

文章编号:1000-582X(2011)01-060-06

## 钒钛铁精矿内配碳球团高温快速直接还原历程

刘松利<sup>1,2</sup>, 白晨光<sup>1</sup>, 胡途<sup>1</sup>, 吕学伟<sup>1</sup>, 邱贵宝<sup>1</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 攀枝花学院材料工程学院, 四川 攀枝花 617000)

**摘要:**采用高温实验炉,在1350℃,氮气保护气氛条件下对钒钛磁铁精矿内配碳球团进行了阶段还原试验,通过TG-DSC、XRD、SEM等检测方法对不同时间内配碳球团还原的组织成分、显微结构等进行研究。结果表明,钒钛铁精矿的还原历程依次为 $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $3(\text{Fe}_3\text{O}_4) \cdot \text{Fe}_2\text{TiO}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{Fe}_2\text{TiO}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ 和 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}$ 和 $\text{FeTi}_2\text{O}_5$ ;在磁铁矿大量还原生成浮士体的阶段,钛铁矿与新生成的浮士体发生“钛铁晶石化”,最终还原转变为单质铁和含铁黑钛石。

**关键词:**直接还原历程;钒钛铁精矿;球团;矿石

中图分类号:TF552

文献标志码:A

## Quick and direct reduction process of vanadium and titanium iron concentrate with carbon-containing pellets at high temperature

LIU Song-li<sup>1,2</sup>, BAI Chen-guang<sup>1</sup>, HU Tu<sup>1</sup>, LV Xue-wei<sup>1</sup>, QIU Gui-bao<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Materials Science and Engineering College, Panzhihua University, Panzhihua, Sichuan 617000, P. R. China)

**Abstract:** By using laboratory high temperature experimental furnace, stage reduction test on vanadium and titanium iron concentrate with carbon-containing pellets under experimental conditions of 1350℃ and in nitrogen atmosphere is introduced, and its tissue composition, microstructure is also studied by TG-DTA, XRD, SEM and other testing method. The experimental results show that reduction process on quick reduction of vanadium and titanium iron concentrate of carbon-containing pellets respectively is  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $3(\text{Fe}_3\text{O}_4) \cdot \text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  and  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}$  and  $\text{FeTi}_2\text{O}_5$ . In the stage of generating float by magnetite iron reduction, the new phase of  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  is generated, and finally vanadium and titanium iron concentrate is reduced into  $\text{Fe}$  and  $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ .

**Key words:** direct reduction process; vanadium and titanium iron concentrate; pellets; ore

钒钛磁铁矿是一种铁、钒、钛等元素共生的复合矿,具有较高的综合利用价值。现已查明,世界钒钛磁铁矿的储量达 $4 \times 10^{10}$ t以上,主要集中在如前苏联的卡契卡纳尔和古谢沃戈尔、美国和中国等国家。其中,中国的钒钛磁铁矿已探明储量为 $9.83 \times 10^9$ t<sup>[1-3]</sup>。采用高炉冶炼处理钒钛磁铁矿,只能回收铁和钒,钛以 $\text{TiO}_2$ 形式进入高炉渣而无法回收利用。为了实现

铁、钒、钛资源高效清洁分离及综合回收利用,近年来转底炉煤基直接还原技术成为处理钒钛磁铁矿的新工艺之一,虽然该工艺已有一定的进展,但基础研究还很薄弱,进一步深入研究其铁、钛等有价金属在高温快速还原过程中的相变历程,对该工艺的完善和产业化应用具有重要的现实意义。

钒钛磁铁矿的物质组成和结构特点决定了其还

收稿日期:2010-09-02

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613503)

作者简介:刘松利(1972-),男,重庆大学博士研究生,主要从事冶金资源综合利用研究。

白晨光(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail) bguang@cqu.edu.cn。

原历程的复杂性。储绍斌等<sup>[4]</sup>研究了钒钛铁精矿在 450~850 °C 的温度范围内分别用 H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>/CO 混合气体的还原过程,发现钛铁晶石还原后生成钛铁矿,钛铁矿在还原过程中若有剩余氧化亚铁存在生成钛铁晶石。何其松<sup>[5]</sup>用 H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>-CO 及 H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CO 混合气体对钛磁铁矿球团进行了大量的还原过程研究,并提出了钛磁铁矿中赤铁矿和铁板钛矿两种矿物的还原途径,即 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>→Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>→FeO→Fe 和 Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>→Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>→FeTiO<sub>3</sub>→Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>。还有一些研究者<sup>[6-13]</sup>研究了钛铁矿与 H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>/CO 混合气体或 C 的还原过程,钛铁矿的还原历程为 FeTiO<sub>3</sub>→Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>→TiO。

以上研究主要采用气体间接还原的方法,对于钒钛铁精矿内配碳球团直接还原的还原历程目前还不清楚。笔者通过高温阶段还原实验,采用 XRD 等检测方法对还原产物进行物相分析,结合 TG-DSC 综合热分析结果,得出了钒钛磁铁矿内配碳球团在高温下快速还原的反应历程。

## 1 实验材料与方案

### 1.1 原料

本实验采用的铁矿粉为攀枝花红格钒钛铁精矿,还原剂为无烟煤,其化学成分如表 1 和表 2 所示。制作球团所用黏结剂为分析纯聚乙烯醇(PVA)。

表 1 钒钛铁精矿的化学成分

成分	TFe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO
质量分数/%	54.52	24.09	51.18	11.70	0.556
成分	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	S	P
质量分数/%	0.62	3.15	2.46	0.51	2.80

表 2 煤粉的化学成分 %

煤的成分			灰分的成分				
C	volatile	灰分	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
81.95	6.79	10.41	0.69	24.96	40.23	3.78	3.12

### 1.2 实验方案

钒钛铁精矿和煤粉经过干燥、研磨和筛分,其颗粒直径分别为  $d_{ore} \leq 88 \mu\text{m}$ ,  $d_{coal} \leq 245 \mu\text{m}$ 。铁精矿粉和煤粉根据混合料中  $w(\text{C})/w(\text{O})=1.2$ ,进行称量后充分混匀,然后添加适量的黏结剂(有机黏结剂 PVA),利用压片成型机压制成直径为 30 mm 左右的球团,成型压力为 10 MPa。实验炉为竖式碳化硅炉,结构示意图如图 1 所示。

实验前,球团先在干燥箱(温度为 120 °C)中干燥 6 h,确保球团中的黏结剂和水分能够完全挥发。实验时,每次取一个球团放在吊篮中,待温度达到设定温度(1 350 °C)后,迅速放入在 N<sub>2</sub>(300 mL/min)保护下、直径为 100 mm 的竖式碳化硅炉内,用镍铬丝悬挂在炉顶上方的铁架上,待还原到某一时间时迅速取出埋入煤粉中进行冷却,随后进行 XRD 等分析。

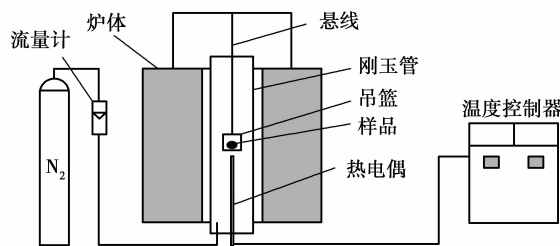


图 1 还原装置示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 TG-DSC 试验结果

钒钛铁精矿粉与煤粉的混合样在 30~1 400 °C 的温度范围内进行了 TG-DSC 综合热分析实验,升温速率为 15 °C/min,实验结果如图 2 所示。

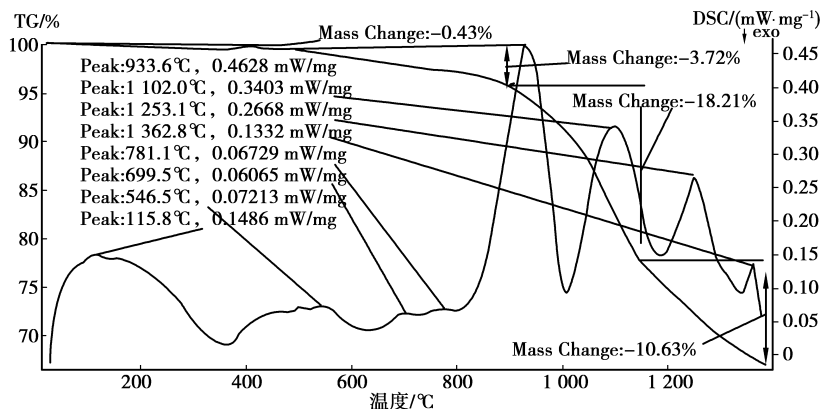


图 2 混合样综合热分析曲线

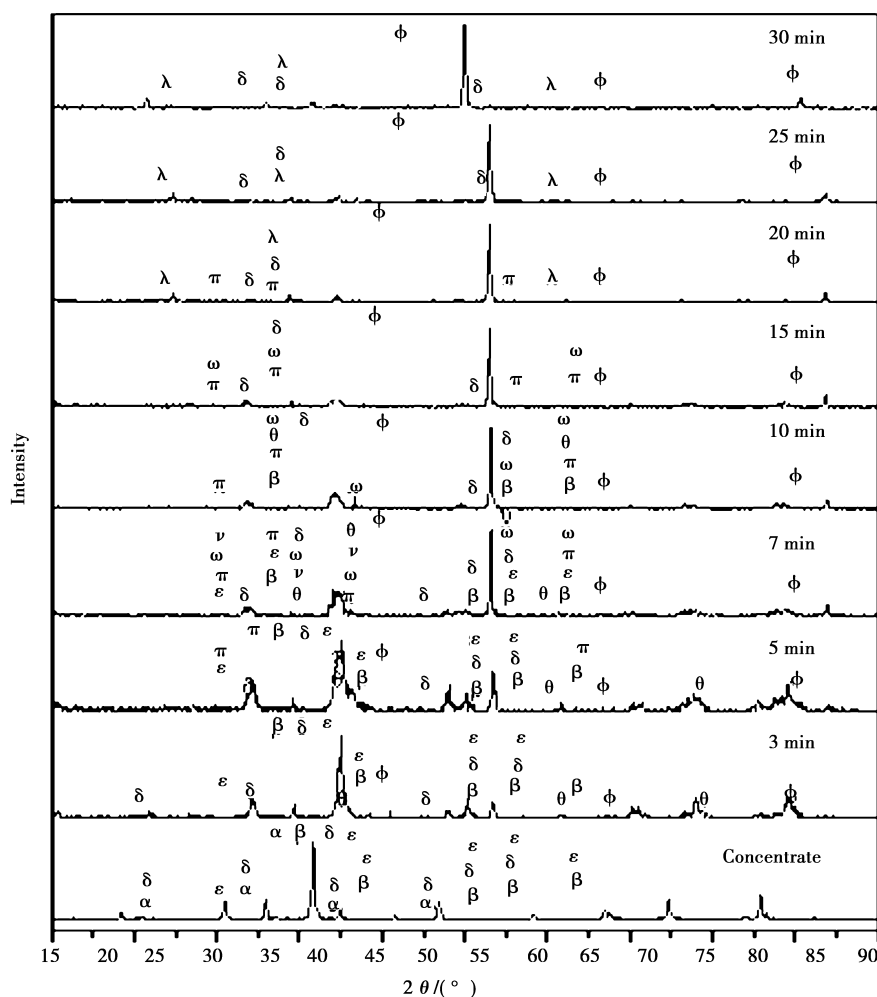
从图 2 中 TG 曲线可以看出,矿煤混合物在升温过程中主要经历 4 个失重阶段。温度低于 460 °C 左右时,试样失重量非常小,仅为 0.43%;温度在 490~900 °C 时,试样失重量为 3.72%,失重较慢;当温度超过 910 °C 后,试样重量急剧下降,其中在 900~1 150 °C 的范围内失重最快,随后失重稍微变慢。从对应的 DSC 曲线来看,在低于 900 °C 的温度范围内有几个平缓的小吸热峰,试样在这一阶段经历了一个连续吸热过程。温度超过 900 °C 后,DSC 曲线上出现了 3 个比较大的吸热峰和 1 个小吸热峰,其峰值分别为 933、1 102、1 253、1 362 °C,说明在这一阶段试样发生了剧烈的化学反应。

## 2.2 样品的 XRD 分析

对钒钛铁精矿和在 1 350 °C 经过不同还原时间还原后的球团进行了 X 射线衍射分析,XRD 图谱如图 3 所示,主要物相的变化分析如表 3 所示。

表 3 不同还原时间下还原产物的物相结构

还原时间	物相
0	$\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_{0.23}(\text{Fe}_{1.95}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_4$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ — $\text{FeTiO}_3$ , $\text{FeTiO}_3$
3	$\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_{0.23}(\text{Fe}_{1.95}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_4$ , $\text{FeTiO}_3$
5	$\text{Fe}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_{0.23}(\text{Fe}_{1.95}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_4$ , $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$ , $\text{FeTiO}_3$
7	$\text{Fe}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_{0.23}(\text{Fe}_{1.95}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_4$ , $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$ , $\text{Fe}_5\text{TiO}_8$ , $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ , $\text{FeTiO}_3$
10	$\text{Fe}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$ , $\text{Fe}_5\text{TiO}_8$ , $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ , $\text{FeTiO}_3$
15	$\text{Fe}$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$ , $\text{Fe}_5\text{TiO}_8$ , $\text{FeTiO}_3$
20	$\text{Fe}$ , $\text{FeO}$ , $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ , $\text{FeTiO}_3$
25	$\text{Fe}$ , $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ , $\text{FeTiO}_3$
30	$\text{Fe}$ , $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ , $\text{FeTiO}_3$



$\phi$ -Fe,  $\alpha$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{FeTiO}_3$ ,  $\beta$ - $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\theta$ - $\text{FeO}$ ,  $\epsilon$ - $\text{Fe}_{0.23}(\text{Fe}_{1.95}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_4$ ,  $\pi$ - $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$   
 $\omega$ - $\text{Fe}_5\text{TiO}_8$ ,  $\delta$ - $\text{FeTiO}_3$ ,  $\nu$ - $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ,  $\lambda$ - $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$

图 3 还原产物 XRD 图谱

由表 3 和图 3 可知,钒钛铁精矿粉的主要物相是磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )和钛磁铁矿( $\text{Fe}_{0.23}(\text{Fe}_{1.95}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeTiO}_3$ ),其次是钛铁矿( $\text{FeTiO}_3$ )。经过 3 min 还原后的球团中出现  $\text{FeO}$ ,还原到 5 min 时出现了单质铁和新相  $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$ 。还原时间达到 7min 时,还原球团中出现了  $\text{Fe}_5\text{TiO}_8$  和钛铁晶石( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ )两新相。当还原进行到 10min 时, $\text{Fe}_{0.23}(\text{Fe}_{1.95}\text{Ti}_{0.42})\text{O}_4$  相消失,钛铁晶石( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ )在还原 15 min 后消失。还原进行到 20min 时, $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$  相和  $\text{Fe}_5\text{TiO}_8$  相消失,出现了含铁黑钛石( $(\text{Fe},\text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ )。还原 25 min 后,还原球团中物相组成为单质铁( $\text{Fe}$ )、含铁黑钛石( $(\text{Fe},\text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ )和钛铁矿( $\text{FeTiO}_3$ )。球团还原 30min 后除钛铁矿的衍射峰强度更弱外,其组成与还原 25 min 后相同。

### 2.3 还原历程的确定

文献[14]中指出钒钛铁精矿的矿物成分主要是钛磁铁矿 [ $m\text{FeO} \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n(\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2)$ ],其次为钛铁矿( $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ )和钛铁晶石( $2\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ),此实验所用钒钛铁精矿经 XRD 物相分析后并未发现钛铁晶石,这可能是因为在空气气氛中进行干燥处理的缘故。通过计算,可以得出纯钛铁晶石只有在很低的氧逸度下才能稳定存在,脱溶出来的钛铁晶石在较低的温度下能氧化形成钛铁矿,其氧化反应为<sup>[15]</sup>:



高温快速还原过程中,可能出现的铁氧化物和钛铁氧化物还原的主要反应及其基本热力学数据如表 4 和表 5 所示。根据表中反应式的标准自由能变的表达式,计算出各式反应的标准自由能变化值  $\Delta G_r^\theta$  与温度  $T$  的关系如图 4 和图 5 所示。

表 4 C 还原氧化物主要反应及其基本热力学数据

反应式	$\Delta G_r^\theta = f(T) / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	反应式序号
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} = 3\text{Fe} + \text{CO}$	$204\,388 - 212.352T$	(2)
$\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$	$155\,848 - 154.982T$	(3)
$\text{Fe}_2\text{TiO}_5 + \text{C} = \text{Fe}_2\text{TiO}_4 + \text{CO}$	$127\,911 - 192.982T$	(4)
$\text{Fe}_2\text{TiO}_5 + 2\text{C} = \text{FeTiO}_3 + 2\text{CO} + \text{Fe}$	$109\,011 - 165.682T$	(5)
$\text{Fe}_2\text{TiO}_4 + \text{C} = \text{Fe} + \text{FeTiO}_3 + \text{CO}$	$150\,108 - 144.892T$	(6)
$2\text{FeTiO}_3 + \text{C} = \text{FeTi}_2\text{O}_5 + \text{Fe} + \text{CO}$	$170\,314.2 - 155.056T$	(7)
$\text{FeTiO}_3 + \text{C} = \text{TiO}_2 + \text{Fe} + \text{CO}$	$190\,900 - 161T$	(8)
$3/5\text{FeTi}_2\text{O}_5 + \text{C} =$	$214\,170 - 171.806T$	(9)
$2/5\text{Ti}_3\text{O}_5 + 3/5\text{Fe} + \text{CO}$		

表 5 CO 还原氧化物主要反应及其基本热力学数据

反应式	$\Delta G_r^\theta = f(T) / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	反应式序号
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{Fe} + \text{CO}_2$	$35\,380 - 40.16T$	(10)
$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$	$-13\,160 + 17.21T$	(11)
$\text{Fe}_2\text{TiO}_5 + \text{CO} = \text{Fe}_2\text{TiO}_4 + \text{CO}_2$	$-41\,097 - 20.79T$	(12)
$\text{Fe}_2\text{TiO}_5 + 2\text{CO} = \text{Fe} + \text{FeTiO}_3 + 2\text{CO}_2$	$-59\,997 + 6.51T$	(13)
$\text{Fe}_2\text{TiO}_4 + \text{CO} = \text{Fe} + \text{FeTiO}_3 + \text{CO}_2$	$-18\,900 + 27.3T$	(14)
$2\text{FeTiO}_3 + \text{CO} = \text{FeTi}_2\text{O}_5 + \text{Fe} + \text{CO}_2$	$1\,306.2 + 17.136T$	(15)
$\text{FeTiO}_3 + \text{CO} = \text{TiO}_2 + \text{Fe} + \text{CO}_2$	$21\,892 + 1.192T$	(16)
$3/5\text{FeTi}_2\text{O}_5 + \text{CO} =$	$45\,162.6 + 0.386T$	(17)
$2/5\text{Ti}_3\text{O}_5 + 3/5\text{Fe} + \text{CO}_2$		

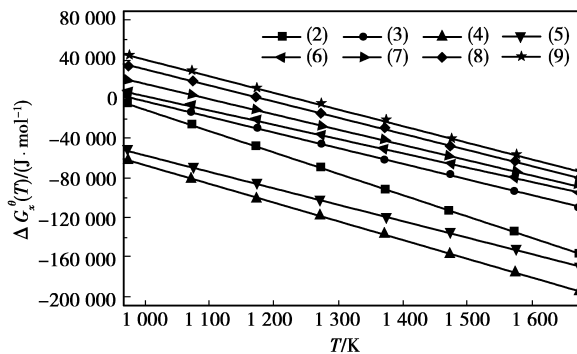


图 4 C 还原铁氧化物和钛铁氧化物的  $\Delta G_r^\theta$ -T 图

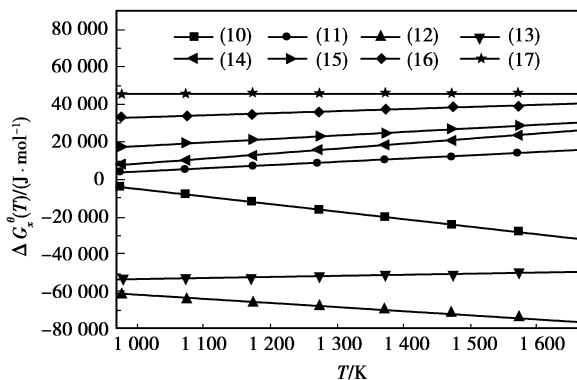
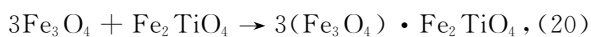
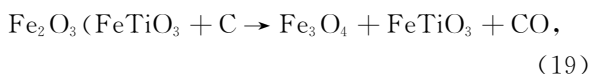
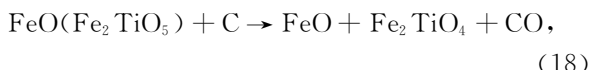


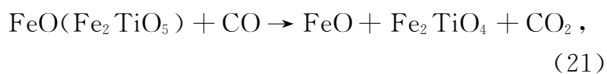
图 5 CO 还原铁氧化物和钛铁氧化物的  $\Delta G_r^\theta$ -T 图

从图 2 中的 TG 曲线看出,试样在 25~430 °C 的温度范围内失重量很小,仅为 0.37%,DSC 曲线在 115 °C 时有一个吸热峰,这一阶段主要是试样内吸附水的去除。在 430~900 °C 温度范围内,DSC 曲线上出现了 3 个较小的连续的吸热峰,试样失重量较小,为 3.72%,可以判断这一阶段发生的反应主要是固相

反应。从 XRD 物相分析结果可以看出,在还原过程的前 7min,出现了 Fe、FeO 和  $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$  三个新相,其中  $\text{Fe}_{2.75}\text{Ti}_{0.25}\text{O}_4$  可以写成  $3(\text{Fe}_3\text{O}_4) \cdot \text{Fe}_2\text{TiO}_4$ 。钛铁晶石的天然矿物于 1946 年由 Mogensen 在研究 Sodra Ulvon 磁铁矿是首次发现,往后的一系列研究指出,这种矿物具有像磁铁矿那样的反型尖晶石结构,在  $600^\circ\text{C}$  以上能与磁铁矿形成完全的固溶体<sup>[16]</sup>。因此这一阶段发生的反应主要有:



固相反应受固态扩散传质和界面反应的影响,速度较慢。在这一温度范围内,还伴随着煤粉中挥发分的析出,析出物对矿物有一定的还原作用,因此这一阶段还伴有以下反应的发生:

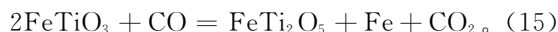
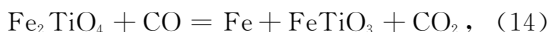
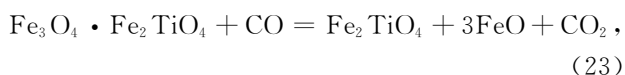
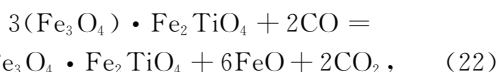


温度超过  $900^\circ\text{C}$  以后,试样重量急剧下降,DSC 曲线上出现 3 个较大的吸热峰,经历了强吸热过程,可以判断试样在这一阶段主要以气-固反应为主。从表 3 可以看出,还原产物中没有出现钛氧化物,表明在此实验条件下反应式(16)和式(17)并没有发生。如图 5 所示,式(11)、式(14)和式(15)在本实验所涉及的温度范围内,其标准自由能  $\Delta G_r^\theta$  均大于 0,从热力学来看,在标准状态下这些反应在限定的温度范围内是不可行的。其中,式(15)的标准自由能正值最大,考虑其非标准状态下的自由能,有:

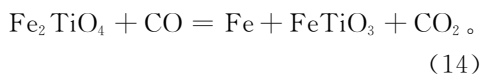
$$\Delta G_r = \Delta G_r^\theta - 2.303RT \lg \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}} =$$

$$1306.2 + 17.136T - 19.147T \lg \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}}$$

若要反应式(15)能发生,其  $\Delta G_r$  需小于 0,当温度为  $1350^\circ\text{C}$  时,可以计算出  $\frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}} > 8.649$ 。在本实验条件下,还原反应激烈进行时,  $\frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{CO}_2}} = 10 \sim 10^2$  是很容易达到的。因此,除了反应式(9)、(10)和(21)外,在这一阶段试样还发生了以下气固反应:



如图 3 所示,随着还原反应的进行,还原产物中出现了钛铁晶石,其衍射峰的相对强度逐渐增强后又慢慢减弱,还原反应进行 15 min 后此相消失。而钛铁矿的衍射峰相对强度在同一阶段经历了减弱后逐渐增强的过程,表明在还原过程中,磁铁矿与钛铁矿共生的矿物能形成钛铁晶石,即钛铁矿与还原产生的 FeO 反应生成钛铁晶石,随后钛铁晶石又被还原为钛铁矿,这与文献[4]中得到的结果一致。



由图 4 可以看出,从热力学角度看,反应式(8)和式(9)在此实验条件下可以发生,但在还原产物中没有找到钛氧化物,这可能是动力学方面的影响造成的。含碳球团在炉子内快速加热的过程中,煤粉中的挥发分及还原气体产物激烈逸出,使碳粒与矿粉颗粒之间产生孔隙(见图 6),二者接触面积很小或不接触,以至于固相反应式(8)和式(9)难以发生。

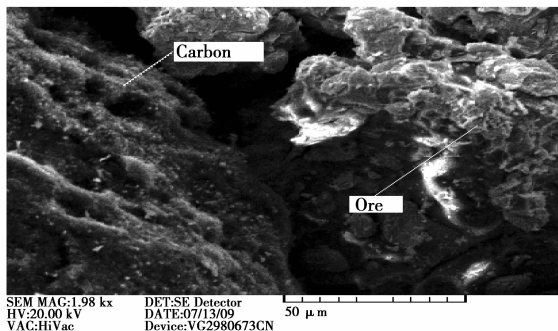


图 6 还原 20 min 后球团的 SEM 照片

综合以上分析,可将钒钛磁铁矿铁精矿含碳球团高温快速直接还原相变历程描述如图 7 所示。

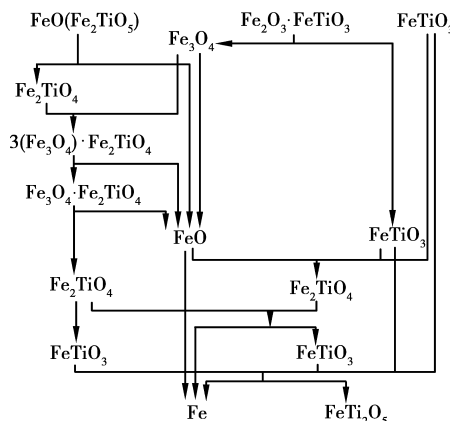


图 7 钒钛铁精矿内配碳球团高温快速直接还原相变历程

### 3 结 论

1) 钒钛铁精矿内配碳球团在 1 350 ℃, 氮气保护气氛实验条件下还原 30min 的过程中, 其相变历程依次为: 钒钛铁精矿  $\rightarrow$   $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  和  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 3(\text{Fe}_3\text{O}_4) \cdot \text{Fe}_2\text{TiO}_4 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{Fe}_2\text{TiO}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{TiO}_4$  和  $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$  和  $\text{FeTi}_2\text{O}_5$ 。

2) 在磁铁矿大量还原生成浮士体的阶段, 钛铁矿与新生成的浮士体发生“钛铁晶石化”, 即  $\text{FeTiO}_3 + \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4 + \text{CO} = \text{Fe} + \text{FeTiO}_3 + \text{CO}_2$ 。

#### 参考文献:

- [1] 邓君, 薛逊, 刘功国. 攀钢钒钛磁铁矿资源综合利用现状与发展[J]. 材料与冶金学报, 2007, 6(2): 83-86.  
DENG JUN, XUE XUN, LIU GONG-GUO. Current situation and development of comprehensive utilization of vanadium-bearing titanomagnetite at PanGang [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2007, 6(2): 83-86.
- [2] 洪流, 丁跃华, 谢洪恩. 钒钛磁铁矿转底炉直接还原综合利用前景[J]. 金属矿山, 2007(5): 10-13.  
HONG LIU, DING YUE-HUA, XIE HONG-EN. Prospect of comprehensive utilization of v-bearing titanomagnetite by rotary hearth furnace process [J]. Metal Mine, 2007(5): 10-13.
- [3] 杨保祥. 攀西地区矿产资源特征及循环经济发展策略探讨[J]. 四川有色金属, 2006(3): 10-12.  
YANG BAO-XIANG. Mineral resources characteristics of Panzhuhua-xichang area and circulation economic development strategy [J]. Sichuan Non-ferrous Metals, 2006(3): 10-12.
- [4] 储绍斌, 石笙陶. 钒钛磁铁矿精矿粉的还原过程[J]. 钢铁, 1981, 6(1): 12-15.  
CHU SHAO-BING, SHI JING-TAO. Reduction process of vanadium and titanium iron concentrate [J]. Iron and Steel, 1981, 6(1): 12-15.
- [5] 何其松. 磁铁矿球团的还原历程及其热力学分析[J]. 钢铁, 1983, 18(4): 4-6.  
HE QI-SONG. Reduction process and thermomechanical analysis of magnetite pelletizing [J]. Iron and Steel, 1983, 18(4): 4-6.
- [6] GIOVANNI D M, BRUNO B, GIUSEPPE T. High

temperature interaction between  $\text{H}_2\text{O}$  and hydrothermal reduced ilmenite [J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 699: 1060-1066.

- [7] YUAN Z, WANG X, XU C, et al. A new process for comprehensive utilization of complex titania ore [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(9): 975-978.
- [8] ZIETSMAN J H, PISTORIUS P C. Process mechanisms in ilmenite smelting [J]. Journal of the South Aimm, 2004, 104(3): 653-660.
- [9] Li W B, YUAN Z F, XU C. Effect of temperature on carbothermic reduction of ilmenite [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2005, 12(4): 1-5.
- [10] WANG Y M, YUAN Z F. Reductive kinetics of the reaction between a natural ilmenite and carbon [J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 81(3): 133-140.
- [11] EUNGYEUL P, OLEG O. Reduction of titania-ferrous ore by hydrogen [J]. ISIJ International, 2004, 44(6): 999-1005.
- [12] XU M, GUO M W, ZHANG J L, et al. Beneficiation of titanium oxides from ilmenite by self-reduction of coal bearing pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2006, 13(2): 6-9.
- [13] FRANCIS A A, EIMIDANY A A. An assessment of the carbothermic reduction of ilmenite ore by statistical design [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 19(9): 279-282.
- [14] 汪云华, 彭金辉. 钒钛磁铁矿制取还原铁粉工艺及改进途径探讨 [J]. 金属矿山, 2006(1): 20-23.  
WANG YUN-HUA, PENG JIN-HUI. Studies on making powder technology and improved approaches of vanadium and titanium magnetite [J]. Metal Mine, 2006(1): 20-23.
- [15] SRINIVASAN N S, LAHIRI A K. Studies on the reduction of hematite by carbon [J]. Metallurgical Transactions B, 1977, 8(1): 175-178.
- [16] SASTRI M V C, VISWANATH R P, VISWANATHAN B. Studies on the reduction of iron oxide with hydrogen [J]. Hydrogen Energy, 1982, 7(12): 951-955.

(编辑 王维朗)