



组合捕收剂浮选锂辉石的作用机理

刘若华¹, 孙 伟¹, 冯 木¹, 梅 志¹, 金 娇²

(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;

2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114)

摘 要: 通过浮选试验、表面张力测试、Zeta 电位以及红外光谱分析, 考察油酸钠(NaOL)、十二烷基琥珀酰胺(HZ)两种捕收剂及其组合捕收剂对锂辉石的浮选性能和作用机理。结果表明: 单一捕收剂在一定浓度下都能较好地浮选锂辉石, 其中 HZ 的捕收性能强于 NaOL, 组合捕收剂浮选效果明显优于任意单一捕收剂。在药剂用量为 200 mg/L、pH=9.0 左右、组合捕收剂的混合摩尔比 $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})$ 为 5:1 的条件下, 浮选效果最好, 浮选回收率达 88.48%。红外光谱分析表明 NaOL 在锂辉石表面以化学吸附为主, HZ 则以物理吸附为主, 两种捕收剂组合使用后的正协同作用是由于锂辉石矿物表面的不均匀性和表面的活性质点的差异使这两种不同药剂能选择性的吸附在矿物表面的不同位置, 从而提高药剂捕收性能。

关键词: 锂辉石; 油酸钠; 十二烷基琥珀酰胺; 浮选; 组合捕收剂

文章编号: 1004-0609(2018)-03-0612-06

中图分类号: TD913

文献标志码: A

锂(Li)元素是位于元素周期表第二周期第一主族的元素, 原子序号 3, 由瑞典化学家 ARFVEDSON 于 1817 年从透锂长石中发现^[1]。锂在原子能、宇航等工业有重要的应用, 被称为“高能金属”^[2]。锂在玻璃、陶瓷、医疗、纺织、催化剂等行业也有着广泛的用途^[3-4]。自然界中的锂资源是极其丰富的, 它们以各种化合物的形式存在。目前预估世界锂资源储量达 1.59×10^7 t(以锂计), 锂资源比较丰富的国家有玻利维亚、中国、智利、阿根廷、美国、加拿大、澳大利亚等, 其中我国的锂资源总量居世界第二^[5]。我国锂矿石资源分布较为集中, 其中花岗伟晶岩型锂矿床主要分布在四川、新疆、江西、湖南等 4 个省区, 包括花岗伟晶岩型的稀有金属矿床(主要为锂辉石和锂云母等)和盐湖卤水锂矿床。含锂矿石主要以氧化物的形式存在, 种类达 150 多种。具有开采利用价值的主要含锂矿物有 6 种, 分别是锂辉石($\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$)、透锂长石($\text{H}_4\text{AlLiO}_{10}\text{Si}_4$)、锂云母($\text{KLiAl}[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{F}, \text{OH})$)、磷锂铝石($\text{LiAl}[\text{PO}_4](\text{F}, \text{OH})$)、锂霞石(LiAlSiO_6)、锂冰晶石($\text{Li}_3\text{Na}_3\text{Al}_2\text{F}_{12}$)。

锂辉石分选方法主要有物理分选法(手选、重选和磁选法)、浮选、化学分选^[6-7]。目前工业上锂辉石的选别主要依靠浮选法, 锂辉石的浮选一般采用正浮选, 包括脱泥-浮选和高碱不脱泥浮选^[8]。大多采用“三碱

两皂一油”(三碱: 碳酸钠、氢氧化钠、硫化钠; 两皂: 氧化石蜡皂、环烷酸皂; 一油: 柴油)的药剂制度^[9]。在锂辉石浮选工艺研究领域, 高碱不脱泥法得到广泛的推广, 使浮选工艺大大简化, 但高碱不脱泥工艺最重要是药剂的选择性, 因此关于新型捕收剂的开发和组合捕收剂的使用研究比较广泛。王毓华等^[10-12]使用新型捕收剂 YOA-15 浮选锂辉石, 在酸性条件下对锂辉石的浮选性能强, 对被强碱擦洗之后的锂辉石亦有较强的捕收能力。何建璋^[13]在锂辉石矿石浮选分离中发现新型捕收剂 YZB-17 的捕收性强, 选择性好。关于锂辉石组合捕收剂的使用也有很多文献报道, 但主要是讨论实际的浮选应用, 而对机理探讨还是比较欠缺。本文作者研究了 NaOL 和新型捕收剂 HZ 以及其组合捕收剂对锂辉石矿物浮选效果, 同时对其作用机理进行了研究, 对浮选锂辉石的高效组合捕收剂开发具有重要的意义。

1 实验

1.1 试验矿样与药剂

本试验所用的锂辉石来自四川某锂辉石矿, 试验矿样分别经过手选、刚玉破碎机破碎、清洗、瓷球罐

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51634009, 51704040); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B14034); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2015BAB14B02)

收稿日期: 2017-11-06; **修订日期:** 2018-01-02

通信作者: 孙 伟, 教授, 博 士; 电话: 13507310692; E-mail: sunmenghu@126.com

研磨、筛分出 0.038~0.074 mm 和 <0.038 mm 两个粒级的锂辉石分别作为分析测试和单矿物浮选试验的样品, 其化学组成分析(XRF)结果如表 1 所列。

表 1 锂辉石样品化学组分分析结果

Table 1 Chemical analysis results of single mineral of spodumene (mass fraction, %)

Li ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Others
7.66	61.48	26.70	0.43	0.45	3.28

试验采用油酸钠(NaOL)、十二烷基琥珀酰胺(HZ)、NaOL 与 HZ 不同摩尔比的组合药剂作为捕收剂, 分析纯 NaOH 和 HCl 作为 pH 调整剂, 试验所用去离子超纯水。

1.2 浮选实验

单矿物浮选试验在 XFD 挂槽浮选机上进行, 主轴转速为 1650 r/min。每次称取 2.0 g 锂辉石单矿物放入 40 mL 浮选槽中, 加 35 mL 蒸馏水, 搅拌调浆 3 min, 再用 HCl 或 NaOH 调节 pH 值至所需条件, 调浆 10 min 后, 加入捕收剂, 搅拌 3 min, 浮选 3 min。所得泡沫产品与槽内产品分别过滤、干燥、称质量, 计算矿物回收率。

1.3 表面张力测定

采用全自动表/界面张力仪(BZY-2 型)测定不同药剂在水溶液中的表面张力。将铂箔薄片悬挂于天平之上, 浸入待测液体中, 测试拉力变化。当铂片与液面接触(或脱离接触)时, 测得最大拉力 F 。

1.4 Zeta 电位测定

将制得的 <0.038 mm 矿样用玛瑙研钵进一步磨至粒径 <5 μm 后进行 Zeta 电位测试。测试中每次称取矿样 0.02 g 置于烧杯中, 加入超纯水 40 mL, 用 HCl 或 NaOH 溶液调节 pH 值, 最后加入不同捕收剂, 用磁力搅拌器搅拌 10 min 后, 静置 5 min。抽取上层清液置入电泳池, 在 JS94H 型微电泳仪上进行 ζ 电位测量, 每个条件测量 3 次, 取其平均值。

1.5 红外光谱分析

矿物与不同药剂作用前后产物的红外光谱在 IRAffinity 1 型傅里叶变换红外光谱仪上测定。在浮选槽内加入研磨至 <5 μm 的 2 g 矿物搅拌, 再按照浮选试验顺序加入各种药剂, 调浆完后将矿样取出, 然后真空抽滤, 固体产物在室温下自然风干。测量时, 取

1 mg 矿物与 100 mg 光谱纯的 KBr 混合均匀, 用玛瑙研钵研磨。然后加到压片专用的磨具上加压、制片, 最后进行测试。

2 结果与讨论

2.1 捕收剂对锂辉石的浮选试验

工业上, 氧化石蜡皂是锂辉石最常用的捕收剂, 其捕收性能稳定、效果优良, 由于氧化石蜡皂成分复杂, 主要作用成分为 C₁₂-C₁₆ 的脂肪酸酸盐, 实验室中为了便于研究, 采用油酸钠(NaOL)作为替代品探究脂肪酸盐类捕收剂与锂辉石的作用效果。十二烷基琥珀酰胺(C₁₆H₃₃O₄N₂, HZ)是工业上优良的表面活性剂, 具有良好的生物降解性, 由于含有羧基和氨基亲固基团, 其可作为一种新型捕收剂使用。

以 NaOL、HZ 作为单一捕收剂, NaOL 和 HZ 按 10:1、5:1、2:1、1:1 摩尔比组合使用, 分别考察了它们对锂辉石的浮选行为影响(见图 1)。由图 1 可知, 锂辉石的浮选回收率随捕收剂浓度的增加而增加, 当捕收剂浓度达到 200 mg/L 时, 锂辉石矿物的回收率不再随捕收剂用量的增加而升高。因此, NaOL、HZ 单一捕收剂以及组合捕收剂对浮选锂辉石的最佳浓度定为 200 mg/L。不同比例的 NaOL 与 HZ 组合捕收剂之间浮选效果差异明显。在低浓度($\rho < 120$ mg/L)范围内, 相同用量下, $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=2:1$ 比例的组合捕收剂的浮选效果较好。在高浓度($\rho > 120$ mg/L)范围内, 相同用量下, $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$ 组合捕收剂的浮选效果好。在低浓度区间, 捕收能力从大到小依次为: HZ、组合捕收剂、NaOL; 在高浓度区间, 捕收能力从大到

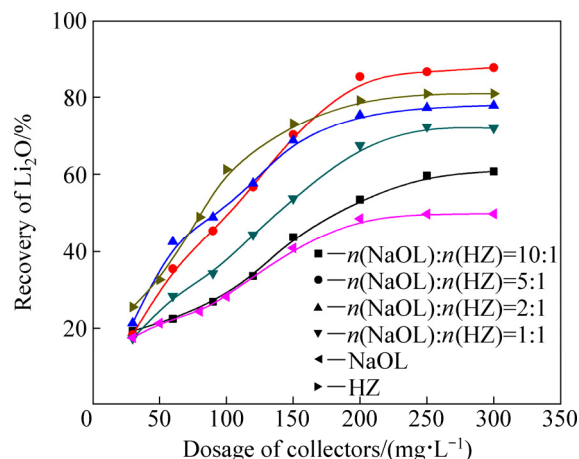


图 1 捕收剂用量与锂辉石浮选回收率的关系(pH=7.5)

Fig. 1 Relationship between dosage of collector and flotation recovery of spodumene (pH=7.5)

小依次为：组合捕收剂、HZ、NaOL。在药剂浓度为最佳浓度 200 mg/L 时，NaOL 对锂辉石的浮选回收率为 48.55%，HZ 对锂辉石浮选回收率达 79.20%， $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$ 组合捕收剂的浮选回收率高达 85.41%。因此，可以确定在捕收剂用量为 200 mg/L 时，使用 $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$ 比例的组合捕收剂浮选效果最佳。

在不同捕收剂浮选体系中，固定药剂用量为 200 mg/L，考察了矿浆 pH 对锂辉石浮选行为的影响，如图 2 所示。对于 NaOL，在矿浆 pH=4~10 的范围内其能较好的浮选锂辉石。在强酸性(pH<3.0)、强碱性(如 pH>11.0)的矿浆环境下 NaOL 几乎不能浮选锂辉石。pH=8.5 时，NaOL 对锂辉石的浮选效果最佳，此时回收率为 49.53%。对于 HZ，最佳浮选 pH 区间为 4~7.5，即中性或弱酸性区域内 HZ 能较好地浮选出锂辉石，而在强酸性和强碱性条件下对锂辉石的浮选效果较差。使用 $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$ 组合捕收剂时，发现在 pH>7 区间内，组合捕收剂的捕收性能优于 HZ 的，同时在广泛 pH 区间内组合捕收剂的捕收性能优于 NaOL 的。因此，可以看出，HZ 和 NaOL 这两种捕收剂的混合使用只在弱碱性条件下显著提高了其捕收性能。同时可确定 $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$ 组合捕收剂在 pH=9.0 的条件下浮选效果最优，回收率为 88.48%。

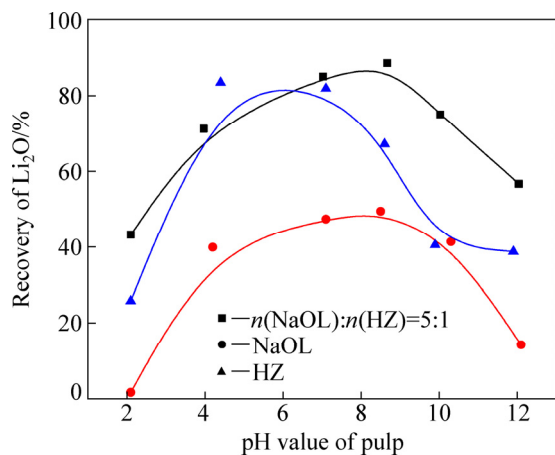


图 2 矿浆 pH 与锂辉石浮选回收率的关系

Fig. 2 Relationship between pH and flotation recovery of spodumene

2.2 不同捕收剂溶液的表面张力测定

表面张力是影响浮选过程中气泡的稳定性，以及气泡形成难易程度的主要参考数据，临界胶团浓度(简称 CMC)是反映表面活性剂降低水溶液表面张力的效率。组合用药的浮选效果优于单一用药，这可能与其在水溶液中的表面张力有一定的关系。图 3 所示为最

佳 pH 条件下(pH=9.0)组合捕收剂与两种单一捕收剂的水溶液浓度与表面张力的关系。NaOL 在水中微量的添加显著地降低了水的表面张力，而随着 NaOL 浓度的增加，溶液的表面张力逐渐下降，在浓度为 302 mg/L 时溶液的表面张力达到最低，为 22.7~24.8 mN/m。此后 NaOL 浓度的增加并不能显著地降低水的表面张力，所以可以确定 NaOL 的 CMC 值约为 302 mg/L，与文献中报道的 1.03×10^{-3} mol/L(308 mg/L)接近。而 HZ 的 CMC 值 568 mg/L，表面张力 36.37 mN/L。作为一种表面活性剂，其表面活性明显不如 NaOL，在较高浓度下，HZ 才能形成胶团。浮选 HZ 用量为 200 mg/L，低于其 CMC 值，在此浓度下，胶团未形成，表面张力较高，起泡性不佳，在单矿物浮选试验中表现出了泡沫量小的特点。组合捕收剂水溶液的表面张力测试结果表明，CMC 值约为 150 mg/L，CMC 值下水溶液表面张力为 24.88 mN/m。可见 HZ 的添加能降低 NaOL 的 CMC 值，这可能是 NaOL 作为一种阴离子型表面活性剂，亲水“离子头”之间的静电作用较强，非离子表面活性剂的“插入”到亲水“离子头”之间，同时亚氨基也存在一定程度的解离，使得离子之间的静电斥力减小。

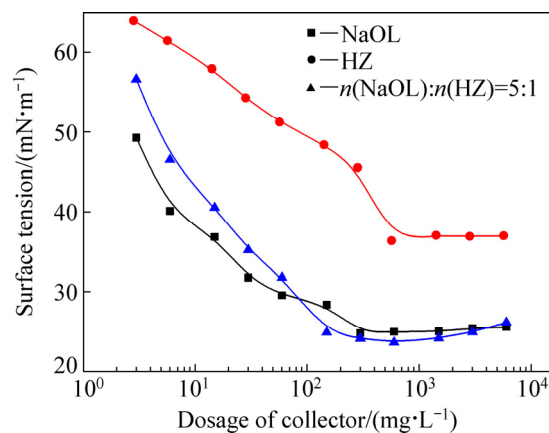


图 3 不同捕收剂水溶液浓度与表面张力的关系

Fig. 3 Relationship between concentration of collector and surface tension

2.3 不同捕收剂体系下锂辉石 Zeta 电位测试

在浮选分离锂辉石矿的捕收剂方面，其发展方向由单一用药向着混合用药的方向发展。锂辉石单矿物浮选试验表明，组合捕收剂相对于单一捕收剂而言有一定优势，这种正协同作用的机理较为复杂^[14]。本研究从锂辉石表面电位的变化角度出发，考察不同捕收剂作用下锂辉石的表面电位变化，如图 4 所示。由图 4 可以看出，在加入 NaOL 之后，锂辉石表面电位出

现负方向的偏移,在 $\text{pH}=4\sim 8$ 的范围内尤为明显,说明在此 pH 范围内油酸钠与锂辉石发生了吸附且吸附力较强^[15];HZ 是一种新型的锂辉石捕收剂,捕收效果较之 NaOL 更好,由于 HZ 难水解且难与酸碱反应,一般认为它是一种非离子型表面活性剂。锂辉石与 HZ 作用后,表面电位出现负方向的偏移,这说明 HZ 在锂辉石表面有一定的吸附作用。但是这种负方向的偏移没有 NaOL 的显著,这可能是 HZ 本身不带电性,而 NaOL 本身荷负电,吸附之后 NaOL 的存在就能使锂辉石表面荷更多的负电; $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$ 组合捕收剂在 $\text{pH}=4\sim 8$ 时表现出明显的改变锂辉石表面电位的特点,说明在此 pH 下组合捕收剂的吸附明显,但由于 HZ 在水中不电离,相对于 NaOL 而言无法明显改变锂辉石的表面电位,故组合捕收剂改变锂辉石表面电位效果没有 NaOL 明显。

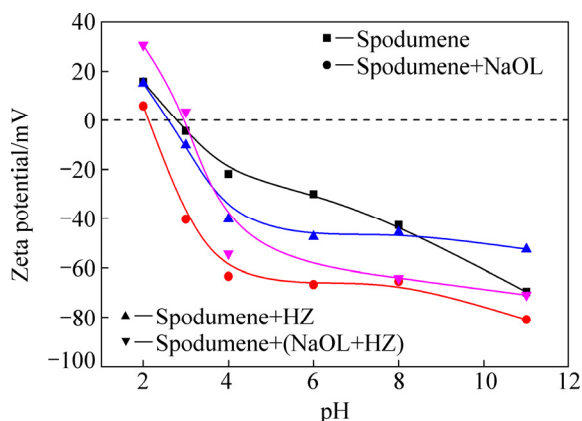


图4 锂辉石与捕收剂作用前后的 Zeta 电位-pH 图

Fig. 4 Zeta potential-pH diagram of spodumene before and after acted with collectors

2.4 红外光谱分析

锂辉石与不同药剂作用前后的红外光谱如图 5 所示,锂辉石与 NaOL 作用后在 2922.4 和 2851.7 cm^{-1} 波长处都有峰存在,在此波长范围内为甲基($-\text{CH}_3$)、亚甲基($-\text{CH}_2-$)的伸缩振动共振峰,表明 NaOL 在锂辉石表面有吸附作用。在 1561.7 和 1452.9 cm^{-1} 波长处有新峰产生,其中 1452.9 cm^{-1} 波长处为亚甲基($-\text{CH}_2-$)的变形振动共振峰, 1561.7 cm^{-1} 处为油酸铝的吸收峰^[16],表明 NaOL 在锂辉石表面生成了新的物质,新峰产生表明这种吸附作用是化学吸附。锂辉石与 HZ 作用后在 2924.4 和 2858.0 cm^{-1} 波长处都有峰存在,在此波长范围内为甲基($-\text{CH}_3$)、亚甲基($-\text{CH}_2-$)伸缩振动共振峰,表明 HZ 在锂辉石表面有吸附作用。而锂辉石与 HZ 药剂作用后,光谱图谱中没有新峰产生,表明这种吸附不是化学吸附, HZ 是

一种非离子型捕收剂,它在锂辉石表面的吸附不是静电吸附,结合 Zeta 电位结果分析推测这种吸附可能是氢键作用^[17]。锂辉石与 $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$ 组合捕收剂作用有新的峰产生,但仍是和锂辉石与 NaOL 作用后的吸收峰类似,表明捕收剂经过组合后, HZ 并没有和 NaOL 生成新的物质从而改变吸收峰的位置。

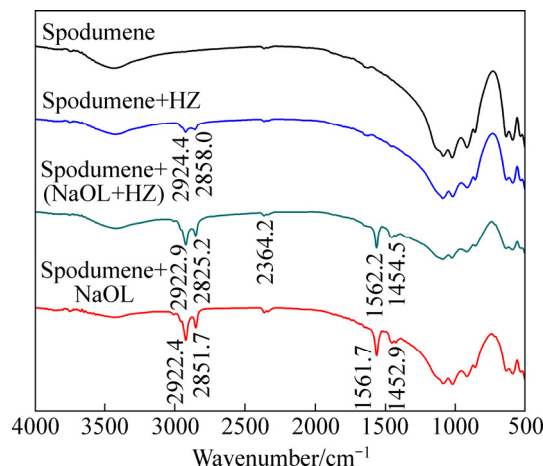


图5 锂辉石与捕收剂作用前后的红外光谱

Fig. 5 FT-IR spectra of spodumene before and after acted with collectors

以上机理分析表明, HZ 的加入并没有和 NaOL 生成新物质(红外特征峰没有改变),而仅仅只是一定程度上加强了 NaOL 在锂辉石表面的吸附强度。组合捕收剂一般能明显提高矿物回收率的原因主要有几种^[18-19]: 1) 生成新的物质,这种新的捕收剂对矿物浮选有特殊效果; 2) 由于矿物表面电性或药剂电性之间的差异,组合捕收剂能一定程度上增强药剂与矿物之间的静电引力或削弱药剂与矿物之间的静电斥力; 3) 由于矿物表面的活性点差异,组合捕收剂中不同的捕收剂可以“穿插”吸附在不同的活性质点上,保证了药剂与矿物之间强的相互作用。结合上面分析推出: NaOL 与 HZ 组合捕收剂的正协同作用的机理极有可能是锂辉石矿物表面的不均匀性和表面活性质点的差异使这两种不同的药剂选择性吸附在锂辉石表面的不同位置。

3 结论

1) 单一捕收剂 NaOL 和 HZ 均能较好的浮选锂辉石,其中 HZ 的浮选效果更好。组合捕收剂对锂辉石浮选效果明显优于单一捕收剂的。在捕收剂用量为 200 mg/L 时,组合捕收剂的摩尔比 $n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$

的浮选效果最佳。

2) HZ 的加入对 NaOL 的表面张力和 CMC 值等表面性质影响不大。NaOL 在锂辉石表面作用以化学吸附为主, 而 HZ 以氢键作用为主。NaOL 和 HZ 捕收剂组合作用后在锂辉石表面并没有生成新的化合物。由于锂辉石矿物表面的不均匀性和表面的活性质点的差异使这两种不同的药剂能选择性的吸附在锂辉石表面的不同位置, 从而强化了浮选效果, 提高药剂捕收性能。

REFERENCES

- [1] HE Gui-chun, XIANG Hua-mei, JIANG Wei, KANG Qian, CHEN Jian-hua. First-principles theory on electronic structure and floatability of spodumene[J]. *Rare Metals*, 2014, 33(6): 742–748.
- [2] BARBIERI L, LEONELLI C, MANFREDINI T, SILIGARDI C, CORRADI A B, MUSTARELLI P, TOMASI C. Nucleation and crystallization of a lithium aluminosilicate glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997, 80(12): 3077–3083.
- [3] AMARANTE M M, SOUSA A B D, LEITE M M. Processing a spodumene ore to obtain lithium concentrates for addition to glass and ceramic bodies[J]. *Minerals Engineering*, 1999, 12(4): 433–436.
- [4] KINGSORTH D J. Lithium minerals in glass. New directions[J]. *Industrial Minerals*, 1988, 244: 49–52.
- [5] 殷德洪, 斯提芬·路易多尔德, 海尔穆特·安特雷科维兹齐. 全球锂的资源、应用及其再生利用[J]. *世界有色金属*, 2011(8): 25–29.
YIN De-hong, LOUIS D S, LEIKEWEI H. Global resources, application and recycling of lithium[J]. *World Nonferrous Metal*, 2011(8): 25–29.
- [6] 陈胜虎, 罗仙平, 杨 备, 严志明. 锂辉石的选矿工艺研究现状及展望[J]. *现代矿业*, 2010(7): 5–7.
CHEN Sheng-hu, LUO Xian-ping, YANG Bei, YAN Zhi-ming. Research situation and prospect of beneficiation technology of spodumene[J]. *Modern Mining*, 2010(7): 5–7.
- [7] 韩 敏, 李志伟, 孙自军, 孙 勇, 刘延霞. 某锂多金属矿综合回收试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2012(2): 27–31.
HAN Min, LI Zhi-wei, SUN Zi-jun, SUN Yong, LIU Yan-xia. Experimental research on comprehensive utilization of a polymetallic ore containing lithium[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2012(2): 27–31.
- [8] 胡岳华, 冯其明. 矿物资源加工技术与设备[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU Yue-hua, FENG Qi-ming. Processing technology and equipment of mineral resources[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [9] 周贺鹏, 雷梅芬, 吕玲芝, 罗礼英. 某低品位难选锂辉石矿选矿工艺研究[J]. *非金属矿*, 2012, 35(5): 28–30.
ZHOU He-peng, LEI Mei-fen, LÜ Ling-zhi, LUO Li-ying. Study on beneficiation process of low grade refractory spodumene ore[J]. *Non-Metallic Mines*, 2012, 35(5): 28–30.
- [10] 王毓华, 于福顺. 新型捕收剂浮选锂辉石和绿柱石[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2005, 36(5): 807–811.
WANG Yu-hua, YU Fu-shun. Flotation of spodumene and beryl with a new collector[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2005, 36(5): 807–811.
- [11] 王毓华, 于福顺, 陈兴华, 黄传兵, 胡业民, 兰 叶. 锂辉石与绿柱石浮选分离的试验研究[J]. *稀有金属*, 2005, 29(3): 320–324.
WANG Yu-hua, YU Fu-shun, CHEN Xing-hua, HUANG Chuan-bing, HU Ye-min, LAN Ye. Selective flotation between spodumene and beryl[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2005, 29(3): 320–324.
- [12] 王毓华. 新型捕收剂浮选锂辉石矿的试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2002(5): 11–13.
WANG Yu-hua. Experimental on the flotation of spodumene using new-type collectors[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2002(5): 11–13.
- [13] 何建璋. 新型捕收剂在锂铍浮选中的应用[J]. *新疆有色金属*, 2009(2): 37–38.
HE Jian-zhang. The utilization of new collector in the flotation of lithium and beryllium[J]. *Non-ferrous Metals of Xinjiang*, 2009(2): 37–38.
- [14] MOON K S, FUERSTENAU D W. Surface crystal chemistry in selective flotation of spodumene ($\text{LiAl}[\text{SiO}_3]_2$) from other aluminosilicates[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 72(1/4): 11–24.
- [15] 徐龙华, 田 佳, 董发勤, 巫侯琴, 王 振, 王进明. 油酸钠浮选锂辉石的表面晶体化学及各向异性[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(10): 2214–2221.
XU Long-hua, TIAN Jia, DONG Fa-qin, WU Hou-qin, WANG Zhen, WANG Jin-ming. Surface crystal chemistry and anisotropy of spodumene flotation with sodium oleate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(10): 2214–2221.
- [16] 荆煦琰, 陈式棣, 么恩云. 红外光谱实用指南[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1992.
JING Xu-ying, CHEN Shi-di, YAO En-yun. Practical guide for infrared spectroscopy[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1992.
- [17] 何桂春, 张慧婷, 华亚南, 蒋 巍. 锂辉石表面环烷酸吸附行为的量子化学[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(4): 833–842.
HE Gui-chun, ZHANG Hui-ting, HUA Ya-nan, JIANG Wei. Quantum chemistry of adsorption naphthenic acid on surface of spodumene[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(4): 833–842.
- [18] 张 闾. 浮选药剂的组合使用[M]. 北京: 冶金工业出版社,

1994.
ZHANG Kai. The combination and combination of flotation reagents[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
[19] 陈 慧. 复配捕收剂在难选胶磷矿浮选中的性能研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2010.
CHEN Hui. Study of mixed collectors on flotation of refractory phosphorite ores[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2010.

Mechanism on flotation of spodumene with combined collector

LIU Ruo-hua¹, SUN Wei¹, FENG Mu¹, MEI Zhi¹, JIN Jiao²

(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering,
Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Flotation performance and mechanism of sodium oleate (NaOL), twelve alkyl succinic amide (HZ), and their combined collectors for spodumene were investigated by flotation tests, surface tension test, Zeta potential and infrared spectroscopic analysis. The results show that each of the single collector has a good capacity for spodumene. The collectability of different collectors follows the descending order: Combined collectors, HZ, NaOL. The combined collector ($n(\text{NaOL}):n(\text{HZ})=5:1$) plays the best role in the flotation at a collector dosage of 200 mg/L and pH=9.0, obtaining recovery of 88.48%. The IR result shows that the ways of NaOL and HZ adsorbed on the surface of spodumene are chemisorption and physisorption, respectively. The positive synergistic effect due to the selective adsorption of the components in the combined collector on the different active sites and the heterogeneity of the different surface can improve the collection performance.

Key words: spodumene; sodium oleate; twelve alkyl succinic amide; flotation; combined collector

Foundation item: Projects(51634009, 51704040) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(B14034) supported by the Program of Introducing Talents of Discipline to Universities, China; Project(2015BAB14B02) supported by the National Science and Technology Support Project of China during the 12th Five-Year Plan Period

Received date: 2017-11-06; **Accepted date:** 2018-01-02

Corresponding author: SUN Wei; Tel: +86-13507310692; E-mail: sunmenghu@126.com

(编辑 王 超)