doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.005

引用格式：卢通，马艳红，肖巧斌，吴桂叶，刘崇峻，朱阳戈，刘慧南. 基于复合配体协同作用的低温适应性锂辉石浮选捕收剂构效关系研究[J]. 矿冶，2026，35(2)：204-211.

LU Tong, MA Yanhong, XIAO Qiaobin, WU Guiye, LIU Chongjun, ZHU Yangge, LIU Huinan. Study on the structure-activity relationship of low-temperature adaptive spodumene flotation collector based on composite ligand synergistic effect[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 204-211.

基于复合配体协同作用的低温适应性锂辉石浮选捕收剂构效关系研究

卢 通 马艳红 肖巧斌 吴桂叶 刘崇峻 朱阳戈 刘慧南

（矿物加工科学与技术全国家重点实验室，北京 102628）

摘 要：本研究聚焦于锂辉石浮选过程中捕收剂在低温环境下适应性差、选择性弱等关键问题，构建了以油酸与短链脂肪酸复合的配体协同作用体系。通过纯矿物浮选试验，系统考察了不同碳链组成的复合捕收剂的性能变化规律。结果显示，油酸与戊酸以9∶1复配时，药剂体系凝固点显著降低，并在低温条件下实现锂辉石回收率达42.7%，较单一油酸体系提高11.5%。结合表面化学表征，研究进一步揭示了复合体系的协同作用机理。接触角测试表明，复合捕收剂使矿物表面接触角增大至54.2°，疏水性明显增强；Zeta电位分析证实，在pH=8条件下，复合药剂通过静电吸附促使矿物表面电位负向偏移，与浮选最佳条件高度吻合；FTIR光谱则排除化学吸附可能性，验证戊酸通过物理吸附促进油酸在矿物表面有序组装，形成致密稳定的疏水层。研究从分子层面阐明了短链脂肪酸碳链长度及其空间位阻效应对吸附构型的调控机制，建立了从微观相互作用到宏观浮选性能的多尺度关联，为开发具有低温适应性的高效浮选药剂体系提供了分子设计依据。该研究对推动高海拔、低温环境下锂资源的高效提取具有重要的理论指导与实际应用价值。

关键词：锂辉石浮选；复合捕收剂；低温适应性；协同作用机制；表面化学表征

中图分类号：TD954 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）02-0204-08

Study on the structure-activity relationship of low-temperature adaptive spodumene flotation collector based on composite ligand synergistic effect

LU Tong MA Yanhong XIAO Qiaobin WU Guiye LIU Chongjun ZHU Yangge LIU Huinan

(State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 102628, China)

Abstract: This study focuses on critical issues such as poor adaptability and weak selectivity of collectors in spodumene flotation under low-temperature environments, constructing a composite ligand synergistic system based on oleic acid and short-chain fatty acids. Through pure mineral flotation tests, the performance variation patterns of the composite collector with different hydrocarbon chain compositions were systematically investigated. The results show that when oleic acid and valeric acid are compounded at a ratio of 9∶1, the freezing point of the reagent system significantly decreases, and the spodumene recovery rate reaches 42.7% under low-temperature conditions, representing an 11.5% improvement compared to the single oleic acid system. Combined with surface chemical characterization, the study further reveals the synergistic mechanism of the composite system. Contact angle tests indicate that the composite collector increases the mineral surface contact angle to 54.2°, significantly enhancing

收稿日期：2025-03-12 **修回日期：**2025-03-12 **录用日期：**2025-03-13

基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFC2903603)；矿冶科技集团有限公司基金资助项目(02-2273)

第一作者：卢通，硕士，助理工程师，主要从事浮选药剂、矿物加工等方面的研究。E-mail：lutong@bgrimm.com

通信作者：吴桂叶，博士，正高级工程师；E-mail：wuguiye@bgrimm.com

©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

hydrophobicity; Zeta potential analysis confirms that under pH=8 conditions, the composite reagent promotes a negative shift in the mineral surface potential through electrostatic adsorption, which aligns closely with the optimal flotation conditions; FTIR spectroscopy rules out the possibility of chemical adsorption, verifying that valeric acid facilitates the orderly assembly of oleic acid on the mineral surface through physical adsorption, forming a dense and stable hydrophobic layer. The study elucidates, at the molecular level, the regulatory mechanism of short-chain fatty acid carbon chain length and steric hindrance effects on adsorption configuration, establishing a multi-scale correlation from microscopic interactions to macroscopic flotation performance. This provides a molecular design basis for developing highly efficient flotation reagent systems with low-temperature adaptability. The research holds significant theoretical guidance and practical application value for promoting the efficient extraction of lithium resources in high-altitude, low-temperature environments.

Key words: spodumene flotation; composite collector; low-temperature adaptability; synergistic mechanism; surface chemical characterization

锂是一种重要的战略金属资源，早期主要应用于润滑剂、特种玻璃、釉药及耐磨合金的制造[1-4]，其独特的化学性质也使其在冶金过程中作为脱氧剂与脱硫剂使用[5]。自2015年以来，全球锂电池产业的迅速发展推动锂资源需求持续增长，锂产量显著提升[1,6,7]。我国锂资源储量丰富，主要分布于湖北、西藏、青海等省或自治区。其中，盐湖卤水型锂矿多分布于高海拔、低温环境中，且镁锂比较高，开发成本高、技术难度大[8-10]，因此以锂辉石为代表的硬岩型锂矿的开发利用对我国锂资源供应具有重要意义[11]。我国锂辉石储量居世界第二，主要分布于四川、江西等省，但普遍存在品位低、嵌布复杂等特点[12,13]。目前锂辉石的选矿方法主要包括人工手选、浮选、磁选及重介质选矿等[14,15]，其中浮选技术因其分选效率高、适应性强，已成为我国锂辉石提取的主流工艺[16]。然而，锂辉石常与长石、石英、云母等铝硅酸盐脉石矿物共生，因表面性质相似，其高效浮选分离仍面临挑战。

实际生产中，油酸作为常用捕收剂存在用量大、低温适应性差等问题。锂辉石在破碎磨矿过程中易沿(110)晶面发生解理，暴露出以断裂的Li－O键和Al－O键为主的表面结构[17]，其中Al－O位点对油酸类捕收剂具有较高亲和力。在碱性介质中，油酸羧基(－COOH)解离生成油酸根离子($C_{17}H_{33}COO^-$)，其活性基团(－COO^-)可通过化学吸附作用于矿物表面的金属位点[18-20]，使疏水碳链向外排列，形成疏水膜，从而增强矿物可浮性。然而，油酸在低温条件下溶解度下降、捕收性能显著降低，往往需加热矿浆以保证分选效果，限制了其在低温环境尤其是高原矿区中的应用。

为此，本研究针对油酸在锂辉石浮选过程中低温适应性差问题，通过油酸与短链(C1–C5)脂肪酸复配构建新型复合捕收剂体系，系统评价其在低温条件下的浮选性能与协同机制。通过纯矿物与实际矿石浮选试验，结合接触角、Zeta电位及FTIR等表面分析手段，阐明复合药剂对锂辉石表面性质与吸附行为的影响规律，旨在开发具有良好低温适应性的高效锂辉石浮选药剂，为我国高海拔低温环境下锂资源的绿色高效开发提供理论支持与技术参考。

1 试验部分

1.1 试验原料

1.1.1 锂辉石纯矿物

试验用锂辉石纯矿物取自广西某矿场，经破碎与手工筛分获得纯度较高的锂辉石。将高纯度块矿进一步研磨、筛分，取+37~−74 μm粒级用于浮选试验；将−37 μm以下细粉用于红外光谱(FTIR)与Zeta电位测试；另选取部分块状样品，经切割、抛光后作为接触角测试样品。采用X射线衍射(XRD)及多元素分析方法鉴定矿物纯度，结果分别如图1与表1所

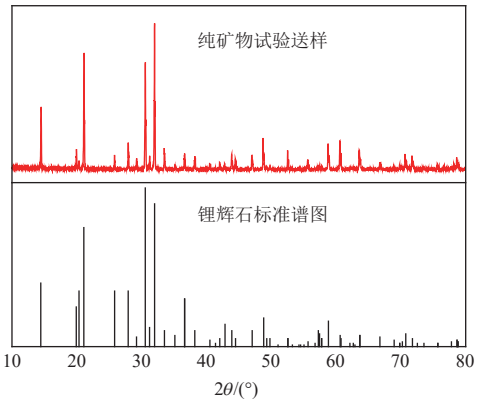


图1 锂辉石纯矿物的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of spodumene pure mineral

表1 锂辉石纯矿物的多元素分析结果

Table 1 Multi-element analysis results of spodumene pure mineral /%

成分	Li_2O	CaO	Fe	Al	MgO	ZnO
含量	7.76	0.042	0.045	6.09	<0.005	0.075
成分	Pb	MnO	Ni			
含量	0.031	0.115	<0.005			

示。多元素分析表明，样品中Li_2O含量为7.76%，对应锂辉石理论纯度达96.64%；XRD谱图与标准谱峰吻合良好，进一步证实样品纯度满足纯矿物试验要求。

1.1.2 实际矿石

试验用实际矿石取自四川某锂辉石矿，其主要脉石矿物为石英与长石，性质与锂辉石相近，常规单一脂肪酸类捕收剂分选效果有限。因此，本研究选用以油酸为基底的复合捕收剂开展实际矿石浮选试验，以评价其分选性能。化学分析（表2）显示，矿石中主要有价成分为Li_2O，品位为1.28%；SiO_2与Al_2O_3含量较高，分别为73.29%与15.50%。矿石XRD分析显示，其主要矿物组成为石英、钠长石、锂辉石、钾长石及白云母。

表2 实际矿石的多元素分析结果

Table 2 Multi-element analysis results of actual ore /%

成分	Li_2O	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	BeO
含量	1.28	0.51	73.29	15.50	0.19	0.047
成分	TFe	K_2O	WO_3	P_2O_5	Na_2O	
含量	1.15	2.83	<0.005	0.26	3.55	

1.2 试验试剂

试验用试剂如表3所示。纯矿物试验及相关机理研究用水均为去离子水，其电导率稳定控制在≤0.1 $\mu S \cdot cm^{-1}$，以消除杂质离子对矿物表面反应过程的干扰。

表3 试验用主要试剂

Table 3 Main reagents used in experiments

药剂名称	生产商	纯度
油酸	阿拉丁	AR
甲酸	阿拉丁	AR
乙酸	阿拉丁	99.5≥GC
丙酸	阿拉丁	AR
正戊酸	阿拉丁	CP
正丁酸	阿拉丁	AR
异丁酸	国药	AR
氢氧化钠	国药	AR
盐酸	国药	AR
MIBC	麦克林	AR

1.3 试验方法

1.3.1 浮选试验

1）纯矿物浮选试验

纯矿物浮选在吉林探矿生产的XRFⅡ型浮选机中进行，主轴转速1 992 $r \cdot min^{-1}$，浮选槽容积30 mL。试验流程与药剂制度如图2所示。每次试验称取2.0 g经超声清洗的锂辉石样品，置于浮选槽中，加入30 mL去离子水，采用稀NaOH或HCl溶液调节矿浆pH值，依次加入pH值调整剂、活化剂、捕收剂及起泡剂，刮泡时间为3 min。所得精矿与尾矿经烘干、称重后，按质量计算回收率。

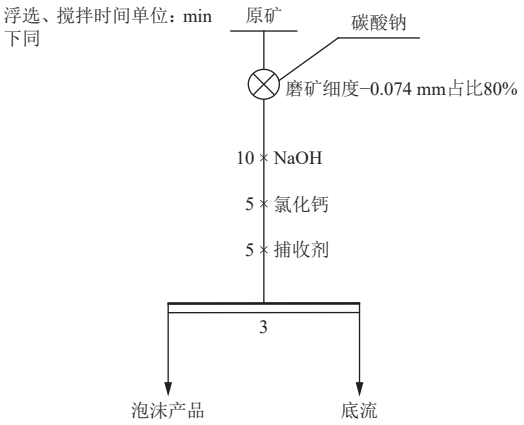


图2 纯矿物浮选试验流程

Fig. 2 Flowsheet of pure mineral flotation tests

2）实际矿石浮选试验

实际矿石浮选在磨矿细度−0.074 mm占比80.0%、碳酸钠用量1 000 $g \cdot t^{-1}$、氢氧化钠用量700 $g \cdot t^{-1}$、氯化钙用量100 $g \cdot t^{-1}$的条件下，采用单因素变量法进行对比试验，旨在探究油酸与短链脂肪酸复配对锂辉石浮选的影响。试验流程如图3所示。

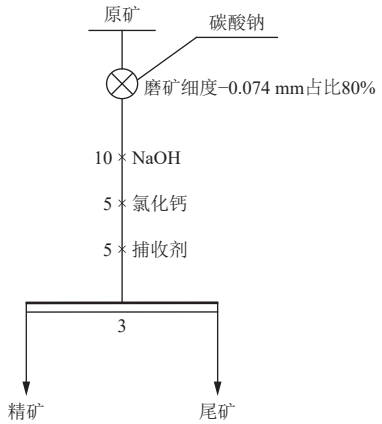


图3 实际矿石浮选试验流程

Fig. 3 Flowsheet of actual ore flotation tests

1.3.2 表面润湿性测试

矿物表面润湿性通过ramé-hart 290 U4型接触角测量仪，采用悬滴法进行测定。测试前，将抛光后的矿物样品置于200 mL烧杯中，加入含特定浓度浮选药剂的溶液100 mL（溶液预先超声乳化10 min），浸泡20 min后取出，室温自然风干并固定于样品台。测试全程使用超纯水为液滴介质，在25±1 ℃恒温条件下完成。

1.3.3 红外光谱测试

采用Nicolet iS10型傅里叶变换红外光谱仪，配合KBr压片法进行测试。取2.0 g粒径≤5 μm的矿物粉末，加入30 mL去离子水，超声清洗3 min，去除表面物理吸附杂质，离心弃去上清液；随后加入30 mL pH=9、浓度100 mg·L^{-1}的捕收剂溶液，磁力搅拌30 min，再经去离子水离心洗涤至无游离药剂残留；所得固体样品置于真空干燥箱中处理至恒重。最终，将干燥样品与光谱纯KBr按1∶150质量比混合研磨、压片，在4 000~500 cm^{-1}波数范围内采集光谱，并同步扣除背景干扰。

1.3.4 Zeta电位测试

使用Zetasizer Nano ZS90型电位分析仪进行测试。将−37 μm锂辉石纯矿物粉末进一步研磨至−5 μm，精确称取0.02 g样品分散于40 mL浓度为1×10^{-3} mol·L^{-1}的KCl支持电解质溶液中，采用0.1 mol·L^{-1} HCl或NaOH溶液精确调节悬浮液初始pH值，并按试验设计加入指定浓度浮选药剂。悬浮液经超声分散5 min后静置15 min，取液面下2 cm处上清液注入U型电泳池，进行Zeta电位测定。

2 结果与讨论

2.1 短链脂肪酸对油酸凝固点的调控效应

油酸因分子链较长且含不饱和双键，在低温条件下倾向于形成半固态胶束或发生结晶，导致药剂黏度升高、流动性下降，从而限制其在低温浮选中的应用。短链脂肪酸（如乙酸C2、丙酸C3、丁酸C4、戊酸C5）具有较低的熔点（如丙酸熔点为−21 ℃），其分子结构紧凑、空间位阻小，引入油酸体系后可有效干扰油酸分子的有序排列，抑制晶核形成与生长，从而降低混合体系的凝固点。

为系统研究短链脂肪酸碳链长度及其配比对油酸凝固行为的影响，本研究在固定油酸用量的基础上，将其分别与不同碳链长度的短链脂肪酸（C1–C5）按多种比例进行复配，系统考察复配体系的凝固点变化规律。结果如图4所示，纯油酸的凝固点约为17 ℃，与不同短链脂肪酸复配后，药剂的凝固点均出现不同程度下降，且随短链脂肪酸比例增加，凝固点呈逐步降低趋势。对比不同短链脂肪酸的作用效果，戊酸（C5）对降低凝固点的作用最为显著。当油酸与戊酸复配比例为9∶1时，体系凝固点降至14 ℃；继续提高戊酸比例至5∶5时，凝固点进一步下降至2 ℃，体现出戊酸在改善油酸低温流动性方面突出的协同效应。

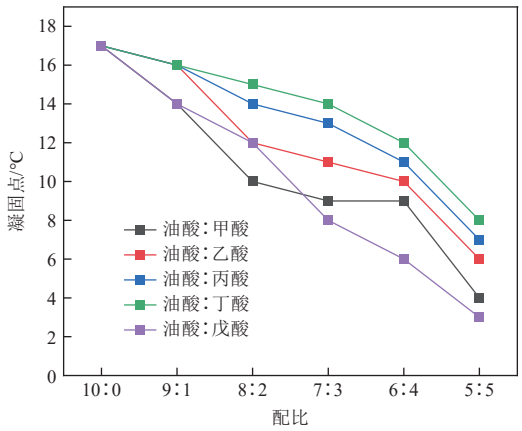


图4 不同油酸与脂肪酸配比时所得复配体的凝固点

Fig. 4 Freezing points of composite agents prepared with different ratios of oleic acid to fatty acids

2.2 纯矿物浮选试验

2.2.1 短链脂肪酸配比对油酸捕收性能的影响

由凝固点测试结果可知，油酸与短链脂肪酸复配可显著改善其凝固点高、低温适应性差的问题。为探究复配体系对锂辉石浮选回收率的影响，在固定捕收剂总用量为170 mg·L^{-1}的条件下，系统考察了油酸与不同短链脂肪酸（甲酸、乙酸、丙酸、丁酸、戊酸）在不同配比下对锂辉石回收率的影响，结果如图5所示。

在矿浆pH=8、单独使用油酸作为捕收剂时，锂辉石回收率约为34%。油酸与戊酸复配后，在配比为9∶1及8∶2条件下，锂辉石回收率提升至37%以上，表现出优于单一油酸的捕收性能。相比之下，油酸与甲酸、乙酸、丙酸或丁酸复配时，回收率均未显著改善，甚至有所下降。此外，当油酸在复配体系中所占比例过低（如油酸与短链脂肪酸配比为5∶5）时，锂辉石回收率普遍降至30%以下，其中油酸—甲酸体系的回收率最低，仅为20%。这表明适宜的短链脂肪酸种类与配比是提升油酸低温浮选性能的关键。

2.2.2 矿浆pH值对复配捕收剂性能的影响

为进一步明确复配捕收剂（油酸∶戊酸=9∶1）在

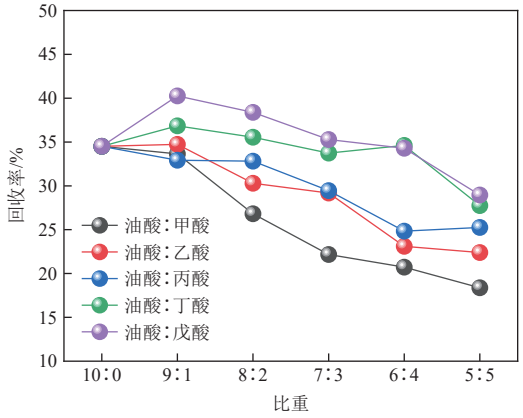


图5 油酸与脂肪酸配比对锂辉石回收率的影响(矿浆pH=8)

Fig. 5 Effects of the ratio of oleic acid to fatty acids on spodumene recovery (pulp pH=8)

不同矿浆环境下的适应性，考察了其在宽pH值范围内的浮选行为，结果如图6所示。从图6可以看出，矿浆pH值对油酸及复配药剂的捕收性能均具有显著影响：在pH=2的强酸性条件下，两者对锂辉石的回收率均低于5%；在pH值为2~8时，回收率随pH值升高而逐步提升；在pH=8时达到最佳，此时油酸与复配药剂的回收率分别为31.2%和42.7%；继续提高pH值，两者回收率均明显下降。试验结果表明，复配捕收剂在不同pH值下的浮选行为趋势与油酸基本一致，均在弱碱性（pH≈8）条件下表现出最强的捕收能力，说明该复配体系在保持油酸pH值适应性的同时，显著提升了其在适宜pH值下的捕收效率。

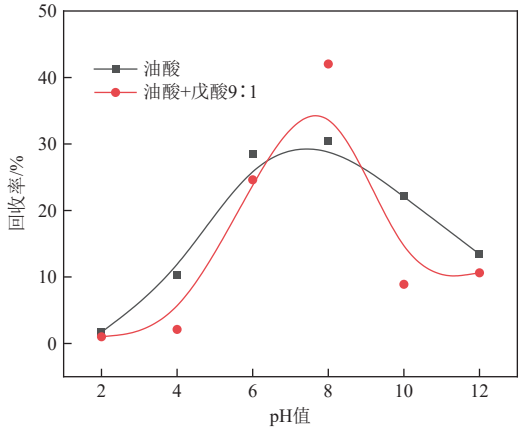


图6 矿浆pH值对锂辉石回收率的影响

Fig. 6 Effect of pulp pH on spodumene recovery

2.3 实际矿石浮选验证

为进一步考察复配捕收剂在实际浮选体系中的性能，选用油酸与不同短链脂肪酸按9∶1比例复配，开展实际矿石浮选试验，结果如图7所示。从图7可以看出，与纯矿物试验规律一致，油酸与戊酸复配可

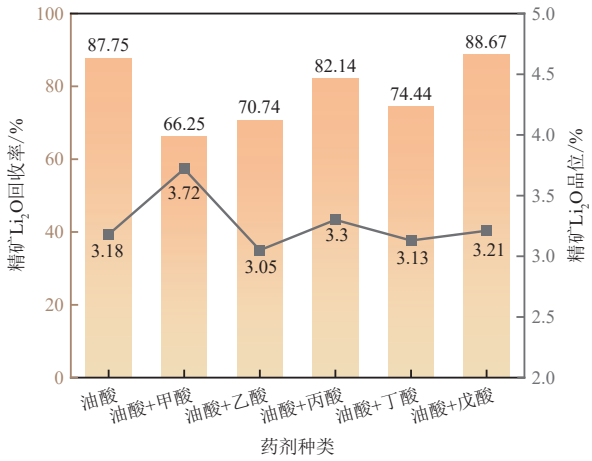


图7 油酸-短链脂肪酸复合配体为捕收剂时对锂辉石回收率和锂品位的影响

Fig. 7 Effects of oleic acid—short-chain fatty acid composite ligands as collectors on spodumene recovery and lithium grade

显著提升对锂辉石的捕收效果。在该复配体系下，精矿中Li_2O品位达到3.21%，回收率达88.67%，相较于单一油酸体系，Li_2O的品位与回收率均获得明显提高。

2.4 表面润湿性分析

接触角是表征固体表面润湿性的重要参数，其定义为气-液界面切线与固-液界面切线之间的夹角。接触角越大，表明固体表面疏水性越强，润湿性越弱[21,22]。

未经药剂处理的锂辉石表面接触角为34.6°（图8），表现出较强的亲水性。经油酸处理后，接触角上升至48.6°，说明油酸能有效增强矿物表面疏水性，从而促进矿物上浮。采用油酸分别与甲酸、戊酸按9∶1复配处理锂辉石表面后，接触角测试显示，

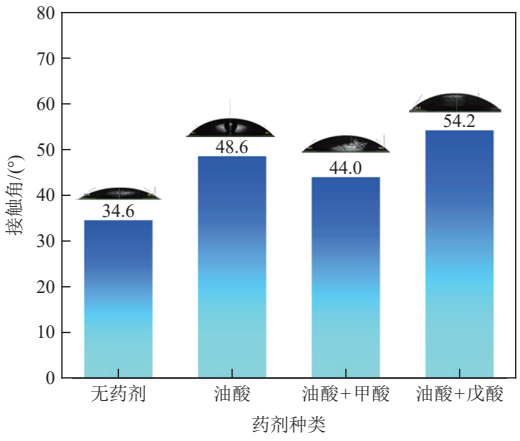


图8 捕收剂对锂辉石表面接触角的影响

Fig. 8 Influence of collectors on the contact angle of spodumene surface

油酸-戊酸复配体系可使接触角进一步增至54.2°，显著高于单一油酸处理结果。这表明戊酸的引入协同增强了油酸在矿物表面的吸附与疏水化效果，从而更有效地改善了锂辉石的可浮性。

2.5 Zeta电位分析

如图9所示，未添加捕收剂时，锂辉石的零电点位于pH≈4，随pH值升高，其表面电位持续为负值，变化趋势与文献报道一致[23]。加入油酸后，锂辉石表面电位整体负移，且在pH=8时达到负向极值，表明该条件下油酸根离子在矿物表面的吸附作用最强；pH值继续升高，表面电位缓慢回升。

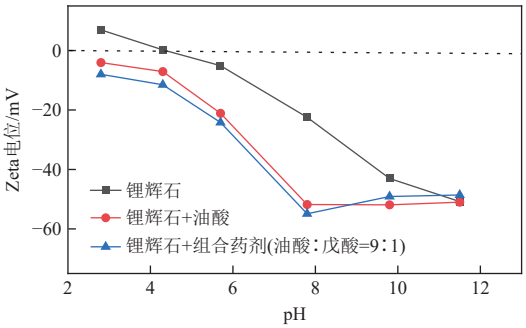


图9 锂辉石与不同捕收剂作用前后的Zeta电位

Fig. 9 Zeta potentials of spodumene before and after interaction with different collectors

采用油酸与戊酸复配捕收剂时，电位变化趋势与单一油酸体系相似，在pH=8时同样出现负电位极值，且该极值的负向幅度略大于单一油酸体系。当pH值进一步升高时，复配体系下的表面电位回升较为明显，这与浮选试验中高碱条件下复配药剂回收率略低于单一油酸的现象相一致。

2.6 红外光谱分析

锂辉石的红外光谱（图10）中，442.96 cm^{-1}处的吸收峰归属于Si—O—Si(Al)弯曲振动，577.33 cm^{-1}处的峰与铝氧八面体振动有关，800~1 000 cm^{-1}的特征峰源于硅氧四面体的伸缩振动[24-26]。经油酸处理后，谱图中出现2 923.88 cm^{-1}和2 854.58 cm^{-1}两处峰，分别对应油酸中C—H键的不对称与对称伸缩振动；1 711.16 cm^{-1}处的特征峰则来源于油酸羧基（$-COO^-$）中C＝O键的强振动耦合[27,28]。

对比单一油酸处理，油酸-戊酸复配体系处理后的锂辉石红外谱图未出现新的特征峰，表明复配过程中未生成新物质。结合Zeta电位结果可知，在适宜pH值条件下，戊酸通过物理协同作用促进了油酸在锂辉石表面的吸附，从而提升了矿物的可浮性与回收率。

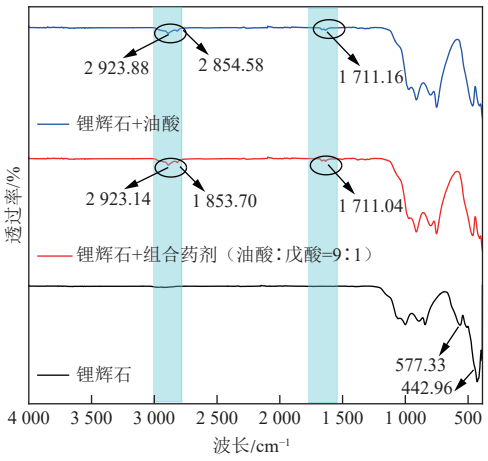


图10 锂辉石与不同捕收剂作用前后的红外谱图

Fig. 10 FTIR spectra of spodumene before and after interaction with different collectors

3 结论

1）戊酸是优化油酸低温性能与捕收能力的最佳短链协同组分。短链脂肪酸（C1–C5）虽能普遍改善油酸的低温稳定性，但仅戊酸与油酸以9∶1复配时在显著降低药剂凝固点的同时，可提升锂辉石回收率至42.7%，较单一油酸体系提高11.5%，且在实际矿石浮选中同步提升Li_2O品位与回收率。

2）复配体系通过物理吸附协同增强表面疏水性并调控界面电势。油酸—戊酸复配药剂通过物理吸附促进油酸在锂辉石表面的定向组装，形成更致密的疏水层，使接触角增大至54.2°，在pH=8条件下，进一步负移矿物表面Zeta电位，优化了静电吸附环境，从而协同强化浮选效果。

3）研究从分子层面阐明短链脂肪酸的碳链长度与空间位阻对油酸吸附构型的调控作用，建立了复合药剂组成与低温浮选性能之间的多尺度关联，研究了“链长—空间效应—吸附构型—浮选性能”的构效关系，为低温适应性浮选药剂的设计提供了理论依据。

参考文献

[1] KAVANAGH L, KEOHANE J, GARCÍA CABELLOS G, et al. Global lithium sources—industrial use and future in the electric vehicle industry: a review[J]. Resources, 2018, 7(4): 57.

[2] 朱加乾，徐宝金，宋学文，等. 西澳某锂辉石矿石浮选试验[J]. 金属矿山，2018(7): 127-130.
ZHU J Q, XU B J, SONG X W, et al. Flotation test on a spodumene ore from Western Australia[J]. Metal Mine, 2018(7): 127-130.

[3] 梅亚军，李潇雨，李成秀，等. 四川可尔因选锂尾矿锂辉石再选实验研究[J]. 矿产综合利用，2023(4): 83-87, 94.

MEI Y J, LI X Y, LI C X, et al. Re-election of spodumene from lithium processing tailings in Keeryin, Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4): 83-87, 94.

[4] 张明杰, 郭清富. 21世纪的能源金属——锂的冶金现状及发展[J]. 盐湖研究, 2001, 9(3): 52-60.
ZHANG M J, GUO Q F. Energetic metal of the 21st century: the situation and development of lithium metallurgy[J]. Journal of Salt Lake Research, 2001, 9(3): 52-60.

[5] 李明曦, 田小松, 王飞旺, 等. 锂辉石晶体结构与浮选药剂之间的作用机理研究现状[J]. 矿产综合利用, 2024(4): 27-34.
LI M X, TIAN X S, WANG F W, et al. Research status of the mechanism of action between spodumene crystal structure and flotation agent[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024(4): 27-34.

[6] CALVO G, VALERO A. Strategic mineral resources: availability and future estimations for the renewable energy sector[J]. Environmental Development, 2022, 41: 100640.

[7] PILLOT C. The rechargeable battery market and main trends 2018—2030[C]//Proceedings of the E-mobility & circular economy: EMCE 2019, international conference, exhibition, plant tours & workshops. Tokyo, Japan, July 1-3, 2019.

[8] 伍倩, 刘喜方, 郑绵平, 等. 我国盐湖锂资源开发现状、存在问题及对策[J]. 现代化工, 2017, 37(5): 1-5.
WU Q, LIU X F, ZHENG M P, et al. Present situation, existing problems and countermeasures of development of salt lake lithium resources in China[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(5): 1-5.

[9] 杨春梅, 王雯, 宁占玉, 等. 青海盐湖锂资源开发现状、存在问题和对策[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(4): 198.
YANG C M, WANG W, NING Z Y, et al. Current situation of lithium resources exploitation in Qinghai salt lake and analysis of existing problems and countermeasures[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019, 45(4): 198.

[10] 邓星星, 殷志刚. 非洲某含透锂长石伟晶岩锂辉石矿综合回收锂的选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5): 87-92.
DENG X X, YIN Z G. Experimental study on comprehensive recovery of lithium from spodumene ore containing petalite pegmatite in Africa[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2023(5): 87-92.

[11] BOWELL R J, LAGOS L, HOYOS C R D L, et al. Classification and characteristics of natural lithium resources[J]. Elements, 2020, 16(4): 259-264.

[12] 张苏江, 张彦文, 张立伟, 等. 中国锂矿资源现状及其可持续发展策略[J]. 无机盐工业, 2020, 52(7): 1-7.
ZHANG S J, ZHANG Y W, ZHANG L W, et al. Present situation and sustainable development strategy of China's lithium resources[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(7): 1-7.

[13] 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 H, HUANG L, BAI H Y, 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.

[14] 刘广学, 彭团儿, 刘磊, 等. 重色浮联合选矿工艺回收某花岗岩型锂辉石中的锂[J]. 金属矿山, 2021(3): 124-129.
LIU G X, PENG T E, LIU L, et al. Recovery of lithium from a granite type spodumene by gravity-color-flotation combination process[J]. Metal Mine, 2021(3): 124-129.

[15] 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 X, LI C X, CHENG R J, et al. Test of the beneficiation of one lithium polymetallic ore overseas[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(2): 65-69.

[16] 钱志博, 周少珍. 某低品位锂辉石矿石浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(6): 62-68.
QIAN Z B, ZHOU S Z. Research on the flotation of a low grade spodumene ore[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2019(6): 62-68.

[17] 胡岳华, 孙伟, 刘润清. 高等浮选化学[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
HU Y H, SUN W, LIU R Q. Advanced flotation chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2024.

[18] ZHU G, WANG Y, LIU X, et al. The cleavage and surface properties of wet and dry ground spodumene and their flotation behavior[J]. Applied Surface Science, 2015, 357: 333-339.

[19] FILIPPOV L, FARROKHPAY S, LYO L, et al. Spodumene flotation mechanism[J]. Minerals, 2019, 9(6): 372.

[20] YU F, WANG Y, ZHANG L, et al. Role of oleic acid ionic–molecular complexes in the flotation of spodumene[J]. Minerals Engineering, 2015, 71: 7-12.

[21] 赵振国. 接触角及其在表面化学研究中的应用[J]. 化学研究与应用, 2000, 12(4): 370-374.
ZHAO Z G. Contact angle and its application in surface chemistry research[J]. Chemical Research and Application, 2000, 12(4): 370-374.

[22] 罗廉明. 接触角、润湿与浮选[J]. 金属矿山, 1991(8): 32-36.
LUO L M. Contact angle, wetting, and flotation[J]. Metal Mine, 1991(8): 32-36.

[23] FUERSTENAU D W. Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2005, 114: 9-26.

[24] HAMASAKI T, EGUCHI K, KOYANAGI Y, et al. Preparation

and characterization of machinable mica glass-ceramics by the sol-gel process[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1988, 71(12): 1120-1124.

[25] FENG D, ZHU Y, LI F, et al. Influence investigation of CaF_2 on the LAS based glass-ceramics and the glass-ceramic/diamond composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(10): 2579-2585.

[26] MADEJOVÁ J. FTIR techniques in clay mineral studies[J]. Vibrational Spectroscopy, 2003, 31(1): 1-10.

[27] NAKAMOTO K. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds, part B: applications in coordination, organometallic, and bioinorganic chemistry[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

[28] 曹苗. 伟晶岩型锂辉石矿的浮选基础与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
CAO M. Froth flotation of spodumene from spodumene-bearing pegmatite ores: theoretical and practical aspects[D]. Changsha: Central South University, 2023.

磷资源开发利用丛书持续出版中

丛书总编：池汝安（俄罗斯工程院外籍院士、国家杰出青年科学基金获得者，享受国务院政府特殊津贴专家，现任湖北三峡实验室主任、武汉工程大学教授，绿色化工过程教育部重点实验室主任。）

磷是保障粮食安全与高新技术发展的战略资源。由**湖北三峡实验室**组织300余位专家历时四年编撰的“磷资源开发利用丛书”（14卷，约600万字），系统梳理磷元素化学、磷矿采选、磷化工全产业链核心技术，内容权威、体系完整。该丛书由**科学出版社**出版发行，是磷化工领域必备权威参考书，科研人员与工程技术人员的案头工具。目前已出版：《磷元素化学》《磷矿采矿》《磷矿物与材料》《黄磷》《磷酸盐》《有机磷化合物》《磷石膏》《药用有机磷化合物》共8卷。

