

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.02.004

## 铬铁矿的还原焙烧与磁选分离

亓捷, 刘承军, 张波, 姜茂发

(东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 沈阳 110819)

**摘要:**以南非铬铁矿为原料,以潞安煤粉为还原剂,进行了铬铁矿粉还原焙烧与磁选分离实验。借助扫描电镜、能谱分析和 X 射线衍射分析,对碳热还原和磁选分离过程中的物相变化进行了系统研究。实验发现,当温度低于 1 200 ℃时,铬铁矿仅发生少量铁氧化物的还原,当温度高于 1 300 ℃时,铬铁矿中铬氧化物开始被还原成碳化铬。随着还原反应的不断进行,铬铁尖晶石结构逐渐发生转变并被破坏。在本实验条件下,铬铁矿较为适宜的预处理温度为 1 200 ℃,此温度下的还原产物磁选后,磁选产物几乎全部为金属铁,磁选所得尾渣的除铁率为 46%,铬的收得率为 80%, $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$ 值高达 3.75。研究工作对于铬铁矿预处理工艺的设计开发及低品位铬铁矿的综合利用具有理论指导意义。

**关键词:**铬铁矿;焙烧;尖晶石结构;磁选;铬铁比

**中图分类号:**TF 046.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2015)02-0025-08

## Reduction roasting and magnetic separation of chromite ore

QI Jie, LIU Chengjun, ZHANG Bo, JIANG Maofa

(Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Ores, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, P.R.China)

**Abstract:** Reduction roasting and magnetic separation of chromite ore is investigated, using South African chromite ore as raw materials and Lu'an pulverized coal as reductant. The phase changes in the reduction and magnetic separation process is analyzed systematically by means of SEM-EDS and X ray diffraction. The results show that only iron oxides in the chromite ore are reduced when the temperature is below 1 200 ℃, and chromium oxides are reduced into chromium carbide when the temperature exceeds 1 300 ℃. The spinel structure is transformed and destroyed gradually with the proceeding of reduction reaction. Under the considering experimental conditions, the appropriate temperature for pretreatment is 1 200 ℃, with an iron removal rate of 46%, a chromium yield rate of 80%, and a higher  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$  value of 3.75, the magnetic separation product is mainly iron. This work has great theoretical significance for the development of chromite ore pretreatment process and the comprehensive utilization of low-grade chromite ore.

**收稿日期:**2014-11-04

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划项目(2012CB626812);教育部新世纪人才计划项目(NCET-11-0077);辽宁省自然科学基金项目(201102062);辽宁省科技攻关项目(2012221013)。

Supported by National Key Basic Research Project of China (2012CB626812), Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (NCET-11-0077), Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (201102062), and Key Science and Technology Program of Liaoning Province of China (2012221013).

**作者简介:**亓捷(1987-),男,东北大学博士研究生,主要从事特色冶金资源高效综合利用研究。

刘承军(联系人),男,东北大学教授,博士生导师,(E-mail)liucj@smm.neu.edu.cn。

**Key words:** chromite ore;roasting;spinel structure;magnetic separation; $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$

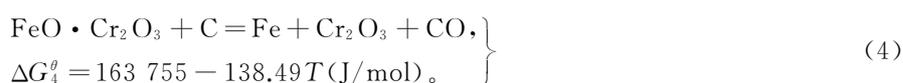
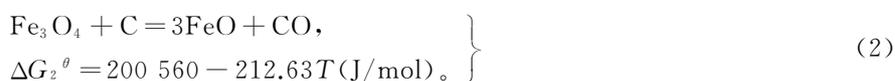
铬铁矿是生产铬铁合金和铬盐的主要原料,具有稳定的立方尖晶石结构,各组分化学键类型十分相似,类质同构,结合紧密,化学稳定性强,利用难度较大<sup>[1-3]</sup>。低品位与低铬铁比( $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$ )的矿石不仅不能满足火法冶炼铬铁合金或不锈钢的成分要求,而且,在铬盐生产过程中,尖晶石结构破坏导致大量与铬离子性质相近的铁离子在溶液中溶出,增加了分离除杂的难度与有价离子的损失<sup>[4-6]</sup>。

为获得合格的铬铁产品与铬盐产品,冶金工业和铬盐工业对铬铁矿品级的要求日渐严苛,生产用铬铁矿均需具有较高的铬铁比,部分化工制盐用铬铁矿要求铬铁比大于 2.0~2.5<sup>[7-8]</sup>。然而,随着铬铁矿资源的不断开采与消耗,高品位的铬铁矿资源日益减少,低品位或低  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$  铬铁矿资源的高效利用具有重要的现实意义。

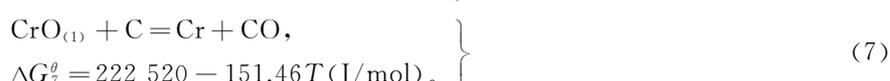
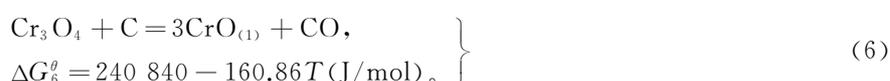
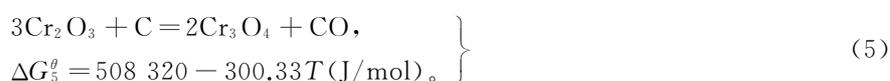
冶金工业中,传统的高碳铬铁生产过程普遍采用高温碳热还原法破坏尖晶石结构<sup>[9-11]</sup>。为提高成本效益,铬铁矿的固态预还原处理工艺已被提出<sup>[12]</sup>,但是,其研究均以生产预还原金属化球团为目的,以利于进一步实现铁、铬的快速还原,生产铬铁合金<sup>[13]</sup>。通过还原焙烧预处理并结合磁选工艺实现铬铁矿选择性还原与富集的研究尚未见报道。笔者基于碳热还原原理,提出采用铬铁矿粉还原焙烧预处理工艺,进行铁、铬氧化物的选择性还原,破坏尖晶石结构。同时,通过磁选工艺分离还原产物,从而有效提高铬铁矿的铬铁比,实现低品位或低  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$  铬铁矿资源的综合利用。在热力学分析的基础上,以潞安煤粉和南非铬铁矿粉为原料,进行了不同实验条件下的铬铁矿还原焙烧预处理实验研究,研究工作对于铬铁矿预处理工艺的设计开发及低品位矿石的综合利用具有理论指导意义。

## 1 热力学分析

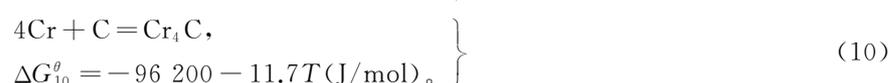
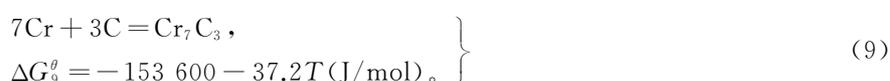
查阅文献<sup>[14-15]</sup>和热力学手册<sup>[16-17]</sup>,首先针对铁铬氧化物的选择性还原做了如下热力学分析。



由式(1)~(4)可得铬铁矿中铁氧化物被还原为金属铁的理论最高温度为 909 ℃。



根据式(5)~(7),可得铬氧化物逐级还原反应自发进行的最低温度为 1 420 ℃。然而,由式(8)~(11)判断,在碳过量的条件下,金属铬与碳会形成铬的碳化物,实际还原产物以铬的碳化物形式存在。



$$\left. \begin{aligned} 23\text{Cr} + 6\text{C} &= \text{Cr}_{23}\text{C}_6, \\ \Delta G_{11}^{\theta} &= -309\,600 - 77.4T \text{ (J/mol)}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} 2/3\text{Cr}_2\text{O}_3 + 26/9\text{C} &= 4/9\text{Cr}_3\text{C}_2 + 2\text{CO}, \\ \Delta G_{12}^{\theta} &= 478\,690 - 347.4T \text{ (J/mol)}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} 2/3\text{Cr}_2\text{O}_3 + 18/7\text{C} &= 4/21\text{Cr}_7\text{C}_3 + 2\text{CO}, \\ \Delta G_{13}^{\theta} &= 482\,288 - 343.5T \text{ (J/mol)}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} 2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 7\text{C} &= \text{Cr}_4\text{C} + 6\text{CO}, \\ \Delta G_{14}^{\theta} &= 373\,150 - 258.8T \text{ (J/mol)}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} 2/3\text{Cr}_2\text{O}_3 + 54/23\text{C} &= 4/69\text{Cr}_{23}\text{C}_6 + 2\text{CO}, \\ \Delta G_{15}^{\theta} &= 494\,369 - 341.7T \text{ (J/mol)}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由式(12)~(15)计算所得, 铬氧化物被还原为碳化铬的最低温度为 1 105 ℃ 左右。所以, 控制选择性还原的理论温度区间为 909~1 105 ℃。由于铬铁矿具有稳定的尖晶石结构, 碳热还原反应的动力学条件较差, 故实际反应温度应高于理论计算温度, 这里选择 1 100~1 500 ℃ 为实验温度区间。

根据本实验所用铬铁矿的成分, 在设定的实验温度区间内利用 Factsage 热力学计算软件, 对不同温度下的 Cr-Fe-C-O 系优势区图进行了计算描绘, 图 1(a)、(b) 所示温度分别为 1 100 ℃ 和 1 500 ℃。由图 1 可得, 常压下, 当温度为 1 100~1 500 ℃ 时, 明显存在“Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe”或“FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+Fe”或“FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>”的稳定区域。以上各区域的存在都表明, 通过控制反应条件可以实现铬铁矿中 FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的选择性还原。

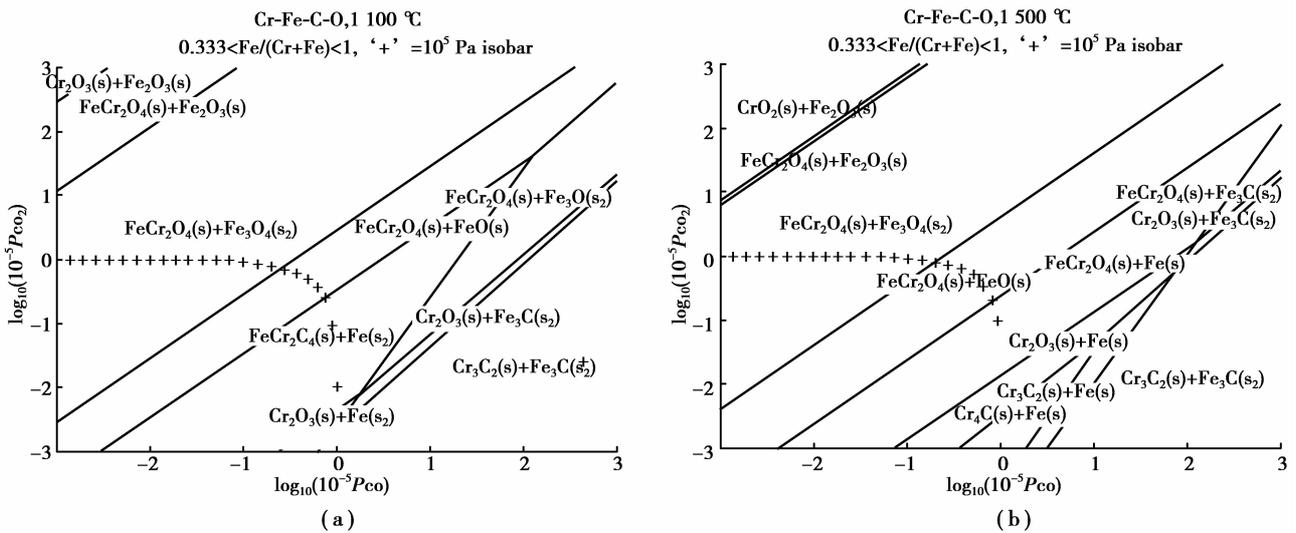


图 1 Cr-Fe-C-O 系优势区图  
Fig.1 Cr-Fe-C-O predominance area diagrams

## 2 实验方法

实验所用的主要原料为南非铬铁矿粉和潞安矿煤粉, 其成分分别如表 1 和表 2 所示。实验所用南非铬铁矿  $w(\sum\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$  值为 1.96。实验用铬铁矿粉与煤粉的粒度均小于 0.074 mm。

表 1 南非铬铁矿主要化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of South African chromite (mass fraction/%)

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO
5.22	18.87	45.18	6.79	13.25	8.87	1.82

表 2 潞安矿煤粉主要化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition of Lu'an pulverized coal (mass fraction/%)

固定碳	挥发份	灰分	水分	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S
71.06	11.17	10.17	7.60	0.17	4.54	3.60	0.48	0.11	0.34

将铬铁矿粉与煤粉均匀混合后放入石墨坩埚,在高温电阻炉中恒温加热进行实验。考虑铬铁矿的还原与还原过程中煤粉的烧损,确定煤粉配加量为矿粉质量的 25%,还原温度分别为 1 100 °C、1 200 °C、1 300 °C、1 400 °C 和 1 500 °C,还原时间为 2 h。还原产物在 200 mT 磁场强度下进行磁选分离,得到含金属铁等物相的磁性产物。由于在本实验条件下,煤粉添加过量,因此,在磁选尾渣中仍残存部分未反应的煤粉。实验过程将磁选尾渣置于刚玉坩埚中,在马弗炉中于 1 300 °C 下煅烧 2 h,以有效去除残存煤粉。

利用 D/max-2500PC 型 X 射线衍射仪对还原产物和磁选产物进行物相分析,判断还原过程的物相变化并确定磁选产物的物相。使用 SSX-550™ 扫描电子显微镜观察不同实验条件下还原产物的形貌变化并进行能谱分析。同时,通过化学分析的方法测定还原产物和磁选产物中铁、铬元素的含量,以定量分析铁铬分离效果和铬铁比的变化情况。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 铬铁矿还原焙烧

图 2 所示为本实验所用南非铬铁矿的扫描电镜图像和能谱分析曲线,观察图像可知,南非铬铁矿形貌完整,结晶程度良好无缺陷,且矿粉表面光洁,无附着物。由能谱分析结果可知,铬铁矿高亮物相 A 为富含铁、铬、镁、铝等元素的尖晶石物相,灰暗物相 B 含硅较多。

图 3 与图 4 所示为南非铬铁矿 1 100 °C 和 1 200 °C 还原 2 h 后还原产物的扫描电镜图像和能谱分析曲线。随着还原反应的进行,铬铁矿表面产生大量高亮的瘤状产物,聚集包裹在铬铁矿基体之上。能谱分析可知,其主要元素为铁(A 点),同时含有少量氧与铬。B 点所示铬铁矿基体中铁含量明显降低,镁、铝、铬、硅的含量较高。

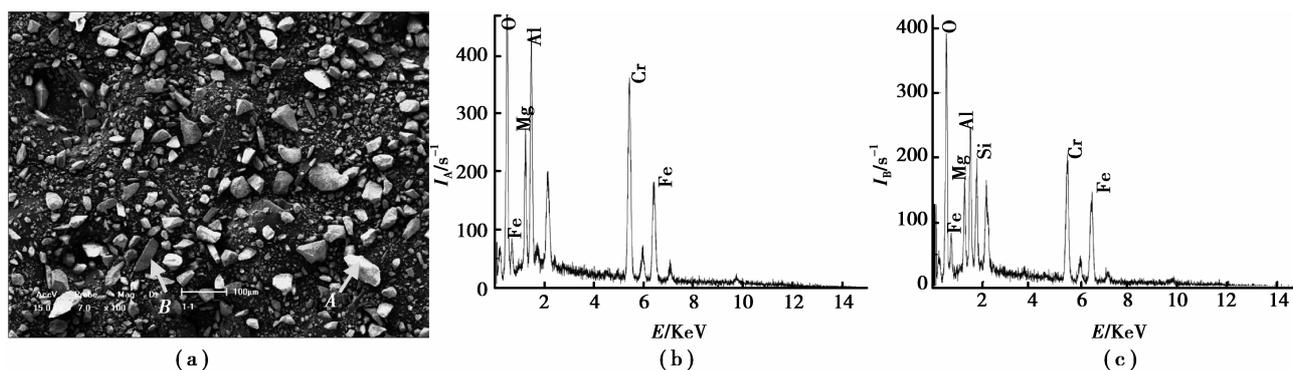


图 2 南非铬铁矿扫描电镜图像与能谱分析

Fig.2 SEM-EDS of the South African chromite ore

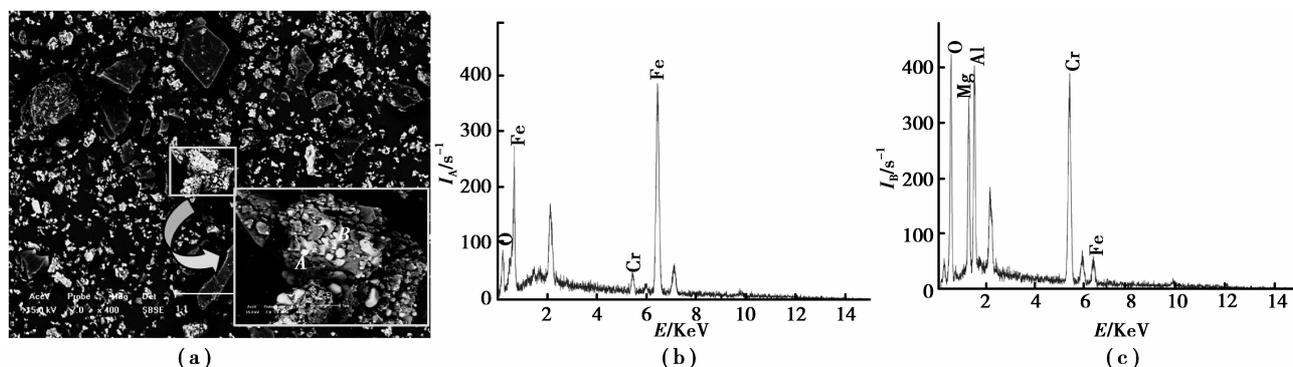


图 3 1 100 °C 还原产物扫描电镜图像与能谱分析

Fig.3 SEM-EDS of the reduction product at 1 100 °C

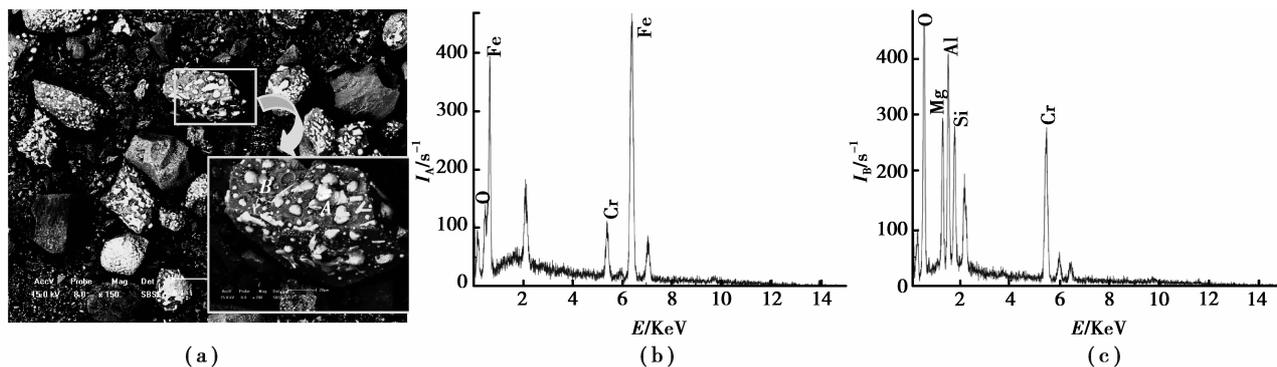


图 4 1 200 °C 还原产物扫描电镜图像与能谱分析  
Fig.4 SEM-EDS of the reduction product at 1 200 °C

随着温度的升高,当温度达到 1 400 °C 之后,铬铁矿表面生成的瘤状包裹增加且彼此连接,开始形成板条状,如图 5 所示。能谱分析可得,在 A 点所示金属物相中,铬元素的相对含量明显增大。同时,B 点所示基体中铁、铬元素急剧减少,几乎不含铁元素,但仍含有少量铬元素,镁、铝元素的相对含量迅速升高。

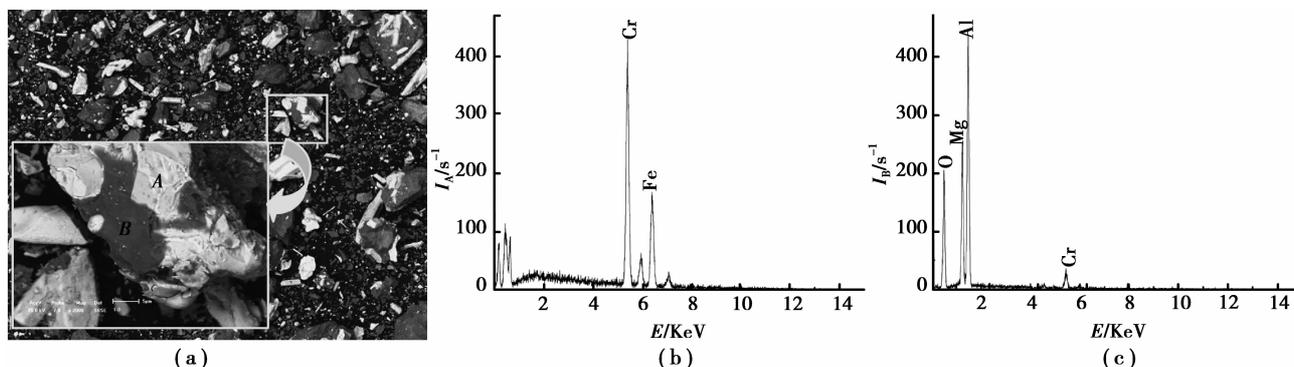


图 5 1 400 °C 还原产物扫描电镜图像与能谱分析  
Fig.5 SEM-EDS of the reduction product at 1 400 °C

图 6 所示为南非铬铁矿 1 500 °C 还原 2 h 后还原产物的扫描电镜图像和能谱分析曲线。由图可知,高亮金属物相不断扩展至整个基体表面,并由板条状变为球团状。图中 A 所示金属物相与 1 400 °C 相似,仍富含铁铬,B 所示基体中已几乎不含铁、铬,主要为镁、铝、氧所组成的化合物。

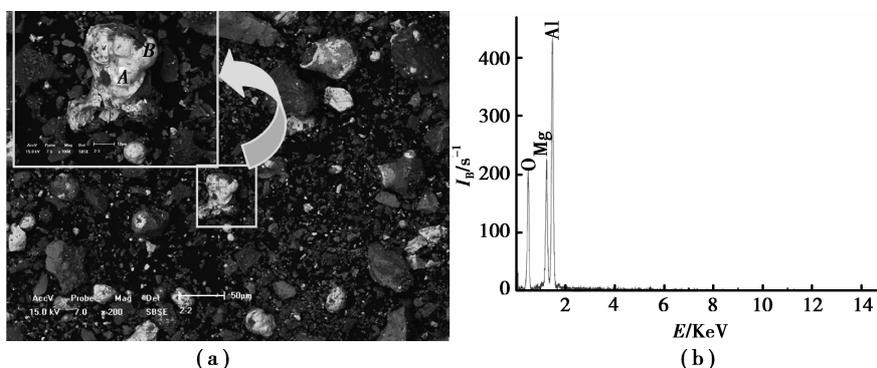


图 6 1 500 °C 还原产物扫描电镜图像与能谱分析  
Fig.6 SEM-EDS of the reduction product at 1 500 °C

图 7 所示为南非铬铁矿及其在不同温度下还原 2 h 后还原产物的 XRD 曲线。由图 7 可知,铬铁矿的主要物相为  $(Mg, Fe)(Cr, Al)_2O_4$  硬铬尖晶矿和镁铝硅酸盐相。当还原温度为 1 100 °C 和 1 200 °C 时,还原产

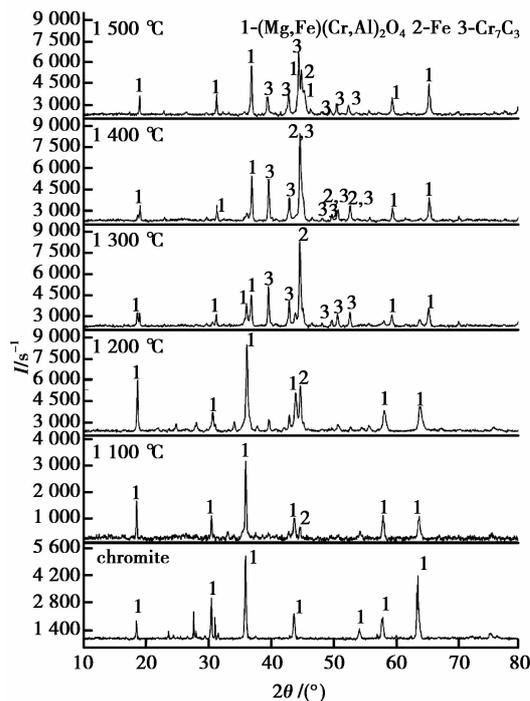


图 7 不同温度下铬铁矿还原 2 h 产物的 XRD 曲线  
Fig.7 XRD patterns of products reduced for 2 h at different temperatures

200 °C 时铬铁尖晶石结构已经开始部分被破坏,并且随着温度升高被破坏程度增加,至 1 500 °C 左右时基体中几乎不含铬元素,为富含镁、铝、氧的化合物。

### 3.2 磁选分离实验

利用磁选管在 200 mT 磁场强度下对不同实验条件下的铬铁矿还原产物进行了磁选分离,以期分离出还原产物中含铁的磁性物相,实现铁铬的初步分离。

由图 8 所示不同温度下铬铁矿还原 2 h 后磁选产物的 XRD 曲线可得,磁选产物主要为铁,1 200 °C 时,磁选产物中含有少量未被还原的尖晶石物相,当温度高于 1 200 °C 时,随着铬氧化物逐渐被还原,磁选产物中  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  相对含量增加。

实验过程以除铁率和铬的收得率来衡量磁选分离的实验效果,其计算式分别见式(16)和(17)。

$$\eta_{\text{Fe}} = \frac{m_{\text{T,Fe磁选}}}{m_{\text{T,Fe还原}}} \times 100\%, \quad (16)$$

式中: $\eta_{\text{Fe}}$  为除铁率,%; $m_{\text{T,Fe磁选}}$  为磁选产物中全铁的质量,g; $m_{\text{T,Fe还原}}$  为还原产物中全铁的质量,g。

$$\eta_{\text{Cr}} = \frac{m_{\text{Cr尾渣}}}{m_{\text{Cr还原}}} \times 100\%, \quad (17)$$

式中: $\eta_{\text{Cr}}$  为铬的收得率,%; $m_{\text{Cr尾渣}}$  为磁选尾渣中铬元素的质量,g; $m_{\text{Cr还原}}$  为还原产物中铬元素的质量,g。

不同还原温度下除铁率与铬的收得率的变化规律如图 9 所示。由图 9 可得,随着还原温度的升高,磁选分离的除铁率呈先减小后增大的趋势,同时,铬的收得

物中  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$  相仍然存在,仅有少量金属铁生成。当还原温度升高至 1 300 °C 时,还原产物中金属铁的含量有所增加,同时,铬氧化物开始被还原,  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$  相的部分衍射峰明显降低,并发生偏移。随着还原温度的进一步升高,  $(\text{Mg,Fe})(\text{Cr,Al})_2\text{O}_4$  相的衍射峰继续显著降低并偏移。同时,由于过量煤粉的存在,高温下铁铬碳化物的生成量逐渐增加。当温度升高至 1 500 °C 时,铬铁矿被进一步还原,铬铁尖晶石结构的变化更加显著,铬铁尖晶石结构被破坏。

综合以上分析可得,在铬铁矿的还原过程中,随着还原温度的升高,外围的铁氧化物首先被还原并在铬铁矿基体表面形成瘤状聚集物,同时,还原反应使铁铬尖晶石的表面首先出现空洞,在还原气氛下,还原剂与铬铁矿表面接触并通过间接还原不断使铁得以还原,还原出的低价铁不断由内向外扩散,在铬铁矿基体表面聚集。在高温和过量煤粉存在的条件下,矿石中的铬氧化物逐渐被还原,与铁的还原类似,被还原的铬最终由内向外扩散并在基体表面富集。随着铁铬元素的不断还原外迁,矿粉基体表面的瘤状产物逐渐聚集为板条状和团状,同时,最终基体中镁、铝、氧相对含量逐渐增多。在 1

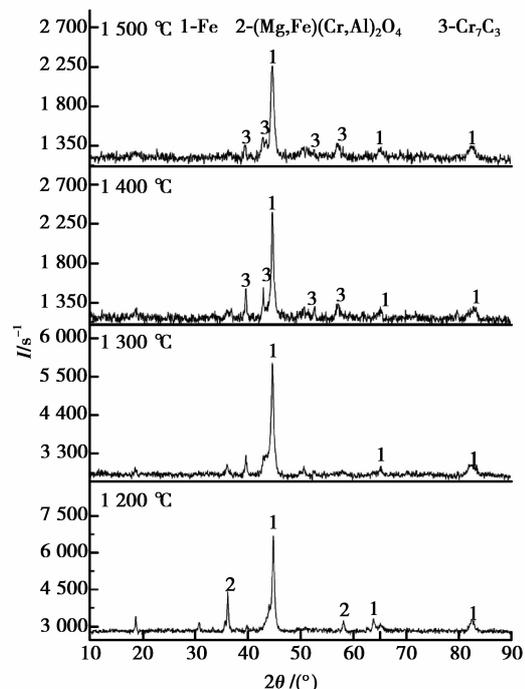


图 8 不同温度下的还原产物磁选后产物 XRD 曲线  
Fig.8 XRD patterns of magnetic separation products of products reduced at different temperatures

率却呈现先增大后减小的趋势。其主要原因为低温不利于还原反应的进行,还原产物较少。高温条件下,铁铬氧化物被大量还原,且彼此固溶,难分离,从而影响除铁率和铬的收得率。综合考虑除铁率与铬收得率,1 200 ℃下还原焙烧 2 h 较为适宜,经磁选分离后,其除铁率约为 46%,铬的收得率约为 80%。

不同温度下铬铁矿还原产物经磁选后所得尾渣的铬铁比如图 10 所示。由图可得,南非铬铁矿经预处理后,铬铁比的变化规律与除铁率变化规律相似,均先升高后降低。铬铁比较原矿的 1.96 有明显升高。在 1 200 ℃下还原后进行磁选,磁选尾渣中  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$  值高达 3.75 左右。

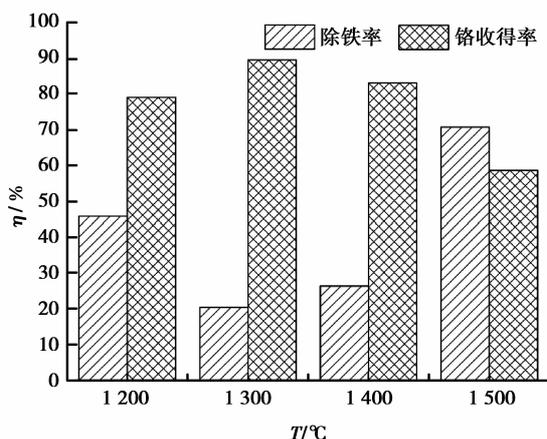


图 9 不同温度下的除铁率与铬的收得率  
Fig.9 Iron-removal rate and yield of chromium at different temperatures

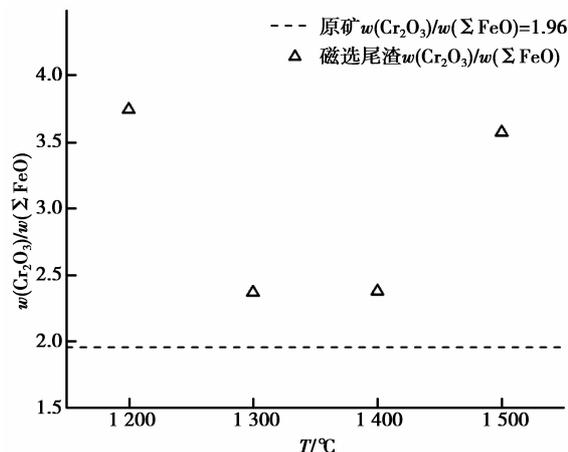


图 10 不同温度下还原产物磁选后尾渣的铬铁比  
Fig.10  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\sum\text{FeO})$  of the tailings after magnetic separation of products reduced at different temperatures

## 4 结 论

1) 实验温度为 1 100 ℃时,经还原焙烧预处理后,铬铁尖晶石结构未发生明显转变,磁选产物主要为金属铁,并夹带未被还原的尖晶石物相。当温度为 1 300 ℃及以上,随着预处理温度的升高,尖晶石结构逐步被破坏。但是,温度过高,碳化铬生成增多,不利于铁铬分离。

2) 综合考虑除铁率、铬收得率和尾渣的铬铁比,较为适宜的预处理温度为 1 200 ℃。在此温度下经还原焙烧、磁选后,所得尾渣的除铁率为 46%,铬的收得率为 80%,铬铁比高达 3.75。

### 参考文献:

- [1] 李艳军,张剑廷.我国铬铁矿资源现状及可持续供应建议[J].金属矿山,2011(10):27-30.  
LI Yanjun, ZHANG Jianting. Current situation of chromite ore in China and recommendation on its sustainable supply [J]. Metal Mine, 2011(10):27-30.
- [2] 赵青,刘承军,姜茂发,等.铬铁矿固态碳热还原过程的影响因素[J].科技导报,2013,31(5/6):40-43.  
ZHAO Qing, LIU Chengjun, JIANG Maofa, et al. Influential factors in the solid carbothermic reduction of chromite [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(5/6):40-43.
- [3] Weber P, Eric R H. The reduction of chromite in the presence of silica flux [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(3): 318-324.
- [4] 张波,杨达朋,赵青,等.铬铁矿硫酸浸出液中  $\text{Cr}^{3+}$  与  $\text{Fe}^{3+}$  的分离[J].有色金属(冶炼部分),2014(7):1-4.  
ZHANG Bo, YANG Dapeng, ZHAO Qing, et al. Separation of  $\text{Cr}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  from sulphuric acid leaching solution of chromite [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(7):1-4.
- [5] 纪柱.铬铁矿酸溶生产三价铬化合物[J].无机盐工业,2012(12):1-5.  
JI Zhu. Preparation of trivalent chromium compounds from chromite by acid-leaching technique [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2012(12):1-5.
- [6] 周秋生,牛飞,王俊娥,等.铬铁矿中杂质铝和铁对铬氧化率的影响及其机理[J].中国有色金属学报,2012,22(5): 1503-1508.

- ZHOU Qiusheng, NIU Fei, WANG June, et al. Influences of impurities of ferrous oxide and aluminum oxide on oxidation rate of trivalent chromium and its mechanism[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(5): 1503-1508.
- [7] Ranganathan S, Sinha S N. Carbothermic reduction of chromite ore under different flow rates of inert gas[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010, 41B(1): 10-18.
- [8] 赵青, 张波, 刘承军, 等. 低  $m(\text{Cr})/m(\text{Fe})$  铬铁矿除铁工艺的实验研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2015, 36(1): 47-51.  
ZHAO Qing, ZHANG Bo, LIU Chengjun, et al. Experimental study on separation of iron from low  $m(\text{Cr})/m(\text{Fe})$  chromite[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2015, 36(1): 47-51.
- [9] 王亚娟, 王丽君, 周国治. 铬铁矿高效还原的动力学分析[J]. 材料与冶金学报, 2014, 13(2): 112-118.  
WANG Yaxian, WANG Lijun, ZHOU Guozhi. Kinetics analysis of solid state reduction of chromite[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2014, 13(2): 112-118.
- [10] 胡亮, 陈加希, 彭建蓉, 等. 铬资源与先进铬合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [11] 王海娟, 郎永沛, 汪晓今, 等. 南非铬铁矿球团烧结工艺的探索[J]. 铁合金, 2013(1): 6-11.  
WANG Haijuan, LANG Yongpei, WANG Xiaojin, et al. Investigation on the pelletizing and sintering process with South African ferrochrome fine ore[J]. Ferro-Alloys, 2013(1): 6-11.
- [12] 李建臣, 白国华, 李光辉. 含碳铬铁矿球团的固态还原特性[J]. 中国有色金属学报, 2011(5): 1159-1164.  
LI Jianchen, BAI Guohua, LI Guanghui. Solid-state reduction properties of carbon-bearing chromite pellets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011(5): 1159-1164.
- [13] 李志忠. 铬矿预还原生产铬铁新工艺[J]. 铁合金, 2011(6): 7-11.  
LI Zhizhong. New technology of chrome ore prerelution[J]. Ferro-alloys, 2011(6): 7-11.
- [14] 莫叔迟, 李荣训, 刘英杰, 等. 铬矿粉制块直接炼钢的研究[J]. 钢铁研究学报, 1990, 2(4): 9-16.  
MO Shuchi, LI Rongxun, LIU Yingjie, et al. Direct steelmaking by adding chromite powder briquet[J]. Journal of Iron and steel Research, 1990, 2(4): 9-16.
- [15] 李建臣. 铬铁矿固态还原的基础及其强化[D]. 长沙: 中南大学资源加工与生物工程学院, 2010.
- [16] Barin I, 程乃良, 牛四通, 等. Thermochemical data of pure substances[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [17] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.

(编辑 张 芊)