

LKD-3 对内蒙古某钼矿的浮选实验

李颖¹, 刘鸿¹, 王舰², 马艺闻¹, 姜效军¹, 张琦¹, 崔波¹

(1. 辽宁科技大学矿业学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 辽宁科技大学化工学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 针对内蒙古某钼矿存在嵌布状态复杂、泥化现象严重、降低尾矿品位难等问题, 采用 LKD-3 捕收剂对其进行浮选实验研究。实验分析结果表明, LKD-3 对辉钼矿具有良好的选择性, LKD-3 中 2,3,5-三甲基萘与碳十醇发生协同作用, 可更有效地吸附在钼矿物表面, 增强钼矿物表面疏水性, 稳定其与药剂的吸附作用, 显著提高钼精矿的品位与回收率; 浮选实验结果表明, 采用 LKD-3 对钼品位 0.164% 的原矿进行一粗五精二扫的闭路浮选实验, 获得钼品位 53.44%, 钼回收率 91.79% 的钼精矿, 比同流程、同药剂制度下采用现场煤油为捕收剂浮选闭路实验时钼精矿品位增加 6.48 个百分点, 回收率增加 4.17 个百分点。研究结果对提高难选钼矿生产指标、减少资源浪费等具有理论指导意义和实践价值。

关键词: 泥化钼矿; 复合捕收剂; 协同作用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.01.021

中图分类号: TD912 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 01-0161-07

引用格式: 李颖, 刘鸿, 王舰, 等. LKD-3 对内蒙古某钼矿的浮选实验[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1): 161-167+173.

LI Ying, LIU Hong, WANG Jian, et al. Experimental study on flotation of a molybdenum mine in Inner Mongolia by LKD-3[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 161-167+173.

作为地壳中含量较少的一种难熔稀有金属, 钼因其具有耐腐蚀、弹性系数高、化学性质稳定等优质特性, 被日益重视并应用于宇航、环保、军工等重要部门^[1]。随着生产利用和出口贸易规模的日益扩大, 简单易选的单一钼矿储量日益减少, 以贫细杂为主的难选钼矿渐渐成为研究重难点。煤油作为国内选钼行业常用的捕收剂, 存在易燃易爆、分散性差、用量加大易消泡, 致使钼回收率下降等问题^[2-3]。近年来, 随着军工行业对煤油的需求日益增加, 正逐渐退出市场^[3]。

国内研究者采用传统捕收剂煤油或市面上的新型捕收剂对钼矿进行浮选实验, 在钼精矿品位达到工业要求前提下, 所得钼精矿回收率未到达 90% 以上^[4], 且所选钼矿尾矿品位偏高的问题也未得以解决^[5]。国外研究者得出, 煤油作为捕收剂用量过大时, 在浮选过程中有明显的消泡现象, 通

常在钼矿捕收剂中加入乳化剂^[6-7], 使捕收能力与弥散性能达到平衡, 实现对难选辉钼矿的高效选别。该类捕收剂普遍成本较高, 相对传统捕收剂煤油、柴油价格昂贵, 投入生产势必提高成本, 致使国内选钼捕收剂无法进一步进展。研制捕收能力强选择性好的高效浮选钼捕收剂在环境保护, 拓宽矿山寿命周期, 减少资源浪费有着深刻长远的意义, 是当今的热点与难点。

内蒙古某钼矿原矿品位 0.164%, 其泥化程度较大、辉钼矿被脉石包裹难以解离, 嵌布粒度较细, 现场所使用的传统煤油捕收剂存在捕收贫细杂难选钼矿能力弱、选择性差, 回收率低等问题。本文选用无味、可提高疏水能力的 2,3,5-三甲基萘, 与具有起泡能力且可分散重芳烃的碳十醇为钼矿捕收剂, 进一步提高该钼矿的浮选指标。采用接触角测试、光学显微镜及红外光谱测试,

收稿日期: 2022-03-23

作者简介: 李颖 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为浮选药剂与应用。

通信作者: 王舰 (1980-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为浮选药剂研究与应用。

分析复合药剂的协同作用和药剂活性结构，对其与矿物表面的吸附机理进行探索研究。

1 矿石性质及实验方法

1.1 矿石性质

实验所用矿石源自内蒙古某大型钼矿选矿厂提供的试样（即浮选给矿），矿石化学元素组成分析结果见表 1，矿物种类及含量见表 2。

从表 1 看出，Mo 含量 0.164%，Cu、Pb 含量

分别为 0.001 7%、0.024%，二者含量较低且分选成本较高，因此钼为主要回收矿物。

由表 2 可知，该钼矿物主要以硫化矿为主，矿石中含有 0.21% 的有用金属矿物辉钼矿（MoS₂），占 1.21% 的脉石金属矿物黄铁矿，占 73.92% 的非金属脉石矿物石英。易泥化脉石矿物高岭土、云母等占比 8.27%，矿石主要成分多为脉石矿物，且含有大量易泥化的脉石矿物，如高岭石、白云母等，分选困难，属于难选钼矿石。

表 1 原矿多元素分析结果/%
Table 1 Multielement analysis of the raw ore

Au*	Ag*	Mo	Cu	Pb	Zn	Fe	As	MgO	K ₂ O	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S
0.07	1.36	0.164	0.001 7	0.024	0.011	0.85	0.0353	0.073	3.33	0.75	80.14	11.52	0.77

*单位为g/t。

表 2 原矿矿物相对含量检测结果
Table 2 Determination of the relative mineral content of the raw ore

矿物	黄铁矿	辉钼矿	方铅矿	闪锌矿等	石英	长石	高岭土	云母及其他
含量/%	1.21	0.21	0.01	0.01	73.92	16.37	5.74	2.53

1.2 浮选实验

实验室小型浮选实验，每次实验均称取 400 g 原矿，采用 1 L XFD 浮选机进行 95 s 的球磨作业，获得浓度 40%、磨矿细度-0.074 mm 约为 58% 的入浮前矿浆，在转速 1 992 r/min 的条件下，依次加入 pH 值调整剂-石灰、捕收剂-煤油/LKD 系列、起泡剂-2[#]油，时间间隔 2 min，浮选后各流程中所获得产品均进行烘干、称重、取样、化验分析。本实验采用一粗两扫开路流程见图 1。

2 实验结果与讨论

2.1 磨矿细度与粒度分析

适宜的磨矿细度对浮选分离至关重要，既要使矿物实现单体解离，又要避免产生过磨现象。为考查适宜磨矿细度，选用药剂制度：石灰 1 500 g/t、煤油 80 g/t，2[#]油 40 g/t，进行一粗两扫的磨矿细度开路实验。

从图 2 结果中可以看出，在-0.074 mm 57.93% 时，钼粗精矿达到 3.86% 的较高品位，80.31% 的较高回收率。-0.074 mm 含量低于 57.93% 时，由于矿石未充分单体解离，目的矿物与脉石连生，颗粒过大不易上浮，且脉石夹杂，导致钼粗精矿品位、回收率偏低；-0.074 mm 含量高于 57.93% 时，脉石中的部分泥化矿石如高岭石、云母产生

过磨现象，包裹有用矿物且使矿浆粘稠，药剂分散困难，导致浮选指标下降。

为进一步考查本实验选用磨矿时间 95 s 时，目的矿物钼矿在各个粒级中的分布情况以及嵌布状态，对其进行粒度筛析实验和光学显微镜的测定，见图 3、表 3。

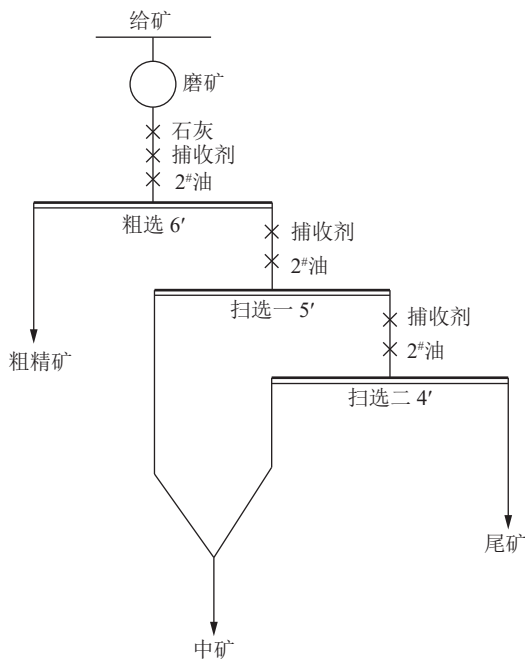


图 1 实验室开路实验工艺流程
Fig.1 Technological process of laboratory open-circuit test

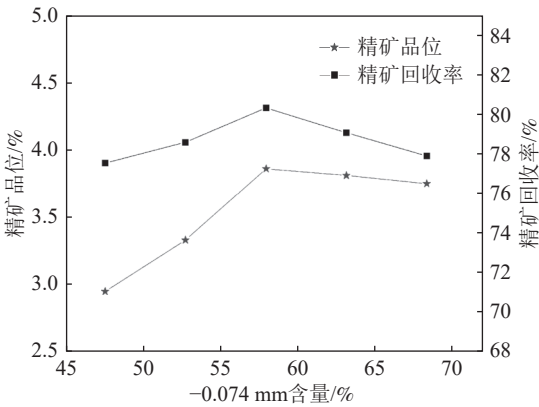


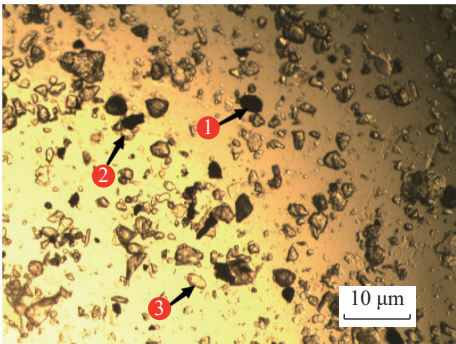
图 2 磨矿细度实验结果
Fig.2 Test results of grinding fineness

由表 3 可看出，钼广泛分布于原矿品位为 0.164% 的难选矿样中，其+0.1 mm 钼品位 0.2%，产率占 42.37%，金属分布率占 51.67%；-0.038 mm 级别钼品位 0.15%，产率占 29.65%，金属分布率占 26.93%。结合图 3 可知，大部分辉钼矿单体解离，部分与脉石矿物连生。总体来看，磨矿时间 95 s(-0.074 mm 57.93%) 时，该矿石已达到分选要求，可进行浮选分离实验。

2.2 药剂筛选实验

2.2.1 实验室药剂筛选实验

表 4 结果表明，优化前，在加药量减少的条件下，LKD-1、LKD-2 在回收率的指标上分别增加了 1.02 个百分点和 1.14 个百分点，钼粗精矿在品位上各提高 0.16 个百分点和 0.12 个百分点。同



①辉钼矿 ②连生体 ③脉石
图 3 原矿显微镜分析
Fig.3 Microscopic analysis of the raw ore

表 3 给矿粒度筛析实验结果				
Table 3 Screening test results of feeding particle size				
粒级/mm	品位/%	产率/%	筛上累计产率/%	分布率/%
+0.10	0.20	42.37	42.37	51.67
-0.10+0.074	0.14	10.36	52.73	8.84
-0.074+0.045	0.12	12.25	64.98	8.96
-0.045+0.038	0.11	5.37	70.35	3.60
-0.038	0.15	29.65	100.00	26.93
合计	0.164	100.00	/	100.00

时，LKD-1、LKD-2 已初步解决现场尾矿品位偏高的问题，由于 LKD-1、LKD-2 加入了具有起泡能力的碳十醇，减少 2#油用量，同时加入可提高疏水能力的 2,3,5-三甲基萘，利用二者协同作用增强钼矿物表面疏水性，使其对辉钼矿有更高的捕收能力与选择性，最终实现经 LKD-1、LKD-2 浮

表 4 实验室药剂筛选实验结果
Table 4 Laboratory drug screening test results

	捕收剂种类	药剂用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位/%	回收率/%
优化前	现场煤油	煤油：80 2#油：60	钼粗精矿	3.86	3.450	80.31
			尾矿	96.14	0.034	19.69
			给矿	100.00	0.166	100.00
	LKD-1	LKD-1：68 煤油：12 2#油：25	钼粗精矿	3.58	3.610	81.33
			尾矿	97.09	0.032	18.67
			给矿	100.00	0.165	100.00
	LKD-2	LKD-2：68 煤油：12 2#油：25	钼粗精矿	3.79	3.570	81.45
			尾矿	96.21	0.032	18.55
			给矿	100.00	0.166	100.00
	优化后	LKD-3	LKD-3：80 2#油：40	钼粗精矿	3.58	3.860
尾矿				97.42	0.029	16.85
给矿				100.00	0.166	100.00
LKD-4		LKD-4:120	钼粗精矿	3.50	3.920	82.56
			尾矿	97.50	0.030	17.44
			给矿	100.00	0.166	100.00

选后的尾矿品位均低于使用现场煤油捕收剂捕收后的尾矿品位，达到金属利用率最大化。

优化后，LKD-3、LKD-4 可代替煤油作为钼矿捕收剂，其中 LKD-4 因其优异的起泡能力可作为二合一药剂使用。由于 2,3,5-三甲基萘与碳十醇协同作用后增强钼矿物表面疏水性，提高了钼粗精矿的回收率和品位，大幅度地降低了尾矿的品位，解决了现场尾矿金属资源利用率低的难题。

2.2.2 现场药剂筛选实验

现场药剂用量、实验流程与实验室实验一致。由图 4 可知，LKD-3 相较于现场煤油在减少药剂用量的条件下，LKD-3 捕收剂浮选后的钼粗精矿在指标品位与回收率上提高了 0.57 个百分点、4.02 个百分点，且尾矿品位明显低于使用现场煤油捕收剂的尾矿品位。综合数据考量，选取 LKD-3 捕收剂为最终浮选药剂。

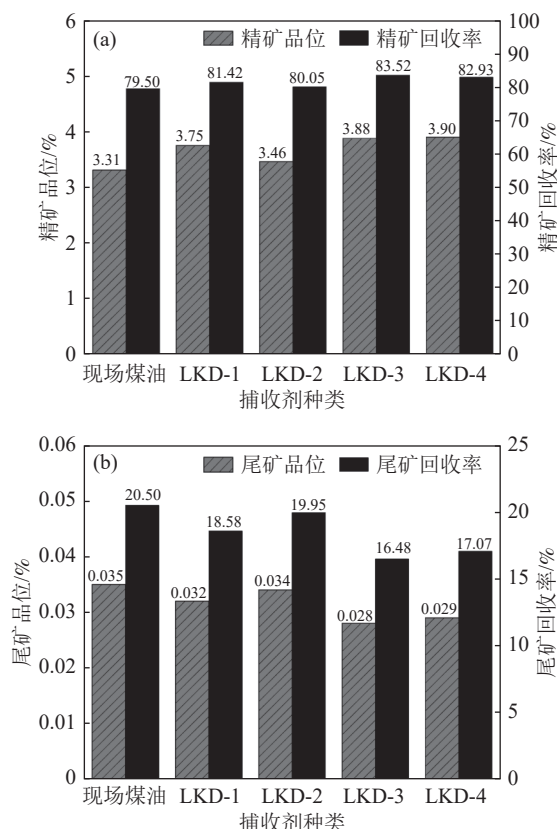


图 4 捕收剂种类对辉钼矿浮选精矿的影响 (a) 和捕收剂种类对辉钼矿浮选尾矿的影响 (b)

Fig.4 Effect of collector types on molybdenite flotation concentrate (a) and effect of collector species on molybdenite flotation tailings (b)

2.3 浮选条件实验

2.3.1 石灰用量实验

石灰作为选钼常用调整剂，可改变矿浆 pH 值

值，适当的矿浆 pH 值会增加辉钼矿的疏水性。在磨矿细度为 -0.074 mm 约为 58%、LKD-3 用量 80 g/t、2#油用量 40 g/t 的条件下，对给矿进行一粗两扫的石灰用量的开路实验，结果见图 5。

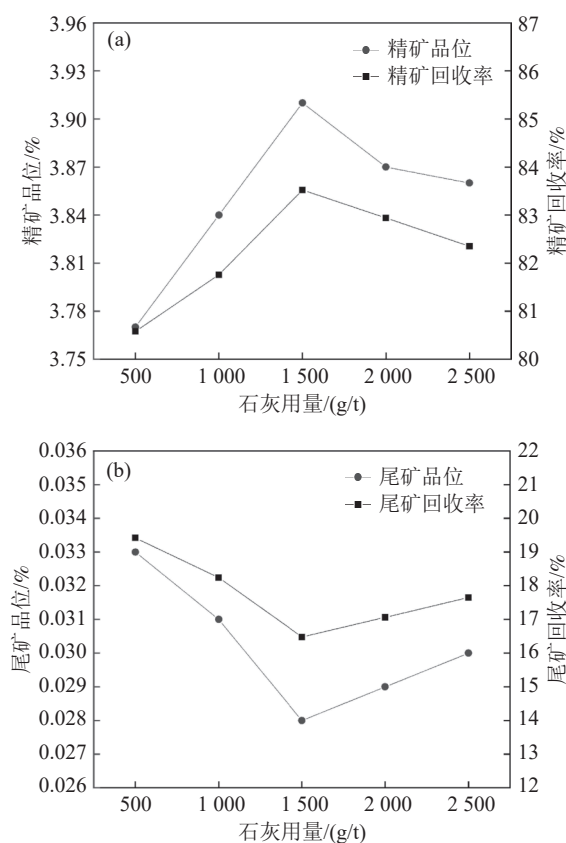


图 5 石灰用量实验

Fig.5 Lime dosage test

由图 5a 可知，随 pH 值调整剂石灰 (CaO) 用量的增加，钼精矿品位、回收率均有上升趋势。当石灰用量为 1500 g/t (pH 值为 10.1) 时，精矿品位达到 3.91% 后出现下降趋势，此时，钼精矿回收率达到 83.52%。由图 5b 可知，在 1500 g/t 时尾矿钼品位 0.028%，尾矿钼回收率 16.48%。

从图 6 可得出，pH 值为 10.1 时，矿浆中 Ca^{2+} 、 CaOH^+ 、 Ca(OH)_2 胶体沉淀三者共存，pH 值低于 10.1，矿浆中 Ca^{2+} 会罩盖在辉钼矿的“棱”上，使其可浮性变差；随矿浆 pH 值升高，矿浆中 Ca^{2+} 与水中 OH^- 生成 CaOH^+ 与 Ca(OH)_2 胶体沉淀， CaOH^+ 对脉石矿物石英具有活化作用，可改变石英矿物表面性质，疏水性增强，可浮性变好，与有用矿物共同上浮，导致精矿品位下降； Ca(OH)_2 胶体沉淀易附着于辉钼矿表面，阻碍捕收

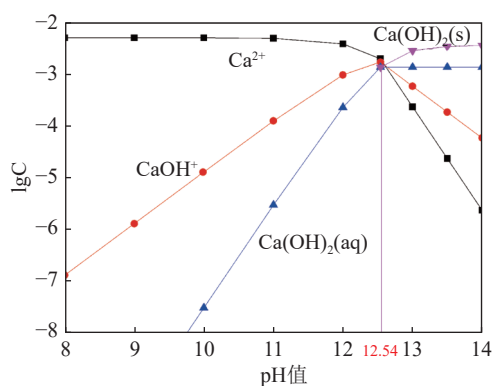


图6 Ca^{2+} 溶液中各组分的 LogC-pH 值关系
Fig.6 LogC-pH value of components in Ca^{2+} solution

剂吸附,降低精矿回收率。综上,选取 1 500 g/t 为石灰较佳用量。

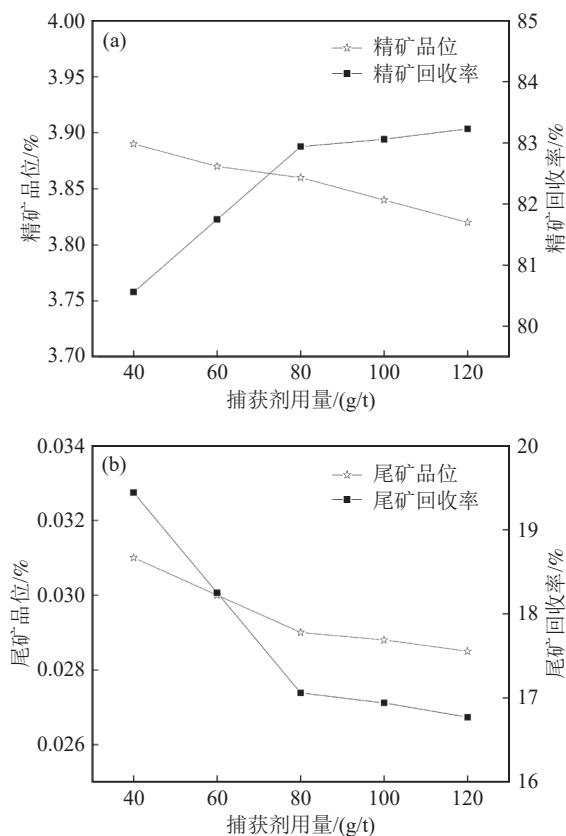


图7 捕收剂用量实验
Fig.7 Test of collector dosage

2.3.2 捕收剂用量实验

为确定捕收剂用量,在磨矿细度为-0.074 mm 约为 58%、药剂制度:石灰 1 500 g/t、2[#]油 40 g/t 的条件下,对给矿进行一粗两扫的捕收剂用量的开路实验,结果见图 7。

由图 7a 可得,药剂用量逐步增加时,钼粗精矿在 80 g/t 时可获得 3.86% 品位、82.94% 回收率

的指标。由图 7b,尾矿品位、回收率均呈下降趋势,且在 20 g/t 至 80 g/t 区间内钼回收率、品位直线下滑。这是因为在超过 80 g/t 时,矿物表面会呈现多层吸附现象^[8],促使石英等脉石矿物的疏水性增加得以上浮,造成精矿品位下降,浮选指标变差。综上,80 g/t 为 LKD-3 捕收剂的较佳用量。

2.3.3 2[#]油用量实验

2[#]油作为起泡剂其用量将直接影响钼精矿品位、回收率。为确定 2[#]油用量,在磨矿细度为-0.074 mm 58% 左右、石灰用量 1 500 g/t、LKD-3 用量 80 g/t 的条件下,进行一粗两扫的 2[#]油用量开路实验,结果见图 8。

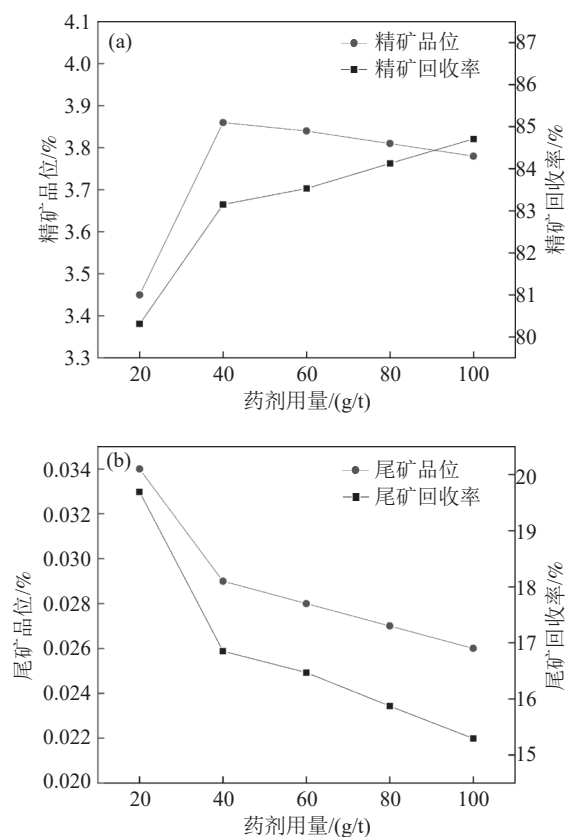


图8 2[#]油用量实验
Fig.8 2[#] Oil consumption test

由图 8a 可得,药剂用量逐步增加时,钼粗精矿在 40 g/t 时可获得 3.86% 品位、83.15% 回收率的指标。由图 8b,尾矿品位、回收率均呈下降趋势,且在 20 g/t 至 40 g/t 区间内钼回收率、品位直线下滑。综上,40 g/t 为 2[#]油的较佳用量。

2.4 红外光谱分析

由图 9(A) 可见,1 052.94 cm^{-1} 为典型芳香烃吸收峰,1 702.84 cm^{-1} 是羧基伸缩振动峰,1 448.28 cm^{-1}

是 C=C 键；图 9(B) 中 $3\,432.67\text{ cm}^{-1}$ 是 O-H 伸缩振动峰；比较曲线 A、B、C， $2\,364.30\text{ cm}^{-1}$ 处的 O-H 键减弱，且发生红移至 $2\,350.80\text{ cm}^{-1}$ ，该图谱没有新的特征峰出现，表明并无新化学键生成，说明 LKD-3 在辉钼矿表面未发生化学吸附。结合 $3\,432.67\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,454.06\text{ cm}^{-1}$ ，捕收剂吸附增强，促进 2,3,5-三甲基萘与碳十醇发生协同作用且效应明显，更有助于辉钼矿的分选。

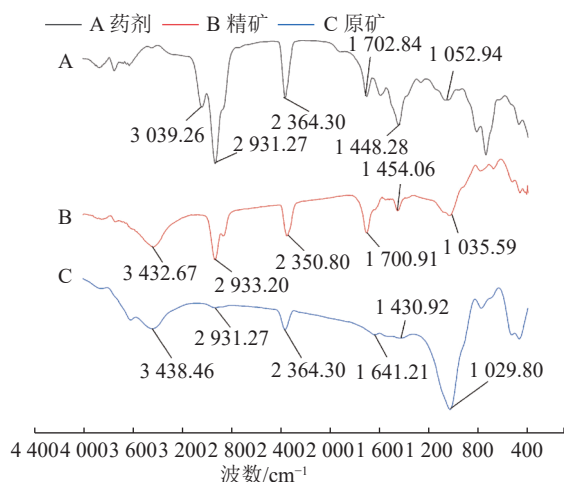


图 9 LKD-3 与矿物作用前后红外光谱变化

Fig.9 Changes of infrared spectra of LKD-3 before and after interaction with minerals

2.5 接触角分析

接触角的测定结果可直观体现矿物表面润湿性与可浮性的关系。

药剂用量单位: g/t

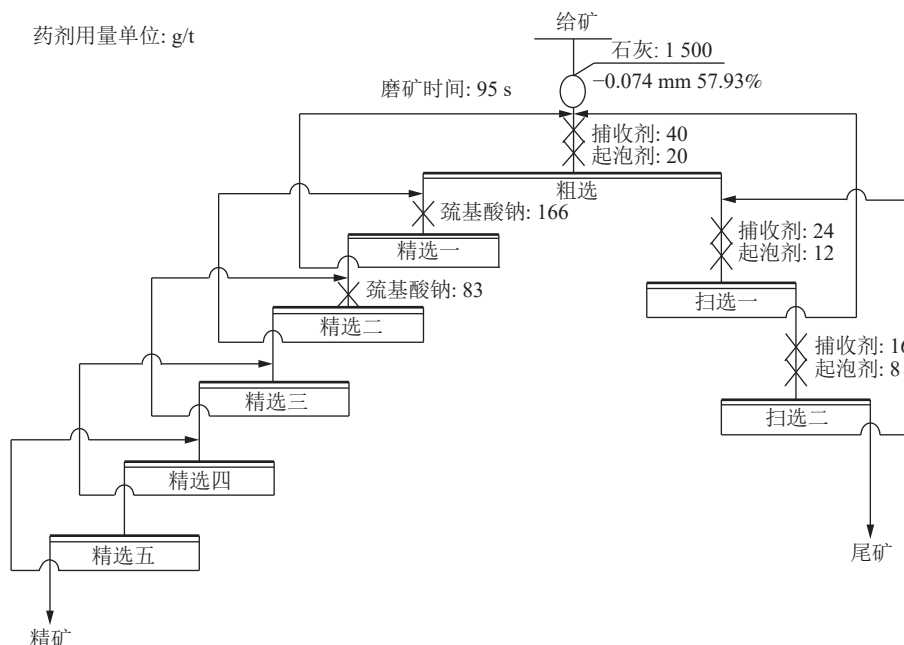


图 10 浮选闭路实验流程

Fig.10 Flow of flotation closed-circuit test

由表 5 可知，辉钼矿的天然接触角为 63.50° ， 77.43° 为吸附煤油后，煤油在辉钼矿表面吸附作用产生的接触角； 92.10° 为吸附 LKD-3 捕收剂后，LKD-3 在辉钼矿的表面吸附作用产生的接触角。根据接触角 θ 介于 60° 到 90° 为矿物表面轻微润湿，为中性亲水矿物，疏水性较好； θ 大于 90° 辉钼矿表面不润湿，疏水性好，可浮性好。可知，天然辉钼矿在未吸附捕收剂时自身呈中性亲水性质，吸附煤油捕收剂后，接触角有所增加，但仍处于 60° ~ 90° 之间，为中等亲水矿物，辉钼矿上浮有一定困难，易夹杂脉石矿物共同上浮，降低浮选指标。与 LDK-3 捕收剂作用后，由于 2,3,5-三甲基萘与碳十醇的协同作用，使其接触角增大至大于 90° ，矿物表面呈疏水性质，朝外的疏水基烃链易与水中气泡稳定接触结合上浮，改善其浮选分离效果。

表 5 接触角测试结果

Table 5 Contact angle test results

名称	天然辉钼矿	煤油	LKD-3
接触角/ $^\circ$	63.50	77.43	92.10

2.6 闭路实验

经实验室药剂筛选实验、条件实验，确定磨矿细度 $-0.074\text{ mm } 58\%$ ，药剂制度：石灰 $1\,500\text{ g/t}$ (pH 值约为 10)、LKD-3 为 80 g/t 、2#油 40 g/t ，对给矿进行一粗五精二扫闭路实验，流程见图 10。

由表 6 可以看出, 钼精矿品位由 46.96% 增加到 53.44%, 品位增加 6.48 个百分点。回收率由原捕收剂 87.62% 提高到 91.79%, 提高 4.17 个百分点。尾矿品位从 0.0198% 下降到 0.0135%, 下降 0.0063 个百分点。闭路结果证明, 2,3,5-三甲基萘与碳十醇协同作用的效果十分显著, 对存在严重泥化现象的钼矿有着良好的选择性和优异的捕收能力, 相较于国内现有捕收剂其分选效果显著。

表 6 闭路实验结果
Table 6 Closed - circuit test results

名称	产率/%	品位/%	回收率/%
精矿	0.28	53.44	91.79
尾矿	99.72	0.0135	8.21
原矿	100.00	0.164	100.00

3 结 论

- (1) 针对尾矿品位高、泥化程度重、嵌布状态复杂的内蒙古某钼矿, 采用 2,3,5-三甲基萘与碳十醇二者的协同作用, 可强化辉钼矿的疏水能力, 提高钼选择性和回收率。
- (2) LKD-3 对原矿含钼 0.164% 的钼矿进行一粗五精二扫的闭路浮选, 得到品位 53.44%、回收率 91.79% 的钼精矿, 钼尾矿品位从 0.019 8% 降到 0.013 5% 的优良指标。相较于使用现场煤油的浮选效果在精矿品位、回收率上分别提高 6.48 个百分点、4.17 个百分点, 展现出比煤油更好的选择性和捕收性能。
- (3) 通过红外光谱分析, 接触角测定证明, LKD-3 中的 C=C 键可更稳定地与辉钼矿产生吸附作用, 使其接触角从 63.50°增大至 92.10°, 造成亲水性减弱, 疏水性增强, 更利于分选。

参考文献:

[1] 王乾帅, 陶东平, 赵通林, 等. 辉钼矿干法旋转摩擦电选预抛尾研究[J]. 矿产综合利用, 2021(6):179-184.
WANG Q S, TAO D P, ZHAO T L, et al. Study of molybdenite pre-concentration by dry rotary triboelectrostatic separation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(6):179-

184.
[2] 张宝元, 钟宏. 辉钼矿的浮选及其捕收剂的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2010(3):52-54.
ZHANG B Y, ZHONG H. Research progress on flotation of molybdenite and its collectors[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2010(3):52-54.
[3] 张美鸽, 徐秋生, 刘迎春. YC 药剂工业实验研究[J]. 有色金属 (选矿部分), 2007(2):48-50.
ZHANG M G, XU Q S, LIU Y C. A study on industry experiments of YC flotation[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2007(2):48-50.
[4] 马晓炜, 张晓平, 武俊杰, 等. 河北某钼矿选矿工艺试验研究[J]. 矿产综合利用, 2014(3):47-50.
MA X W, ZHANG X P, WU J J, et al. Experimental study on mineral processing technology of a molybdenum ore in Hebei Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(3):47-50.
[5] 王立刚, 叶岳华, 胡志强, 等. 蒙古国某斑岩型铜矿伴生资源高效回收工艺技术研究[J]. 中国矿业, 2018(6): 285-288.
WANG L G, YE Y H, HU Z Q, et al. Study on the high efficient recovery process technology of associated molybdenum resources in a porphyry copper mine in Mongolia[J]. China Mining Magazine, 2018(6): 285-288.
[6] Qidong Zhang, Xiaoli Li, Mingming Li, et al. Study on flotation separation experiment of molybdenite using new type collector[J]. Advanced Materials Research, 2013(753-755):81-84.
[7] Bocharov, V. A, Ignatkina, V. A. & Alekseichuk, D. A. Influence of mineral compositions and their modification on the selection flowchart and collectors of selective flotation of ores of nonferrous metals[J]. Russ. J. Non-ferrous Metals, 2012(53):279-288.
[8] 苏拓宇, 姜效军, 张琦, 等. 芳香烃与磷化物协同分选低品位铜钼矿[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(1): 48-52.
SU T Y, JIANG X J, ZHANG Q, et al. Separation of low-molybdenum ore by the synergistic effect of aromatic hydrocarbons and phosphide[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(1): 48-52.

(下转第 173 页)

Keywords: Muddy molybdenum ore; Compound collector; Synergistic effect