

锂辉石选矿技术现状及展望^{*}

董栋^{1,2,3}, 程宏伟^{1,2}, 郭保万^{1,2}, 何兰军³

(1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2. 自然资源部多金属矿评价与综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006; 3. 国土资源部放射性与稀有稀散矿产综合利用重点实验室, 广东 韶关 512026)

摘要: 锂是新世纪的能源金属, 而锂辉石是锂的重要来源之一。介绍了锂辉石矿的选矿技术进展, 详细阐述了锂辉石的选矿工艺、浮选捕收剂和浮选调整剂的研究现状及发展趋势, 并展望了锂辉石选矿技术以后的发展方向。

关键词: 锂辉石; 选矿工艺; 浮选药剂; 作用机理; 捕收剂; 调整剂

中图分类号: TD955 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2018)04-0130-05

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.03.044

Research Situation and Prospect on the Mineral Processing Technology of Spodumene

DONG Dong^{1,2,3}, CHENG Hongwei^{1,2}, GUO Baowan^{1,2}, HE Lanjun³

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, China; 2. Key Laboratory of Evaluation and Multipurpose Utilization of Polymetallic Ores of Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, China; 3. Key Laboratory of Radioactive and Rare Scattered Mineral Comprehensive Utilization, Ministry of Land and Resource, Shaoguan 512026, China)

Abstract: Lithium is an energy metal material in new century, and spodumene is one of the most important sources of lithium. In this paper, the progress on the mineral processing technology of spodumene was introduced, the situation and development trend of processing flowsheet, flotation collectors and flotation modifier were elaborated, and the major developing outlook of beneficiation of spodumene were prospected.

Key words: spodumene; mineral processing technology; flotation reagents; action mechanism; collector; regulators

锂是密度最小的金属, 银白色, 质软, 具有极强的电化学活性。锂广泛应用于电池、电子、化工、材料、医疗等领域^[1]。锂的生产规模和产量近年来得到迅猛发展, 被称为21世纪的能源金属^[2]。

锂辉石是锂的重要来源之一, 锂辉石 $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ 产于白云母型和锂云母型花岗伟晶岩中, 是伟晶岩作用过程交代成因的矿物, 属单斜晶系, 常呈柱状、板状产出, 也见有板柱状、棒状、或致密隐晶块状集合体。锂辉石常与锂云母、绿柱石、铌钽铁

矿、电气石、白云母等共生^[3,4]。我国锂辉石资源储量居世界第二位, 主要分布在新疆、四川、江西、湖南等地^[5-7]。但锂辉石品位较低、嵌布粒度细, 与脉石矿物均属于硅酸盐矿物, 同时表面易受风化污染或在矿浆中受矿泥污染, 使其可浮性变坏, 且矿浆中的一些难免离子会同时活化锂辉石和脉石矿物, 以上因素使锂辉石矿物与脉石矿物浮选分离效率大幅度降低, 致使分离困难, 资源综合利用率低。因此本文主要结合锂辉石的选矿研究和生产实践, 进行选矿

* 收稿日期: 2018-04-19

基金项目: 国土资源部放射性与稀有稀散矿产综合利用重点实验室开放基金(KYSKFJJ201506)

作者简介: 董栋(1986-), 男, 硕士, 主要研究方向为选矿工艺与应用。

工艺及药剂研究现状及进展综述。

1 锂辉石的晶体结构

锂辉石属链状结构硅酸盐矿物,硅氧四面体以共角顶氧的方式沿c轴方向连结成无限延伸的硅氧四面体链;Al与O形成铝氧八面体,并以共棱方式沿c轴方向连结成“之”字形的无限延伸的八面体链。两个硅氧四面体链与一个铝氧八面体链形成2:1夹心状的“I”形杆链,再借助Li连接起来。Li在M2位置,Al在M1位置,其晶体结构如图1所示^[8,9]。

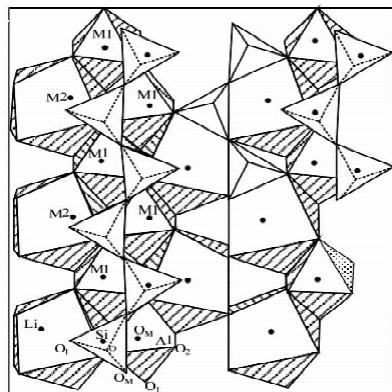


图1 锂辉石的晶体结构

Fig. 1 Crystal structure of spodumene

锂辉石破碎时,由表1的计算结果表明,Li-O键的键强远小于Al-O键和Si-O键的键强,因此平行c轴方向的Li-O键大量断裂,此外垂直c轴方向的Al-O键和Si-O键也部分断裂。由于Li易

表1 锂辉石化学键计算结果^[3]

Table 1 The results of chemical bond calculation of spodumene

阳离子	电价	离子半径/nm	配位数/n	元素电负性	$M^{n+} - O^{2-}$ 平均键长/nm	$M^{n+} - O^{2-}$ 库仑力F	$M^{n+} - O^{2-}$ 键的相对键合强度
Li ⁺	1	0.082	6	0.97	0.221	0.47	0.06~0.08
Al ³⁺	3	0.061	6	1.47	0.192	1.75	0.26~0.37
Si ⁴⁺	4	0.034	4	1.74	0.162	3.20	0.78~1.12

表2 不同产地锂辉石的选矿工艺及指标

Table 2 The mineral processing technology and index of spodumene in different producing areas

产地	矿石性质及组成	原矿Li ₂ O品位	选矿工艺	药剂制度	选别指标
新疆可可托海 ^[17]	锂辉石、钽铌铁矿、长石、石英等	1.32%	浮选-重选	氧化石蜡皂、环烷酸皂	精矿Li ₂ O品位5.97%,回收率86.5%
四川马尔康 ^[26]	锂辉石、角闪石、透辉石等	1.36%	浮选	/	精矿Li ₂ O品位5.12%,回收率78.86%
四川甘孜 ^[27]	锂辉石、钽铌铁矿、铌钽铁矿、锡石等	1.2%~1.4%	浮选	组合捕收剂	精矿Li ₂ O品位5.5%~5.8%,回收率75%
江西赣州 ^[28]	锂辉石、长石、石英、云母等	1.46%	浮选	十二胺、731	精矿Li ₂ O品位5.2%,回收率66%
美国金丝山 ^[29]	锂辉石、长石、石英、白云母等	1.5%	浮选	塔尔油、乙二醇	精矿Li ₂ O品位6.3%,回收率75%~78%

溶于水,与水中的H⁺发生交换吸附,Al³⁺端和Si⁴⁺端也能吸附OH⁻,这两种作用的结果使锂辉石在水中表明键合大量的羟基,在广泛的pH值范围内带负电,而且零电点也低。

2 锂矿石的选矿工艺研究

工业上锂辉石矿选矿常用的方法有:浮选法、磁选法、重介质法、手选法等。

(1) 浮选法

浮选法是锂辉石矿石最常有的选别方法,凡是具有工业价值的锂辉石矿基本上都可用浮选法,因此广泛应用于国内外锂辉石选矿厂^[10~14]。

(2) 磁选法

锂辉石矿物中,只有铁锂辉石具有弱磁性,因此磁选法主要用于去除锂辉石矿中的含铁矿物以及综合回收其它有价金属,提高锂辉石精矿品质,工业上磁选法常与浮选、重选等方法联合使用^[15~18]。

(3) 重介质法

重介质法主要是利用锂辉石矿物和脉石矿物的密度差进行选别,用于嵌布粒度较粗的锂辉石矿的选别,具有投资少、生产成本低、精矿品位和回收率较高、易于后续锂的提取和加工等优点^[19~23]。

(4) 手选法

手选法是利用锂辉石矿物与脉石矿物间的表面性质差异进行人工分选的一种选别方法。手选法主要用于分选原矿中含废石较多的矿石,用于预选作业,初步将目的矿石与脉石矿物分离,提高入选品位^[24,25]。

(5) 联合工艺

伴随着锂辉石资源的不断开采,贫细杂的锂辉石资源将不断增多,采用单一的选矿方法已经很难得到合格的精矿,必须采用联合选矿工艺,比如:浮选—重选—磁选联合工艺等,提高资源的综合利用率。针对不同产地锂辉石矿的选矿工艺和指标见表2。

3 浮选药剂

浮选是我国锂辉石选别最重要的方法,而浮选药剂在锂辉石的浮选中起着十分重要的作用,因此本文针对捕收剂和调整剂进行详细介绍。

3.1 浮选捕收剂

锂辉石常用的捕收剂主要有:阳离子捕收剂和阴离子捕收剂,见表 3。

表 3 常用捕收剂类型及特点^[30-39]

Table 3 The types and characteristics of conventional collectors

药剂类型	常用药剂	特点
阴离子型	油酸钠、氧化石蜡皂、塔尔油、环烷酸皂等	应用广泛,捕收能力弱,选择性好,使用时需要高价金属阳离子活化和调整剂控制活化的选择性
阳离子型	胺类捕收剂:十二胺、十四胺等	捕收性能普遍较好,但选择性差,使用时需要高价金属阳离子对硅酸盐矿物产生不同程度的抑制作用,提高分离的选择性

蜡皂作为捕收剂,提高了药剂的捕收效果,获得了良好的技术指标,大大降低了药剂用量,使锂辉石选别达到先进水平。赵开乐等^[45]针对四川某锂辉石矿开展试验研究,采用新型组合捕收剂 SD - 5 作为捕收剂,原矿氧化锂品位 1.42%,经过一粗两扫三精,可以获得氧化锂品位 6.12%、回收率 86.01% 的精矿,与现场生产指标相比,回收率大幅提高,工艺流程简单,经济技术指标优异。冯木等^[46,47]针对四川某锂辉石矿,研究采用新型捕收剂 HZ - 1 的捕收性能,并和常用的锂辉石捕收剂氧化石蜡皂和环烷酸皂进行对比,单一捕收剂试验结果表明 HZ - 1 选择性较好,将氧化石蜡皂、HZ - 1、环烷酸皂两两复配进行组合捕收剂试验,结果表明组合捕收剂比各单一捕收剂捕收能力和选择性更好,机理研究也验证了组合捕收剂浮选效果更佳。

3.1.1 阴离子捕收剂的作用机理

目前在阴离子捕收剂研究中以油酸钠为代表,经高价金属阳离子活化后,捕收剂与锂辉石矿物表面发生化学作用而吸附。用油酸钠浮选锂辉石,油酸钠主要通过 Al^{3+} 与油酸根 COO^- 离子发生化学作用而吸附在锂辉石表面,这种吸附具有不可逆性,吸附强度较高,通过分子间作用力,互相牵扯形成一种栅栏状吸附层,从而提高油酸钠在矿物表面整体吸附强度^[48]。从分子动力学角度研究表明锂辉石表面化学性质主要是两个晶面(110)与(001)控制,其中晶面(110)比(001)易与油酸发生化学吸附,油酸

锂辉石新型捕收剂主要为螯合捕收剂和组合捕收剂等。王毓华^[40-42]研制了新型螯合捕收剂,使锂辉石与脉石矿物能够有效分离,明显降低了选矿成本,提高了锂辉石的选别指标。何建璋^[43]针对某花岗伟晶岩锂辉石矿,采用螯合捕收剂 YZB - 17 能提高锂辉石和绿柱石混合精矿的品位和回收率,实现锂辉石和绿柱石的分离。范新斌^[44]针对新疆可可托海三号脉在生产上使用新型捕收剂肟酸和氧化石

分子在矿物表面形成单分子层使其疏水,生成的分子层越紧密,吸附性越强,接触角也越大^[49]。

3.1.2 阳离子捕收剂的作用机理

目前在阳离子捕收剂研究中基本以十二胺为代表,捕收剂与锂辉石表面的相互作用,主要是靠阳离子 RNH_3^+ 或 $\text{RNH}_2 \cdot \text{RNH}_3^+$ 在矿物表面双电层依靠静电引力吸附在荷负电的矿物表面,但这种吸附较弱,需要适宜的浓度使捕收剂在矿物表面形成半胶束吸附,使静电引力吸附和烃链间的范德瓦尔斯力共同起吸附作用。从能量角度和前线轨道能的角度进行分析,锂辉石与十二胺作用后体系总能量和前线轨道能量均比和油酸钠作用后低,说明十二胺对锂辉石的捕收能力大于油酸钠^[50,51]。

现有锂辉石捕收剂都存在捕收性能和选择性能不能兼顾的问题,即当用阴离子捕收剂浮选时,可浮性普遍较差;当用阳离子捕收剂浮选时,选择性普遍较差,目前尚缺乏来源广、价格低的有选择性的高效捕收剂,而新型捕收剂的研制尚处于实验室阶段,因此针对锂辉石的新型高效捕收剂的研制与工业应用是重点和难点。

3.2 浮选调整剂

锂辉石常用的调整剂主要有金属阳离子调整剂、无机调整剂和有机调整剂,见表 4。

调整剂研究较多的为金属阳离子调整剂,其与锂辉石的作用主要是配合捕收剂使用起活化或者抑

表4 常用调整剂类型^[52-58]

Table 4 The types of conventional modifiers

药剂类型	常用药剂
金属阳离子调整剂	CaCl ₂ , FeCl ₃ , FeSO ₄ , CuSO ₄ 等
无机调整剂	Na ₂ CO ₃ 、NaOH 和 Na ₂ S 等
有机调整剂	低分子量有机调整剂和高分子量有机调整剂(包括淀粉类、纤维素类等)

制作用。

关于活化机理,主要有以下两种观点:(1) Fuerstenau 根据金属羟基络合物的氢氧离子结合矿物已吸附的氢氧离子并脱水,使金属阳离子吸附于矿物表面,提出“金属离子羟基络合物是主要活化组分”的假说;(2) James 等根据金属离子的吸附量测量和理论分析认为,金属氢氧化物在界面的溶度积小于在溶液中的溶度积,通过计算进一步证明界面区域金属离子的浓度远大于溶液中金属离子的浓度,因此金属氢氧化物更容易在矿物表面生成氢氧化物沉淀,提出的“金属氢氧化物表面沉淀是起活化作用的主要组分”假说^[59-61]。

抑制作用机理目前也有两种观点:一是金属离子吸附在矿物表面后提高了矿物表面的电性,减弱捕收剂的静电吸附力;二是硅酸盐矿物在多价金属阳离子作用下,大大降低了矿物界面层内的捕收剂阳离子浓度,使捕收剂对矿物的捕收作用减弱^[3,62]。

有机调整剂因为其作用形式、作用效果及作用机理在复杂的浮选体系中十分复杂,有时还会出现相反的结果,因此其作用实质有待进一步系统深入的研究。

4 结语及展望

(1) 针对我国锂辉石矿的特点,采用联合工艺才能实现锂辉石与脉石矿物的有效分离。

(2) 现有锂辉石捕收剂都存在捕收性能和选择性能不能兼顾的问题,新型捕收剂的研制尚处于实验室阶段,因此,针对锂辉石的新型高效捕收剂的研制与工业应用是重点。

(3) 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。

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):76-80,98.
- [2] 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(3):52-60.

- [3] 孙传尧, 印万忠. 硅酸盐矿物浮选原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 王濮. 系统矿物学(中)[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [5] 翟锐, 翟志龙. 合理开发柴达木锂资源[J]. 中国石油和化工, 2001(7):26-27.
- [6] 郑绵平, 刘喜方. 中国的锂资源[J]. 新材料产业, 2007(8):13-16.
- [7] 冯安生. 锂矿物的资源、加工和应用[J]. 矿产保护与利用, 1993(1):39-46.
- [8] 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.
- [9] 潘兆橹. 结晶学与矿物学(下)[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [10] 程仁举, 李成秀, 刘星, 等. 川西某低品位锂辉石矿分选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(5):42-45, 50.
- [11] 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(9):111-114.
- [12] 樊丽丽, 曾钦. 浅析某地区锂辉石选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2017(4):57-59.
- [13] 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, 51.
- [14] 梅志, 孙伟, 刘若华, 等. 四川某锂辉石矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(5):46-48, 52.
- [15] 刘人辅, 谷晋川. 生产低铁锂辉石的工艺流程及其特点[J]. 矿产综合利用, 1989(6):20-23.
- [16] 刘人辅, 谷晋川. 锂辉石除铁研究[J]. 非金属矿, 1990(6):20-24.
- [17] 赖复兴. 不加温浮选锂辉石矿和低铁锂辉石选矿扩大试验[J]. 新疆有色金属, 1996(1):58-61.
- [18] Siame E, Pascoe R D. Extraction of lithium from micaceous waste from china clay production [J]. Minerals Engineering, 2011, 24(14):1595-1602.
- [19] 陶家荣. 锂辉石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.
- [20] A · B · 索萨, 汪镜亮. 葡萄牙锂辉石矿石的选矿研究[J]. 国外金属矿选矿, 2001(10):29-31.
- [21] 廖明和, 许温复, 王学平. 锂辉石重液分选试验[J]. 非金属矿, 2003, 26(6):40-41.
- [22] Sousa A B, Amarante M M, Leite M. Beneficiation studies on a spodumene ore from portugal [J]. Developments in Mineral Processing, 2000, 13:40-46.
- [23] Tippin R, Browning J, Llewellyn T. Continuous heavy liquid concentration of spodumene [M]. Washington D. C: Bureau of Mines, 1979:29.
- [24] 宋雪娟. 手选作业在某锂辉石矿选矿中的应用[J]. 新疆有色金属, 2012(5):50-51.
- [25] Brandt Felix, Haus Reiner. New concepts for lithium minerals processing [J]. Minerals Engineering, 2010, 23(8):

- 659–661.
- [26] 魏喜国. 马尔康矿锂辉石浮选工艺改造点滴[J]. 新疆有色金属, 1994(4): 24–25.
- [27] 杨磊. 四川甲基卡地区锂辉石选矿工艺试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2014(1): 30–34.
- [28] 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.
- [29] 选矿手册编委会. 选矿手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 11.
- [30] 石海兰, 朱文龙. Fe^{3+} 对锂辉石浮选的影响及机理研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2015, 43(4): 5–9.
- [31] 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.
- [32] 李新冬, 黄万抚, 文金磊, 等. 锂辉石矿的工艺矿物学与选矿工艺研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(5): 1207–1213.
- [33] 谢贞付. 不同粒度锂辉石浮选特性及矿泥影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [34] 吕玲芝. 某复杂难选低品位锂辉石矿综合回收工艺[J]. 有色金属工程, 2014, 4(2): 54–57.
- [35] 吕玲芝. 江西宁都锂辉石矿浮选工艺及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- [36] 任文斌. 联合捕收剂浮选锂辉石生产实践[J]. 新疆有色金属, 2012, 35(3): 84–85.
- [37] 伊新辉. 锂辉石低温浮选试验研究[J]. 中国矿山工程, 2011, 40(6): 20–22, 43.
- [38] 朱文龙, 黄万抚. 国内外锂矿物资源概况及其选矿工艺综述[J]. 现代矿业, 2010, 26(7): 1–4.
- [39] 魏喜国. 马尔康矿锂辉石浮选工艺改造点滴[J]. 新疆有色金属, 1994(4): 24–25.
- [40] 王毓华. 新型捕收剂浮选锂辉石的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2002(5): 11–13.
- [41] 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, 2005, 36(5): 807–811.
- [42] Wang Yuhua, Yu Fushun. Effects of metallic ions on the flotation of spodumene and beryl[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 17(1): 35–39.
- [43] 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.
- [44] 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, 75.
- [45] 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.
- [46] 冯木, 孙伟, 刘若华, 等. 组合捕收剂在锂辉石浮选中协同作用的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(2): 96–100.
- [47] 冯木. 新型捕收剂在锂辉石浮选中的作用机理及表面化学分析[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [48] 徐龙华, 董发勤, 巫侯琴, 等. 油酸钠浮选锂辉石的作用机理研究[J]. 矿物学报, 2013, 33(2): 181–184.
- [49] Beena R, Sathish P, Jyotsna T, et al. A molecular dynamics study of the interaction of oleate and dodecylammonium chloride surfactants with complex aluminosilicate minerals [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, 362: 510–516.
- [50] 项华妹. 锂辉石电子结构及其可浮性的量子化学研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
- [51] 项华妹, 何芮, 张海天. 基于锂辉石纯矿物的浮选研究[J]. 中国科技信息, 2015(5): 64–66.
- [52] 高扬, 刘全军, 宋建文. 四川康定选铁尾矿回收锂辉石选矿试验研究[J]. 轻金属, 2017(7): 1–5.
- [53] 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.
- [54] 刘方. 硅酸盐矿物浮选过程中调整剂对捕收剂作用方式的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [55] 刘方, 孙传尧. 调整剂和油酸钠添加顺序对硅酸盐矿物浮选的影响[J]. 金属矿山, 2011(3): 90–94.
- [56] 李爱民, 蒋进光, 王晖, 等. 含铍矿物浮选研究现状与展望[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008(3): 58–61.
- [57] 孙蔚, 叶强. 对四川某地锂辉石矿浮选的认识[J]. 新疆有色金属, 2004(4): 28–30.
- [58] 李毓康. 含绿柱石、锂辉石矿石浮选分离工艺及“三碱”调整剂作用机理的研究[J]. 国外金属矿选矿, 1991(Z1): 89–96.
- [59] M C Fuerstenau, B R Palmer. Flotation – gaudin A M memorial volume[M]. New York: AIME, 1976.
- [60] James R O, Healy T W. Adsorption of hydrolysable metal ions at the oxide – water interface. I. $\text{Co}^{(II)}$ adsorption on SiO_2 and TiO_2 as model systems[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1972, 40(1): 42–52.
- [61] 于福顺. 锂辉石与绿柱石浮选分离工艺及机理的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [62] 李金林, 刘丹, 王伊杰, 等. 锂辉石浮选机理研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(8): 2400–2406, 2411.

引用格式: 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 Dong, CHENG Hongwei, GUO Baowan, et al. Research situation and prospect on the mineral processing technology of spodumene[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4): 130–134.