

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.05.021

## 赤泥使用石灰窑尾气脱碱的模拟实验

唐小辉,徐 刚,刘润藻,李士琦,徐 凯

(北京科技大学 冶金与生态工程学院,北京 100083)

**摘 要:**通过对山西某铝厂赤泥的基础特性分析,提出用含 CO<sub>2</sub> 为 20%左右的石灰窑尾气对赤泥进行脱碱模拟实验。热力学分析表明利用石灰窑尾气脱碱是可行的,而实际影响脱碱的主要为动力学因素。实验以脱碱率为指标,分析液固比、CO<sub>2</sub> 体积分数、CO<sub>2</sub> 摩尔比、搅拌速度和反应温度 5 个因素对赤泥脱碱率的影响。研究结果表明,合理的脱碱工艺参数为:液固比 8 mL/g、CO<sub>2</sub> 体积分数 20%、CO<sub>2</sub> 摩尔比 40、搅拌速度 400 r/min 和反应温度 60 ℃,该工艺条件下的脱碱率为 31.10%。实验结果表明,可以利用含 CO<sub>2</sub> 为 20%左右的石灰窑尾气对赤泥进行脱碱处理,该工艺能脱除赤泥中的可溶性碱,符合“以废治废”的循环经济理念。

**关键词:**赤泥;石灰窑尾气;脱碱;模拟实验

**中图分类号:**X758

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2015)05-142-09

## Simulation experiments for dealkalization of red mud by limekiln gas

TANG Xiaohui, XU Gang, LIU Runzao, LI Shiqi, XU Kai

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

**Abstract:** Through analyzing the basic characteristic of red mud from an aluminum factory in Shanxi, a dealkalization simulation experiment of red mud with lime kiln tail gas containing CO<sub>2</sub> around 20% is proposed. Thermodynamic analysis shows that dealkalization by using lime kiln exhaust is feasible, and the actual main factors affecting dealkalization are the dynamics factors. Experiments take dealkalization rate as an index, the influence of liquid-solid ratio, CO<sub>2</sub> volume fraction, CO<sub>2</sub> mole ratio, stirring speed and reaction temperature of red mud on dealkalization rate are researched and the results are as follows. The reasonable parameters for dealkalization are liquid-solid ratio 8 mL/g, CO<sub>2</sub> volume fraction 20%, CO<sub>2</sub> mole ratio 40, stirring speed 400 r/min and reaction temperature 60 ℃, and the dealkalization rate under these process conditions is 31.10%. The study results show that lime kiln tail gas of containing CO<sub>2</sub> at around 20% could be used for red mud dealkalization treatment, and this process can remove the soluble alkali in red mud, which conforms to the concept of “using waste treat waste”.

**Key words:** red mud; limekiln tail gas; dealkalization; simulation experiment

赤泥是氧化铝生产过程中产生的碱性固体废渣,因其中含有氧化铁,外观呈红色泥土状而得名<sup>[1]</sup>。目前我国的氧化铝产量已跃居世界第一,而平均每生产 1 t 氧化铝就会产生 1~2 t 的赤泥,按此计算,我国每年赤泥产量将达到 4 000~8 000 万 t<sup>[2-4]</sup>。目前,赤泥的处理大都采用露天堆存,这种方式不仅占用大量土地,耗

收稿日期:2015-02-19

作者简介:唐小辉(1989-),男,硕士研究生,主要从事钢铁冶金及二次资源综合利用研究,(E-mail)txhjhon@163.com。

李士琦(联系人),男,北京科技大学教授,博士生导师。

费较多维护费用,而且赤泥中的碱向地下渗透,还会造成土壤和地下水的污染<sup>[5-7]</sup>。赤泥中含有较高的碱性氧化物,是其强碱、强毒性的主要来源,因此,脱碱是赤泥无害化处理的关键。目前,国内外常用的赤泥脱碱方法主要有:石灰脱碱法、CO<sub>2</sub>脱碱法、盐、酸浸出法以及工业废水废渣中和法等<sup>[8-10]</sup>。这些方法普遍存在成本较高、处理工艺复杂并且处理过程产生大量废液,笔者从“以废治废”、“变废为宝”的循环经济理念出发,提出使用石灰窑废气进行脱碱。

石灰窑废气是生产石灰过程中排出的含 CO<sub>2</sub> 的酸性气体。随着我国钢铁、电石、耐火材料等工业的快速发展,每年石灰的需求量十分巨大。石灰窑按使用燃料分为混烧窑和气烧窑,按窑型分为竖窑、回转窑、套筒窑、麦尔兹窑等,同时又有正压操作窑和负压操作窑之分。石灰窑每生产 1t 石灰将产生 1t 左右的 CO<sub>2</sub>,而石灰窑尾气主要气体成分为 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和微量的 CO、SO<sub>2</sub> 等,其中 CO<sub>2</sub> 的体积分数为 15%~35%<sup>[11-13]</sup>。目前,由于技术、经济、法规政策等诸多方面的原因,国内石灰窑尾气中的 CO<sub>2</sub> 仍全部自由排放。

实验选取山西某铝厂的拜耳法低铁赤泥为研究对象,分别进行粒度、XRF 荧光、XRD 衍射、扫描电镜分析,对该赤泥的理化特性、物相结构进行全面了解。在此基础上,进行赤泥脱碱的热力学、动力学分析,探讨利用石灰窑气中的 CO<sub>2</sub> 中和赤泥中的可溶性碱,实现赤泥中有“毒”物质的无害化处理。

## 1 赤泥基础特性

### 1.1 粒度分析

使用型号为 LMS-30 的激光衍射散射式粒度分布测定仪对赤泥粒度进行测定,其结果如图 1 所示。

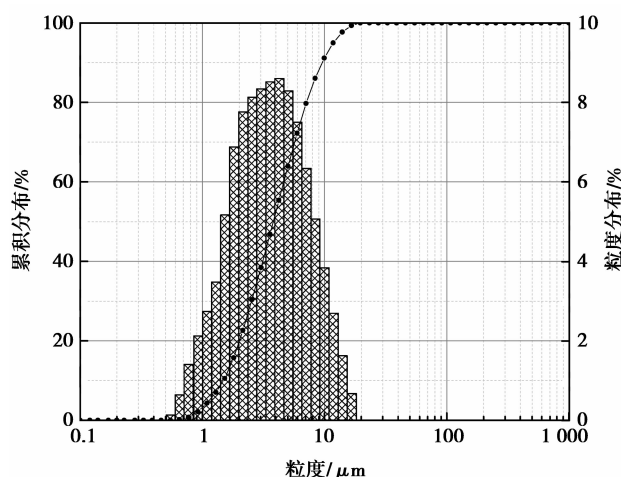


图 1 赤泥的粒度分布

Fig.1 Distribution of particle size of red mud

由图 1 可以看出,该赤泥粒度分布范围是 0.55~16.58 μm,分散度较为集中,赤泥的粒度中位数为 3.814 μm,属于微细粒粉尘。

### 1.2 XRF 荧光分析

使用岛津 XRF-1800 的 XRF-荧光分析仪对赤泥进行化学分析,结果如表 1 所示。

表 1 赤泥 XRF 荧光分析结果(质量百分数)

Table 1 X-ray fluorescence analysis of red mud (mass percentage)

成分	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	其他
含量/%	16.37	22.20	20.74	12.91	16.98	6.62	0.99	0.96	2.23

由荧光分析结果可以看出,赤泥中的碱性氧化物主要是钠,约占 13%,而钾含量很少,该赤泥中还含有较高的 Fe,具有一定的回收利用价值。

### 1.3 XRD 分析

赤泥是多种复杂化合物的混合物,各个元素之间存在着多种价态,使用 MAC M21 的超大功率 X 射线衍

射仪对赤泥进行了 XRD 检测,检测结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出,赤泥中的 Fe 主要由氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、水化石榴石( $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ )、钛铁矿( $\text{TiFeO}_3$ )组成,而 Na 则主要由苛性钠( $\text{NaOH}$ )、铝酸钠( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )、铝硅酸钠( $\text{Na}_{0.61}\text{Al}_{4.7}\text{Si}_{7.32}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ )组成。

#### 1.4 扫描电镜分析

为确定赤泥的颗粒形貌和微观结构特征,使用型号为 JSM-6480LV 高低真空扫描电镜对赤泥进行观测。

由图 3 可以看出,赤泥颗粒在放大 1 500 倍的电镜下呈现出粘结团聚现象,其形貌也不规则,赤泥的粒径也在几微米到几十微米之间不等。

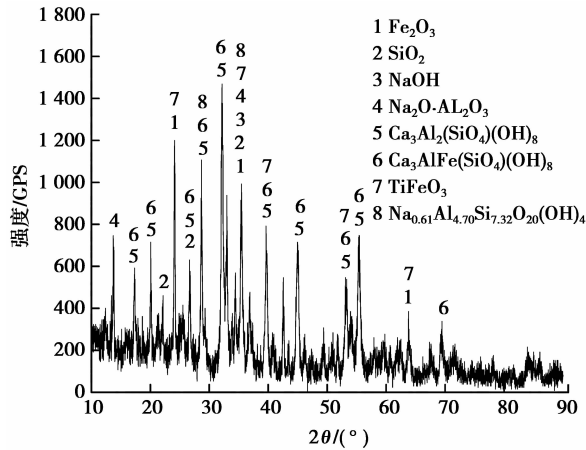


图 2 赤泥的 XRD 分析结果

Fig.2 Results of X-ray diffraction analysis for red mud

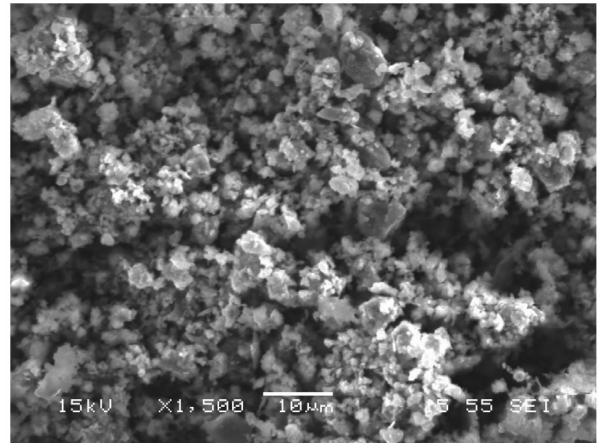


图 3 赤泥扫描电镜照片

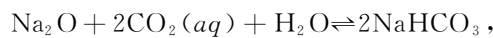
Fig.3 The micrograph by scanning electron on red mud

由此可知,赤泥中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量高达 12.91%,主要以苛性钠、铝酸钠和铝硅酸钠的形式存在, $\text{CO}_2$  可以与其中的可溶性碱反应;赤泥粒度分布在 0.55~16.58  $\mu\text{m}$ ,分散度较为集中。

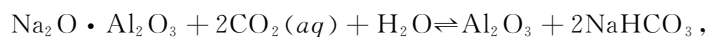
## 2 脱碱原理

### 2.1 脱碱热力学

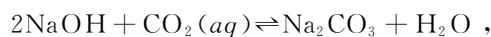
赤泥中的可溶性钠主要有苛性钠( $\text{NaOH}$ )、氧化钠( $\text{Na}_2\text{O}$ )、铝酸钠( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )、硅酸钠( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )等。当过量的  $\text{CO}_2$  通入赤泥浆液后与赤泥中的可溶性碱发生化学反应<sup>[14]</sup>,可能涉及的化学反应如下:



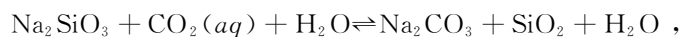
$$\Delta_r G_m^\theta = -84\,413 + 218.148T \quad \text{J/mol}; \quad (1)$$



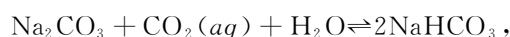
$$\Delta_r G_m^\theta = -230\,896 + 382.646T \quad \text{J/mol}; \quad (2)$$



$$\Delta_r G_m^\theta = -167\,047 + 133.81T \quad \text{J/mol}; \quad (3)$$



$$\Delta_r G_m^\theta = -86\,693 + 147.152T \quad \text{J/mol}; \quad (4)$$



$$\Delta_r G_m^\theta = -128\,485 + 337.137T \quad \text{J/mol}; \quad (5)$$

式(1)-(4)都为赤泥中可溶性碱的中和反应,而式(5)为赤泥浆液中碳酸钠与过量的  $\text{CO}_2$  反应生成  $\text{NaHCO}_3$ 。根据物理化学理论,对于反应  $aA + bB \leftrightarrow cC + dD$ ,范特霍夫等温式为: $\Delta_r G = \Delta_r G_m^\theta + RT \ln Q$ ,反应熵  $Q$  的计算式如下:

$$Q = \frac{(P_C/P^\theta)^c \cdot (P_D/P^\theta)^d}{(P_A/P^\theta)^a \cdot (P_B/P^\theta)^b} \quad \text{或} \quad \frac{(C_C/C^\theta)^c \cdot (C_D/C^\theta)^d}{(C_A/C^\theta)^a \cdot (C_B/C^\theta)^b}, \quad (6)$$

$\Delta_r G > 0$ , 反应向左自发进行;  $\Delta_r G < 0$ , 反应自发向右进行;  $\Delta_r G = 0$ , 反应达到平衡。基于此, 为判断脱碱反应能否在室温标态下发生, 以反应式(3)为例进行计算。

根据脱碱处理的预设工况, 取初始赤泥浆溶液中反应物 NaOH 浓度为 0.1 mol/L, 生成物  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  的浓度为 0.05 mol/L,  $c^\theta = 1$  mol/L。石灰窑废气中  $\text{CO}_2$  的体积分数为 15%~35%, 取  $p(\text{CO}_2)/p^\theta = 0.1$ , 而纯固体和纯液体由于浓度或压力保持恒定不变, 不写入平衡常数式, 故有反应商

$$Q = \frac{\left(\frac{c_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{c^\theta}\right)}{\left(\frac{c_{\text{NaOH}}}{c^\theta}\right)^2 \cdot \left(\frac{p_{\text{CO}_2}}{p^\theta}\right)} = 0.05 / (0.1^2 \times 0.1) = 50$$

设反应温度为室温  $T = 298$  K,  $R = 8.31$  J/(K·mol), 将数据带入则有:

$\Delta_r G = \Delta_r G_m^\theta + RT \ln Q = -167\,047 + 133.81 \times 298 + 8.31 \times 298 \times \ln 50 = -117\,484 \leq 0$ , 可见, 反应式(3)在室温标态下能够正向自发进行。同理, 可求得其他化学反应标态室温下的吉布斯自由能, 如表 2 所示。

表 2 室温标态下各可溶性碱反应强弱

Table 2 The reaction strength of soluble alkali at room temperature and standard state

反应物	生成物	$\Delta_r G / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	反应强弱
NaOH	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	-117 484	强 ↓ 弱
$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	NaHCO <sub>3</sub>	-107 732	
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	-37 140	
$\text{Na}_2\text{O}$	NaHCO <sub>3</sub>	-25 107	

从以上分析可以看出, 利用含  $\text{CO}_2$  为 15%~35% 的石灰窑尾气进行赤泥脱碱在热力学上是可行的。

## 2.2 脱碱动力学

赤泥脱碱是模拟石灰窑废气中的  $\text{CO}_2$  和赤泥在带有一定机械搅拌的反应釜中进行的气液固三相复杂反应过程。脱碱的三相体系包括液体( $\text{H}_2\text{O}$ )、固体(赤泥)和气体( $\text{CO}_2$ ), 其动力学的传质主要包括气液间的传质、液固间的传质以及气液固内部的传质。对于气、液、固三相的动力学反应机理国内外学者提出不同理论, 比如溶质渗透模型, 双膜理论以及表面更新模型, 而用经典双膜理论来解释赤泥脱碱的动力学仍是最佳选择<sup>[15-16]</sup>。该过程分为以下 5 个步骤:

- 1)  $\text{CO}_2$  溶于水并通过气膜向气液界面、液相主体和液固界面扩散传质;
- 2) 固相颗粒中的可溶性碱通过液固界面进入液相主体;
- 3) 液相主体中的可溶性碱向气液界面扩散传质;
- 4) 液相主体与液膜内的  $\text{CO}_2$  和可溶性碱的扩散对流;
- 5) 液相主体和液膜内的  $\text{CO}_2$  与可溶性碱发生界面化学反应。

上述 5 个步骤中 1)~4) 都为传质过程, 而 5) 为化学反应过程。在具有机械搅拌的作用下, 溶解在液体中的  $\text{CO}_2$  和可溶性碱的扩散传质都较快, 界面化学反应也基本在瞬间完成, 而气相中的  $\text{CO}_2$  向气液界面和可溶性碱在固相主体向固液界面的扩散较为缓慢, 其中后者的扩散速率更慢, 这也成为该过程的动力学限制环节。因此, 赤泥脱碱反应速率主要取决于反应体系中可溶性碱的溶解扩散速度。

## 3 使用石灰窑废气脱碱模拟实验

### 3.1 实验方案

实验按照 L16(4<sup>5</sup>) 拟水平正交表设计方案, 重点考察液固比、 $\varphi(\text{CO}_2)$  (气相中  $\text{CO}_2$  体积分数)、 $\text{CO}_2$  摩尔比(中和反应过程中实际通入的  $\text{CO}_2$  摩尔数与赤泥中参加反应的碱性物质的摩尔数的比值)、搅拌强度、反应温度对赤泥脱碱的影响。其中, 液固比、 $\varphi(\text{CO}_2)$ 、 $\text{CO}_2$  摩尔比、反应温度是脱碱热力学影响因子, 搅拌强度、反应温度是脱碱动力学影响因子。实验指标为脱碱率  $\eta$ , 其表达式如下:

$$\eta = \left(1 - \frac{\omega_2 m_2}{\omega_1 m_1}\right) \times 100\% \quad (7)$$



式中： $\eta$  为脱碱率； $\omega_1$  为脱碱前赤泥中 Na 的百分含量； $m_1$  为脱碱前赤泥的质量； $\omega_2$  为脱碱后赤泥中 Na 的百分含量； $m_2$  为脱碱后赤泥的质量。

实验各因子水平列于表 3。

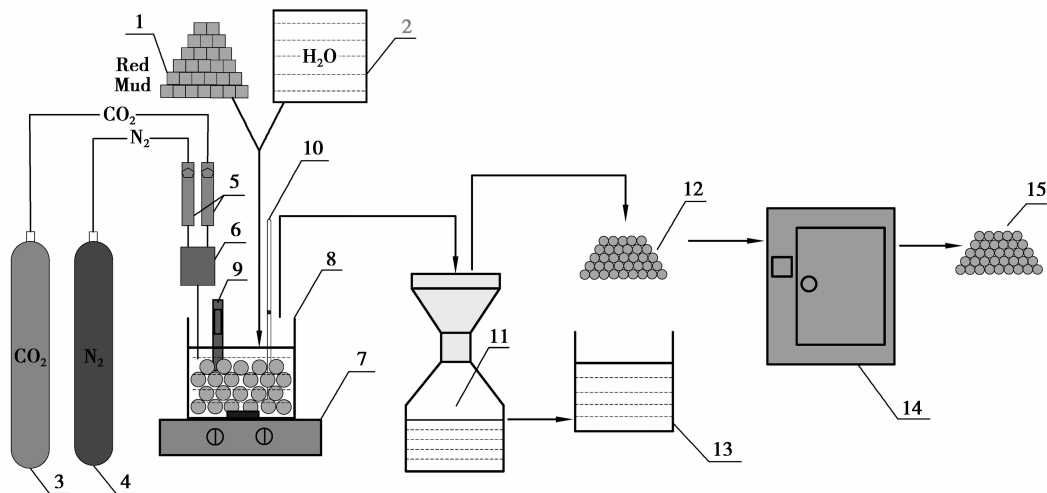
表 3 因素水平表

Table 3 The table of factor and level

水平	因素				
	液固比/( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$\varphi(\text{CO}_2)/\%$	$\text{CO}_2$ 摩尔比	搅拌强度/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	反应温度/ $^\circ\text{C}$
1	2	20	5	0	20
2	4	40	10	200	40
3	6	60	20	400	60
4	8	80	40	600	80

### 3.2 实验装置及步骤

石灰窑废气模拟脱碱实验装置流程示意图如图 4 所示。



1.赤泥；2.自来水；3. $\text{CO}_2$ 气瓶；4. $\text{N}_2$ 气瓶；5.气体流量计；6.气体混合室；7.恒温搅拌器；8.脱碱反应釜；9.pH测量计；10.温度计；11.抽滤装置；12.(湿)脱碱赤泥；13.滤液；14.烘箱；15.(干)脱碱赤泥

图 4 石灰窑废气脱碱模拟实验装置流程示意图

Fig.4 The simulation dealkalization equipment diagram by kiln exhaust gas

实验步骤：

- 1) 实验每次取 30 g 赤泥于反应釜，按设计液固比加入自来水搅拌混匀；
- 2) 调整搅拌器转速并升温，当温度到预定温度时开始通入  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  的混合气体；
- 3) 通气结束后将浆液抽滤，分别得到滤液和滤渣，将滤渣送入烘箱  $120\text{ }^\circ\text{C}$  内烘干；
- 4) 烘干后的滤渣称重并化验，计算脱碱率。

## 4 实验结果及分析

实验按照  $L_{16}(4^5)$  拟水平正交表共进行了 16 组实验，将实验得到的样品采用原子吸收光谱法对其中的 Na 含量进行检测，并根据公式(7)计算得到脱碱率如表 4 所示。

表 4 脱碱实验结果

Table 4 The experiment results of dealcalization

实验号	因素					脱碱率 $\eta/\%$
	液固比	$\varphi(\text{CO}_2)$	$\text{CO}_2$ 摩尔比	搅拌强度	反应温度	
1	2	20	5	0	20	26.24
2	2	40	10	200	40	28.05
3	2	60	20	400	60	29.48
4	2	80	40	600	80	29.33
5	4	20	10	400	80	29.00
6	4	40	5	600	60	26.46
7	4	60	40	0	40	26.89
8	4	80	20	200	20	27.80
9	6	20	20	600	40	28.34
10	6	40	40	400	20	28.97
11	6	60	5	200	80	28.46
12	6	80	10	0	60	28.05
13	8	20	40	200	60	31.20
14	8	40	20	0	80	28.37
15	8	60	10	600	20	28.51
16	8	80	5	400	40	29.23

由实验结果可以看出,实验中脱碱率最低的为第 1 组,脱碱率为 26.24%,而脱碱率最高的为第 13 组,脱碱率为 31.20%,两者相差不大。为得到各个因素对实验指标的影响情况,确定出因素的主次顺序以及找出最优参数组合,对脱碱正交实验结果分别进行直观分析和方差分析。

#### 4.1 直观分析

各因子对脱碱率影响的直观分析如图 5 所示。

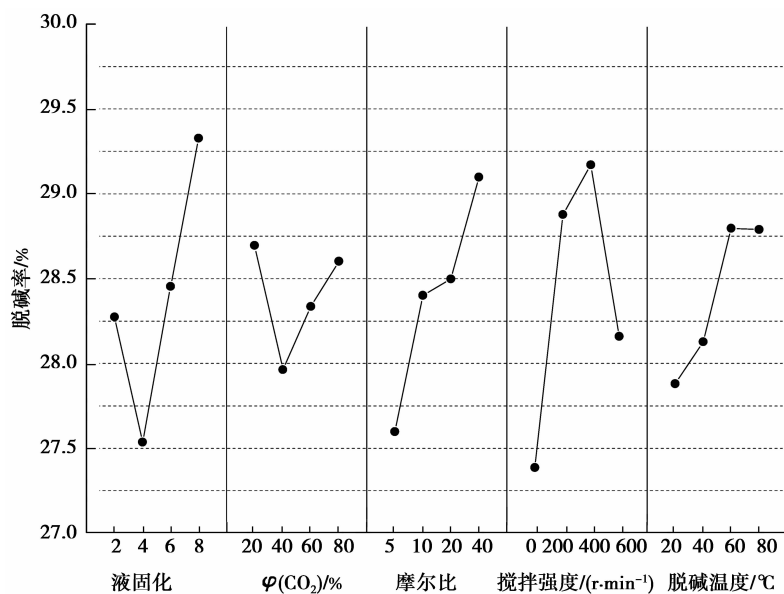


图 5 各因素对脱碱率的直观分析图

Fig.5 The visual analysis chart of dealcalization on each factor

由图 5 可以看出,  $\varphi(\text{CO}_2)$  为 20% 的脱碱率比 80% 的脱碱率略高, 但是  $\varphi(\text{CO}_2)$  对脱碱反应的影响并不显著。从热力学分析,  $\text{CO}_2$  体积分数越大, 其分压也就越大, 反应的吉布斯自由能也就越小, 有利于脱碱反应的进行。实际生产中石灰窑废气  $\text{CO}_2$  体积分数较低, 实验结果表明石灰窑废气中  $\varphi(\text{CO}_2)$  在 20% 左右可用于赤泥脱碱。高的液固比和  $\text{CO}_2$  摩尔比均有利于脱碱, 但这也同时增加了设备负荷和脱碱成本。当搅拌强度在 400 r/min, 反应温度在 60 °C 时脱碱效果最佳, 此时反应有较优的热力学和动力学条件。在实际生产过程中要求操作简单, 成本低廉, 实验石灰窑废气模拟脱碱最佳工况为:  $\text{A}_4\text{B}_1\text{C}_4\text{D}_3\text{E}_3$ , 即液固比为 8,  $\varphi(\text{CO}_2)$  为 20%,  $\text{CO}_2$  摩尔比为 40, 搅拌速度为 400 r/min, 反应温度为 60 °C。

#### 4.2 方差分析

对表 5 的实验结果进行方差分析, 结果列于表 5。

表 5 方差分析结果  
Table 5 The results of variance analysis

因素	偏差平方和	自由度	F 比	极差	显著性
液固比	6.49	3	5.01	1.24	
$\varphi(\text{CO}_2)$	1.30	3	1.00	0.53	
$\text{CO}_2$ 摩尔比	4.56	3	3.52	1.07	
搅拌强度	7.62	3	5.88	1.28	*
反应温度	2.62	3	2.02	0.69	
误差	1.29	15			

注:  $F(3, 3)_{0.10} = 5.39$

由表 5 的结果可以看出, 在实验研究范围内, 仅搅拌强度对赤泥脱碱率略有显著性影响, 而其他几个因子对脱碱率的影响均不显著。这说明机械搅拌可以加速赤泥颗粒中的可溶性碱溶解, 同时, 也促进  $\text{CO}_2$  在气液界面的传质, 这也是脱碱过程中主要的动力学影响因素。各因子对脱碱率的影响排序为: 搅拌强度 > 液固比 >  $\text{CO}_2$  摩尔比 > 反应温度 >  $\varphi(\text{CO}_2)$ 。

#### 4.3 脱碱赤泥特性分析

在最佳工况下进行赤泥脱碱实验, 实验得到的脱碱率为 31.10%, 将脱碱后的残渣进行 XRD 分析和扫描电镜分析。

##### 1) 脱碱赤泥 XRD 分析

图 6 中衍射峰上标“■”表示该衍射峰显著性减弱, 标“●”表示该衍射峰显著性增强。对比图 2, 赤泥脱碱前后衍射峰总体没有太大变化, 说明赤泥的主要物相没有变化。结合实验结果分析可知, 脱碱后赤泥中的  $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  基本消失, 剩余的含钠物质主要为铝硅酸钠, 说明可溶性强碱物质已被脱除, 石灰窑废气对赤泥脱碱起到一定效果。

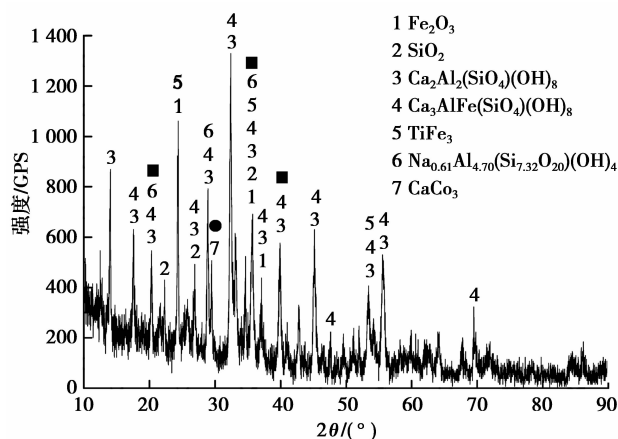


图 6 脱碱赤泥 XRD 分析结果

Fig.6 Results of X-ray diffraction analysis on dealcalized red mud

## 2) 脱碱赤泥 SEM 分析

由图 7 可知,经过脱碱处理后的赤泥,颗粒由不规则块状转变为球状,而粒径为几微米。相比于图 3,赤泥颗粒间的粘结团聚现象有所降低。

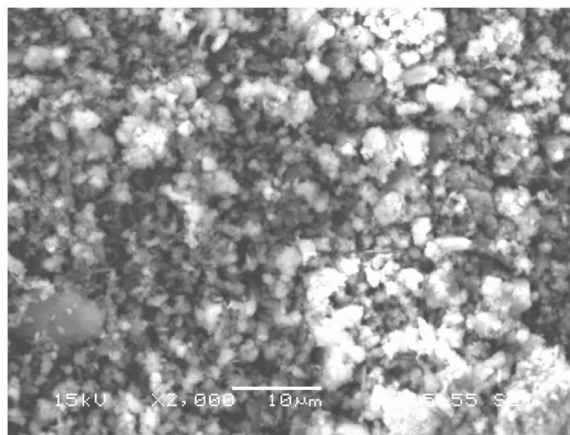


图 7 脱碱赤泥扫描电镜照片

Fig.7 The micrograph by scanning electron on dealcalized red mud

## 5 结 论

1) 赤泥属于微米级的固体颗粒,其中含有较高的钠碱性物质,钠主要以苛性钠( $\text{NaOH}$ )、铝酸钠( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )和铝硅酸钠( $\text{Na}_{0.61}\text{Al}_{4.7}\text{Si}_{7.32}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ )的形式存在。

2) 模拟实验得到的最佳脱碱工艺参数为液固比 8 mL/g、 $\text{CO}_2$  体积分数 20%、 $\text{CO}_2$  摩尔比 40、搅拌速度 400 r/min、反应温度 60 °C,在该工艺条件下进行脱碱得到的脱碱率为 31.10%,已基本将赤泥中的可溶性碱脱除。

3) 模拟实验中各因子对脱碱率的影响顺序为:搅拌强度 > 液固比 >  $\text{CO}_2$  摩尔比 > 反应温度 >  $\varphi(\text{CO}_2)$ ,而搅拌强度对脱碱率略有显著性影响。结果表明,石灰窑尾气可以利用来处理铝业赤泥,并且能够脱除其中的可溶性碱。

4) 石灰窑尾气脱碱模拟实验处理工艺简单,成本低廉,实现“以废治废,变废为宝”的循环经济理念,有利于资源的二次利用。

### 参考文献:

- [1] 马淑花,郑诗礼,张懿. 赤泥中氧化钠和氧化铝的回收[J]. 矿产综合利用, 2008(1):27-30.  
MA Shuhua, ZHENG Shili, ZHANG Yi. Recovery of soda and alumina from red mud [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2008(1):27-30. (in Chinese)
- [2] 姜玉敬. 近 30 年世界铝电解工业的发展与启示[J]. 世界有色金属, 2010(11):15-18.  
JIANG Yujing. Development of global aluminum electrolysis industry in the last 30 years and its enlightenment [J]. World Nonferrous Metals, 2010(11):15-18. (in Chinese)
- [3] 纪志军,李士琦,张长春,等.  $\text{CO}_2$  对赤泥的脱钠处理实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(1):42-46.  
JI Zhijun, LI Shiqi, ZHANG Changchun, et al. Experimental studies on sodium removal of red mud by  $\text{CO}_2$  [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45(1):42-46. (in Chinese)
- [4] The International Aluminium Institute. Alumina Production [EB/OL]. (2014-1-27) [2014-2-10]. <http://www.world-aluminium.org/statistics/alumina-production/#map>.
- [5] 南相莉,张延安,刘燕,等. 我国赤泥综合利用分析[J]. 过程工程学报, 2010(10):264-270.  
NAN Xiangli, ZHANG Yanan, LIU Yan, et al. Analysis of comprehensive utilization of red mud in China [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010(10):264-270. (in Chinese)
- [6] Sneha S, Ajoy K, Amitava B. Proposal for resources, utilization and processes of red mud in India-a review [J].

- International Journal of Mineral Processing, 2013(118):43-45.
- [7] Liu W, Chen X, Li W, et al. Environmental assessment, management and utilization of red mud in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 84:606-610.
- [8] 吴龙, 李士琦, 沈平. 使用 CO<sub>2</sub> 对拜耳法赤泥脱钠的无害化工艺[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(11):75-80.  
WU Long, LI Shiqi, SHEN Ping. The harmless process for the sodium removal of Bayer red mud by CO<sub>2</sub> [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(11):75-80. (in Chinese)
- [9] Ramesh C.S, Raj K.P, Bankim C.R. Neutralization of red mud using CO<sub>2</sub> sequestration cycle [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010(179):28-34.
- [10] 王利英, 李小雷, 瞿二安, 等. 赤泥脱碱的研究[J]. 矿业论坛, 2010(7):759.  
WANG Liying, LI Xiaolei, QU Eran, et al. Study on dealkalization of red mud [J]. Science & Technology Information, 2010(7):759. (in Chinese)
- [11] 高全, 邱景平, 宋守志. 石灰窑废气 CO<sub>2</sub> 的综合利用[J]. 矿业工程, 2004, 2(4):59-62.  
GAO Quan, QIU Jingping, SONG Shouzhi. The complex utilization of limekiln exhaust gas of CO<sub>2</sub> [J]. 2004, 2(4):59-62. (in Chinese)
- [12] 成爱萍. 采用变压吸附工艺技术回收石灰窑气生产液体二氧化碳[J]. 南方钢铁, 1995(2):24-26.  
CHENG Aiping. Production process using liquid carbon dioxide recovery technology of pressure swing adsorption gas of limekiln [J]. Southern Steel, 1995(2):24-26. (in Chinese)
- [13] 沈新峰. 石灰窑尾气二氧化碳回收工艺研究及设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 2008.  
SHEN Xinfeng. Research and design on CO<sub>2</sub> recovery technology of limekiln tail gas [D]. Xian: The school of environment and municipal engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [14] 王琪, 李津, 赵颖, 等. 铝业碱性赤泥的悬浮碳化法脱碱工艺研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(12):2275-2280.  
WANG Qi, LI Jin, ZHAO Ying, et al. Study on the dealkalization of red mud by suspension and carbonation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(12):2275-2280. (in Chinese)
- [15] 王志, 韩敏芳, 张以河, 等. 拜耳法赤泥的湿法碳化脱碱工艺研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(9):1851-1855.  
WANG Zhi, HAN Minfang, ZHANG Yihe, et al. Study on the dealkalization technics of Bayer-process red mud with CO<sub>2</sub> by carbonation [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(9):1851-1855. (in Chinese)
- [16] 王琪, 栾兆坤, 韦斌. 铝矿赤泥碱回收的动力学及机理研究[J]. 无机盐工业, 2008, 40(5):39-41.  
WANG Qi, LUAN Zhaokun, WEI Bin. Study on mechanism and kinetic of alkali recovery from red mud of aluminum ore [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2008, 40(5):39-41. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)