

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2020.06.005

锂铍稀有金属选矿及综合利用研究现状和展望

汪泰^{1,2,3}, 胡真^{1,2,3}, 王威⁴

- (1. 广东省资源综合利用研究所, 广州 510650;
2. 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广州 510650;
3. 广东省矿产开发与综合利用重点实验室, 广州 510650;
4. 新疆自然资源与生态环境研究中心, 乌鲁木齐 830011)

摘要:简述了锂铍稀有金属资源分布、需求以及选矿工艺现状,并对浮选作用机理进行了概述,指出联合选矿工艺将成为复杂锂铍资源分离的发展趋势;仍需要加强锂铍浮选作用机理研究,丰富稀有金属浮选基础理论;开发绿色高效环保的浮选药剂,减少环境污染;强化钽、铌、锡、石英和长石等伴生资源的综合利用,降低固废排放。

关键词:锂辉石;绿柱石;选矿工艺;综合回收

中图分类号:TD954 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-9492(2020)06-0024-06

Research Status and Prospects of Lithium Beryllium Rare Metals Beneficiation and Comprehensive Utilization

WANG Tai^{1,2,3}, HU Zhen^{1,2,3}, WANG Wei⁴

- (1. Guangdong Institute of Resources Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, China;
2. State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources Development and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510650, China;
4. The Research Center for Resource and Environment of Xinjiang, Urumqi 830011, China)

Abstract: The distribution and demand of lithium and beryllium rare metal resources and the current situation of mineral processing technology are briefly described and the flotation mechanism is outlined. It is pointed out that the combined beneficiation process will become the development trend of the separation of complex lithium and beryllium resources. It is still necessary to strengthen the study of flotation mechanism of lithium and beryllium and enrich the basic theory of rare metal flotation, to develop green, efficient and environment-friendly flotation reagents to reduce environmental pollution, and to strengthen the comprehensive utilization of associated resources such as tantalum, niobium, tin, quartz and feldspar, and reduce solid waste emissions.

Key words: spodumene; beryl; beneficiation process; comprehensive recovery

锂铍等稀有金属广泛应用于航空航天、核能和新能源汽车等高新产业,已成为我国的战略性关键金属资源^[1]。锂资源主要分布于伟晶岩、沉积岩和盐湖卤水等矿床中。探明锂总储量为1 500万t,主要分布于智利、中国和玻利维亚,占世界总储量的

80%以上。近年来,先后在川西^[2]、喀喇昆仑^[3]等海拔地区陆续厘定出多条伟晶岩稀有金属成矿带,锂资源储量占我国总量的60%以上。随着经济的快速发展,中国锂的消费量占世界消费总量的52%,但对我国的外依存度高达80%^[4]。铍矿床分为花岗伟

收稿日期:2020-03-16

基金项目:新疆自治区重点研发计划项目(2019B00011-3);国家自然科学基金重大研究计划(91962215)

作者简介:汪泰(1986-),男,硕士,高级工程师,主要从事矿产源综合利用研究。

晶岩和气成热液型两大类,铍资源总量 338.3 万 t,储量 116.4 万 t,主要分布在巴西、印度、俄罗斯、美国、阿根廷和澳大利亚等国家。虽然铍资源丰富,但是单一矿床少、共伴生矿床多,铍品位较低,综合回收难度较大。根据 2015 年美国地质调查局公布的数据,全球铍矿产量 270 t,美国占 89%。我国虽然已经是第二大产铍国,但是铍资源供不应求,对外依存度仍高达 87%^[5]。

1 锂铍选矿工艺研究进展

选矿工作者围绕锂铍资源主要开发出浮选法、重介质选矿法、热裂法、手选法、化学处理法和联合工艺等选别方法^[6-7]。

1.1 浮选法

基于浮选药剂的作用强化锂铍矿物与脉石可浮性差异实现分离,是细粒浸染的锂辉石和绿柱石常用的分离方法。

锂的浮选主要包括锂辉石和锂云母的选别。根据锂辉石的浮选顺序分为正浮选和反浮选两种工艺。锂辉石正浮选(优先浮锂)是目前常见的浮锂工艺,在磨矿过程中加入氢氧化钠或者碳酸钠,调节矿浆 pH 值至碱性,通过高浓度、强搅拌,多次脱泥,然后加入脂肪酸或者氧化石蜡皂浮选锂辉石^[8-9]。锂辉石反浮选通常使用石灰调节矿浆 pH 值至碱性,然后添加适量的糊精或淀粉,选择性抑制锂辉石,采用阳离子胺类捕收剂将云母等硅酸盐类脉石矿物进行浮选脱除,槽内产品即为锂辉石精矿^[10]。值得注意的是,由于浮选矿浆中的一些 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 难免离子,不仅对锂辉石有一定的活化作用,而且也对石英、长石等硅酸盐脉石矿物具有活化作用,导致锂辉石与脉石矿物浮游差异减小。因此,筛选脉石矿物的有效抑制剂是锂辉石浮选的关键^[11]。宜春钽铌多金属矿中锂云母的含量达到 20%,选厂针对重选尾矿进行锂云母浮选,获得 Li_2O 品位 4%~4.7%、回收率 80%~85%的锂辉石精矿产品。

铍的浮选主要包括绿柱石和羟硅铍石的选别。绿柱石浮选通常需要用酸或者碱预处理,加入金属阳离子活化才具备良好的可浮性^[12],矿浆 pH 值对绿柱石浮选影响也比较显著^[13],而氟化物对绿柱石浮选产生较强的抑制作用。基于此,绿柱石浮选通过酸或碱预先处理,不仅可以消除矿物表面的污染,而且可选择性溶蚀绿柱石矿物表面,增加铍金属离子暴露,增加阴离子捕收剂在绿柱石矿物表面的作用几率^[14]。由此,绿柱石浮选分为酸法和碱法两种

流程^[15]。美国主要采用浮选回收羟硅铍石,也有采用原矿直接浸出提取铍化物的液液萃取工艺。

由于伟晶岩锂铍矿风化严重,含泥量大,矿泥影响浮选矿浆的黏度、消耗大量的浮选药剂、吸附在锂铍矿物表面影响分离、释放 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 活化其他矿物,从而增大了锂铍浮选分离的难度。为减少矿泥对锂铍浮选的不良影响,选矿工作者也开发了预先脱泥工艺、阶段磨矿阶段选别等浮选工艺^[16]。此外,也有采用浮选脱除部分易浮矿物和矿泥^[17]的碱法工艺,即采用氢氧化钠预处理,调节矿浆 pH 值至 8~8.5,然后采用脂肪酸类捕收剂浮选绿柱石的碱法不脱泥浮选工艺。值得注意的是,花岗伟晶岩矿床中锂辉石和绿柱石经常伴生在一起,且两者的可浮性相近,浮选分离的关键在于寻找选择性抑制剂。针对锂铍浮选已经开发出部分优先浮锂-锂铍混浮-锂铍分离、优先浮铍-再选锂以及优先浮选锂再选铍等三种分离工艺。1961 年我国学者创造性提出了“优先选铍再选锂”技术思路,采用“三碱二皂一油”的药剂制度,开发出“碱法不脱泥”选别工艺^[18],实现了新疆可可托海三号脉锂辉石和绿柱石综合回收,具有划时代的意义。

1.2 重选/重介质选矿法

由于锂辉石的密度为 3.2 g/cm^3 左右,石英、长石等主要脉石矿物密度为 2.6 g/cm^3 左右,密度差异并不明显,跳汰、螺旋溜槽、摇床等常规重选设备难以实现锂铍矿物与脉石的分离。对嵌布粒度较粗的锂辉石矿,采用三溴甲烷、四溴乙烷等作为重液,可实现锂辉石与轻比重脉石矿物分离,该方法具有简易、经济等优点^[19]。该方法与浮选法相比,具有设备投资少、运营成本低,技术指标高等优点,同时重选精矿易于后续锂盐的提取和深加工,但面临重介质回收、循环利用等难题。

陶家荣针对四川某锂辉石样品中-3+1 mm 粒级,使用密度为 $2.95\sim 3.0 \text{ g/cm}^3$ 重介质,通过“一粗一精”的两段重介质选别流程,在入选 Li_2O 品位为 2.95%的条件下,获得了 Li_2O 品位为 7.06%,总回收率为 87.47%的锂辉石精矿。重介质分选锂辉石已经在我国四川阿坝州、新疆福海县、以及美国北卡罗莱纳州、南达科塔州等矿选矿厂得到应用^[20]。

1.3 热裂法

β 型锂辉石具有疏松特质,当锂辉石高温焙烧时,会由 α 型锂辉石转变为 β 型锂辉石,而石英等脉石矿物在该温度下没有发生变化,然后通过破碎、筛分或者风力分选实现分离,得到锂辉石精矿。

DRESLER W 等人采用热裂法将锂辉石与石英等脉石分离,基于锂辉石受热晶型发生改变,质脆易碎,通过选择性磨矿,并通过筛分、风力选矿,获得了 Li_2O 品位 4%~6%、回收率 70%~80% 的锂精矿产品^[21]。

1.4 手选法

手选法是基于锂辉石、绿柱石的形状和颜色与其他脉石矿物的差异进行人工拣选,适用于含废石较多的原矿分选,通常用于预选作业,提高锂铍入选品位。20 世纪 50 年代,在我国新疆可可托海就用手选生产锂辉石精矿,回收率达到 20%~30%。四川省金川县李家沟锂辉石矿脉石矿物呈黑色,与锂辉石等有用矿物色差明显,宋雪娟^[22]在原矿粗碎作业后应用手选作业,将黑色脉石矿物选出。1962 年国外生产 7 740 t 绿柱石精矿中,手选的绿柱石高达 6 750 t,占绿柱石产量的 90% 以上。由于手选劳动强度大、生产效率低、资源浪费较大,逐步被其它选矿工艺替代^[23],但有较好条件的矿区,首选仍不失为一种从粗粒嵌布锂铍矿中获得锂铍精矿的方法。

1.5 磁选法

磁选法主要是用于锂辉石、绿柱石精矿的提纯。通过磁选将精矿中伴生的含铁杂质矿物脱除,获得高质量精矿产品。汤小军等^[24]针对四川某难选多金属锂辉石矿采用浮选法获得锂辉石精矿。由于浮选锂辉石精矿中含有一定量黑云母、电气石、角闪石以及在选别过程当中产生的铁屑,试验通过高梯度磁选除杂,获得了 Fe_2O_3 含量为 0.18% 的低铁锂辉石精矿。

1.6 化学处理法

化学处理法主要用于从盐湖卤水中提取锂^[25]。美国十分重视这项研究,20 世纪 60 年代以后从盐湖卤水中提锂在美国得到了飞速发展。随着研究工作的深入开展,卤水提锂的方法不断增多,也不断涌现新技术和新工艺。需要指出的是,我国由于盐湖卤水镁锂比值高达 40 以上,目前多数处于实验室研究阶段,未能大规模推广实践^[26]。因此,今后一段时间内我国仍主要依赖从锂矿中提取锂。

1.7 联合工艺

伴随着锂辉石资源的深入开采,“贫、细、杂、难”的锂铍矿资源不断增多,单一的选矿方法很难获得合格的锂、铍精矿,“重-浮”、“浮-磁”等联合工艺开始普遍应用。美国金斯山选厂^[27]采用重-浮联合工艺选别原矿 Li_2O 品位为 1.50% 的锂辉石矿,针对 +3.3 mm 物料采用重选法回收锂辉石,−3.3 mm 物料通过磨矿浮选回收锂辉石,最终获得了锂辉石

精矿 Li_2O 品位为 6.30%、 Li_2O 回收率为 75% 的技术指标。此外,由于锂辉石精矿中通常含有少量铁矿物,或是弱磁性的铁锂云母,为了提高锂辉石精矿的产品等级,对浮选锂辉石精矿采用磁选除杂,获得低铁锂辉石精矿产品。

2 锂铍矿浮选机理研究进展

浮选作为锂铍矿选矿的主要手段,国内外学者在锂铍矿浮选药剂和浮选基础理论方面也做了相关研究。

国外学者通过研究发现,锂辉石 {110} 矿物表面的 Al 位点是油酸钠最有利的选择性吸附点^[28],其他铝硅酸盐矿物的 Al 位点却被藏在典型晶体单元结构深处,使这些铝硅酸盐矿物难以吸附油酸钠^[29],从而实现锂辉石与脉石的浮选分离。

孙传尧等^[30]针对不同颜色锂辉石的浮游特性差异进行研究,结合矿物晶体化学和表面特性,分析了三种不同颜色锂辉石浮游性差异。在阴离子捕收剂体系下,不同颜色的锂辉石表面 O^{2-} 受溶液中 Fe^{3+} 影响,活化程度不一,粉红色锂辉石可浮性最佳,与工业试验浮选现象一致。HE 等^[31]以量子化学计算为理论基础,研究了锂辉石晶体的能带结构、Mulliken 布居、态密度以及前线轨道与锂辉石可浮性之间的关系,并通过量子化学计算和红外光谱测试解释了环烷酸在锂辉石表面的吸附行为^[32]。彭兰等^[33]分析了胺类阳离子捕收剂各物化参数对实际捕收能力的影响,通过量子化学计算发现胺类阳离子捕收剂的极性基团是影响铝硅酸盐矿物捕收性能的决定因素。

陈建华等^[34]、孙伟等^[35]采用量子化学计算方法对硫化矿矿物晶体性质进行了大量研究,理论相对成熟。然而,锂铍等稀有金属矿与浮选药剂的作用机理多是采用等温吸附曲线、Zeta 电位、红外光谱等常规测试手段进行研究,而捕收剂与矿物作用机理通过量子化学计算、矿物表面微观作用机制却鲜有报道,这也将成为今后锂铍浮选研究方向之一。

3 资源的综合利用

3.1 伴生金属的综合利用

伟晶岩锂铍多金属矿中除了含有锂和铍等主要金属元素之外,通常含有少量的铷(与云母伴生)、钽、铌和锡等伴生元素,实现这些伴生元素的综合回收可以提高开发价值。汤小军对四川某锂辉石矿中钽铌铁矿、锡石和磁性铁等少量伴生矿物,利用密

度、磁性差异,采用“重选-磁选联合工艺”进行综合回收,分别获得了钽铌精矿、锡石精矿、铁精矿。何阳阳^[36]对川西某锂辉石矿的矿石性质进行了研究,在此基础上开展重选、浮选试验研究,采用重-磁联合工艺回收该锂辉石矿中伴生钽铌及锡石等有价矿物。宜春钽铌多金属矿采用重选回收钽铌,重选尾矿浮选获得锂云母精矿产品,伴生金属铷和铯在锂云母中富集回收。

3.2 非金属矿的综合回收

锂铍稀有金属矿中含有大量的云母、长石、石英等脉石矿物,实现云母、长石和石英的综合回收不仅可以提高产品价值,而且可以大幅减少尾矿排放、有利于当地环保。

李新冬等^[37]在工艺矿物学研究基础上,以硫酸调浆、十二胺作捕收剂,采用不脱泥-优先浮选硫化矿、云母和石英-再浮选锂辉石的工艺,反浮选回收云母和石英,两种矿物产率达到50%以上。徐龙华等^[38]对四川甲基卡锂辉石浮选尾矿进行长石综合回收试验研究,针对石英和长石分离工艺的复杂性,该试验采用弱磁-强磁除铁后,使用硫酸调节矿浆pH至酸性,并添加氢氟酸活化石,使用阴阳离子组合捕收剂浮选长石,最终获得了 K_2O+Na_2O 品位为11.33%、作业回收率为85.77%的长石精矿,该方法实现了原矿中70%的矿物作为精矿产品进行回收。还有一种综合利用方式就是石英和长石不进行分离,直接以长石硅砂混合料的形式直接用于玻璃工业。此外,尾矿可作为建筑材料或是采空区充填料^[39],例如马钢姑山选铁尾矿结构致密坚硬用作混凝土骨料;铜陵有色实施了尾砂充填取得了良好的社会效益;凡口铅锌矿和焦家金矿利用尾矿作采空区充填料,尾矿利用率分别达到95%、50%以上。

4 结论

1)我国是锂资源需求大国,锂辉石仍是提供锂的主要来源。以浮选为主的多种联合工艺是回收复杂锂铍资源的主要方法,但需要加强锂铍浮选作用机理研究,丰富稀有金属浮选基础理论。

2)川西、喀喇昆仑地区发现的超大型伟晶岩锂铍多金属矿,是未来我国稀有金属生产重要潜在基地,但川疆高海拔山区锂铍稀有金属矿在开发过程中受空气稀薄、温度低、水质差等客观环境因素限制,浮选药剂溶解速度慢、药剂与矿物表面作用差。因此,开发出耐低温、强选择性、绿色环保的浮选药剂,将是实现高寒地区稀有金属绿色回收的关键。

3)锂铍稀有金属矿中通常含有少量的铷、钽、铌、锡等伴生金属,开发经济、高效的重选设备是实现低品位伴生资源回收的关键;实现锂铍矿中石英、长石等主要组成矿物的综合回收,对于固废减排具有十分重要的意义;尾矿可考虑制备高性能的建筑材料和回填料,降低固废排放,实现无尾矿排放,减少生态破坏;开展浮选废水清洁改质和循环利用研究,最终实现回水全回用。

参考文献

- [1] 蒋少涌,温汉捷,许成,等.关键金属元素的多圈层循环与富集机理:主要科学问题及未来研究方向[J].中国科学基金,2019,33(2):112-118.
JIANG Shaoyong, WEN Hanjie, XU Cheng, et al. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: major scientific issues for future research[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 112-118.
- [2] 郑绵平,刘喜方.中国的锂资源[J].新材料产业,2007(8):13-16.
ZHENG Mianping, LIU Xifang. China's lithium resources[J]. Advanced Materials Industry, 2007(8): 13-16.
- [3] 王核,李沛,马华东,等.新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿床的发现及其意义[J].大地构造与成矿学,2017,41(6):1053-1062.
WANG He, LI Pei, MA Huadong, et al. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(6): 1053-1062.
- [4] 马哲,李建武.中国锂资源供应研究:现体系状、问题与建议[J].中国矿业,2018,27(10):1-7.
MA Zhe, LI Jianwu. Analysis of China's lithium resources supply system: Status, issues and suggestions[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(10): 1-7.
- [5] 梁飞,赵汀,王登红,等.中国铍资源供需预测与发展战略[J].中国矿业,2018,27(11):6-10,17.
LIANG Fei, ZHAO Ting, WANG Denghong, et al. Supply and demand forecast and development strategy of berulium resources in China[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(11): 6-10, 17.
- [6] 吕永信,幸伟中,李金荣.概论锂辉石和绿柱石矿石浮选理论与实践[J].有色金属(冶炼部分),1965(6):14-19,25.
LYU Yongxin, XING Weizhong, LI Jinrong. Theory and practice of flotation of spodumene and beryl ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 1965(6): 14-19, 25.
- [7] 《矿产资源综合利用手册》编委会.矿产资源综合利用

- 手册[M].北京:科学出版社,2000:306~319.
- Editorial Board of Manual on Comprehensive Utilization of Mineral Resources. Manual on Comprehensive Utilization of Mineral Resources [M]. Beijing: Science Press, 2000: 306-319.
- [8] CLARKE G. Industrial mineral processing 3-froth flotation[J]. Industrial Minerals, 1984, 201: 44-45.
- [9] REDEKER I H. Flotation of feldspar, spodumene, quartz and mica from pegmatites in North Carolina, USA[J]. Erzmetall, 1977, 30(12): 566-572.
- [10] VALADAO G E S, GONTIJO C F, PERES A E C. Bench scale flotation of spidumene-quartz and lepidolite-quartz synthetic mixtures [D]. Natal (Brizal): Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 1985.
- [11] PEADIP. The science of reagents design: a historical perspective[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals(India), 1997, 50(6): 481-494.
- [12] FUERSTENAU M C. The role of iron in the flotation of some silicates [J]. Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME, 1976, 235: 321-328.
- [13] VISWANATHAN K V. The role of inorganic ions in the flotation of beryl[J]. Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME, 1965, 3: 283-286.
- [14] MANSER R M. Handbook of silicate flotation [M]. England: Warren Sping Laboratory, 1975: 26-41.
- [15] TOREM M L, BARRONS BITTENCOUNT A L, OLIVEIRA A P. Influence of pH on adsorption of anionic collectors by a silicate[J]. Associacao Brasileira Metalurgia Materials, 1992, 3: 369-383.
- [16] 巫侯琴, 方帅, 徐龙华, 等. 伟晶岩型锂辉石矿石浮选药剂及工艺研究现状[J]. 金属矿山, 2018(7): 1-6.
- WU Houqin, FANG Shuai, XU Longhua, et al. Research situation of pegmatite spodumene flotation reagents and process[J]. Metal Mine, 2018(7): 1-6.
- [17] 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 Yuhua, YU Fushun, CHEN Xinghua, et al. Selective flotation between spodumene and beryl[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2005, 29(3): 320-324.
- [18] 周维志. 绿柱石优先浮选及其与锂辉石分离的研究与实践[J]. 金属学报, 1980, 16(3): 249-262.
- ZHOU Weizhi. Selective flotation of beryl and its separation from spodumene [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1980, 16(3): 249-262.
- [19] AMARANTE M M, DE SOUSA A BOTELHO, LEITE M MACHADO. Processing a spodumene ore to obtain lithium concentrates for addition to glass and ceramic bodies [J]. Minerals Engineering, 1999, 12(4): 433-436.
- [20] 缙海. 重介质选矿技术及其在锂辉石选矿中的应用[J]. 新疆有色金属, 2018, 41(增刊 1): 71-73.
- MIAN Hai. Dense medium beneficiation technology and its application in spodumene beneficiation [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2018, 41(S1): 71-73.
- [21] 廖石林, 刘瑞春. 锂辉石热裂法选矿试验[J]. 四川有色金属, 1991(1): 33-37.
- LIAO Shilin, LIU Ruichun. Beneficiation test of spodumene thermal cracking method [J]. Sichuan Nonferrous Metals, 1991(1): 33-37.
- [22] 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 Xuejuan. Application of manual beneficiation in a spodumene mine [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2012, 35(5): 50-51.
- [23] BRANDT FELIX, HAUS REINER. New concepts for lithium minerals processing [J]. Minerals Engineering, 2010, 23(8): 659-661.
- [24] 汤小军, 李辉, 邓星星, 等. 四川某难选多金属锂辉石矿选矿工艺试验研究[J]. 四川有色金属, 2012(3): 19-22.
- TANG Xiaojun, LI Hui, DENG Xingxing, et al. Research on a refractory polymetallic spodumene ore processing technology test in Sichuan [J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2012(3): 19-22.
- [25] 李昱昀, 狄晓亮, 高洁. 国内外盐湖卤水锂资源及开发现状[J]. 盐湖盐与化工, 2005, 34(5): 31-35.
- LI Yuyun, DI Xiaoliang, GAO Jie. The status of saline lake lithium resources and its present situation of exploration [J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2005, 34(5): 31-35.
- [26] 宋彭生, 李武, 孙柏, 等. 盐湖资源开发利用进展[J]. 无机化学学报, 2011(5): 801-815.
- SONG Pengsheng, LI Wu, SUN Bai, et al. Recent development on comprehensive utilization of salt lake resources [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2011(5): 801-815.
- [27] 孙传尧. 选矿工程师手册(第四册) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 117.
- SUN Chuanyao. Mineral processing engineer's handbook (Volume 4th) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 117.
- [28] KWANG S M, 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(1/2/3/4): 11-24.
- [29] 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.

- [30] 孙传尧,印万忠.同一矿体中锂辉石、霓石的浮游性差异分析[J].中国矿业大学学报,2001,30(6):5-10.
SUN Chuanyao, YIN Wanzhong. Difference in flotability of spodumene and aegirine from the same ore body[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(6): 5-10.
- [31] HE G C, XIANG H M, JIANG W, et al. First-principles theory on electronic structure and floatability of spodumene[J]. Rare Metals, 2014, 33(6): 742-748.
- [32] 何桂春,张慧婷,华亚南,等.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 Guichun, ZHANG Huiting, HUA Yanan, et al. Quantum chemistry of adsorption of naphthenic acid on surface of spodumene [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(4): 833-842.
- [33] 彭兰,曹学锋,杜平.铝硅酸盐矿物捕收剂的设计研究[J].广西民族学院学报(自然科学版),2005(2):90-93.
PENG Lan, CAO Xuefeng, DU Ping. The studies of collectors to catch aluminum silicate minerals [J]. Journal of Guangxi University for Nationalities(Natural Science Edition), 2005(2): 90-93.
- [34] 陈建华,钟建莲,李玉琼,等.黄铁矿、白铁矿和磁黄铁矿的电子结构及可浮性[J].中国有色金属学报,2011,21(7):1719-1727.
CHEN Jianhua, ZHONG Jianlian, LI Yuqiong, et al. Electronic structures and flotability of pyrite, marcasite and pyrrhotite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(7): 1719-1727.
- [35] 孙伟,杨帆,胡岳华,等.前线轨道在黄铜矿捕收剂开发中的应用[J].中国有色金属学报,2009,19(8):1524-1532.
SUN Wei, YANG Fan, HU Yuehua, et al. Application of frontier orbital in developing new collectors of chalcopyrite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(8): 1524-1532.
- [36] 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.
HE Yangyang, XIE Zhiyuan. Analysis of influence on ground subsidence caused by large scale mining [J]. Industrial Minerals & Processing, 2017, 46(5): 13-15, 51.
- [37] 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.
LI Xindong, HUANG Wanfu, WEN Jinlei, et al. Study on process mineralogy and mineral processing technology of spodumene ore[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(5): 1207-1213.
- [38] 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 Longhua, TIAN Jia, WU Houqin, et al. Experimental study on strengthening flotation and comprehensive utilization of pegmatite spodumene ore[J]. Non-Metallic Mines, 2017, 40(4): 16-19.
- [39] 张淑会,薛向欣,刘然,等.尾矿综合利用现状及其展望[J].矿冶工程,2005,25(3):44-47.
ZHANG Shuhui, XUE Xiangxin, LIU Ran, et al. Current situation and prospect of the comprehensive utilization of mining tailings [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005, 25(3): 44-47.