

重晶石伴生氟化物的赋存状态及浸出试验研究^①

范智禹¹, 聂登攀², 李维娟¹, 王一雍¹, 李继东¹, 庞启航¹

(1.辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051; 2.贵州民族大学 化学工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 研究了重晶石伴生氟化物赋存状态, 结合 Plackett-Burman 试验法, 采用 HCl-AlCl₃ 浸出重晶石伴生氟化物, 考察 HCl 浓度、AlCl₃ 浓度、反应温度、反应时间和液固比对氟浸出率的影响。结果表明: 重晶石中氟元素主要以萤石形式存在, 呈浸染状和条带状分布; HCl 浓度 3 mol/L、AlCl₃ 浓度 0.4 mol/L、反应温度 80 °C、反应时间 30 min、液固比 10 mL/g、矿样粒度 48~75 μm、搅拌速度 300 r/min 条件下, 氟浸出率可达 93.20%, 浸出后重晶石质量分数 95.91%; 各因素影响氟浸出率的显著性排序为: 反应温度>HCl 浓度>反应时间>AlCl₃ 浓度>液固比。

关键词: 重晶石; 氟化物; 赋存状态; HCl-AlCl₃; 浸出; Plackett-Burman 试验法; 氟

中图分类号: TQ132; TF111

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.06.021

文章编号: 0253-6099(2024)06-0099-05

Leaching Test Based on Occurrence State of Fluoride in Barite

FAN Zhiyu¹, NIE Dengpan², LI Weijuan¹, WANG Yiyong¹, LI Jidong¹, PANG Qihang¹

(1.School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China; 2.School of Chemical Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Based on the investigation of occurrence state, fluoride associated with barite was leached with HCl-AlCl₃ by using Plackett-Burman design, and influences of HCl concentration, AlCl₃ concentration, reaction temperature, reaction time, and liquid-to-solid ratio on fluorine leaching rate were investigated. It is found that the fluorine in barite mainly exists in the form of disseminated and banded fluorite. By using HCl at a concentration of 3 mol/L and AlCl₃ at a concentration of 0.4 mol/L, after 30 min leaching reaction of ore sample with grain size of 48–75 μm, liquid-to-solid ratio of 10 mL/g, and stirring speed at 300 r/min, the leaching rate of fluorine can reach 93.20%, and the mass fraction of barite is 95.91%. Results show that all factors that influence fluorine leaching rate are arranged in descending order of importance as follows: reaction temperature > HCl concentration > reaction time > AlCl₃ concentration > liquid-to-solid ratio.

Key words: barite; fluoride; occurrence state; HCl-AlCl₃; leaching; Plackett-Burman design; fluorine

重晶石 (BaSO₄) 是含钡的非金属矿石, 具有无毒、密度大、耐酸碱、填充性和防辐射性好等优点, 常用作涂染料、加重剂、防射线混凝土以及聚合填充材料等, 广泛应用于石油、化工、采矿、建筑等领域^[1-4]。天然重晶石常与萤石 (CaF₂)、方解石 (CaCO₃) 等脉石矿物伴生^[5]。重晶石产品 BaSO₄ 品位须达到 90% 以上才能进入市场销售^[6]。采用重选^[7]、磁选^[8]和浮选^[9]等选矿方法难以彻底脱除伴生的脉石矿物, 为提高重

晶石产品质量, 浸出提纯是一种高效方法^[10]。

重晶石伴生的萤石与盐酸和硫酸反应均会生成有毒的氟化氢气体, 与水互溶后形成氢氟酸, 对设备腐蚀严重。盐酸-硼酸-硫酸混合可有效浸出 CaF₂^[11], 此方法氟浸出率虽然较高, 但同样对设备产生腐蚀, 且浸出后的含氟废液难以处理, 容易造成环境污染。有研究曾使用络合法浸出混合稀土精矿中的氟化物^[12], 添加 Al³⁺ 能与 F⁻ 形成络合离子 [AlF_n]³⁻ⁿ, 用于生产冰晶石,

① 收稿日期: 2024-06-12

基金项目: 辽宁省教育厅重点攻关项目 (JYTZD2023091); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2021] 一般 484, 黔科合支撑 [2020] 4Y014, 黔科合基础 [2020] 1Y406); 贵州省科协专项及调研课题 (YZ2023001)

作者简介: 范智禹 (1997—), 男, 辽宁鞍山人, 博士研究生, 主要研究方向为矿物材料加工及资源综合利用。E-mail: 624705418@qq.com

通信作者: 李维娟 (1966—), 女, 辽宁锦州人, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为高性能金属材料组织与性能调控。E-mail: liweijuan826@163.com

但在重晶石提质除氟工艺中未见相关报道。

本文采用 $\text{HCl}-\text{AlCl}_3$ 浸出重晶石中的氟化物,考察了 HCl 浓度、 AlCl_3 浓度、反应温度、反应时间和液固比对氟浸出率的影响,并在单因素实验基础上,结合 Plackett-Burman 试验设计,确定各因素影响氟浸出率的显著性,旨在为重晶石提质降杂工业化放大试验提供指导。

1 试验

1.1 试验原料

试验所用重晶石矿样取自贵州赛博盟微粉工业有限公司。采用 X 射线荧光光谱仪 (XRF, 荷兰 PANalytical Axios) 分析重晶石矿样化学成分,结果见表 1。从表 1 可看出,重晶石矿样中主要成分为 BaO 和 SO_3 ,所含杂质元素主要有钙、氟、锶和硅,其中氟含量(质量分数)达 5.29%。

表 1 重晶石主要化学成分分析结果(质量分数) %

F	BaO	CaO	SiO_2	P_2O_5	Al_2O_3	Fe_2O_3	SrO	SO_3
5.29	46.43	5.30	1.40	0.05	0.30	0.10	0.65	40.48

采用 X 射线衍射仪(XRD, 日本 Rigaku Ultima IV)测定了重晶石矿样的 XRD 图谱,结果见图 1。由图 1 可知,矿样主要物相为重晶石(BaSO_4)、萤石(CaF_2)、方解石(CaCO_3)、石英(SiO_2)和石膏(CaSO_4)。

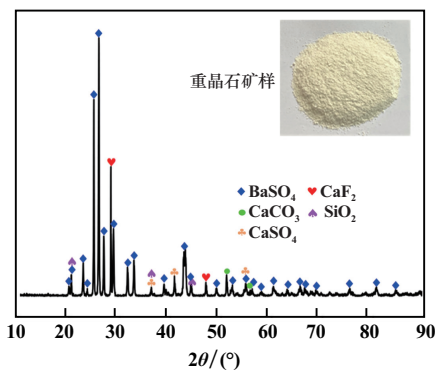


图 1 重晶石矿样 XRD 图谱

采用矿物解离分析仪(MLA, 美国 FEI MLA 650)分析重晶石矿样的背散射电子图像,结果如图 2 所示。由图 2 可观测到重晶石、萤石和生石膏的存在,萤石有富集现象,且 CaF_2 含量较高。矿样的主要矿物组成及含量见表 2。由表 2 可知,重晶石中还伴有铝镁尖晶石、方解石、磁铁矿、天青石、白云石和钙长石,其中重晶石含量(质量分数,下同)87.99%、萤石含量 7.96%。

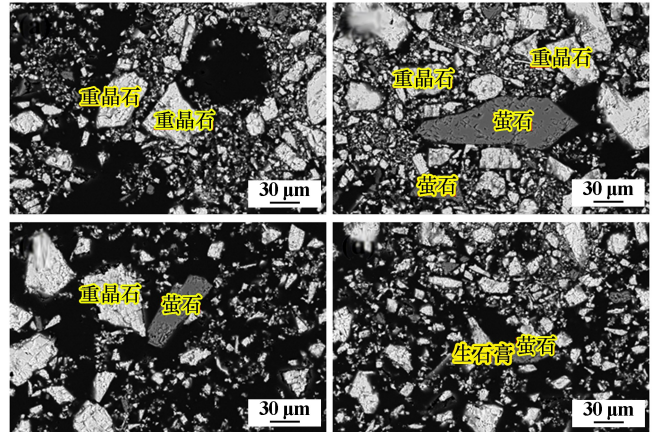


图 2 重晶石矿样的背散射图

表 2 重晶石主要矿物组成及含量(质量分数) %

重晶石	萤石	石英	生石膏	铝镁尖晶石
87.99	7.96	1.46	1.39	0.02
方解石	磁铁矿	天青石	白云石	钙长石
1.06	0.03	0.03	0.01	0.05

重晶石矿样薄片偏光显微分析结果见图 3。由图 3 可见,重晶石主体呈白色,细小的萤石颗粒呈现浸染状构造,疏散、不均匀分布在重晶石矿体中,且有部分隐晶质存在。而有富集现象的萤石在一个方向延伸,以条带状分布夹杂在重晶石矿体中,呈现暗黄色,纯萤石矿物本身应无色,结合 XRF 分析结果可知,其呈现颜色的原因主要是混入了铁、铝等杂质元素。

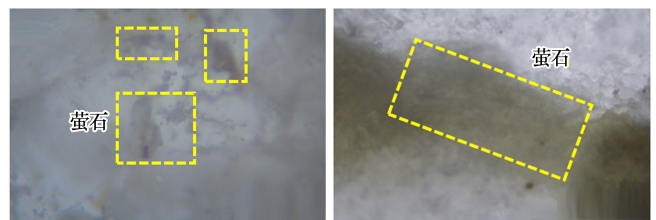
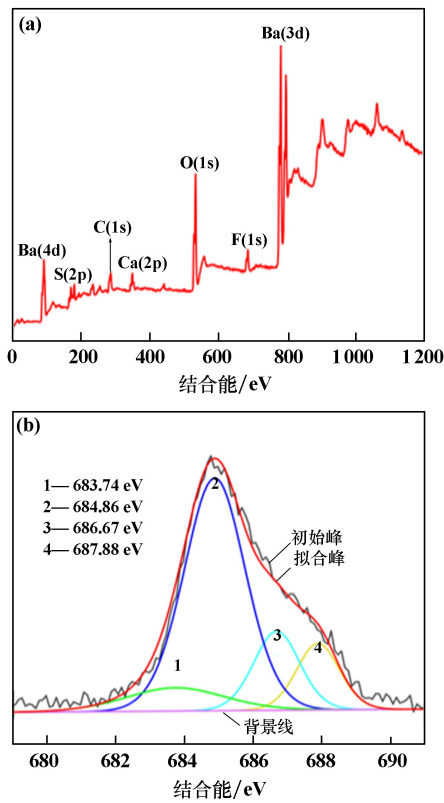


图 3 重晶石矿样薄片偏光显微分析结果

采用 X 射线光电子能谱仪(XPS, 美国 Thermo ESCALAB 250XI)测定重晶石矿中的微量含氟物相,结果如图 4 所示。图 4(a)中存在 6 个强峰,说明 Ba、O、S、Ca 和 F 是重晶石矿样中含量较多的元素,这与 XRF 分析结果一致。图 4(b)中存在 683.74、684.86、686.67 和 687.88 eV 共 4 个特征峰,查询美国国家标准技术研究所 XPS 数据库进行数据匹配与对照,结合 XRF 分析, $\text{F}(1s)$ 分谱图中,结合能 683.74 eV 附近的相关结构为 $\text{Ba}-\text{F}$, 684.86 eV 附近的相关结构为 $\text{Ca}-\text{F}$ 与 $\text{Sr}-\text{F}$, 686.67 eV 附近的相关结构为 $\text{Si}-\text{F}$, 687.88 eV 附近的相关结构为 $\text{Al}-\text{F}$ 。可见重晶石矿中还存在

Ba—F、Sr—F、Si—F 和 Al—F 结合形态的氟化物。



(a) 全谱图; (b) F(1s)分谱图

图 4 重晶石矿样 XPS 图谱

1.2 浸出试验

以 500 mL 三口烧瓶为反应器,采用水浴加热和机械搅拌,配置冷凝管,搅拌速度 300 r/min。在反应器中加入一定量 HCl 和 AlCl₃ 溶液,加热至设定温度。再投入 20 g 研磨至 48~75 μm 的重晶石矿样。反应一段时间后进行液固分离、洗涤,测定浸出液和浸出渣中氟含量,计算氟浸出率:

$$\eta = \frac{pV}{mw} \quad (1)$$

式中: η 为氟浸出率,%; p 为浸出液中 F⁻ 质量浓度, g/mL; V 为浸出液体积, mL; m 为重晶石质量, g; w 为重晶石初始氟含量(质量分数), %。

试验试剂盐酸(HCl)由重庆川东化工(集团)有限公司生产,氯化铝(AlCl₃)由上海麦克林生化科技有限公司生产,均为分析纯。试验用水为从实验室去离子纯水机接取的超纯水,其电阻率为 18.25 MΩ。

1.3 Plackett-Burman 试验设计

基于单因素实验结果,采用 Design-Expert 8.0.6.1 软件,对 HCl 浓度(X_1 , mol/L)、AlCl₃ 浓度(X_2 , mol/L)、反应温度(X_3 , °C)、反应时间(X_4 , min)、液固

比(X_5 , mL/g) 5 个因素进行氟浸出率的显著性考察,建立 Plackett-Burman 因素水平表如表 3 所示,比较各因素与整体差异的显著性。其中每个因素选取单因素实验较好结果的高低两个水平,分别用 -1 和 1 表示。

表 3 Plackett-Burman 试验设计因素和水平

水平	因素				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
-1	2	0.2	65	20	8
1	4	0.6	95	40	12

2 试验结果与讨论

2.1 重晶石伴生氟化物浸出单因素实验

2.1.1 盐酸浓度试验

AlCl₃ 浓度 0.2 mol/L、反应温度 95 °C、反应时间 40 min、液固比 12 mL/g、矿样粒度 48~75 μm、搅拌速率 300 r/min 条件下,考察了 HCl 浓度对重晶石中氟浸出率的影响,结果如图 5 所示。结果表明,较高的 HCl 浓度可加速氟的浸出;HCl 浓度从 1 mol/L 增加到 3 mol/L,氟浸出率显著提高,HCl 浓度从 3 mol/L 增加到 4 mol/L,氟浸出率只有细微提高。适宜的 HCl 浓度为 3 mol/L。

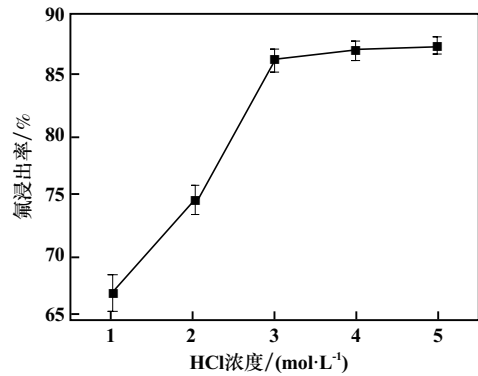


图 5 盐酸浓度对重晶石矿中氟浸出率的影响

2.1.2 氯化铝浓度试验

HCl 浓度 3 mol/L,其他条件不变,考察了 AlCl₃ 浓度对重晶石中氟浸出率的影响,结果如图 6 所示。结果表明,AlCl₃ 浓度从 0.2 mol/L 增加到 0.4 mol/L,氟浸出率明显提高;AlCl₃ 浓度从 0.4 mol/L 增加到 0.6 mol/L,氟浸出率达到平衡;AlCl₃ 浓度继续增加到 1.0 mol/L,氟浸出率反而降低。氟化物的分解是 HCl 和 AlCl₃ 共同作用于矿物颗粒表面的结果,Al³⁺ 浓度过高会阻碍氟化物与 HCl 的碰撞概率,导致氟浸出率降低。适宜的 AlCl₃ 浓度为 0.4 mol/L。

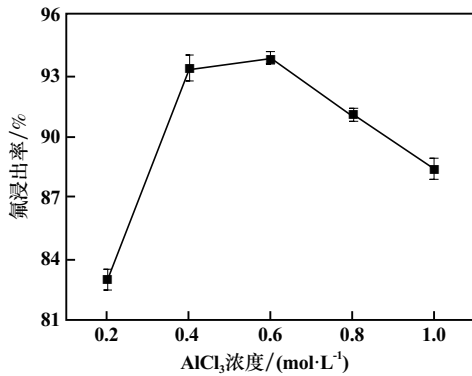
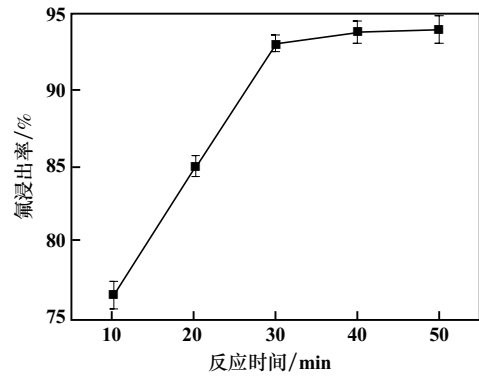
图6 AlCl₃浓度对重晶石矿中氟浸出率的影响

图8 反应时间对重晶石矿中氟浸出率的影响

2.1.3 反应温度试验

AlCl₃ 浓度 0.4 mol/L, 其他条件不变, 考察了反应温度对重晶石中氟浸出率的影响, 结果如图 7 所示。结果表明: 氟浸出率随着反应温度升高而增大; 反应温度 65 °C 以下时, 氟浸出率较低; 反应温度从 80 °C 增加到 95 °C, 氟浸出率细微增加。温度升高能使能量较低的分子变成活化分子, 增加反应物中的活化分子数, 同时分子热运动加快, 使分子间有效碰撞次数增加, 加快反应速率; 温度过高会导致盐酸快速挥发, 不仅浪费原料, 还会造成环境污染。适宜的反应温度为 80 °C。

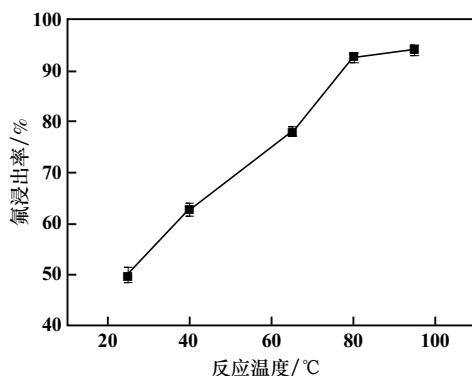


图7 反应温度对重晶石矿中氟浸出率的影响

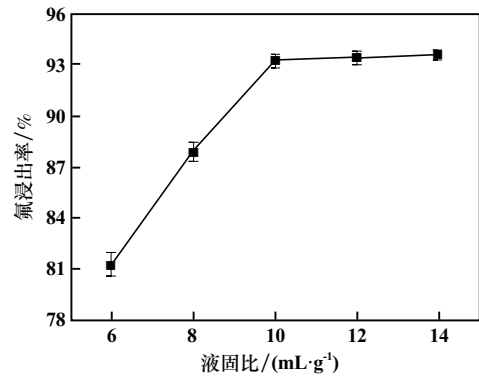


图9 液固比对重晶石矿中氟浸出率的影响

2.2 各因素影响氟浸出率的显著性分析

Plackett-Burman 试验结果见表 4。根据 Plackett-Burman 试验结果, 采用 Design-Expert 8.0.6.1 软件自动计算得到重晶石中氟浸出率的回归方程系数以及影响因素的显著性, 结果如表 5 所示。由表 5 可知, 反应温度、HCl 浓度和反应时间对氟浸出率的影响极显著, 液固比对氟浸出率的影响不显著。根据 *F* 值得到各因素显著性大小排序依次为: 反应温度 > HCl 浓度 > 反应时间 > AlCl₃ 浓度 > 液固比。

表4 Plackett-Burman 试验方案和结果

试验组	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	氟浸出率 / %
1	-1	-1	-1	-1	-1	37.16
2	-1	1	1	-1	1	68.63
3	-1	-1	1	-1	1	60.05
4	1	-1	-1	-1	1	54.83
5	1	1	1	-1	-1	80.99
6	-1	-1	-1	1	-1	57.63
7	-1	1	-1	1	1	61.82
8	-1	1	1	1	-1	73.94
9	1	1	-1	-1	-1	60.12
10	1	-1	1	1	-1	89.60
11	1	1	-1	1	1	76.51
12	1	-1	1	1	1	90.87

2.1.4 反应时间试验

反应温度 80 °C, 其他条件不变, 考察了反应时间对重晶石中氟浸出率的影响, 结果如图 8 所示。结果表明, 氟浸出率随着反应时间延长而增大, 反应 30 min 后, 氟浸出率没有明显变化。适宜的反应时间为 30 min。

2.1.5 液固比试验

反应时间 30 min, 其他条件不变, 考察了液固比对重晶石中氟浸出率的影响, 结果如图 9 所示。结果表明, 随着液固比增加, 氟浸出率提高, 液固比超过 10 mL/g 后, 氟浸出率没有明显变化。液固比较低时, 浆料黏度和浸出液离子浓度较大, 液固传质速率较低, 浸出率较小。适宜的液固比为 10 mL/g。

表 5 Plackett-Burman 设计回归模型方差分析

项目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	2 606.34	5	521.27	57.45	< 0.000 1 * *
X ₁	731.48	1	731.48	80.62	< 0.000 1 * *
X ₂	84.64	1	84.64	9.33	< 0.022 4 *
X ₃	1 121.53	1	1 121.53	123.61	< 0.000 1 * *
X ₄	654.02	1	654.02	72.08	< 0.000 1 * *
X ₅	14.67	1	14.67	1.62	< 0.250 5
残差	54.44	6	9.07	—	—
总离差	2 660.78	11	—	—	—

注: P < 0.05 为差异显著,以 * 表示; P < 0.01 为差异极显著,以 * * 表示。

2.3 酸浸后的矿物特征

在 HCl 浓度 3 mol/L、AlCl₃ 浓度 0.4 mol/L、反应温度 80 °C、反应时间 30 min、液固比 10 mL/g、矿样粒度 48~75 μm、搅拌速率 300 r/min 的优化条件下酸浸重晶石,氟浸出率可达 93.20%。对优化条件下酸浸后的重晶石矿样进行了 XRD 分析,结果如图 10 所示。由图 10 可看出,浸出后矿样主要物相为 BaSO₄,未见 CaF₂ 和 CaCO₃ 晶相峰,但 XRD 光谱并不平滑,小峰很多,峰强较弱,说明重晶石中还含有多种微量物相。对比浸出前后的重晶石矿样图可知,浸出后矿样白度显著提高。

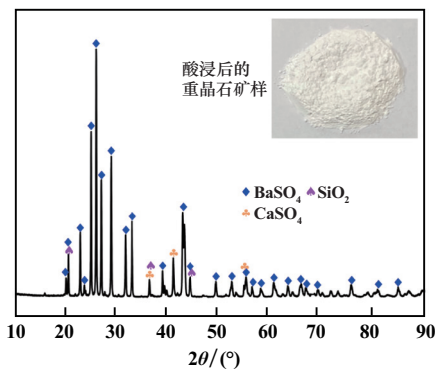


图 10 酸浸后重晶石矿样 XRD 图谱

进一步对浸出后的重晶石矿样进行 MLA 分析,结果如图 11 所示。由图 11 可知,酸浸后矿样中主要矿物组成为重晶石、石英和生石膏,未检测到萤石矿物。酸浸后重晶石矿样主要矿物含量如表 6 所示。酸浸后重晶石中 BaSO₄ 含量(质量分数)为 95.91%,较酸浸前有了显著提高,获得了能市场销售的合格产品;酸浸后生成了少量氟化铝和天青石。

3 结论

1) 重晶石矿样中氟元素主要以萤石形式存在,呈浸染状和条带状分布,同时还存在少量以 Ba—F、Fe—F、Sr—F、Si—F 和 Al—F 结构形态赋存的氟。重晶石矿

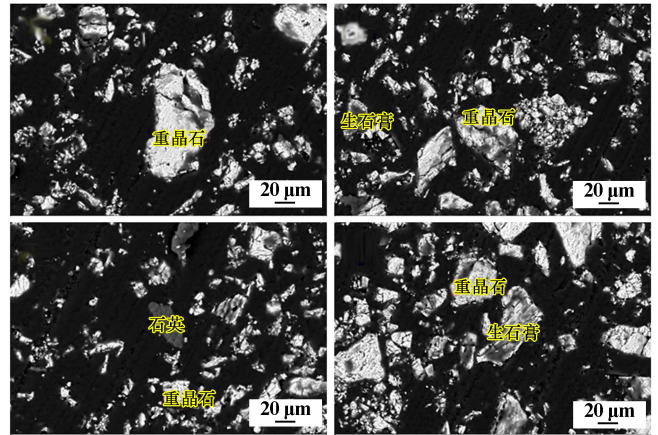


图 11 酸浸后重晶石的背散射图

表 6 酸浸后重晶石主要矿物含量(质量分数) %

重晶石	氟化铝	石英	生石膏	天青石	其他
95.91	0.25	1.73	1.95	0.03	0.13

样还伴有萤石、石英、生石膏、铝镁尖晶石、方解石、磁铁矿、天青石、白云石和钙长石,其中重晶石质量分数为 87.99%,萤石质量分数为 7.96%。

2) HCl-AlCl₃ 溶液可有效浸出重晶石中伴生氟化物,提高重晶石产品质量。在 HCl 浓度 3 mol/L、AlCl₃ 浓度 0.4 mol/L、反应温度 80 °C、反应时间 30 min、液固比 10 mL/g、矿样粒度 48~75 μm、搅拌速度 300 r/min 条件下,氟浸出率可达 93.20%,浸出后重晶石质量分数 95.91%。各因素影响氟浸出率的显著性顺序为:反应温度>HCl 浓度>反应时间>AlCl₃ 浓度>液固比。

参考文献:

- [1] MOHAMED A, BASFAR S, ELKATATNY S, et al. Prevention of barite sag in oil-based drilling fluids using a mixture of barite and ilmenite as weighting material[J]. Sustainability, 2019,11(20):5617-5630.
- [2] SMAHA R W, HE W, SHECKELTON J P, et al. Synthesis-dependent properties of barlowite and Zn-substituted barlowite[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2018,268:123-129.
- [3] BOUALI E, AYADI A, KADRI E-H, et al. Rheological and mechanical properties of heavy density concrete including barite powder[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020,45(5):3999-4011.
- [4] HUANG R, ZHANG X, ZHOU C. Mechanical, flammable, and thermal performances of co-extruded wood polymer composites with core-shell structure containing barite-filled shells[J]. Wood Science and Technology, 2020,54(4):1299-1318.
- [5] 李琅琅,李梅,高凯,等. 白云鄂博萤石与稀土浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(3):43-46.

(下转第 107 页)

表2 银杏叶生物炭基肥修复土壤前后重金属形态占比

重金属种类	土壤状态	重金属形态占比/%			
		残渣态	可氧化态	可还原态	弱酸可提取态
Pb	原始土壤	30.71	14.36	11.12	43.81
	修复后土壤	66.16	11.61	10.02	12.21
Cd	原始土壤	2.36	0.76	36.35	60.53
	修复后土壤	12.80	0.74	33.71	52.75
Cu	原始土壤	22.33	11.13	1.23	65.31
	修复后土壤	24.19	14.12	1.22	60.47

3 结论

1) 以干燥、粉碎后的银杏叶制得银杏叶生物炭基肥。在修复时间4 d、银杏叶生物炭基肥添加量4%、反应温度30℃条件下,采用银杏叶生物炭基肥修复污染土壤,土壤中Pb、Cd、Cu稳定效率分别达到89.5%、97.5%、74.9%。

2) 使用银杏叶生物炭基肥修复污染土壤后,Pb、Cd、Cu由不稳定的弱酸可提取态和可还原态向相对稳定的残渣态变化,Pb、Cd、Cu弱酸可提取态占比分别由43.81%、60.53%、65.31%降至12.21%、52.75%、60.47%,Pb、Cd可还原态占比分别由11.12%、36.35%降至10.02%、33.71%,Pb、Cd可氧化态占比分别由14.36%、0.76%降至11.61%、0.74%,Cu可氧化态占比由11.13%升至14.12%,Pb、Cd、Cu残渣态占比分别由30.71%、2.36%、22.33%升至66.16%、12.80%、24.19%,修复效果显著。

3) 银杏叶生物炭基肥稳定性强、修复效果好、成本低,在修复重金属污染土壤方向有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 石永春. 农田重金属污染土壤修复技术研究进展[J]. 山东化工, 2023, 52(18): 244-246.
- [2] 刘军生. 抗镉内生菌促进三叶草修复土壤镉污染的研究[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2019.
- [3] 姚曜晖. 国内重金属土壤修复技术应用现状[J]. 科技创新导报, 2017, 14(19): 105-106.
- [4] 邹春景, 傅晓文, 马荣辉, 等. 石油污染土壤的生物-化学联合修复技术研究进展[J]. 现代化工, 2023, 43(10): 36-40.
- [5] 张军, 蔺亚青, 胡方洁, 等. 土壤重金属污染联合修复技术研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(5): 1038-1042.
- [6] 王信粉, 时利香, 李薇. 石油烃污染土壤联合修复技术研究进展[J]. 环境生态学, 2022, 4(1): 84-90.
- [7] 任家强, 宋昕, 何跃. 柴油污染土壤低温热处理及其对土壤理化性质的影响[J]. 土壤, 2020, 52(5): 956-961.
- [8] 张秀娟, 安丽芸, 刘勇, 等. 基于梯度稀释法分析细菌多样性对土壤碳代谢的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 768-777.
- [9] 王爽. 基于¹⁵N稀释法的森林草原交错带两种植被类型土壤氮转化特征研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [10] 张雄邦, 潘磊, 张天宇. 重金属镉污染土壤修复技术研究进展[J]. 现代矿业, 2022, 38(5): 209-213.
- [11] 傅开彬, 秦天邦, 徐信, 等. 纳米气泡气浮应急修复铜离子污染土壤的工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 54-58.
- [12] 王浩. 螯合剂强化铀污染土壤的植物修复技术[J]. 环境与发展, 2023, 35(3): 68-76.
- [13] 彭鑫, 朱逸纯, 杨远, 等. 解磷菌联合绿色活化剂对黑麦草累积土壤中镉的影响[J]. 矿冶工程, 2024, 44(1): 95-99.
- [14] 张光文, 胡桂星, 郝迪. 硫化改性生物炭对Mn污染土壤稳定化修复效果的研究[J]. 中国锰业, 2021, 39(3): 38-42.
- [15] 王秋利, 韩勇. 污泥基生物炭在矿区土壤重金属污染治理中的应用[J]. 能源与环境, 2023, 45(5): 43-48.

引用本文: 王霞霞, 刘静霖, Zanariah Jasmani. 银杏叶生物炭基肥修复重金属污染土壤方法研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6): 104-107.

(上接第103页)

- [6] LIU C, WANG Q, YANG S. Effects of barite size on the fluorite flotation using the reagent scheme of GS/NaOH[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 626: 127101.
- [7] DENIZ V. Prediction of barite recovery and grade by multiple linear regression (MLR) analysis in concentrating of barite tailings by using multi-gravity separator (MGS)[J]. Particulate Science and Technology, 2020, 39(6): 748-756.
- [8] 刘超, 陈志强, 罗传胜, 等. 磁-浮联合工艺回收重晶石选矿试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(10): 40-42.
- [9] 刘诚, 韩立伟, 王田雨, 等. 抑制剂马来酸-丙烯酸共聚物在浮选分离重晶石与萤石中的作用及机理[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 62-65.
- [10] SHI Z N, LI W, HU X W, et al. Recovery of carbon and cryolite

from spent pot lining of aluminium reduction cells by chemical leaching[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(1): 222-227.

- [11] HUANG Y, DOU Z, ZHANG T, et al. Leaching kinetics of rare earth elements and fluoride from mixed rare earth concentrate after roasting with calcium hydroxide and sodium hydroxide[J]. Hydrometallurgy, 2017, 173: 15-21.
- [12] 徐超, 陈艳波, 蔡明明, 等. 某浮选金精矿浸出工艺优化试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(1): 108-111.

引用本文: 范智禹, 聂登攀, 李维娟, 等. 重晶石伴生氟化物的赋存状态及浸出试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6): 99-103.