硫酸铵焙烧-水浸法从煤灰中协同浸出锂、铝试验研究①

徐世雄[1,2], 吴林[1,3], 钟方军[1,3], 李熹[1,3], 任平[1,3], 罗兴发[1,3], 成奖国[2], 董蕾[1], 武静[1]
(1.贵州省煤田地质局实验室, 贵州 贵阳 550016; 2.贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 3.富矿精开与环境保护贵州省院士工作站, 贵州 贵阳 550016)

摘 要: 采用硫酸铵焙烧-水浸法从煤灰中协同浸出锂、铝,考察了硫酸铵与煤灰质量比、焙烧温度、焙烧时间、液固比、浸出温度、浸出时间对锂、铝浸出率的影响。结果表明,在硫酸铵与煤灰质量比 4∶1、焙烧温度 400 ℃、焙烧时间 2 h、液固比 4∶1、浸出温度80 ℃、浸出时间 30 min 的优化条件下,锂浸出率达 86.77%,铝浸出率达 78.04%。机理分析结果表明,锂的载体相莫来石在 400 ℃下与硫酸铵热分解产物硫酸氢铵发生反应,生成可溶性硫酸铝铵和硫酸铝,莫来石晶体结构被破坏;锂释放后与硫酸氢铵反应生成硫酸锂,经水浸进入液相,从而实现了锂、铝的高效协同浸出。

关键词: 煤灰; 硫酸铵焙烧; 水浸法; 锂; 铝; 协同浸出; 粉煤灰
中图分类号: TF803.2 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.028
文章编号: 0253-6099(2026)04-0183-07

Experimental Study on Synergistic Leaching of Lithium and Aluminum from Coal Ash by Ammonium Sulfate Roasting - Water Leaching

XU Shixiong[1,2], WU Lin[1,3], ZHONG Fangjun[1,3], LI Xi[1,3], REN Ping[1,3], LUO Xingfa[1,3], CHENG Jiangguo[2], DONG Lei[1], WU Jing[1]
(1.*Laboratory of Guizhou Provincial Coalfield Geology Bureau*, *Guiyang* 550016, *Guizhou*, *China*; 2.*College of Mining*, *Guizhou University*, *Guiyang* 550025, *Guizhou*, *China*; 3.*Guizhou Academician Workstation for Precise Exploitation of Valuable Mineral Resources and Environmental Protection*, *Guiyang* 550016, *Guizhou*, *China*)

Abstract: Ammonium sulfate roasting - water leaching process was adopted to synergistically leach lithium and aluminum from coal ash, and the effects of mass ratio of ammonium sulfate to fly ash, roasting temperature, roasting time, liquid-to-solid ratio, leaching temperature and leaching time on leaching rates of lithium and aluminum were also investigated. The results show that under the optimized conditions: ammonium sulfate and fly ash in a mass ratio of 4∶1, roasting temperature of 400 ℃, roasting time of 2 h, liquid-to-solid ratio of 4∶1, leaching temperature of 80 ℃ and leaching time of 30 min, the leaching rates of lithium and aluminum reach 86.77% and 78.04%, respectively. Mechanism analysis indicates that mullite, the host phase of lithium, reacts with ammonium bisulfate (the thermal decomposition product of ammonium sulfate) at 400 ℃ to generate soluble ammonium aluminum sulfate and aluminum sulfate, resulting in destruction of mullite crystal structure. After being released, lithium reacts with ammonium bisulfate to form lithium sulfate, which enters the aqueous phase during water leaching, thus realizing efficient synergistic leaching of lithium and aluminum.

Key words: coal ash; ammonium sulfate roasting; water leaching; lithium; aluminum; synergistic leaching; fly ash

粉煤灰是燃煤电厂产生的大宗固体废物,大量堆存会出现占用资源、扬尘、淋溶污染等环境问题[1-3]。因此,粉煤灰综合利用对环境保护具有重要意义。目前,粉煤灰综合利用方向主要集中于制作建材、提取有

① **收稿日期**: 2026-01-28
基金项目: 贵州省自然资源厅 2022 年度新一轮找矿突破战略行动项目(黔自然资函〔2022〕632 号); 贵州省科技计划项目(黔科合平台 KXJZ〔2024〕003); 贵州省煤田地质局三级科研项目(贵煤科研〔2024〕2-03)
作者简介: 徐世雄(1999—),男,贵州毕节人,硕士研究生,主要研究方向为矿产资源综合利用。E-mail:923747889i@qq.com
通信作者: 吴林(1990—),女,四川沐川人,博士,高级工程师,从事矿产资源综合利用研究工作。E-mail:82208721@qq.com

价金属等领域[4],其中提取有价金属是实现粉煤灰高附加值利用的重要研究方向和热点之一。粉煤灰的主要化学组成为 SiO_2 和 Al_2O_3[5],主要矿物相包括玻璃体、莫来石、石英、赤铁矿等[6];除富含铝组分外,粉煤灰中还伴生锂、镓、稀土等战略性金属元素,具有显著的综合利用潜力[7-9]。随着高科技产业的迅猛发展,锂、铝需求逐渐增大,我国锂、铝优质资源的储量有限、对外依存度高[10-11]。因此,从粉煤灰中协同提取 Li、Al,具有重要战略意义。

粉煤灰中 Li 主要存在于莫来石与玻璃相中[12-14],这为 Li、Al 的协同提取提供了有利条件。现有研究多单独提取粉煤灰中 Li 或 Al,而 Li、Al 协同提取研究较少。目前,从粉煤灰中提取 Li、Al 的工艺主要包括酸/碱直接浸出法和助剂焙烧-浸出法。酸/碱直接浸出法浸出率较低,需要借助加压或高温等强化手段,对设备要求较高[15]。助剂焙烧-浸出法浸出效果较好,但焙烧温度高(≥800 ℃),能耗较大[16]。当采用硫酸或 NH_4F 等助剂进行焙烧时,虽能在较低温度(150~300 ℃)实现高效浸出,但焙烧过程中产生的强腐蚀性有毒酸雾,会腐蚀设备并带来环境和安全问题[17-18]。相对而言,硫酸铵焙烧-水浸法焙烧温度低(350~500 ℃),废气可被氨水或硫酸吸收,实现试剂闭环回收,应用前景好。

由于实际粉煤灰的煤源组成复杂,难以追溯其原始地质煤层来源,因而无法直接用于指导前端地质寻矿与煤层开发。通过模拟高温燃煤过程制备煤灰可以建立煤灰与煤层之间的对应关系并为煤层综合利用提供依据。基于此,本文采用硫酸铵焙烧-水浸法从煤灰中协同浸出 Li、Al。以硫酸铵为助剂对煤灰进行焙烧活化,再使用水对焙烧渣中 Li、Al 进行浸出,并研究了 Li、Al 协同浸出过程的物相变化和反应机理,以期为粉煤灰中 Li、Al 综合利用提供理论依据和技术支撑。

1 试验

1.1 化学组成

试验所用煤灰样品为贵州黔北和盘兴煤田的混合样,经燃烧后,破碎、磨矿至-75 μm。本文主要针对煤灰中 Li、Al 元素的浸出,煤灰制备过程中经过充分燃烧,C 含量较低,基本不参与反应,影响较小,因此未对 C 含量进行相关测试。煤灰主要化学成分见表 1。由表 1 可知,煤灰主要由 SiO_2(37.72%)和 Al_2O_3(30.94%)组成,其中 Li_2O 含量为0.21%,参照 DZ/T 0203—2020《矿产地质勘查规范 稀有金属类》[19]中伴生锂综合评价参考性指标(Li_2O≥0.20%),该试样 Li_2O 含量已达到伴生锂可综合利用标准。

表 1 煤灰主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of coal ash %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	Li_2O
37.72	30.94	6.87	0.79	8.54	1.18	1.18	1.77	0.21

1.2 矿物组成

图 1 为煤灰 XRD 图谱。由图 1 可知,煤灰主要矿物成分为莫来石($Al_6Si_2O_{13}$)、赤铁矿(Fe_2O_3)和石膏($CaSO_4$)。莫来石是 Al 的主要载体矿物相。文献[20]研究结果表明,粉煤灰中 Li 与 Al、Si 元素相关性强。粉煤灰中 Li 主要赋存于莫来石和玻璃相中[21-22]。因此,本文煤灰中 Li、Al 均以莫来石为主要载体矿物相,提取 Li、Al 的关键在于破坏莫来石的矿物结构,使晶格束缚的 Li、Al 元素解离并溶入浸出液。

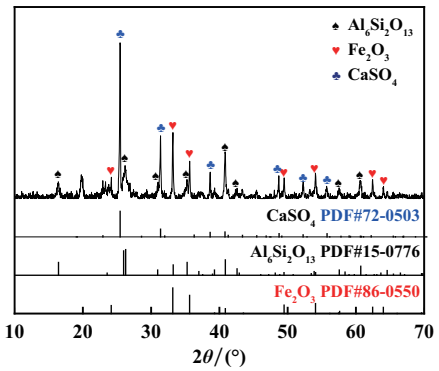


图 1 煤灰 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of coal ash

1.3 试验方法

称取煤灰样品于瓷坩埚中,按一定配比将硫酸铵与煤灰样品充分混合均匀后焙烧活化,自然冷却至室温得到焙烧渣。再将焙烧渣按一定液固比加入去离子水,放入水浴锅中进行恒温加热搅拌浸出,反应结束后,冷却过滤,得到浸出液和浸出渣。

采用 X 射线荧光光谱仪(赛默飞 ARL Perform'X 4200)分析样品组成元素;采用电感耦合等离子体质谱仪(珀金埃尔默 NexION 2000)测定浸出液 Li 含量;采用电感耦合等离子体发射光谱仪(珀金埃尔默 Avio 200)测定浸出液 Al 含量;采用 X 射线粉末衍射仪(马尔文帕纳科 X'Pert Pro MPD)表征试样矿物组成。

2 结果与讨论

2.1 锂、铝浸出条件试验

2.1.1 硫酸铵与煤灰质量比

焙烧时间 2 h、焙烧温度 400 ℃、液固比 4∶1、浸出温度 80 ℃、浸出时间 30 min 条件下,考察了硫酸铵与

煤灰质量比对 Li、Al 浸出率的影响,结果见图 2。由图 2 可知,Li 浸出率随硫酸铵与煤灰质量比增大而增大,Al 浸出率随硫酸铵与煤灰质量比的增大呈现不规律变化。为获得更高的 Li 浸出率,同时兼顾试剂成本,适宜的硫酸铵与煤灰质量比为 4∶1。

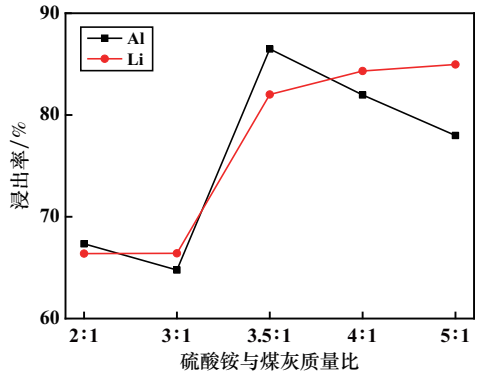


图 2　硫酸铵与煤灰质量比对 Li、Al 浸出率的影响

Fig. 2　Effect of mass ratio of ammonium sulfate to coal ash on leaching rates of Li and Al

2.1.2　焙烧温度

硫酸铵与煤灰质量比 4∶1,其他条件不变,焙烧温度对 Li、Al 浸出率的影响见图 3。由图 3 可知,焙烧温度 400 ℃时,Li 浸出率为 86.34%,Al 浸出率为 80.66%;继续升高焙烧温度,Li 浸出率开始下降。焙烧温度从 300 ℃提升至 400 ℃时,莫来石逐渐分解转化为硫酸铝铵和硫酸铵,400 ℃时基本分解;随着焙烧温度继续升高,反应速率加快,生成大量不溶性的二氧化硅将莫来石迅速包裹,阻碍了反应进行,导致煤灰中莫来石分解不彻底,Li 和 Al 浸出率均降低。因此,适宜的焙烧温度为 400 ℃。

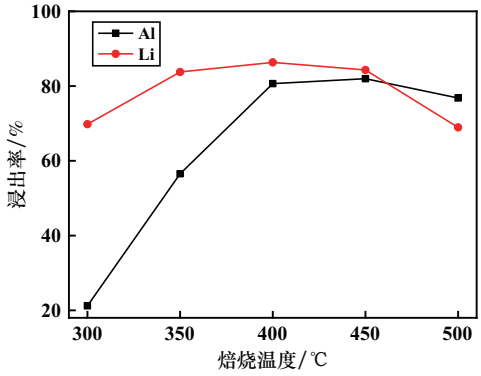


图 3　焙烧温度对 Li、Al 浸出率的影响

Fig. 3　Effect of roasting temperature on leaching rates of Li and Al

2.1.3　焙烧时间

焙烧温度 400 ℃,其他条件不变,焙烧时间对 Li、Al 浸出率的影响见图 4。由图 4 可知,焙烧时间 2 h 时,Li 浸出率为 85.73%,Al 浸出率为 80.82%;继续延长焙烧时间,Li、Al 浸出率均无明显变化。焙烧时间影响煤灰中莫来石分解反应进行的程度,随着反应进行,Li、Al 元素随莫来石的分解逐渐释放,焙烧时间达到 2 h 时,莫来石已基本分解,因此,继续延长焙烧时间对浸出率无明显提升作用。适宜的焙烧时间为 2 h。

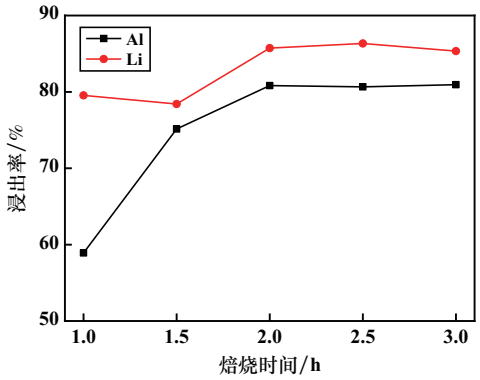


图 4　焙烧时间对 Li、Al 浸出率的影响

Fig. 4　Effect of roasting time on leaching rates of Li and Al

2.1.4　液固比

焙烧时间 2 h,其他条件不变,液固比对 Li、Al 浸出率的影响见图 5。由图 5 可知,Li、Al 浸出率均随着液固比增大呈现先升高后降低的趋势。液固比主要影响矿浆黏度,适当提高液固比可在一定程度上提高浸出率。液固比越大,矿浆黏度越小,传质阻力越小,同时反应速率越快,浸出率越高。然而,当液固比过大时,液体总量过大,削弱了搅拌效果,导致传质效率降低,浸出率下降。因此,液固比选用 4∶1。

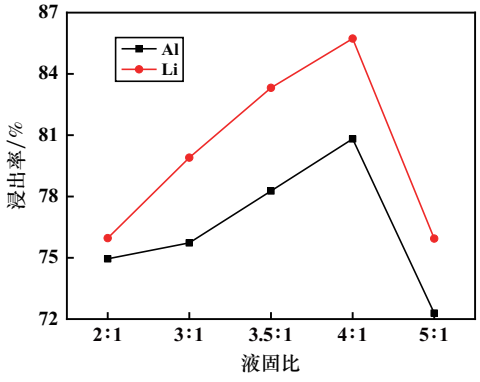


图 5　液固比对 Li、Al 浸出率的影响

Fig. 5　Effect of liquid-solid ratio on leaching rates of Li and Al

2.1.5　浸出温度

液固比 4∶1,其他条件不变,浸出温度对 Li、Al 浸出率的影响见图 6。由图 6 可知,浸出温度 80 ℃时,Li 浸出率为 85.73%,Al 浸出率达 80.82%;继续升高浸出

温度至 90 ℃,Li 浸出率略有下降,Al 浸出率无明显变化。浸出温度是影响反应速率的关键因素,温度升高加剧了分子热运动,提高了分子间有效碰撞概率,从而加快了反应速率,促进了硫酸铝铵和硫酸铝的溶解。适宜的浸出温度为 80 ℃。

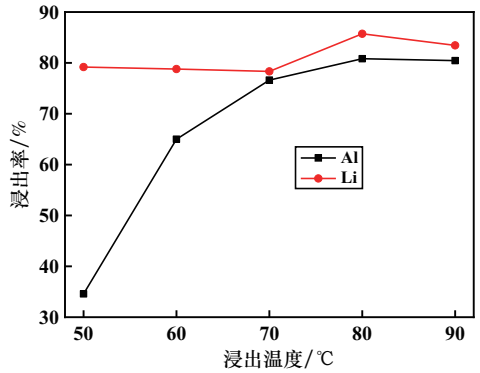


图 6 浸出温度对 Li、Al 浸出率的影响

Fig. 6 Effect of leaching temperature on leaching rates of Li and Al

2.1.6 浸出时间

浸出温度 80 ℃,其他条件不变,浸出时间对 Li、Al 浸出率的影响见图 7。由图 7 可知,Li、Al 浸出率随着浸出时间延长呈现不规律变化。浸出时间 30 min 时,Li 浸出率为 86.77%,Al 浸出率为 78.04%。浸出时间越长,硫酸铝铵和硫酸铝溶解越充分。为使 Li 浸出率最大化,同时保证 Al 也具有较高的浸出率,适宜的浸出时间为 30 min。

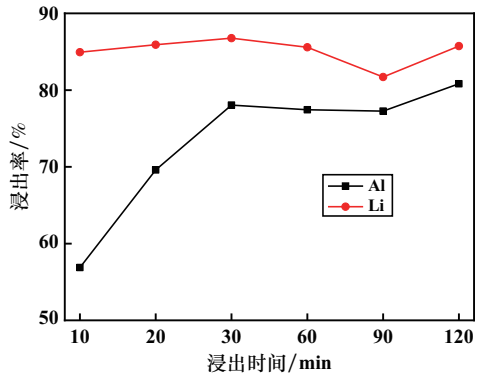


图 7 浸出时间对 Li、Al 浸出率的影响

Fig. 7 Effect of leaching time on leaching rates of Li and Al

2.1.7 综合试验

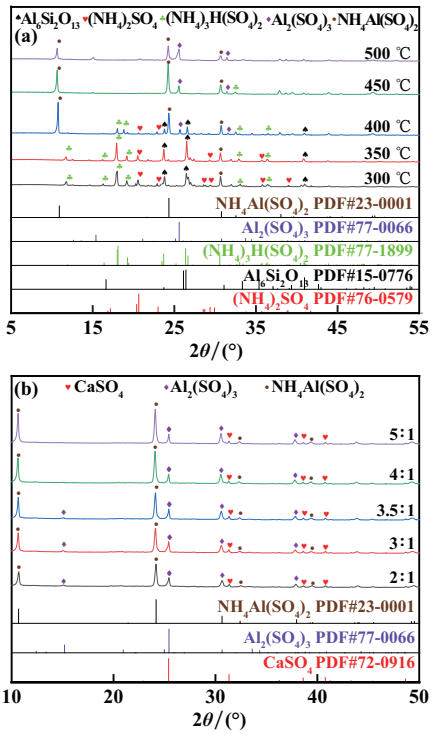
综上单因素实验,硫酸铵焙烧-水浸法协同浸出 Li、Al 的优化工艺参数为:硫酸铵与煤灰质量比为 4∶1、焙烧温度 400 ℃、焙烧时间 2 h、液固比 4∶1、浸出温度 80 ℃、浸出时间 30 min,在此条件下,Li 浸出率为 86.77%,Al 浸出率为 78.04%。

2.2 锂、铝浸出机理

2.2.1 硫酸铵焙烧过程机理

为揭示硫酸铵焙烧过程的机理,采用 XRD 分析了不同焙烧温度和不同硫酸铵与煤灰质量比条件下焙烧产物的物相组成,结果见图 8。其中,考察不同焙烧温度影响时,硫酸铵与煤灰质量比、焙烧时间分别固定为 4∶1、2 h;考察不同硫酸铵与煤灰质量比影响时,焙烧温度、焙烧时间分别固定为 400 ℃、2 h。由图 8 可知,焙烧温度 300 ~ 400 ℃时,随着焙烧温度升高,$(NH_4)_2SO_4$ 与 $Al_6Si_2O_{13}$ 的特征衍射峰强度逐渐减弱,并伴随有 $(NH_4)_3H(SO_4)_2$ 特征衍射峰出现;继续升高焙烧温度,$(NH_4)_3H(SO_4)_2$ 特征衍射峰逐渐减弱,同时 $NH_4Al(SO_4)_2$ 特征衍射峰出现并不断增强,其间也出现少量 $Al_2(SO_4)_3$ 特征衍射峰。焙烧温度 400 ℃时,焙烧产物主要为 $NH_4Al(SO_4)_2$,少量未完全分解的 $(NH_4)_3H(SO_4)_2$、$(NH_4)_2SO_4$、$Al_6Si_2O_{13}$ 以及新生成的 $Al_2(SO_4)_3$。焙烧温度 400~500 ℃时,$NH_4Al(SO_4)_2$ 特征衍射峰逐渐减弱,而 $Al_2(SO_4)_3$ 特征衍射峰显著增强,其余中间产物的衍射峰基本消失,主要产物为 $Al_2(SO_4)_3$ 和 $NH_4Al(SO_4)_2$。

不同硫酸铵与煤灰质量比条件下,焙烧产物的主要物相均包括 $CaSO_4$、$NH_4Al(SO_4)_2$ 和 $Al_2(SO_4)_3$。随着硫酸铵质量比增大,$NH_4Al(SO_4)_2$ 和 $Al_2(SO_4)_3$ 的特征峰强度逐渐增强。这一现象表明,增大硫酸铵用



(a) 不同焙烧温度;(b) 不同硫酸铵与煤灰质量比

图 8 焙烧产物 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns of roasted products

量虽未改变最终产物的种类,但反应更充分,显著促进了煤灰中 $Al_6Si_2O_{13}$向可溶性硫酸盐的转化,该物相转化规律与图 2 分析结果一致。

图 9 为 400 ℃下煤灰与硫酸铵焙烧产物的 SEM-EDS 图像,其中硫酸铵与煤灰质量比为 4∶1,焙烧时间为 2 h。由图 9 可知,400 ℃下硫酸铵焙烧产物主要为 $NH_4Al(SO_4)_2$ 和 $Al_2(SO_4)_3$,$NH_4Al(SO_4)_2$ 和$Al_2(SO_4)_3$ 多呈规则晶状。硫酸铝铵晶体呈棱柱状,主要元素组成为 Al、S、N、O、C,其中 C 元素为样品制备过程中所做喷涂,在分析时不作考虑,下同;Al、S、N、O 元素含量分别为 8.48%、19.87%、8.82%、50.32%,结果与 $NH_4Al(SO_4)_2$ 中各元素质量比相当。硫酸铝晶体呈板块状或层片状,主要元素组成为 Al、S、O,含量分别为 14.37%、22.81%、49.64%,结果与$Al_2(SO_4)_3$中各元素质量比相当。煤灰和硫酸铵在 400 ℃焙烧条件下反应生成了 $NH_4Al(SO_4)_2$ 和 $Al_2(SO_4)_3$。

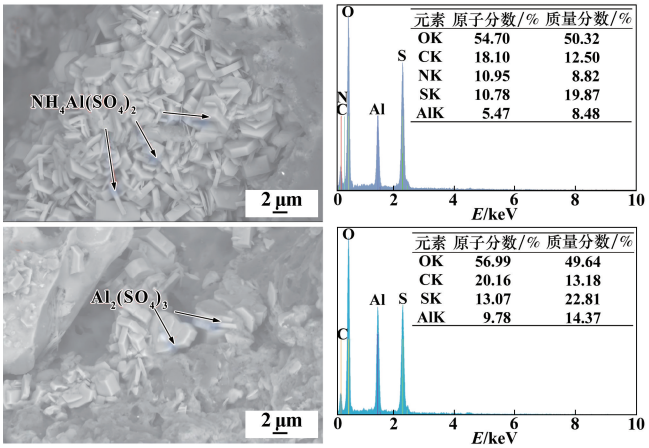


图 9　400 ℃下煤灰与硫酸铵焙烧产物的 SEM-EDS 图像

Fig. 9　SEM-EDS analysis of products obtained from roasting of coal ash with ammonium sulfate at 400 ℃

硫酸铵热分解是一个复杂的反应过程,涉及许多中间产物,文献[23]研究显示,当温度高于 180 ℃时,$(NH_4)_2SO_4$ 开始逐渐分解,生成液态 NH_4HSO_4。温度升至 300 ℃及以上时,$(NH_4)_2SO_4$ 可进一步分解为 $(NH_4)_3H(SO_4)_2$,或 NH_4HSO_4 和 $(NH_4)_3H(SO_4)_2$[24]。此外,$(NH_4)_2SO_4$ 也可与 NH_4HSO_4 反应生成 $(NH_4)_3H(SO_4)_2$[25-26]。当温度继续升高至400 ℃以上时,$(NH_4)_3H(SO_4)_2$ 开始脱水,分解生成中间体 $(NH_4)_2S_2O_7$。但由于$(NH_4)_2S_2O_7$ 不稳定,可迅速分解为气态 NH_3、SO_2、N_2 和 H_2O[24,27]。最终反应为 $(NH_4)_2SO_4$ 热分解生成气态的 NH_3、SO_2、N_2 和 H_2O[24]。所涉及的化学反应式如下。

$$(NH_4)_2SO_4 = NH_4HSO_4(l) + NH_3(g) \quad (1)$$

$$2(NH_4)_2SO_4 = (NH_4)_3H(SO_4)_2 + NH_3(g) \quad (2)$$

$$3(NH_4)_2SO_4 = NH_4HSO_4(l) + (NH_4)_3H(SO_4)_2 + 2NH_3(g) \quad (3)$$

$$(NH_4)_2SO_4 + NH_4HSO_4(l) = (NH_4)_3H(SO_4)_2 \quad (4)$$

$$(NH_4)_3H(SO_4)_2 = (NH_4)_2S_2O_7 + NH_3(g) + H_2O(g) \quad (5)$$

$$3(NH_4)_2S_2O_7(s) = 2NH_3(g) + 6SO_2(g) + 2N_2(g) + 9H_2O(g) \quad (6)$$

$$3(NH_4)_2SO_4(s) = 3SO_2(g) + N_2(g) + 4NH_3(g) + 6H_2O(g) \quad (7)$$

结合图 8 和图 9 的分析结果可知,300~400 ℃时,煤灰中 $Al_6Si_2O_{13}$与 NH_4HSO_4 反应生成 $NH_4Al(SO_4)_2$、SiO_2、H_2O 和 NH_3。当温度进一步升高至 400~500 ℃时,$NH_4Al(SO_4)_2$ 又逐渐分解生成 $Al_2(SO_4)_3$。同时,赋存于煤灰中的 Li 随着 $Al_6Si_2O_{13}$结构被破坏得以释放出来,与 NH_4HSO_4 反应生成易溶的硫酸锂。相关化学反应式如下。

$$Al_6Si_2O_{13} + 12NH_4HSO_4(l) = 6NH_4Al(SO_4)_2 + 2SiO_2 + 9H_2O(g) + 6NH_3(g) \quad (8)$$

$$2NH_4Al(SO_4)_2 = Al_2(SO_4)_3 + 2NH_3(g) + SO_3(g) + H_2O(g) \quad (9)$$

$$Li_2O + NH_4HSO_4(l) = Li_2SO_4 + H_2O(g) + NH_3(g) \quad (10)$$

2.2.2　水浸过程机理

为探究水浸过程的反应机理,采用 XRD 和 SEM-EDS 分析了优化条件下所得焙烧渣和浸出渣的主要组成和微观形貌,结果见图 10 和图 11。由图 10 可知,焙烧渣中 $NH_4Al(SO_4)_2$、$Al_2(SO_4)_3$ 等物相的衍射峰基本消失,而 $CaSO_4$ 的衍射峰凸显。此外,焙烧渣中少量未分解的 $Al_6Si_2O_{13}$由于含量相对较低,未在 XRD 图谱中凸显。结合图 11 分析,浸出渣中硫酸钙晶体呈短柱状,棱角分明,界面平直,其主要元素组成为Ca、

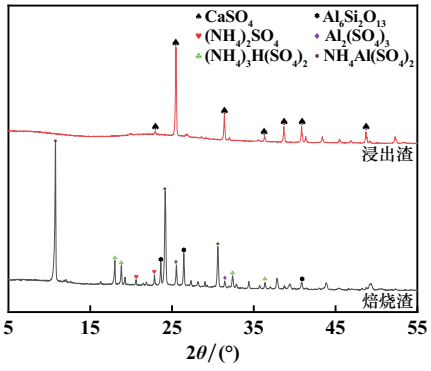


图 10　浸出前后产物的物相变化

Fig. 10　Phase changes of products before and after leaching

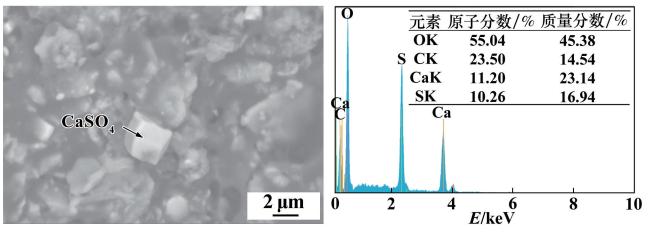


图 11 浸出渣的 SEM-EDS 分析结果

Fig. 11 SEM-EDS analysis of leaching residue

S、O,这与 XRD 分析结果一致。因此,硫酸铵焙烧过程中生成的可溶性 $(NH_4)_3H(SO_4)_2$、$NH_4Al(SO_4)_2$、$Al_2(SO_4)_3$ 和 Li_2SO_4,在水浸过程中充分溶解进入液相,而 $CaSO_4$ 因其难溶于水而残留于浸出渣中。因此,硫酸铵焙烧-水浸法可实现煤灰中 Li、Al 高效协同浸出。

3 结论

1) 硫酸铵焙烧-水浸条件试验的优化条件为:硫酸铵与煤灰质量比为 4∶1、焙烧温度 400 ℃、焙烧时间 2 h、液固比 4∶1、浸出温度 80 ℃、浸出时间 30 min,在此条件下,Li 浸出率达 86.77%,Al 浸出率达 78.04%。

2) 锂、铝协同浸出过程的相变规律和反应机理研究结果表明,在硫酸铵焙烧过程中,Li、Al 的载体相莫来石被硫酸铵的热分解产物 NH_4HSO_4 分解生成可溶性的 $NH_4Al(SO_4)_2$ 和 $Al_2(SO_4)_3$,莫来石结构被破坏,释放出 Li 与 NH_4HSO_4 反应生成可溶性的 Li_2SO_4,产物 $NH_4Al(SO_4)_2$、$Al_2(SO_4)_3$ 和 Li_2SO_4 经水浸后进入溶液,从而实现了 Li、Al 的高效协同浸出。

参考文献(References):

[1] 芮玥纪,王兴明,陈继旺. 粉煤灰堆放对周边环境危害的研究进展[J]. 农业与技术, 2024,44(3):98-101.
Rui Yueji, Wang Xingming, Chen Jiwang. Research progress on the harm of fly ash stacking to surrounding environment[J]. Agriculture and Technology, 2024,44(3):98-101.

[2] 杨玉飞,卢永琦,刘婷婷,等. 基于 CiteSpace 可视化分析粉煤灰堆存对水环境影响研究进展[J]. 科学技术与工程, 2025,25(13):5285-5296.
Yang Yufei, Lu Yongqi, Liu Tingting, et al. Review on the impact of coal fly ash stockpiling on water environment based on CiteSpace visualization analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13):5285-5296.

[3] 赵兴杰,杨坤,胡途. 机械活化对粉煤灰提铝影响研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):111-114.
Zhao Xingjie, Yang Kun, Hu Tu. Effect of mechanical activation on extraction of aluminum from fly ash[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(6):111-114.

[4] 湛燕. 粉煤灰综合利用研究进展[J]. 山东化工, 2024,53(17):119-122.
Zhan Yan. Research progress on comprehensive utilization of fly ash[J]. Shandong Chemical Industry, 2024,53(17):119-122.

[5] 王高科,郭伟勇,黄鹏程,等. 宁夏宁东能源化工基地电厂粉煤灰的理化性质及资源化利用评价[J]. 再生资源与循环经济, 2023, 16(8):20-25.
Wang Gaoke, Guo Weiyong, Huang Pengcheng, et al. Evaluation on physicochemical properties and resource utilization of fly ash from power plant in Ningxia Ningdong Energy Chemical Industry Base[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2023,16(8):20-25.

[6] 赵永彬. 粉煤灰的矿物学性质研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(4):112-116.
Zhao Yongbin. Research on mineralogical properties of fly ash[J]. Clean Coal Technology, 2015,21(4):112-116.

[7] 郭祥,沈明伟,李永勇,等. 低品位黏土型锂矿焙烧-酸浸提锂试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(5):113-117.
Guo Xiang, Shen Mingwei, Li Yongyong, et al. Experimental study on lithium extraction from low-grade clay-type lithium ore by roasting and acid leaching process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(5):113-117.

[8] 康健,崔培龙,康昱,等. 煅烧-水浸法分离黏土型锂矿浸出液中锂和铝[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):90-93.
Kang Jian, Cui Peilong, Kang Yu, et al. Separation of lithium and aluminum in leaching solution of clay-type lithium ore by calcination and water leaching[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(6):90-93.

[9] 冯利娟. 高铝粉煤灰复杂酸性体系中铝铁锂镓协同提取研究[D]. 太原:山西大学, 2024:4.
Feng Lijuan. Study on synergistic extraction of aluminum, iron, lithium and gallium from complex acidic system of high aluminum fly ash[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024:4.

[10] 王京,李静,张金良. 全球视角下的中国铝资源供需形势分析[J]. 中国矿业, 2024,33(12):54-62.
Wang Jing, Li Jing, Zhang Jinliang. Analysis of aluminum resource supply and demand situation in China from a global perspective[J]. China Mining Magazine, 2024,33(12):54-62.

[11] 郑明贵,王萍,潘天阳. 中国铝资源供应安全预警系统研究[J]. 科技促进发展, 2020,16(11):1307-1316.
Zheng Minggui, Wang Ping, Pan Tianyang. Research on security early warning system of aluminum resource supply in China[J]. Science & Technology for Development, 2020,16(11):1307-1316.

[12] 刘云霞. 山西省典型矿区煤及煤灰中锂镓赋存状态与转化机制[D]. 太原:太原理工大学, 2022:54.
Liu Yunxia. Occurrence and transformation of lithium and gallium in coal and coal ash from typical mining areas of Shanxi province[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022:54.

[13] 胡朋朋. 高铝粉煤灰中锂的赋存状态及预脱硅过程浸出规律研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2018:13.
Hu Pengpeng. Occurrence of lithium in high-alumina-coal fly ash and its leaching behaviors during pre-desilication[D]. Beijing: Universi-

ty of Chinese Academy of Sciences (Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences), 2018:13.

[14] 王禹昊,董众兵. 粉煤灰中有价战略性关键金属活化提取研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2025,53(8):121-130.
Wang Yuhao, Dong Zhongbing. Advances in research on the activation and recovery of strategic and critical valuable metals from coal fly ash[J]. Coal Geology & Exploration, 2025,53(8):121-130.

[15] 赵爱春,刘煜金,张廷安,等. 粉煤灰综合利用硫酸浸取铝、铁试验[J]. 中国有色冶金, 2022,51(2):99-105.
Zhao Aichun, Liu Yujin, Zhang Tingan, et al. Experiment on sulfuric acid leaching of aluminum and iron for comprehensive utilization of coal ash[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022,51(2):99-105.

[16] 王沙,秦伟,韩雪,等. 粉煤灰中锂元素的浸出及动力学研究[J]. 湿法冶金, 2024,43(6):646-651.
Wang Sha, Qin Wei, Han Xue, et al. Leaching and kinetic of lithium element from waste coal fly ash[J]. Hydrometallurgy of China, 2024,43(6):646-651.

[17] Xu H Q, Liu C L, Mi X, et al. Extraction of lithium from coal fly ash by low-temperature ammonium fluoride activation-assisted leaching[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 279: 119757.

[18] 赵梓,赵爱春,刘宸嘉,等. 硫酸铵焙烧活化—硫酸浸出粉煤灰提铝熟料的动力学研究[J]. 湿法冶金, 2024,43(2):129-133.
Zhao Zi, Zhao Aichun, Liu Chenjia, et al. Kinetics of aluminum extraction clinker from fly ash by ammonium sulfate roasting activation - sulfuric acid leaching[J]. Hydrometallurgy of China, 2024,43(2): 129-133.

[19] DZ/T 0203—2020 矿产地质勘查规范 稀有金属类[S].
DZ/T 0203-2020 Specifications for rare metal mineral exploration[S].

[20] 张帆. 碱溶脱硅联用有机溶剂萃取法回收高铝粉煤灰中锂[D]. 焦作:河南理工大学, 2024:25.
Zhang Fan. Recovery of lithium from high aluminum fly ash by alkaline dissolution desilication combined with organic solvent extraction[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2024:25.

[21] 张磊,陈航超,潘金禾,等. 煤系锂和稀土的赋存特征与富集提取研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(6):1-13.
Zhang Lei, Chen Hangchao, Pan Jinhe, et al. Research progress on occurrence characteristics, enrichment and extraction of coal-based lithium and rare earth[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(6):1-13.

[22] 董卉,陈娟,李箫玉,等. 烧结剂对新疆粉煤灰中锂浸出的作用特性[J]. 化工进展, 2019,38(3):1538-1544.
Dong Hui, Chen Juan, Li Xiaoyu, et al. The effect of activator on lithium extraction from Xinjiang fly ash[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019,38(3):1538-1544.

[23] Jariwala M, Crawford J, LeCaptain D J. In situ Raman spectroscopic analysis of the regeneration of ammonium hydrogen sulfate from ammonium sulfate[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007,46(14):4900-4905.

[24] Ju J R, Feng Y L, Li H R, et al. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: a systematic review[J]. Chemical Engineering Journal, 2023,457:141197.

[25] Saleh H I, Hassan K M. Extraction of zinc from blast-furnace dust using ammonium sulfate[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2004,79(4):397-402.

[26] Mohamed S, van der Merwe E M, Altermann W, et al. Process development for elemental recovery from PGM tailings by thermochemical treatment: preliminary major element extraction studies using ammonium sulphate as extracting agent[J]. Waste Management, 2016, 50:334-345.

[27] Kiyoura R, Urano K. Mechanism, kinetics, and equilibrium of thermal decomposition of ammonium sulfate[J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1970,9(4):489-494.

引用本文:徐世雄,吴林,钟方军,等. 硫酸铵焙烧-水浸法从煤灰中协同浸出锂、铝试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):183-189.
Xu Shixiong, Wu Lin, Zhong Fangjun, et al. Experimental study on synergistic leaching of lithium and aluminum from coal ash by ammonium sulfate roasting - water leaching[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):183-189.