

钒钛分离与提取

钒钛铁精矿竖炉预还原的热力学 计算和试验研究

程相魁, 向琴琴, 赵英涛, 王 军

(攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 采用热力学计算软件 HSC 对攀枝花钒钛铁精矿内配碳球团竖炉预还原进行了平衡组分、金属化率和还原度的计算; 试验研究了内配碳球团不同的竖炉预还原工艺下的金属化率和还原度。研究表明: 随着反应温度升高, 内配碳球团的金属化率和还原度呈现升高的趋势, 当温度达到 800 ℃ 左右, 体系中金属化率达到最大值为 99.2%; 温度升高到 1 000 ℃, 还原度达到最大值 87.2%; 试验得到的金属化率和还原度变化规律与理论相符。在 1 200 ℃ 时, 获得最大金属化率和还原度分别为: 85.23% 和 80.15%。当底部吹入还原性气氛(10% N₂ + 30% H₂ + 60% CO) 时, 1 200 ℃ 达到的最大金属化率和还原度分别为: 88.43% 和 90.42%。因此, 在体系中通入还原性气体, 还原过程被明显强化。

关键词: 钒钛铁精矿; 竖炉; 预还原; 热力学; 金属化率; 还原度

中图分类号: TF554 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7638(2019) 04-0004-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.04.002

开放科学(资源服务) 标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Thermodynamic Calculation and Experimental Study on Pre-reduction of Vanadium-titanium Iron Concentrate in Shaft Furnace

Cheng Xiangkui, Xiang Qinqin, Zhao Yingtao, Wang Jun

(Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The equilibrium compositions, metallization rate and reduction degree of carbon-added pellets of Panzhihua vanadium-titanium iron concentrate pre-reduced in shaft furnace were calculated by HSC software. The metallization rate and reduction degree of the carbon-added pellets at different pre-reduction processes were studied experimentally. The experimental results show that with the increase of reaction temperature the metallization rate and reduction degree of the pellets increase, and the maximum metallization rate of 99.2% can be obtained at 800 ℃. The maximum reduction degree reaches 87.2% when the temperature rises to 1 000 ℃. The variation of metallization rate and reduction degree coincides well with the theory predictions. The maximum metallization rate and reduction degree are respectively 85.23% and 80.15% at 1 200 ℃. With the reduction atmosphere of 10% N₂ + 30% H₂ + 60% CO introduced from the bottom, the maximum metallization rate and reduction degree of 88.43% and 90.42% can be respectively gained at 1 200 ℃. Therefore, the reduction process can be reinforced obviously in circumstance of introducing reduction gas into the system.

Key words: vanadium-titanium iron concentrate, shaft furnace, pre-reduction, thermodynamics, metallization rate, degree of reduction

收稿日期: 2019-06-13

基金项目: 科技部“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFB0603805); 攀西试验区战略资源开发支撑计划(川发改投资(2015) 724 号); 攀枝花市科技局新技术及产业化项目(2017CY-G-24)。

作者简介: 程相魁(1969—), 男, 河北遵化人, 副教授, 主要从事冶金工程成果转化及冶金新工艺研究等。E-mail: zksping@cqu.edu.cn。

0 引言

攀钢高炉法治炼钒钛铁精矿的技术投产以来,随着冶炼技术不断的发展和完善,精料水平及装备水平的提高,高炉冶炼不断强化,逐步形成了独特的钒钛铁精矿高炉强化冶炼技术。但是攀钢高炉—转炉流程只回收了铁和钒,钛以 TiO_2 的形式进入高炉渣形成了高钛型高炉渣(渣中 TiO_2 的质量分数为 22%~25%)^[1-3]。国内外相关学者针对攀钢高钛型高炉渣的利用开展了大量的研究,这些技术虽然为攀钢高钛型高炉渣提取钛奠定了基础,但这些方法存在处理量小、工艺复杂、污染环境等问题,到目前仍无法得到大规模的工业应用^[4-8]。近年来,随着钒钛铁精矿非高炉冶炼技术的发展,钒钛铁精矿中铁钒钛资源综合利用得以实现,其技术路线是:钒钛铁精矿球团作为入炉原料,采用非高炉方法(比如:回转窑、转底炉和竖炉)进行预还原,预还原后得到的金属化球团进入电炉熔分,从而综合回收钒钛铁等资源^[9-11]。吴秋廷综述了各种非高炉方法预还原钒钛铁精矿的研究现状,采用回转窑直接还原,还原温度为 1 050 ℃,炉料保温时间 6 h 钒钛铁精矿金属化率可达到 80%,随着温度的提高,金属化率呈增加趋势,但是回转窑温度过高会导致回转窑结圈和粘结等问题;转底炉直接还原控制还原温度和时间分别为 1 300 ℃和 20 min 以上

时球团金属化率可稳定达到 90%以上,随着还原温度的升高和还原时间的延长,球团金属化率呈增加趋势。竖炉直接还原试验表明,金属化率与还原气体质量、还原温度具有很大的关系,采用还原气($\text{CO}+\text{H}_2$)/($\text{CO}+\text{H}_2+\text{CO}_2+\text{N}_2$)>95%和还原温度范围 1 000~1 200 ℃时,球团金属化率维持在 82%~92%^[11]。预还原得到球团的金属化率是直接还原炼铁流程的关键指标,是影响工艺顺行、工艺能耗、还原时间和产品质量的重要因素。

对比各种非高炉预还原技术,竖炉具有还原温度低,球团金属化率高等优点,为了进一步探究攀枝花地区钒钛铁精矿预还原后球团的金属化率,笔者首先采用 HSC6.0 软件进行理论分析,计算不同温度下钒钛铁精矿中 Fe-O-C 、 Ti-O-C 、 V-O-C 和 C-O 系统的平衡组分以及理论金属化率;其次,采用竖炉对冷固结的钒钛铁精矿进行实验室预还原研究,主要包括:钒钛铁精矿球团竖炉预还原和竖炉底吹还原性气体对预还原后球团的金属化率和还原度的影响。

1 试验原料

本试验所用钒钛铁精矿粉和煤粉由攀枝花某钢铁厂提供,其中钒钛铁精矿是经原矿磁选富集后得到的。试验采用的钒钛磁铁精矿和无烟煤粉的主要化学成分如表 1 和表 2 所示。

表 1 钒钛铁精矿主要化学成分

Table 1 Chemical compositions of Vanadium-titanium iron concentrate

%

TFe	FeO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	V_2O_5	S	P
56.46	31.23	1.41	4.41	2.11	3.30	12.23	0.61	0.24	0.073

表 2 无烟煤成分

Table 2 Chemical compositions of anthracite

%

C	灰分	挥发分	S	P	H_2O
78.73	10.16	8.55	0.28	0.023	2.56

根据钒钛铁精矿中铁含量采用如下方法进行配碳量的计算:设原矿中全铁含量为 ω_{TFe} ,%; FeO 含量为 ω_{FeO} ,%; Fe_3O_4 含量为 $\omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$,%; 全氧含量为 ω_{O} ,%; 碳氧摩尔比(C/O)为 n ;在检测出 ω_{TFe} 和 ω_{FeO} 的条件下,则有:

$$\omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4} = \left(\omega_{\text{TFe}} - \frac{56}{72} \times \omega_{\text{FeO}} \right) \times \frac{232}{168} \quad (1)$$

$$\omega_{\text{O}} = \frac{16}{72} \times \omega_{\text{FeO}} + \frac{64}{232} \times \omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \quad (2)$$

单位质量原矿配碳量 ω_{C} 为:

$$\omega_{\text{C}} = n \times \frac{12}{16} \times \omega_{\text{O}} \quad (3)$$

按照钒钛铁精矿的主要化学成分结合式(1)~(3),计算得到钒钛铁精矿中铁氧化物全部还原所需碳的量。然后,采用钒钛铁精矿和煤粉作为原料,进行冷固球团的制备,得到冷固球团的主要化学成分如表 3 所示。

2 热力学平衡组分计算分析

2.1 热力学平衡组分计算原理

采用 HSC Chemistry 6.0 软件^[12]对钒钛铁精矿冷固球团竖炉预还原的热力学进行理论计算。

表 3 冷固结球团主要化学成分
Table 3 Chemical compositions of cold consolidated pellets

									%
TFe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	V ₂ O ₅	S	C
53.29	29.26	1.36	4.42	2.17	3.19	11.54	0.57	0.25	3.62

热力学中平衡组分的计算采用软件提供的 E-equilibrium Compositions 功能。平衡组分计算的理论基础为体系总的吉布斯自由能最小方法^[13-14],按照此方法推导过程如下:

假设体系有 N_D 个独立组元和 N_U 个非独立组元,包括 N_i 种元素,分布在 P 个相中,进行了 R 次反应。在第 j 相中,独立组元 D 和非独立组元 U 的摩尔数分别为 $M_{D,j}$ 和 $M_{U,j}$,化学位分别为 $\mu_{D,j}$ 和 $\mu_{U,j}$,则体系总的 Gibbs 自由能为:

$$G = \sum_{D=1}^{N_D} \sum_{j=1}^P M_{D,j} \mu_{D,j} + \sum_{U=1}^{N_U} \sum_{j=1}^P M_{U,j} \mu_{U,j} \quad (4)$$

根据物料平衡,第 e 种元素在体系中的总摩尔数 M_e 应等于各组元该元素的摩尔数之和:

$$G = \sum_{D=1}^{N_D} \sum_{j=1}^P M_{D,j} \alpha_{D,e} + \sum_{U=1}^{N_U} \sum_{j=1}^P M_{U,j} \alpha_{U,e} \quad (5)$$

式中, $\alpha_{D,e}$ 、 $\alpha_{U,e}$ 分别代表独立组元和非独立组元中第 e 种元素的原子数。在恒温、恒压及物料平衡的前提下,体系平衡的条件为总的 Gibbs 自由能达到最小值(即 $G \rightarrow G_{\min}$)。

钒钛铁精矿中铁氧化的还原度(R)计算方法:

$$R = \frac{n_0 - n_0'}{n_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中, n_0 为反应前钒钛铁精矿中与 Fe 元素相结合的 O 含量(mol), n_0' 为反应后钒钛铁精矿中与 Fe 元素相结合的 O 含量(mol)。

反应后钒钛铁精矿球团中的金属铁含量与全铁含量之比定义为金属化率(M):

$$M = \frac{n_{Fe'}}{n_{Fe}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, n_{Fe} 为反应前钒钛铁精矿中全铁的含量(mol), $n_{Fe'}$ 为反应后钒钛铁精矿中金属铁的含量(mol)。

2.2 热力学计算结果分析

平衡组分以 100 g 钒钛铁精矿为原料,以钒钛铁精矿中的铁氧化物全部转换为金属铁为标准计算需要的配碳量为 1.44 mol,以该摩尔组分为基础通过 HSC Chemistry6.0 计算了钒钛铁精矿中铁氧化、钛氧化物、钒氧化物和碳体系的平衡组分,计算结果如图 1 所示。

图 1 是采用 HSC 软件计算的温度对各个体系

平衡组分的影响。图 1 中(a~d)分别表示钒钛铁精矿中 Fe 氧化物体系、钛氧化物体系、钒氧化物体系和碳—氧体系的平衡组分结果。从图 1 可知:铁氧化物在还原过程中,当温度为 0~300 °C,体系中首先是 Fe_2O_3 的平衡摩尔百分含量减少,同时体系中的浮氏体($FeO_{1.056}$, $Fe_{0.945}O$ 和 $Fe_{0.947}O$)含量逐渐增加,在该温度范围内升高和降低幅度较低。同时,在该温度范围内 FeO 平衡摩尔百分含量也在降低;当温度在 300~500 °C 范围内,随着温度升高, Fe_2O_3 的含量急剧减少,浮氏体含量增加。根据图 1(a)分析,在 500 °C 之后,理论计算的得到的金属铁的含量逐渐增加,并且在 600 °C 之后,含量急剧增加;当温度到达 1 100 °C 时,Fe 平衡组分的量达到最大,继续增加温度,金属 Fe 的产率增量较少。因此,结合图 1 分析可知,在较低温度范围下(0~300 °C),已经发生了铁氧化物从高价到低价的转化,浮氏体开始生成;当温度增加 500 °C 之后,体系中金属铁开始生成;当温度升高到 1 100 °C 时,体系中金属铁平衡组分的含量达到最大含量,随着温度进一步升高,体系中铁的增量较小;因此针对铁氧化物还原体系,结合实际还原过程的动力学影响因素设计铁氧化物还原的温度为 1 200 °C。

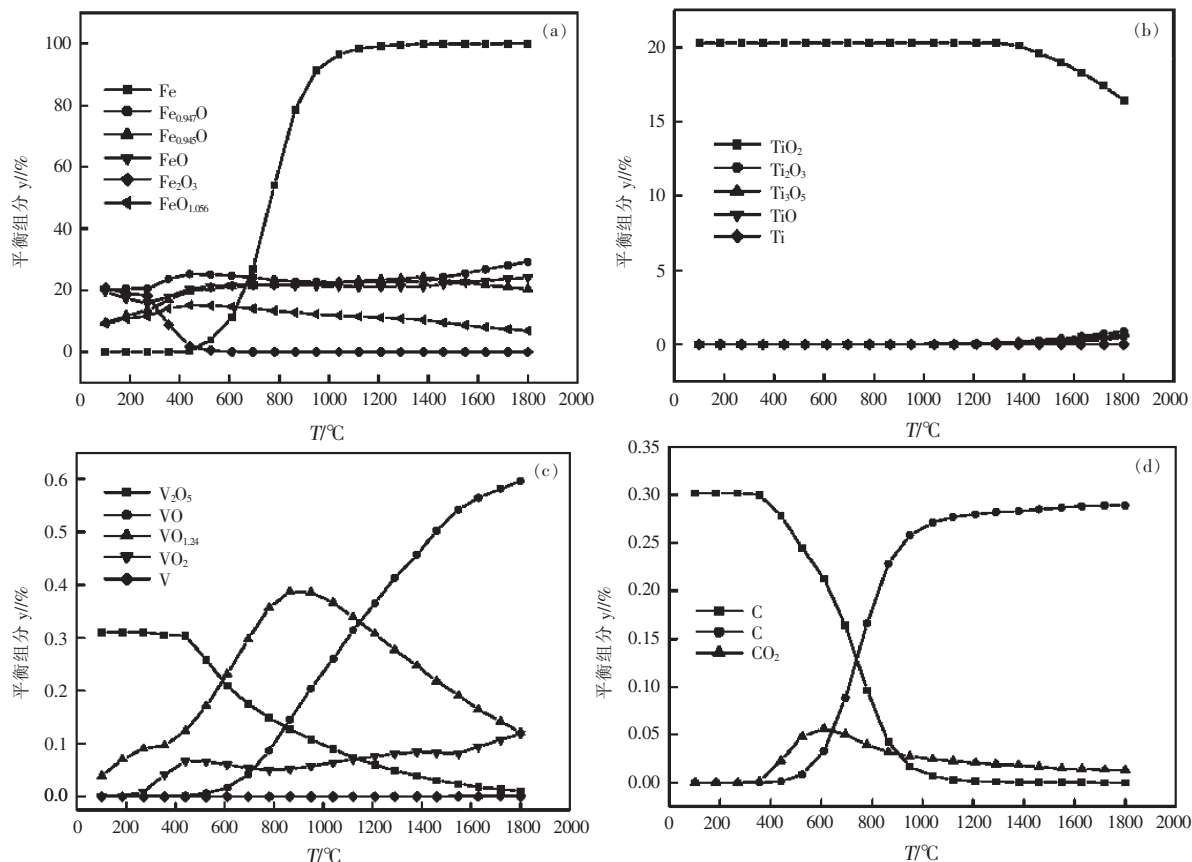
从图 1(b)可以发现,随着温度升高,在该配碳量下,体系中 TiO_2 开始转变温度大约在 1 300 °C。主要是由于随着温度升高,理论计算的配碳量是以铁平衡进行计算;因此,在钛氧化物的体系中,参与反应的碳或者体系中 CO 的分压较小,因此导致整个体系中钛氧化物基本不参与反应。在理论计算的铁氧化物还原温度 1 200 °C 的条件下,体系中钛氧化物基本不参与反应,钛氧化物以 TiO_2 的形式进入到渣相中。

图 1(c)显示:400 °C 之后, V_2O_5 的含量开始明显在减少, $VO_{1.24}$ 的平衡含量增加,到 500 °C 之后,VO 的含量逐渐增加。从平衡组分含量分析可知,钒氧化物在该体系下服从逐级还原的原则,但是在该配碳量下,也没有金属钒的生成。当温度升高到 1 200 °C 时,体系中的钒以 VO 和 $VO_{1.24}$ 的物相存在,因此,在该配碳情况下,反应温度到 1 200 °C,体系

中的钒不会发生还原生成金属钒,而是以 VO 和 $\text{VO}_{1.24}$ 的氧化物进入渣相中。

图 1(d) 是体系中 $\text{C}-\text{CO}-\text{CO}_2$ 的平衡体系,从图中可以发现,随着温度升高, CO_2 的含量先增加后减小, CO 的含量从 500 °C 开始,其含量急剧增加。当

温度达到 1 000 °C 左右,体系中 CO 含量基本达到最大值,温度继续升高,体系中 CO 的平衡含量几乎没有发生变化。因此根据体系的平衡组分分析可知,反应温度在 1 000 °C 时,体系中 CO 的分压达到最大,有利于铁氧化物的还原。



(a) 铁氧化物体系; (b) 钛氧化物体系; (c) 钒氧化物体系; (d) 碳氧体系

图 1 钒钛铁精矿不同体系平衡组分计算

Fig.1 The equilibrium compositions of vanadium-titanium iron concentrate in different systems

图 2 是理论计算得到体系的金属化率和铁氧化物的还原度。从图 2 分析可知,随着温度升高,体系中铁氧化物的还原度逐渐增大,当温度增加到 700 °C 时,体系中还原度增加幅度放缓,当体系中温度升高到 1 000 °C 左右时,还原度达到最大值 87.2%; 同样,随温度升高,体系中铁氧化物的金属化率呈现出逐渐增加的趋势,当温度达到 800 °C 左右,体系中金属化率达到最大值为 99.2%。庞建明等^[3]在 50% $\text{CO}+50\%\text{N}_2$ 气氛下进行的流态化动力学试验结果表明,温度 850 °C 下,铁矿粉在 30 min 时还原度即可达到 90%,而温度 800 °C 及 750 °C 下的还原度分别为 85% 及 74%。对比热力学分析结果可知,理论计算结果明显低于流态化计算(试验)结果,可能是

由于理论计算时采用固体 C 作为还原剂,而非气体还原剂,因此在低温下参与反应为固—固反应,因此反应动力学条件较差,当温度升高 900 °C 之后,由于 C 的气化反应开始,导致体系中产生大量的 CO 气体,此时逐渐改变反应的动力学条件,还原度和金属化率进一步的增加。

3 试验验证

试验首先将钒钛铁精矿和煤粉在密封式制样机中进行预磨制样,制样后钒钛铁精和无烟煤粉-74 μm 粒级占比为 71.23%,将预磨后的钒钛铁精矿粉、无烟煤粉和粘结剂按照 100 : 5 : 10 的比例混匀,称取 200 g 原料预研钵中进行润磨,润磨后的原料采

用台式粉末压片机控制压力为 10 MPa 将原料压制粒度 20~30 mm 的球团。钒钛铁精矿冷固球团还原试验流程如图 3 所示,加热设备为带有称量装置的 1 600 ℃ 高温管式炉,天平在线称重监控还原失重。试验采用瓶装气体配气作为还原气体,包括 CO、N₂ 及 H₂。

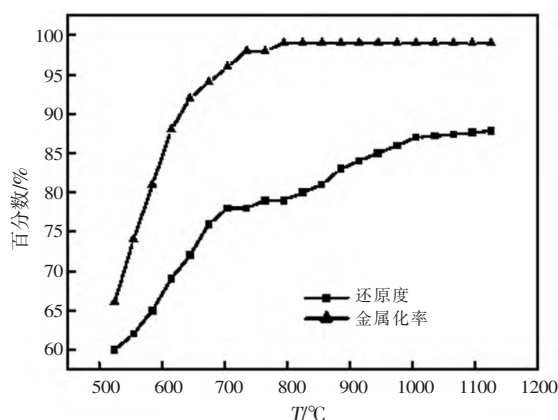
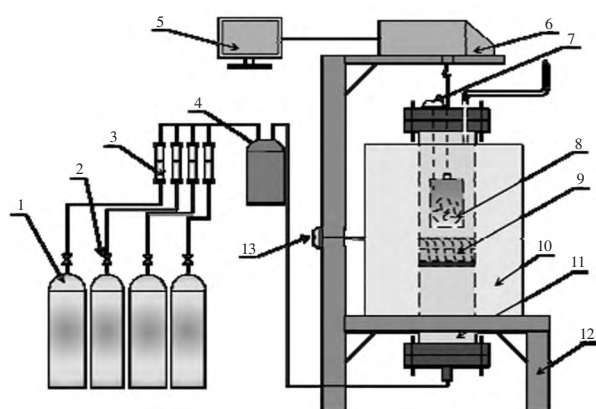


图 2 钒钛铁精矿在不同温度条件的金属化率和还原度的理论计算

Fig.2 Theoretical calculations of metallization rate and reduction degree of vanadium-titanium iron concentrate at different temperatures



1-气瓶; 2-阀门; 3-流量计; 4-稳压罐; 5-电脑;
6-电子天平; 7-试样测温; 8-试样; 9-高铝砖;
10-管式炉; 11-反应器; 12-支架; 13-热电偶

图 3 钒钛铁精矿球团直接还原竖炉试验流程

Fig.3 Experimental procedure for direct reduction of vanadium-titanium iron concentrate in shaft furnace

为探究金属还原度和金属化率,试验采用钒钛铁精矿冷固球团竖炉预还原和竖炉底吹还原气氛(10% N₂+30% H₂+60% CO) 进行对比分析。试验过程中用电子天平称取一定质量的钒钛铁精矿冷固球团装入吊篮中,将装有球团的吊篮放入高温管式炉中,然后开始对钒钛铁精矿冷固球团进行加热,把钒钛铁精矿

冷固球团加热到 1 200 ℃,保温 2 h 左右。样品取出后,称重,对样品的还原率和气体利用率进行计算,然后进行化学分析。还原试验过程中,通过电子天平在线称量,随时显示钒钛球团的失重量,失重数据在线显示,并被采集储存到电脑中。试验开始时,钒钛铁精矿冷固球团的失重为零。试验结束后,根据还原过程中钒钛铁精矿冷固球团的失重量,可以计算出钒钛铁精矿冷固球团的还原度和金属化率。

图 4 是实验室采用竖炉对钒钛铁精矿冷固球团进行预还原得到的金属化率和还原度,并与理论计算结果进行对比。从图 4 可知,理论计算得到的金属化率和还原度随着温度升高而增大,在温度为 1 200 ℃ 时,获得的金属化率和还原度最大,分别为: 99.96% 和 89.82%; 竖炉预还原得到金属化率和还原度随着温度升高变化趋势与理论计算结果相同,但 1 200 ℃ 时获得最大金属化率和还原度低于理论值,分别为: 85.23% 和 80.15%。

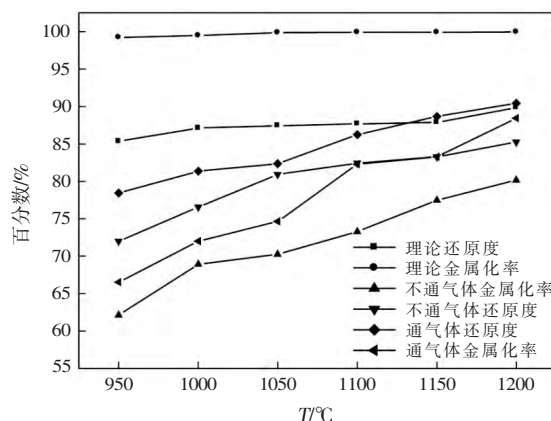


图 4 温度对钒钛铁精矿球团竖炉预还原的影响

Fig.4 Effect of temperature on pre-reduction of vanadium-titanium iron concentrate pellets in shaft furnace

图 4 同时给出底部吹入还原性气氛(10% N₂+30% H₂+60% CO) 时钒钛铁精矿冷固球团竖炉预还原的金属化率和还原度随温度的变化趋势。结果表明: 随着反应温度的升高,炉底吹入还原性气体后,得到的金属化率和还原度逐渐增加,当温度为 1 200 ℃ 时达到最大值分别为: 88.43% 和 90.42%。因此,在体系中通入还原性气体,还原过程被明显强化,这主要是由于试验过程中还原气氛的通入,反应体系内,还原性气体的分压明显增加,还原性气体的利用率增加,强化预还原动力学过程,因此导致通入还原气体后金属化率和还原度明显增加;结合理论分析,由温度对钒钛铁精矿冷固球团还原的影响规

律,以及考虑到钒钛铁精矿冷固球团在高温下的强度及粘结性,钒钛铁精矿球团竖炉预还原试验的温度定在 1 100 ℃。在此温度下,保温 2 h,竖炉底部通入还原性气体,得到预还原的金属化率和还原度分别为: 82.26% 和 86.23%。在该温度条件下,理论计算也证明了 TiO_2 基本不发生物相转变, V_2O_5 基本以 VO 的形式进入到渣相中。

4 结论

基于 HSC 热力学计算软件,以钒钛铁精矿冷固结球团为研究对象,对球团预还原过程中各个体系的平衡组分进行了热力学计算和分析;为了进一步探究钒钛铁精矿冷固结球团竖炉预还原过程和验证 HSC 热力学计算的可靠性,实验室进行了钒钛铁精矿内配碳球团和底吹还原性气体的竖炉预还原试验研究。热力学计算和试验研究结果表明:

1) 热力学计算结果表明:随着温度升高,铁氧化物的还原服从逐级还原的过程;当还原温度为 1 100 ℃左右时,体系中金属铁的平衡组分含量达到最大

值,因此根据热力学计算结果确定了预还原温度为 1 100 ℃;在此温度条件下, TiO_2 基本不会发生物相转变,而 V_2O_5 则以 $\text{VO}_{1.24}$ 和 VO 物相进入渣相。

2) 采用 HSC 软件对钒钛铁精矿冷固结球团竖炉直接还原进行了理论计算,计算结果表明:球团的金属化率和还原度随着温度升高而升高。当体系温度升高到 1 000 ℃左右时,还原度达到最大值 87.2%;当温度升高过程,体系中的金属化率是呈现出逐渐增加的趋势,当温度达到 800 ℃左右,体系中金属化率达到最大值为 99.2%。

3) 钒钛铁精矿冷固结球团竖炉直接还原实验得到金属化率和还原度随着温度升高而升高,在 1 200 ℃时,获得最大金属化率和还原度分别为: 85.23% 和 80.15%。采用底部吹入还原性气氛: 10% N_2 + 30% H_2 + 60%CO。随着反应温度的升高,得到的金属化率和还原度逐渐增加,当温度为 1 200 ℃时达到最大值分别为: 88.43% 和 90.42%。因此,在体系中通入还原性气体,还原过程被明显强化。

参考文献

- [1] Xu Benping. Main elements distribution in Panzhihua vanadium and titanium magnetite smelting process in China [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2018, 17(2): 94-100.
(徐本平. 攀枝花钒钛铁精矿冶炼过程中主要稀散元素分布走向研究 [J]. 材料与冶金学报, 2018, 17(2): 94-100.)
- [2] Jing Jianfa, Guo Yufeng, Zheng Fuqiang, et al. Development status on comprehensive utilization of Ti-bearing blast furnace slag [J]. Metal Mine, 2018, 47(4): 185-191.
(景建发, 郭宇峰, 郑富强, 等. 含钛高炉渣综合利用的研究进展 [J]. 金属矿山, 2018, 47(4): 185-191.)
- [3] Xie Hong'en, Qin Xingguo, Zheng Kui, et al. Analysis of effect factors of smelting temperature of high-titanium-type blast furnace slag [J]. China Metallurgy, 2017, 27(9): 13-19.
(谢洪恩, 秦兴国, 郑魁, 等. 高钛型高炉渣熔性温度影响因素分析 [J]. 中国冶金, 2017, 27(9): 13-19.)
- [4] Zou Jianxing. Effect of titanium extraction technology of high titanium blast furnace slag and non-blast furnace iron-making technology on comprehensive utilization of Panzhihua vanadium-titanium magnetite [J]. Panzhihua Technology and Information, 2010(3): 5-9.
(邹建新. 高钛型高炉渣提钛技术与非高炉炼铁技术对攀枝花钒钛铁精矿综合利用的影响 [J]. 攀枝花科技与信息, 2010(3): 5-9.)
- [5] Dai Zehang, Guan Denggao, Chen Mingming. Present state of complex utilization on Panzhihua high titanium-bearing blast furnace slag [J]. Zhejiang Chemical Industry, 2017, 48(11): 46-48.
(戴泽航, 管登高, 陈明铭. 攀枝花高钛型高炉渣综合利用现状 [J]. 浙江化工, 2017, 48(11): 46-48.)
- [6] Yang Yu, Liang Jinglong, Li Hui, et al. Resource recycling progress of Panzhihua titanium bearing blast furnace slag [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018, 210(2): 17-20.
(杨宇, 梁精龙, 李慧, 等. 攀钢含钛高炉渣资源化再利用进展 [J]. 矿产综合利用, 2018, 210(2): 17-20.)
- [7] Li Junhan, Qiu Kehui, Gong Yinchun. Developments of comprehensive utilization and extraction technology of Ti component from Panzhihua iron and steel Co. Ti-bearing blast furnace slag [J]. Sichuan Chemical Industry, 2010(2): 21-25.
(李俊翰, 邱克辉, 龚银春. 攀钢含钛高炉渣中钛组分的提取及综合利用进展 [J]. 四川化工, 2010(2): 21-25.)

- [8] Zhou Guobiao, Peng Tongjiang, Sun Hongjuan, *et al.* Research on recovery of iron from Ti-bearing blast furnace slag by wet low-intensity magnetic separation [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(3): 44-49.
(周国彪, 彭同江, 孙红娟, 等. 湿式弱磁选从含钛高炉渣中提取金属铁的研究 [J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(3): 44-49.)
- [9] Lv Yanan, Guo Yufeng, Chen Dong. Study on electric furnace smelting of vanadium-titanium magnetite concentrate [J]. Non-ferrous Metals (Smelting Part), 2016(7): 38-41.
(吕亚男, 郭宇峰, 陈栋. 钒钛磁铁精矿预还原球团电炉冶炼研究 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(7): 38-41.)
- [10] Lv Yanan, Guo Yufeng, Chen Dong. Effect of additive on smelting reduction of vanadium-titanium magnetite ore pellets [J]. Non-ferrous Metals (Smelting Part), 2017(2): 47-50.
(吕亚男, 郭宇峰, 陈栋. 添加剂对钒钛磁铁精矿球团熔融还原冶炼的影响 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(2): 47-50.)
- [11] Wu Qiuting. Engineering study on RHF direct reduction of vanadium-bearing titanomagnetite [J]. Iron and Steel, 2010, 45(11): 22-26.
(吴秋廷. 钒钛磁铁矿转底炉直接还原工程化技术研究 [J]. 钢铁, 2010, 45(11): 22-26.)
- [12] Ronie A. User's guide. Outokumpu HSC chemistry for windows chemical reaction equilibrium software with extensive thermodynamic database [M]. Pori: Outokumpu Research OY, 2002: 1-39.
- [13] Zhou Yong, Li Zhengbang. Thermodynamic analysis on direct alloying of V_2O_5 [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2006, 27(4): 38-42.
(周勇, 李正邦. V_2O_5 直接合金化的热力学分析 [J]. 钢铁钒钛, 2006, 27(4): 38-42.)
- [14] Zhu Kuisong, Wen Yaomin, Wang Yungang, *et al.* Thermodynamic calculation and experimental study on TiC_xN_{1-x} prepared by carbothermal reduction-nitridation of ilmenite [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(6): 25-33.
(朱奎松, 文耀民, 王云刚, 等. 钛铁矿碳热还原氮化制备 TiC_xN_{1-x} 热力学计算及试验研究 [J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(6): 25-33.)
- [15] Pang Jianming, Guo Peimin, Zhao Pei. Study on the reduction of 1~3 mm iron ore powder by CO in fluidized bed [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2010, 31(3): 15-19.
(庞建明, 郭培民, 赵沛. 流化床中 CO 还原 1~3 mm 铁矿粉研究 [J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(3): 15-19.)

编辑 杨冬梅

钒钛产业技术创新战略联盟获 2018 年度活跃度较高评价

7 月 9 日从中国产业技术创新战略联盟协同发展网获悉, 钒钛联盟在 2018 年度产业技术创新战略联盟活跃度评价中获“活跃度较高”评价。

遵照国家科技部《关于推动产业技术创新战略联盟构建的指导意见》, 攀钢集团有限公司、中国科学院过程工程所联合国内 4 家企业、15 家科研院校共同组建“钒钛资源综合利用产业技术创新战略联盟”(以下简称“钒钛联盟”), 于 2011 年 7 月在北京召开成立大会, 2013 年获国家科技部批准(国科发体〔2013〕632 号文)进入国家试点联盟。截止 2018 年, 已发展为 31 家成员单位, 其中科研院所 14 家, 高校 12 家, 企业 5 家。

据悉, 此次联盟活跃度评价时限为 2018 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日, 主要考核联盟组织机构建设与运行、协同创新活动和带动产业发展成效, 共有 88 家联盟参评, 其中获活跃度高 30 家、较高 15 家、一般 23 家、不活跃 20 家, 另有 11 家未参加活跃度评价, 53 家录入信息未达到要求。在此次活跃度评价中, 钒钛联盟获得“活跃度较高”评价, 排名 35。

钒钛战略联盟成立 8 年来, 钒钛联盟不断完善和规范组织机构建设, 持续探索开展联盟协同创新活动及面向行业开展技术辐射活动等, 有效发挥了引领和支撑钒钛资源综合利用领域技术进步的重要作用。

(高官金 供稿)