

## 钠盐对高铝褐铁矿还原焙烧铝铁分离的影响

姜 涛, 刘牡丹, 李光辉, 孙 娜, 曾精华, 邱冠周

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 研究钠盐对高铝褐铁矿还原焙烧过程中铝铁分离的影响。结果表明: 高铝褐铁矿经还原后, 铁的金属化率为 87.13%, 焙烧产物经磨矿磁选后, 金属铁粉中铁品位和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量分别为 68.07%(质量分数)和 7.94%, 铁的回收率仅为 19.77%; 添加硫酸钠 14%(质量分数)、辅助添加剂 BS 2.5%(质量分数)后还原高铝褐铁矿, 铁的金属化率可达 95.69%, 焙烧产物经磨矿磁选后, 金属铁粉中铁品位升高到 91.3%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量降低为 1.27%, 铁的回收率达到 93.64%。XRD、EDX 及微观结构研究表明: 未添加钠盐时, 高铝褐铁矿中铁氧化物易被还原为无磁性的  $\gamma\text{-Fe}$ , 且铁与铝、硅结合紧密, 磁选分离难度大; 添加的钠盐能与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  反应生成铝硅酸钠, 破坏矿石结构, 有利于改善高铝褐铁矿的还原效果, 但在碳酸钠作用下铁晶粒较小且易与脉石矿物结合, 而在硫酸钠作用下金属铁颗粒长大, 与脉石矿物解离性能好, 有利于铝铁分离。

**关键词:** 褐铁矿; 钠盐; 还原焙烧; 铝

中图分类号: TD982

文献标志码: A

## Effects of sodium-salt on Al-Fe separation by reduction roasting for high-aluminum content limonite

JIANG Tao, LIU Mu-dan, LI Guang-hui, SUN Na, ZENG Jing-hua, QIU Guan-zhou

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

**Abstract:** The effects of different sodium salts on Al-Fe separation in limonite were studied during reduction roasting process. The results show that when the ore is reduced directly, the metallization rate of iron in roasted ore is 87.13%, and the total iron grade and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content of metallic iron concentrate is 68.07% and 7.94%, respectively, but the iron recovery rate is only 19.77% when the roasted products are treated by magnetic-separation. The metallization rate of Fe in the roasted ore is up to 95.69% when reducing with addition of 14% (mass fraction)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and 2.5% BS. The total iron grade of metallic iron product increases to 91.3%, and the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content decreases to 1.27%, the iron recovery rate reaches 93.64% when the roasted products are treated by magnetic-separation. The XRD, EDX and microstructure results indicate that, when limonite is reduced without sodium salts, the iron oxides are reduced to nonmagnetic  $\gamma\text{-Fe}$ , and most of the iron granules combine with aluminum and silicon gangues closely, which results in difficulties during magnetic separation. The sodium salts react with gangues bearing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  and form sodium aluminosilicates, thus, the structure of the ore is destroyed, and the reduction effect is greatly enhanced. However, the sizes of metallic iron grains obtained during the reduction with addition of sodium carbonate are relatively small and combined with gangue tightly. When reduced with sodium sulphate, the metallic iron grains grow and can be easily liberated from gangue. Therefore, Al-Fe separation is more effective after adding sodium sulphate.

**Key words:** limonite; sodium salt; reduction roasting; aluminium

在我国安徽、广西、贵州等地以及毗邻的东南亚国家储有丰富的高铝褐铁矿, 其中含铝矿物与含铁矿物紧密共生、嵌布关系复杂, 且矿石中大量铁、铝以类质同像形式共存, 这类资源利用的关键是实现铁与铝、硅的高效分离<sup>[1-2]</sup>。国内外就高铝褐铁矿铝铁分离提出了 3 种典型工艺, “先选后冶”工艺<sup>[3-5]</sup>、“先铝后铁”工艺<sup>[6-9]</sup>和“先铁后铝”工艺<sup>[10-12]</sup>。“先选后冶”适用于处理结构简单的含铝褐铁矿石, 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。“先铝后铁”工艺要求矿石中有效氧化铝 ( $A_{Al_2O_3}$ )/活性氧化硅 ( $S_{SiO_2}$ ) 高, 同时赤泥回收铁的经济效益难以保证。“先铁后铝”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。由此可见, 由于这类矿石铝铁赋存关系复杂, 这 3 种工艺均无法经济有效地实现其铝铁分离。

钠盐焙烧是通过在矿物原料中加入钠盐(如碳酸钠、氯化钠、苛性钠、硫酸钠等)在一定温度和气氛条件下使难溶矿物转变为相应的钠盐, 所得焙砂再经水、稀酸或稀碱溶液浸出, 用于提取有用组分或除去矿物原料中的某些杂质<sup>[13]</sup>。另一方面, 研究发现, 在还原过程中少量碱金属盐和碱土金属氧化物能使氧化铁的晶格点阵发生畸变, 产生微孔, 使还原气体通过缺陷更容易扩散到反应界面上, 从而加速反应的进行, 提高还原反应速率<sup>[14-16]</sup>。鉴于高铝褐铁矿中铝、硅的赋存矿物主要为三水铝石和硅酸盐矿物的特点, 碱性添加剂钠盐可与它们反应生成铝酸钠或铝硅酸钠, 同时还原过程中添加钠盐可强化铁氧化物还原, 从而达到铁与铝、硅分离的目的。由此, 本文作者开发了钠化还原法铝铁分离新工艺, 由高铝褐铁矿制备高品位直接还原金属铁粉<sup>[17-18]</sup>。该工艺的关键技术之一就是在高铝褐铁矿直接还原过程中添加钠盐强化还原及铝铁分离。本文作者主要介绍钠盐对铝铁分离的影响, 并采用自动图像分析技术、XRD 及 EDX 技术研究了钠盐添加剂的作用机理。

## 1 实验

### 1.1 原料性质

本研究所用高铝褐铁矿的主要物化性能参见文献[1-2], 其主要化学成分如表 1 所列。该矿石铁品位为 48.92%(质量分数),  $Al_2O_3$  含量为 8.16%、 $SiO_2$  含量为 4.24%, 有害元素硫含量为 0.11%, 其它有害元素磷、钠、钾含量均比较低。试验所用还原剂为烟煤, 固定碳含量 48.47%, 挥发份含量 43.08%, 灰份含量 8.45%,

试验时破碎到粒径小于 5 mm 备用。由于碳酸钠广泛应用于烧结法生产氧化铝工业中, 硫酸钠也是普遍应用的钠盐添加剂, 因此, 本研究选用硫酸钠、碳酸钠作为钠盐添加剂, 二者均为分析纯。

表 1 原矿的主要化学成分

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

Fe <sub>T</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	P	S	LOI
48.92	8.16	4.24	0.68	0.015	0.048	0.11	11.33

LOI is loss on ignition.

### 1.2 研究方法

试验流程包括造块、还原焙烧和磁选 3 个环节, 即原矿经磨矿后与粘结剂, 钠盐添加剂及辅助添加剂混匀后造块、干燥, 干团块与煤一起置于竖炉内还原, 焙烧产物冷却后经磨矿磁选, 分别得到金属铁粉和非磁性物。详细方法及原则流程参见文献[17]。本实验中以还原产物的金属化率及金属铁粉全铁品位、 $Al_2O_3$  含量、铁的回收率和铝的脱除率作为评价指标。

## 2 结果与讨论

本实验以硫酸钠、碳酸钠为添加剂, 在还原焙烧温度 1 100 °C, 焙烧时间 60 min、磨矿粒度小于 75  $\mu m$  的含量为 98%、磁场强度为 675mT 的条件下, 研究钠盐对铝铁分离的影响, 结果如表 2 所列。试验时还原剂烟煤用量为足量, 表中各组钠盐的用量均是通过系统试验后确定的, BS 是为强化还原焙烧过程中金属铁颗粒长大加入的一种辅助添加剂。

从表 2 可以看出, 在相同的焙烧、磨矿、磁选条件下, 高铝褐铁矿还原焙烧, 还原产物中铁的金属化率仅为 87.13%, 而添加硫酸钠、碳酸钠还原后, 金属化率大幅度提高, 其值均超过 95%。从铝铁分选效果来看, 高铝褐铁矿不加钠盐还原焙烧时, 铝铁分离效果不好, 金属铁粉中铁品位仅为 68.07%,  $Al_2O_3$  含量高达 7.94%, 铁的回收率只有 19.77%; 添加硫酸钠还原焙烧, 铝铁分离效果有所改善, 金属铁粉中  $Al_2O_3$  含量下降到 1.87%, 但是铁品位及铁的回收率均不到 90%; 以碳酸钠为添加剂时, 金属铁粉产率大幅度提高, 铁的回收率达到 91.79%, 但铁品位只有 82.05%,  $Al_2O_3$  含量为 3.62%, 铝铁分离效果不佳; 当添加 2.5% 辅助添加剂 BS, 同时降低添加碳酸钠、硫酸钠用量至 14% 时, 还原焙烧以及分选效果均有所改善, 金属铁粉中铁品位有所升高, 比较而言, 硫酸钠与 BS 共同

表 2 钠盐对还原焙烧-磁选铝铁分离的影响

Table 2 Effects of sodium salts on Al-Fe separation during reduction roasting-magnetic separation

Mass fraction of sodium salt/%			Metallization of iron /%	Mass fraction of magnetic material/%				Mass fraction of non-magnetic material/%		
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	BS		Yield	Fe <sub>T</sub> <sup>1)</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Iron recovery	Fe <sub>T</sub> <sup>1)</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> recovery
0	0	0	87.13	20.46	68.07	7.94	19.77	71.06	10.63	83.88
20	0	0	96.14	59.30	87.95	1.87	89.21	15.49	22.58	89.23
0	20	0	98.05	71.92	82.05	3.62	91.79	18.80	27.30	74.65
0	14	2.5	97.63	65.29	86.55	3.61	88.78	20.57	20.46	75.08
14	0	2.5	95.69	63.74	91.30	1.27	93.64	12.76	22.40	91.05

1) Total content.

作用时铝铁分离效果更好, 金属铁粉铁品位达到 91.3%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量降低至 1.27%, 铁的磁选回收率为 93.64%。

综上所述可知, 硫酸钠、碳酸钠均有利于改善高铝褐铁矿的还原效果, 大幅度提高还原产物的金属化率, 在硫酸钠与辅助添加剂 BS 的共同作用下, 可有效实现铝铁分离, 获得高品位金属铁粉。

## 2.1 钠盐对高铝褐铁矿还原焙烧行为的影响

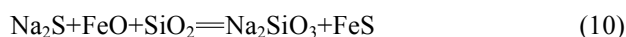
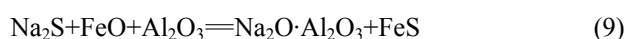
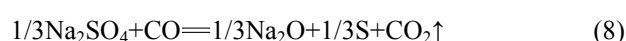
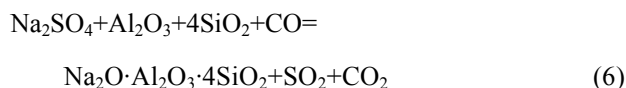
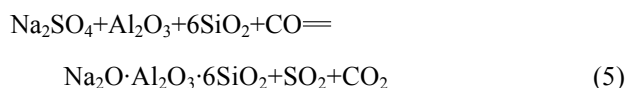
### 2.1.1 钠盐对高铝褐铁矿还原焙烧物相变化的影响

钠盐添加剂能显著改善高铝褐铁矿的还原及铝铁分离效果, 为揭示不同钠盐作用下高铝褐铁矿还原过程中铁、铝、硅矿物的物相变化规律, 采用 X 射线衍射技术(XRD)对不同钠盐作用下的焙烧产物进行物相分析, 其结果如图 1 所示。还原焙烧条件为焙烧温度为 1 100 °C, 焙烧时间为 60 min, 钠盐用量如表 2 所列。为了便于比较, 同时将原矿的 XRD 结果一并列出。

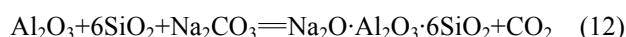
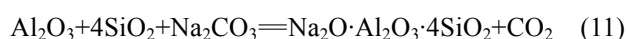
由图 1 可以看出, 相对于原矿, 高铝褐铁矿经还原焙烧后, 物相发生很大变化。从图 1(b)可知, 不添加钠盐对原矿进行还原焙烧时, 焙烧产物中铁的物相主要有  $\alpha$ -Fe 和  $\gamma$ -Fe。与具有铁磁性的体心立方晶格的  $\alpha$ -Fe 相比, 面心立方晶格结构的  $\gamma$ -Fe 具有如下两个特点, 一是为顺磁性物质, 在 770 °C(居里点)以上会失去磁性, 二是对 X 射线反射能力弱。因此, 从图 1(b)中相对较强的  $\gamma$ -Fe 衍射峰可知, 还原产物中  $\gamma$ -Fe 的含量较多, 显然这部分铁因没有磁性在分选时无法回收, 这是原矿直接还原金属铁粉回收率低的原因之一。还原产物的其它物相有 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>、Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> 及 AlFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 是 FeO 与 SiO<sub>2</sub> 反应的产物, 而 AlFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 是原矿中铁被铝以类质同像取代后的铁氧化物的还原产物<sup>[1]</sup>。原矿还原焙烧过程中发生的反应主要如下:



图 1(c)所示为高铝褐铁矿添加硫酸钠还原焙烧产物的 XRD 谱从图 1(c)可知, 焙烧产物的物相主要有金属铁和铝硅酸钠, 其次是 Fe<sub>2.56</sub>Si<sub>0.44</sub>O<sub>4</sub>、FeSiO<sub>3</sub> 及 FeS。FeS 是 FeO 与硫酸钠还原产物 Na<sub>2</sub>S 反应形成的。结合热力学计算可知, 添加硫酸钠还原焙烧发生的反应主要有:



添加碳酸钠还原焙烧时, 焙烧产物的主要物相依然是金属铁和铝硅酸钠(见图 1(d)), 也仍然存在  $\gamma$ -Fe 的衍射峰, 只是衍射峰强度明显比原矿还原焙烧时要弱, 铁的物相中还有少量浮氏体和 Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>。结合热力学计算可知, 添加碳酸钠还原焙烧时发生的反应主要有:



焙烧产物相比于只添加硫酸钠或只添加碳酸钠的还原产物, 当硫酸钠及碳酸钠分别与 BS 共同添加, 主要物相变化不大, 如图 1(e)和(f)所示, 仍然以金属铁和铝硅酸钠为主。不过从图中可以看到, 碳酸钠成

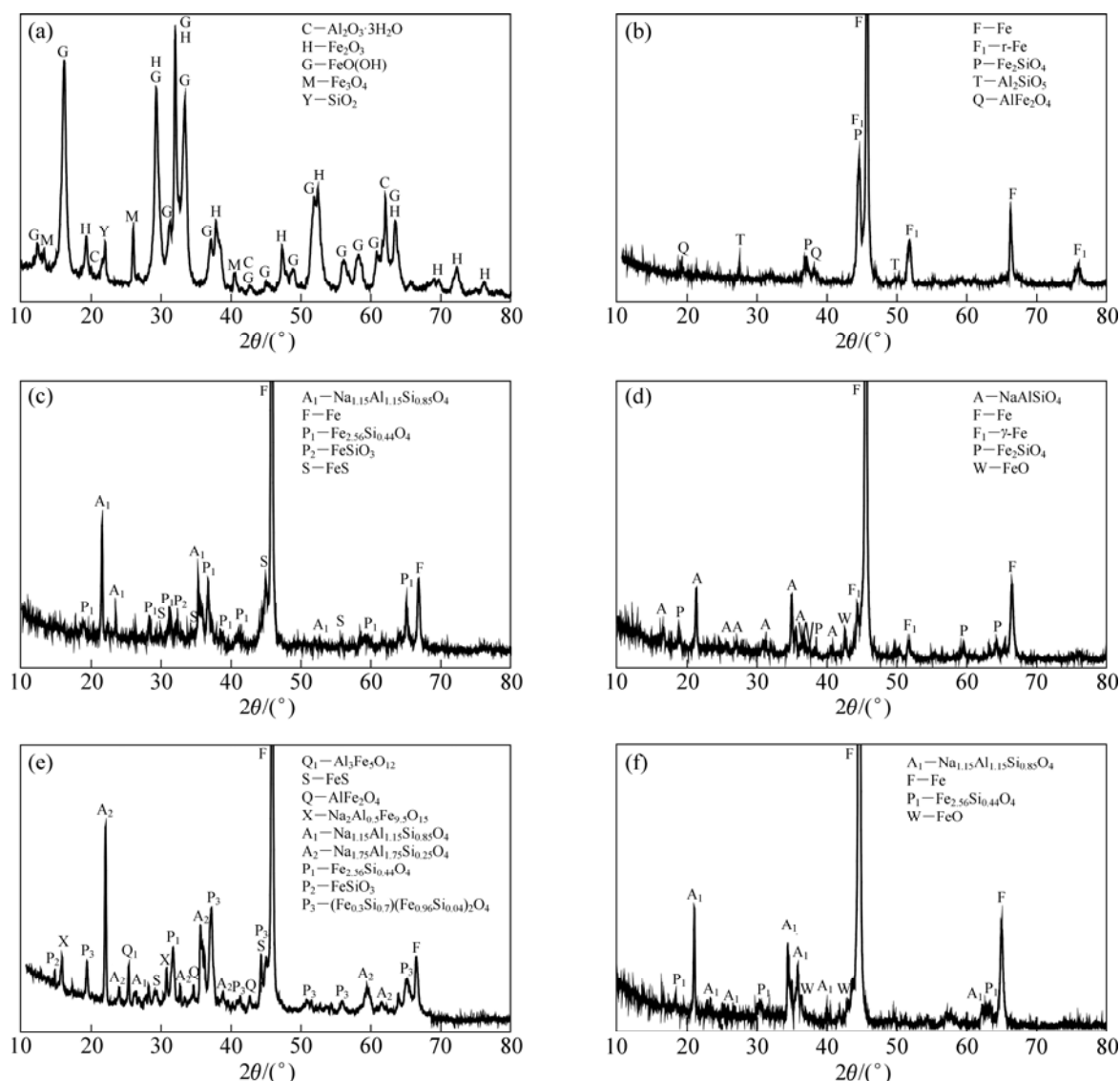


图 1 不同钠盐作用下还原产物的 XRD 谱

**Fig.1** XRD patterns of reduced products adding of different sodium salts: (a) Raw ore; (b) No additive; (c)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; (d)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; (e)  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{BS}$ ; (f)  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{BS}$

硫酸钠与 BS 共同作用下, 铝硅酸钠的衍射峰明显较未添加 BS 还原焙烧的衍射峰要强。同时, 对比图 1(d) 和 1(f) 可知, 碳酸钠与 BS 共同作用下,  $\gamma\text{-Fe}$  已经完全转变为  $\alpha\text{-Fe}$ , 而浮氏体的衍射峰明显减弱, 可见铁氧化物的还原更充分了。进一步对比图 1(c)、(d)、(e) 和 (f) 可以看出, 添加硫酸钠还原焙烧产物中铝硅酸钠的衍射峰比碳酸钠作用下的要强。

以上结果表明, 不添加钠盐还原焙烧时, 高铝褐铁矿中的部分铁氧化物被还原成无磁性的  $\gamma\text{-Fe}$ , 难以通过磁选回收; 当添加钠盐后,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  与钠盐发生反应生成铝硅酸钠, 破坏了矿石结构, 并使铁氧化物的还原效果得到改善。比较而言, 硫酸钠的作用比碳酸钠的作用要强。

## 2.2 不同钠盐添加剂作用下金属铁晶粒的长大特性

还原的目的是为后续磨矿、磁选分离铝铁创造条件, 因此铝铁分离效果除了受铁还原程度(即金属化率)的影响, 还与还原后金属铁颗粒的大小及其与脉石成分的解离特性相关, 只有当高铝褐铁矿充分还原, 并使金属铁晶粒长大到可以物理分选的必要粒度, 才能获得较好的铝铁分离效果。

为了进一步确定不同钠盐添加剂对高铝褐铁矿还原焙烧过程中金属铁晶粒长大的影响, 对不同钠盐添加剂作用下的还原球团进行了显微结构分析, 结果如图 2 所示。还原球团的焙烧条件为焙烧温度  $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ , 焙烧时间 60 min, 钠盐用量与表 2 一致。图 3 所示为无钠盐还原焙烧球团中的显微组织及图中相应颗粒的

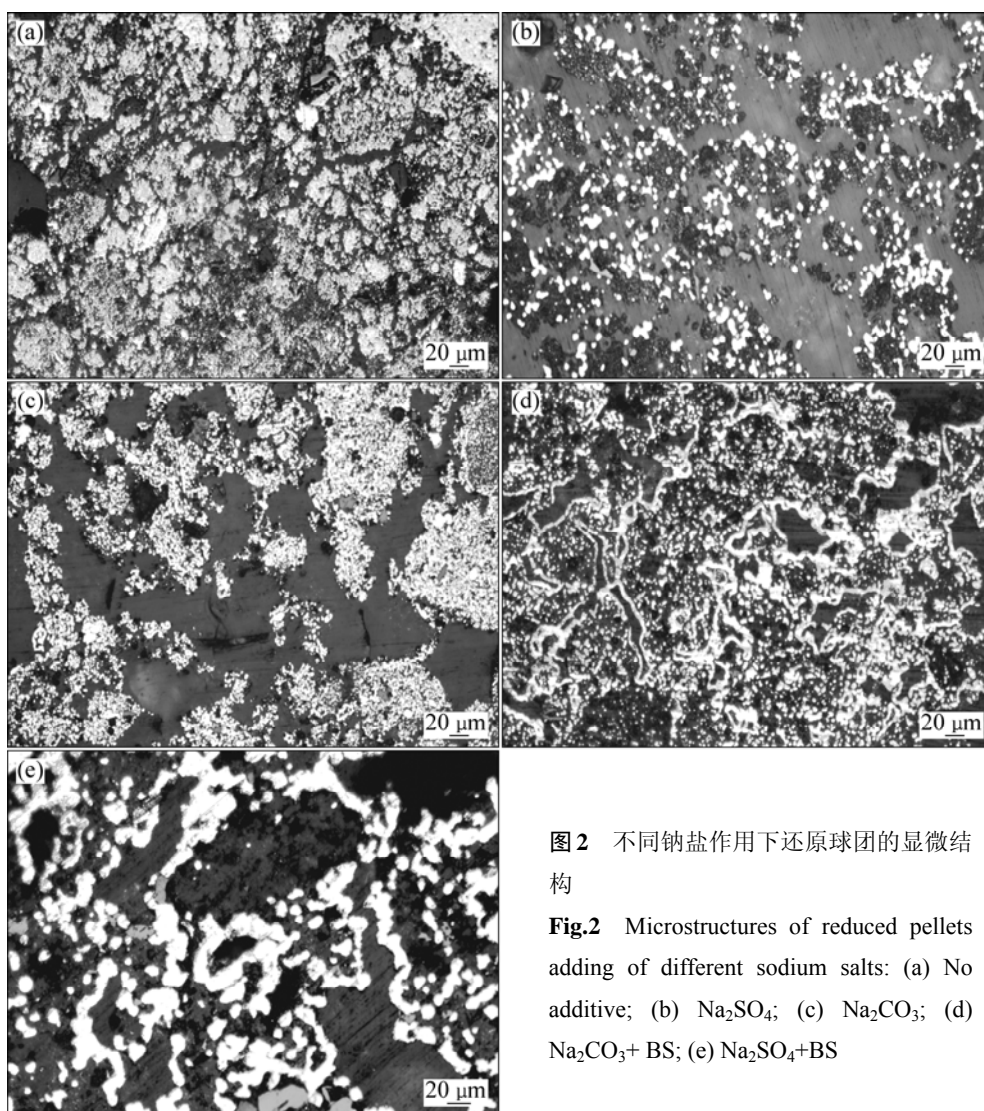


图2 不同钠盐作用下还原球团的显微结构

**Fig.2** Microstructures of reduced pellets adding of different sodium salts: (a) No additive; (b)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; (c)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; (d)  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{BS}$ ; (e)  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{BS}$

EDX 谱。

由图 2(a)可知, 不添加钠盐还原焙烧高铝褐铁矿时, 球团内部亮白色的金属铁晶粒非常少, 大部分铁颗粒呈灰白色。对其进行扫描电镜能谱(EDX)分析可知, 亮白色的铁晶粒(A)中主要成分为铁(见图 3(b)), 而灰白色的颗粒(B)中包含有铁、铝、硅 3 种元素(见图 3(c)), 表明还原焙烧后大部分铁仍与铝、硅结合紧密, 单体解离性能差, 因此铝铁分离效果差。

由图 2(b)可知, 当添加硫酸钠还原焙烧, 还原球团内部铁晶粒(白色颗粒)与脉石矿物(灰色)出现较明显的界限。结合还原球团 XRD 结果, 脉石矿物主要是铝硅酸钠。此时, 虽然铁晶粒间相互连接、聚拢, 但晶粒长大仍不充分, 大部分铁晶粒粒度较细, 一般为  $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 。这较好地解释了添加硫酸钠还原时铝铁分离效果较佳, 而金属铁粉中铁品位和铁磁选回收率相对较低的原因(见表 1)。

由图 2(c)可以看到, 添加碳酸钠焙烧的还原球团内部铁晶粒数目较多, 但晶粒间并未相互连接长大, 仅以粒度细小的颗粒聚集, 铁晶粒粒度一般为  $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 。结合表 1 可知, 在碳酸钠作用下, 还原球团的金属化率最高, 表明碳酸钠促进铁氧化物的还原。由图 1(d)可知, 碳酸钠在还原过程中同样与铝、硅发生反应生成铝硅酸钠, 但是从图 2(c)来看, 铁晶粒与脉石矿物间未出现明显的界限。图 4 所示为添加碳酸钠还原球团中铁颗粒的显微组织及 EDX 谱。EDX 结果表明, 球团内部金属铁颗粒与铝、硅、钠结合紧密, 嵌布关系复杂, 难以实现单体解离。以上结果表明, 添加碳酸钠还原焙烧后, 虽然还原球团金属化率高, 金属铁粉的回收率高, 但是由于铁晶粒与铝、硅、钠结合紧密, 在分选过程中磁性产品金属铁粉的质量不高。

从图 2(d)可以看到, 相比于单独添加碳酸钠还原焙烧的球团, 添加碳酸钠和 BS 还原后, 球团内部部

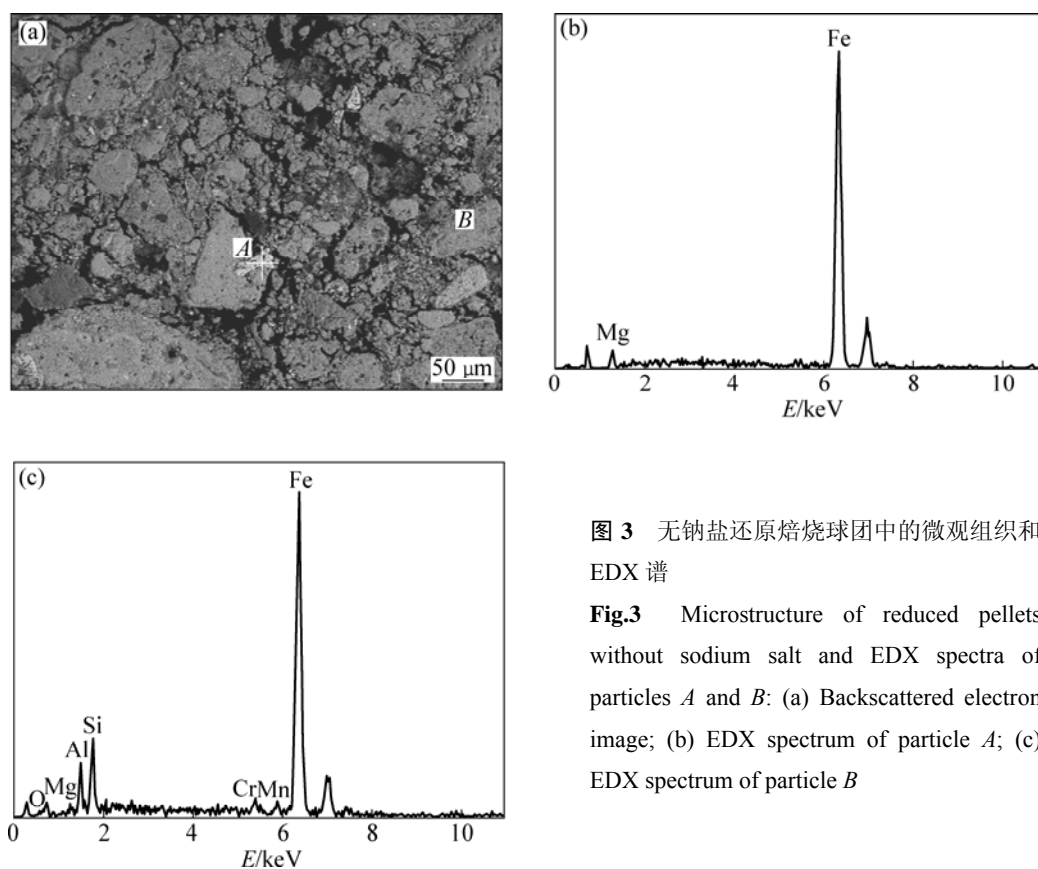


图 3 无钠盐还原焙烧球团中的微观组织和 EDX 谱

**Fig.3** Microstructure of reduced pellets without sodium salt and EDX spectra of particles *A* and *B*: (a) Backscattered electron image; (b) EDX spectrum of particle *A*; (c) EDX spectrum of particle *B*

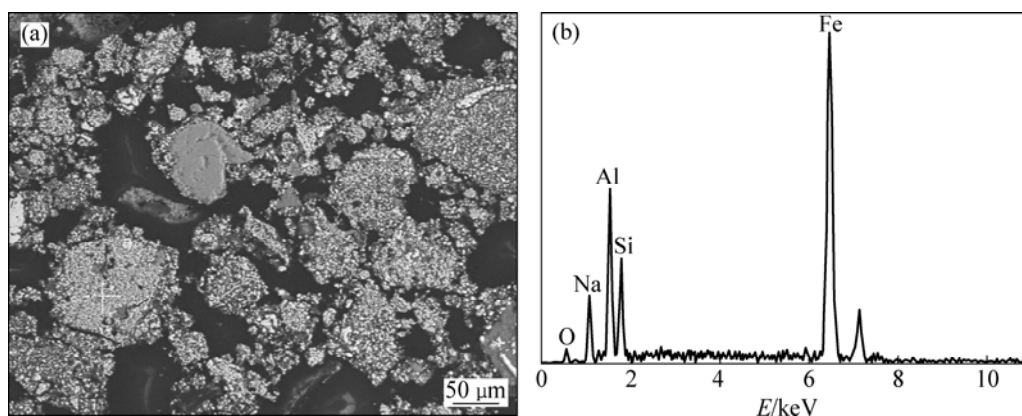


图 4 添加碳酸钠还原球团中铁颗粒的显微组织及 EDX 谱

**Fig.4** Microstructure and EDX spectrum of metallic iron particles of reduced pellet with addition of sodium carbonate: (a) Backscattered electron image; (b) EDX spectrum

分铁晶粒开始沿着颗粒边缘生长连接长大, 粒度一般可达 30~40  $\mu\text{m}$ , 不过其长大的趋势较弱, 形成的金属铁环状结构较细。此时, 尚有大部分铁晶粒未聚拢、连接, 分散在环状结构中, 这部分铁晶粒与铝硅酸钠等脉石矿物仍形成包裹嵌布关系, 在磨矿过程中解离仍有一定难度, 因此铝铁分离效果仍然不佳。

添加硫酸钠和 BS 还原焙烧后(见图 2(e)), 相比于单独添加硫酸钠, 球团内部铁晶粒与脉石矿物的界限

变得分明, 大部分铁晶粒开始明显连接、长大, 并且沿颗粒边缘形成环状, 粒度多在 20~40  $\mu\text{m}$  之间, 这种结构有利于磨矿过程中金属铁颗粒与脉石矿物的解离, 因此在获得高铁品位金属铁粉的同时, 铁的回收率也明显提高, 如表 2 所列。

综上所述, 不添加钠盐还原焙烧高铝褐铁矿时, 大部分铁与铝、硅结合紧密, 难以实现单体解离, 铝铁分离效果较差。硫酸钠、碳酸钠均能与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$

反应生成铝硅酸钠,破坏矿石结构,促进铁晶粒的长大,但两者作用机理不同。硫酸钠能促进铁晶粒与脉石矿物的分离,但是铁晶粒间连接不充分,导致磁选产品铁品位较高、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量低,铁的回收率相对较低;碳酸钠能促进铁氧化物的还原,但是铁晶粒与脉石矿物结合紧密,导致磁选铁的回收率高,而金属铁粉品质较差,铁品位相对较低、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量相对较高。辅助添加剂BS可强化铁晶粒的聚集长大,当其与硫酸钠共同作用时,铁晶粒充分长大,与脉石矿物界限分明,铝铁分离效果显著提高。关于BS的作用机理,有待于进一步深入研究。

### 3 结论

1) 高铝褐铁矿还原焙烧,铝铁分离效果不佳,铁的金属化率为87.13%,磁选金属铁粉铁品位为68.07%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量高达7.94%,铁的回收率仅为19.77%。硫酸钠、碳酸钠均能促进铁氧化物的还原,大幅度提高还原产物中铁的金属化率至95%以上。在硫酸钠用量14%、BS用量2.5%的条件下,金属铁粉铁品位达到91.3%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量降低到1.27%,铁的磁选回收率为93.64%。

2) XRD、EDX及微观结构研究结果表明,不添加钠盐还原时,铁氧化物容易被还原为无磁性的 $\gamma\text{-Fe}$ ,难以磁选回收,且大部分铁与铝、硅结合紧密,解离困难。硫酸钠、碳酸钠均能与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 反应生成铝硅酸钠,破坏矿石结构,有利于改善铝铁分离效果。比较而言,碳酸钠作用下,铁晶粒数目多、粒度小,且与脉石矿物结合紧密,而硫酸钠作用下铁晶粒较大,且与脉石矿物界限分明,对铝铁分离有利。

3) 辅助添加剂BS促进铁晶粒聚集长大以及与脉石矿物的分离,当其与硫酸钠共同作用时,铝铁分离效果显著提高,其作用机理有待进一步深入研究。

### REFERENCES

- [1] 李光辉,周太华,刘牡丹,姜涛,范晓慧.难处理褐铁矿铝铁分离新工艺及机理研究[J].中国有色金属学报,2008,18(11):2087-2093.  
LI Guang-hui, ZHOU Tai-hua, LIU Mu-dan, JIANG Tao, FAN Xiao-hui. A novel process and mechanisms of aluminum-iron separation of refractory limonite ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(11): 2087-2093.
- [2] 李光辉,刘牡丹,姜涛,周太华,范晓慧.高铝铁矿石工艺矿物学及铝铁分离技术[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40(5):1165-1171.  
LI Guang-hui, LIU Mu-dan, JIANG Tao, ZHOU Tai-hua, FAN Xiao-hui. Mineralogy and separation of aluminum and iron of high-aluminum iron ores[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(5): 1165-1171.
- [3] 李光辉,董海刚,肖春梅,范晓慧,郭宇峰,姜涛.高铁铝土矿的工艺矿物学及铝铁分离技术[J].中南大学学报:自然科学版,2006,37(2):235-240.  
LI Guang-hui, DONG Hai-gang, XIAO Chun-mei, FAN Xiao-hui, GUO Yu-feng, JIANG Tao. Mineralogy and separation of aluminum and iron from high ferrous bauxite[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(2): 235-240.
- [4] BOLSAITIS P, CHANG V, SCHORIN H, ARANGUREN R. Beneficiation of ferruginous bauxites by high-gradient magnetic separation[J]. International Journal of Mineral Processing, 1981, 8(3): 249-263.
- [5] WANG Yu-hua, HUANG Chuan-bing, HU Yue-hua, HU Ye-min, LAN Ye. Beneficiation of diasporic-bauxite ore by selective flocculation with a polyacrylate flocculant[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(9): 664-672.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] JAMIESON E, JONES A, COOLING D, STOCKTON N. Magnetic separation of Red Sand to produce value[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(15): 1603-1605.
- [9] LIU Wan-chao, YANG Jia-kuan, XIAO Bo. Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(1): 474-478.
- [10] 朱忠平,黄柱成,姜涛,李光辉,庄剑鸣.高铁三水铝石型铝土矿烧结特性[J].中国有色金属学报,2007,17(8):1360-1366.  
ZHU Zhong-ping, HUANG Zhu-cheng, JIANG Tao, LI Guang-hui, ZHUANG Jian-ming. Sintering properties of high iron gibbsite-type bauxite ores[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(8): 1360-1366.
- [11] 李殷泰,毕诗文,段振瀛,杨毅宏,张敬东.关于广西贵港三水铝石型铝土矿综合利用工艺方案的探讨[J].轻金属,

- 1992(9): 6-14.
- LI Yin-tai, BI Shi-wen, DAN Zheng-yin, YANG Yi-hong, ZHANG Jing-dong. Study on multipurpose utilization technology of gibbsite-bauxite in Guangxi[J]. Light Metals, 1992(9): 6-14.
- [12] 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.
- [13] 黄礼煌. 化学选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 46-47.
- HUANG Li-huang. Chemical beneficiation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990: 46-47.
- [14] 郭培民, 赵 沛, 张殿伟. 低温下碳还原氧化铁的催化机理研究[J]. 钢铁钒钛, 2006, 27(4): 1-5.
- GUO Pei-min, ZHAO Pei, ZHANG Dian-wei. Study on catalytic mechanism of reducing hematite by carbon at low temperature[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2006, 27(4): 1-5.
- [15] 张临峰, 郭培民, 赵 沛. 碱金属盐对气基还原铁矿石的催化规律研究[J]. 钢铁钒钛, 2008, 29(1): 1-5.
- ZHANG Lin-feng, GUO Pei-min, ZHAO Pei. Study on catalytic mechanism of gas-based reduction of iron ore[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2008, 29(1): 1-5.
- [16] 郭兴敏, 唐洪福, 张圣弼.  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  在含碳球团还原中催化机理的研究[J]. 金属学报, 2000, 36(6): 638-641.
- GUO Xing-min, TANG Hong-fu, ZHANG Sheng-bi. Study on the catalysis mechanism of  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  for reduction of iron ore pellet with carbon[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(6): 638-641.
- [17] 姜涛, 刘牡丹, 李光辉, 孙 娜, 曾精华, 邱冠周. 钠化还原法处理高铝褐铁矿新工艺[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 565-571.
- JIANG Tao, LIU Mu-dan, LI Guang-hui, SUN Na, ZENG Jing-hua, QIU Guan-zhou. Sodium salt added reduction process treating high-aluminum content limonite ores[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 565-571.
- [18] WEISSBERGER S, ZIMMELS Y. Studies on concentration and direct reduction of the Ramim iron ore[J]. International Journal of Mineral Processing, 1983, 11(2): 115-130.

(编辑 龙怀中)