

红土镍矿钠盐还原焙烧—磁选的机理

李光辉, 饶明军, 姜涛, 史唐明, 黄晴晴

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘要: 配加钠盐焙烧可改善红土镍矿的还原—磁选效果, 显著提高磁性产品的镍、铁品位及回收率。通过热力学计算, 并结合 X 射线衍射、光学显微镜以及环境扫描电镜分析, 对硫酸钠和碳酸钠作用下红土镍矿的还原行为进行研究。结果表明: 钠盐在红土镍矿还原焙烧过程中, 可以破坏硅酸盐矿物的结构, 有利于镍的还原富集。碳酸钠强化镍还原的能力强于硫酸钠的, 硫酸钠则因还原过程中形成的硫具有降低镍铁金属颗粒表面张力的作用, 因而其促进镍铁颗粒聚集长大的能力明显高于碳酸钠的, 且硫酸钠作用下 FeS 的形成也有利于提高镍的品位。所以, 硫酸钠和碳酸钠的共同作用下可获得高镍品位的磁性产品及较高的镍回收率。

关键词: 红土镍矿; 钠盐; 还原焙烧; 镍铁

中图分类号: TF815

文献标志码: A

Reduction roasting-magnetic separation mechanisms of nickelferous laterite ore in presence of sodium salts

LI Guang-hui, RAO Ming-jun, JIANG Tao, SHI Tang-ming, HUANG Qing-qing

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

Abstract: The sodium salts are able to enhance the reduction roasting-magnetic separation of the laterite ores significantly and improve the content and recovery of nickel and iron of magnetic product. The reduced behaviors of saprolitic laterite in the presence of sodium sulfate or sodium carbonate were investigated by using thermodynamical calculation, X-ray diffractometry, optical microscopy and environmental scanning electron microscopy. The results show that sodium salts are able to enhance the reduction and beneficiation of nickel. The sodium carbonate is more effective than the sodium sulfate to reduce nickel locked in forsterite. However, the sodium sulfate is capable of facilitating the growth and coalescence of ferronickel particles because sulfur formed during the reduction of sodium sulfate, diminishing their surface tension, as well as improving the separation of nickel from iron by forming FeS and inhibiting the complete reduction of iron. Thus, a ferronickel material with high nickel content and high recovery of nickel can be obtained in the presence of both sodium sulfate and sodium carbonate.

Key words: laterite ore; sodium salts; reduction roasting; ferronickel

不锈钢用镍约占全球镍消费总量的 65%, 不锈钢工业的迅速发展推动了镍的强劲需求。红土镍矿占有世界陆基镍资源的 72%, 是未来镍供应的主要来源^[1-2]。用红土镍矿生产镍铁合金作为不锈钢的生产原料, 具有成本低、可综合回收铁的优点, 是保障不锈钢工业可持续发展的有效途径之一^[3-4]。

红土镍矿还原焙烧—分选, 可使镍、铁在一定程度上得到富集, 但由于镍在原矿中含量低、且多以类质同像形式存在于针铁矿或蛇纹石中, 致使其在还原、分选过程中富集和回收效果均不理想。碱金属盐能催化金属氧化物的炭热还原, 通过提高碳的反应活性, 使金属氧化物的晶格点阵发生畸变以及使还原产物产

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50725416); 湖南省研究生科研创新项目(CX2011B124)

收稿日期: 2011-01-12; 修订日期: 2011-03-26

通信作者: 姜涛, 教授, 博士; 电话: 0731-88877656; E-mail: jiangtao@mail.csu.edu.cn

生微孔、加速还原气体的内扩散。同时, 碱金属氧化物可与 SiO_2 、 Al_2O_3 等酸性脉石成分发生反应, 起到破坏矿石结构的作用^[5-7]。

本文作者研究发现^[8-10]: 添加硫酸钠和碳酸钠可显著强化红土镍矿的还原焙烧、改善磁选效果, 提高镍铁精矿中镍、铁品位和回收率。由此开发出红土镍矿钠盐还原焙烧-磁选制取镍铁合金原料的新工艺。采用该新工艺处理含镍 1.58% 的腐泥土型红土镍矿, 磁选所得磁性产品的镍品位可分别从无钠盐时的 2.0% 提高到 7.5%, 镍的回收率也相应从 19.1% 上升到 82.7%。

为揭示钠盐强化红土镍矿还原-磁选的作用机制, 本文作者通过热力学计算, 并结合 X 射线衍射技术、光学显微鉴定以及环境扫描电镜分析, 研究了钠盐作用下红土镍矿还原产物物相组成、微观结构变化等。

1 实验

1.1 实验原料

试验所用的添加剂为无水碳酸钠(Na_2CO_3)和无水硫酸钠(Na_2SO_4), 均为分析纯试剂。还原剂为褐煤, 其固定碳含量 48.47%, 挥发份含量 43.08%, 灰分含量 8.45%, 试验前将煤破碎至粒度小于 5 mm。

所用的红土镍矿来自印尼, 含 1.58% Ni 和 22.06% (质量分数) Fe_T , 脉石成分主要包括 19.5% MgO 和 35.6% SiO_2 。矿物组成为利蛇纹石($\text{Mg}_3\text{Si}_2(\text{OH})_4\text{O}_5$)、针铁矿(FeOOH)、赤铁矿(Fe_2O_3) 以及少量石英(SiO_2), 属于腐泥土型红土镍矿。化学物相分析结果(见表 1)表明: 原矿中的镍不以独立矿物存在, 主要分布于铁氧化物和硅酸盐矿物中, 其分布率分别为 66.0% 和 28.3%。从 TG-DSC 曲线(见图 1)可知, 原矿中的利蛇纹石在 898 K 左右脱除羟基生成无定形的硅酸盐, 而无定形的硅酸盐在 1 097 K 左右重结晶生成镁橄榄石(Mg_2SiO_4)和顽火辉石(MgSiO_3)^[11-12]。稳定、致密的镁橄榄石和顽火辉石的生成, 不利于赋存于其晶格中的镍的还原^[13]。

1.2 方法

红土镍矿经破碎、磨矿至粒径小于 $74\text{ }\mu\text{m}$ 部分的占 80% 以上, 与添加剂按比例(质量比)混匀、造球, 球团经干燥后装入预先铺有一定量还原煤的耐高温不锈钢容器($d60\text{ mm}\times 150\text{ mm}$)中, 再覆盖过量还原煤后置于竖式电阻炉(SK-8-13 型)内按设定温度进行还原

表 1 镍的化学物相分析

Table 1 Chemical phase analysis of nickel of laterite sample

Phase	Mass fraction/%	Distribution rate/%
Adsorption	0.025	1.6
Sulfides	0.064	4.1
Iron oxides	1.075	66.0
Silicates	0.416	28.3
Total	1.580	100.0

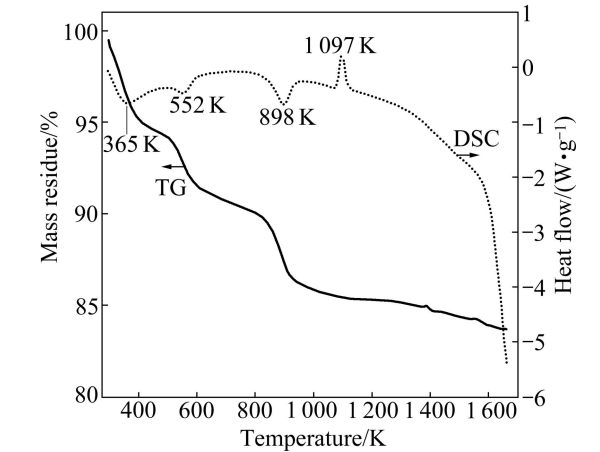


图 1 红土镍矿 TG-DSC 曲线

Fig. 1 TG-DSC curves of laterite ore

焙烧。

采用 X 射线衍射仪(日本理学 D/Max 2500 型 X 射线衍射仪)测定还原产物的物相组成; 采用光学显微镜(德国徕卡 DM RXP 型光学显微镜)观察还原产物中金属镍铁颗粒的大小; 采用环境扫描电镜(荷兰 FEI Quanta 200 型环境扫描电镜)对还原产物中各主要元素的分布赋存状态进行分析。

2 钠盐作用下红土镍矿的还原行为

2.1 热力学分析

根据红土镍矿的主要化学成分、物相组成特点及镍的赋存状态, 分析了铁、镍氧化物及蛇纹石钠化还原焙烧的热力学。

2.1.1 铁、镍氧化物还原焙烧的热力学

铁、镍氧化物被固体碳还原平衡图(见图 2)。从图 2 可以看出, NiO 极易还原, 而在较低的温度和极低的 CO 浓度下即可还原成金属镍。而铁氧化物需在 $T>868\text{ K}$ 、 $\varphi(\text{CO})>59.1\%$ 时(图 2 中 T_a 点)才可还原生成金属铁, 还原生成的金属镍和金属铁可形成一系列的固溶体, 即镍铁合金^[14]。

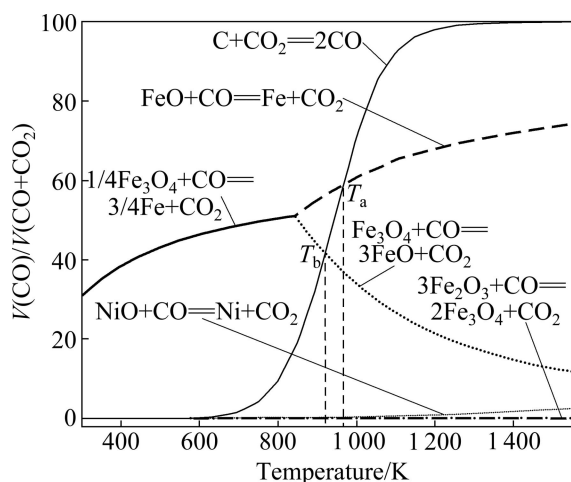


图2 固体碳还原铁、镍氧化物的平衡气相组成与温度的关系

Fig. 2 Relationship between temperature and equilibrium composition of iron and nickel oxides reduced by solid carbon

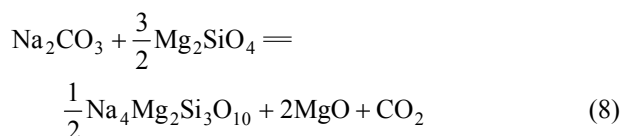
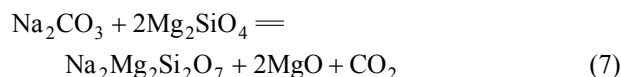
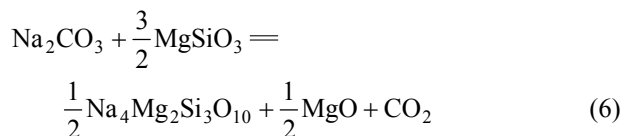
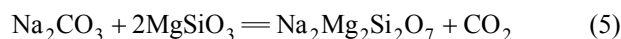
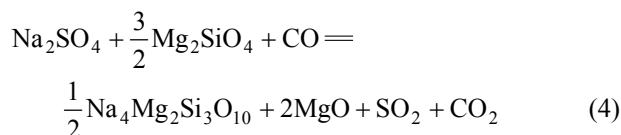
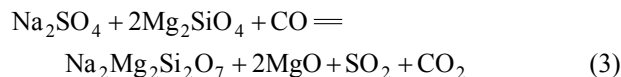
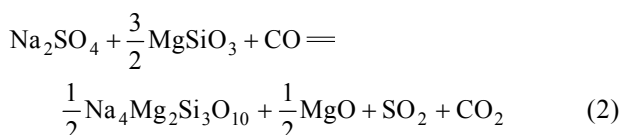
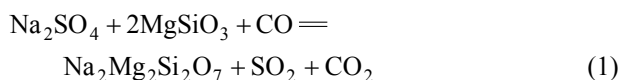
热力学分析表明, 采用还原方法处理红土镍矿, 在适宜的条件下可实现镍的选择性还原, 制备高镍品位的镍铁合金。但在实际矿石中因镍的含量低、赋存状态复杂, 红土镍矿的还原-分选效果并不理想^[15]。

当有碳酸钠和硫酸钠存在时, Na_2CO_3 与 Fe_2O_3 反应生成 $\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{O}_4$, 还原气氛下 Na_2SO_4 可生成 Na_2S 和 S , Na_2S 还会与 FeO 反应生成 FeS , 从而可改变铁氧化物的还原历程, 且生成的低熔点物质为还原过程的扩散传质创造了有利条件^[16-17]。

2.1.2 蛇纹石钠盐还原焙烧的热力学

对还原焙烧过程中碳酸钠、硫酸钠与蛇纹石反应的热力学进行了计算。对于缺乏热力学数据的三元复杂硅酸盐($\text{Na}_2\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 和 $\text{Na}_4\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$), 本文作者参照文献[18]中的方法, 采用复杂含氧盐矿物热力学数据的简单估算方法计算其标准摩尔生成吉布斯自由能。

结合 TG-DSC 曲线(见图 1)可知, 红土镍矿中的利蛇纹石在高温下生成镁橄榄石(Mg_2SiO_4)和顽火辉石(MgSiO_3), 因此, 添加硫酸钠和碳酸钠进行还原焙烧时, Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 与 MgSiO_3 、 Mg_2SiO_4 可能发生的反应如式(1)~(8)所示。



将上述反应在 298~1 600 K 范围内的 $\Delta G^\ominus$ 与 T 作图(见图 3)可知, 与 Mg_2SiO_4 相比, MgSiO_3 更易与 Na_2SO_4 或 Na_2CO_3 发生反应, MgSiO_3 与 Na_2SO_4 或 Na_2CO_3 反应的开始反应温度均在 1 100 K 以下, 而 Mg_2SiO_4 与 Na_2SO_4 或 Na_2CO_3 的反应则相对较为困难, 其中与 Na_2SO_4 的开始反应温度在 1 400 K 以上。

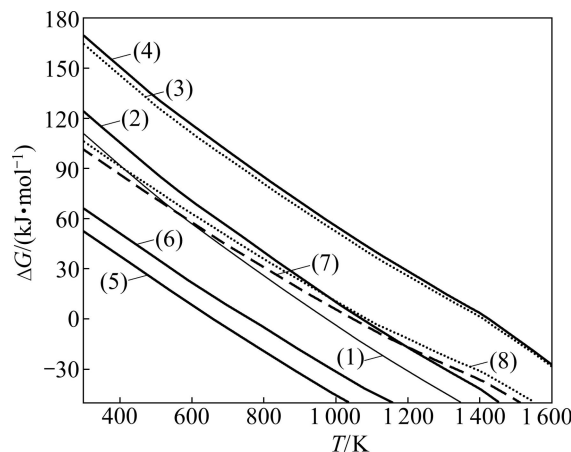


图3 反应式(1)~(8)的 $\Delta G^\ominus$ - T 关系曲线

Fig. 3 Plots of $\Delta G^\ominus$ - T for reactions (1)~(8)

在 298~1 600 K 范围内, Na_2CO_3 比 Na_2SO_4 更易与 MgSiO_3 或 Mg_2SiO_4 发生反应。在 1 373 K 条件下, Na_2CO_3 能与 MgSiO_3 或 Mg_2SiO_4 发生反应, 而 Na_2SO_4 只能与 MgSiO_3 反应, 因而对破坏 MgSiO_3 和 Mg_2SiO_4 等结构的作用更大, 有利于赋存于蛇纹石中镍的还原。由此可推断, Na_2CO_3 对强化蛇纹石中镍还原的能力要强于 Na_2SO_4 的。

2.2 还原过程中红土镍矿的物相转变规律

采用 X 射线衍射技术研究硫酸钠和碳酸钠作用下红土镍矿还原产物的物相组成, 其结果分别如图 4 和 5 所示。还原焙烧条件为焙烧温度 1 100 °C, 焙烧时间 60 min。

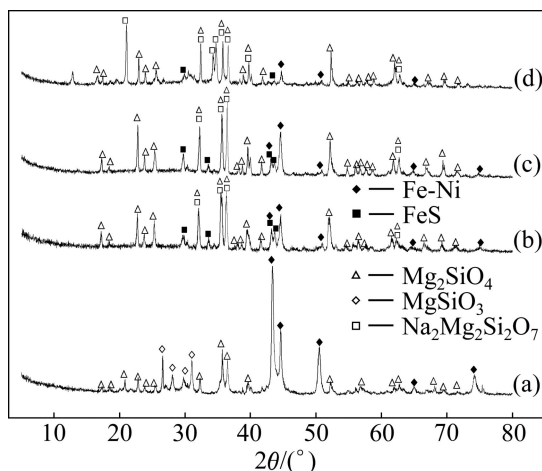


图 4 不同硫酸钠用量下还原产物的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of reduced product with various amounts of sodium sulfate: (a) 0; (b) 10%; (c) 20%; (d) 50%

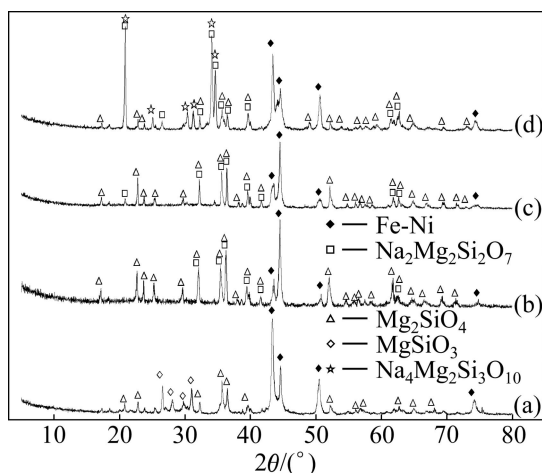


图 5 不同碳酸钠用量下还原产物的 XRD 谱

Fig. 5 XRD patterns of reduced product of various amounts of sodium carbonate: (a) 0; (b) 10%; (c) 20%; (d) 50%

由图 4 中 XRD 结果可知, 与未加钠盐的还原产物物相组成(见图 4(a))相比, 添加硫酸钠后, 还原产物中 MgSiO_3 相消失, 而新生了 FeS 和 $\text{Na}_2\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 相; 与此同时, Fe-Ni 衍射峰的强度明显减弱, 这是由于 FeS 的形成导致铁氧化物还原成金属铁的数量减少。这一结果表明, FeS 的生成有利于铁与镍的分离, 为磁选获得高镍含量的镍铁精矿创造了有利条件。

红土镍矿添加碳酸钠还原焙烧后, 还原产物的 XRD 谱如图 5 所示。由图 5 可见, 还原产物中 MgSiO_3 物相消失, 随着碳酸钠用量的增加, Mg_2SiO_4 衍射峰也不断减弱。结合热力学分析可知, 这是因为 Mg_2SiO_4 与 Na_2CO_3 发生了反应, 当 Na_2CO_3 用量加大到 50% 时, 还原产物物相中出现 $\text{Na}_4\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$ 。

2.3 还原过程中镍铁颗粒的长大特性

还原过程中红土镍矿中的镍铁颗粒需长大到一定的尺寸, 才能通过磁选将其与脉石成分得到有效分离, 获得高品质的精矿。为进一步揭示不同钠盐对红土镍矿还原焙烧过程中镍铁颗粒长大的影响, 对硫酸钠和碳酸钠作用下还原球团显微结构的特征与主要元素分布状态进行了分析。还原球团的焙烧条件为焙烧温度 1 100 °C, 焙烧时间 60 min。

2.3.1 显微结构分析

图 6 所示为不同钠盐作用下还原球团的显微结构。由图 6(a)可以看出, 不加添加剂对红土镍矿进行还原时, 球团结构紧密, 亮白色的镍铁颗粒数量很少, 表明镍、铁氧化物的还原程度不够, 且还原后的镍铁颗粒较小, 未能聚集长大, 不利于后续的磁选分离。添加 10%硫酸钠后(见图 6(b)), 红土镍矿还原球团孔隙增加, 镍铁颗粒明显聚集长大。这是由于硫酸钠在还原过程中产生的单质硫降低了镍铁合金颗粒的表面张力和熔点, 从而促进了镍铁合金颗粒的聚集和长大^[19]。

与添加 10%硫酸钠相比, 添加 10%碳酸钠后(见图 6(c)), 还原产物中镍铁颗粒数目较多, 但颗粒间并未相互连接长大, 嵌布粒度细, 一般在 2~5 μm 之间, 表明碳酸钠促进了镍、铁的还原, 但是对镍铁颗粒长大的作用不明显。在硫酸钠和碳酸钠的共同作用下(见图 6(d)), 镍铁颗粒进一步聚集长大, 部分镍铁颗粒的粒度达到 50 μm 以上, 可通过磁选与非磁性脉石成分得到分离。

2.3.2 元素分布状态分析

有无钠盐条件下还原球团的元素分布状态如图 7 和 8 所示。由图 7 可见, 无钠盐作用下, 铁、镍的分布区域并不一致, 表明镍、铁未能得到有效的富集。而添加 10%硫酸钠和 10%碳酸钠后(见图 8), 还原产物中的镍、铁元素的分布集中且区域基本一致, 镍铁颗粒粒径明显增大, 与镁、硅、钠等脉石成分($\text{Na}_2\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_4\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}$)的分布区域界限分明, 极有利于后续的磁选分离, 进而获得高品位的镍铁产品和镍铁回收率。

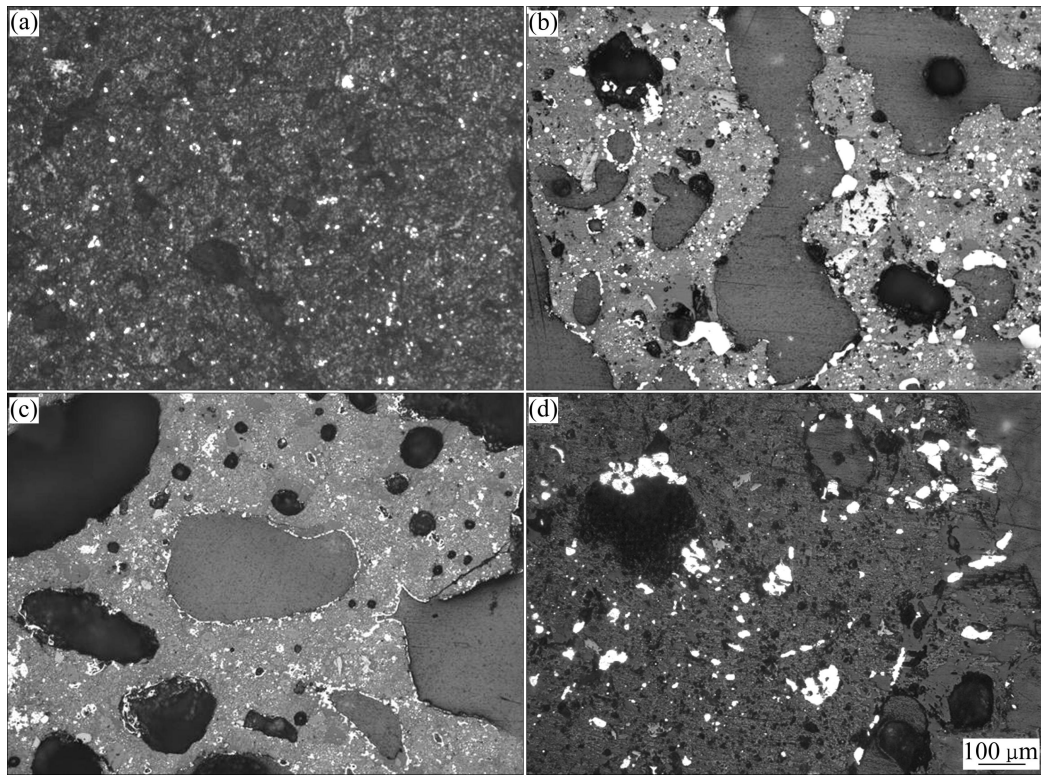


图 6 不同钠盐作用下还原球团的显微结构

Fig. 6 Microstructures of reduced pellets with addition of different sodium salts: (a) Without additive; (b) 10% Na_2SO_4 ; (c) 10% Na_2CO_3 ; (d) 10% Na_2SO_4 +10% Na_2CO_3

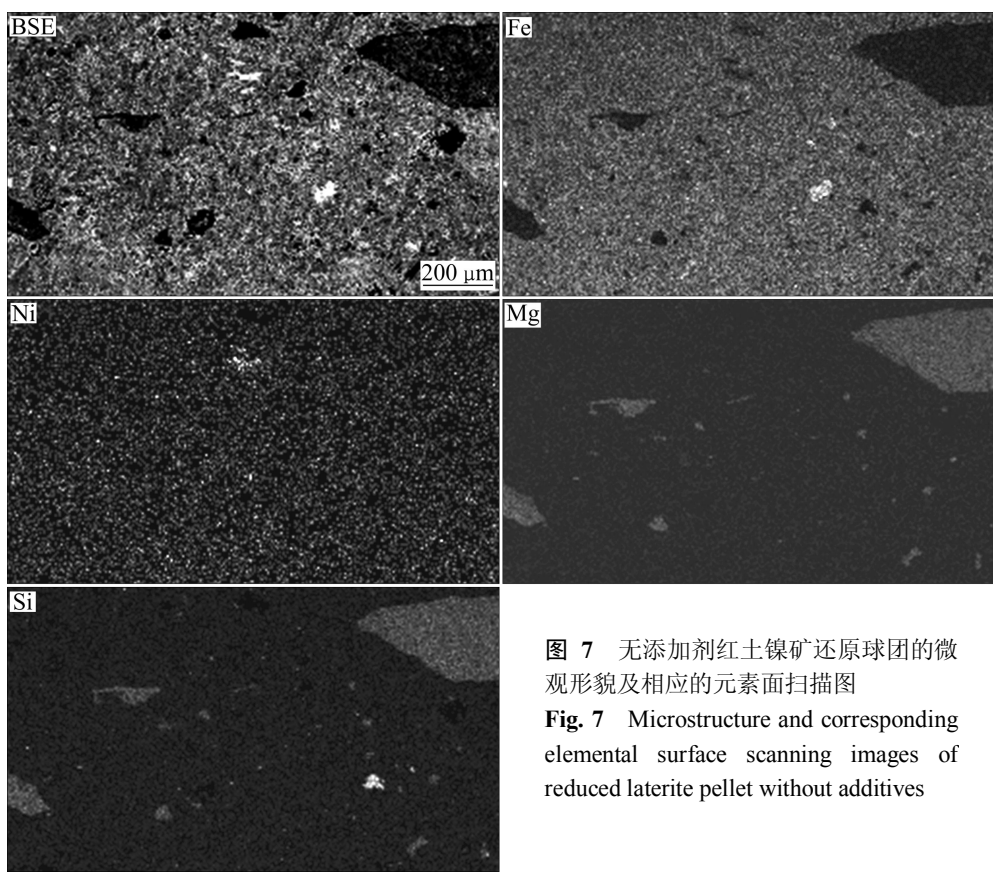


图 7 无添加剂红土镍矿还原球团的微观形貌及相应的元素面扫描图

Fig. 7 Microstructure and corresponding elemental surface scanning images of reduced laterite pellet without additives

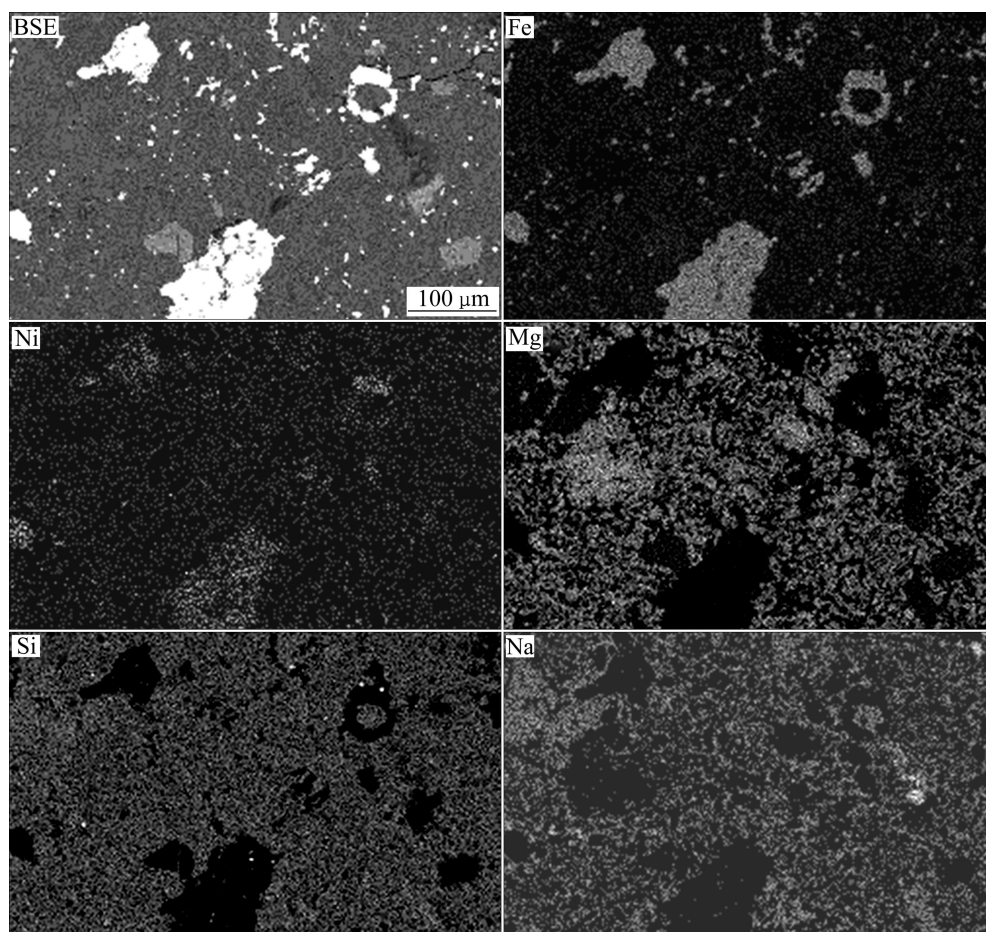


图 8 10%Na₂SO₄ 和 10%Na₂CO₃ 共同作用下还原球团的微观形貌及相应的元素面扫描图

Fig. 8 Microstructure and corresponding elemental surface scanning images of reduced pellet with Na₂SO₄ and Na₂CO₃

3 结论

1) 当还原温度低于 1 100 °C 时, 碳酸钠可与硅酸盐矿物镁橄榄石(Mg₂SiO₄)、顽火辉石(MgSiO₃)反应生成 Na₂Mg₂Si₂O₇ 和 Na₄Mg₂Si₃O₁₀, 而硫酸钠只能与 MgSiO₃ 发生反应。因此, 碳酸钠对破坏硅酸盐矿物的结构和促进赋存于蛇纹石中镍的还原作用更大。

2) 碳酸钠可促进镍、铁的金属化还原, 但对还原后镍、铁颗粒聚集长大的作用效果不明显。硫酸钠则因还原过程中硫的生成降低了镍铁金属颗粒的表面张力, 促进了镍铁颗粒的聚集长大; 而且通过 Na₂S 与 FeO 反应形成 FeS, 还可减少铁氧化物还原成金属铁的数量, 有利于铁、镍的分离。

3) 在硫酸钠和碳酸钠共同作用下, 还原产物中镍铁颗粒的尺寸较无钠盐作用时明显增大, 部分镍铁颗粒的粒度达到 50 μm 以上; 镍、铁元素分布集中且区域基本一致, 与脉石成分的分布区域界限分明, 为通

过磁选方法有效分离镁和硅等非磁性脉石成分, 为获得高镍品位的磁性产品及高的镍回收率提供了有利的条件。

REFERENCES

- [1] DALVI A D, BACON W G, SBOUME R C O. The past and the future of nickel laterites [EB/OL]. <http://www.pdac.ca/pdac/publications/papers/2004/techprgm-dalvi-bacon.pdf>. 2004-03-04.
 - [2] KIM J, DODBIBA G, TANNO H, OKAYA K, MATSUO S, FUJITA T. Calcination of low-grade laterite for concentration of Ni by magnetic separation[J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(4): 282-288.
 - [3] WARNER A E M, DÍAZ C M, DALVI A D, MACKEY P J, TARASOV A V. JOM world nonferrous smelter survey (Part III): nickel:laterite[J]. *JOM*, 2006, 58(4): 11-20.
 - [4] 张友平, 周渝生, 李肇毅, 李维国. 红土矿资源特点和火法冶金工艺分析[J]. *铁合金*, 2007, 38(6): 18-21.
- ZHANG You-ping, ZHOU Yu-sheng, LI Zhao-yi, LI Wei-guo.

- Characteristics of laterite resource and analysis on its pyrometallurgy process[J]. *Ferro-alloys*, 2007, 38(6): 18–21.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 郭兴敏, 唐洪福, 张圣弼. Li_2CO_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 Li_2CO_3 for reduction of iron ore pellet with carbon[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, 36(6): 638–641.
- [8] 李光辉, 姜 涛, 范晓慧, 李 骞, 饶明军, 张元波. 一种用于强化红土镍矿还原分选的添加剂. 中国, CN 101413053A [P]. 2009–04–22.
- LI Guang-hui, JIANG Tao, FAN Xiao-hui, LI Qian, ZHUANG Yuan-bo. Additive for strengthening reduction and separation of laterite-nickel ore: CN 101413053A [P]. 2009–04–22.
- [9] LI Guang-hui, RAO Ming-jun, JIANG Tao, ZHANG Yuan-bo, LI Qian. A novel process for preparing ferronickel powder from laterite ores[C]//TMS 139th Annual Meeting & Exhibition. Warrendale, PA, USA: Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 2010, 1: 489–496.
- [10] 李光辉, 饶明军, 姜 涛, 黄晴晴, 史唐明, 张元波. 红土镍矿还原焙烧–磁选制取镍铁合金原料的新工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(12): 3137–3142.
- LI Guang-hui, RAO Ming-jun, JIANG Tao, HUANG Qing-qing, SHI Tang-ming, ZHANG Yuan-bo. Innovative process for preparing ferronickel materials from laterite ore by reduction roasting-magnetic separation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(12): 3137–3142.
- [11] 李金辉, 李新海, 胡启阳, 王志兴, 周友元, 郑俊超, 伍 凌. 活化焙烧强化盐酸浸出红土矿的镍[J]. *中南大学学报*, 2010, 41(5): 1691–1697.
- LI Jin-hui, LI Xin-hai, HU Qi-yang, WANG Zhi-xing, ZHOU You-yuan, ZHENG Jun-chao, WU Ling. Enhancement of nickel extraction from laterite in hydrochloride acid through activated roasting[J]. *Journal of Central South University*, 2010, 41(5): 1691–1697.
- [12] KOZAWA T, ONDA A, YANAGISAWA K, CHIBA O, ISHIWATA H, TAKANAMI T. Thermal decomposition of chrysotile-containing wastes in a water vapor atmosphere[J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2010, 118(1384): 1199–1201.
- [13] VALIX M, CHEUNG W H. Effect of sulfur on the mineral phases of laterite ores at high temperature reduction[J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(7): 523–530.
- [14] CORES A, FORMOSO A, LARREA M T, ORTIZ J. Kinetic regularities in joint reduction of nickel and iron oxides under non-isothermal conditions[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1989, 16(6): 446–449.
- [15] 张永禄, 王成彦, 徐志峰. 低品位碱预处理红土镍矿加压浸出过程[J]. *过程工程学报*, 2010, 10(2): 263–269.
- ZHANG Yong-lu, WANG Cheng-yan, XU Zhi-feng. Pressure leaching of alkali-pretreated limonitic laterite ore[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2010, 10(2): 263–269.
- [16] 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. Novel process for treatment of high-aluminum limonite ore by reduction roasting with addition of sodium salts[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(3): 565–571.
- [17] 姜 涛, 刘牡丹, 李光辉, 孙 娜, 曾精华, 邱冠周. 钠盐对高铝褐铁矿还原焙烧铝铁分离的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(6): 1226–1233.
- JIANG Tao, LIU Mu-dan, LI Guang-hui, SUN Na, ZENG Jing-hua, QIU Guan-zhou. Effects of sodium-salt on Al-Fe separation by reduction roasting for high-aluminum content limonite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(6): 1226–1233.
- [18] 钱红亮, 刘 畅, 吉远辉, 姚文俊, 冯 新, 陆小华. 复杂含氧盐矿物热力学数据的简单估算方法[J]. *化工学报*, 2010, 61(3): 544–550.
- QIAN Hong-liang, LIU Chang, JI Yuan-hui, YAO Wen-jun, FENG Xin, LU Xiao-hua. Simple estimation method for thermodynamic data of complex oxysalt minerals[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2010, 61(3): 544–550.
- [19] WATANABE T, ONO S, ARAI H, MATSUMORI T. Direct reduction of garnierite ore for production of ferro-nickel with a rotary kiln at Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd., Oheyama Works[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1987, 19(1/4): 173–187.

(编辑 龙怀中)