

# 赤泥活化煤矸石提取 $Al_2O_3$ 试验研究

季登会<sup>1</sup>, 罗文波<sup>2</sup>, 龙潇<sup>2</sup>, 向春<sup>1</sup>, 王晓福<sup>1</sup>

1. 云南锡业研究院有限公司, 云南 个旧 661000;
2. 贵州理工学院 材料与能源工程学院, 贵州 贵阳 550003

中图分类号: TD849.5; TF821 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)02-0142-06  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.02.022

**摘要** 赤泥和煤矸石都含有大量有价金属铝, 可以作为铝土矿替代资源之一。通过在赤泥和煤矸石中配入碳酸钠、碳酸钙, 混匀后高温焙烧, 利用赤泥中残余的碱及配入的碳酸钠、碳酸钙活化赤泥及煤矸石, 使矿物中难溶的氧化铝转变为易溶出的铝酸钠, 二氧化硅转变为难溶出的硅酸钙, 焙烧后物料碱浸出提铝。优化的焙烧工艺参数为: 焙烧温度 1250 °C、焙烧时间 45 min、 $Na_2O/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  摩尔比 1.1 : 1、 $CaO/SiO_2$  摩尔比 2 : 1, 在此条件下, 赤泥、煤矸石中氧化铝转化率高, 焙烧矿样铝的浸出率为 78.45%。该工艺技术利用赤泥中的残碱活化作用, 可以极大减少碳酸钠等试剂的加入, 降低生产成本, 减少环境污染。  
**关键词** 赤泥; 煤矸石; 活化; 焙烧; 浸出; 氧化铝

煤矸石是煤炭挖掘、加工过程中排放出来的废弃物, 是炭质、泥质和砂质页岩的混合物, 一般煤矸石产量约占煤炭开采量的 10%~15%<sup>[1]</sup>, 我国 2020 年原煤产量 39 亿 t, 煤矸石产生量 7.29 亿 t<sup>[2]</sup>。煤矸石因其含炭量极低, 一般不用于发热, 由于难以利用导致大量堆存, 堆放过程因雨淋、风化、日晒、自燃等造成严重的环境危害<sup>[3-5]</sup>。同时煤矸石中含有大量二氧化硅、氧化铝、硫铁矿、炭等有用物质, 堆存也造成可利用资源的浪费。目前煤矸石可以用于发电、建材、道路建设等领域, 还可以用于提取白炭黑及氧化铝等高价产品<sup>[6-8]</sup>。

赤泥是铝土矿提炼氧化铝过程排放出来的固体废渣, 因含有氧化铁成分使外观颜色类似赤色泥土而得名, 据统计每生产 1 t 的氧化铝有 0.8~1.5 t 赤泥被排放<sup>[9]</sup>。由于氧化铝的产量需求增加, 我国 2021 年赤泥的年产量已达到 5 000 余万 t, 累计堆存总量超过 2 亿 t<sup>[10]</sup>。赤泥是一种强碱性工业残渣, 长期堆存会对生态环境造成巨大破坏, 引起土壤碱化、污染地下水、对人体造成放射性伤害等<sup>[11-14]</sup>。同时赤泥中含有大量的二氧化硅、氧化铝、氧化铁、稀有金属等有价成分, 可以从回收氧化铝、稀有金属、铁等<sup>[15-18]</sup>。

我国是氧化铝生产和消费大国, 铝资源严重匮乏, 需要寻找新的铝矿资源来源, 而赤泥和煤矸石中的氧

化铝含量都较高, 有较好的回收利用价值, 可作为铝矿资源的替代品之一<sup>[19]</sup>。其中赤泥提取氧化铝的方法主要有石灰烧结法、钙化-碳化法、亚熔盐法、微生物法等<sup>[20-24]</sup>, 煤矸石提取氧化铝的方法主要有酸法和烧结法等<sup>[25-26]</sup>。赤泥和煤矸石中提取氧化铝的方法都存在着试剂消耗大、成本高的缺点。本文针对赤泥和煤矸石的特点, 提出一种赤泥活化煤矸石提取氧化铝的研究方法, 在赤泥和煤矸石混合渣中配入一定量的碳酸钠、碳酸钙, 进行活化焙烧, 回收其中的有价金属铝, 试验利用赤泥中的残碱活化, 可以极大减少碳酸钠等试剂的加入, 降低生产成本, 减少环境污染。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原料及试剂

试验原料为赤泥 (pH>14)、煤矸石, 采用化学分析方法测定其主要化学成分及其含量, 结果如表 1 表 2 所示。

表 1 赤泥成分分析结果 /%  
Table 1 Composition analysis results of red mud

成分	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O
含量	17.50	21.50	21.61	4.23	14.10	1.74	1.39

收稿日期: 2023-01-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51904083)

作者简介: 季登会 (1984—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为湿法冶金; E-mail: 280845147@qq.com。

罗文波 (1983—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为湿法冶金; E-mail: luowenbo@126.com。

由表 1 可知, 赤泥中氧化铝含量为 21.61%, 其余成分含量较高的是 21.50% 的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、17.50% 的 SiO<sub>2</sub> 和 14.10% 的 CaO。也有少量的 Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、MgO 等碱性成分。由表 2 知, 煤矸石中 SiO<sub>2</sub> 的含量高达 35.81%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 25.17%, C 含量为 8.29%, 还含有少量的 Fe、Mg、Ca、S 等成分。

表 2 煤矸石成分分析结果 /%

成分	SiO <sub>2</sub>	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	CaO	MgO	S
含量	35.81	5.97	25.17	8.29	2.48	1.56	3.28

分别对煤矸石和赤泥进行物相分析, 煤矸石的 XRD 结果如图 1 所示, 由图 1 可看出, 煤矸石主要矿物为高岭石、石英、氧化铁, 高岭石含量较高, 说明煤矸石中存在大量稳定铝硅酸盐组成的矿物。赤泥的 XRD 结果如图 2 所示, 由图中可看出, 赤泥的主要物相有高岭石、硅酸二钙、水钙铝榴石、氧化铁等物相, 铝主要存在于高岭石等稳定铝硅酸盐中。

试剂: 氢氧化钠(成都市科隆化学品有限公司)、

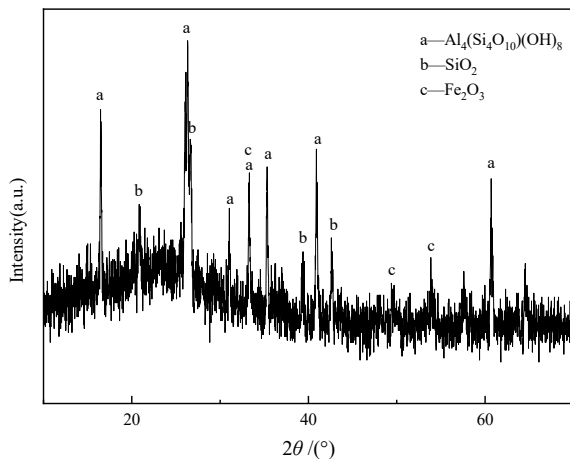


图 1 煤矸石 XRD 图  
Fig. 1 XRD diagram of coal gangue

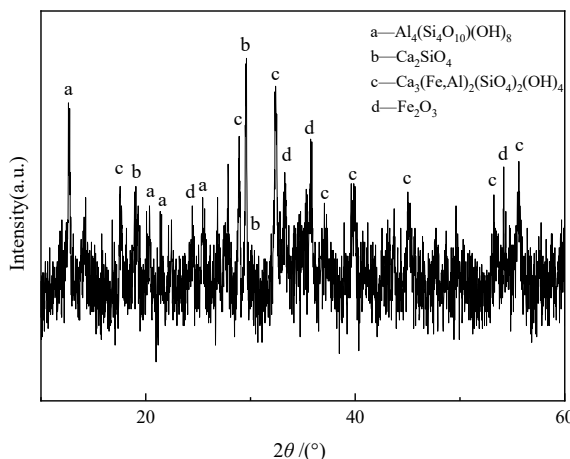


图 2 赤泥 XRD 图  
Fig. 2 XRD diagram of red mud

碳酸钠(重庆茂业化学试剂有限公司)、碳酸钙(天津市北辰方正试剂厂)均为分析纯。

## 1.2 试验设备

试验主要的设备表 3 所示。

表 3 试验设备  
Table 3 Experimental equipments

设备名称	型号	厂商
行星球磨机	QM-35P4	长沙天创粉末技术有限公司
台式真空泵 过滤装置	SHZ-D(III)	郑州予华仪器制造有限公司
精密增力电动 搅拌机	JJ-1	国华仪器制造有限公司
精密电子天平	FA1004	上海舜宇恒平科学仪器 有限公司
高温节能管式炉	BLMT-1600	洛阳市博莱曼特试验电炉 有限公司
数恒温水浴锅	HH-4	国华仪器制造有限公司
电热鼓风干燥箱	DHG-9070B	上海琅环实验设备有限公司

## 1.3 试验方法及原理

### 1.3.1 试验方法

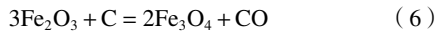
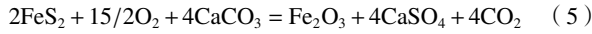
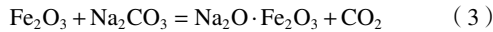
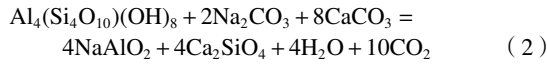
将赤泥、煤矸石、碳酸钠、碳酸钙等物料破碎制粉后按一定比例混合均匀, 加水搅拌后压制成球, 球团烘干后放入高温管式炉中在一定温度和时间条件下进行焙烧, 焙烧样冷却后磨细送样分析物相, 磨细焙烧样加入低浓度的氢氧化钠溶液浸出铝。铝浸出率计算如式(1):

$$\eta(\text{Al}) = \left[ 1 - \frac{m_2 \times \omega(\text{Al})_2}{m_1 \times \omega(\text{Al})_1} \right] \times 100\% \quad (1)$$

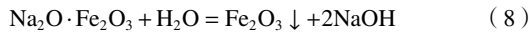
式中:  $\eta(\text{Al})$ —Al 的浸出率, 单位 %;  $m_1$ —焙烧矿质量, 单位 g;  $m_2$ —浸出渣质量, 单位 g;  $\omega(\text{Al})_1$ —焙烧矿中 Al 的质量分数, 单位 %;  $\omega(\text{Al})_2$ —浸出渣中 Al 的质量分数, 单位 %;

### 1.3.2 试验原理

硅含量较高的赤泥和煤矸石, 采用碱石灰烧法<sup>[27]</sup>, 通过焙烧, 使矿物中难溶的氧化物(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)相应地转变为铝酸钠(Na<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、铁酸钠(Na<sub>2</sub>O·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、硅酸二钙(2CaO·SiO<sub>2</sub>)等。其中赤泥中的残余碱及添加的碳酸钠会与赤泥及煤矸石中的氧化铝反应生成易于溶出的铝酸钠, 因此赤泥中的残余碱起到活化赤泥及煤矸石中氧化铝的作用, 焙烧时碳酸钙热解得到的氧化钙会与二氧化硅反应生成硅酸二钙, 氧化钙还会与煤矸石中硫铁矿焙烧产生的二氧化硫发生反应, 起到酸碱中和及固定二氧化硫污染气体的作用<sup>[28]</sup>。因此, 本试验具有极大减少碳酸钠等试剂的加入、降低生产成本、减少环境污染的优点。活化焙烧发生的主要化学反应如下:



低浓度的氢氧化钠溶液浸出活化焙烧矿样发生的主要化学反应如下:



### 1.4 工艺流程

每次试验煤矸石与赤泥分别取 100 g, 同时按照

试验要求的  $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  摩尔比、 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  摩尔比计算出需要加入的碳酸钠及碳酸钙质量, 所有原料加入球磨机中破碎混匀后, 加水搅拌、压制成球, 球团烘干后放入高温管式炉中在一定温度和时间条件下进行焙烧, 焙烧矿取出磨细后加入低浓度的氢氧化钠溶液浸出铝, 浸出矿浆过滤得到的浸出渣可以作为水泥原料, 浸出液即为碱性铝酸钠溶液。浸出液通入  $\text{CO}_2$  气体进行碳分, 使溶液中铝酸钠反应转变为氢氧化铝沉淀和碳酸钠, 控制溶液的 pH 值保持不变即可停止通入  $\text{CO}_2$  气体, 此时溶液中残余的氢氧化钠与  $\text{CO}_2$  反应也完全转变为碳酸钠。碳分后的溶液主要成分为碳酸钠, 经过蒸发结晶后得到碳酸钠固体, 可以循环利用。原则工艺流程见图 3。

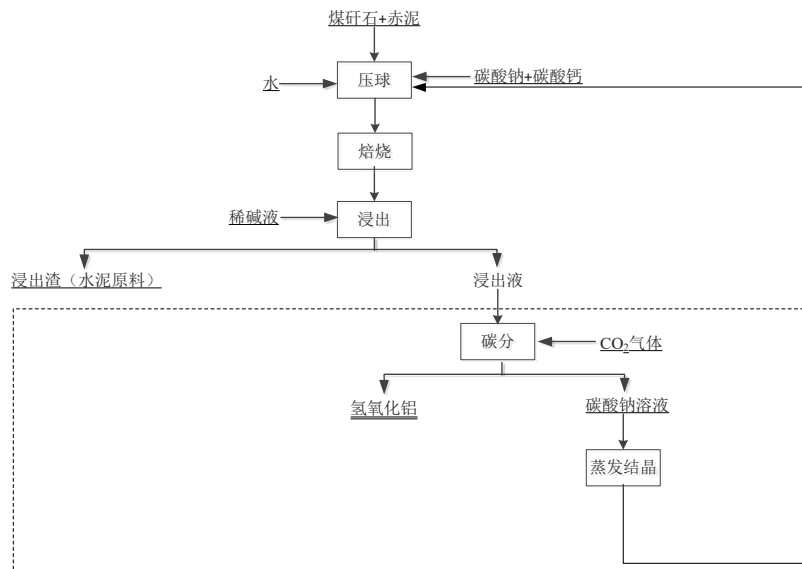


图 3 工艺流程(虚线部分本文未涉及)  
Fig. 3 Process diagram (The dashed part is not involved in this experiment)

## 2 结果与讨论

本文的赤泥活化煤矸石提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  试验, 主要考察焙烧温度、焙烧时间、 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  摩尔比、 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  摩尔比等参数对铝浸出率的影响。得到的焙烧矿磨细后采用稀碱液浸出其中铝, 控制稀碱浸出条件为:  $\text{NaOH}$  浓度  $0.5 \text{ mol/L}$ , 浸出温度  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , 浸出时间  $15 \text{ min}$ , 液固比  $10 : 1$ 。

### 2.1 焙烧温度对铝浸出率的影响

试验固定煤矸石与赤泥质量比为  $1 : 1$ 、焙烧时间  $30 \text{ min}$ 、物料  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  摩尔比为  $2 : 1$ 、物料  $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  摩尔比为  $1 : 1$ , 考察焙烧温度在  $1150 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$  区间对铝浸出率的影响, 试验结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 随着焙烧温度的增加, 铝的浸出率是先增加后趋于稳定, 这是因为焙烧温度较低时, 煤矸石和赤泥中稳定的高岭石矿物热分解为活性氧化

铝和二氧化硅不完全, 即反应式(2)中高岭石中铝转变为铝酸钠的反应进行不完全, 相应地铝浸出率也就偏低, 当焙烧温度增加到  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 高岭石中铝转变

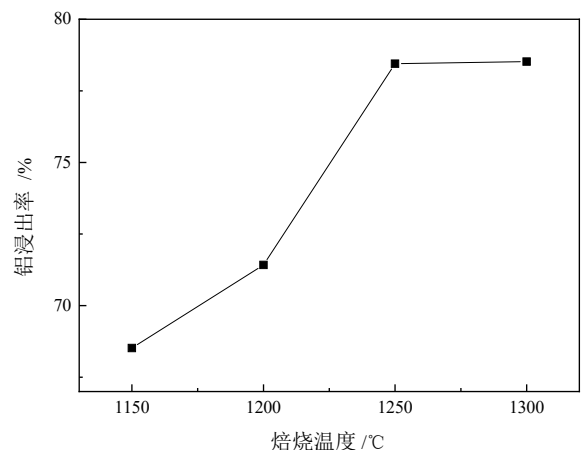


图 4 焙烧温度对铝浸出率的影响  
Fig. 4 Effect of calcination temperature on aluminum leaching rate

为铝酸钠的反应基本完成,继续增加焙烧温度,铝的浸出率基本维持不变。综合考虑,焙烧温度取 $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 为宜。

## 2.2 焙烧时间对铝浸出率的影响

试验条件:每次试验加入的煤矸石与赤泥质量比为 $1:1$ ,焙烧温度 $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 、物料 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ 摩尔比为 $2:1$ 、物料 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 摩尔比为 $1:1$ ,考察焙烧时间在 $15\sim 60\text{ min}$ 区间内对铝浸出率的影响,试验结果如图5所示。

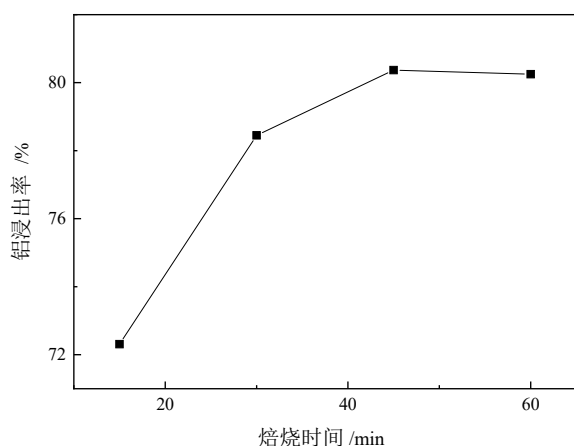


图5 焙烧时间对铝浸出率的影响

Fig. 5 Effect of calcination time on aluminum leaching rate

由图5可知,随着焙烧时间的增加,铝的浸出率是先增加后趋于平衡,这是因为焙烧时间太短,煤矸石及赤泥中的铝硅酸盐未完全活化转化为铝酸钠,因此铝的浸出率低,而随着焙烧时间增加,活化反应进行得越完全,铝的浸出率相应增加。当焙烧时间为 $45\text{ min}$ 时,再继续增加焙烧时间,铝的浸出率变化不大,焙烧时间过长不仅会增加能耗,还可能造成部分物料的烧结。综合考虑,焙烧时间取 $45\text{ min}$ 为宜。

## 2.3 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 摩尔比对铝浸出率的影响

试验条件:每次试验加入的煤矸石与赤泥质量比为 $1:1$ ,焙烧温度 $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 、焙烧时间 $45\text{ min}$ 、物料 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ 摩尔比为 $2:1$ ,考察物料 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 摩尔比在 $0.8\sim 1.2$ 区间内对铝浸出率的影响,试验结果如图6所示。

由图6可知,随着物料 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 摩尔比的增加,铝的浸出率先迅速增加后增加趋缓,这是因为钠盐是煤矸石及赤泥的焙烧活化辅助剂,通过加入含钠物质与煤矸石及赤泥一起焙烧,破坏硅、铝、铁元素在煤矸石及赤泥中的存在状态,最终使物料中的铝转变为铝酸钠,铁转变为铁酸钠。当物料中 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 摩尔比为 $1:1$ 时,理论上物料中的铝、铁已全部转变为铝酸钠和铁酸钠,但是钠盐在

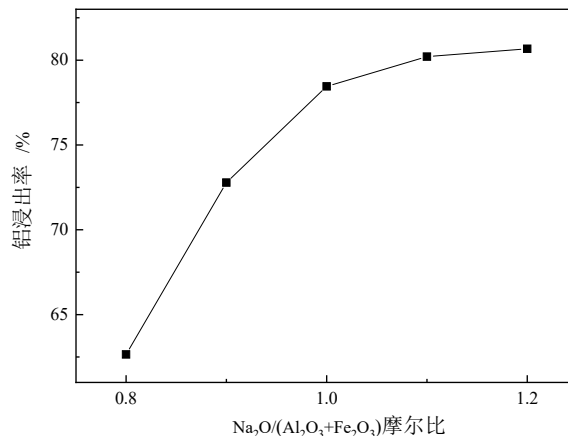


图6  $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 摩尔比对铝浸出率的影响

Fig. 6 Effect of  $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  mole ratio on aluminum leaching rate

高温焙烧时可能存在烧损情况,其加入量应稍大于理论量才能使铝的浸出率达到要求。综合考虑,物料 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 摩尔比取 $1.1:1$ 为宜。

## 2.4 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ 摩尔比对铝浸出率的影响

试验条件:每次试验加入的煤矸石与赤泥质量比为 $1:1$ ,焙烧温度 $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 、焙烧时间 $45\text{ min}$ 、物料 $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 摩尔比为 $1.1:1$ ,考察物料 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ 摩尔比在 $1.8\sim 2.2$ 区间内对铝浸出率的影响,试验结果如图7所示。

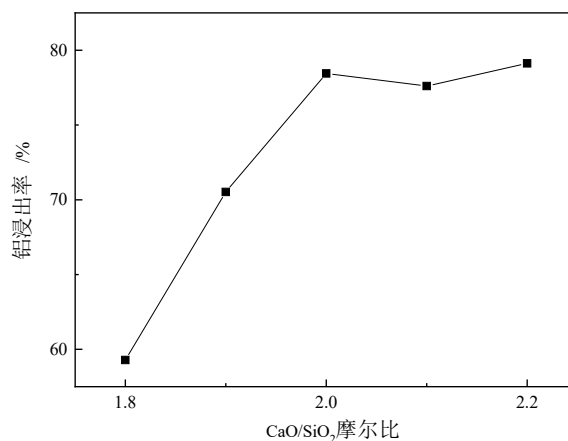


图7  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  摩尔比对铝浸出率的影响

Fig. 7 Effect of  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  mole ratio on aluminum leaching rate

由图7可知,随着物料 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ 摩尔比的增加,铝的浸出率先增加后趋于平缓,这是因为钙盐也是煤矸石及赤泥的焙烧活化辅助剂,通过加入含钙物质与煤矸石及赤泥一起焙烧,破坏硅铝元素在煤矸石及赤泥中的存在状态,最终使物料中的硅全部转变为硅酸二钙。当物料 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ 摩尔比为 $2:1$ 时,理论上物料中的硅已全部转变为硅酸二钙,再继续增加 $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ 摩尔比已无必要,多余的钙反而可能会与铝发生反应生成不溶产物,对铝的浸出不利。综合考虑,物料

CaO/SiO<sub>2</sub> 摩尔比取 2 : 1 为宜。

焙烧后物料的 XRD 结果如图 8 所示, 由图可知, 焙烧后的物料中主要物相为硅酸二钙、铝酸钠、铁酸钠、四氧化三铁等。说明赤泥和煤矸石中的难溶铝硅酸盐及氧化铁大部分发生转化, 其中硅转化为了不溶的硅酸二钙, 铝转化为了可溶的铝酸钠, 铁转化为部分铁酸钠及低价铁氧化物, 只要用稀碱液在适宜的溶出条件下, 就可实现硅铝分离。

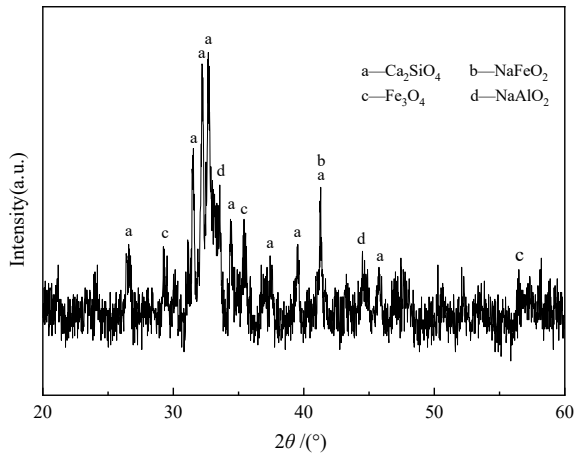


图 8 焙烧物料的 XRD 图

Fig. 8 XRD diagram of the calcined product

### 3 结论

(1) 通过化学成分分析及 XRD 物相分析可知, 赤泥及煤矸石中含有大量难溶铝硅酸盐物相, 可以作为提取铝的原料来源。为了提取其中有价金属铝, 本试验在赤泥及煤矸石中加入碳酸钠和碳酸钙进行焙烧, 通过赤泥中残余碱及碳酸钠和碳酸钙的活化作用, 使赤泥及煤矸石中难溶的铝硅酸盐物相转化为易溶出的铝酸钠和难溶的硅酸二钙等物相, 试验利用了赤泥的残余碱, 同时该工艺中碳酸钠可循环利用, 极大减少碳酸钠的用量, 降低了成本。

(2) 最佳赤泥活化煤矸石提取 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的试验条件为: 煤矸石与赤泥质量比为 1 : 1, 焙烧温度 1250 °C、焙烧时间 45 min、物料 Na<sub>2</sub>O/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 摩尔比为 1.1 : 1、物料 CaO/SiO<sub>2</sub> 摩尔比 2 : 1, 此焙烧矿样进行稀碱浸出, 铝的浸出率为 78.45%。

### 参考文献:

[1] 任根宽. 煤矸石提取氧化铝活化过程的研究[J]. 非金属矿, 2012, 35(2): 50-52.  
REN G K. Study on activation process of extraction of alumina from coal gangue[J]. Non-Metallic Mines, 2012, 35(2): 50-52.

[2] DU S L, MAO S B, GUO F Q, et al. Investigation of the catalytic performance of coal gangue char on biomass pyrolysis in a thermogravimetric analyzer and a fixed bed reactor[J]. Fuel, 2022, 328: 1-10.

[3] 边炳鑫, 李哲, 解强. 煤系固体废物资源化技术[M]. 北京: 化学工

业出版社, 2019.

BIAN B X, LI Z, XIE Q. Coal measures solid waste resource technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

- [4] LI D, WU D, XU F, et al. Literature overview of Chinese research in the field of better coal utilization[J]. J Cleaner Prod, 2018, 185: 959-80.
- [5] LI M S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A Review of Research and Practice[J]. Sci Total Environ, 2006, 357(1/2/3): 38-53.
- [6] QIN Q Z, DENG J S, GENG H H, et al. An exploratory study on strategic metal recovery of coal gangue and sustainable utilization potential of recovery residue[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 340: 130765-130777.
- [7] GUO Z H, XU J J, XU Z H, et al. Performance of cement-based materials containing calcined coal gangue with different calcination regimes[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 56: 104293-104308.
- [8] GUAN X, CHEN J X, ZHU M Y, et al. Performance of microwave-activated coal gangue powder as auxiliary cementitious material[J]. Journal of Materials Research and technology, 2021, 14: 2799-2811.
- [9] SHAKE M A, BASSAM A T, HEMM U A, et al. A review of the sustainable utilisation of red mud and fly ash for the production of geopolymer composites[J]. Construction and Building Materials, 2022, 350: 128892-128915.
- [10] 龙昌鑫, 方琴, 杨小洁, 等. 赤泥基本性能及赤泥混凝土力学性能研究[J]. 中国水运, 2021, 21(10): 126-127+130.  
LONG C X, FANG Q, YANG X J, et al. Study on basic properties of red mud and mechanical properties of red mud concrete[J]. China Water Transport, 2021, 21(10): 126-127+130.
- [11] JUNG K H, KANG S P, CHOE G C. Effect of red mud content on strength and efflorescence in pavement using alkali-activated slag cement[J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2018, 12(1): 18-31.
- [12] 陈一铭. 赤泥作为建筑材料的利用现状分析[J]. 河南建材, 2022(11): 16-18.  
CHENG Y M. Analysis of the current situation of the use of red mud as a building material[J]. Henan Building Materials, 2022(11): 16-18.
- [13] 薛生国, 李玉冰, 郭颖. 氧化铝工业赤泥环境影响研究进展[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(4): 401-412.  
XUE S G, LI Y B, GUO Y. Environmental impact of bauxite residue: a comprehensive review[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(4): 401-412.
- [14] CHAVA V, RUBEN N, MADDURU S R C, et al. Comparison of mechanical and durability properties of treated and untreated red mud concrete[J]. Materials Today: proceedings, 2020, 27: 284-287.
- [15] 苏泽林, 王东波, 黄纤晴, 等. 高碱性拜耳法赤泥碳酸化脱碱及其机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(5): 1547-1552.  
SU Z L, WANG D B, HANG X Q, et al. Research on dealcalization and mechanism of high-alkaline bayer process red mud by carbonation[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(5): 1547-1552.
- [16] 丛云伶. 赤泥微波碳热还原-磁选回收铁工艺研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2018.  
CONG Y L. Study on iron recovery process of red mud on microwave carbon thermal reduction and magnetic separation methods[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2018.
- [17] AGRAWAL S, DHAWAN N. Evaluation of red mud as a polymetallic source—a review[J]. Minerals Engineering, 2021, 171: 1-14.
- [18] DM A, CM A, SB A, et al. Characterization of cast iron and slag produced by red muds reduction via arc transferred plasma (ATP)

- reactor under different smelting conditions – science direct[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(5): 1–11.
- [ 19 ] 郭志强, 燕可洲, 张吉元, 等. 煤矸石/粉煤灰对赤泥钠化还原焙烧反应的影响机制[J]. 化工学报, 2022, 73(5): 2194–2205.  
GUO Z Q, YAN K Z, ZHANG J Y, et al. Influence mechanism of coal gangue/coal fly ash on the sodium reduction roasting reaction of red mud[J]. CIESC Journal, 2022, 73(5): 2194–2205.
- [ 20 ] 郑秀芳, 胡剑, 姜梅, 等. 低温拜耳赤泥石灰法脱碱工艺优化研究[J]. 轻金属, 2010(4): 21–23.  
ZHENG X F, HU J, JIANG M, et al. Study on optimization of dealkalization process on adding lime to red mud produced by low temperature bayer process[J]. Light Metals, 2010(4): 21–23.
- [ 21 ] LI R, ZHANG T, LIU Y, et al. Calcification–carbonation method for red mud processing[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 316: 94–101.
- [ 22 ] 郭芳芳. “钙化–碳化法”处理拜耳法赤泥的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.  
GUO F F. Study on the treatment of bayer red mud by “calcification–carbonization process” [D]. Shenyang: Northeast University, 2015.
- [ 23 ] 张懿. 亚熔盐清洁生产技术与高效利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.  
ZHANG Y. Clean production technology and efficient utilization of sub-
- molten salt[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [ 24 ] BANNING N C, PHILLIPS I R, JONES D L, et al. Development of microbial diversity and functional potential in bauxite residues and under rehabilitation[J]. Restoration Ecology, 2011, 19(101): 78–87.
- [ 25 ] CHENG F Q, CUI L, MILLER J D, et al. Aluminum leaching from calcined coal using hydrochloric acid solution[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2012, 33(6): 391–403.
- [ 26 ] GUO Y X, YAN K Z, CUI L, et al. Effect of  $\text{NaCO}_3$  additive on the activation of coal gangue for alumina extraction[J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 131: 51–57.
- [ 27 ] 耿学文, 马鸿文, 苏双青, 等. 高铝煤矸石脱硅滤饼碱石灰烧结法制备氢氧化铝的实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(6): 635–639.  
GENG X W, MA H W, SU S Q, et al. Preparation of aluminum hydroxide from high-alumina gangue desilication residues based on soda lime sintering method[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(6): 635–639.
- [ 28 ] 江文琛. 拜耳法赤泥碱石灰烧结法回收铁铝工艺的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.  
JIANG W C. Study on the process of recovering iron and aluminum from bayer process red mud alkali lime sintering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.

## Experiment of $\text{Al}_2\text{O}_3$ Extraction from the Activated Red Mud and Coal Gangue

JI Denghui<sup>1</sup>, LUO Wenbo<sup>2</sup>, LONG Xiao<sup>2</sup>, XIANG Chun<sup>1</sup>, WANG Xiaofu<sup>1</sup>

1. Yunnan Tin Research Institute Co., Ltd, Gejiu 661000, Yunnan, China;

2. Faculty of Materials and Energy Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, Guizhou, China

**Abstract:** Red mud and coal gangue contain a large amount of aluminum, which can be used as a substitute of bauxite. The mixture of red mud and coal gangue with the addition of sodium carbonate and calcium carbonate were calcinated in high-temperature, resulting in the insoluble alumina and silicon dioxide in the minerals transformed into soluble sodium aluminate and insoluble calcium silicate respectively, through activating red mud and coal gangue by alkali in red mud, sodium carbonate and calcium carbonate. Furthermore, the aluminum was extracted by alkali leaching from the calcined product. The optimum calcination parameters was a temperature of 1250 °C, a calcination time of 45 min, a  $\text{Na}_2\text{O}/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  molar ratio of 1.1 : 1, and  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  molar ratio of 2 : 1, and the leaching rate of aluminum reached 78.45% with a higher conversion rate of alumina in red mud and coal gangue. The process takes advantage of the residual alkali in red mud and significantly reduces the dosage of reagents such as sodium carbonate, thereby reducing production costs and environmental pollution.

**Keywords:** red mud; coal gangue; activation; roasting; leaching; aluminum oxide

引用格式: 季登会, 罗文波, 龙潇, 向春, 王晓福. 赤泥活化煤矸石提取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(2): 142–147.

JI Denghui, LUO Wenbo, LONG Xiao, XIANG Chun, WANG Xiaofu. Experiment of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  extraction from the activated red mud and coal gangue[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(2): 142–147.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)