川西某锂铌钽铍多金属矿浮选共富集回收试验研究①

刘星[1,2]，李成秀[1,2]，程仁举[1,2]，徐莺[1,2]，蒋朋[1,2]
（1.中国地质科学院矿产综合利用研究所，四川 成都 610041；2.自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心，四川 成都 610041）

摘　要：对川西某锂铌钽铍多金属矿进行了浮选共富集回收试验研究。采用直接磨矿-混合浮选工艺，以自主研制的 EM-PN30 为捕收剂，闭路试验获得了 Li_2O 品位 5.60%、Nb_2O_5品位 0.035%、Ta_2O_5品位 0.015%、BeO 品位 0.138%的含铌钽铍锂精矿，Li_2O 回收率为 85.98%，伴生铌、钽、铍回收率分别为 73.13%、78.33%、52.58%，较好实现了该矿锂铌钽铍多金属综合富集回收，为后续磁选、重选工艺分离铌、钽以及锂、铍创造了条件。

关键词：锂多金属矿；浮选；共富集；锂；铌；钽；铍；花岗伟晶岩；锂辉石
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.015
文章编号：0253-6099(2025)06-0087-04

Experimental Study on Flotation Co-Enrichment Recovery of Lithium-Niobium-Tantalum-Beryllium Polymetallic Ore in Western Sichuan

LIU Xing[1,2], LI Chengxiu[1,2], CHENG Renju[1,2], XU Ying[1,2], JIANG Peng[1,2]
(1. *Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Chengdu* 610041, *Sichuan, China*; 2. *Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu* 610041, *Sichuan, China*)

Abstract: An experimental research on co-enrichment and recovery of multiminerals by flotation process was conducted for a lithium-niobium-tantalum-beryllium polymetallic ore in Western Sichuan. By adopting a process consisting of direct grinding and bulk flotation with self-developed EM-PN30 as a collector, a closed-circuit test produced a lithium-niobium-tantalum-beryllium concentrate grading 5.60% Li_2O, 0.035% Nb_2O_5, 0.015% Ta_2O_5 and 0.138% BeO, with Li_2O recovery of 85.98% and recoveries of other associated niobium, tantalum and beryllium at 73.13%, 78.33% and 52.58% respectively. It is concluded that a comprehensive enrichment and recovery of lithium, niobium, tantalum and beryllium from such polimetallic ore can be actualized, which can provide favorable conditions for the subsequent Nb/Ta separation and Li/Be separation by magnetic or gravity separation process.

Key words: lithium-bearing polymetallic ore; flotation; co-enrichment; lithium; niobium; tantalum; beryllium; granite pegmatite; spodumene

锂作为 21 世纪绿色能源转型的关键战略资源，广泛应用于锂离子电池储能领域。随着全球低碳经济快速发展，锂资源需求量呈现指数级增长。我国锂资源对外依存度长期居高不下，高效开发川西等地区赋存的硬岩型锂辉石矿对保障国家新能源产业安全具有重要意义[1-3]。然而，传统锂辉石浮选工艺聚焦单一锂资源回收，对矿石中共伴生的铌、钽、铍等稀有金属缺乏系统性富集手段，导致资源综合利用水平偏低[4-5]。铌、钽作为高熔点、耐腐蚀的“工业维生素”，在电子、航空等领域具有不可替代性[6]；铍则因其优异的核性能与轻质特性，是核能与航天工业的战略性材料[7-9]。若仅回收锂而忽略其他稀有金属，不仅造成资源浪费，尾矿中残留的铌、钽、铍组分还可能引发环境风险。

目前，针对锂铌钽铍多金属矿的选矿研究多集中

① **收稿日期**：2025-06-20
基金项目：国家重点研发计划(2023YFC2908200)；国家自然科学基金(U24A2097)；四川省科技计划项目(2023YFG0095)；中国地质大调查项目(DD20242002)
作者简介：刘星(1987—)，男，四川乐山人，硕士，副研究员，从事复杂难选冶多金属矿的综合利用技术工艺及浮选药剂研究。E-mail：ly000606xing@126.com

于单一矿种分选,多组分协同回收技术尚不成熟。锂辉石与铌钽矿物(如钽铁矿、铌铁矿)、绿柱石(铍矿物)等存在表面特性与可浮性差异,传统单一浮选流程难以实现多组分同步富集[10-11]。近年来,研究者通过复合抑制剂调控、新型捕收剂开发等手段,在锂与长石、云母等脉石矿物分离方面取得显著进展,但对多金属共伴生体系下矿物界面作用机制及协同回收工艺及药剂的研究仍显不足[12-13]。本文以川西某典型花岗伟晶岩型锂铌钽铍多金属矿为研究对象,通过多金属浮选共富集过程中高效选择性捕收剂研发应用,构建“锂为主、多金属协同富集”的浮选体系,突破传统单一矿种回收模式的技术瓶颈,为复杂多金属矿产资源的高效利用提供参考范式,对推动我国战略性稀有金属资源的综合开发具有一定价值。

1 矿石性质和试验方法

1.1 矿石性质

川西某锂铌钽铍多金属矿化学多元素分析结果见表 1。由表 1 可知,该矿中 Li_2O 为主要可回收元素,伴生有价元素为铌、钽、铍,其中 $Nb_2O_5+Ta_2O_5$ 品位之和为 0.013%、BeO 品位为 0.051%,根据行业标准 DZ/T 0203—2020《矿产地质勘察规范 稀有金属类》,铌、钽、铍品位已达到回收标准,可综合富集回收。Sn、Cs_2O、Rb_2O 品位均未达到综合回收利用标准。有害杂质 TFe(0.93%)、P_2O_5 (0.29%)含量均较低。

表 1 原矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of raw ore %

Li_2O	Nb_2O_5	Ta_2O_5	Sn	BeO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	TFe
1.25	0.009 3	0.003 7	0.022	0.051	72.08	0.047	15.71	0.93
K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO	Rb_2O	CaO	Cs_2O	S	
2.67	3.87	0.29	0.094	0.089	0.36	0.007 4	0.013	

矿石中有用矿物主要为锂辉石,还有微量的钽锰铌铁矿以及极其微量的锡石、黄铁矿等。矿石中脉石矿物以长石类(包括斜长石、钾长石)、石英为主,其次为云母类(包括白云母、黑云母);微量矿物有角闪石、磷灰石、辉石、方解石、白云石、榍石、锆石等矿物。

1.2 试验方法

该矿铌、钽、铍含量较低,且在浮选过程中随锂辉石一起进入粗精矿,因此选矿以回收锂辉石为主,铌、钽、铍矿物作为伴生元素综合利用。条件试验主要考察锂的富集回收,在闭路试验中验证和考察铌、钽、铍混合浮选富集回收情况。条件试验流程如图 1 所示。

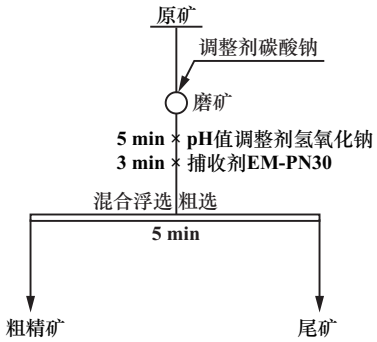


图 1 条件试验流程

Fig. 1 Flowchart for condition test

试验试剂包括调整剂碳酸钠、氢氧化钠(分析纯,成都市科隆化学品有限公司)和捕收剂 EM-PN30。通过锂辉石、铌钽铁矿、绿柱石等靶向矿物表面共性活性金属质点吸附动力学研究,差异化定向组装和改性脂肪酸,选择性扩大锂、铌、钽、铍矿物表面活性位点与捕收剂基团化学吸附焓,有效实现锂、铌、钽、铍多组分混合浮选,并在此基础上调整复配多种表面活性剂,实现药剂泡沫黏性-脆度共轭体系优化,自主研发了锂、铌、钽、铍混合浮选捕收剂 EM-PN30。

矿石破碎至-2 mm,经 XQM-Φ240×90 锥形球磨机磨矿后,采用挂槽式浮选机进行浮选。试验中,磨矿浓度(质量分数)62.5%,浮选机转速 1 650 r/min、充气量 0.4 m^3/h,矿浆温度 13~15 ℃。

2 试验结果与讨论

2.1 粗选条件试验

2.1.1 磨矿细度试验

调整剂碳酸钠(加入磨机,下同)用量 1 000 g/t、pH 值调整剂氢氧化钠用量 700 g/t、捕收剂 EM-PN30 用量 1 500 g/t 条件下,按照图 1 所示流程,考察了磨矿细度对浮选指标的影响,结果见图 2。随着磨矿细度增加,粗精矿锂回收率增加,锂品位在 4.0%~4.2%

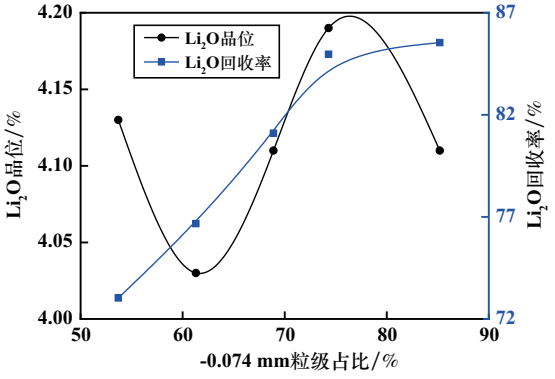


图 2 磨矿细度对粗选指标的影响

Fig. 2 Effect of grinding fineness on roughing indicators

之间波动。-0.074 mm 粒级占 74.3%时，粗精矿 Li_2O 回收率为 84.97%；继续增加磨矿细度，粗精矿 Li_2O 回收率仅略有增加，但 Li_2O 品位明显降低。综合考虑，确定适宜的磨矿细度为-0.074 mm 粒级占 74.3%。

2.1.2　碳酸钠用量试验

碳酸钠是锂辉石浮选常用的调整剂，主要用于调节浮选矿浆 pH 值和擦洗锂辉石表面的污染杂质。目前锂辉石浮选碳酸钠常用的加药点有 3 个：一是加入磨机；二是加入搅拌桶；三是部分加入磨机、部分加入搅拌桶。根据矿石性质并结合以往大量的锂辉石浮选研究经验，采用将碳酸钠加入磨机的方式，可以利用磨矿阶段长时间擦洗来促进碳酸钠尽早地作用于矿石新鲜解理面，增强药剂的作用效果。

按照图 1 所示流程，磨矿细度-0.074 mm 粒级占 74.3%，其他条件不变，考察了碳酸钠用量对粗选指标的影响，结果见图 3。碳酸钠在锂辉石浮选过程中主要起到抑制脉石矿物的作用，随着碳酸钠用量增加，粗精矿 Li_2O 品位逐渐升高，Li_2O 回收率先增加后小幅降低。不添加碳酸钠时，粗精矿 Li_2O 品位和回收率都很低，碳酸钠用量 1 000 g/t 时，粗精矿 Li_2O 品位和回收率分别为 3.81%和 87.19%，之后再增加碳酸钠用量，Li_2O 回收率降低。综合考虑粗精矿 Li_2O 品位和回收率，确定适宜的粗选碳酸钠用量为 1 000 g/t。

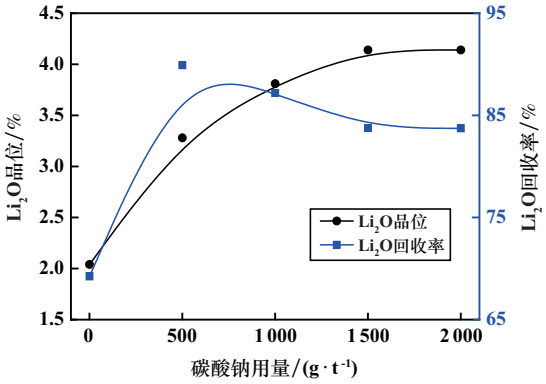


图 3　碳酸钠用量对粗选指标的影响

Fig. 3　Effect of sodium carbonate dosage on roughing indicators

2.1.3　氢氧化钠用量试验

氢氧化钠除了调节矿浆 pH 值，在锂辉石矿浮选中还有一定的活化作用，能提高锂的回收率，但氢氧化钠过量时，矿浆 pH 值过高，容易降低药剂的选择性。

按照图 1 所示流程，碳酸钠用量 1 000 g/t，其他条件不变，考察了氢氧化钠用量对粗选指标的影响，结果见图 4。随着氢氧化钠用量增加，粗精矿 Li_2O 品位和 Li_2O 回收率都先升高后降低。确定粗选适宜的氢氧化钠用量为 700 g/t。

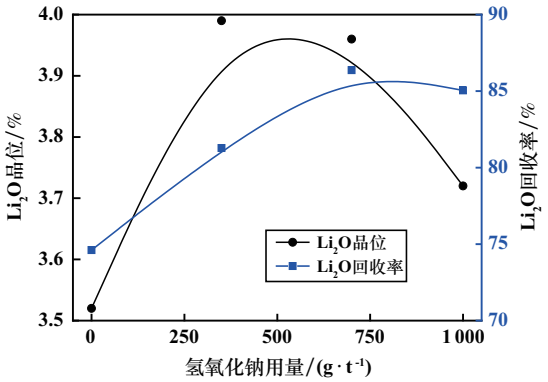


图 4　氢氧化钠用量对粗选指标的影响

Fig. 4　Effect of sodium hydroxide dosage on roughing indicators

2.1.4　EM-PN30 用量试验

捕收剂是实现锂辉石浮选工艺的关键。按照图 1 所示流程，氢氧化钠用量 700 g/t，其他条件不变，考察了 EM-PN30 用量对粗选指标的影响，结果见图 5。随着 EM-PN30 用量增加，粗精矿 Li_2O 品位逐渐降低，Li_2O 回收率逐渐升高；EM-PN30 用量 1 800 g/t 时，粗精矿 Li_2O 品位 4.51%，Li_2O 回收率 89.08%，选别指标理想。确定适宜的捕收剂 EM-PN30 用量为 1 800 g/t。

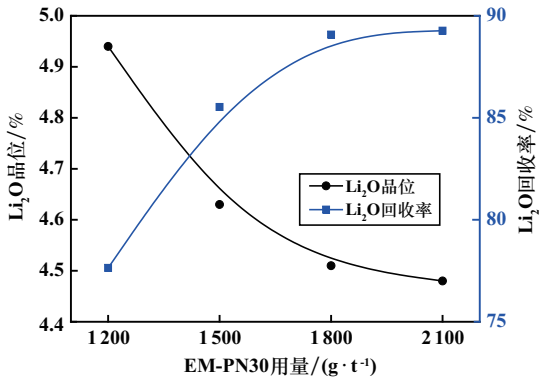


图 5　EM-PN30 用量对粗选指标的影响

Fig. 5　Effect of EM-PN30 dosage on roughing indicators

2.2　混合浮选闭路试验

在开路试验基础上，进行了川西某锂铌钽铍多金属矿混合浮选闭路试验。试验流程及条件见图 6，结果见表 2。对于 Li_2O 品位 1.25%、Nb_2O_5 品位0.009 3%、Ta_2O_5 品位 0.003 7%、BeO 品位 0.051%的原矿，在磨矿细度-0.074 mm粒级占 74.3%条件下，配以自主研发的高效锂辉石捕收剂 EM-PN30，经一粗二扫三精闭路浮选，获得了 Li_2O 品位 5.60%、Nb_2O_5品位0.035%、Ta_2O_5 品位 0.015%、BeO 品位 0.138%的含铌钽铍锂精矿，Li_2O 回收率为 85.98%，伴生铌、钽、铍回收率分别为 73.13%、78.33%、52.58%，较好实现了锂铌钽铍综合富集回收，为后续磁选、重选等工艺分离铌、钽以及

锂、铍创造了有利条件。

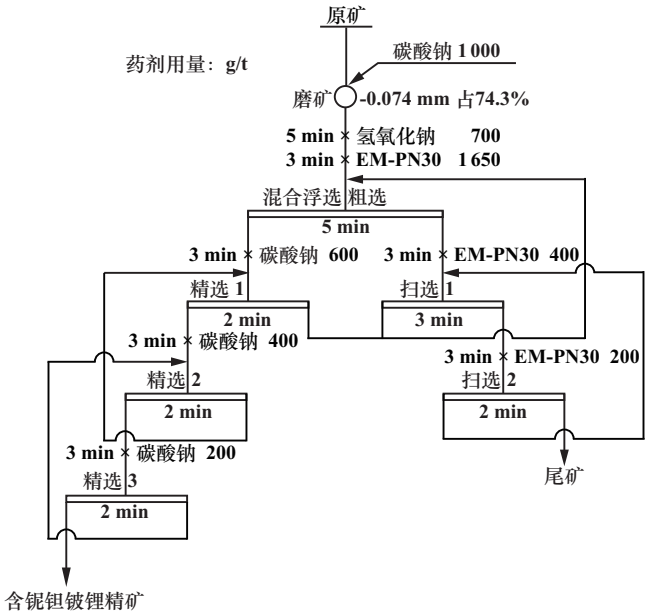


图 6 闭路浮选试验流程

Fig. 6 Flowchart for closed-circuit flotation test

表 2 闭路浮选试验结果

Table 2 Closed-circuit flotation test results

产品名称	产率/%	品位/%				回收率/%			
		Li_2O	Nb_2O_5	Ta_2O_5	BeO	Li_2O	Nb_2O_5	Ta_2O_5	BeO
含铌钽铍锂精矿	19.42	5.60	0.035	0.015	0.138	85.98	73.13	78.33	52.58
尾矿	80.58	0.22	0.003	0.001	0.030	14.02	26.87	21.67	47.42
原矿	100.00	1.26	0.009 3	0.003 7	0.051	100.00	100.00	100.00	100.00

3 结论

1）川西某锂铌钽铍多金属矿 Li_2O 品位 1.25%，含 Nb_2O_5 0.009 3%，Ta_2O_5 0.003 7%，BeO 0.051%，属于多金属稀有金属矿，考虑综合回收利用。

2）针对该矿的矿石性质，靶向研制了锂铌钽铍多金属浮选共富集捕收剂 EM-PN30，可有效实现锂铌钽铍多组分浮选共富集回收。

3）采用自主研发的高效混浮捕收剂 EM-PN30，“磨矿-混浮”工艺获得了 Li_2O 品位 5.60%、Nb_2O_5 品位 0.035%、Ta_2O_5 品位 0.015%、BeO 品位 0.138%的含铌钽铍锂精矿，Li_2O 回收率为 85.98%，伴生铌、钽、铍回收率分别为 73.13%、78.33%、52.58%，较好实现了锂铌钽铍多金属综合富集回收，为后续磁选、重选工艺分离铌、钽以及锂、铍创造了条件。

参考文献(References)：

[1] 吴西顺，王登红，黄文斌，等. 全球锂矿及伴生铍铌钽的采选冶技术发展趋势[J]. 矿产综合利用，2020(1)：1-9.
WU Xishun, WANG Denghong, HUANG Wenbin, et al. Global technical development trends of litihium minerals and associated beryllium-niobium-tantalum exploitation [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(1):1-9.

[2] 陈从喜. 战略性矿产资源开发利用研究进展与展望[J]. 中国矿业，2025，34(2)：4-19.
CHEN Congxi. Progress and prospects in the development and utilization of strategic mineral resources[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(2):4-19.

[3] 王登红，王成辉，孙艳，等. 我国锂铍钽矿床调查研究进展及相关问题简述[J]. 中国地质调查，2017，4(5)：1-8.
WANG Denghong, WANG Chenghui, SUN Yan, et al. New progresses and discussion on the survey and research of Li, Be, Ta ore deposits in China[J]. Geological Survey of China, 2017, 4(5):1-8.

[4] 王艳，李玺，石磊，等. 反浮选在四川某锂辉石矿选矿试验研究中的应用[J]. 地质找矿论丛，2024，39(3)：431-435.
WANG Yan, LI Xi, SHI Lei, et al. Application of reverse flotation in experimental research on mineral processing technology for a spodumene ore in Sichuan[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources, 2024, 39(3):431-435.

[5] 何湛，祁忠旭，孙大勇，等. 锂辉石浮选技术现状及发展趋势研究[J]. 矿业研究与开发，2024，44(5)：243-250.
HE Zhan, QI Zhongxu, SUN Dayong, et al. Research on current status and development trend of spodumene flotation technology [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(5):243-250.

[6] 李庆哲，王京彬，刘大文，等. 全球锂矿资源勘查开发现况及国外典型锂矿床概述[J]. 地质与勘探，2025，61(3)：636-654.
LI Qingzhe, WANG Jingbin, LIU Dawen, et al. Exploration and development status of global lithium resources and overview of typical foreign lithium deposits[J]. Geology and Exploration, 2025, 61(3): 636-654.

[7] 刘晶晶，李少龙，吕泽鹏，等. 铍资源回收与高值化工艺进展[J]. 矿冶，2024，33(5)：714-728.
LIU Jingjing, LI Shaolong, LYU Zepeng, et al. Progress on the recovery and value-increment of resources containing beryllium[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(5):714-728.

[8] 邓伟，颜世强，谭洪旗，等. 我国铍矿资源概况及选矿技术研究现状[J]. 矿产综合利用，2023(1)：148-154.
DENG Wei, YAN Shiqiang, TAN Hongqi, et al. General situation of beryllium ore resources and research status of mineral processing technology in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(1):148-154.

[9] 朱一民. 2024 年浮选药剂的进展[J]. 有色金属(选矿部分)，2025(3)：1-16.
ZHU Yimin. Progress of flotation reagents in 2024[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(3):1-16.

[10] 刘星，李成秀，程仁举，等. 国外某锂多金属矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用，2019(2)：65-69.
LIU Xing, LI Chengxiu, CHENG Renju, et al. Test of the beneficiation of one lithium polymetallic ore overseas[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(2):65-69.

(下转第 101 页)

face sulfidization in flotation of oxidized copper ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(5):122-129.

[8] 王璐瑶,刘胜,刘广义,等. 铜矿浮选捕收剂研究进展与展望[J]. 铜业工程, 2024(3):69-84.
WANG Luyao, LIU Sheng, LIU Guangyi, et al. A crucial review on research progress for copper ore flotation collectors[J]. Copper Engineering, 2024(3):69-84.

[9] 蔺月萌,韩百岁,姜丽帅,等. 氧化铜矿浮选方法及药剂的研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2024(3):112-120.
LIN Yuemeng, HAN Baisui, JIANG Lishuai, et al. Research status and prospects of flotation methods and reagents for oxidized copper ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024(3):112-120.

[10] 王纪镇,荆茂晨,刘睿华,等. 浮选药剂性能理论分析[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(3):10-16.
WANG Jizhen, JING Maochen, LIU Ruihua, et al. Theoretical analysis of flotation reagent performance[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(3):10-16.

[11] 黄凌云,孙鑫,杨思原,等. 氧化铜矿浮选捕收剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020,40(2):88-92.
HUANG Lingyun, SUN Xin, YANG Siyuan, et al. Application and research progress of flotation collectors for copper oxide ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020,40(2):88-92.

[12] 杨绵延,马英强,于岩,等. 孔雀石分段硫化的浮选行为及机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2021,41(2):80-88.
YANG Mianyan, MA Yingqiang, YU Yan, et al. Staged sulfuartion-flotation of malachite and its mechanism[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(2):80-88.

引用本文:李勇,汤川,陈兴海,等. 辅助捕收剂 MC-07 应用于刚果(金)某氧化铜钴矿的浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):96-101.
LI Yong,TANG Chuan,CHEN Xinghai, et al. Experimental study on using auxiliary collector MC-07 in flotation of copper-cobalt oxide ore from Democratic Republic of Congo[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):96-101.

(上接第 90 页)

[11] 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 Chao, ZHANG Yushu, ZHANG Shaoxiang, 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.

[12] 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.

[13] 王星. 新疆某锂钽铌铍多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):198-202.
WANG Xing. Beneficiation of Lithium-tantalum-niobium-beryllium polymetallic ore from Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):198-202.

引用本文:刘星,李成秀,程仁举,等. 川西某锂铌钽铍多金属矿浮选共富集回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):87-90.
LIU Xing, LI Chengxiu, CHENG Renju, et al. Experimental study on flotation co-enrichment recovery of lithium-niobium-tantalum-beryllium polymetallic ore in Western Sichuan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):87-90.

(上接第 95 页)

[6] 韩文杰. 新型高分子铁矿抑制剂的抑制机理研究[D]. 沈阳:东北大学, 2023.
HAN Wenjie. Study on depression mechanism of new polymer iron ore depressants[D]. Shenyang: Northeast University, 2023.

[7] 王维民,殷平. 金垦淘洗机在本溪矿业公司提质增效中的应用[J]. 现代矿业, 2020,36(12):153-155.
WANG Weimin, YIN Ping. Application of Jinken wachine in improving quality and increasing efficiency in Benxi Mining Company[J]. Modern Mining, 2020,36(12):153-155.

[8] 张汉泉,高王杰,蔡祥,等. 淘洗磁选机在鲕状赤铁矿提铁降杂中的应用[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):37-39.
ZHANG Hanquan, GAO Wangjie, CAI Xiang, et al. Application of elutriation magnetic separator in upgrading iron concentrate of oolitic hematite by reducing impurities[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(3):37-39.

引用本文:王斌,刘晓慧,李天霞. 某混合型铁矿高效选铁技术研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):91-95.
WANG Bin, LIU Xiaohui, LI Tianxia. Efficient beneficiation technology for mixed iron ores[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):91-95.