

# 铝业碱性赤泥的悬浮碳化法脱碱工艺研究

王琪 李津 赵颖 栾兆坤\*

(中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要** 研究探讨了碱性废弃物赤泥的常压悬浮碳化法脱碱绿色环保新工艺。详细研究考察了反应温度、反应时间、液固比以及 CO<sub>2</sub> 通气量 4 个因素对赤泥脱碱效能的影响, 确定了最佳工艺参数和技术条件。研究表明, 在温控 60℃, 反应时间 1.5 h, 液固比为 10, CO<sub>2</sub> 通气量为 0.8 L/m<sup>3</sup> 的反应条件下, 赤泥脱碱率(以 Na<sub>2</sub>O 计)达到 85% 以上, 同时得到含 3% ~ 5% 碳酸盐的碱性溶液。与传统生石灰脱碱工艺相比, 悬浮碳化法具有操作简便、脱碱率高、所得碱纯度高、无废弃物排放等优点, 并可实现双废物(CO<sub>2</sub> 废气和赤泥废弃物)的可持续综合利用。

**关键词** 铝业赤泥 脱碱新工艺 悬浮碳化法 条件与效能

中图分类号 X756 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2009)12-2275-06

## Study on the dealkalization of red mud by suspension and carbonation

Wang Qi Li Jin Zhao Ying Luan Zhaokun

(State Key Laboratory of Environmental Analytical Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract** A new technology for removing alkali from alkaline red mud by sinter method under normal pressure by the method of suspension and carbonation was discussed. The influences of reaction temperature, reaction time, liquid/solid ratio and CO<sub>2</sub> input on alkali removal rate were investigated, and the optimal technology conditions were proposed: reaction temperature 60℃, reaction time 1.5 h, liquid/solid ratio 10, CO<sub>2</sub> flow velocity 0.8 L/m<sup>3</sup>. Under these conditions, the removal rate (base on Na<sub>2</sub>O) can reach 85%, meanwhile the diluent solution including carbonate 3% ~ 5% can be obtained. The advantages of the technology of suspension and carbonation are as follows: operating easily, high removal rate of alkali, the high purity of alkali obtained and not producing other pollutants, comparing with traditional alkali removal method. Furthermore, this technology utilizes double wastes (CO<sub>2</sub> exhaust gas and red mud) synthetically.

**Key words** red mud; dealkalization; suspension and carbonation; condition and efficiency

赤泥是氧化铝生产过程中产生的残矿渣, 因其富含氧化铁(20% ~ 50%)呈红褐色而称之为赤泥。赤泥呈强碱性, 每吨赤泥附带 3 ~ 4 m<sup>3</sup> 碱液并夹带些痕量的放射性元素。2006年, 我国氧化铝年产已达 1500 万 t 以上, 每生产 1 t Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 就会产生 0.6 ~ 1.2 t 的赤泥矿渣。目前, 大量赤泥废弃物主要采取湿法露天堆存环境中, 不仅占用大量土地资源, 耗用了大量场地维护费, 而且强碱、高盐度的赤泥附着液经渗漏, 造成土壤、水体和地下水严重污染<sup>[1-4]</sup>。另外, 赤泥中含有大量有价金属氧化物, 如钛(10% ~ 20%)、铁(20% ~ 40%)、铝(8% ~ 15%)、硅(10% ~ 20%)、钙镁(20% ~ 40%), 以及钪、铈等稀有稀土元素, 具有较高回收价值。同时这些金属的氧化物是环境技术领域制备絮凝剂、吸附剂、催化氧化剂的基本原材料。由于至今没有得到有效利用, 造成

了资源的二次浪费。

为了有效地利用赤泥, 实现废弃资源再利用, 国内外已进行了大量研究, 如从赤泥中提取有价金属钛、铁等, 或将其用于硅酸盐水泥、建材基料<sup>[5-9]</sup>等等。但是, 由于赤泥碱含量过高, 制约其资源化综合利用。因此, 经济有效地实现赤泥脱碱是赤泥资源化综合利用中亟待解决的问题。

CO<sub>2</sub> 是一种无色、无味的气体, 是地球上最丰富的碳资源之一。20 世纪以来, 随着人类工业生产活

基金项目: 国家环保公益行业科研专项资助项目(200709037)

收稿日期: 2008-12-24 修订日期: 2009-02-25

作者简介: 王琪(1979-), 男, 博士, 研究方向: 主要从事环境化学与固体废物资源化方面的研究。

E-mail: wq020704@126.com

\* 通讯联系人

动的高速发展, CO<sub>2</sub> 排放量越来越大, 预计到 2100 年, 大气中二氧化碳的浓度将达到  $5.5 \times 10^{-4} \text{ mg/L}^{[10]}$ 。由于它在大气中含量高、寿命长, 所以对温室效应的贡献最大, 其浓度增加对温室效应的贡献值更是达到 55%<sup>[11]</sup>。大量 CO<sub>2</sub> 气体排放导致的全球“温室效应”及造成的一系列严重环境问题<sup>[12]</sup>, 引起了世界各国高度重视, 并已将其作为温室气体削减与控制的重点。如能将 CO<sub>2</sub> 转化成再生资源加以利用, 使之变废为宝, 不仅对当前世界性 CO<sub>2</sub> 减排做出贡献, 而且也将创造显著的社会效益、环境效益和经济效益。

目前, 无论对烧结法还是拜耳法赤泥, 采用的脱碱工艺均为生石灰法<sup>[13-14]</sup>。该法以生石灰为脱碱剂, 在水热条件下与赤泥中的碱性物质发生钙钠置换反应。赤泥中的碱性物质被转化为不同形态的钠盐进入溶液, 生石灰则转化为难溶性钙盐进入赤泥。

针对生石灰法脱碱工艺中操作温度高、生成钙盐污染物的缺点, 本文研究开发了新型悬浮碳化法赤泥脱碱绿色环保工艺, 即利用工业生产过程中的 CO<sub>2</sub> 废气进行赤泥脱碱, 实现双废物 (CO<sub>2</sub> 和赤泥) 的可持续综合再利用。实验过程中, 详细研究考察了悬浮碳化法的反应温度、时间、液固比及 CO<sub>2</sub> 通气量等因素对赤泥脱碱效能的影响, 并确定了最佳脱碱工艺条件。与传统生石灰脱碱工艺相比, 本文所研发的悬浮碳化工艺具有操作温度低、脱碱率高、所得碱纯度高, 无新废弃物产生和排放等优点。

## 1 实验方法与材料

### 1.1 实验设备

气体流量计、DC-12H 恒温水浴锅、JJ-1 精密定时电动搅拌器、马弗炉、离心机、浆态三相脱碱反应器。分析检测仪器: 原子吸收光谱仪 (Shimadzu AA6300)、扫描电镜和能谱仪 (Hitachi-300N)。

### 1.2 实验原料与步骤

山东铝业股份有限公司烧结法赤泥, 含碱量在 3% ~ 6% (以 Na<sub>2</sub>O 计); CO<sub>2</sub> 气体钢瓶。

首先将烧结法赤泥在马弗炉中于 600~700℃ 下焙烧 5 h 然后将其粉碎并研磨过 80 目筛。将预处理赤泥置于脱碱反应器中, 按一定液固比定量加入去离子水, 充分搅拌混合成泥浆状, 并在设定温度下, 按一定气体速率通入 CO<sub>2</sub> 进行气液固三相脱碱反应。反应结束后, 将澄清液与固渣进行离心分离, 采用火焰原子吸收法<sup>[15]</sup>测定离心液中碱含量 (Na<sup>+</sup>

离子浓度); 固渣中碱的含量通过质量差减法计算获得。

实验过程中, 使用日本 HITACHI 公司的 S-3000N 扫描电镜 (SEM) 对脱碱前后的赤泥样品的表面形态进行了检测分析, 同时用美国 EDAX 公司的能谱仪对样品进行了成分分析; 样品的比表面积 (BET)、孔容和孔径用比表面测定仪 (ASAP2000 Micromeritics Co., U. S. A) 检测分析; 使用日本理学电机公司 (Rigaku) 的 X 射线衍射仪 (D/MAX 2500) 对脱碱前后的赤泥进行了组成分析 (铜靶, 40 kV, 150 mA)。

采用正交表 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 对整个实验过程进行设计, 着重考察反应温度、时间、液固比及 CO<sub>2</sub> 通气量 4 个因素对脱碱率的影响效果。实验的因素水平设计见表 1。

表 1 因素水平表

Table 1 Factors and levels

水平	因素			
	反应温度 (°C)	反应时间 (h)	液固比 (mL/g)	CO <sub>2</sub> 通气量 (L/min)
1	40	1	5	0.5
2	50	1.5	7	0.8
3	60	2	10	1

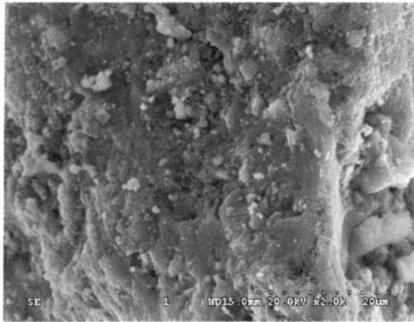
## 2 实验结果与讨论

### 2.1 脱碱前后赤泥样品的表征

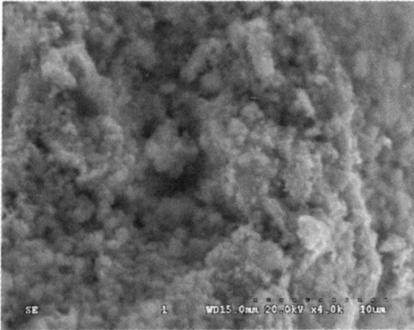
#### 2.1.1 扫描电镜、能谱和 X 射线衍射分析

SEM 能够很直观地反映出 CO<sub>2</sub> 对赤泥样品的作用效果。图 1(a) 和图 1(b) 分别为脱碱前后赤泥样品的表面形态。通过分析观察, 不难发现: 在整个碳化过程进行中, 样品的外表面发生了明显变化。颗粒的表面变得粗糙, 而且在表面生成了大量的孔。这是由于 CO<sub>2</sub> 与赤泥表面的碱发生化学反应, 使得大部分碱进入溶液造成的。图 2 和图 3 分别为脱碱前、后赤泥样品的能谱分析。根据能谱分析图可确定赤泥脱碱前、后 Na 元素的含量变化。图 2 中 Na 含量为 4.25%, 即相当于 Na<sub>2</sub>O 含量 5.73%; 图 3 中 Na 含量为 0.69%, 即 Na<sub>2</sub>O 含量为 0.93% (< 1%), 因此碱的去除率可达 85% 以上。如图 4 和图 5 所示, 赤泥样品在脱碱前后的 X 射线衍射图也有明显不同, 表示 Na<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 等几种碱的峰在图 5 中大量消失。因此, 赤泥经过悬浮碳化法脱碱工艺, 其表面大量的附着碱进入溶液中, 致使赤泥自身的碱含量降低至 1% 以下, 符合作为生

产硅酸盐水泥基料的要求。



(a) 脱碱前



(b) 脱碱后

图 1 脱碱前后赤泥样品的 SEM 图

Fig.1 SEM micrograph of red mud before and after dealkalization

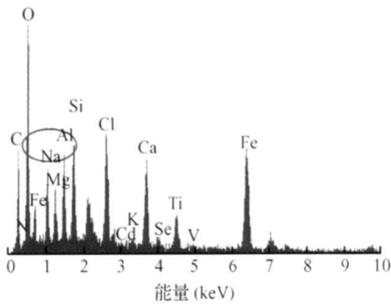


图 2 脱碱前赤泥中 Na 的含量

Fig.2 Content of Na in the red mud before dealkalization

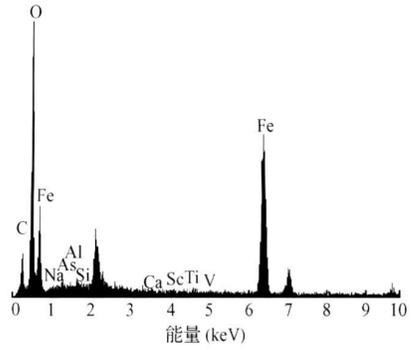


图 3 脱碱后赤泥中 Na 的含量

Fig.3 Content of Na in red mud after dealkalization

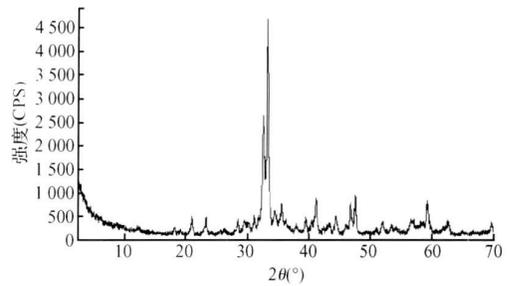


图 4 脱碱前赤泥的 XRD 图

Fig.4 XRD pattern of red mud before dealkalization

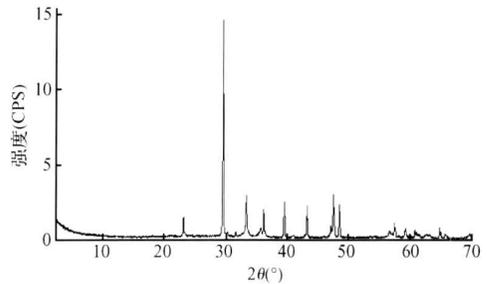


图 5 脱碱后赤泥的 XRD 图

Fig.5 XRD pattern of red mud after dealkalization

到了溶液中, 导致其比表面积、孔容和孔径都发生了不同程度的增大。

表 2 脱碱前后赤泥样品的 BET 结果

Table 2 BET results of red mud before and after dealkalization

项目	脱碱前	脱碱后
比表面积 (m <sup>2</sup> /g)	7. 1041	38 7626
孔容 (cm <sup>3</sup> /g)	0 012229	0 070949
平均孔径 (A)	68. 8565	73 2136

### 2.1.2 比表面积、孔容和孔径

单点 N<sub>2</sub>-BET 法测得的赤泥样品的比表面积、孔容和孔径结果见表 2。经实验测定, 赤泥样品的比表面积由脱碱前的 7. 1041 m<sup>2</sup> /g 增大为脱碱后的 38. 7626 m<sup>2</sup> /g 而且孔容和孔径也分别从 0. 012229 cm<sup>3</sup> /g 和 68. 8565 × 10<sup>-10</sup> m 增加到了 0. 070949 cm<sup>3</sup> /g 和 73. 2136 × 10<sup>-10</sup> m。这些结果表明, 赤泥样品经过悬浮碳化过程后, 附着碱脱离赤泥主体进入

## 2.2 正交实验结果与极差分析

表3是悬浮碳化脱碱工艺的实验结果及相应的极差分析。根据 $R$ 值的大小,影响脱碱率的4个因素按其重要性排列如下:温度 > 液固比 >  $\text{CO}_2$  通气量 > 时间。在本脱碱工艺中,提高反应温度,增大液固比,适当增加 $\text{CO}_2$  通气量和反应时间,赤泥样品中碱的去除率就会提高。

通过分析研究,确定整个碳化过程的最佳工艺参数和条件为:温度  $60^\circ\text{C}$ , 时间 1.5 h, 液固比 1Q, 通气量  $0.8 \text{ L/m}^3$ 。在该反应条件下,赤泥脱碱率可达 85%, 赤泥中的碱含量降低至 1% 以下,完全符合作为生产硅酸盐水泥基料的要求。

表3 实验结果及极差分析

Table 3 Experimental results and range analysis

实验号	脱碱条件				脱碱率 (%)
	反应温度	反应时间	液固比	$\text{CO}_2$ 通气量	
1	1	1	1	1	20.36
2	1	2	2	2	37.80
3	1	3	3	3	55.08
4	2	1	2	3	60.78
5	2	2	3	1	71.63
6	2	3	1	2	70.58
7	3	1	3	2	85.12
8	3	2	1	3	57.45
9	3	3	2	1	50.86
$M_1$	37.75	53.95	49.47	47.62	
$M_2$	67.66	55.63	49.82	63.03	
$M_3$	63.01	58.84	69.14	57.77	
$R$	29.91	4.89	19.67	15.41	

## 2.3 各因素对脱碱率的影响

### 2.3.1 温度的影响

图6是反应温度对脱碱率的影响效果图。可以看出,脱碱率随着温度的升高先增加后降低。这是因为升高温度可以加快反应速率即提高脱碱率,然而温度过高反而会减少气相反应物 $\text{CO}_2$ 在三相反应体系中的溶解量,降低了气相反应物的浓度,导致脱碱率降低。因此,反应过程中选取适当反应温度是必要的。本工艺选择反应温度为 $60^\circ\text{C}$ ,脱碱率可达 85%。

### 2.3.2 液固比的影响

液固比是衡量整个工艺合理性的一个重要经济指标。在图7中,脱碱率随液固比增加,呈先增大后

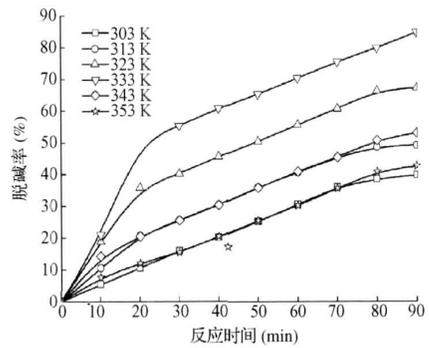


图6 温度对脱碱率的影响

Fig 6 Effect of temperature on alkali removal rate

减小的趋势,即脱碱率出现一个极大值。对于此现象,可解释为:液固比较小时,由于固相溶质浓度较大,占据了液相反应主体的大部分空间,导致气相反应物进入反应体系的难度加大,从而在一定程度上减小了气液接触的比表面积,影响了气液传质过程。液固比较大时,随搅拌进行,虽然减小了气液界面液膜侧的阻力、增大了气体向液相的传质,但由于单位反应体系体积中固相溶质浓度减少,脱碱反应速率同样会减慢。上述两种情况均会导致整个工艺脱碱率的降低。所以,选择合适的液固比是提高碱回收率的重要因素,本工艺选择液固比为 1Q。

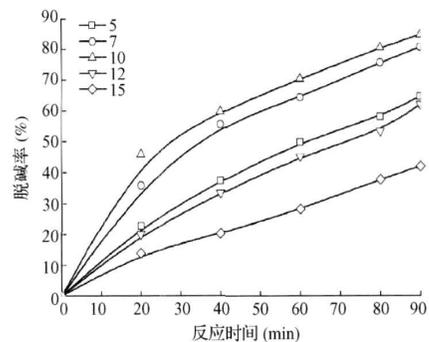


图7 液固比对脱碱率的影响

Fig 7 Effect of liquid/solid ratio on alkali removal rate

### 2.3.3 通气量的影响

图8反映了通气量对脱碱率的影响。在悬浮碳化脱碱反应过程中, $\text{CO}_2$  通入量对脱碱率也有很大影响。实验结果表明,随 $\text{CO}_2$  通入量增加,脱碱率随之增加。该现象可以用经典的“双膜理论”来解释。当通气速度大于溶解速度时,气液界面的气相一侧就会有多余还未溶解的 $\text{CO}_2$ 。此时,随着未溶

解的 CO<sub>2</sub> 的数量增加, 气膜一侧的推动力, 即 CO<sub>2</sub> 分压增大, 减少了气液界面处液膜侧 CO<sub>2</sub> 扩散阻力, 使更多的 CO<sub>2</sub> 更容易进入反应体系中进行碳化反应。但是如果通入量过大, 会导致部分 CO<sub>2</sub> 气体未及进入反应体系就跑掉了, 非但不会增加碱的脱除率反而造成了原料的浪费。因此, 选择适宜的通气量也是衡量工艺合理性的一个重要经济指标, 本工艺选择 CO<sub>2</sub> 通气量为 0.8 L/m<sup>3</sup>。

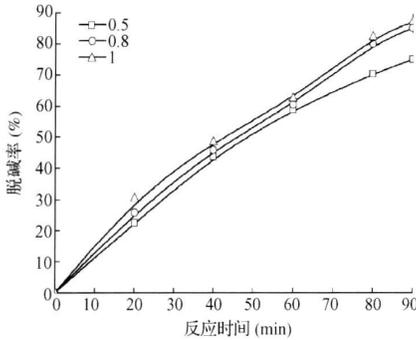


图 8 通气量对脱碱率的影响

Fig 8 Effect of CO<sub>2</sub> input on alkali removal rate

2.3.4 时间的影响

图 9 是反应时间对脱碱率的影响。由图 9 可见, 反应时间越长, 体系中的反应进行程度越完全。但在反应时间超过 1.5 h 后, 脱碱率提高并不明显。因此, 在悬浮碳化脱碱反应中, 优选 1.5 h 为最佳反应时间。

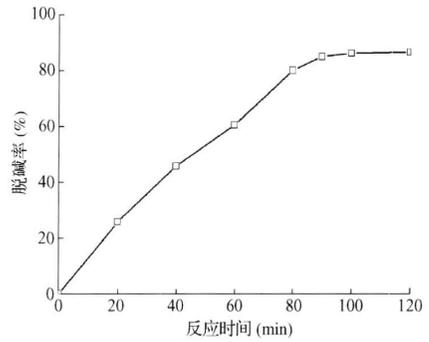


图 9 时间对脱碱率的影响

Fig 9 Effect of reaction time on a kali removal rate

2.4 赤泥脱碱原理

赤泥本身附带一定量结晶水, 经 600~700 °C 焙烧后, 结晶水被完全去除<sup>[16]</sup>。在水热反应条件下, 赤泥的附着碱溶解于反应溶液中, 并在赤泥颗粒表面与水相溶液之间形成一种亚稳动态碱溶解平衡。当 CO<sub>2</sub> 进入反应体系中, 与溶液中的碱发生反应后, 这种平衡被破坏, 造成了液固界面与溶液中碱量的浓度差, 迫使赤泥的附着碱不断进入反应体系中进行脱碱反应, 最终完成脱碱过程。

赤泥的悬浮碳化法脱碱工艺属于气、液、固三相反应, 在整个脱碱过程中, CO<sub>2</sub> 气体主要与溶液中的碱性化合物, 如铝酸钠 (Na<sub>2</sub>O · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、碳酸钠 (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)、氢氧化钠 (NaOH)、硅酸钠 (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)、铝硅酸钠 (Na<sub>2</sub>O · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 1.7SiO<sub>2</sub> · nH<sub>2</sub>O) 等发生碳化反应, 以达到脱碱的目的。在整个工艺过程中涉及到的化学反应及相应的 ΔG<sub>r</sub><sup>0</sup> 值见表 4。

表 4 脱碱反应方程式与 ΔG<sub>r</sub><sup>0</sup> 值

Table 4 Reaction equations and ΔG<sub>r</sub><sup>0</sup> values

方程编号	悬浮碳化脱碱反应	ΔG <sub>r</sub> <sup>0</sup>
(1)	Na <sub>2</sub> O · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2NaHCO <sub>3</sub>	- 230 896+ 382 646T
(2)	2NaOH + CO <sub>2</sub> = Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	- 167 047+ 133. 81T
(3)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O + SiO <sub>2</sub>	- 86 693+ 147 152T
(4)	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> = 2NaHCO <sub>3</sub>	- 84 413+ 218 148T
(5)	Na <sub>2</sub> O · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 1.7SiO <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O + 2CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O = 2NaHCO <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 1.7SiO <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O	1 075 767+ 362 999T

由表 4 可推知, 在温度 T = 348 K 以下时, 方程 (1) ~ 方程 (4) 的 ΔG<sub>r</sub><sup>0</sup> 值均小于 0, 表明在常温下, 这四种反应都能发生且较易进行。对于方程 (5) 而

言, 在温度大于 0 情况下, ΔG<sub>r</sub><sup>0</sup> 值始终大于 0, 因此该反应在常温下不会发生。实验计算了反应温度 T = 333.15 K 时, 上述各个反应的 ΔG<sub>r</sub><sup>0</sup> 值, 反应 (1)

~ (5) 的  $\Delta G_r^0$  值分别为  $-103\ 475$ 、 $-122\ 488$ 、 $-37\ 691$ 、 $-11\ 770$ 、 $1\ 196\ 646$  kJ/mol。实验通过计算  $\Delta G_r^0$  值,得到了在悬浮碳化脱碱反应过程,各碱性物质参与反应的先后顺序和难易程度。研究表明,NaOH 首先参与脱碱反应,随后依次是  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 而  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.75\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  不参与脱碱反应。

### 3 结论

本文研究探讨了碱性赤泥废弃物的常压悬浮碳化法脱碱绿色环保新工艺。详细研究考察了反应温度、时间、液固比及  $\text{CO}_2$  通气量等因素对赤泥脱碱效能的影响,确定了最佳工艺参数和技术条件。本工艺具有以下特点:

(1) 工艺将造成温室效应的  $\text{CO}_2$  用于赤泥废弃物脱碱,不仅达到“废气减排化”和“废物减量化”,而且实现双废物 ( $\text{CO}_2$  和赤泥) 的可持续综合利用;

(2) 悬浮碳化工艺属于气、液、固三相反应过程,在最佳反应条件下,该工艺可有效脱除碱性赤泥中的碱,脱除率达到 85% 以上,脱碱后的赤泥中含碱量低于 1%,符合作为生产硅酸盐水泥基料的要求;

(3) 整个工艺可实现闭路循环,反应过程不产生“三废”污染,属于绿色环保型清洁生产工艺。

### 参考文献

[1] 曹小虎. 山西铝厂赤泥堆场对地下水环境影响分析. 地下水, 2006, 28(1): 53~54

[2] 付新峰, 尹国勋, 谭利敏, 等. 中州铝厂赤泥堆放场对环境的影响及治理对策. 焦作工学院学报(自然科学版), 2003, 22(2): 136~139

[3] 丁坚平, 蔡良钧, 毛健全, 等. 扎塘赤泥库渗漏污染评价

及治理研究. 中国岩溶, 2003, 22(2): 124~129

[4] 杜长学, 彭振斌, 陈安, 等. 广西平南赤泥堆场地下水渗流特性试验研究. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(4): 74~78

[5] 姜怡娇, 宁平. 氧化铝厂赤泥的综合利用现状. 环境科学与技术, 2003, 26(1): 40~42

[6] 卜天梅, 李文化, 杨金妮, 等. 利用烧结法赤泥生产水泥的研究. 原料与品种, 2005, (2): 67~68

[7] 王立堂. 赤泥利用的有效途径. 资源利用, 1998, (8): 46~48

[8] Tsakiridis P. E., Agatzin+Leonardou S., Oustadakis P. Red mud addition in the raw meal for the production of portland cement clinker. Journal of Hazardous Materials, 2004, 116(1~2): 103~110

[9] Zhuhua Pan, Lin Cheng, Yinong Lu, et al. Hydration products of a alkali-activated slag-red mud cementitious material. Cement and Concrete Research, 2002, 32(3): 357~362

[10] 闫志勇, 张虹, 陈昌和, 等.  $\text{CO}_2$  排放导致的地球升温问题及基本技术对策. 环境科学进展, 1999, 7(6): 175~181

[11] 黄黎明, 陈康良. 二氧化碳的回收利用与捕集储存. 石油与天然气化工, 2006, 35(5): 354~358

[12] 周玮生, 柳泽幸雄. 中国未来源需求及  $\text{CO}_2$  减排技术对策的数值模拟. 世界环境, 1996, (4): 38~41

[13] 李耀刚, 王雅琼, 王克勤, 等. 烧结法赤泥脱碱过程. 化工冶金, 1998, 19(4): 309~312

[14] 王宏, 卜天梅, 白永民. 拜耳法赤泥常压添加石灰脱碱试验探索. 有色金属分析通讯, 2003, (2): 22~24

[15] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 409~412

[16] 张彦娜, 潘志华. 不同温度下赤泥的物理化学特征分析. 济南大学学报(自然科学版), 2005, 19(4): 293~297