

提高锂辉石矿选矿指标的工程化 关键技术研究

Study on Key Engineering Technologies for Improving Mineral Processing Indexes of Spodumene

夏自发, 邓朝安, 邹毅仁, 何荣权(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:本文针对国内多个锂辉石矿选矿厂生产选矿指标明显低于试验指标问题,分析了导致锂辉石选矿指标试验与生产差异的原因,提出了工程化关键技术的解决方案,如适宜的磨矿细度、窄粒级入选、浮选前预处理、分段加药、强化搅拌、快速排泡等,为相似选矿厂建设提供了借鉴意义。

关键词:锂辉石矿; 强化调浆; 加温浮选; 工程化; 选矿指标

中图分类号: TD954 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)03-0068-05

Abstract: Considering that the mineral processing indexes of multiple spodumene concentrators in China are significantly lower than the test indexes, the paper analyzes the reason for such differences and proposes a solution to key engineering technologies, including suitable grinding fineness, narrow-size particles into the mill, pretreatment before flotation, staged dosing, intensified agitation and rapid bubble removal, which provide referential significance for similar concentrators.

Key words: spodumene; intensified conditioning; heated flotation; engineering; beneficiation indexes

1 前言

锂作为稀有元素,因其独特理化性质,在医药、化工等诸多领域广泛应用^[1],特别是电荷密度大、易极化其他分子或原子、电极电势最负、密度小等物理性质^[2],使其在锂电等新能源领域需求日益增加。

我国锂辉石矿产资源丰富,主要赋存在花岗伟晶岩和花岗岩矿物型矿床中,主要分布在四川、江西、新疆、湖南等地。常伴生有长石、云母、石英等铝硅酸盐脉石矿物,有非常相似的自然可浮性,化学成分和矿石性质复杂使得锂辉石矿物回收率不高,锂辉石矿加工成本一直居高不下。

锂辉石密度小(3.20 t/m^3),且不具有磁性,无法用一般的重选法和磁选法将含锂矿物与常见脉石矿物(如石英、长石、云母等)分离,浮选法通常是锂辉石在实验室和工业实践中研究最多和应用最广泛的方法。

2 锂辉石选矿生产实践

2.1 国内部分锂辉石矿选矿指标

通过现场考察和查阅文献,统计了国内部分锂辉石选矿厂生产指标,生产指标见表1。

由表1可知,锂辉石选矿厂实际生产指标的锂精矿品位一般在5.5%以上,但回收率普遍低于80%。

2.2 生产指标与试验指标对比

国内多个研究单位对锂辉石的选矿进行了深入研究,试验指标都较好,锂精矿 Li_2O 品位约为5.5%,回收率大于80%。按照试验流程建设投产的锂辉石选矿厂,例如四川某锂辉石选矿厂,试验的 Li_2O 回收率为86.36%,生产的 Li_2O 回收率为65%~80%;例如四川某锂辉石选矿厂,试验的 Li_2O 回收率为85.12%,生产的 Li_2O 回收率为70%~75%。大量的生产实际证明,锂辉石生产的回收率指标与试验指标存在较大差异,生产回收率比试验回收率一般低5%~10%,呈现负变。

3 工程化关键技术研究

锂辉石矿选矿厂实际回收率为70%~80%,比试验回收率一般低5%~10%,该现象表明,锂辉石选矿由试验成果向工程化转化效果不理想,指标差异较大,以下原因都可能导致试验与生产指标差异。

[作者简介] 夏自发(1981-),男,湖南长沙,高级工程师,硕士,主要从事选矿咨询与设计工作。

[引用格式] 夏自发,邓朝安,邹毅仁,等.提高锂辉石矿选矿指标的工程化关键技术研究[J].中国矿山工程,2022,51(3):68-72.

表1 国内部分锂辉石选矿厂生产指标

序号	实例	生产工艺指标		
		原矿品位 $\alpha_{\text{Li}_2\text{O}}/\%$	精矿品位 $\beta_{\text{Li}_2\text{O}}/\%$	回收率 $\varepsilon_{\text{Li}_2\text{O}}/\%$
1	四川某锂辉石选矿厂	1	4.8	65
		1.35	6	80
2	四川某锂辉石选矿厂	1.3	5.48	75.44
3	四川某锂辉石选矿厂	1.36	5.5	70~75
4	国内某进口锂辉石选矿厂	1.4~1.5	5.8~6	60~70
5	国内某进口锂辉石选矿厂	1.22	4.95	72.52
6	江西某锂辉石选矿厂	0.77	4.40	74.86
7	新疆某锂辉石选矿厂(低品位矿)	0.34	4.40	60
8	新疆某锂辉石选矿厂(尾矿再选)	0.76	5.92	60.94
9	新疆某锂辉石选矿厂(高品位矿)	1.3~2	5.5~6.67	76.71~87.39
10	新疆某锂辉石选矿厂	0.69	5.19	72

1) 试验研究不充分

试验条件未充分考虑生产实际情况,比如水质、温度、药剂循环累积等。

2) 试验研究与生产实际偏差

通常试验过程受设备及规模限制,一些生产条件无法在试验中完全模拟,如浮选粒级组成、矿泥成分变化、生产波动等。

3) 对锂辉石选矿特殊性认识不够

锂辉石的选别在某些方面与铝土矿、钾盐、锡石、萤石类似,但又有区别,尤其是在矿泥处理、强化调浆、流程结构、入选粒度、分段加药、设备选型等方面有其特殊性。

通过对比分析试验条件与生产实际,发现指标差异的核心原因在于锂辉石选矿的工程化关键技术未能获得合理解决,例如磨矿细度、入选粒级、矿泥处理、浮选环境、矿浆温度、泡沫流动速率等。

结合锂辉石矿的选矿特点,针对影响锂辉石矿选矿指标的关键因素进行了研究,提出了工程化关键技术解决方案。

3.1 适宜的磨矿细度

粗粒难浮是锂辉石浮选显著特点之一,锂辉石最佳的浮选粒度范围是 $-0.106 \sim +0.038 \text{ mm}$,其中, $-0.074 \sim +0.038 \text{ mm}$ 、 $-0.106 \sim +0.074 \text{ mm}$ 、 -0.038 mm 、 $-0.200 \sim +0.106 \text{ mm}$ 的粒级回收率依次降低。有文献表明,当浮选粒度为 0.2 mm 时,浮选回收率为 61% ;当浮选粒度为 0.30 mm 时,浮选回收率仅为 22% [3]。锂辉石的浮选粒度一般要小于 0.15 mm ,随着锂辉石嵌布粒度变化,合适的磨矿细度对浮选起着至关重要的作用。

磨矿粒度越细,锂精矿回收率越高,大多数选矿试验研究推荐的磨矿细度为 -0.074 mm 占 75% 以上,甚至 80% 以上。

经现场考察和文献调研,国内部分锂辉石选矿厂实际生产的磨矿细度为 -0.074 mm 占 $65\% \sim 72\%$,实际生产磨矿细度通常比试验研究磨矿细度粗。

磨矿粒度变细,可以减轻粗粒难浮的不利因素,但也会增加浮选矿浆黏度,增加矿泥量,增大精矿和尾矿的脱水难度。锂辉石浮选的矿浆黏度高,粒度越细、黏度越高,为了保证浮选作业的稳定,磨矿细度不宜过细。大量生产实践表明,生产中锂辉石会出现选择性磨矿,即磨矿细度为 -0.074 mm 占 70% 时,锂辉石精矿的细度可达到 -0.074 mm 占 80% 。综合考虑锂辉石解离度、浮选指标和产品脱水等因素,锂辉石通常适宜的磨矿细度为 -0.074 mm 占 $70\% \sim 75\%$ 。

3.2 窄粒级入选

谢贞付、朱广丽、田佳等人通过研究发现^[4-6],湿磨条件下,锂辉石单矿物在 $-0.106 \sim +0.038 \text{ mm}$ 粒级的浮选回收率明显高于其他粒级 ($-0.106 \sim +0.074 \text{ mm} > -0.074 \sim +0.038 \text{ mm} > -0.038 \text{ mm} > -0.15 \sim +0.106 \text{ mm} > +0.15 \text{ mm}$), $-0.106 \sim +0.038 \text{ mm}$ 是锂辉石浮选的最佳粒级。合适的磨矿粒度组成,尤其是锂辉石矿物的粒级分布,是影响锂辉石浮选的重要因素。

提高磨矿产品中 $-0.106 \sim +0.038 \text{ mm}$ 粒级含量,降低粗粒、细泥含量,实现窄粒级入选将为浮选作业创造良好的选别条件,可以提高锂辉石浮选

指标。

当碎磨工艺采用半自磨工艺时,可以采取以下措施优化磨矿产品粒级实现窄粒级入选。

1)增加顽石破碎

在半自磨机格子板上开设砾石窗,适当增加砾石窗尺寸,排出物料经筛分后,筛上物料破碎至-16 mm,消除难磨粒级,以此来优化半自磨机的磨矿效果。

2)降低半自磨机长径比

常见的半自磨机长径比约为0.5:1,即大直径,小长度。增大半自磨机直径,缩短筒体长度,减少冲击次数,加快排矿速度,减少细粒级含量。

3)优化半自磨机作业参数

降低半自磨机钢球充填率至8%~10%、降低半自磨机磨矿浓度至75%左右,以减少细粒级含量。

4)采用两段分级

旋流器与球磨机组成闭路,不仅控制了最终磨矿产品粒度,不合格粒级需继续返回磨机再磨,合格粒级及时排出避免返回磨机过磨。SABC流程的磨矿细度达到-0.074 mm占70%~75%时,一段旋流器分级效率低,存在“粗中跑细、细中夹粗”现象,导致磨矿分级效果差。采用两段分级,第二段分级对一段旋流器溢流进行分级来保证磨矿最终产品粒度合格。增加二段分级将弱化一段分级入料粒级分布不合理、合格粒级少的问题,从而提高一段分级溢流切分点,提高溢流产率。二段分级旋流器可以针对一段旋流器溢流粒级分布窄、合格粒级多特点,在旋流器型号以及内部结构上进行改进,从而确保产出合格磨矿产品。采用两段分级后,一段、二段分级功能特征明显,从而降低了操作难度,整体分级效率都会提高。

3.3 预处理

锂辉石矿石中含有白云母、铁锂云母、高岭土等矿物。这些矿物硬度小,在磨矿过程中易泥化,产生大量难选矿泥,恶化浮选环境,不仅影响锂辉石的可浮性,而且在浮选过程中也容易导致矿浆流变性更加复杂。

片状云母具有选择性磨矿特点,从而导致磨矿产品粒度不均匀,大于0.074 mm和小于0.010 mm部分含云母矿物高,大部分细磨的云母在浮选锂辉石过程中,进入锂精矿,降低精矿质量。

矿泥具有颗粒细微,比表面积大的特点。在浮

选过程中矿泥对选别指标的高低有很大影响。在锂辉石浮选过程中,矿泥基本是围岩脉石,除少量原生矿泥外,大部分是次生矿泥。

由于矿泥严重影响锂辉石浮选,在含锂矿物入选前,有必要对矿浆进行预处理,预处理的方法有:脱泥、强化搅拌、分散矿泥等,以提高药剂的选择性。

锂辉石正浮选的预处理工艺有两类,一类为碱法不脱泥工艺,另一类为预先脱泥工艺。两类工艺的特点见表2。

表2 锂辉石正浮选的预处理工艺

	碱法不脱泥工艺	预先脱泥工艺
工艺流程	在碱性环境强化调浆后直接进行锂辉石浮选,不脱泥,不洗矿	预先脱除矿泥或易浮矿物,再强化调浆后进行锂辉石浮选
优点	流程及药剂制度较为简单	生产指标稳定,易于操作,药剂消耗量小,便于尾矿脱水
缺点	浮选指标不稳定,波动大,药剂消耗量大	流程较复杂

工程上已经应用的锂辉石预先脱泥方式主要有浮选脱泥、沉降脱泥和旋流器脱泥三种,三种脱泥方式的特点见表3。应根据处理规模、产品质量要求、云母含量、磨矿细度等因素,选择合适的预先脱泥方式。

表3 锂辉石浮选预先脱泥方式

	浮选脱泥	沉降脱泥	旋流器脱泥
工艺流程	在锂辉石浮选前,采用浮选药剂预先脱除矿泥或易浮矿物	采用脱泥斗、耙式浓缩机或倾斜板浓缩机作为脱泥设备,利用矿泥重力沉降速度慢的特性,将矿泥从溢流中脱除	采用水力旋流器作为脱泥设备,利用矿泥受到离心力小、沉降速度慢的特性,将矿泥从溢流中脱除
优点	通过调整药剂制度,不仅可以脱除细粒矿泥,也能脱除易浮矿物	能耗低,生产缓冲能力强,运行平稳可靠,底流浮选浓度高	处理能力大,分级过程有擦洗效果,可以多段旋流器联合脱泥,脱泥效率高,底流浮选浓度高
缺点	浮选脱泥过程较难稳定控制,泡沫夹带严重,导致矿石中较多的锂金属损失于矿泥中	脱泥效率低,溢流中夹粗,底流中夹细,会造成锂辉石矿物的损失	给矿波动会影响分级效果,脱泥工艺较复杂

3.4 强化调浆

调浆作业对锂辉石的浮选效果影响明显,经过

碱液浸泡过的锂辉石单矿物具有更好的可浮性,一方面,经碱擦洗过的锂辉石表面会暴露出更多的金属原子位点以供阴离子捕收剂吸附,另一方面是锂辉石解理面 Si 原子溶蚀,产生电负性强的 Si—O—(硅氧断裂键),吸附金属离子从而被活化。

这些化学反应都需要一定时间,锂辉石与石英、长石的分离也需要一定时间的强烈搅拌。强化调浆的关键是搅拌时间,周贺鹏等人对搅拌时间进行了研究^[9-10],搅拌时间对 Li₂O 回收率的影响并不显著,而 Li₂O 品位随搅拌时间的延长快速提高,最后保持平稳。这与延长了 Na₂CO₃ 和 NaOH 各组分在矿物表面的作用时间,提高了矿物表面的溶蚀效果,增强矿物表面电负性的同时矿物表面生成“自生水玻璃”有关。

试验与生产实践都表明,强化调浆可以提锂辉石矿的选矿指标,生产中,可采取的强化调浆措施有:

(1)Na₂CO₃ 分段添加有助于改善锂浮选指标,Na₂CO₃ 分段添加在球磨机和粗选搅拌作业。

(2)采用高剪切力搅拌槽,提高调浆过程中的搅拌强度。

(3)增大 NaOH 用量,可以使锂辉石的品位和回收率有不同程度的提升,同时搅拌作用还可以缩短 NaOH 的作用时间。

(4)延长搅拌时间,搅拌时间宜大于 25 min。

3.5 加温浮选

脂肪酸类及胺类等锂辉石浮选捕收剂的性能受温度影响较大,在低温条件下水溶性及分散性差,低温条件下锂辉石回收率低,采用同样的药剂制度进行混浮粗选,进行了 30℃、12℃、6℃ 三种不同温度的浮选对比试验,试验结果见表 4。

由低温浮选对比试验结果可知,随着温度的降低,浮选捕收剂的性能受到一定的影响,温度由 30℃ 将至 6℃ 时,锂辉石粗精矿 Li₂O 品位由 4.43% 降到 4.03%,Li₂O 回收率则降低了约 20%,尾矿中锂的损失大幅增加,在较低温度下,浮选效果明显变差。

目前国内外对锂辉石低温浮选工艺及低温捕收剂的研究和应用都有很大的进步,但在低温地区的适应性仍然较差。

我国大部分锂辉石矿地处低温地区,昼夜温差大,冰雪霜冻期气温低,雪水融化的水温低,宜采用加温浮选,延长生产期,提高锂辉石回收率。

表 4 低温浮选对比试验结果

试验矿浆温度/℃	产品名称	产率/%	Li ₂ O	Li ₂ O
			品位/%	回收率/%
30	粗精矿	23.74	4.43	87.33
	尾矿	76.26	0.20	12.67
	原矿	100.00	1.20	100.00
12	粗精矿	20.50	4.14	70.35
	尾矿	79.50	0.45	29.65
	原矿	100.00	1.22	100.00
6	粗精矿	20.23	4.03	67.59
	尾矿	79.77	0.49	32.41
	原矿	100.00	1.20	100.00

3.6 泡沫快速排出

锂辉石矿浮选精矿产率大(最终精矿产率 > 20%),矿浆黏度大,泡沫流动性很差,生产中让浮选泡沫快速排出非常关键,宜采取以下措施:

(1)浮选机规格宜小,浮选机槽数宜多,尽量降低泡沫延长载荷和浮选机截面载荷。

(2)采用双边刮泡浮选机,或者增加推泡板,推泡角度更大、更深。

(3)锂辉石矿浮选对充气量很敏感,需要的充气量小。

(4)采用充气式浮选机,便于调节充气量。

4 结论

我国锂辉石矿产资源丰富,主要采用浮选法回收,国内已有多个锂辉石矿选矿厂投入生产,锂精矿的品位一般在 5.5% 以上,但回收率普遍低于 80%,并且生产指标明显低于试验指标。

通过对比分析试验与生产实际,导致指标明显差异的主要原因是由于以下工程化关键技术未得到合理解决:磨矿细度、入选粒级、矿泥、浮选环境、矿浆温度、泡沫流动速率。

通过分析影响锂辉石选矿指标试验与生产差异的原因,本文提出了工程化关键技术的解决方案。

(1)粗粒难浮是锂辉石浮选的特点之一,锂辉石矿适宜的磨矿细度为 -0.074 mm 占 70% ~ 75%。

(2)锂辉石最佳的浮选粒度范围是 -0.106 ~ +0.038 mm,降低粗粒及细泥的含量,窄粒级入选,为浮选作业创造良好的给料条件,可以提高锂辉石浮选指标。

(3)锂辉石矿石中含原生矿泥,在磨矿过程中又产生大量次生矿泥,恶化浮选环境,在含锂矿物入

选前,有必要对矿浆进行预处理,浮选操作更为稳定,生产指标更好。

(4)强化调浆对锂辉石的浮选效果影响明显,锂辉石矿宜采用分段加药、高剪切力搅拌槽、延长搅拌时间等措施提高调浆效果。

(5)锂辉石捕收剂的低温适应性较差,而我国大部分锂辉石矿地处低温地区,昼夜温差大,冰雪霜冻期气温低,雪水融化的水温低,宜采用加温浮选,延长生产期,提高锂辉石回收率。

(6)锂辉石矿浮选精矿产率大,矿浆黏度大,泡沫流动性很差,让浮选泡沫快速排出是保证流程通畅的关键。

[参考文献]

[1] 周贺鹏,张永兵,雷梅芬,等. 磁选尾矿综合回收钽铌锂及长石选矿工艺研究[J]. 非金属矿,2018,41(3): 69-71.

[2] KHATER G, MORSI M. Glass-ceramics based on spodumene-enstatite system from natural raw materials

[J]. Thermochimica Acta, 2011, 519(1):6-11.

[3] 王淀佐,邱冠周,胡岳华. 资源加工学[M]. 北京:科学出版社,2005.

[4] 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.

[5] 田佳. 伟晶岩型锂辉石矿强化浮选分离的基础研究[D]. 成都:西南科技大学,2018.

[6] 朱广丽,王毓华,王旭明,等. 磨矿环境和晶格杂质对锂辉石浮选的影响[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2019,29(7):1527-1537.

[7] 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.

[8] 何炯奎. 低品位锂辉石矿石的选别及生产实践[J]. 稀有金属,1985(4):35-41.

[9] 周贺鹏,张永兵,雷梅芬,等. 微细粒锂辉石强化浮选回收试验研究[J]. 非金属矿,2019,42(4):24-27.

[10] 夏自发,邓朝安,任兴民,等. 磁浮联合工艺在尾矿中回收萤石的工业化应用[J]. 有色设备,2021,35(2): 40-44.

(上接第37页)

的匹配程度越高,结果表现为应力集成程度、塑性区范围、竖向位移越小。因此除前处理阶段网格划分、参数设置外,在计算阶段仍需注重提高开采过程的模拟精细程度。

[参考文献]

[1] 郭延辉,侯克鹏,孙华芬,等. 地下金属矿山深部开采引起地表移动变形规律研究[J]. 有色金属(矿山部分),2011,63(5):36-40,45.

[2] 田敏,胡崑. 基于FLAC^{3D}的某铁矿采场结构参数优选[J]. 现代矿业,2018,34(2):69-70,73.

[3] 李占金,郝家旺,孙文诚,等. 深部大规模开采岩体稳定性数值模拟研究[J]. 金属矿山,2018(2):56-60.

[4] 周东良,刘玉桥,李占奎,等. 深部金属矿山卸压开采硐室设计及模拟效果分析[J]. 黄金,2018,39(4):

27-30,47.

[5] 吴昊燕,刘育明,寇永渊,等. 深井矿山下向水平分层充填开采与水平矿柱应力演化研究[J]. 中国矿山工程,2021,50(6):1-6.

[6] 杨清平,陈志强,王红心. 基于FLAC^{3D}的谦比希铜矿盘区保安矿柱稳定性分析[J]. 中国矿山工程,2022, 51(1):12-16.

[7] 王辉林,李艳刚,马鸿录,等. 某矿井下开采地压分布规律研究[J]. 采矿技术,2021,21(6):99-103.

[8] 张超,宋卫东,付建新,等. 深部复杂金矿体充填开采对地表建筑物稳定性影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(8):1143-1151,1158.

[9] 马春德,徐家庆,刘焕新,等. 基于ANSYS-FLAC^{3D}的深部采场结构参数优化研究[J]. 矿冶工程,2021, 41(1):20-23.