基(十二烷基磺酸钠SDS)、砷酸基(苄基砷酸钠)、羟肟基(烷基羟肟酸)、膦酸基(苯乙烯膦酸)等活性基团的不同捕收剂对该锂矿石浮选的影响,试验流程见图1,捕收剂种类对锂回收的影响如表4所示。由表4可知,捕收剂EF1117对锂辉石矿物表现出良好的捕收性和选择性,经一次粗选即可获得Li₂O品位4.17%、回收率85.33%的粗精矿。

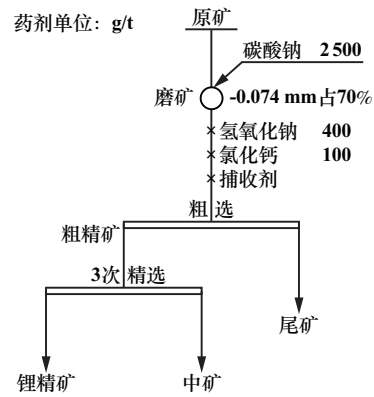


图1 浮选试验流程

Fig. 1 Flowchart of flotation test

表4 捕收剂种类对锂回收的影响

捕收剂种类	捕收剂用量/(g·t ⁻¹)	粗精矿Li ₂ O品位/%	Li ₂ O回收率/%
731	2 000	3.65	79.84
油酸	400	3.17	85.40
731+SDS	1 500+500	3.35	83.44
731+苯乙烯膦酸	1 500+500	4.02	82.17
731+烷基羟肟酸	1 500+500	3.60	82.78
731+苄基砷酸钠	1 500+500	4.23	83.48
EF1117	2 000	4.17	85.33

相同条件下,考察了捕收剂 EF1117 用量对锂回收的影响,结果见表5。从表5可以看出,随着 EF1117 用量增加,粗精矿 Li_2O 回收率增加,但3次精选后的锂精矿 Li_2O 品位呈逐渐降低的趋势。确定适宜的捕收剂 EF1117 用量为 2 000 g/t。

表5 捕收剂 EF1117 用量对锂回收的影响

Table 5 Effect of EF1117 dosage on lithium recovery

EF1117 用量/ ($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$)	粗精矿 Li_2O 品位/%	粗精矿 Li_2O 回收率/%	3次精选锂精矿 Li_2O 品位/%
1 250	4.24	80.24	6.03
1 500	4.21	83.25	5.99
1 750	4.21	86.26	5.97
2 000	4.30	86.99	5.91
2 500	4.33	88.16	5.60

2.2 磨矿细度试验

矿物解离状态与磨矿细度相关,尤其是粗选作业。在调整剂碳酸钠用量 2 500 g/t(加入磨机中)、氢氧化钠用量 400 g/t、氯化钙用量 100 g/t,捕收剂 EF1117 用量 2 000 g/t,考察了粗选磨矿细度对锂回收的影响,结果见图2。由图2可知,粗选磨矿细度由-0.074 mm 粒级占 60% 增加至占 80%, 锂回收率、锂品位均先增加后降低。这可能是磨矿细度不够时,相对粗粒的目的矿物吸附捕收剂的量不足,或因粗粒矿物表面吸附药剂的矿化程度不高,泡沫负载粗粒矿物能力不强,造成部分粗粒矿物未进入泡沫产品而损失;颗粒偏细时,矿石中含有较多的磨矿易泥化矿物,随着粗选磨矿细度增加,产出的细泥量增加,对锂矿物浮选产生负作用。适宜的粗选磨矿细度为-0.074 mm 粒级占 70%, 此时对应的锂辉石矿物单体解离度为 92.6%。

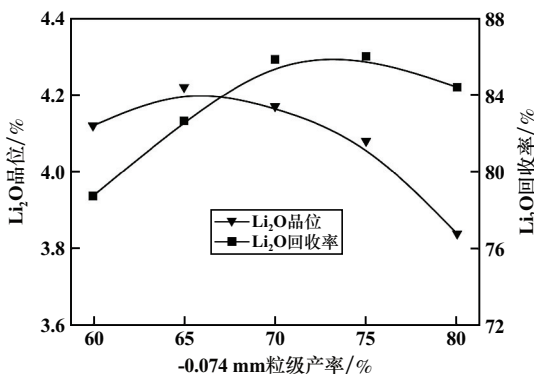


图2 磨矿细度对锂回收的影响

Fig. 2 Effects of grinding fineness on lithium recovery

2.3 浮选综合试验

经单因素实验得到全粒级浮选优化条件为:粗

选磨矿细度-0.074 mm 粒级占 70%, 调整剂碳酸钠用量 2 500 g/t(加入磨机中)、氢氧化钠用量 400 g/t、氯化钙用量 100 g/t, 捕收剂 EF1117 用量 2 000 g/t。再经浮选浓度、浮选时间及精扫选等试验, 论证了粗精矿采用 3 次精选(在精选 1、精选 2、精选 3 时分别添加 500、500、300 g/t 碳酸钠)、2 次扫选的浮选流程。同时, 采用上述浮选剂体系, 对该试验矿石进行了脱泥-浮选条件优化试验, 得到脱泥-浮选优化条件为: 粗选磨矿细度-0.074 mm 粒级占 70%, 调整剂碳酸钠用量 2 500 g/t(加入磨机中), 脱泥后调整剂碳酸钠用量 200 g/t、氢氧化钠用量 200 g/t、氯化钙用量 100 g/t, 捕收剂 EF1117 用量 1 500 g/t, 精、扫选流程与全粒级浮选流程一致。

3 不同流程方案闭路对比试验

在实验室条件下, 进行了 4 种不同流程方案的闭路浮选对比试验, 对应的试验流程分别如图 3~6 所示, 试验结果见表 6。从表 6 可知, 采用方案 1~3 都能得到 Li_2O 品位高于 5.5%、 Li_2O 回收率大于 85% 的锂精矿, 方案 4 分选指标相对较差。与方案 1(常规工艺流程)相比, 方案 2 和方案 3 获得的锂精矿 Li_2O 回收率分别提高了 1.08 和 1.53 百分点; 方案 3 的 Li_2O 回收率最高, 为 86.75%, 但对应的精矿 Li_2O 品位比方案 2 相对低 0.23 百分点, 方案 2 获得的锂精矿 Li_2O 品位达到了 5.76%。方案 4 可能受限于实验室试验条件, 脱泥后所得浮选中矿再磨产生次生细泥而影响了锂的分选指标。

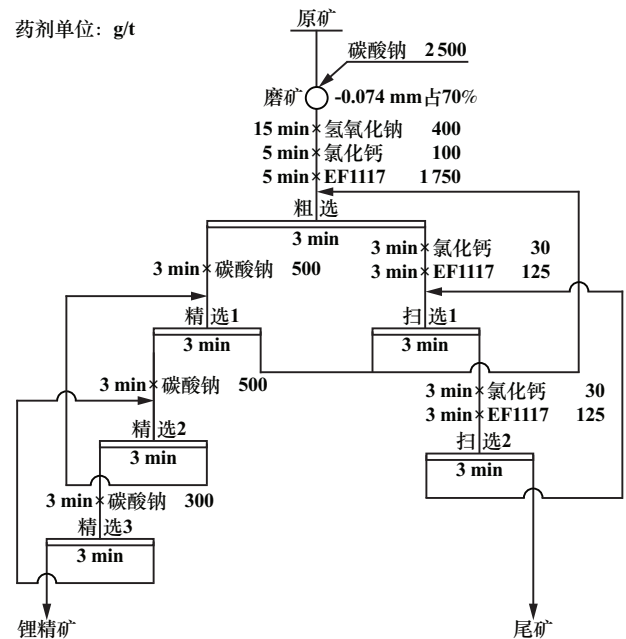


图3 方案1流程

Fig. 3 Flowchart of scheme 1

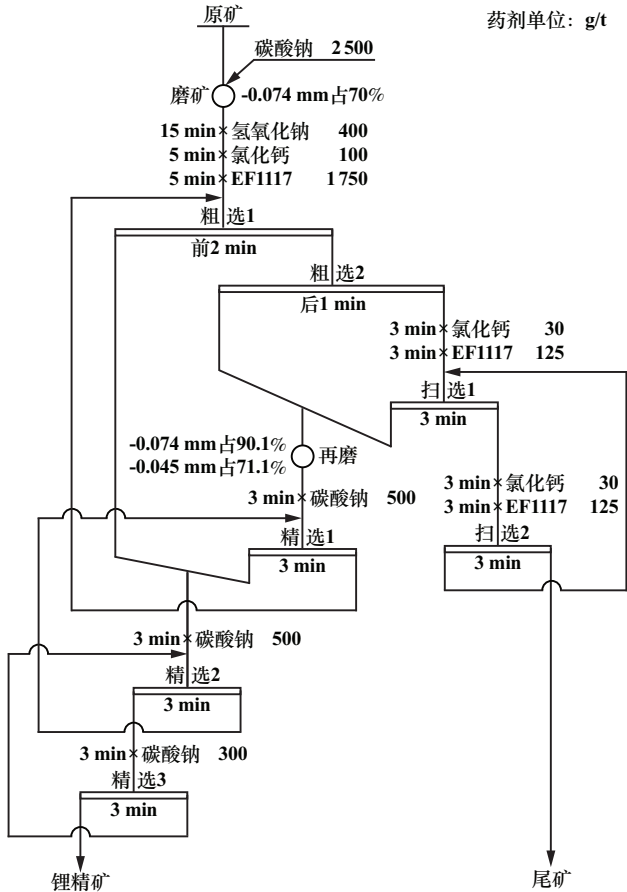


图 4 方案 2 流程

Fig. 4 Flowchart of scheme 2

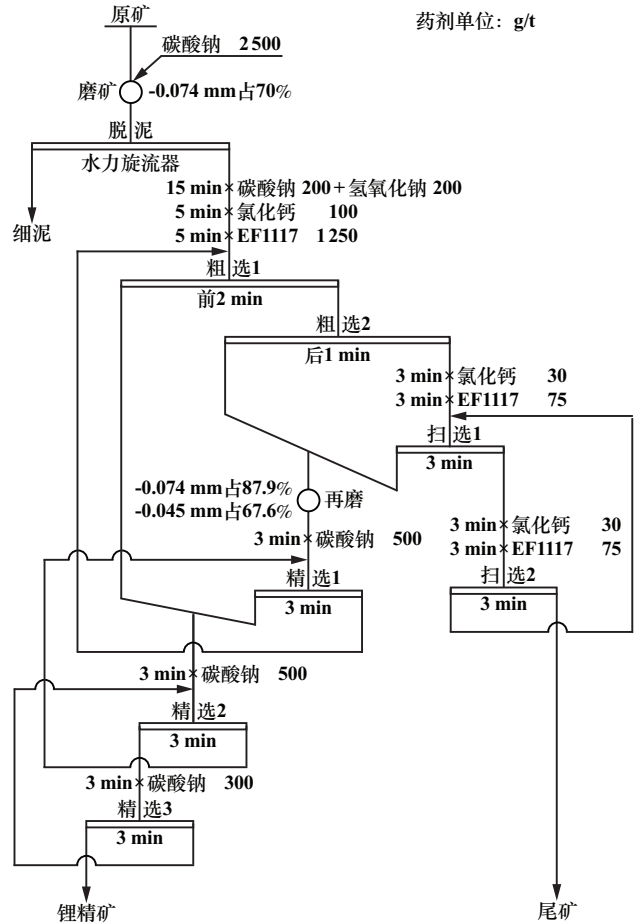


图 6 方案 4 流程

Fig. 6 Flowchart of scheme 4

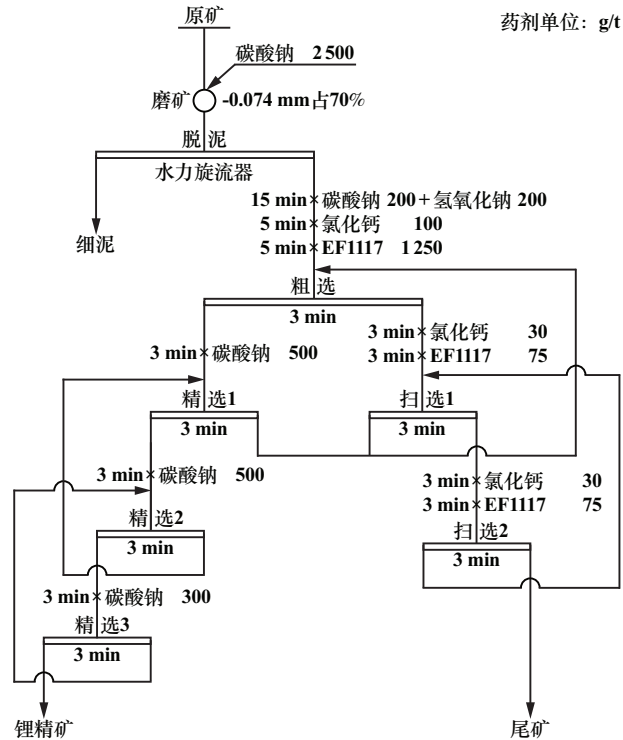


图 5 方案 3 流程

Fig. 5 Flowchart of scheme 3

表 6 闭路试验结果

Table 6 Closed-circuit test results

方案	产品名称	产率/%	Li ₂ O 品位/%	Li ₂ O 回收率/%
1	锂精矿	19.28	5.56	85.22
	尾矿	80.72	0.23	14.78
	原矿	100.00	1.26	100.00
2	锂精矿	18.68	5.76	86.30
	尾矿	81.32	0.21	13.70
	原矿	100.00	1.25	100.00
3	细泥	6.01	0.81	3.85
	锂精矿	19.81	5.53	86.75
	尾矿	74.18	0.16	9.40
4	细泥	5.94	0.84	3.94
	锂精矿	20.01	5.38	84.96
	尾矿	74.05	0.19	11.10
	原矿	100.00	1.27	100.00

各工艺流程方案各有优、缺点,不同流程方案的优缺点对比见表 7。对比分析可见,方案 1 的优势在于:流程结构简单,便于现场管理与维护,设备投资费用相对较低;但该方案存在对矿物细泥的走向控制不佳、易

造成磨浮粗选回路处理量大、且浮选捕收剂消耗大等缺陷。方案2的优势主要有:快速浮出部分易浮锂辉石矿物颗粒,以相对慢浮含锂矿物所得中矿泡沫产品再磨再选,有利于提高复杂嵌布矿物的解离效率,同时慢浮中矿经再磨再选后尾矿再循环返回粗选,还能有效缓解粗选不当积压中矿的现象,继而增强目的矿物分选的选择性,提高粗选分选效率;该方案的不足在于,流程结构复杂,需配置中矿再磨系统,并配备多段

矿浆流的分支分导管路系统,生产设备的投资成本相对更高。方案3的优势在于:预先脱泥后再浮选,流程结构简单,现场管理与维护方便,通过物理方法预先脱除部分细泥,减少细泥对锂浮选分离系统的不当影响,其药剂消耗量低,相对于全粒级浮选流程捕收剂用量降低约30%;其不足在于锂浮选分离指标的好坏取决于脱泥效果的好坏,且脱泥过多时细泥损失锂较多。

表7 各浮选流程方案优缺点对比

Tabel 7 Comparison of advantages and disadvantages of flotation processes

方案	流程内容	优点	缺点
1	全粒级浮选-中矿顺序返回	1) 流程相对简单,便于现场管理与维护 2) 投资费用相对较低	1) 磨浮系统处理量大 2) 药剂消耗量大
2	全粒级浮选-中矿再磨	1) 优先浮出部分高品质易浮锂辉石,以相对慢浮含锂矿物的中矿再磨再选,对矿物有效解离及精细化调控浮选有利 2) 快浮出部分粗精矿产品,中矿经再磨再选后尾矿再循环返回至粗选作业,可缓解粗选作业的处理压力	1) 流程相对复杂,需中矿再磨,及多矿浆流分支分导系统 2) 投资费用相对较高 3) 浮选剂消耗量较大
3	脱泥-浮选-中矿顺序返回	1) 流程相对简单,现场管理与维护方便 2) 减少细泥影响,药剂用量相对较低,锂回收指标相对较好 3) 投资费用相对较低	脱泥效果的好坏对浮选指标及系统稳定影响较大
4	脱泥-浮选-中矿再磨	1) 药剂用量相对较低 2) 可快速浮出部分粗精矿,缓解粗选作业压力	1) 流程复杂,需脱泥并配备中矿再磨系统 2) 脱泥后中矿再磨难控制,次生细泥易影响浮选效果

综上所述,对于从复杂矿物嵌布的低品位锂辉石矿中浮选回收锂辉石矿物,经全粒级浮选与脱泥-浮选工艺方案的对比研究发现,除考虑提高Li₂O回收率指标外,从矿物有效解离控制、磨浮系统适应性的角度出发,推荐采用方案2(两粗两扫三精全粒级浮选-中矿再磨),该工艺闭路浮选获得了Li₂O品位5.76%、Li₂O回收率86.30%的锂精矿;从减少浮选药剂消耗、规避细泥影响角度出发,推荐方案3(脱泥-一粗二扫三精浮选-中矿顺序返回),该方案闭路浮选获得了Li₂O品位5.53%、Li₂O回收率86.75%的锂精矿。

4 结论

1) 试验用锂原矿Li₂O品位为1.26%,为低品位锂辉石矿;矿石中含锂矿物绝大多数为锂辉石矿物,其与脉石矿物呈多相矿物集合体,有部分锂矿物与脉石矿物互含并呈微细粒被包裹结构,致使含锂矿物磨矿高效解离与选择性浮游分离难度大。

2) 3种浮选流程可从该锂矿石中浮选获得Li₂O品位高于5.5%、Li₂O回收率高于85%的锂精矿;相对于常规的全粒级浮选-中矿顺序返回浮选工艺流程(方案1),采用全粒级浮选-中矿再磨浮选工艺流程(方案2)和脱泥-浮选-中矿顺序返回工艺流程(方案3)所得锂精

矿中Li₂O回收率分别提高了1.08和1.53个百分点,其中,又以脱泥-浮选-中矿顺序返回工艺流程(方案3)获得的Li₂O回收率最高(86.75%),以全粒级浮选-中矿再磨浮选工艺流程(方案2)获得的锂精矿Li₂O品位最高(5.76%)。

3) 除考虑Li₂O回收率指标外,从矿物有效解离控制、磨浮系统适应性的角度出发,推荐采用两粗两扫三精全粒级浮选-中矿再磨的浮选工艺流程(闭路试验获得了Li₂O品位5.76%、Li₂O回收率86.30%的锂精矿);从减少浮选药剂消耗、规避细泥影响角度出发,推荐采用脱泥-一粗二扫三精浮选-中矿顺序返回的浮选工艺流程(闭路试验获得了Li₂O品位5.53%、Li₂O回收率86.75%的锂精矿)。

参考文献(References):

- [1] 孟禄超,陈庆荣,吴春桃,等. 锂离子电池Li₂FeP₂O₇正极材料的制备及其电化学性能[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):136-139.
MENG Luchao, CHEN Qingrong, WU Chuntao, et al. Preparation and electrochemical performance of Li₂FeP₂O₇ as cathode materials for lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):136-139.
- [2] KORBEL C, FILLIPPOVA I, FILLIPPOV L. Froth flotation of lithium mica: A review[J]. Minerals Engineering, 2023,192:107986.

- [3] 刑凯,朱清,任军平,等. 全球锂资源特征及市场发展态势分析[J]. 地质通报, 2023,42(8):1402-1421.
XING Kai, ZHU Qing, REN Junping, et al. Research on the characteristics and market development trend of global lithium resources[J]. Geological Bulletin of China, 2023,42(8):1402-1421.
- [4] 王核,黄亮,白洪阳,等. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状:评述和展望[J]. 大地构造与成矿学, 2022,46(5):848-866.
WANG He, HUANG Liang, BAI Hongyang, et al. Types, distribution, development and utilization of lithium mineral resources in China: Review and perspective[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022,46(5):848-866.
- [5] 孔会磊,李文渊,任广利,等. 伟晶岩型锂矿床研究现状及其在中国西部的找矿前景[J]. 西北地质, 2023,56(1):11-30.
KONG Huilei, LI Wenyuan, REN Guangli, et al. Research status of pegmatite-hosted Li deposits and their exploration prospect in west China[J]. Northwestern Geology, 2023,56(1):11-30.
- [6] WANG W N, PAN M, DUAN C L, et al. Dry deep screening of spodumene and its mineral processing technology[J]. Minerals Engineering, 2022,179:107445.
- [7] 汪泰,邹坚坚,王威,等. 伟晶岩型锂辉石矿碱溶蚀-浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):57-60.
WANG Tai, ZOU Jianjian, WANG Wei, et al. Test on pegmatite spodumene ore with alkali dissolution and flotation process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):57-60.
- [8] COOK B K, GIBSON C E. A review of fatty acid collectors: Implications for spodumene flotation[J]. Minerals, 2023,13(2):212.
- [9] 赵志辉,谢瑞琦,童雄,等. 硬岩型锂辉石浮选药剂研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2023,32:1492-1503.
ZHAO Zhihui, XIE Ruiqi, TONG Xiong, et al. Research progress on flotation reagents for hard rock type spodumene[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023,32:1492-1503.
- [10] 周贺鹏. 微细粒锂辉石聚团浮选特性及矿物表面反应机理[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
ZHOU Hepeng. Agglomeration flotation characteristics of micro-fine spodumene and the reaction mechanism on mineral's surface[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [11] 赵悦豪,王毓华,郑海涛,等. 四川某锂辉石矿磨矿产品粒级优化试验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(1):49-53.
ZHAO Yuehao, WANG Yuhua, ZHENG Haitao, et al. Optimization of particle size distribution of grinding products of spodumene ore from Sichuan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(1):49-53.
- 引用本文:康金星,王鑫,姜志学,等. 复杂嵌布低品位锂辉石矿浮选工艺的方案比较[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):102-107.
KANG Jinxing, WANG Xin, JIANG Zhixue, et al. Comparison of flotation schemes for low-grade spodumene ore with complex mineral dissemination[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):102-107.

(上接第101页)

- [8] 徐晓衣,王丰雨,张超达,等. 螺旋溜槽回收某细粒级钛铁矿的试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):45-48.
XU Xiaoyi, WANG Fengyu, ZHANG Chaoda, et al. Optimization of gravity separation flowsheet with spiral chute for collecting fine ilmenite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):45-48.
- [9] 张元军. SLon磁选机分选超细粒级钛铁矿的试验研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2009.
ZHANG Yuanjun. Research on the tiny particle ilmenite experiment by SLon magnetic separator[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2009.
- [10] 李丽匣,申帅平,袁致涛,等. 微细粒钛铁矿磁选回收率低原因分析[J]. 中国矿业, 2018(11):138-144.
LI Lixia, SHEN Shuaiping, YUAN Zhitao, et al. Loss mechanism of fine-grained ilmenite in magnetic separation[J]. China Mining Magazine, 2018(11):138-144.
- [11] 刘能云,陈超,张裕书,等. 从尾矿中回收钛铁矿的试验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(1):65-68.
LIU Nengyun, CHEN Chao, ZHANG Yushu, et al. Experimental study on recovery of ilmenite from tailings[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(1):65-68.
- 引用本文:吴雪红,王洪彬,安登极,等. 低浓度微细粒级钛铁矿高效回收工艺对比探析[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):97-101.
WU Xuehong, WANG Hongbin, AN Dengji, et al. Comparative analysis of efficient recovery processes of low-concentration fine-grained ilmenite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):97-101.