

## 高铁三水铝石矿拜耳法溶出过程中铝针铁矿的行为

李小斌<sup>1,2</sup>, 孔莲莲<sup>1,2</sup>, 齐天贵<sup>1,2</sup>, 周秋生<sup>1,2</sup>, 彭志宏<sup>1,2</sup>, 刘桂华<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083;  
2. 中南大学 难冶有色金属资源高效利用国家工程实验室, 长沙 410083)

**摘要:** 为了查明铝针铁矿含量高的红土型铝土矿拜耳法溶出过程中氧化铝溶出率低的原因, 研究针铁矿在溶出过程中的转化规律及其对氧化铝溶出率的影响。结果表明: 在溶出温度为 110~240 °C 时, 该类型铝土矿中的铝针铁矿基本不发生转化, 其中的氧化铝难以溶出; 提高溶出温度到 260 °C 或在 240 °C 左右溶出时, 添加干矿石量 3% 的石灰可促使铝针铁矿转化为赤铁矿, 且氧化铝的溶出率随着针铁矿转化程度的增加而提高。加入非钙质添加剂也可以促使铝针铁矿在溶出过程发生结构转变, 且氧化铝几乎完全参与反应, 从而说明此类铝土矿中铝针铁矿在溶出过程中难以转变为红土型铝土矿中氧化铝溶出率低的重要原因。

**关键词:** 三水铝石矿; 高铁; 溶出; 铝针铁矿

中图分类号: TF821

文献标志码: A

## Effect of alumogoethite in Bayer digestion process of high-iron gibbsitic bauxite

LI Xiao-bin<sup>1,2</sup>, KONG Lian-lian<sup>1,2</sup>, QI Tian-gui<sup>1,2</sup>, ZHOU Qiu-sheng<sup>1,2</sup>, PENG Zhi-hong<sup>1,2</sup>, LIU Gui-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
2. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Refractory Non-ferrous Metals Resources,  
Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The transformation law of goethite and its effect on the alumina recovery were investigated in order to determine the reason of low alumina recovery in Bayer digestion process of gibbsite bauxite with high alumogoethite content. The results show that the goethite present in this kind of bauxite has no obvious change in the digestion temperature range of 110 °C to 240 °C with low alumina recovery. And alumogoethite can be transformed to hematite by increasing digestion temperature to 260 °C or adding lime of 3% of dry ores added at about 240 °C, and the alumina digestion rate increases with the increase of the goethite conversion degree. Adding non-calcareous additives in the re-digestion process of red mud containing goethite can promote the structure transformation of alumogoethite and thus alumina almost reacts completely. The transition of alumogoethite into other forms in Bayer digestion process is important for alumina recovery for lateritic bauxite.

**Key words:** gibbsite bauxite; high-iron; digestion; alumogoethite

针铁矿是铝土矿中常见的主要含铁矿物之一, 在以三水铝石和针铁矿为主要矿物的红土型铝土矿中, 铝类质同象置换针铁矿中的铁而形成铝针铁矿的现象较普遍<sup>[1]</sup>。我国广西中部的贵港、宾阳和横县等地已探明的超过 5 亿 t 的高铁三水铝石型铝土矿<sup>[2]</sup>是典型

的红土型铝土矿, 它具有高铁、高铝的特点, 是我国铁、铝冶炼重要的潜在资源之一。为充分提取该类矿石中的铁和铝, 国内外开展了大量的研究工作。有研究通过化学法<sup>[3]</sup>和生物法<sup>[4]</sup>等先富集铝土矿中的铁, 再进行冶炼; 也有人提出了先将高铁三水铝石型铝土矿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274242)

收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-07-19

通信作者: 齐天贵, 讲师, 博士; 电话: 0731-88830453; E-mail: qitiangui@csu.edu.cn

在高炉(或电炉)内冶炼提铁，然后对炉渣进行浸出提取氧化铝的“先铁后铝”工艺<sup>[5]</sup>；而基于该铝土矿中三水铝石在低温下易溶出的特点，提出的先将矿石经拜耳法溶出分离大部分铝、随后从溶出赤泥中回收铁的“先铝后铁”工艺<sup>[6-7]</sup>应该更为合理，因而受到广泛关注，但该类型铝土矿在拜耳法溶出过程中氧化铝的溶出率(约 55%)远低于其理论溶出率(70%左右)<sup>[8]</sup>，导致此工艺难以实际应用。为明确此类铝土矿中氧化铝溶出率低的原因，陈世益等<sup>[9-10]</sup>进行了相关研究，通过 XRD 和 FTIR 谱中针铁矿的衍射峰和振动峰的位移来计算针铁矿中铝的取代率，认为应归因于矿石中针铁矿中的部分铁被铝的取代，即所谓铝针铁矿。但由于很多因素都可能导致衍射峰和振动峰发生位移，因此，要确定铝针铁矿的存在及其影响还需更直接的证据。由于铝针铁矿的转化是其中铝溶出的前提，MURRAY 等<sup>[11]</sup>曾研究针铁矿的水热转化过程，而 SUSS 和 MALTZ<sup>[12]</sup>则研究铝针铁矿在铝酸钠溶液中浸出时的转化行为以及硅、钛、钙化合物对其转变为赤铁矿的影响，但遗憾的是，均未研究(铝)针铁矿的转化对矿石中氧化铝溶出的影响。而 MALTS 和 MOZZHUKHINA<sup>[13]</sup>对几内亚高铝针铁矿含量的铝土矿进行了溶出试验，结果表明提高溶出温度和添加石灰可以改善其溶出过程的技术指标，但添加大量石灰将导致赤泥量和铝损失量增加。因此，进一步明确铝针铁矿及其转化对矿石中氧化铝溶出过程的影响，寻找其他非钙添加剂促进铝针铁矿的转化，对于优化和强化此类铝土矿的溶出是非常有意义的。为此，本文作者试图通过研究溶出过程中铝针铁矿转化与氧化铝溶出率之间的对应关系，阐明广西高铁三水铝石矿中氧化铝难溶出的内在原因，尝试通过添加非钙物质促进针铁矿的转变，为此类高铁三水铝石矿的合理利用提供理论基础。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

试验所用原料为广西横县高铁三水铝石型铝土矿，X 射线衍射及半定量分析表明：该矿石的主要物相为三水铝石、针铁矿及赤铁矿(含量分别为 40%、20%、25%)；XRD 衍射谱中除较弱的伊利云母、高岭石的特征峰外，无其他硅矿物的特征峰<sup>[14]</sup>。该铝土矿的化学成分分析结果如表 1 所列。

由表 1 可知，该矿石属高铁低铝硅比三水铝石型铝土矿，铝硅比仅为 3.37，根据铝硅比计算得到该矿

表 1 高铁三水铝石矿化学成分

Table 1 Chemical compositions of gibbsitic bauxite with high iron content (mass fraction, %)

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	lg(loss)
29.46	8.73	42.53	1.73	0.056	0.043	0.28	0.48	16.69

石中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的理论溶出率为 70.3%。

实验用铝酸钠循环母液采用工业氢氧化铝(Al(OH)<sub>3</sub>，≥98%)和工业氢氧化钠(NaOH，≥96.0%)在不锈钢容器中加热溶解反应后配制；石灰采用分析纯氢氧化钙在 850 °C 煅烧 2 h 制得。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 溶出实验

将铝土矿用振动磨磨细至粒度小于 143 μm，根据拜耳法溶出配料分子比称取铝土矿至 150 mL 钢弹中，同时将 100 mL 由工业纯 NaOH 和 Al(OH)<sub>3</sub> 配制而成的铝酸钠溶液加入钢弹中，再加入 2 个 d15 mm 和 4 个 d 8 mm 的钢球以加强搅拌，钢弹密封后置于已预热至实验设定温度的 DY-8 型低压群釜(甘油为加热介质)或 XYF-6 型钢弹型高压溶出装置(熔盐为加热介质)中进行溶出。溶出至预定时间后，取出钢弹并快速冷却，溶出浆液经抽滤、洗涤获得溶出液和赤泥；溶出液经稀释定容后分析其中的氧化铝、苛性碱和二氧化硅浓度，湿赤泥置于(100±5) °C 干燥箱中烘干 24 h 后称取质量并分析其化学成分。

#### 1.2.2 分析方法

溶出液中氧化铝、苛性碱浓度及赤泥中氧化铝含量采用容量法测定，二氧化硅含量通过 7230G 型分光光度计采用硅钼蓝比色法测定，赤泥物相采用 Rigaku-TTRIII 型 X 射线衍射仪分析，红外光谱采用压片法在 NICOLET-6700 型傅里叶红外光谱仪上进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铝土矿中氧化铝溶出性能

该铝土矿属三水铝石型铝土矿，文献[5,8,9-10]中对其低温(<145 °C)溶出条件下氧化铝的溶出性能进行了较多研究，认为其低温溶出性能较差。为明确该矿中氧化铝的溶出行为，对其在 100~240 °C 溶出温度下的溶出性能进行了研究，结果如表 2 所示。

定义表 2 中 110 °C 下溶出 10 min 所得赤泥为常压溶出赤泥(下同)。由表 2 可知，在实验溶出温度范

表2 溶出条件对氧化铝溶出率的影响

Table 2 Influence of digestion conditions on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  digestion rate

Temperature/°C	Spent liquor		$\alpha'_k$	$Q/\text{g}$	Time/min	$\text{Al}_2\text{O}_3$ recovery/%	Relative digestion rate/%
	$\rho(\text{Na}_2\text{O}_k)/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\alpha_k$					
110	155.44	3.20	1.6	28.82	10	56.7	80.6
120	155.44	3.20	1.6	28.82	10	49.9	70.9
140	155.44	3.20	1.6	28.82	10	46.0	65.4
180	222.83	2.84	1.6	31.99	40	56.7	80.5
236	213.50	3.07	1.6	43.34	20	52.8	75.1
236	213.50	3.07	1.6	43.34	40	52.8	75.1
236	213.50	3.07	1.6	43.34	60	52.8	75.1
236	225.56	3.06	2.0	20.34	30	56.0	79.6

$\alpha_k$ : Molecule ratio of  $\text{Na}_2\text{O}_k$  to  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\alpha'_k$ : Predetermined  $\alpha_k$  of digestion liquor;  $Q$ : Bauxite amount per 100 mL spent liquor

围内, 提高溶出温度并不能大幅提高氧化铝的溶出率, 在配料分子比为 1.6~2.0 的条件下, 矿石中氧化铝的实际溶出率为 46.0%~56.7%, 这与文献报道中该矿石的溶出性能一致。表 2 中在较高溶出温度和母液碱浓度下, 氧化铝的相对溶出率也仅为 75%~80%, 说明即使该铝土矿中, 所有硅矿物在溶出过程都是活性的, 矿石中仍有至少 20% 的可溶氧化铝未能溶出。因此, 有必要对矿石中这部分氧化铝难以溶出的原因进行进一步阐明。

## 2.2 针铁矿对氧化铝溶出的影响

为明确赤泥中未溶出氧化铝的存在形态, 对该铝土矿不同溶出条件下所得赤泥进行了物相分析, 其结果如图 1 所示。

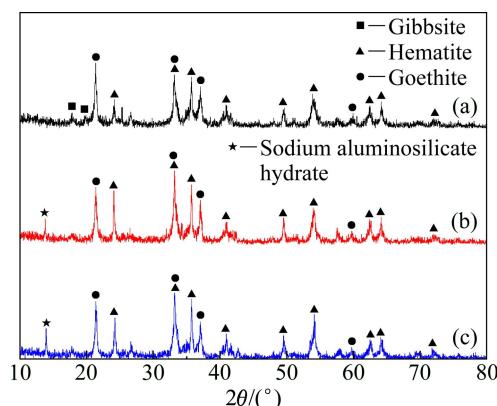


图1 不同条件下溶出赤泥的XRD谱

Fig. 1 XRD patterns of red mud under different conditions: (a) Digestion temperature 110 °C, 10 min; (It was defined as atmospheric pressure red mud) (b) Digestion temperature 236 °C, 30 min; (c) Re-digestion of atmospheric pressure red mud, 236 °C, 30 min

由图 1 可知, 无论是常压溶出赤泥还是高压溶出赤泥, XRD 谱中表明其主要物相为赤铁矿和针铁矿, 无明显的三水铝石的衍射峰, 除在高压溶出赤泥中有少量钠硅渣存在外, 赤泥物相分析中未发现其它单独的含铝物相, 说明矿石中的三水铝石在溶出过程中已溶出完全。研究表明<sup>[11]</sup>, 赤铁矿在拜耳法溶出过程中基本不发生转变, 并对氧化铝的溶出无显著影响, 而针铁矿在适当溶出条件下可转化为赤铁矿。为查明针铁矿对三水铝石溶出的影响, 研究纯针铁矿存在时三水铝石的溶出性能, 其结果如表 3 所列。

表3 针铁矿对三水铝石溶出过程的影响

Table 3 Influence of goethite on digestion process of gibbsite

$m(\text{FeOOH})/\text{g}$	Time/min	$\text{Al}_2\text{O}_3$ recovery/%
0	20	89.1
49.5	20	89.8
0	40	92.6
49.5	40	94.0

Temperature 236 °C; Spent liquor:  $\rho(\text{Na}_2\text{O}_k)=213.5 \text{ g/L}$ ,  $\alpha_k=3.07$ ;  $\alpha'_k=1.6$ ;  $Q=11.81 \text{ g per 100 mL spent liquor}$

表 3 表明, 单纯的针铁矿对三水铝石的溶出过程无明显影响, 即高铁三水铝石矿中单独的纯针铁矿并不会影响氧化铝的溶出率。有研究指出<sup>[10]</sup>, 针铁矿中铁被铝类质同象置换后, 针铁矿的晶格结构会发生变化, 引起针铁矿 X 射线衍射峰位置的偏移, 但这种偏移常常比较细微而难以与纯针铁矿的峰进行分辨。因此, 据图 1 和表 3 的试验结果推测, 在拜耳法溶出过程中未能溶出的铝应存在于针铁矿晶格中, 即以铝针铁矿的形态存在。铝针铁矿中的  $\text{Al}^{3+}$  以硬铝石分子结构进入矿物晶格, 在矿物晶格被破坏之前不能被溶出<sup>[9]</sup>。

### 2.3 温度对针铁矿转化及氧化铝溶出的影响

为使铝针铁矿中的铝能充分溶出,对该铝土矿中(铝)针铁矿在溶出过程的转化及其对氧化铝溶出率的影响做了进一步研究。铝土矿中的(铝)针铁矿在高温溶出条件下( $220\sim260^{\circ}\text{C}$ )可转化为赤铁矿<sup>[11~12]</sup>,将溶出温度提高至 $260^{\circ}\text{C}$ ,对图1(a)所示的常压溶出赤泥进行再溶出,溶出残渣的物相变化如图2所示。

比较图1和2可知,当溶出温度升高至 $260^{\circ}\text{C}$ ,时间延长至60 min时,残渣中针铁矿的衍射峰已经消失,而赤铁矿的衍射峰显著增强,说明该条件下矿石中的针铁矿已转化为赤铁矿。在高温溶出条件下,矿石中的钛矿物参与反应对氧化铝的溶出及针铁矿的转化不利,添加石灰可降低或消除钛矿物对氧化铝溶出的影响,对比图2(a)和(b)可以看出,高温下温度是影响针铁矿转化速度的主要因素,石灰或钛矿物对其转化的影响均不明显。常压溶出赤泥在 $260^{\circ}\text{C}$ 下再溶出过程中,铝和硅的溶出反应规律如表4所列。

由表4可知,常压溶出赤泥经 $260^{\circ}\text{C}$ 的高温再次溶出后,氧化铝总溶出率显著升高并达到理论溶出率,即除了理论上硅矿物全部形成钠硅渣造成的氧化铝损失外,矿石中的其它氧化铝全部进入溶出液中。表4中常压溶出赤泥经加入少量石灰再溶出,氧化铝溶出率略有降低,这主要是形成了少量水化石榴石所致。结合图2和表4中的结果可知,当赤泥中针铁矿在高温下完全转化为赤铁矿后,矿石中可溶的氧化铝几乎全部参与溶出反应,即(铝)针铁矿结构被破坏有利于氧化铝的溶出,说明该铝土矿中部分铝以铝针铁矿形式存在。

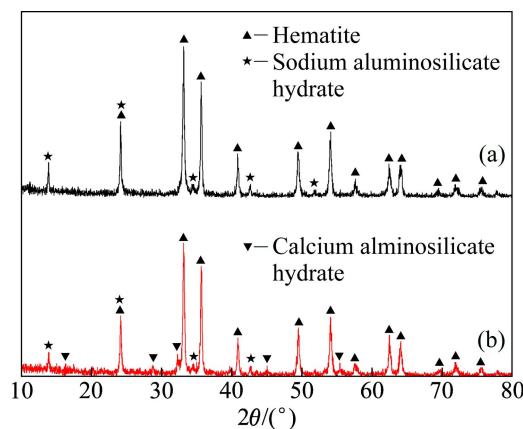


图2 高温溶出常压赤泥所得残渣的XRD谱

**Fig. 2** XRD patterns of residue obtained by re-digesting atmospheric pressure red mud at elevated temperature: (a) Without lime; (b) Adding 3% lime ( $Temperature 260^{\circ}\text{C}$ ; Spent liquor:  $\rho(\text{Na}_2\text{O}_k)=236.22 \text{ g/L}$ ,  $\alpha_k=3.07$ ; Time 1 h;  $\alpha_k'=2.0$ )

表4 高温下针铁矿转化对氧化铝溶出的影响

**Table 4** Effect of transforming of goethite on digestion process of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  at elevated temperature

Red mud	A/S	Total $\text{Al}_2\text{O}_3$ recovery/%	Relative digestion rate/%
Digestion at $110^{\circ}\text{C}$	1.64	56.7	80.6
Re-digestion at $260^{\circ}\text{C}$	0.98	71.02	101
Re-digestion at $260^{\circ}\text{C}$ with 3% lime	1.02	69.73	99.19

### 2.4 添加剂对针铁矿转化及氧化铝溶出的影响

铝针铁矿发生转化是其中铝得以溶出的基础,高温( $>260^{\circ}\text{C}$ )虽可使铝针铁矿发生转化,但其不仅造成能耗的增加,也使硅矿物反应活性增加,不利于该矿石中铝与铁的高效分离。为使铝针铁矿能在较为温和的溶出条件下发生转化,实验研究石灰和非钙质添加剂存在时铝针铁矿的转化规律及其对氧化铝溶出的影响,其中非钙质添加剂不含钙,不会导致渣量的增加和铝的损失,实验结果如表5和图3所示。

表5 添加剂对常压赤泥再溶出过程的影响

**Table 5** Effect of additives on re-digestion process of atmospheric pressure red mud

Additive	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> recovery in re-digestion process/%	Total Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> recovery/%	Relative digestion rate/%
3% lime	9.06	55.26	78.61
Non-calcareous additive	14.42	57.89	82.34
3% lime and non-calcareous additive	23.07	62.15	88.41

Temperature  $236^{\circ}\text{C}$ ; Spent liquor:  $\rho(\text{Na}_2\text{O}_k)=234.1 \text{ g/L}$ ,  $\alpha_k=3.0$ ;  $\alpha_k'=1.6$ ;  $Q(\text{atmospheric pressure red mud})=40.34 \text{ g per 100 mL}$  spent liquor; Additives without calcium

将图3中赤泥的物相与图1(b)比较分析可知,在相同溶出温度下,石灰、非钙质添加剂等都有利于矿石中铝针铁矿的转化,非钙质添加剂对针铁矿转变的促进作用强于石灰的促进作用。在溶出过程加入非钙质添加剂时,残渣XRD谱中出现磁铁矿的特征峰,

说明非钙质添加剂也可使铝针铁矿发生转变, 使其结构重组, 释放出其中的铝。将表 5 中氧化铝的溶出率与图 3 中赤泥的物相进行对比可以看出, 赤泥中针铁矿衍射峰越弱, 氧化铝溶出率越高, 即氧化铝溶出率随针铁矿转变程度的增加而升高。

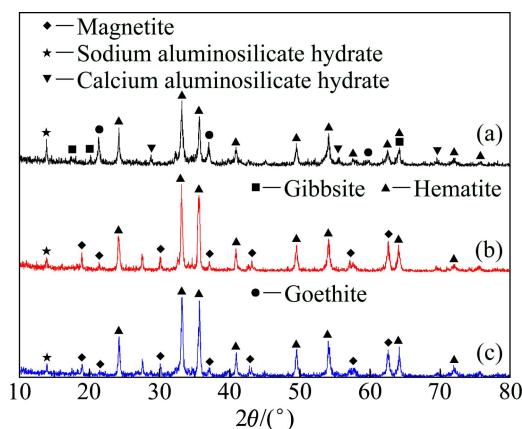


图 3 加入不同添加剂时高压再溶出常压赤泥所得残渣的XRD谱

**Fig. 3** XRD patterns of residue from high pressure re-digestion of atmospheric digestion red mud with different additives: (a) 3% lime; (b) Non-calcareous additive; (c) 3% lime and non-calcareous additives

## 2.5 赤泥的红外光谱分析

为进一步确定该类型铝土矿中各矿物在溶出过程中的变化, 将部分溶出赤泥进行红外光谱分析, 结果如图 4 所示。

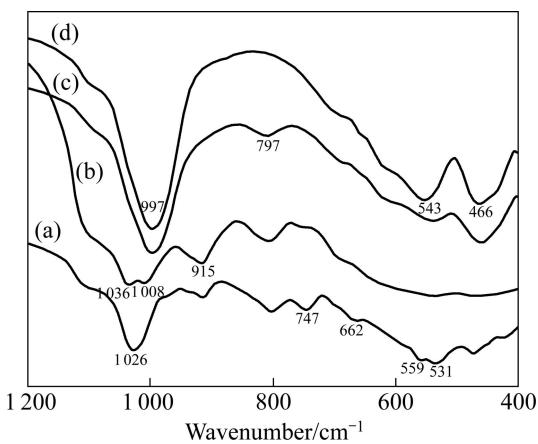


图 4 铝土矿及溶出赤泥或残渣的IR谱

**Fig. 4** FTIR spectra of bauxite, red mud and residue: (a) Bauxite; (b) Red mud obtained by digesting bauxite at 110 °C; (c) Red mud obtained by digesting bauxite at 236 °C; (d) Residue obtained by re-digesting atmospheric pressure red mud at 260 °C

将前面的溶出实验结果与图 4 对比可以看出, 铝土矿经常压溶出后, 赤泥红外谱线中与三水铝石相关的吸收峰(1 026、662、559 和 531  $\text{cm}^{-1}$ )<sup>[15]</sup>消失, 也说明三水铝石已溶出。随着溶出温度的升高, 赤泥的红外谱线中 997~1 008  $\text{cm}^{-1}$  处代表 Si—O—Al 的吸收峰增强, 这与溶出赤泥中钠硅渣含量随溶出温度的升高而增加相符; 915  $\text{cm}^{-1}$  处代表铝的含氧羟氧化物中—OH 弯曲振动的吸收峰<sup>[16]</sup>随着 797  $\text{cm}^{-1}$  处代表 Fe—OH 的吸收峰<sup>[17]</sup>的减弱而减弱, 这与矿石中铝的含氧羟氧化物存在于针铁矿中并以铝针铁矿形态存在有关, 也证明铝针铁矿中的铝随针铁矿结构的破坏而溶出。常压赤泥经过 260 °C 再溶出所得赤泥的红外谱线中只剩下 Si—O—Al 的振动吸收峰和赤铁矿在 543 和 466  $\text{cm}^{-1}$  处的特征峰, 797  $\text{cm}^{-1}$  处 Fe—OH 的振动峰消失, 说明此时赤泥中的针铁矿已全部转化, 这与XRD 谱的结果相吻合。

## 3 结论

1) 高铁三水铝石矿拜耳法溶出过程中, 矿石中氧化铝的反应率随(铝)针铁矿的转变程度的增加而升高, 提高溶出温度到 260 °C 或在约 240 °C 溶出时添加干矿石量的 3% 的石灰均可促进铝针铁矿转化为赤铁矿, 从而提高氧化铝的反应率, 氧化铝最终相对溶出率可达 100%。

2) 236 °C 下溶出高铁三水铝石矿时, 加入非钙质添加剂亦可诱导(铝)针铁矿的转变, 使其发生结构重组, 从而提高氧化铝的溶出率。

## REFERENCES

- [1] 赵恒勤, 赵新奋, 胡四春, 马化龙. 我国三水铝石铝土矿的矿物学特征研究[J]. 矿产保护与利用, 2008(6): 40~44.  
ZHAO Heng-qin, ZHAO Xin-fen, HU Si-chun, MA Hua-long. Study on the mineralogical characteristics of gibbsite bauxite in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2008(6): 40~44.
- [2] 高建阳, 朱军, 祝凤美, 杨丛林. 富铁三水铝土矿中铁矿物的反应特性[J]. 矿业工程, 2008, 6(4): 39~41.  
GAO Jian-yang, ZHU Jun, ZHU Feng-mei, YANG Con-lin. Reaction characteristics of iron minerals in gibbsitic bauxite rich in iron[J]. Mining Engineering, 2008, 6(4): 39~41.
- [3] VRACAR R Z, VUKCEVIC S M, PAREZANOVIC I S, KAMBEROVIC Z J. The study of iron chlorination from bauxite for its enrichment[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2001, 30(2): 84~90.

- [4] PAPASSIOPI N, VAXEVANIDOU K, PASPALIARIS I. Effectiveness of iron reducing bacteria for the removal of iron from bauxite ores[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(1): 25–31.
- [5] 唐向琪, 陈谦德. 贵港式三水铝石矿综合利用方案比较[J]. 轻金属, 1995(2): 1–6.  
TANG Xiang-qi, CHEN Qian-de. Scheme comparison of Guigang gibbsite multipurpose utilization[J]. Light Metals, 1995(2): 1–6.
- [6] LI Xiao-bin, XIAO Wei, LIU Wei, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong, ZHOU Qiu-sheng, QI Tian-gui. Recovery of alumina and ferric oxide from Bayer red mud rich in iron by reduction sintering[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(5): 1342–1347.
- [7] LI Guang-hui, SUN Na, ZENG Jing-hua, ZHU Zhong-pin, JIANG Tao. Reduction roasting and Fe-Al separation of high iron content gibbsite-type bauxite ores[C]// Warrendale PA: TMS, 2010: 14–18.
- [8] 梅贤功. 广西高铁三水型铝土矿开发利用工艺流程概述[J]. 轻金属, 1993(2): 12–17.  
MEI Xian-gong. The summary of development utilization technological process of high iron content gibbsite-type bauxite from Guang-xi[J]. Light Metals, 1993(2): 12–17.
- [9] 陈世益. 广西铝针铁矿的研究及其意义[J]. 广西地质, 1997, 10(2): 21–24.  
CHEN Shi-yi. The study of alumogoethite from Guangxi and its significance[J]. Guangxi Geology, 1997, 10(2): 21–24.
- [10] 陈世益, 周芳. 广西贵港三水型铝土矿针铁矿中铝的类质同象转换[J]. 中南矿冶学院学报, 1993, 24(3): 283–288.  
CHEN Shi-yi, ZHOU Fang. Isomorphous substitution of aluminium in goethite of Guigang gibbsitic bauxite from Guangxi[J]. Journal of Central South University of Mining and Metallurgy, 1993, 24(3): 283–288.
- [11] MURRAY J, KIRWAN L, LOAN M, HODNETT B K. In-situ synchrotron diffraction study of the hydrothermal transformation of goethite to hematite in sodium aluminate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2009, 95(3/4): 239–246.
- [12] SUSS A G, MALTZ N S. Aluminium and chromium containing goethites: Composition, properties, behaviour in soda aluminate liquors in presence of silicon, titanium and calcium compounds[C]//Warrendale PA: TMS, 1991: 1343–1347.
- [13] MAL'TS N S, MOZZHUKHINA L I. High-temperature leaching of bauxites with a high concentration of aluminogoethite [J]. Tsvetnye Metally, 1981(11): 6–9. (in Russian)
- [14] 张志强. 还原烧结高铁含铝物料综合提取铝和铁[D]. 长沙: 中南大学, 2009: 10–11.  
ZHANG Zhi-qiang. Treatment of high iron Al-containing resources by reductive sintering to recover Al and Fe comprehensively[D]. Changsha: Central South University, 2009: 10–11.
- [15] 刘才群. 用红外光谱法研究铝矾土矿物[J]. 中国陶瓷, 1994(1): 12–16.  
LIU Cai-qun. A study on bauxite clay mineral with infrared spectrometry[J]. China Ceramics, 1994(1): 12–16.
- [16] FROST R, RUAN H, KLOPROGGE T. Comparison of the Raman spectra of bayerite, boehmite, diaspore and gibbsite[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2001, 32(9): 745–750.
- [17] MOHAPATRA M, ROUT K, MOHAPATRA B K, ANAND S. Sorption behavior of Pb(II) and Cd(II) on iron ore slime and characterization of metal ion loaded sorbent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166(2/3): 1506–1513.

(编辑 李艳红)