

符招弟, 张晓娟, 杨林. 伟晶岩型锂矿石中锂的化学物相分析方法研究[J]. 岩矿测试, 2024, 43(3): 432–439. DOI: 10.15898/j.ykcs.202307310114.

FU Zhaodi, ZHANG Xiaojuan, YANG Lin. Chemical Phase Analysis of Lithium in Pegmatitic Lithium Ores[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(3): 432–439. DOI: 10.15898/j.ykcs.202307310114.

伟晶岩型锂矿石中锂的化学物相分析方法研究

符招弟^{1,2}, 张晓娟^{1,2}, 杨林^{1,2}

- (1. 长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2. 长沙矿冶院检测技术有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 伟晶岩型锂矿石中产出的锂云母和锂辉石是重要的提锂原料, 化学物相分析能够为这类锂矿石的地质勘探、矿床评价和高效选冶等提供重要的技术支撑。由于各类含锂矿物在化学性质上非常相似, 目前尚未见与锂矿石化学物相分析相关的报道。本文建立了一种针对伟晶岩型锂矿中锂进行化学物相分析的方法。将锂物相分为铁锂云母中锂、锂云母中锂和锂辉石中锂三相。采用稀盐酸选择性浸出铁锂云母中锂, 浓硫酸选择性浸出锂云母中锂, 最后残渣用氢氟酸挥发除硅, 王水溶解测定锂辉石中锂, 并探索确立了各相态的最佳浸出条件。通过对川西某锂矿中锂物相进行 6 次分析, 得到各相态锂的相对标准偏差 (RSD) 为 1.27%~3.79%, 均小于 5%, 各相态锂的加和与总锂结果的相对偏差为 1.22%, 小于 5%, 说明该方法适用于伟晶岩型锂矿石中锂的化学物相分析。

关键词: 锂; 锂矿石; 化学物相分析; 电感耦合等离子体发射光谱法

要点:

- (1) 根据锂云母、锂辉石化学性质的差别, 采用单矿物实验, 探索出浓硫酸为锂云母的选择性浸出剂, 实现了锂云母和锂辉石的分离。
- (2) 采用化学物相分析方法查明了伟晶岩型锂矿石中锂的存在状态及各矿物中锂的含量, 确定了锂各相态的最佳浸出条件。
- (3) 分析川西某锂矿中各相态中锂的含量, 各相态锂的相对标准偏差为 1.27%~3.79%, 且其加和与总锂结果相对偏差为 1.22%。

中图分类号: P618.71

文献标识码: B

锂由于其优良的物理和化学性能, 在军事、电池、特种合金、受控热核反应等领域具有重要作用^[1-4]。受清洁能源转型影响, 能源绿色化对锂、钴、镍、稀土、碲等关键矿产的需求激增。自然界中发现的锂矿床中, 卤水型、伟晶岩型和沉积型是三种最重要的矿床类型^[5], 伟晶岩型锂矿属于内生型锂矿床^[6], 锂主要赋存于锂辉石、锂云母等矿物中^[7], 而锂云母、锂辉石是主要的提锂原料^[8-9]。

一个含锂矿体工业体系的价值大小, 不仅在于矿石中锂含量的高低, 更与锂在矿石中的赋存状态密切相关^[10]。物相分析研究物料的物相组成、占比及元素在各载体矿物中的赋存状态及含量等, 它在资源合理有效利用中起到关键作用^[11]。物相分析方法按原理和任务分为物理物相分析方法和化学物相分析方法, 现代物理物相分析方法主要包括矿相显微镜分析法、电子探针显微法、矿物参数自动定

收稿日期: 2023-07-31; **修回日期:** 2023-09-01; **接受日期:** 2024-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目“战略性矿产岩矿分析测试技术和标准体系”课题“战略性矿产多元素同时分析技术和标准化”(2021YFC2903001)

作者简介: 符招弟, 硕士, 高级工程师, 主要从事无机元素成分分析、化学物相分析以及色谱分析研究。E-mail: 251395040@qq.com。

量分析系统 (MLA) 等现代岩矿鉴定手段。随着科技的发展, 物理物相分析方法在矿物物相分析中得到广泛应用^[12-13]。锂由于原子序数小 ($N=3$), 使得用岩矿鉴定手段查明锂的赋存状态极为困难, 目前该类方法仅能查明锂矿石中含锂矿物种类及占比^[14-16], 而无法确定各含锂矿物中锂的准确含量。

化学物相分析方法在矿物加工工程、冶金工艺过程、地质找矿、矿床评价以及化工生产、能源新材料研制等领域获得普遍应用^[17]。与现代岩矿鉴定手段方法相比, 它不受原子序数影响。近年来, 铜铅锌金银等元素的化学物相分析方法研究报道较多^[18-19], 而锂的化学物相分析相关报道很少, 仅见龚美菱等^[20]一篇报道, 该报道研究的是铝土矿中锂的赋存状态, 对伟晶岩型锂矿石的化学物相分析方法没有研究, 而这类锂矿石恰是近年来研究和利用的热点。锂的化学物相分析研究的难点在于, 锂的赋存矿物如锂云母、锂辉石等均属于难溶硅酸盐矿物, 化学性质极为相似, 需要根据细微的差别, 筛选合适的选择性溶剂。

本文探索建立了伟晶岩型锂矿石化学物相分析方法, 借助 MLA 结果, 确定伟晶岩型锂矿石可分为铁锂云母中锂、锂云母中锂和锂辉石中锂三相。利用稀盐酸能选择性溶解铁锂云母, 选定稀盐酸为铁锂云母中锂的浸出剂; 根据锂云母和锂辉石单矿物实验, 确定了锂云母和锂辉石的最佳分离条件, 并将建立的锂化学物相分析方法应用于实际样品分析, 验证了方法的准确性和稳定性。

1 实验部分

1.1 仪器及工作条件

电感耦合等离子体发射光谱仪 (AVIO550 型, 美国 PerkinElmer 公司)。测定锂的工作条件为: 等离子体气流速 15L/min, 辅助气流速 0.2L/min, 雾化器气流速 0.2L/min, 射频功率 1500W, 蠕动泵流速 1.5mL/min, 锂的波长为 670.784nm 和 610.362nm, 采用标准曲线法进行定量。

微量天平 (AB204-S 型, 瑞士 Mettler Toledo 公司); 马弗炉 (长沙实验电炉厂)。

1.2 主要试剂

锂标准溶液 GSB 04-1712-2004: 浓度 1000mg/L, 天津市光复精细化工研究所生产, 相对扩展不确定度为 0.7%(包含因子 2)。

硫酸、硝酸、盐酸、高氯酸、氢氟酸: 均为分析纯。

1.3 样品特点

1.3.1 锂云母、锂辉石单矿物

锂辉石和锂云母单矿物购置于万宝矿物公司, 用于条件实验。单矿物粉碎研磨至粒度为-200 目, 根据总锂含量的测定方法测定锂云母中锂含量为 2.22%, 锂辉石中锂的含量 3.25%。

1.3.2 样品性质

选取川西某矿区的伟晶岩型锂矿石作为研究样本, 测得其总锂含量为 0.81%, 根据矿物参数自动定量分析系统 (MLA) 分析得到该矿物主要组成及含量见表 1。由测定结果可知, 该锂矿石云母含量为 20.93%, 锂辉石含量为 10.53%, 有价矿物主要为云母、锂辉石和长石。

表 1 川西某矿区锂矿石的矿物组成及含量

Table 1 Mineral composition and content of lithium ores in Western Sichuan.

矿物	含量 (%)	矿物	含量 (%)
云母	20.93	斜长石	19.04
锂辉石	10.53	高岭石	1.77
石英	28.75	赤铁矿	1.46
铝土矿	3.33	钾长石	9.75
石榴石	1.78	磷灰石	0.39

1.4 实验方法

1.4.1 总锂含量的测定

准确称取 0.1g 已在 105℃ 干燥 2h 的试样于 100mL 聚四氟乙烯烧杯中, 用少量的水吹洗杯壁, 加入 15mL 盐酸、5mL 硝酸、10mL 氢氟酸, 于 250℃ 电热板上加热 20min, 再加入 3mL 高氯酸, 继续加热至冒白烟, 取下冷却。以少量水吹洗杯壁, 补加 10mL 氢氟酸, 继续加热至冒浓白烟, 样品呈湿盐状时, 冷却至室温, 以少量水吹洗杯壁, 加热溶解盐类。将溶液转移至 100 mL 容量瓶中, 以水稀释至刻度, 混匀, 静置, 用 ICP-OES 于波长 610.362nm 处测定锂的含量。

1.4.2 锂的化学物相分析步骤

伟晶岩型锂矿石中锂的化学物相分析方法的具体分析流程如图 1 所示。

(1) 铁锂云母中锂的分离检测

准确称取 0.1g 矿石样品于 200mL 玻璃烧杯中, 加入 30% 盐酸溶液 30mL, 混匀后盖上表面皿, 沸水浴上加热 30min, 间隔 10min 摇动, 取下冷却至室温, 用定性慢速滤纸过滤, 收集滤液, 用碎滤纸擦拭烧杯

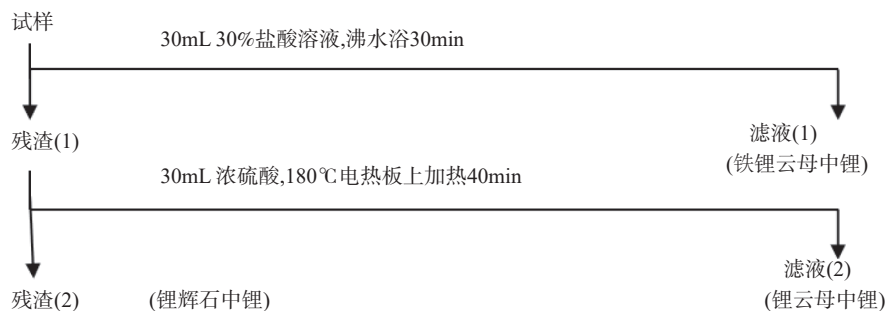


图1 伟晶岩型锂矿石中锂的化学物相分析流程

Fig. 1 Schematic diagram for the lithium phase analysis in pegmatitic lithium ores.

内壁,用3%盐酸溶液洗涤烧杯内壁和沉淀各4次,用水再洗涤沉淀4~5次,滤液于电热板上加热浓缩至近干,取下冷却后,吹入少量水,加入1mL浓硝酸,于电热板上加热溶解盐类,冷却后转入50mL容量瓶中,用水定容,混匀,静置30min,以电感耦合等离子体发射光谱法测定溶液中锂的含量,即为铁锂云母中锂含量。

(2) 锂云母中锂的分离检测

将残渣(1)连同滤纸放入原烧杯中,加入浓硫酸30mL,搅拌,使滤纸上的滤渣尽可能与溶液接触,盖上表面皿,置于180℃电热板上,加热40min,取下冷却至室温,将样品缓慢转入另一个加有100mL水的烧杯中,用水洗净原烧杯,冷却后将沉淀全部转入漏斗中,用定性慢速滤纸过滤,收集滤液,用碎滤纸擦拭烧杯内壁,用水再洗涤烧杯和沉淀各4~5次,滤液于电热板上加热冒烟至干,取下冷却,吹入少量水,加入1mL浓硝酸,于电热板上加热溶解盐类,取下冷却后转入100mL容量瓶中,以水定容,混匀,静置30min,以ICP-OES测定溶液中锂含量,即为锂云母中锂含量。

(3) 锂辉石中锂的分离检测

将残渣(2)连同滤纸放入50mL瓷坩埚中,将瓷坩埚置于650℃马弗炉中炭化30min,取出后冷却至室温,将瓷坩埚中的残渣完全转移至100mL聚四氟乙烯烧杯中,用少量水吹洗内壁,加入9mL浓盐酸、3mL浓硝酸、10mL浓氢氟酸,以下步骤同总锂含量的测定方法,以ICP-OES测定溶液中锂的含量,即为锂辉石中锂含量。

2 结果与讨论

2.1 铁锂云母中锂的选择性浸出

铁锂云母化学式为 $\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$,根据铁锂云母中的铁能溶于稀盐酸的特性,而锂云

母和锂辉石属于难溶硅铝酸盐矿物,难溶于稀盐酸,用稀盐酸溶解铁而破坏铁锂云母,达到铁锂云母和锂云母、锂辉石的分离。选取稀盐酸于沸水浴上对铁锂云母中锂进行浸出,在此过程中,盐酸浓度、浸出时间对铁锂云母中锂的浸出影响较大,因此考察了这两个关键因素对铁锂云母中锂浸出的影响。

2.1.1 盐酸溶液浓度对铁锂云母中锂浸出的影响

准确称取一组锂矿石样品,分别加入10%、20%、30%、40%盐酸溶液各30mL,在沸水浴上加热反应60min,考察盐酸浓度对铁锂云母中锂溶解的影响。结果表明,随着盐酸浓度的增加,被浸出锂的含量增加,当盐酸浓度达到20%以上时,结果趋于平稳,这说明铁锂云母被溶解完全。综合考虑,选择盐酸浓度为30%。

2.1.2 浸出时间对铁锂云母中锂浸出的影响

在盐酸浓度为30%时,考察浸出时间对铁锂云母中锂浸出的影响。准确称取一组锂矿石样品,分别加入30%的盐酸30mL,在沸水浴上加热反应20、30、40、50min,考察反应时间对铁锂云母中锂溶解影响。结果表明,随着浸出时间增加,被浸出锂的含量增加,当浸出时间为30min时,结果趋于平稳,这说明铁锂云母被溶解完全。综合考虑,选择浸出时间为30min,测得该锂矿石铁锂云母中锂含量为0.040%。

2.1.3 盐酸溶液(30%)对锂云母、锂辉石中锂浸出的影响

铁锂云母作为浸出的第一相,所用的浸出剂必须对第二相锂云母中锂和第三相锂辉石中锂的溶解非常少,否则,将不能作为铁锂云母的理想浸出剂。本文通过考察30%盐酸对锂云母和锂辉石单矿物的溶解影响,从而考察30%盐酸溶液对铁锂云母中锂浸出的选择性。准确称取锂云母、锂辉石单矿物各0.1g,分别加入30%盐酸30mL,混匀后盖上表面皿,

于沸水浴上加热 30min, 过滤, 收集滤液, 测定滤液中锂的含量。结果表明, 锂云母中锂的浸出率为 0.090%, 锂辉石中锂的浸出率仅 0.071%, 均小于 5%, 这说明 30% 盐酸对锂云母、锂辉石的溶解很少。在上述优化的条件下, 不会造成矿石中锂云母或者锂辉石的溶解而导致串相问题, 因此选择 30% 盐酸溶液作为铁锂云母的选择性浸出剂。

2.2 锂云母中锂的选择性浸出

锂云母中锂的选择性浸出, 关键是锂云母和锂辉石的分离。本文采用锂云母、锂辉石单矿物试验, 探索优化锂云母、锂辉石的分离条件。

锂云母和锂辉石同属于硅铝酸盐, 但是两者的化学结构不同。锂辉石的化学组成为: $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ 或 $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ ^[21], 锂云母的化学组成为: $\text{K}\{\text{Li}_{1-x}\text{Al}_{1+x}[\text{Al}_{2x}\text{Si}_{4-2x}\text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2\}$, ($x=0 \sim 0.5$)^[22-23], 根据锂云母与浓硫酸在 110 ~ 200℃ 下反应, 锂转化成硫酸锂^[24-25], 可选择硫酸作为锂云母中锂的浸出剂, 先溶解锂云母, 留下难溶的锂辉石, 加入王水和氢氟酸, 溶解锂辉石。在此过程中, 硫酸浓度、反应温度和反应时间都对锂云母的浸出影响较大, 因此考察硫酸浓度、反应温度和反应时间三个因素对锂云母溶解的影响。

2.2.1 硫酸溶液浓度对单矿物浸出率的影响

准确称取锂云母、锂辉石单矿物各 0.1g 于一组烧杯中, 分别加入 50% 硫酸、67% 硫酸、浓硫酸 30mL, 盖上表面皿, 置于 200℃ 电热板上, 加热 40min, 考察硫酸浓度对浸出率的影响, 结果如表 2 所示。由结果可知, 随着硫酸浓度的增加, 锂云母的浸出率逐渐增加, 浓硫酸对锂云母的浸出率能达到 97% 以上, 且对锂辉石的浸出率小于 5%, 满足物相分析的要求, 因此选择浓硫酸作为锂云母的浸出剂。

表 2 硫酸溶液浓度对单矿物浸出率的影响

Table 2 Effect of sulfuric acid solution concentration on leaching rate of monominerals.

单矿物	不同硫酸溶液浓度下单矿物浸出率 (%)		
	50% 硫酸	67% 硫酸	浓硫酸
锂云母	10.23	37.17	97.89
锂辉石	0.62	1.85	2.68

硫酸能选择性溶解锂云母, 而不溶解锂辉石, 这是因为锂云母与硫酸发生分解^[26], 而天然的锂辉

石为单斜晶系的 α -锂辉石, 化学惰性大, 除氢氟酸外, 几乎不与任何的酸碱发生反应^[27]。因此浓硫酸能够实现锂云母和锂辉石的分离。

2.2.2 反应温度对单矿物浸出率的影响

准确称取锂云母、锂辉石单矿物各 0.1g 于一组烧杯中, 加入 30mL 浓硫酸, 盖上表面皿, 置于电热板上, 加热 40min, 调节电热板的温度, 考察反应温度对浸出率的影响, 结果列于表 3。由表中结果可知, 当电热板温度控制在 180℃ 以上, 锂云母的浸出率达到 97% 以上, 温度在 200℃ 以下, 锂辉石的溶解均不明显, 但是当温度达到 220℃ 时, 锂辉石的溶解增加, 这可能是温度的升高, 导致极少部分锂辉石晶型发生改变, 从而化学活性发生了一些变化, 因此控制电热板温度在 180℃。

表 3 反应温度对单矿物在硫酸中浸出率的影响

Table 3 Effect of temperature on leaching rate of monominerals in sulfuric acid.

单矿物	不同反应温度下单矿物浸出率 (%)			
	160℃	180℃	200℃	220℃
锂云母	90.23	97.17	97.89	98.57
锂辉石	1.36	1.50	2.68	8.92

2.2.3 反应时间对单矿物浸出率的影响

准确称取锂云母、锂辉石单矿物各 0.1g 于一组烧杯中, 加入浓硫酸 30mL, 将电热板温度控制在 180℃, 分别加热 20、30、40、50、60min, 考察反应时间对浸出率的影响。结果表明, 随着反应时间的增长, 锂云母的浸出率逐渐升高, 到 40min 时, 浸出率大于 97%。同样, 随着时间增长, 锂辉石也有部分溶解, 到 60min 时, 锂辉石的浸出率达到 5.46%, 综合考虑, 选择反应时间为 40min, 此时锂辉石的浸出率小于 5%, 锂云母和锂辉石能够得到较好的分离效果。

2.2.4 矿石中锂云母锂的选择性浸出

将浸出完铁锂云母中锂的锂矿石样品滤渣, 放入原烧杯中, 采用上述单矿物试验优化后的实验条件, 加入浓硫酸 30mL, 搅拌, 使滤纸上的滤渣尽可能与溶液接触, 盖上表面皿, 置于 180℃ 的电热板上加热 40min, 选择性溶解锂云母中锂, 测得该锂矿石中锂云母的锂含量为 0.44%。

2.3 锂辉石中锂的测定

由于天然锂辉石化学惰性大, 只与氢氟酸发生反应, 因此选择氢氟酸破坏矿物中的硅, 从而使锂辉

石中的锂溶解,测定溶液中锂即为锂辉石中锂。将上述浸出完锂云母中锂的滤渣,连同滤纸放入 50mL 瓷坩埚中,于 650℃ 马弗炉中炭化滤纸,烧后残渣完全转移至 100mL 聚四氟乙烯烧杯中,用少量水吹洗内壁,按照测总锂的方法进行检测,测得该锂矿石中锂辉石中的锂含量为 0.34%。

2.4 样品分析

2.4.1 精密度试验结果

按照确定的锂物相分析方法测定该川西伟晶岩锂矿石各物相中锂含量,统计相对标准偏差 (RSD) 以进行精密度考察。由表 4 结果可知,通过 6 次试

验,计算各相态中锂测定值的相对标准偏差为 1.27%~3.79%,均小于 5%,且各相态中锂的加和与总锂的平均值偏差为 1.22%,小于 5%,满足物相分析的要求。

2.4.2 实际样品分析

按照确定的锂物相分析方法分析该川西锂矿石精矿、中矿和尾矿三个样品各相态中的锂含量。由表 5 结果可知,经过浮选后的精矿,锂云母和锂辉石中锂都大幅增加,尾矿中锂云母和锂辉石中锂减少,三个样品各相态锂加和与总锂结果平均值的相对偏差在 1.29%~3.24%,均小于 5%。

表 4 锂物相精密度结果

Table 4 Precision test results of Li in each phase.

锂的相态	锂含量的测定值 (%)						锂含量测定平均值 (%)	RSD (%)
铁锂云母中锂	0.041	0.040	0.038	0.038	0.039	0.038	0.040	3.79
锂云母中锂	0.430	0.440	0.450	0.440	0.420	0.430	0.440	2.41
锂辉石中锂	0.340	0.330	0.330	0.350	0.350	0.330	0.340	2.91
各相态锂加和	0.811	0.810	0.818	0.828	0.809	0.797	0.820	1.27
锂的总和	0.811	0.813	0.809	0.816	0.823	0.813	0.810	0.60

表 5 实际锂矿石样品中锂的相态分析结果

Table 5 Phase analysis results of Li in actual lithium ore samples.

样品名称	铁锂云母中 锂含量 (%)	锂云母中 锂含量 (%)	锂辉石中 锂含量 (%)	相态之和 (%)	总锂含量 (%)
精矿	0.050	0.66	0.86	1.570	1.55
中矿	0.030	0.24	0.21	0.480	0.47
尾矿	0.021	0.19	0.14	0.351	0.34

3 结论

探索建立了伟晶岩型锂矿石中锂的化学物相分析方法。选用 30% 稀盐酸为铁锂云母中锂的选择性浸出剂,浓硫酸为锂云母的选择性浸出剂,最后残渣

用王水、氢氟酸、高氯酸溶解锂辉石中的锂,结果表明各相态的选择性浸出剂对目标矿物的浸出率均大于 97%,而对其他相态的浸出率均小于 5%,不存在串相问题。通过对川西某伟晶岩型锂矿石进行 6 次分析,各相态锂的相对标准偏差均小于 5%,且各相态的加和与总锂偏差小于 5%。将优化后的锂的化学物相分析方法应用于同一矿物选矿过程中的精矿、中矿和尾矿,样品中各相态中锂的走向符合选矿规律。该方法的建立将有助于进一步了解伟晶岩型锂矿石的赋存状态,为该类锂矿石的地质找矿、矿床评价、矿石选冶等提供技术支撑。

自然界中含锂矿物很多,赋存状态也更复杂,本文仅建立了伟晶岩型锂矿石的化学物相分析方法,更多锂矿石的物相分析方法还需要进一步探索研究,为锂矿石的选冶提供更强的助力。

Chemical Phase Analysis of Lithium in Pegmatitic Lithium Ores

FU Zhaodi^{1,2}, ZHANG Xiaojuan^{1,2}, YANG Lin^{1,2}

(1. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, China;

2. Testing Technology Company of Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, China)

HIGHLIGHTS

- (1) According to the difference in petrochemical properties of lepidolite and spodumene, the monomineral experiment was used to explore concentrated sulfuric acid as the selective leaching agent of lepidolite, and the separation of lepidolite and spodumene was realized.
- (2) The existence state of lithium in pegmatitic lithium ores and the content of lithium in each mineral were ascertained by chemical phase analysis method, and the optimal leaching conditions for each phase of lithium were determined.
- (3) The content of lithium in various phases in lithium ores in Western Sichuan was analyzed. The relative standard deviation of the proposed method in each phase was 1.27%–3.79%, and the relative deviation between the sum and the total lithium was 1.22%.

ABSTRACT: Chemical phase analysis can provide important technical guidance for geological exploration, deposit evaluation and high efficiency metallurgy of lithium ore. Because many lithium minerals are very similar in chemical properties, there are no reports related to the chemical phase analysis of lithium ores. Pegmatitic lithium ore is an important kind of lithium ore, in which lepidolite and spodumene are important raw materials for extracting lithium. In this research, a method for chemical phase analysis of lithium in pegmatitic lithium ores was established to determine the content of lithium in each lithium mineral. The lithium was divided into three phases: zinnwaldite, lithium mica, and spodumene. Dilute hydrochloric acid was used to selectively leach lithium from zinnwaldite, concentrated sulfuric acid was used to dissolve lithium from lithium mica, and *aqua regia* was used to dissolve lithium from spodumene. The optimal leaching conditions of each phase was explored and established. According to the analysis of lithium phase in lithium ores in Western Sichuan for 6 repetitions, the relative standard deviation of each phase was 1.27%–3.79% and the relative deviation of the sum and the total lithium was 1.22%, all less than 5%, indicating that this method is suitable for the chemical phase analysis of lithium in pegmatitic lithium ores.

KEY WORDS: lithium; lithium ore; chemical phase analysis; inductively coupled plasma-optical emission spectrometry

参考文献

- [1] 王秋舒, 元春华, 许虹. 全球锂矿资源分布与潜力分析[J]. 中国矿业, 2015, 24(2): 10–17.
Wang Q S, Yuan C H, Xu H. Analysis of the global lithium resource distribution and potential[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(2): 10–17.
- [2] 付洪波, 吴边, 王华东, 等. 激光诱导击穿光谱定量分析锂矿石中锂元素[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(11): 3489–3493.

- Fu H B, Wu B, Wang H D, et al. Quantitative analysis of lithium in lithium ore by laser induced breakdown spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(11): 3489–3493.
- [3] 张苏江, 张彦文, 张立伟, 等. 中国锂矿资源现状及其可持续发展策略[J]. 无机盐工业, 2020, 52(7): 1–7.
Zhang S Z, Zhang Y W, Zhang L W, et al. Present situation and sustainable development strategy of China's lithium resources[J]. Inorganic Chemicals Industry,

- 2020, 52(7): 1-7.
- [4] 刘舒飞, 陈德稳, 李会谦. 中国锂资源产业现状及对策建议[J]. 资源与产业, 2016(2): 12-15.
- Liu S F, Chen D W, Li H Q. Situation and suggestions of China's lithium resources industry[J]. Resources & Industries, 2016(2): 12-15.
- [5] 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 等. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 263-278.
- Liu L J, Wang D H, Liu X F, et al. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine[J]. Geology in China, 2017, 44(2): 263-278.
- [6] 李建康, 刘喜方, 王登红. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2269-2283.
- Li J K, Liu X F, Wang D H. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2269-2283.
- [7] 于泓, 王登红, 于扬, 等. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状[J]. 岩矿测试, 2019, 38(3): 354-364.
- Yu F, Wang D H, Yu Y, et al. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary-type lithium deposits[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(3): 354-364.
- [8] 于扬, 王登红, 于泓, 等. 川西甲基卡大型锂资源基地绿色调查及环境评价指标体系的建立[J]. 岩矿测试, 2019, 38(5): 534-544.
- Yu Y, Wang D H, Yu F, et al. Study on the index system of green investigation and environmental evaluation for the Jiajika Large Lithium Mineral Resource Base, Western Sichuan, China[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(5): 534-544.
- [9] 李良彬, 刘明, 彭爱平, 等. 锂云母提锂工艺及工业化应注意的问题[J]. 世界有色金属, 2014, 8(3): 37-39.
- Li L B, Liu M, Peng A P, et al. Attention to the process and industrialization of lithium extraction from le mica[J]. World Nonferrous Metals, 2014, 8(3): 37-39.
- [10] 符招弟, 傅绕, 杨炳红. 分相浸出-火焰原子吸收光谱法测定高硫高钾金矿石及选冶物料中金的赋存状态[J]. 冶金分析, 2015, 35(11): 23-27.
- Fu Z D, Fu R, Yang B H. Application of phase separation leaching-flame atomic absorption spectrometry to the determination of occurrence state of gold in high sulfur high-arsenic gold ore and smelting material[J]. Metallurgical Analysis, 2015, 35(11): 23-27.
- [11] 金绍祥. 化学物相分析法测定瓮福磷尾矿中钙镁磷元素形态含量[J]. 岩矿测试, 2011, 30(3): 357-360.
- Jin S X. Determination of occurrence states of calcium, magnesium, phosphorus in Wengfu phosphorus tailings by chemical phase analysis[J]. Rock and Mineral Analysis, 2011, 30(3): 357-360.
- [12] 王坤阳, 徐金沙, 饶华文, 等. 扫描电镜-X射线能谱仪在丹巴地区铂族矿物物相特征分析中的应用[J]. 岩矿测试, 2013, 32(6): 924-930.
- Wang K Y, Xu J S, Rao H W, et al. Application of SEM and EDS for phase characteristics analysis of platinoid mineral in the Danba area[J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(6): 924-930.
- [13] 涂家润, 卢宜冠, 孙凯, 等. 应用微束分析技术研究铜钴矿床中钴的赋存状态[J]. 岩矿测试, 2022, 41(2): 226-238.
- Tu J R, Lu Y G, Sun K, et al. Application of microbeam analytical technology to study the occurrence of cobalt from copper-cobalt deposits[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(2): 226-238.
- [14] 惠博, 龚大兴, 陈伟, 等. 贵州六枝地区沉积型锂矿中锂的赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021, 2(1): 1-4.
- Hui B, Gong D X, Chen W, et al. Study on the occurrence of lithium in sedimentary lithium deposits in Liuzhi area, Guizhou Province[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021, 2(1): 1-4.
- [15] 衣姝, 王金喜. 安家岭矿9号煤中锂的赋存状态和富集因素分析[J]. 煤炭与化工, 2014, 37(9): 7-10.
- Yi S, Wang J X. Lithium occurrences and enrichment factor law in No. 9 coal seam of Anjialing mine[J]. Coal and Chemical Industry, 2014, 37(9): 7-10.
- [16] 崔燚, 温汉捷, 于文修, 等. 滇中下二叠统倒石头组富锂黏土岩系锂的赋存状态及富集机制研究[J]. 岩石学报, 2022, 37(7): 2080-2094.
- Cui Y, Wen H J, Yu W X, et al. Study on the occurrence state and enrichment mechanism of lithium in lithium-rich clay rock series of the Daoshitou Formation of lower Permian in Central Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica,

- 2022, 37(7): 2080–2094.
- [17] 黄宝贵. 化学物相分析在物料成分全分析数据处理中的应用[J]. 岩矿测试, 2009, 28(5): 439–443.
Huang B G. Application of chemical phase analysis in tested data processing of complete analysis for material composition[J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(5): 439–443.
- [18] 黄宝贵, 张志勇, 杨林, 等. 中国化学物相分析研究的新成就(上)[J]. 中国无机分析化学, 2011, 1(2): 6–12.
Huang B G, Zhang Z Y, Yang L, et al. Recent achievements of chemical phase analysis in China (First Half)[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical chemistry, 2011, 1(2): 6–12.
- [19] 黄宝贵, 张志勇, 杨林, 等. 中国化学物相分析研究的新成就(下)[J]. 中国无机分析化学, 2011, 1(3): 8–15.
Huang B G, Zhang Z Y, Yang L, et al. Recent achievements of chemical phase analysis in China (Second Half)[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2011, 1(3): 8–15.
- [20] 龚美菱, 才世福, 张敏. 某铝土矿中锂的赋存状态分析[C]//龚美菱. 化学物相分析研究论文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986: 273–280.
Gong M L, Cai S F, Zhang M. Analysis of Occurrence State of Lithium in Bauxite[C]//Gong M L. Chemical Phase Analysis Research Papers. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986: 273–280.
- [21] 白峰, 冯恒毅, 邹思劼, 等. 河南卢氏官坡伟晶岩中锂辉石的矿物学特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(2): 281–285.
Bai F, Feng H Y, Zou S J, et al. A mineralogical study of spodumene from Guanpo Pegmatites in Lushi, Henan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(2): 281–285.
- [22] Ogorodova L P, Kiseleva I A, Melchakova L V, et al. Thermodynamic properties of lithium mica: Lepidolite[J]. Geochemistry International, 2010, 435(1): 68–70.
- [23] Demyanova L P, Tressaud A. Fluorination of aluminosilicate interals: The example of lepidolite[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2009, 130(9): 799–805.
- [24] 柳林, 刘磊, 张亮, 等. 采用硫酸化焙烧-水浸工艺从锂云母精矿中提取锂[J]. 湿法冶金, 2021, 40(1): 6–9.
Liu L, Liu L, Zhang L, et al. Recovery of lithium from lepidolite concentrate by sulfuric acid roasting-water leaching process[J]. Hydrometallurgy of China, 2021, 40(1): 6–9.
- [25] 乔玲, 周本华, 姚成. 锂云母中提取锂的方法初步研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2004, 26(5): 47–48.
Qiao L, Zhou B H, Yao C. Preliminary study on extracting lithium from lepidolite[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 26(5): 47–48.
- [26] 赵寻, 杨静, 马鸿文, 等. 硫酸介质中锂云母分解反应动力学[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9): 2588–2595.
Zhao X, Yang J, Ma H W, et al. Kinetics of lepidolite decomposition reaction in sulfuric acid solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2588–2595.
- [27] 田千秋, 陈白珍, 陈亚, 等. 锂辉石硫酸焙烧及浸出工艺研究[J]. 稀有金属, 2011, 35(1): 118–123.
Tian Q Q, Chen B Z, Chen Y, et al. Roasting and leaching behavior of spodumene in sulphuric acid process[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(1): 118–123.