

## 新疆某伟晶岩型锂辉石矿浮选实验研究

程仁举, 李成秀, 刘星, 王越, 蒋朋

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心, 自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川省稀土技术创新中心, 四川 成都 610041)

**摘要:** 这是一篇矿物加工工程领域的论文。新疆某锂辉石矿  $\text{Li}_2\text{O}$  品位为 1.04%, 含锂矿物主要为锂辉石、含锂白云母及磷锂铝石, 脉石矿物主要有石英、钠长石和钾长石。该矿石在磨矿细度-0.074 mm 79.4% 的条件下, 采用自主开发的捕收剂 EM-PN51, 经一粗一扫三精的浮选闭路流程, 最终获得  $\text{Li}_2\text{O}$  品位 5.36%、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$  含量 0.071%、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  含量 0.044% 的含铌钽锂精矿,  $\text{Li}_2\text{O}$  回收率为 87.38%,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  回收率为 87.33%、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  回收率为 88.26%, 实现了该锂辉石矿中多种有价组分的综合回收。

**关键词:** 矿物加工工程; 锂辉石; 浮选; 捕收剂; 综合回收

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.014

中图分类号: TD955 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)04-0088-07

锂及其化合物在国民经济和国防建设中具有重要的战略意义, 其作为一种重要的战略资源而备受各国重视, 已被多个国家和组织列为“关键矿产”, 被誉为 21 世纪推动世界前进的元素<sup>[1]</sup>。近年来除了在玻璃、陶瓷、橡胶等传统领域应用外, 更广泛的应用于动力电池和其他储能领域<sup>[2]</sup>。我国锂辉石矿资源储量丰富, 目前主要分布在四川、新疆、江西等地<sup>[3-4]</sup>。但目前开发利用不足, 国内锂盐生产所需的锂精矿高度依靠进口, 产品主要进口澳大利亚的锂辉石矿精矿, 国内锂原料对外依存度高达 80% 以上, 为国内新能源等相关产业的发展带来一定的原料供应风险<sup>[5]</sup>。

新疆是我国重要的稀有金属资源集中区, 包含锂、铍、铌、钽等矿种, 近几年, 多家地勘单位在南疆地区开展了大量地质勘查工作, 在锂铍等稀有资源方面取得了新的找矿突破<sup>[6]</sup>。截至目

前, 该地区已发现 2000 余条伟晶岩脉, 已发现 8 处锂铍矿产地, 分别为阿克塔斯、阿克萨依、卡拉喀、509 道班西、505、507、俘虏沟南 1 号和俘虏沟南 2 号<sup>[7-8]</sup>。该地区地质找矿取得了重大突破, 但资源综合利用技术和资源的可利用性评价工作尚属空白, 亟待开展该地区锂多金属矿的综合利用技术攻关。常用的锂辉石矿选别方法有: 浮选法、重介质选矿法和联合选矿法等<sup>[9-11]</sup>。本研究针对新疆某锂辉石矿开展了浮选实验研究, 取得了较好的分选指标。

## 1 实验样品与方法

### 1.1 实验样品

本研究样品取自新疆大红柳滩锂矿矿区, 首先开展了矿石性质研究。原矿化学多元素分析结果见表 1。

表 1 原矿化学多元素分析结果/%

Table 1 Main chemical components analysis of the ore sample

$\text{Li}_2\text{O}$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	BeO	$\text{SiO}_2$	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	TFe	FeO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	MnO	CaO	Sn	S
1.04	0.0139	0.0085	0.069	71.95	0.038	15.34	0.29	0.19	3.75	3.80	0.97	0.09	0.43	0.21	<0.01

收稿日期: 2022-11-17

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目 (DD20221697); 中国地质科学院矿产综合利用研究所基金项目 (S2001); 四川省科技计划项目 (2022YFS0509)

作者简介: 程仁举 (1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 矿物加工工程专业, 研究方向为锂矿综合利用研究及全球锂资源调查与评价工作。

为了全面、准确地确定矿石中其他矿物的种类，对原矿进行了X射线衍射分析，样品X射线衍射分析结果见图1。检测得知矿石中的主要矿物

为钾长石、钠长石、石英、锂辉石、白云母等。然后进行了原矿的AMICS自动化矿物分析(图2)，确定了矿石中矿物组成及含量。

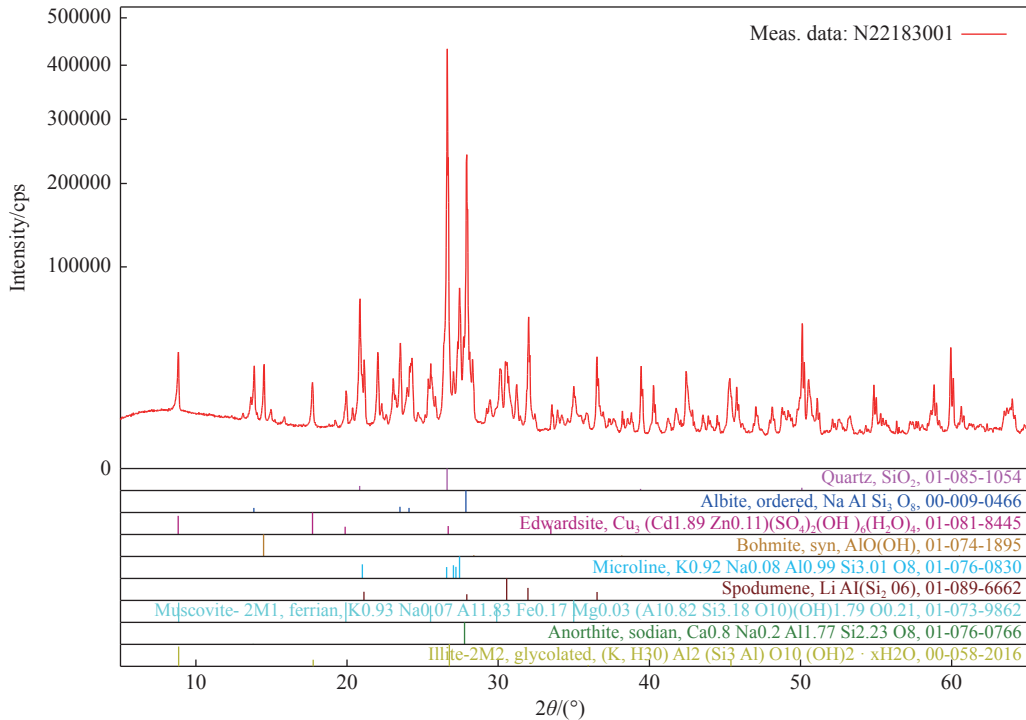


图1 原矿 XRD  
Fig.1 Results of XRD

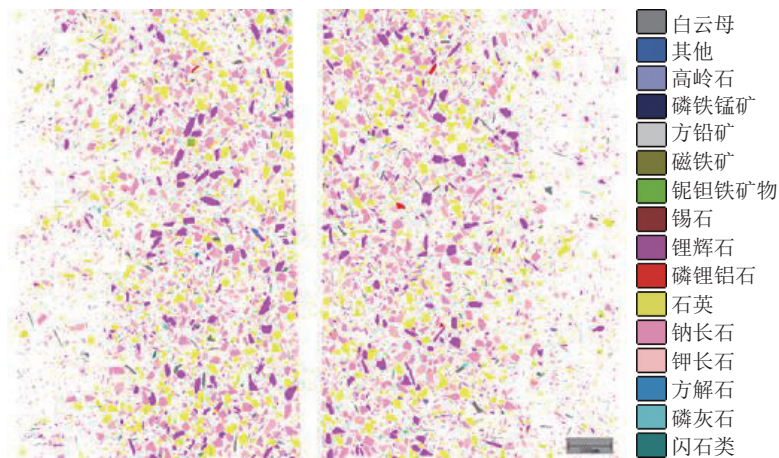


图2 原矿 AMICS 分析  
Fig.2 AMICS analysis of the ore samples

通过原矿化学多元素分析及工艺矿物学研究结果可知，该矿为伟晶岩型锂多金属矿，伴生有价元素主要为铌、钽、锡、铍，可考虑综合回收，其是否能经济综合利用还需通过进一步的工艺矿物学和选矿实验研究确定。矿石中的含锂矿物主要为锂辉石、含锂白云母及磷锂铝石，矿物

量分别为 13%、11.5% 及 0.85%。脉石矿物主要为石英、钠长石和钾长石，矿物量分别为 34.5%、21.3%、15.7%，此外还有微量的磷灰石、黏土矿物、碳酸盐矿物等。金属矿物含量极低，不足矿物总量的 0.5%，有铌钽矿物、锡石等，含量分别为 0.05% 及 0.22%。

### 1.2 实验方法

采用 Rigaku Ultima IVX 射线衍射仪分析矿样矿物组成，采用 Sigma300 扫描电子显微镜开展矿样 AMICS 自动化矿物分析。实验浮选机采用 XFD-IV 型单槽浮选机，规格有 3、1.5 和 0.75 L。磨机为 XMQ-φ240×90 mm 锥形球磨机。实验使用的 NaOH 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 均为分析纯，捕收剂 EM-PN10 和 EM-PN51 为我所自主开发的新型高效锂矿捕收剂。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 磨矿细度实验

合理的磨矿细度是矿物实现有效分选的关键。该矿由于铌钽含量很低，且在浮选过程中随锂辉石一起进入锂精矿，该矿以回收锂辉石为主，铌钽矿物仅作为伴生组分考虑其综合回收。因此磨矿细度的选择应该以锂为主，在确保锂回收的前提下，适当地选择较粗的磨矿细度，以降低铌钽矿物的过磨。

磨矿细度实验流程及条件见图 3，实验结果见图 4。

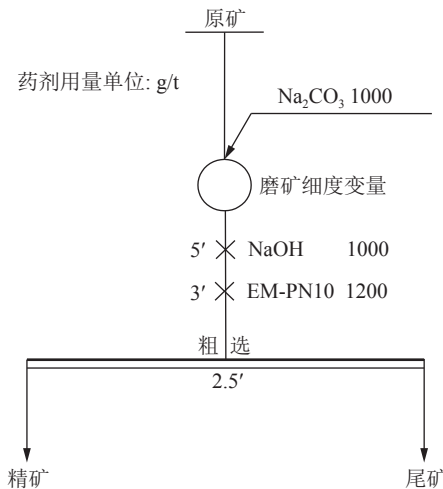


图 3 磨矿细度实验流程  
Fig.3 Flowsheet of grinding fineness test

由图 4 实验结果可知，当磨矿细度由-0.074 mm 52.3% 增加到 87.1%，精矿 Li<sub>2</sub>O 回收率基本呈递增趋势，而 Li<sub>2</sub>O 品位则先增加后降低。当磨矿细度-0.074 mm 含量为 79.4% 时，精矿 Li<sub>2</sub>O 的回收率为 86.99%，继续细磨，精矿 Li<sub>2</sub>O 的品位和回收率均降低，且细磨后浮选泡沫发粘。因此，确定适宜的磨矿细度为-0.074 mm 79.4%，此时，精矿 Li<sub>2</sub>O 品位为 3.27%，回收率为 86.99%。

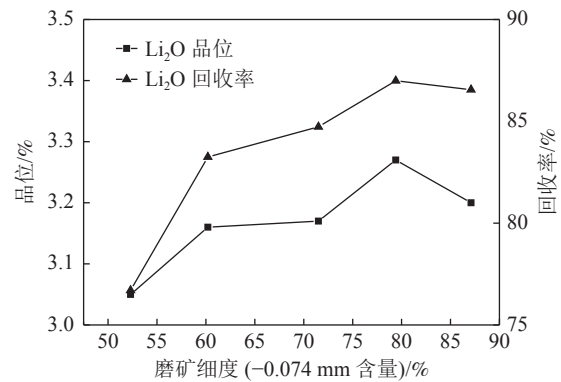


图 4 磨矿细度实验结果  
Fig.4 Results of grinding fineness test

### 2.2 粗选 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量实验

碳酸钠作为锂辉石浮选常用的调整剂，主要用于擦洗锂辉石表面的杂质污染及对石英、长石类矿物的选择性抑制。在锂辉石浮选过程中常需要长时间搅拌，因此将其加入磨机，保证足够的擦洗强度和作用时间，是一种常用的处理手段。相对于浮选过程中的长时间搅拌，将其加入磨机，往往可起到更好的实验效果。

实验固定条件：磨矿细度-0.074 mm 79.4%，NaOH 用量 1000 g/t，EM-PN10 用量 1200 g/t。变更磨矿阶段 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量进行实验，实验流程见图 5，实验结果见图 6。

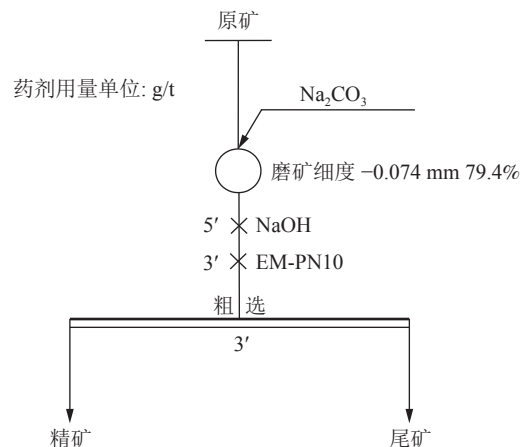


图 5 粗选条件实验流程  
Fig.5 Flowsheet for condition test of roughing

由碳酸钠用量实验结果可知，当 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量从 500 g/t 增加到 3000 g/t 时，精矿 Li<sub>2</sub>O 品位由 2.11% 增加到了 4.15%，Li<sub>2</sub>O 回收率由 91.96% 降低至 57.23%。综合考虑精矿 Li<sub>2</sub>O 品位及回收率指标，确定适宜的 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量为 1000 g/t，此时，精矿的 Li<sub>2</sub>O 品位为 3.27%，回收率为 86.93%。

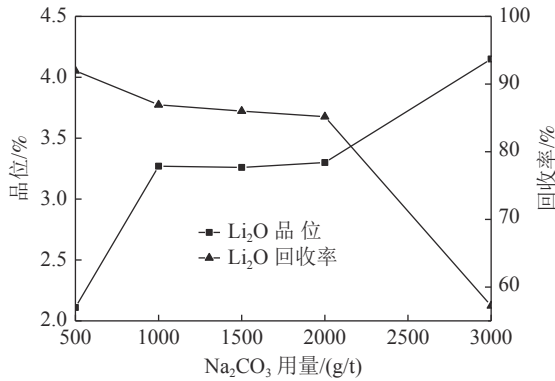


图6 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量实验结果  
Fig.6 Results of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dosage test

### 2.3 粗选 NaOH 用量实验

NaOH 常作为锂辉石浮选的调整剂，粗选 NaOH 用量实验流程见 图 5，其中 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量 1000 g/t，EM-PN10 用量 1200 g/t，变更粗选 NaOH 用量进行实验。实验结果见 图 7。

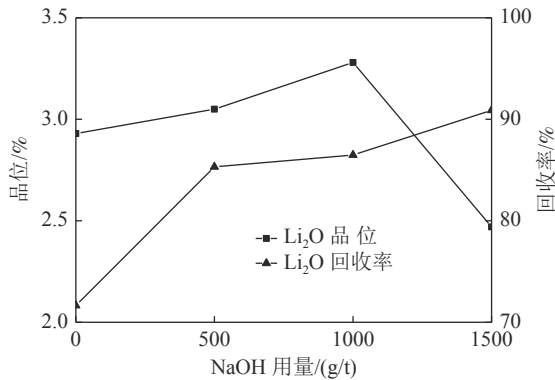


图7 NaOH 用量实验结果  
Fig.7 Results of NaOH dosage test

粗选氢氧化钠用量实验结果表明，随着 NaOH 用量的增加，精矿产率逐渐增加，精矿 Li<sub>2</sub>O 品位先增后减，回收率逐渐增加。综合考虑，当 NaOH 用量为 1000 g/t 时，精矿 Li<sub>2</sub>O 品位为 3.28%，回收率为 86.48%，分选指标相对较优，因此，确定适宜的粗选 NaOH 用量为 1000 g/t。

### 2.4 捕收剂对比实验

选择性能和捕收性能均较好的锂矿捕收剂是实现锂辉石与脉石矿物分选的关键，因此，本研究选取了几种目前市面上常用的锂矿捕收剂（本着科学公正研究原则，对其进行了代号处理，分别为 1#捕收剂，9#捕收剂和 30#捕收剂）和自主研发的两种捕收剂进行了捕收剂对比实验研究，为了更好考察药剂的捕收性能，将捕收剂用量统一由 1200 g/t 调整至 1000 g/t。

实验条件：磨矿细度-0.074 mm 79.4%，Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量 1000 g/t，NaOH 用量 1000 g/t。实验流程见图 8，实验结果见表 2。

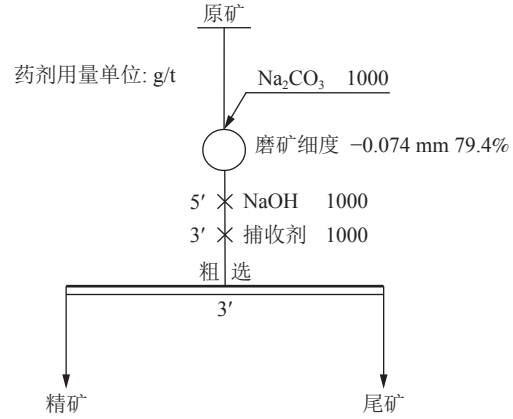


图8 捕收剂对比实验流程  
Fig.8 Flowsheet for collector comparison test

表2 捕收剂对比实验结果

Table 2 Results of collector comparison test

捕收剂种类	产品名称	产率/%	Li <sub>2</sub> O品位/%	Li <sub>2</sub> O回收率/%
1#捕收剂	精矿	48.10	1.86	86.89
	尾矿	51.90	0.26	13.11
9#捕收剂	原矿	100.00	1.03	100.00
	精矿	20.42	3.76	75.09
30#捕收剂	尾矿	79.58	0.32	24.91
	原矿	100.00	1.02	100.00
EM-PN10	精矿	23.21	3.73	84.30
	尾矿	76.79	0.21	15.70
EM-PN51	原矿	100.00	1.03	100.00
	精矿	27.51	3.35	87.00
EM-PN51	尾矿	72.49	0.19	13.00
	原矿	100.00	1.06	100.00
EM-PN51	精矿	26.36	3.44	87.87
	尾矿	73.64	0.17	12.13
EM-PN51	原矿	100.00	1.03	100.00

由表 2 五种捕收剂对比实验结果可知，1#捕收剂的选择性能较差，9#捕收剂的捕收性能较差，30#捕收剂虽然选择性能较好，一段粗选 Li<sub>2</sub>O 品位可选到 3.73%，但捕收性能比 EM-PN51 略差，进一步实验发现，增加用量后，其粗选 Li<sub>2</sub>O 品位明显降低。综合来看，EM-PN51 的捕收性能和选择性能更均衡，一段粗选尾矿可降至 0.17%，精矿 Li<sub>2</sub>O 回收率为 87.87%。确定采用 EM-PN51 作为该矿浮选捕收剂。

### 2.5 捕收剂 EM-PN51 用量实验

针对确定的浮选捕收剂 EM-PN51 进行了粗选用量条件实验。实验条件为磨矿细度-0.074 mm

79.4%，Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 用量 1000 g/t，NaOH 用量 1000 g/t。

实验流程见 图 9，实验结果见图 10。

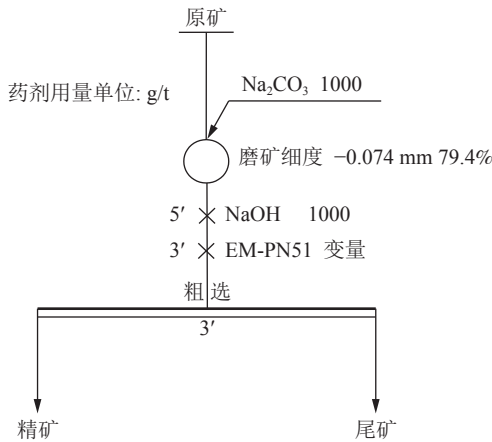


图 9 捕收剂用量实验流程  
Fig.9 Flowsheet for collector dosage test

粗选 EM-PN51 用量实验结果表明，随着 EM-PN51 用量由 600 g/t 增加至 1500 g/t，精矿 Li<sub>2</sub>O 品位由 3.85% 降至 3.34%，回收率由 78.55% 增加到 89.35%。综合考虑，确定适宜的 EM-PN51 用量

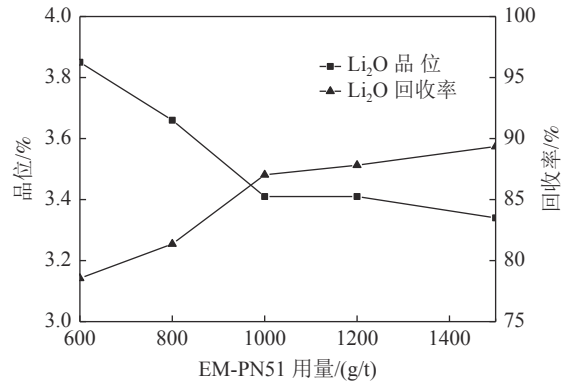


图 10 EM-PN51 用量实验结果  
Fig.10 Results of EM-PN51 dosage test

为 1000 g/t，此时，精矿 Li<sub>2</sub>O 品位为 3.41%，Li<sub>2</sub>O 回收率为 87.03%。

### 2.6 闭路实验及指标

在条件实验的基础上，进行了新疆某锂辉石矿浮选闭路实验。中矿依次返回，根据实验现象及经验相应地调整了浮选药剂制度。闭路实验流程及条件见图 11，实验结果见表 3。

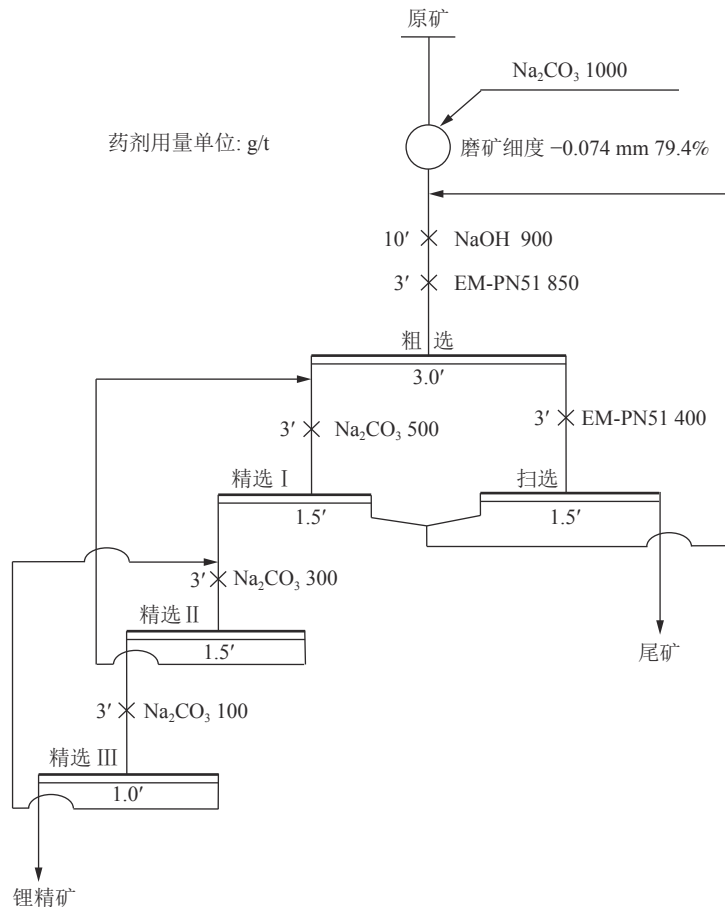


图 11 浮选闭路实验流程  
Fig.11 Flowsheet of closed-circuit flotation test

表3 闭路实验结果  
Table 3 Results of closed-circuit flotation test

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Li <sub>2</sub> O	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Li <sub>2</sub> O	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
锂精矿	17.13	5.36	0.0710	0.0440	87.38	87.33	88.26
尾矿	82.87	0.16	0.0021	0.0012	12.62	12.67	11.74
原矿	100.00	1.05	0.0139	0.0085	100.00	100.00	100.00

闭路实验结果表明，针对 Li<sub>2</sub>O 品位 1.05%，含 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.0139%，含 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.0085% 的新疆某锂辉石矿，在磨矿细度-0.074 mm 79.4% 的条件下，采用自主开发的锂辉石捕收剂 EM-PN51，经一粗一扫三精的浮选闭路流程，最终获得了 Li<sub>2</sub>O 品位 5.36%、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 0.071%、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 0.044% 的含铌钽锂精矿，Li<sub>2</sub>O 回收率为 87.38%，Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 回收率为 87.33%、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 回收率为 88.26%，实现了该锂辉石矿中多种有价值组分的综合回收。

### 3 结论

(1) 通过多种分析检测手段，确定该矿石为锂多金属矿，其 Li<sub>2</sub>O 品位为 1.04%。含锂矿物主要为锂辉石、含锂白云母及磷锂铝石，脉石矿物主要有石英、钠长石和钾长石。

(2) 闭路实验结果表明：针对新疆某低品位锂辉石矿，采用自主开发的捕收剂 EM-PN51，在磨矿细度-0.074 mm 79.4% 的条件下，经一粗一扫三精的浮选闭路流程，最终可获得 Li<sub>2</sub>O 品位 5.36%、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 0.071%、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 0.044% 的含铌钽锂精矿，Li<sub>2</sub>O 回收率为 87.38%，Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 回收率为 87.33%、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 回收率为 88.26%，实现了该锂辉石矿中多种有价值组分的综合回收。

### 参考文献：

[1] 李成秀, 程仁举, 刘星. 我国锂辉石矿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.  
[2] 吴西顺, 孙艳, 王登红, 等. 国际锂矿开发的技术现状、革新及展望[J]. 矿产综合利用, 2020(6):110-120.  
WU X S, SUN Y, WANG D H, et al. Research status and prospects of spodumene ore beneficiation technology in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):110-120.  
[3] 李侃, 高永宝, 滕家欣, 等. 新疆和田县大红柳滩一带花岗伟晶岩型稀有金属矿成矿地质特征、成矿时代及找矿方向[J]. 西北地质, 2019(4):206-221.  
LI K, GAO Y B, TENG J X, et al. Metallogenic geological

characteristics, mineralization age and resource potential of the granite-pegmatite-type rare metal deposits in Dahongliutan Area, Hetian County, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2019(4):206-221.

[4] 孙文礼, 马叶情, 宋庆伟. 中国花岗伟晶岩型锂矿特征和研究进展[J]. 地质与勘探, 2021(3):478-496.

SUN W L, MA Y Q, SONG Q W. Characteristics and research progress of granitic pegmatite type lithium deposits in China[J]. Geology And Exploration, 2021(3):478-496.

[5] 程仁举, 李成秀, 刘星, 等. 澳大利亚锂矿山开发利用现状及对中国的启示[J]. 中国矿业, 2021(9):49-53.

CHENG R J, LI C X, LIU X, et al. Development and utilization of lithium mines in Australia and its enlightenment to China[J]. China Mining Magazine, 2021(9):49-53.

[6] 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. 地质力学学报, 2022(5):743-764.

WANG D H, DAI H Z, LIU S B, et al. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. Journal of Geomechanics, 2022(5):743-764.

[7] 杜晓飞, 王威, 张雅芳, 等. 新疆锂矿资源分布、矿床类型及找矿方向[J]. 新疆有色金属, 2020(6):1-4.

DU X F, WANG W, ZHANG Y F, et al. Lithium resource distribution, deposit type and prospecting direction in Xinjiang[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2020(6):1-4.

[8] 王记周, 燕洲泉, 徐磊, 等. 新疆大红柳滩地区伟晶岩型锂铍资源潜力分析[J]. 黄金科学技术, 2019(6):802-815.

WANG J Z, YAN Z Q, XU L, et al. Potential evaluation of pegmatite-type lithium-beryllium mineral resources in Dahongliutan, Xinjiang[J]. Gold Science and Technology, 2019(6):802-815.

[9] Tadesse B. -The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: a review[J]. Minerals Engineering, 2019, 131:170-184.

[10] 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):153-157.

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):153-157.

[11] 杨金山, 卿林江, 张建刚, 等. 锂辉石矿的选矿工艺现状与发展趋势[J]. 现代矿业, 2022(2):28-31.

YANG J S, QIN L J, ZHANG J G, et al. Current condition and developing tendency of spodumene beneficiation processing[J]. Modern Mining, 2022(2):28-31.

## Flotation of a Pegmatite Type Spodumene Ore in Xinjiang

Cheng Renju, Li Chengxiu, Liu Xing, Wang Yue, Jiang Peng

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Applied Technology Innovation Center of Rare Earth Resources of Chinese Geological Survey, Sichuan Rare Earth Technology Innovation Center, Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** This is an essay in the field of mineral processing engineering.  $\text{Li}_2\text{O}$  grade of a spodumene ore in Xinjiang is 1.04%. The lithium-containing minerals are mainly spodumene, Lithium-Muscovite and montebrasite. The gangue minerals are mainly quartz, albite and potassium feldspar. Under the condition of grinding finness -0.074 mm content 79.4%, using self-developed collector EM-PN51, the concentrate products with  $\text{Li}_2\text{O}$  grade 5.36%,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  content 0.071%,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  content 0.044% and  $\text{Li}_2\text{O}$  recovery rate 87.38%,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  recovery rate 87.33%,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  recovery rate 88.26% can be obtained by the closed flotation circuit of one-roughing, one-scavenging, three-cleaning. The comprehensive recovery of several valuable components in spodumene ore is realized.

**Keywords:** Mineral processing engineering; Spodumene; Flotation; Collector; Comprehensive recycling

////////////////////////////////////  
(上接第 87 页)

## Re-election of Spodumene from Lithium Processing Tailings in Keeryin, Sichuan

Mei Yajun, Li Xiaoyu, Li Chengxiu, Liu Xing

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Applied Technology Innovation Center of Rare Earth Resources of Chinese Geological Survey, Sichuan Rare Earth Technology Innovation Center, Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** This is an essay in the field of mineral processing engineering. In order to comprehensively evaluate the feasibility of spodumene beneficiation of certain lithium tailings in Sichuan, the mineralogy study of the lithium tailings beneficiation process and the test study of the whole beneficiation process were carried out. Through MLA/AMICS automatic mineral analysis, LA-ICP-MS laser ablation in-situ analysis and other technical means, the mineral composition of the tailings sample and the occurrence state of lithium in the sample were found; On the basis of a series of exploratory tests, the lithium separation process of "grinding-desliming-floating" was determined. For the lithium tailings with a  $\text{Li}_2\text{O}$  grade of 0.51%, the high-efficient spodumene collector EM-PN10 is used to obtain a flotation spodumene concentrate with a  $\text{Li}_2\text{O}$  grade of 4.32% and a  $\text{Li}_2\text{O}$  recovery of 60.23% through a closed flotation process of one roughing, one sweeping and four finishing. After the flotation lithium concentrate is subjected to high-intensity magnetic separation, a spodumene concentrate with a  $\text{Li}_2\text{O}$  grade of 5.07% and a recovery of 59.21% (relative to the raw ore) is finally obtained. The recovery and utilization index of spodumene determined by the test can provide certain technical support for the utilization of this kind of spodumene tailings.

**Keywords:** Spodumene tailings; Mineral processing engineering; Collector; High intensity magnetic separation