

## 高铝褐铁矿铝铁分离新工艺及其机理

李光辉, 周太华, 刘牡丹, 姜涛, 范晓慧

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 系统地研究高铝褐铁矿工艺矿物学特性, 开发钠盐焙烧—溶出铝铁分离新工艺, 运用 XRD 和 SEM 等分析铝铁的分离机理。结果表明: 铝主要呈微细颗粒嵌布于褐铁矿中或以类质同象形式存在于针铁矿中, 采用常规的磁选、浮选和磁化焙烧等工艺不能有效地分离铝铁; 采用钠盐焙烧—溶出铝铁分离新工艺, 当焙烧温度为 1 000 °C, 焙烧时间为 10 min, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 质量分数为 14.0% 时, 可制备全铁品位 63.21%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 2.13% 的铁精矿, 有效实现铝铁分离; 原矿中的铝经钠盐焙烧后转变为铝硅酸钠、铝酸钠、 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 铝酸钠、铝硅酸钠经溶出后被脱除, 残留在铁精矿中的铝主要为呈微细颗粒嵌布在铁矿物中的  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

**关键词:** 高铝褐铁矿; 焙烧; 溶出; 脱铝

中图分类号: TD 924.1

文献标识码: A

## Novel process and mechanisms of aluminum-iron separation of high-aluminum limonite ore

LI Guang-hui, ZHOU Tai-hua, LIU Mu-dan, JIANG Tao, FAN Xiao-hui

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** A novel process of removal aluminum from the high aluminum limonite ore by sodium-salt-added roasting-leaching was developed based on the investigation on properties of mineralogy. And the mechanism of aluminum-iron separation was studied by XRD and SEM. The results show that aluminum minerals are mainly dispersed among the iron ore as a manner of superfine grains or scattered into the iron minerals in isomorphism, thus magnetic separation, floatation and magnetized roasting are unable to remove aluminum from the ore effectively. Aluminum can be removed from the ore by sodium-salt-added roasting followed leaching processing, and the iron concentrate with the iron grade of 63.21% and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content of 2.13% can be obtained under the conditions of roasting temperature of 1 000 °C, roasting time of 15 min and mass fraction of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> of 14.0%. Aluminum in the ore is transformed to sodium aluminate, sodium aluminosilicate and  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, among which sodium aluminate and sodium aluminosilicate can be leached by water and acid solution in turn, while  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> remains in iron concentrate as a manner of superfine grains.

**Key words:** high-aluminum limonite; roasting; leaching; removing aluminum

近年来, 经济的快速发展推动了我国钢铁工业持续高速增长, 铁矿石供求矛盾日益突出<sup>[1]</sup>。而我国铁矿石富矿少, 贫矿多, 高品质和易选的铁矿资源逐渐减少, 国内钢铁工业不得不更多的依赖进口铁矿以满足生产需求<sup>[2]</sup>。自 2003 年以来, 我国对进口铁矿石的依赖度已达 50% 左右, 再加上铁矿石价格连年持续上

涨, 这给我国钢铁工业乃至整个国民经济的安全带来重大隐患<sup>[3-4]</sup>。因此, 迫切需要依靠技术进步最大限度地开发利用低品位复杂难选铁矿石资源, 以保障钢铁工业持续稳定发展<sup>[5]</sup>。

高铝褐铁矿是一类典型的复杂难处理铁矿石, 在我国广西以及毗邻的东南亚国家等均有较大储量, 因

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50725416)

收稿日期: 2008-05-07; 修订日期: 2008-08-01

通讯作者: 李光辉, 副教授, 博士; 电话: 0731-8830542; E-mail: liguangh@mail.csu.edu.cn

其  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高,若直接作为炼铁原料,会导致炉渣流动性变差、脱硫能力下降、焦比升高、高炉操作困难<sup>[6-7]</sup>。但褐铁矿储量丰富,价格相对低廉,仍是一种比较重要的铁矿资源<sup>[8]</sup>。为有效降低褐铁矿中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量,国内外就高铝铁矿的铝铁分离开展研究,已基本形成 3 种典型工艺: 1) 先选别,后冶炼,即先采用物理选矿方法选出高品位的铝精矿和铁精矿,然后从各自的精矿中提取铝和铁<sup>[9-10]</sup>。这种方法适用于处理结构简单的含铝铁矿石,对于铝铁嵌布关系复杂,单体解离性能差的矿石作用不明显; 2) 先铝后铁,即拜耳法溶出铝—赤泥回收铁工艺,该工艺要求矿中有效氧化铝( $\text{AAI}_2\text{O}_3$ )/活性氧化硅( $\text{RSiO}_2$ )高,同时赤泥回收铁的经济效益难以保证<sup>[11-12]</sup>; 3) 先铁后铝,即高炉或者电炉冶炼—炉渣浸出提铝工艺,该工艺可有效实现铝铁分离,但存在能耗高、造渣困难、炉渣溶出困难等问题<sup>[13-14]</sup>。由此可见,由于高铝褐铁矿石内矿物嵌布关系复杂,目前又缺少系统地研究,因而尚未得到合理有效利用,基本属于呆滞矿产资源。

本文作者在系统研究某高铝褐铁矿工艺矿物学特性的基础上进行了铝铁分离研究,开发了钠盐焙烧—溶出脱铝新工艺,实现了铝铁高效分离,为难处理高铝铁矿石资源的开发与综合利用提供新的有效途径。

## 1 实验

### 1.1 实验方法

铝铁分离实验主要包括造球、焙烧和浸出 3 个主要环节。实验时,将原矿细磨至粒度小于  $74\ \mu\text{m}$  占 80%,然后与无水  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  按一定比例(质量分数)混匀,在圆盘造球机内造球,取粒度为 8~12 mm 的合格球团做为焙烧原料。焙烧实验在中南大学自行设计建造的实验型链篦杯上进行,按拟定温度和时间完成球团的干燥与焙烧后,球团自然冷却,破碎、磨矿至 80% 粒度小于  $74\ \mu\text{m}$  的作为溶出试验原料。

焙烧矿的溶出脱铝包括水浸和酸浸两段,浸出装置采用中南大学自行设计制造的 DY8 群釜,其结构参考文献<sup>[15]</sup>。水浸温度  $60\ ^\circ\text{C}$ ,浸出时间 5 min,液固比 5:1,搅拌速度 60 r/min,反应结束后进行固液分离,所得滤饼再进行第二段酸浸;酸浸温度  $60\ ^\circ\text{C}$ ,浸出时间 15 min,稀硫酸浓度为 4.5%(质量分数),液固比 5:1,搅拌速度 60 r/min,反应结束后,进行固液分离,滤渣即为铁精矿。铁精矿经干燥取样,分析 TFe 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量,以 TFe 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量作为主要评价指标。

### 1.2 原料性能

实验所用高铝褐铁矿的主要化学成分如表 1 所列。由表 1 可看出,原料铁品位中等,全铁含量为 48.92%;  $\text{SiO}_2$  含量为 4.24%; 烧损较高,含量为 11.33%,但其氧化铝含量达 8.16%,远高于炼铁原料的要求,因此必须提高铁品位,降低氧化铝含量,才能满足炼铁工业生产的要求。

表 1 原料的主要化学成分

Table 1 Main composition of raw ore (mass fraction, %)

TFe	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	P	S	LOI
48.920	8.160	4.240	0.680	0.015	0.048	0.110	11.330

LOI is loss of ignition.

采用 X 射线衍射技术对原矿的物相组成进行了分析,结果如图 1 所示。

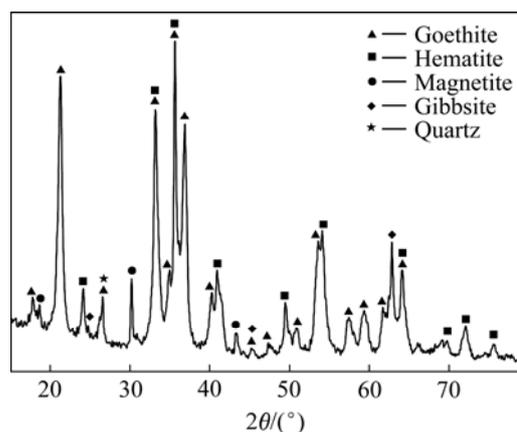


图 1 原矿的 XRD 谱

Fig.1 XRD pattern of raw ore

XRD 结果表明,原矿中含铁矿物以针铁矿和赤铁矿为主,其次是磁铁矿;含铝矿物主要是三水铝石;含硅矿物主要为石英。

为进一步确定矿石中铝的赋存状态及其与铁之间的嵌布关系,进行了化学物相分析及扫描电镜分析,结果见表 2 和图 2。

表 2 原矿中铝的化学物相及分布

Table 2 Chemical phases and distributions of aluminum in raw ore

Phase	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$
Gibbsite	2.80
Diaspore	1.70
Iron minerals	3.30
Silicates	0.36
Total	8.16

从表 2 可知, 原矿中主要载铝矿物为三水铝石、一水硬铝石和铁矿物, 其  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量分别为 2.80%、1.70% 和 3.30%, 赋存于硅酸盐矿物中的铝相对较少。

从图 2 可知, 原矿中铝主要以两种形式产出: 一是晶形完整, 呈微细粒包裹体嵌布在褐铁矿中或沿褐铁矿边缘镶嵌(图 2(c)中的白色颗粒), 这主要是水铝石(三水铝石和一水硬铝石), 粒度为 10~50  $\mu\text{m}$ , 其 X 射线能谱分析如图 3 所示; 二是呈点状均匀分散于铁矿物中(见图 2(c)中的白色区域), 这主要是以类质同象形式存在于铁矿物中的铝, 其 X 射线能谱分析如图 4 所示。从图 3 和 4 可知, 水铝石中含有铁, 铁矿物中含有铝, 铝铁相互嵌布, 这将不利于铝铁分离。

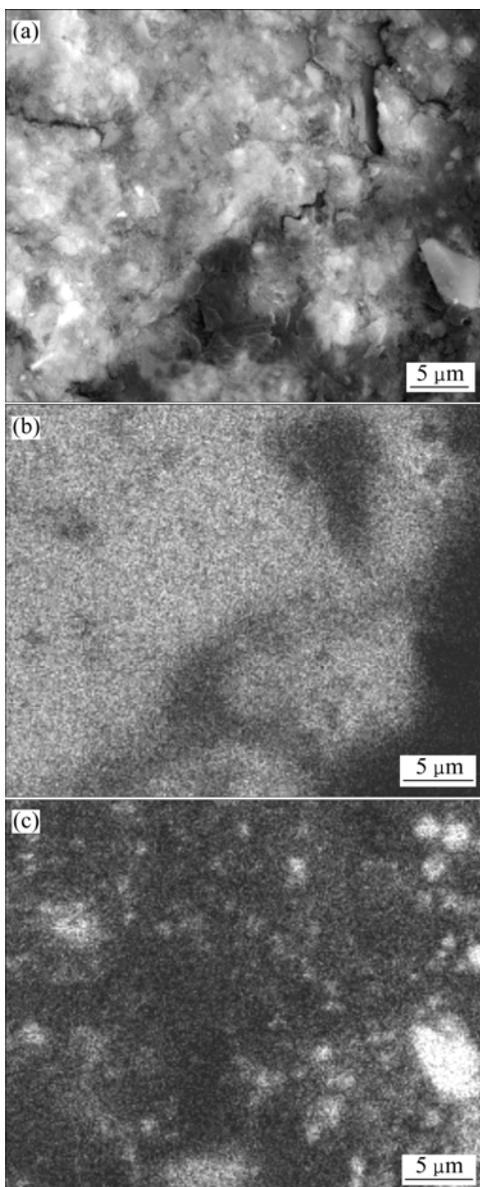


图 2 原矿的 SEM 像

**Fig.2** SEM images of raw ore: (a) Electronic image of backscattering; (b) Line-by-line scanning image of iron; (c) Line-by-line scanning image of aluminum

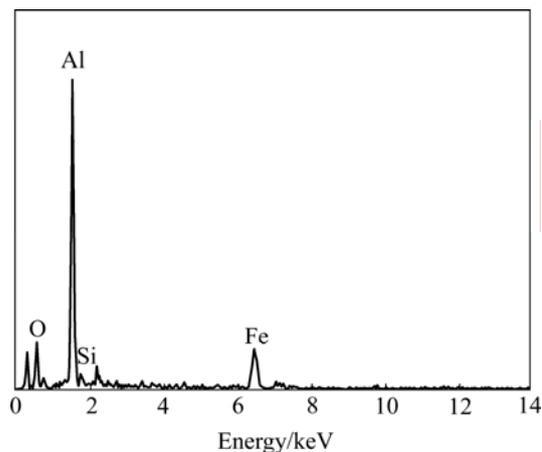


图 3 水铝石的 X 射线能谱

**Fig.3** X-ray energy spectrum of alumina hydroxides

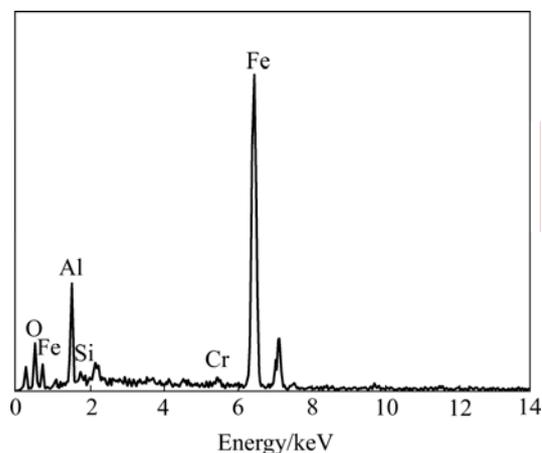


图 4 含铝铁矿物的 X 射线能谱

**Fig.4** X-ray energy spectrum of Al-bearing iron ores

综上所述, 原矿中铝主要呈细颗粒水铝石(三水铝石和一水硬铝石)嵌布于褐铁矿中和以类质同象形式存在于针铁矿物中, 硅酸盐中的铝较少, 其中以类质同象形式存在于针铁矿物中的铝占 40.44%, 这部分替代的铝采用常规的选矿方法(磁选、浮选)不可能从矿物中分离出来, 同时在水铝矿物中亦含有一定数量的铁, 这将导致铝铁分离非常困难。采用磁化焙烧—磁选对原矿进行铝铁分离, 精矿中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量最低为 7.41%, 此时铁品位仅 60.51%, 铝铁分离效果不明显。

## 2 铝铁分离

### 2.1 铝铁分离实验

高铝褐铁矿中铝与铁嵌布关系复杂, 结构紧密, 采用常规选矿方法不能有效分离铝铁。众所周知, 钠

盐焙烧能在一定温度和气氛条件下,使难溶目的组分矿物转变为可溶性的相应钠盐,所得焙砂再用水、稀酸或稀碱进行浸出,目的组分转入溶液,从而使某些组分得以富集。本研究采用钠盐焙烧使铝与钠发生反应转变为钠盐,破坏褐铁矿中铝铁的紧密结构,再通过浸出的方法分离铝铁。影响铝铁分离效果的因素主要为焙烧温度、焙烧时间和钠盐用量。

### 2.1.1 焙烧温度

在  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量配比为 9%, 焙烧时间为 15 min 时, 焙烧温度对铁精矿 TFe 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的影响如图 5 所示。

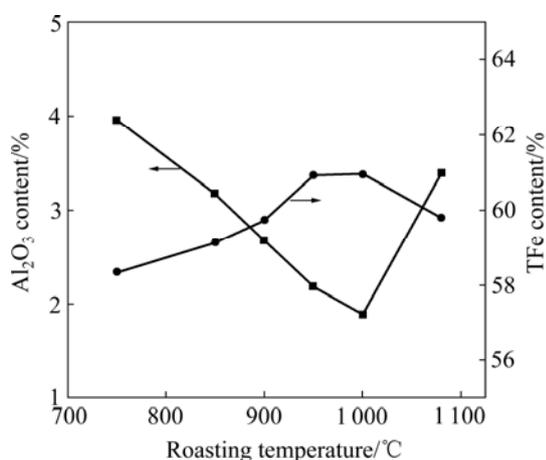


图 5 焙烧温度对铁精矿 TFe 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的影响

**Fig.5** Effects of roasting temperature on TFe and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents of iron concentrate

从图 5 可知, 焙烧温度为 750~1 000 °C 时, 随着焙烧温度的升高, 铁精矿中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量逐渐下降, 铁品位逐渐上升; 当焙烧温度为 1 000 °C 时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量降为 1.89%, 铁品位提高到 60.95%, 铝铁分离效果较好。但焙烧温度继续升高时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量升高, 铝铁分离效果变差。研究表明: 适宜的焙烧温度为 950~1 000 °C。

### 2.1.2 焙烧时间

当焙烧温度为 1 000 °C,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  含量为 9% 时, 焙烧时间对铁精矿 TFe 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的影响如图 6 所示。从图 6 可知, 随着焙烧时间的延长,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量逐渐下降, 铁品位逐渐上升, 当焙烧时间超过 10 min 时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量和铁品位均趋于稳定。因此, 适宜的焙烧时间为 10~15 min。

### 2.1.3 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 用量

在焙烧温度为 1 000 °C, 焙烧时间为 15 min 时,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  用量对铁精矿 TFe 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的影响如图 7 所示。从图 7 可知, 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  用量的增加, 铁精

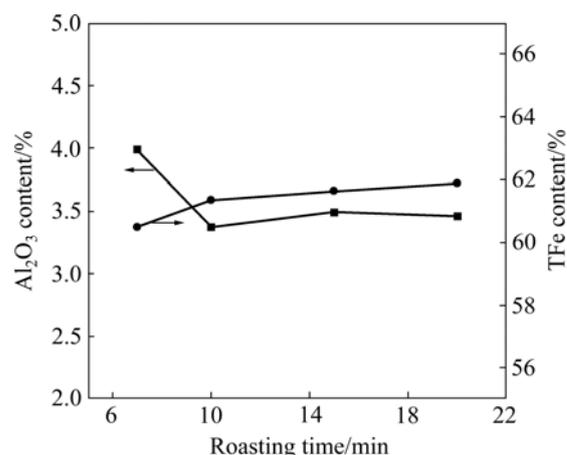


图 6 焙烧时间对铁精矿 TFe 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的影响

**Fig.6** Effects of roasting time on TFe and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents of iron concentrate

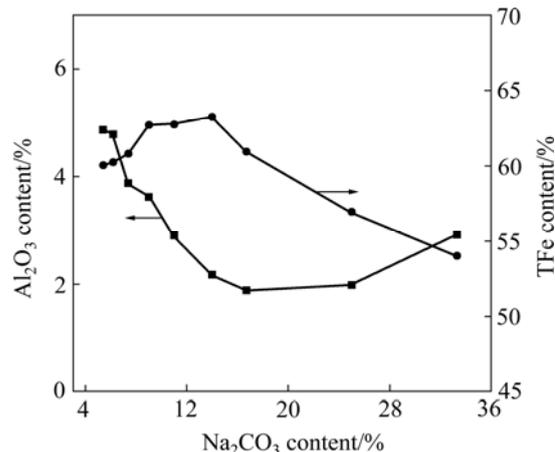


图 7  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  含量对铁精矿 TFe 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的影响

**Fig.7** Effects of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  content on TFe and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents of iron concentrate

矿中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量逐渐降低, 铁品位逐渐升高, 当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  含量为 14% 时, 铁品位最高, 为 63.21%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 2.13%; 若  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  含量进一步增大时, 精矿铁品位呈明显地下降趋势, 而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的下降趋势比较缓慢, 当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  含量超过 16.7% 时, 铁精矿中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量转而上升。综合考虑  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量、铁品位,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  含量为 9%~14% 左右比较合适。

综上所述, 适宜的钠盐焙烧条件: 焙烧温度 950~1 000 °C, 焙烧时间 10~15 min,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  含量为 9%~14%。

## 2.2 铝铁分离机理

### 2.2.1 热力学分析

由原矿主要化学成分可知(见表 1), 在钠盐焙烧的

过程中, 矿石中  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  之间发生反应。体系可能发生反应的  $\Delta G$  与温度的关系如图 8 所示。体系在空气中焙烧, 计算时  $p(\text{CO}_2)=30.4 \text{ Pa}$ 。

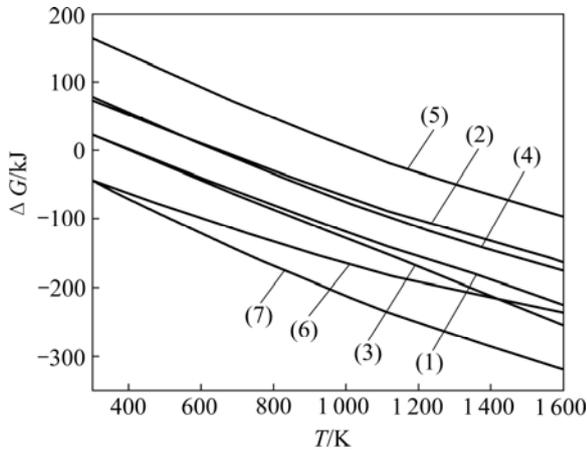


图 8 反应的  $T-\Delta G$  曲线

Fig.8  $T-\Delta G$  curves of reaction equations

图中各反应为:

- (1)  $\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{SiO}_2=\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2+\text{CO}_2$ ,
- (2)  $\text{Na}_2\text{CO}_3+1/2\text{SiO}_2=1/2(2\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2)+\text{CO}_2$ ,
- (3)  $\text{Na}_2\text{CO}_3+2\text{SiO}_2=\text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2+\text{CO}_2$ ,
- (4)  $\text{Na}_2\text{CO}_3+\text{Al}_2\text{O}_3=2\text{NaAlO}_2+\text{CO}_2$ ,
- (5)  $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Na}_2\text{CO}_3=\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CO}_2$ ,
- (6)  $\text{Al}_2\text{O}_3+4\text{SiO}_2+\text{Na}_2\text{CO}_3=\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2+\text{CO}_2$ ,
- (7)  $\text{Al}_2\text{O}_3+6\text{SiO}_2+\text{Na}_2\text{CO}_3=\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2+\text{CO}_2$

从图 8 可知, 在一定的温度下, 各反应存在  $\Delta G < 0$  的区间, 说明  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  均可与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  发生反应, 生成相应钠盐。根据各反应  $\Delta G^\ominus$  的大小可知, 当  $1000 \text{ K} < T < 1300 \text{ K}$  时, 各钠盐生成的优先顺序为  $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2 > \text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2 > \text{Na}_2\text{O}\cdot 2\text{SiO}_2 > \text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2 > \text{NaAlO}_2 > 2\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{SiO}_2 > \text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。

热力学计算结果表明, 在  $\text{SiO}_2$  存在的条件下, 钠盐焙烧过程中  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  会优先与  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成铝硅酸钠; 当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  过量时,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  继续与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成铝酸钠; 当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  过量时,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  不足以反应完  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  时, 剩余  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  将与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  反应生成铁酸钠。

### 2.2.2 铝铁分离行为研究

为了解钠盐焙烧—溶出脱铝过程中的铝铁分离行为, 对焙烧温度  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 焙烧时间  $15 \text{ min}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

质量分数为 9% 条件下的焙烧矿、水浸矿、铁精矿进行了化学成分分析和 X 射线衍射分析, 结果如表 3 及图 9~11 所示。

表 3 铝铁分离过程中各产品的主要化学成分

Table 3 Main chemical compositions of samples obtained during separation of aluminium and iron (mass fraction, %)

Sample	TFe	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	LOI
Roasted ore	50.45	8.35	4.24	6.35	2.26
Aqueous-leached ore	54.29	6.87	4.43	3.81	0.86
Iron concentrate	62.72	3.62	0.63	0.24	1.19

结合图 1 和 9 可知, 焙烧矿中赤铁矿的衍射峰增强了, 磁铁矿的衍射峰减弱了, 出现了铝硅酸钠的衍射峰, 针铁矿、三水铝石和石英的衍射峰消失了, 这说明原矿经钠盐焙烧后, 针铁矿脱水转变为赤铁矿, 部分磁铁矿亦氧化成赤铁矿, 三水铝石、石英与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  反应生成铝硅酸钠。同时, 根据热力学分析(见图 8)可知, 当温度为  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  均可与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  发生化学反应生成相应钠盐, 但当  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  同时存在时,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  会优先与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  反应, 因此, 当  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  为 9% 的较低用量时, 其主要与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  反应生成铝硅酸钠、铝酸钠。根据铝酸钠可溶于水溶液的特性, 水浸矿石中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量由 8.35% 降为 6.87%, 为焙烧过程中铝酸钠的生成提供了依据。

由图 10 可知, 水浸矿中铝硅酸钠的衍射峰依然存在, 赤铁矿衍射峰和磁铁矿的衍射峰增强了, 这说明在水浸过程中, 铝酸钠溶解进入水溶液, 而铝硅酸钠

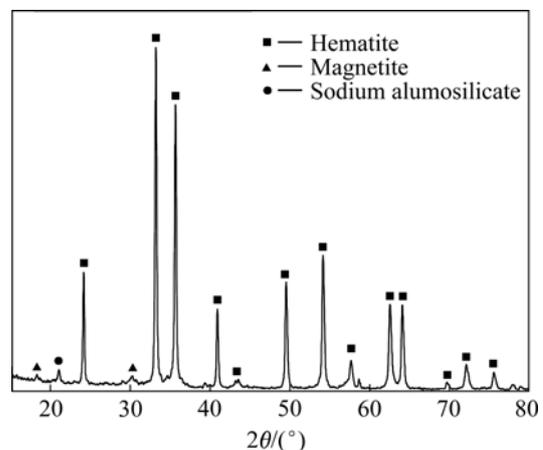


图 9 焙烧矿的 X 射线衍射谱

Fig.9 XRD pattern of roasted ore

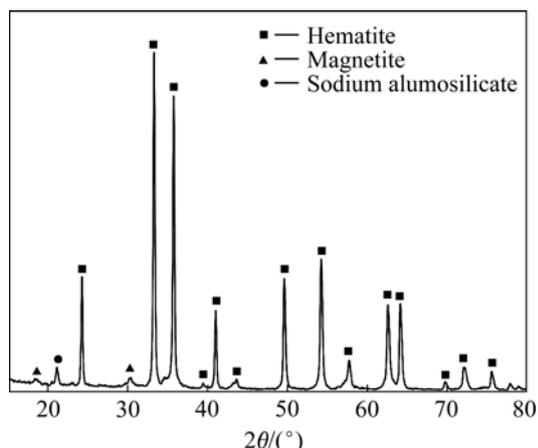


图 10 水浸矿的 X 射线衍射谱  
Fig.10 XRD pattern of alkali-leached ore

因难溶于水进入渣相，同时赤铁矿和磁铁矿未溶于水而得到富集。在水浸过程中， $Al_2O_3$  含量由 8.35% 降为 6.87%，脱铝率为 23.5%。

由图 11 可知，铁精矿中铝硅酸钠的衍射峰消失了，赤铁矿衍射峰和磁铁矿的衍射峰增强了，这说明在稀酸浸出过程中，铝硅酸钠溶于酸进入溶液， $Al_2O_3$  含量由 6.87% 降为 3.62%，而赤铁矿和磁铁矿未溶于

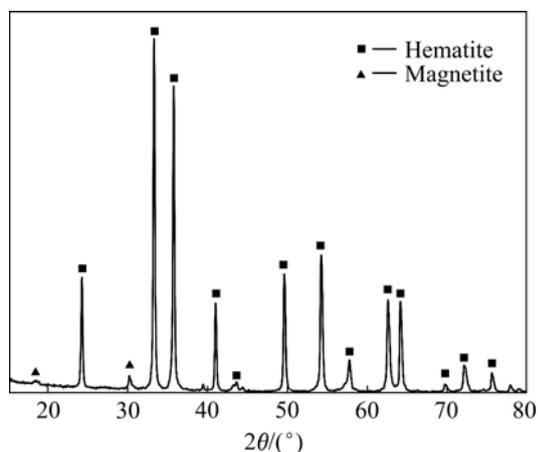


图 11 铁精矿的 X 射线衍射谱  
Fig.11 XRD pattern of iron concentrate

表 4 铝铁分离过程中铝和铁的物相变化

Table 4 Phase transformation of aluminum and iron during separating aluminum and iron

Phase	Raw ore	Roasted ore	Aqueous-leached ore	Iron concentrate
Al	Gibbsite Diaspore Isomorphism in iron ore Aluminosilicate	Sodium aluminate Sodium aluminosilicate $\alpha-Al_2O_3$	Sodium aluminosilicate $\alpha-Al_2O_3$	$\alpha-Al_2O_3$
Fe	Hematite Goethite Magnetite	Hematite Magnetite	Hematite Magnetite	Hematite Magnetite

稀硫酸得到富集。酸浸过程中的脱铝率为 45.6%。

为确定铝铁分离后铁精矿中铝的赋存状态，对铁精矿进行了扫描电镜分析，结果如图 12 所示。结合图 2 和 12 可知，均匀分布于铁矿物中的铝消失了，部分呈微细粒嵌布在铁矿物中的铝仍在铁精矿中，这表明以类质同象形式存在于铁矿的铝在钠盐焙烧—溶出脱铝过程中被脱除了，而部分水铝矿物转变为难溶于水亦难溶于稀硫酸的铝矿物。据文献[16]可知，这部分难溶的铝矿物为一水硬铝石在高于 450 °C 时脱水转变成的  $\alpha-Al_2O_3$  (刚玉)。

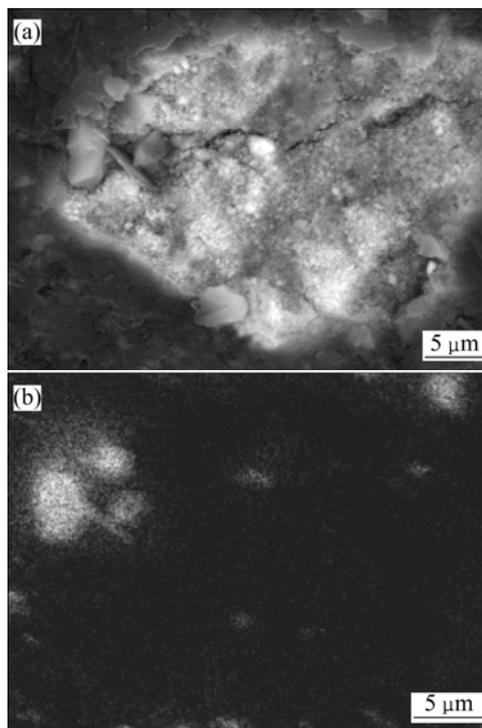


图 12 铁精矿的 SEM 像  
Fig.12 SEM images of iron concentrate: (a) Electronic image of backscattering; (b) Line-by-line scanning image of aluminum

综上所述，当焙烧温度 1 000 °C，焙烧时间 15 min， $Na_2CO_3$  质量分数为 9% 时，铝和铁在钠盐焙烧—溶出脱铝过程中物相变化如表 4 所列。

### 3 结论

1) 高铝褐铁矿中铝与铁嵌布关系十分复杂, 铝主要是呈微细颗粒水铝石(三水铝石和一水硬铝石)嵌布于褐铁矿中的和以类质同象形式存在于针铁矿物中, 其中类质同象形式存在于铁矿物中的铝占有 40.4%, 用常规选矿方法不能有效分离铝铁。

2) 钠盐焙烧—溶出脱铝工艺能有效实现铝铁分离, 当焙烧温度 1 000 °C, 焙烧时间 15 min,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  质量分数为 14%时, 在适宜的溶出条件下, 铁精矿  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量降低为 2.13%, 铁品位 TFe 提高至 63.21%。

3) 通过热力学计算, 并结合 XRD 和 SEM 分析结果表明: 原矿经钠盐焙烧后, 铝转变为铝硅酸钠、铝酸钠、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 铝酸钠水浸后即被脱除, 而铝硅酸钠需经稀硫酸浸出才能脱除, 残留在铁精矿中的铝主要为呈微细粒嵌布在铁矿物中  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; 针铁矿、赤铁矿、磁铁矿转为赤铁矿和少量磁铁矿, 并在水浸和酸浸过程中基本不溶而得到富集。

#### 参考文献:

- [1] 余永富, 张汉泉. 我国钢铁发展对铁矿石选矿科技发展的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 1-7.  
YU Yong-fu, ZHANG Han-quan. Influence of domestic iron and steel development on iron ore processing technology[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1): 1-7.
- [2] 孙炳泉. 近年我国复杂难选铁矿石选矿技术进展[J]. 金属矿山, 2006(3): 11-13.  
SUN Bing-quan. Beneficiation technology of refractory iron ore in China in recent years[J]. Metal Mine, 2006(3): 11-13.
- [3] 袁致涛, 高太, 印万忠, 韩跃新. 我国难选铁矿石资源利用的现状与发展方向[J]. 金属矿山, 2007(1): 1-6.  
YUAN Zhi-tao, GAO Tai, YIN Wan-zhong, HAN Yue-xin. Status quo and development orientation of China's refractory ore resource utilization[J]. Metal Mine, 2007(1): 1-6.
- [4] 张泾生. 我国铁矿资源开发利用现状及发展趋势[J]. 钢铁, 2007, 17(1): 1-6.  
ZHANG Jing-sheng. Status and trend of exploitation and utilization of iron ore resource in China[J]. Iron and Steel, 2007, 17(1): 1-6.
- [5] 刘南松. 关于铁矿石优化利用的探讨[J]. 冶金矿山设计与建设, 1996, 28(2): 36-41.  
LIU Nan-song. Study on optimization of iron ore utilization[J]. Metallurgy Mine Design and Construction, 1996, 28(2): 36-41.
- [6] 沈峰满. 高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量渣系高炉冶炼工艺探讨[J]. 鞍钢技术, 2005(6): 1-4.

- SHEN Feng-man. Discussion on BF operation with high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  slag[J]. Angan Technology, 2005(6): 1-4.
- [7] LEE K R, SUITO H. Activities of FeO in  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-FeO}(<5\%)$  slag saturated with liquid iron[J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 1994, 25B(10): 893-901.
- [8] 孙炳泉. 褐铁矿选矿技术进展[J]. 金属矿山, 2006(8): 27-29.  
SUN Bing-quan. Advance in beneficiation technology of limonite ore[J]. Metal Mine, 2006(8): 27-29.
- [9] 刘万超, 杨家宽, 肖波. 拜耳法赤泥中铁的提取及残渣制备建材[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(1): 187-192.  
LIU Wan-chao, YANG Jia-kuan, XIAO Bo. Recovering iron and preparing building material with residues from Bayer red mud[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(1): 187-192.
- [10] 袁明亮, 汪艳梅, 胡岳华. 铝土矿尾矿除钛和铁及其采用表面改性[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(12): 2059-2064.  
YUAN Ming-liang, WANG Yan-mei, HU Yue-hua. Removing of titanium and iron from bauxite tails and its surface modification[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(12): 2059-2064.
- [11] 周秋生, 范旷生, 李小斌, 彭志宏, 刘桂华. 采用烧结法处理高铁赤泥回收氧化铝[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(1): 92-97.  
ZHOU Qiu-sheng, FAN Kuang-sheng, LI Xiao-bin, PENG Zhi-hong, LIU Gui-hua. Alumina recovery from red mud with high iron by sintering process[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2008, 39(1): 92-97.
- [12] SCHULZE D G. The influence of aluminum on iron oxides ( VIII unti-cell dimensions of Al-substituted goethite and estimation of Al-from them)[J]. Clays and Clay Minerals, 1984, 32(1): 36-44.
- [13] TROLORD F, TARDY Y. A model of  $\text{Fe}^{3+}$ -Kaolinite,  $\text{Al}^{3+}$ -Goethite,  $\text{Al}^{3+}$ -Hematite equilibria in laterites[J]. Clay Minerals, 1989, 24(1): 1-21.
- [14] 曹瑛, 李卫东, 刘艳改. 工业废渣赤泥的特性及回收利用现状[J]. 硅酸盐通报, 2007, 26(1): 143-145.  
CAO Ying, LI Wei-dong, LIU Yan-gai. Properties of red mud and current situation of its utilization[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2007, 26(1): 143-145.
- [15] 姜涛, 李光辉, 范晓慧, 黄柱成, 邱冠周. 一水硬铝石型铝土矿焙烧水浸脱硅新工艺(I)[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(4): 534-538.  
JIANG Tao, LI Guang-hui, FAN Xiao-hui, HUANG Zhu-cheng, QIU Guan-zhou. Desilication from diasporic bauxite by roasting-alkali leaching process ( I ) [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(4): 534-538.
- [16] 杨重愚. 氧化铝生产工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.  
YANG Chong-yu. Alumina production technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.

(编辑 李艳红)