

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2022.03.015

锂辉石的选矿研究进展

陈家灵¹ 谢海云^{1,2} 柳彦昊¹ 张培¹ 晋艳玲¹ 曾鹏¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 云南省战略金属矿产资源绿色分离与富集重点实验室, 昆明 650093)

摘要: 锂辉石是我国主要的锂矿资源, 但因其与伴生脉石矿物在物理化学性质上的相似性导致分选困难。分析了锂辉石矿晶体结构与可浮性的关系, 对锂辉石的选矿工艺、浮选药剂的作用机理等进行了阐述和总结。浮选是锂辉石主要的选矿方法, 重选、磁选等其它选矿方法在预先抛废、精矿除杂中也有重要应用, 复杂锂辉石矿的分选多用联合工艺以提高资源利用率, 因此不断优化分选工艺是提高锂辉石选矿效率的关键。此外应加强锂辉石与选矿药剂作用机理研究, 对浮选新药剂的开发和应用进行理论指导。

关键词: 锂辉石; 选矿工艺; 选矿药剂; 作用原理

中图分类号: TD955 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2022)03-0112-07

Research progress on mineral processing of spodumene

CEHN Jia-ling¹ XIE Hai-yun^{1,2} LIU Yan-hao¹ ZHANG Pei¹ JIN Yan-ling¹ ZENG Peng¹

(1. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Mineral Resources, Kunming 650093, China)

Abstract: Spodumene is the main lithium mineral resource in China, but it is difficult to separate because of its similarity in physical and chemical properties with associated gangue minerals. In this paper, the relationship between the crystal structure and floatability of spodumene ore was analyzed, and the beneficiation process of spodumene ore and the action mechanism of flotation agents were described and summarized. Flotation is the main beneficiation method of spodumene, gravity separation, magnetic separation and other methods also play an important role in the pre-discarding gangue and removing impurity of concentrate. At the same time, the combined process is mostly used in the separation of complex spodumene ore to improve utilization rate of resources. The continuous optimization of the separation process is the key to improve the efficiency of spodumene beneficiation. In addition, the mechanism between spodumene and mineral processing reagents should be strengthened to provide theoretical guidance for the development and application of new flotation reagents.

Key words: spodumene; beneficiation process; mineral processing reagent; action mechanism

锂是质量最轻、能量密度最大的金属, 在锂电池、动力电池和核能等领域有重要应用, 被誉为21世纪的能源金属^[1]。锂资源主要为含锂盐湖和含锂矿石。我国盐湖锂资源占比高达70%^[2], 但由于镁锂比高, 开发环境恶劣, 尚无法大规模工业开发^[3]。有开发价值的含锂矿物主要为锂辉石、锂云母、透锂长石和锂磷铝石, 其中锂辉石储量大、

分布广, 是开采最为广泛的矿种^[4]。目前, 我国主要从含锂矿石中提取锂。

锂辉石是链状硅酸盐矿物, 常见伴生脉石矿物为石英和长石^[5]。浮选是锂辉石分离富集的主要工艺。锂辉石的浮选过程中普遍存在锂品位较低、嵌布粒度细、锂矿物与脉石性质接近、表面易被矿泥覆盖及矿浆中难免离子对脉石的活化等问题, 对锂辉石的分离富集均带来一定困难^[6]。除浮选工艺外, 锂辉石的分选方法还包括手(色)选法、重介质法和磁选法, 这些方法作为辅助工艺, 可以提高锂辉石的精矿品质、节约选矿成本和提高资源综合利

收稿日期: 2021-11-30

基金项目: 中国铜业集团迪庆矿业科技攻关项目(20180043)

第一作者: 陈家灵, 硕士研究生, 研究方向为矿物加工。

E-mail: 1058010723@qq.com

通信作者: 谢海云, 博士, 教授; E-mail: xie-haiyun@163.com

用率。本文从选矿工艺和选矿药剂的作用机理等方面对锂辉石选矿进展进行综述，旨在为我国的锂辉石选矿研究及工艺开发提供一定的思路。

1 锂辉石的晶体结构与可浮性

孙传尧院士等研究认为矿床成因、矿石性质、矿物特性等具有“基因性质”，与矿物可选性密切相关且对分选指标具有重要影响^[7]。矿物的晶体结构作为“基因矿物加工学”的重要组成部分，是确定矿物可浮性的关键。锂辉石($\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$)属单链状结构硅酸盐矿物，基本结构是 $[\text{SiO}_4]$ 四面体和 $[\text{AlO}_6]$ 八面体， $[\text{SiO}_4]$ 以共角顶氧的方式连成无限延伸的硅氧四面体链， $[\text{AlO}_6]$ 以共棱方式连成“之”字形的无限延伸的八面体链，两链再借助 Li 连接形成 2:1 夹心状的“I”形杆链，其晶体结构如图 1 所示^[5,8]。研究人员发现锂辉石晶体结构中的 Li—O 键和 Al—O 键相对容易断裂，新生成的矿物表面会有较多的 Li^+ 、 Al^{3+} 暴露出来， Li^+ 溶于水使矿物表面荷负电，阳离子捕收剂易在其表面发生静电吸附。虽然—COOH、—CONHOH、—OSO₂H 等的阴离子捕收剂能化学吸附于锂辉石表面，但捕收性能较弱^[9,10]。XU 等^[11]通过计算锂辉石(110)面、(001)面和(100)面的表面能，认为(110)面是锂辉石最常见的解理面，且(110)面 Al 位密度最高，对阴离子捕收剂的吸附能力最强。此外，不同磨矿条件和磨矿细度会影响锂辉石的解理面组成，导致锂辉石显示出不同的可浮性^[12,13]。可见，系统

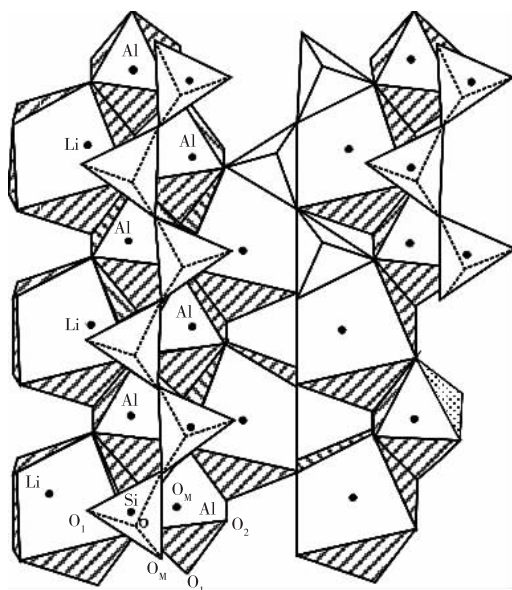


图 1 锂辉石晶体结构图^[5,9]

Fig. 1 Spodumene crystal structure diagram^[5,9]

地研究锂辉石的矿石特性并建立完善的矿物基因数据库，有助于从本质上揭示锂辉石的物理化学等性质，这对其分选工艺的开发和优化具有十分重要的指导意义。

2 锂辉石浮选工艺及药剂研究现状

浮选法对有工业价值的锂辉石均可进行有效回收。我国的锂辉石矿具有“贫、细、杂”的特点^[14]，不同矿床产出的锂辉石的矿石性质各异且可浮性不一，因此采用的浮选工艺流程也不尽相同。

2.1 锂辉石的浮选工艺

2.1.1 预先脱泥—浮选工艺

锂辉石的预先脱泥—浮选是目前最常见的工艺。浮选过程中捕收剂性能、调整剂配比、矿泥含量和矿浆中难免离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 等)会影响选矿指标^[15,16]。为降低矿泥的影响，一般在浮选前设置预先脱泥作业，通过加入 Na_2CO_3 或 NaOH 调节矿浆 pH 值并改善矿浆中离子环境后进行浮选。朱加乾等^[17]通过在浮选作业前预先脱泥，用 HP(羧酸类)作捕收剂，以 CaCl_2 为调整剂，采用一粗两精两扫的闭路流程，获得 Li_2O 品位 5.86%、回收率 75.27% 的锂辉石精矿。赵开乐等^[18]在磨矿细度—0.074 mm 占 67.5% 时先采用沉降法脱除微细粒矿泥，再在碱性条件下进行浮选，获得 Li_2O 品位 6.12%、回收率 86.01% 的锂辉石精矿。

此外，浮选法也可用于锂辉石的脱泥，与传统脱泥工艺相比，不仅脱泥效果好还能提高浮选指标。于福顺等^[19]发现用十二烷基硫酸钠进行浮选脱泥后再直接浮选能得到更好的选矿指标。何桂春等^[20]研究表明用椰油胺浮选脱除矿泥和云母能有效提高锂辉石的浮选效果。

2.1.2 碱法不脱泥浮选工艺

预先脱泥—浮选工艺较复杂，且存在脱泥效率偏低和资源损耗的问题。鉴于此，研究人员开发出了碱法不脱泥浮选工艺，即在浮选前先通过加入碱液进行强搅拌调浆来分散矿泥、改善浮选环境，再加入捕收剂直接浮出锂辉石。与脱泥—浮选工艺相比，碱法不脱泥工艺的回收率更高，且可通过选择适宜的捕收剂、控制合理的磨矿细度、优化精选作业次数等操作来确保精矿品位达标^[21]。

何阳阳等^[22]采用 Na_2CO_3 和 NaOH 强搅拌调浆,以氧化石蜡皂、环烷酸皂为捕收剂,通过直接浮选得到 Li_2O 品位为 6.04%、回收率为 85.88% 的锂辉石精矿。闫克勤^[23]在原矿含 Li_2O 1.21%、磨矿细度—0.074 mm 占 83.2% 的条件下,以油酸钠和水杨羟肟酸为捕收剂, FeCl_3 为调整剂,直接浮选获得了 Li_2O 品位为 6.16%、回收率为 85.43% 的锂辉石精矿。

2.1.3 反浮选工艺

锂辉石反浮选工艺通常先采用 Na_2CO_3 或 NaOH 调节矿浆 pH 值至弱碱性,后添加适量的糊精或淀粉等选择性抑制锂辉石,再用胺类捕收剂将石英、长石等脉石矿物进行浮选脱除,浮选尾矿即为锂辉石精矿。目前,锂辉石的原矿品位普遍不高,所以反浮选工艺主要应用于粗选段和精矿提纯阶段。

徐龙华等^[24]采用反浮选工艺将云母等脉石脱除后再将锂辉石进行初步富集,粗精矿经再磨后进行锂辉石精选,最终得到 Li_2O 品位 6.20%、回收率为 87.34% 的锂辉石精矿,在取得良好选矿指标的同时降低了磨矿成本。孙志健等^[25]对 Li_2O 品位 4.41% 的锂辉石精矿进行反浮选除杂,得到 Li_2O 品位为 5.25%、矿物纯度超过 86% 的精矿,大幅

度提升了精矿品质。

2.1.4 微细粒聚团浮选工艺

微细颗粒团聚浮选是指在捕收剂作用下,微细粒矿物在高速运动的流体中通过捕收剂分子的缔合作用彼此团聚形成疏水的聚团上浮并与脉石矿物分离。该工艺可以实现微细粒矿物的有效回收。对含 Li_2O 1.48% 的微细粒锂辉石,周贺鹏^[26]采用团聚浮选工艺的工业试验获得 Li_2O 品位 5.62%、回收率为 74.28% 的锂辉石精矿,对比原“脱泥—浮选”工艺,回收率可提高 9%,同时进一步简化了生产流程。目前,对于组成复杂、嵌布粒度细且含泥量高的难选锂辉石矿,如何在不脱泥的前提下开发出具有高选择性、普遍适应性且流程简单的浮选工艺依然是提高锂辉石浮选回收率的重要研发方向。

2.2 锂辉石浮选捕收剂及其作用原理

2.2.1 浮选捕收剂

锂辉石的浮选药剂常用“三碱两皂”,三碱为 Na_2S 、 Na_2CO_3 和 NaOH ，“两皂”为氧化石蜡皂和环烷酸皂。除采用油酸钠、皂类、十二烷基磺酸钠等阴离子捕收剂外,阳离子捕收剂在反浮选工艺时也经常被使用。锂辉石常用浮选药剂及其作用特点见表 1。

表 1 锂辉石常用选矿药剂及其作用特点^[27]

Table 1 Common beneficiation reagents for spodumene and their function characteristics^[27]

捕收剂			调整剂	
捕收剂类型	常用捕收剂	特点	常用调整剂	作用
阴离子捕收剂	油酸钠、氧化石蜡皂、环烷酸皂、十二烷基磺酸钠、羟肟酸等	选择性好,捕收能力弱。用于锂辉石正浮选	金属阳离子、氢氧化钠、碳酸钠等	活化锂辉石
阳离子捕收剂	十二胺、椰油胺等	选择性差、捕收能力强,起泡性好。多用于反浮选	硫化钠、六偏磷酸钠、糊精、淀粉等	抑制锂辉石

除了表 1 中常见的捕收剂,为更好地实现捕收剂选择性和捕收能力的兼顾,锂辉石浮选中组合捕收剂和螯合捕收剂的使用日渐广泛。如范新斌^[28]采用肟酸和氧化石蜡皂组合捕收锂辉石取得了良好的浮选指标,同时降低了药剂用量且提高了经济效益。针对四川某锂辉石矿,赵开乐等^[18]发现采用新型组合捕收剂 SD-5 可提高锂辉石的回收率并能简化生产流程。谢瑞琦等^[29]采用新型两性螯合捕收剂 DRQ-3 对锂辉石浮选的试验结果表明,DRQ-3 在室温、弱碱性、无活化剂的条件下对锂辉石具有很强的捕收能力,且药剂用量小、选择性强。

2.2.2 阴离子捕收剂作用机理

阴离子捕收剂以化学吸附的方式吸附于锂辉石表面的 Al^{3+} 位上^[30]。油酸钠是锂辉石浮选最常用的阴离子捕收剂,其在弱碱性时对锂辉石的回收率

较高^[31]。油酸钠(NaOL)在碱性条件下水解成油酸阴离子(OL^-),再与锂辉石表面的 Al^{3+} 生成难溶的油酸铝($\text{Al}(\text{OL})_3$)。

YU 等^[32]的研究表明,油酸在强碱性条件下水解成油酸离子,在酸性和中性条件下为油酸分子,在弱碱性条件下为离子和分子同时存在,且在范德华力作用下缔合形成离子—分子复合物,再化学吸附在锂辉石表面且复合物的疏水性最强,这解释了锂辉石在弱碱性条件时的浮选回收率较高的原因。

2.2.3 阳离子捕收剂作用机理

阳离子捕收剂主要以静电吸附方式作用于矿物表面,但这种作用力较弱,常通过提高捕收剂的浓度使其在矿物表面形成半胶束吸附。XIE 等^[33]合成了一种新型阳离子捕收剂(PPFDA),并发现 PPPDA 可通过静电作用和氢键吸附在锂辉石、长石和石英

表面,且在长石和石英表面的吸附量远大于在锂辉石表面上的吸附量,可用于锂辉石的反浮选工艺。

2.2.4 组合捕收剂的作用机理

与单一捕收剂相比,组合捕收剂具有协同效应,能有效改善捕收剂在目标矿物表面的吸附行为^[34]。阴、阳离子组合捕收剂在矿物表面存在协同吸附作用,在吸附过程中两种捕收剂头部基团携带的相反电荷降低了头部基团之间的静电斥力,使矿物表面吸附的基团更紧密地堆积在一起,增强两者的吸附,两种捕收剂还可以生成络合物吸附在矿物表面^[35]。

2.3 锂辉石浮选调整剂及其作用机理

由于锂辉石与脉石矿物表面性质相似,在浮选过程中需要添加调整剂对锂辉石进行活化或抑制,常见的调整剂见表1。

2.3.1 金属阳离子对锂辉石的活化作用机理

在锂辉石浮选过程中,常使用多价金属阳离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 等活化锂辉石^[36]。关于其活化机理,主要有“单羟基络合物”和“氢氧根沉淀”两种理论,前者认为金属羟基化合物是活化锂辉石的有效成分,后者则认为吸附于矿物表面的金属氢氧化物沉淀是活化锂辉石的有效成分。GAO 等^[37]认为 Ca^{2+} 和油酸钠能在溶液中形成具有特定结构的络合物或胶体,吸附在锂辉石表面促进锂辉石浮选。LIU 等^[38]的研究表明,pH 值对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 活化锂辉石矿物有显著影响,在达到一定 pH 值时,锂辉石表面会呈现正电性,有利于阴离子捕收剂吸附。ZHANG 等^[39]的研究表明,在 pH 值为 3~12 时,锂辉石、钠长石和石英矿物在水中均荷负电,但在 pH 值为 2~7 时加入 Fe^{3+} 能改变矿物表面的电性,增强油酸钠在矿物表面的吸附。

2.3.2 锂辉石抑制剂的作用机理

WANG 等^[40]研究表明, Na_2S 能与锂辉石表面预吸附的 Fe^{3+} 反应生成亲水的 FeS 胶体,六偏磷酸钠在水中电离生成的阴离子可与锂辉石表面的多价金属离子反应生成稳定的亲水络合物。淀粉作为传统的硅酸盐矿物抑制剂可通过氢键作用吸附在矿物表面,其选择性差,但改性后的磷酸酯淀粉能选择性吸附在锂辉石表面,而在石英表面只少量吸附^[27],使得锂辉石被抑制。

2.3.3 矿物表面溶解对锂辉石浮选的影响

在锂辉石浮选中,使用 NaOH 调浆可以消除锂辉石表面的杂质和矿泥等污染^[41],能有效提高浮选回收率。研究发现,锂辉石经过 NaOH 溶液处理后,其矿物表面会部分溶解,导致锂辉石和长

石表面的 Al 位密度增加,但由于长石表面 Al 位密度很小,Al 位密度的增加不足以显著增强油酸在长石表面的吸附^[41,42]。因此,经 NaOH 处理过的锂辉石表面对捕收剂的吸附能力得到了增强,进一步扩大了其与脉石矿物间的可浮性差异。

3 锂辉石选矿的辅助工艺

除浮选法外,手(色)选法、重介质法、磁选法是锂辉石常见的选别手段,在工业生产中有重要应用。手(色)选法、重介质法可应用于预先抛废,磁选法可应用于精矿除杂。在处理品位高、单体解离粒度大的矿石时,手(色)选法、重介质法可以生产出合格的锂辉石精矿^[43,44],但在处理复杂矿物时,采用联合选矿法才能生产出合格精矿,并实现资源综合利用。

3.1 预先抛废

在工业生产中,预先抛废能实现节能降耗、提高入选品位的目的。目前锂辉石选别中的预先抛废可以通过手(色)选法、重介质法来实现。如宋雪娟^[43]对四川某锂辉石矿进行有无手选作业的对比研究结果表明,手选能有效得提高入选品位、降低选矿成本和提高锂的浮选指标。近年来,随着选矿新设备、新工艺的不断发展,色选机逐渐替代人工手选。此外,刘广学等^[45]将 -8+0.5 mm 粒级的原矿(Li_2O 品位 3.75%)进行重介质分选抛尾试验,得到尾矿的 Li_2O 品位仅有 0.18%,可以实现预先抛尾的目的。

3.2 精矿除杂

在锂辉石精矿中常混杂一些具有弱磁性的矿物,常用磁选处理提高精矿品质。熊涛等^[46]通过“弱磁选—浮选”的工艺获得 Li_2O 品位 5.65%、含铁 3.2% 的品质较差的锂辉石精矿,通过高梯度磁选进一步除铁得到 Li_2O 品位 6.24%,含铁仅为 0.38% 的锂辉石精矿,大幅度提升了精矿品质。

3.3 联合选矿

随着对锂辉石的不断开发,用单一的选矿方法难以实现对“贫、细、杂”锂辉石矿的选别,需使用联合选矿工艺来处理。程仁举等^[47]对四川某多金属矿进行了选矿工艺试验,含 Li_2O 1.65%、 $\text{Ta}_2\text{O}_5 + \text{Nb}_2\text{O}_5$ 0.022% 的原矿,先混合浮选富集锂和钽铌,然后通过磁选从混合精矿分离出锂辉石精矿,磁选精矿再用重选法将钽铌进一步富集,采用“浮选—磁选—重选”联合工艺得到了 Li_2O 品位 5.73%、

回收率为 85.63% 的锂精矿和 $\text{Ta}_2\text{O}_5 + \text{Nb}_2\text{O}_5$ 品位为 36.90% 的钽铌精矿。

4 结论与展望

锂辉石的晶体结构和表面性质是重要的矿物基因特性,是决定矿物可浮性的关键,加强锂辉石矿物学特征研究有助于锂辉石资源的开发。针对“贫、细、杂”的锂辉石矿,应重视各种选矿工艺的联合应用以提高其资源利用率。此外,锂辉石高效浮选药剂的研发是提高浮选分离效果的一个重要方向,开展锂辉石与浮选药剂的作用机理研究,有助于新型捕收剂与调整剂的研制和工业应用。

参考文献

- [1] 林大泽. 锂的用途及其资源开发[J]. 中国安全科学学报, 2004(9): 76-80.
LING D Z. Uses of lithium and its resource exploitation[J]. China Safety Science Journal, 2004(9): 76-80.
- [2] 王琪, 赵有璟, 刘洋, 等. 高镁锂比盐湖镁锂分离与锂提取技术研究进展[J]. 化工学报, 2021, 72(6): 2905-2921.
WANG Q, ZHAO Y J, LIU Y, et al. Recent advances in magnesium/lithium separation and lithium extraction technologies from salt lake brine with high magnesium/lithium ratio[J]. CIESC Journal, 2021, 72(6): 2905-2921.
- [3] 葛涛, 徐亮, 孟金伟, 等. 盐湖卤水提锂工艺技术研究进展[J]. 有色金属工程, 2021, 11(2): 55-62.
GE T, XU L, MENG J W, et al. Research progress of lithium extraction technology from salt lake brine [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(2): 55-62.
- [4] 张杰. 锂辉石矿浮选基础理论与工艺研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015: 1-90.
ZHANG J. Research on basic theory and technology of spodumene flotation [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015: 1-90.
- [5] 谢贞付, 王毓华, 于福顺, 等. 伟晶岩型锂辉石矿浮选研究综述[J]. 稀有金属, 2013, 37(4): 641-649.
XIE Z F, WANG Y H, YU F S, et al. Reviews of flotation research on pegmatite spodumene ores[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(4): 641-649.
- [6] 董栋, 程宏伟, 郭保万, 等. 锂辉石选矿技术现状及展望[J]. 矿产保护与利用, 2018(4): 130-134.
DONG D, CHENG H W, GUO B W, et al. Research situation and prospect on the mineral processing technology of spodumene [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4): 130-134.
- [7] 孙传尧, 周俊武, 贾木欣, 等. 基因矿物加工工程研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(1): 1-7.
SUN C Y, ZHOU J W, JIA M X, et al. Research on genetic mineral processing engineering [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(1): 1-7.
- [8] 贾木欣, 孙传尧. 几种硅酸盐矿物对金属离子吸附特性的研究[J]. 矿冶, 2001, 10(3): 25-30.
JIA M X, SUN C Y. Study on adsorption behavior of metal ions on some silicate minerals[J]. Mining and Metallurgy, 2001, 10 (3): 25-30.
- [9] 于福顺, 闫平科, 蒋曼, 等. 锂辉石、钾长石矿物基因特性及其可浮性分析[J]. 金属矿山, 2020, 49(6): 75-80.
YUN F S, YAN P K, JIANG M, et al. Minerals genetic properties and their floatability of spodumene and potassium feldspar[J]. Metal Mine, 2020, 49(6): 75-80.
- [10] 谢瑞琦, 朱一民, 刘杰, 等. 基于密度泛函理论的锂辉石晶体结构及(110)面表面化学基因特性研究[J]. 金属矿山, 2020, 49(6): 68-74.
XIE Q R, ZHU Y M, LIU J, et al. The first principle calculation of spodumene electronic structure and surface chemistry features of spodumene (110) surface[J]. Metal Mine, 2020, 49 (6): 68-74.
- [11] XU L H, PENG T F, TIAN J, et al. Anisotropic surface physicochemical properties of spodumene and albite crystals: Implications for flotation separation[J]. Applied Surface Science, 2017, 426: 1005-1022.
- [12] ZHU G L, WANG Y H, LIU X W, 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.
- [13] XU L H, HU Y H, WU H Q, et al. Surface crystal chemistry of spodumene with different size fractions and implications for flotation[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 169: 33-42.
- [14] 何桂春, 蒋巍, 项华妹. 锂辉石选矿研究现状及展望[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(4): 61-65.
HE G C, JIANG W, XIANG H M. Research status and prospect of spodumene beneficiation[J]. Mining Research and Development, 2014, 34(4): 61-65.
- [15] 钱志博, 于洋, 周少珍. 泥质化蚀变型锂辉石矿选别工艺研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(增刊 2): 318-323.
QIAN Z B, YU Y, ZHOU S Z. Study on the separation process of muddy alteration spodumene ore[J]. China Mining Magazine, 2020, 29 (S2):

- 318-323.
- [16] 周贺鹏, 张永兵, 耿亮, 等. 调浆搅拌时间对含泥锂辉石浮选过程的影响[J]. 稀有金属, 2021, 45(6): 702-710.
- ZHOU H P, ZHANG Y B, GENG L, et al. The influence of mixing and mixing time on the flotation process of sludge-containing spodumene[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(6): 702-710.
- [17] 朱加乾, 黄丽亚, 陈波. 澳洲某锂辉石选矿试验研究及生产实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(6): 51-56.
- ZHU J Q, HUANG L Y, CHEN B. Beneficiation test and production practice on some spodumene ores from Australia [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(6): 51-56.
- [18] 赵开乐, 王昌良, 邓伟, 等. 某锂辉石矿石工艺矿物学特征及选矿试验[J]. 矿物学报, 2014, 34(4): 553-558.
- ZHAO K L, WANG C L, DENG W, et al. Technological mineralogical characteristics and beneficiation test of a spodumene ore [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2014, 34(4): 553-558.
- [19] 于福顺, 蒋曼, 王建磊, 等. 澳大利亚某锂辉石矿预先脱泥—浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(6): 69-72.
- YU F S, JIANG M, WANG J L, et al. Study on pre-deslime-flotation test of australian spodumene ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(6): 69-72.
- [20] 何桂春, 项华妹, 蒋巍, 等. 四川某低品位锂辉石矿选矿工艺试验研究[J]. 非金属矿, 2014, 37(1): 48-50.
- HE G C, XIANG H M, JIANG W, et al. Study on beneficiation process of low grade refractory spodumene ore in Sichuan[J]. Non-Metallic Mines, 2014, 37(1): 48-50.
- [21] 罗仙平, 吕玲芝, 陈晓明, 等. 江西某低品位难选锂辉石矿直接浮选工艺[J]. 有色金属工程, 2012, 2(5): 36-39.
- LUO X P, LYU L Z, CHEN X M, et al. Direct flotation process of a low-grade refractory spodumene ore in Jiangxi[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2012, 2(5): 36-39.
- [22] 何阳阳, 谢志远. 川西地区某锂辉石矿选矿试验探讨[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(5): 13-15.
- HE Y Y, XIE Z Y. Discussion on beneficiation test of a spodumene ore in Western Sichuan[J]. Industrial Minerals & Processing, 2017, 46(5): 13-15.
- [23] 闫克勤. 贵州某锂辉石矿石选矿试验[J]. 金属矿
- 山, 2018, 47 (11): 95-97.
- YAN K Q. Beneficiation test of a spodumene ore in Guizhou[J]. Metal Mine, 2018, 47(11): 95-97.
- [24] 徐龙华, 田佳, 巫侯琴, 等. 某锂辉石矿强化浮选及综合利用试验研究[J]. 非金属矿, 2017, 40(4): 16-19.
- XU L H, TIAN J, WU H Q, et al. Experimental study on strengthening flotation and comprehensive utilization of pegmatite spodumene ore[J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(4): 16-19.
- [25] 孙志健, 于洋. 某含腐锂辉石的难选锂辉石矿选矿试验研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(11): 29-33.
- SUN Z J, YU Y. Processing research on refractory spodumene ore containing cymatolite[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(11): 29-33.
- [26] 周贺鹏. 微细粒锂辉石聚团浮选特性及矿物表面反应机理 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020: 129-139.
- ZHOU H P. Agglomeration flotation characteristics of micro-fine spodumene and the reaction mechanism on mineral' s surface [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020: 129-139.
- [27] 朱一民, 谢瑞琦, 张猛. 锂辉石浮选捕收剂及调整剂研究综述[J]. 金属矿山, 2019, 48(2): 15-21.
- ZHU Y M, XIE R Q, ZHANG M. Review of spodumene flotation collectors and regulators [J]. Metal Mine, 2019, 48 (2): 15-21.
- [28] 范新斌. 锂辉石浮选中高效浮选剂的联合使用[J]. 新疆有色金属, 2012, 35(3): 69-70.
- FAN X B. Combined use of high-efficiency flotation agent in spodumene flotation[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2012, 35(3): 69-70.
- [29] 谢瑞琦, 朱一民, 韩旭倩, 等. 新型锂辉石捕收剂 DRQ-3 的浮选性能及作用机理研究[J]. 金属矿山, 2019, 48(2): 97-101.
- XIE R Q, ZHU Y M, HAN X Q, et al. Flotation behaviors and mechanisms of a amphoteric chelated type collector DRQ-3 for spodumene flotation [J]. Metal Mine, 2019, 48(2): 97-101.
- [30] ZHU G L, WANG X M, LI E Z, et al. Wetting characteristics of spodumene surfaces as influenced by collector adsorption [J]. Minerals Engineering, 2019, 130: 117-128.
- [31] XIE R Q, ZHU Y M, LIU J, et al. A self-assembly mixed collector system and the mechanism for the flotation separation of spodumene from feldspar and quartz[J/OL]. Minerals Engineering, 2021, 171: 107082. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107082>.
- [32] YU F S, WANG Y H, ZHANG L, et al. Role of oleic acid ionic-molecular complexes in the flotation of

- spodumene[J]. Minerals Engineering, 2015, 71: 7-12.
- [33] XIE R Q, ZHU Y M, LIU J, et al. The flotation behavior and adsorption mechanism of a new cationic collector on the separation of spodumene from feldspar and quartz [J/OL]. Separation and Purification Technology, 2021, 264: 118445. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118445>.
- [34] BOGALE T, FIDELE M, BORIS A, et al. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review [J]. Minerals Engineering, 2019, 131: 170-184.
- [35] HANUMANTHA R K, FORSSBERG K. Mixed collector systems in flotation [J]. International Journal of Mineral Processing, 1997, 51(1): 67-79.
- [36] ZHANG Y B, ZHOU H P, CAO Y J, et al. Activation mechanism of calcium hydrolysate on the spodumene surface and its effect on the adsorption of collector [J/OL]. Minerals Engineering, 2021, 174: 107221. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107221>.
- [37] GAO J D, SUN W, LYU F. Understanding the activation mechanism of Ca^{2+} ion in sodium oleate flotation of spodumene: A new perspective[J/OL]. Chemical Engineering Science, 2021, 244: 116742. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116742>.
- [38] LIU W J, ZHANG S Q, WANG W Q, et al. The effects of $\text{Ca}(\text{II})$ and $\text{Mg}(\text{II})$ ions on the flotation of spodumene using NaOL[J]. Minerals Engineering, 2015, 79: 40-46.
- [39] ZHANG J, WANG W Q, LIU J, et al. $\text{Fe}(\text{III})$ as an activator for the flotation of spodumene, albite, and quartz minerals [J]. Minerals Engineering, 2014, 61: 16-22.
- [40] 王毓华, 于福顺, 陈兴华, 等. 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 Y H, YU F S, CHEN X H, et al. Experimental study on flotation separation of spodumene and beryl[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(3): 320-324.
- [41] WANG Y H, ZHU G L, ZHANG L, et al. Surface dissolution of spodumene and its role in the flotation concentration of a spodumene ore [J]. Minerals Engineering, 2018, 125: 120-125.
- [42] ZHU G L, ZHAO Y H, ZHENG X Y, et al. Understanding the role of sodium hydroxide in the selective flotation separation of spodumene from feldspar and quartz[J/OL]. Minerals Engineering, 2020, 159: 106648. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106648>.
- [43] 宋雪娟. 手选作业在某锂辉石矿选别中的应用[J]. 新疆有色金属, 2012, 35(5): 50-51.
- SONG X J. Application of hand separation in the separation of spodumene ore [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2012, 35(5): 50-51.
- [44] 陶家荣. 锂辉石矿重介质选矿工业试验与研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2002(2): 13-16.
- TAO J R. Industrial experiment and research on heavy medium beneficiation of spodumene ore [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2002(2): 13-16.
- [45] 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, 50(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, 50(3): 124-129.
- [46] 熊涛, 陈禄政, 谢美芳, 等. 某锂辉石矿 SLon 磁选机除铁提锂试验研究及应用[J]. 非金属矿, 2020, 43(6): 67-69.
- XIONG T, CHEN L Z, XIE M F, et al. Iron removing research and application of SLon HGMS in spodumene[J]. Non-Metallic Mines, 2020, 43(6): 67-69.
- [47] 程仁举, 李成秀, 刘星, 等. 四川某锂多金属矿石选矿试验[J]. 金属矿山, 2017, 46(9): 111-114.
- CHENG R J, LI C X, LIU X, et al. Experimental research on comprehensive utilization of lithium polymetallic ore in Sichuan province[J]. Metal Mine, 2017, 46(9): 111-114.

通信作者简介: 谢海云, 女, 博士, 昆明理工大学教授, 硕士生导师。主要研究方向为有色金属矿和铁矿的选矿工艺及理论。提出基于矿物表面选择性钝化浮选分离铜铅硫化矿混合精矿的新方法, 创新性地解决了铜铅分离难题。主持国家自然科学基金、云南省基金和企业项目共 20 余项, 申请国家发明专利 14 项, 已授权 10 项, 专利技术转让 1 项。以第一作者或通讯作者发表学术论文 40 余篇, 其中 SCI、EI 检索 20 余篇。

