

## 中性气氛下钒钛磁铁矿高炉渣系研究

储满生, 冯 聪, 唐 珏, 柳政根  
(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 以钒钛磁铁矿现场高炉渣为基础, 纯化学试剂调制渣样, 在中性气氛条件下研究了炉渣二元碱度及  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$  含量对实验渣系冶金性能的影响。结果表明: 增加碱度和  $\text{MgO}$  含量, 炉渣熔化性温度( $t_m$ )、初始黏度( $\eta_0$ )和高温黏度( $\eta_h$ )呈先降低后升高趋势; 增大  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量, 炉渣  $t_m$  升高,  $\eta_0$  先降低后升高,  $\eta_h$  呈上升趋势; 增大  $\text{TiO}_2$  含量, 炉渣  $t_m$  升高,  $\eta_0$  和  $\eta_h$  逐渐下降, 炉渣黏流活化能升高, 热稳定性变差; 增大  $\text{V}_2\text{O}_5$  含量, 炉渣  $t_m$  先降低后升高,  $\eta_0$  和  $\eta_h$  逐渐增大。高炉冶炼钒钛磁铁矿适宜渣系为: 二元碱度 1.15,  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$  质量分数分别为 13%、13%、7%、0.30%。

**关 键 词:** 钒钛磁铁矿; 高炉渣; 炉渣成分; 冶金性能; 中性气氛

中图分类号: TF 542 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)09-1283-05

## Study on Blast Furnace Slag System of Vanadium-Titanium Magnetite Under Neutral Atmosphere

CHU Man-sheng, FENG Cong, TANG Jue, LIU Zheng-gen

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHU Man-sheng, E-mail: chums@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** The components of practical blast furnace (BF) slag of vanadium-titanium magnetite were adjusted by adding pure chemical reagents. The effects of binary basicity,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{V}_2\text{O}_5$  on the metallurgical properties of experimental slag were studied under neutral atmosphere. The results showed that with increasing content of basicity and  $\text{MgO}$ , the melting temperature ( $t_m$ ), initial viscosity ( $\eta_0$ ) and high-temperature viscosity ( $\eta_h$ ) of slag first decrease and then increase. As increasing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content,  $t_m$  increases,  $\eta_0$  first decreases and then increases,  $\eta_h$  increases. When increasing  $\text{TiO}_2$  content,  $t_m$  increases,  $\eta_0$  and  $\eta_h$  decrease. The viscosity flow activation energy of slag increases and the heat stability of slag becomes worse. With increasing  $\text{V}_2\text{O}_5$  content,  $t_m$  first decreases and then increases,  $\eta_0$  and  $\eta_h$  increase. The suitable BF slag for smelting vanadium-titanium magnetite is: binary basicity 1.15,  $\text{MgO}$  13%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  13%,  $\text{TiO}_2$  7%,  $\text{V}_2\text{O}_5$  0.30%.

**Key words:** vanadium-titanium magnetite; blast furnace slag; slag component; metallurgical properties; neutral atmosphere

钒钛磁铁矿是一种具有显著综合利用价值的复合矿产资源<sup>[1]</sup>。目前主要采用高炉法冶炼钒钛磁铁矿, 其炉渣存在泡沫渣、铁损和炉渣黏稠等问题。而造渣制度作为高炉四大基本操作制度之一, 关系到高炉冶炼过程的顺行和炼铁生产中各项指标的优劣。因此, 根据炼铁原料和冶炼品种等条件, 选择一个冶金性能适宜的终渣成分显得尤为

重要。高炉渣系冶金性能主要集中在熔化性温度( $t_m$ )、黏度( $\eta$ )及脱硫性能等方面<sup>[2-4]</sup>。本文以国内某企业现场钒钛磁铁矿高炉渣为基准, 采用分析纯化学试剂配合渣样, 系统探索了渣系二元碱度( $R_2$ )及  $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$  含量对钒钛磁铁矿高炉渣系冶金性能的影响规律, 进而得出适宜高炉冶炼钒钛磁铁矿渣系结构, 从而强化高炉

收稿日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(51090384); 国家高技术研究发展计划项目(2012AA062302); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130602003)。

作者简介: 储满生(1973-), 男, 安徽岳西人, 东北大学教授, 博士生导师。

冶炼,实现节能降耗.

## 1 实验原料与方法

现场高炉渣化学成分(质量分数,%)为  $\text{CaO}$  33.69,  $\text{SiO}_2$  31.46,  $\text{MgO}$  10.87,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  13.30,  $\text{TiO}_2$  6.66,  $\text{V}_2\text{O}_5$  0.11. 该渣熔化性温度高( $1310^\circ\text{C}$ ), 初始黏度大( $1.22\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ), 特别是低温( $1280^\circ\text{C}$ )黏度大, 影响了高炉生产的各项指标. 为探究炉渣成分对钒钛磁铁矿高炉渣系冶金性能影响规律, 设计了炉渣单因素实验, 其中,  $R_2$  变化范围为  $1.100 \sim 1.200$ ,  $\text{MgO}$  质量分数变化范围为  $10\% \sim 14\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数变化范围为  $13\% \sim 17\%$ ,  $\text{TiO}_2$  质量分数变化范围为  $7\% \sim 11\%$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  质量分数变化范围为  $0.10\% \sim 0.40\%$ .

本研究运用 RTW-10 熔体物性综合测定仪进行炉渣黏度测定. 炉渣黏度测量采用钼质测头, 石墨坩埚盛渣, 渣量为  $140\text{ g}$ . 为防止炉渣渗碳, 其内部衬有钼片; 为防止炉渣飞溅, 坩埚上放置和坩埚外径尺寸相同的石墨套筒. 实验过程从炉管底部通入氩气, 流量为  $1.5\text{ L/min}$ . 当炉渣温度达到  $1500^\circ\text{C}$ , 恒温  $30\text{ min}$ , 而后降温测黏度, 降温速度为  $-3^\circ\text{C/min}$ , 得到相应渣系黏度-温度( $\eta-t$ )曲线, 将熔化性温度  $t_m$  (渣系  $\eta-t$  曲线与横坐标成  $135^\circ$  的斜线相切点的温度)、初始黏度  $\eta_0$  ( $t_m$  对应的渣系黏度)及高温黏度  $\eta_h$  ( $1500^\circ\text{C}$  对应的渣系黏度)作为本研究所考察的渣系冶金性能指标<sup>[5]</sup>.

## 2 实验结果及分析

### 2.1 碱度( $R_2$ )对渣系冶金性能的影响

炉渣的  $t_m$ ,  $\eta_0$  及  $\eta_h$  随渣系  $R_2$  变化规律如图 1 所示. 可见,  $R_2$  小于  $1.15$  时, 增大炉渣  $R_2$ , 渣系  $t_m$ ,  $\eta_0$  和  $\eta_h$  呈降低趋势;  $R_2$  大于  $1.15$  时, 继续提高  $R_2$ , 炉渣  $t_m$ ,  $\eta_0$  和  $\eta_h$  反而增大. 这是因为起初提高  $R_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  等碱性氧化物能使对炉渣流动性影响较大的硅氧络离子  $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$  解体, 炉渣黏度下降, 流动性得到改善<sup>[6]</sup>. 而继续增大  $R_2$ , 由于渣中  $\text{CaO}$  本身熔点高( $2614^\circ\text{C}$ ), 且渣中会形成如钙钛矿等高熔点化合物, 导致炉渣冶金性能变差<sup>[3]</sup>.

由于实验炉渣  $\text{V}_2\text{O}_5$  含量较少, 本文对渣系进行相图分析时暂不考虑该相. 采用 Factsage6.4 绘制  $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 13.3\%$ ,  $w(\text{TiO}_2) = 6.66\%$  的

$\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$  五元炉渣的等温线-初晶区相图, 如图 2 所示. 从图中可以看出, 各实验渣系均处于等温线分布稀疏的黄长石初晶区内, 炉渣熔化性温度较低, 炉渣黏度低, 流动性较好. 并且, 随  $R_2$  升高, 该钒钛磁铁矿高炉渣的熔点逐渐增大, 可能是由于渣中高熔点物质增多, 这也进一步说明了该炉渣  $R_2$  不宜太大.

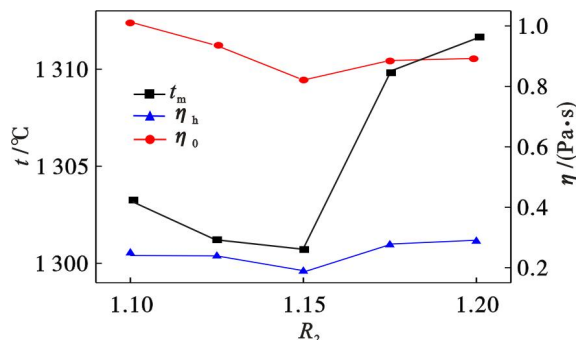


图 1 不同  $R_2$  渣系冶金性能的变化规律

Fig. 1 Changes of metallurgical performance of slag with different  $R_2$

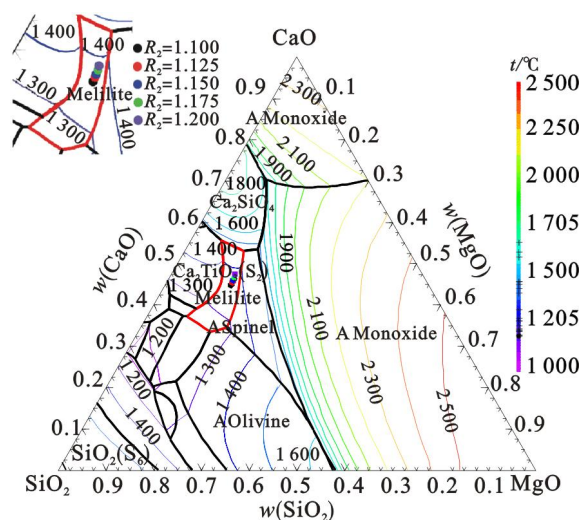


图 2  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-13.3\%\text{ Al}_2\text{O}_3-6.66\%\text{ TiO}_2$  相图

Fig. 2  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}-13.3\%\text{ Al}_2\text{O}_3-6.66\%\text{ TiO}_2$  system

### 2.2 $\text{MgO}$ 对炉渣冶金性能的影响

炉渣的  $t_m$ ,  $\eta_0$  及  $\eta_h$  随  $\text{MgO}$  含量变化规律如图 3 所示. 可见, 随炉渣  $\text{MgO}$  含量增加, 炉渣  $t_m$ ,  $\eta_0$  和  $\eta_h$  呈先降低后升高趋势. 这是因为渣中  $\text{MgO}$  较少时, 增加渣系  $\text{MgO}$  含量能使部分  $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$  阴离子结构解体, 同时渣中生成熔点低于  $1400^\circ\text{C}$  的低熔点复杂化合物, 如镁蔷薇辉石 ( $3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ) 等, 进而渣系流动性得到改善; 而进一步提高渣系  $\text{MgO}$  含量, 渣中易形成非均匀相高熔点化合物, 如尖晶石 ( $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 熔

点为2 135 ℃)等,进而使渣系黏度和 $t_m$ 升高,渣系流动性变坏<sup>[7]</sup>.

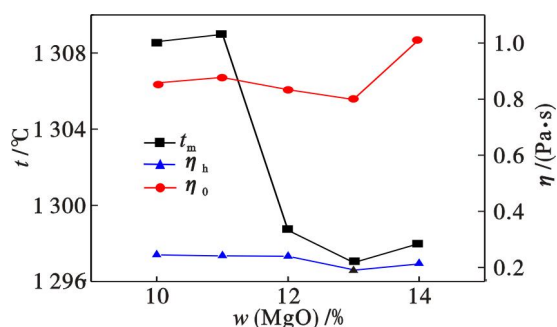


图3 不同MgO含量渣系冶金性能的变化规律

Fig. 3 Changes of metallurgical performance of slag with different MgO content

Factsage6.4 绘制的  $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 13.3\%$ ,  $w(\text{TiO}_2) = 6.66\%$  的  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$  五元炉渣等温线-初晶区相图,如图4所示.可知,随炉渣MgO含量升高,钒钛磁铁矿高炉渣系逐渐由黄长石初晶区向尖晶石初晶区过渡.黄长石初晶区内,等温线分布稀疏,且随MgO含量升高,炉渣液相线温度变化不大,渣系热稳定性和化学稳定性较好,炉渣冶金性能优良;而尖晶石初晶区内,等温线分布较为密集,改变炉渣中MgO含量,易引起渣系波动,炉渣稳定性不易控制.因此权衡考虑,钒钛磁铁矿高炉渣系MgO质量分数控制在13%左右为宜.

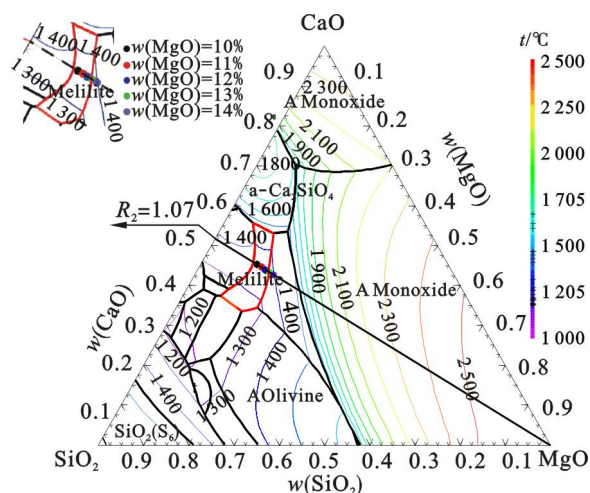


图4  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - 13.3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 6.66\% \text{TiO}_2$  相图

Fig. 4  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - 13.3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 6.66\% \text{TiO}_2$  system

### 2.3 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 对炉渣冶金性能的影响

炉渣的 $t_m$ , $\eta_o$ 及 $\eta_h$ 随 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量变化规律如图5所示.可见,炉渣 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量升高,渣系 $t_m$ , $\eta_h$ 逐渐增大, $\eta_o$ 呈先降低后升高趋势.炉渣初始

黏度 $\eta_o$ 降低可能是由于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量较低且在渣中扩散不充分,高熔点化合物生成较少,炉渣黏度较低<sup>[8]</sup>.而进一步提高 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量时,渣中 $(\text{AlO}_4)^{5-}$ 复合阴离子团数量增加较快,促使如镁铝尖晶石( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,熔点为2 135℃)等高熔点复杂化合物快速生成.同时,随着这些化合物增加,渣中会生成对渣系冶金性能影响更大的矿相,使渣系 $t_m$ 升高,黏度变大,流动性变差<sup>[9]</sup>.

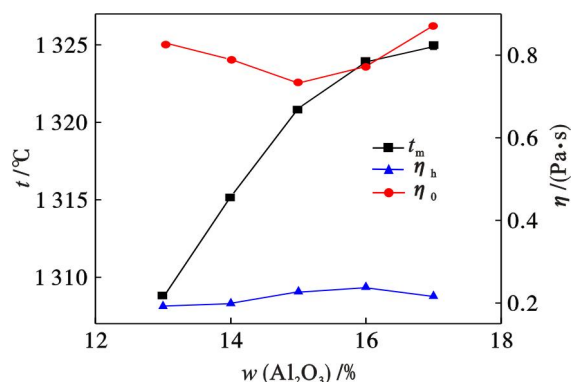


图5 不同 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量渣系冶金性能的变化规律

Fig. 5 Changes of metallurgical performance of slag with different  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content

Factsage6.4 绘制的  $w(\text{MgO}) = 10.87\%$ ,  $w(\text{TiO}_2) = 6.66\%$  的  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{TiO}_2$  五元炉渣等温线-初晶区相图如图6所示.可见, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量越高,渣系越偏向于尖晶石初晶区,炉渣熔点逐渐增大.综合考虑实验结果与热力学相图分析,认为该钒钛磁铁矿高炉渣的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量分数应保持在13%.

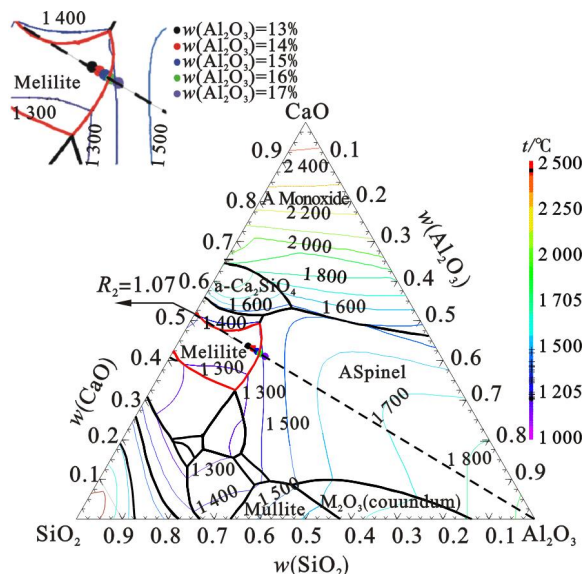


图6  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - 10.87\% \text{MgO} - 6.66\% \text{TiO}_2$  相图

Fig. 6  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - 10.87\% \text{MgO} - 6.66\% \text{TiO}_2$  system



## 2.4 TiO<sub>2</sub> 对炉渣冶金性能的影响

炉渣的  $t_m$ ,  $\eta_0$  及  $\eta_h$  随 TiO<sub>2</sub> 含量变化规律如图 7 所示. 可见, TiO<sub>2</sub> 含量增加, 炉渣  $t_m$  增大,  $\eta_0$  和  $\eta_h$  下降. 据熔渣离子理论, Ti<sup>4+</sup> 离子半径比 Si<sup>4+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 大, 可使硅氧复合阴离子 Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub><sup>z-</sup> 网状结构部分解体, 因此, 炉渣含有一定 TiO<sub>2</sub> 能降低炉渣黏度<sup>[3]</sup>. 但随 TiO<sub>2</sub> 含量升高, 渣中钙钛矿 CaTiO<sub>3</sub> (熔点 1 970 °C) 等高熔点物质数量增多, 炉渣  $t_m$  升高.

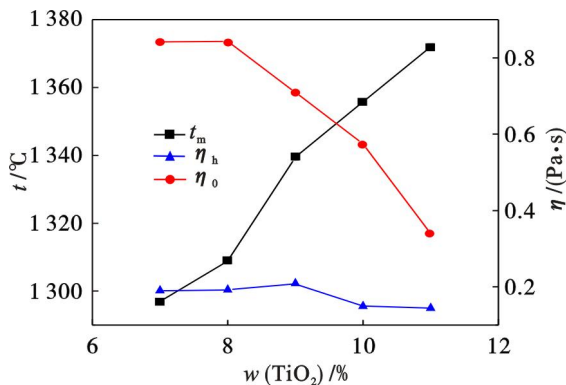


图 7 不同 TiO<sub>2</sub> 含量渣系冶金性能的变化规律  
Fig. 7 Changes of metallurgical performance of slag with different TiO<sub>2</sub> content

Factsage6.4 绘制的  $w(\text{MgO}) = 10.87\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 13.3\%$  的 CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - MgO - TiO<sub>2</sub> 五元系炉渣等温线 - 初晶区相图如图 8 所示. TiO<sub>2</sub> 含量增大, 钒钛磁铁矿高炉渣系逐渐由黄长石初晶区移动到钙钛矿初晶区, 炉渣熔点

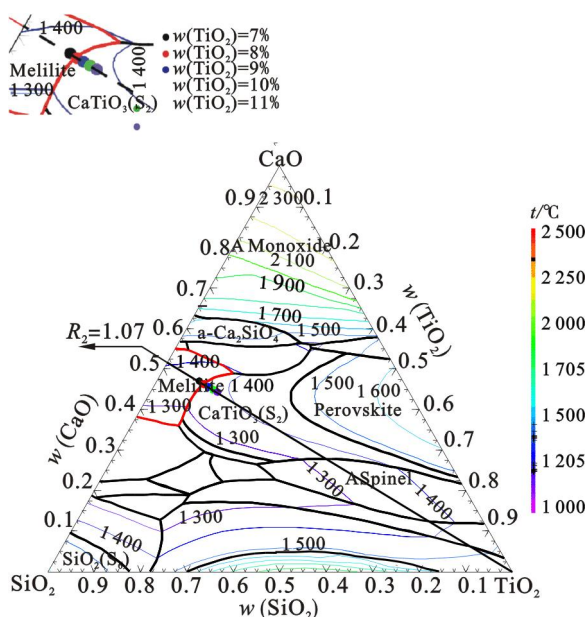


图 8 CaO - SiO<sub>2</sub> - TiO<sub>2</sub> - 10.87% MgO - 13.3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相图

Fig. 8 CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-10.87% MgO-13.3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system

增大, 总体上来说, 渣系化学稳定性和热稳定性均变差, 且不易控制与调整. 综合考虑, 应将该钒钛磁铁矿高炉渣中的 TiO<sub>2</sub> 质量分数调整至 7%.

参照阿伦尼乌斯黏度公式<sup>[6]</sup> ( $\eta = A \exp(E_\eta / RT)$ ) 并运用实验数据对不同 TiO<sub>2</sub> 含量炉渣黏流活化能  $E_\eta$  进行计算, 计算结果列于表 1. 可见, TiO<sub>2</sub> 含量升高, 钒钛磁铁矿高炉渣的黏流活化能呈升高趋势, 炉渣黏度的变化对温度敏感性增大, 渣系热稳定性变差.

表 1 不同 TiO<sub>2</sub> 含量炉渣的  $E_\eta$

Table 1 The  $E_\eta$  of the slags with series TiO<sub>2</sub> content

$w(\text{TiO}_2)/\%$	$-\ln A$	$E_\eta / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	温度范围/°C
7	18.74	$2.44 \times 10^5$	1 278 ~ 1 500
8	19.60	$2.56 \times 10^5$	1 291 ~ 1 500
9	27.04	$3.61 \times 10^5$	1 305 ~ 1 500
10	32.27	$4.33 \times 10^5$	1 297 ~ 1 500
11	41.12	$5.56 \times 10^5$	1 307 ~ 1 500

## 2.5 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量对炉渣冶金性能的影响

渣系冶金性能随 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量变化规律如图 9 所示.

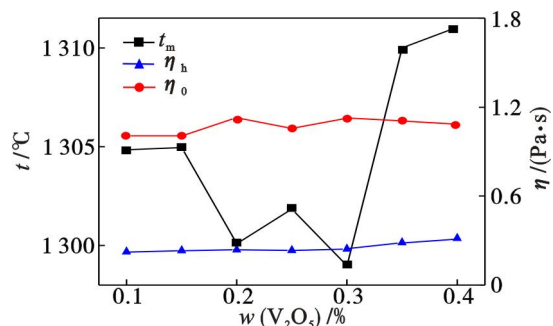


图 9 不同 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量渣系冶金性能的变化规律  
Fig. 9 Changes of metallurgical performance of slag with different V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content

随炉渣 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量升高, 渣系  $t_m$  大致呈先降低后升高趋势,  $\eta_0$  和  $\eta_h$  逐渐升高. 这可能是由于渣中 CaO 与钒生成钒酸钙 ( $m\text{CaO} \cdot n\text{V}_2\text{O}_5$ ), 其相对于高熔点复杂化合物来说, 熔点较低, 结构较简单, 可稀释炉渣, 从而渣系  $t_m$  和黏度较低. 而高炉渣中 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量较高时, 炉渣中会生成钒尖晶石 ( $\text{FeO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$ ) 等矿相, 其熔点高于 1 700 °C, 进而使渣系  $t_m$  和黏度均有所上升<sup>[10]</sup>.

## 2.6 高炉冶炼钒钛磁铁矿的适宜渣系

通过对渣系单因素变化规律实验结果的分析可知, 高炉冶炼钒钛磁铁矿的适宜渣系结构为: 碱度 1.150, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量分数分别为 13%, 13%, 7%, 0.30%. 为验证该适宜渣系的

合理性,本文又进一步检测了该炉渣的冶金性能并对其进行相图分析(见图10)。

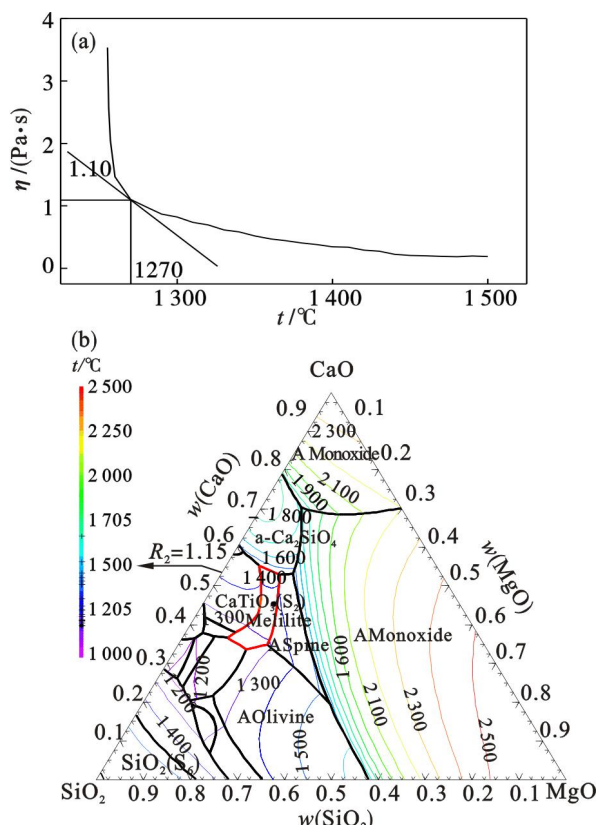


图10 适宜渣系  $\eta-t$  曲线和相图分析

Fig. 10  $\eta-t$  curve and phase diagram analysis for suitable slag

(a)— $\eta-t$  曲线; (b)—相图分析。

可知,该适宜渣系的  $t_m$  为 1 270 °C,  $\eta_0$  为 1.10 Pa·s,  $\eta_h$  为 0.19 Pa·s, 各指标均远优于现场渣,且渣系处于黄长石初晶区内,炉渣稳定性和流动性较好,有利于强化高炉冶炼钒钛磁铁矿。

### 3 结 论

1) 钒钛磁铁矿高炉渣的碱度和 MgO 含量增加,炉渣的  $\eta_0$ ,  $\eta_h$  和  $t_m$  均呈先降低后升高趋势;  $Al_2O_3$  含量增加,  $\eta_0$  呈先降低后升高趋势,  $\eta_h$ ,  $t_m$  逐渐增大,  $t_m$  增幅较大。

2) 钒钛磁铁矿高炉渣的  $TiO_2$  含量增加,炉渣的  $\eta_0$  和  $\eta_h$  逐渐下降,其中  $\eta_0$  下降显著,  $t_m$  逐渐增大,同时炉渣黏流活化能逐渐升高,渣系热稳定性变差;  $V_2O_5$  含量增加,  $\eta_0$  和  $\eta_h$  逐渐升高,  $t_m$  总体呈先降低后升高趋势。

3) 由单因素实验获得的高炉冶炼钒钛磁铁

矿的适宜渣系为:二元碱度 1.15, MgO,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $V_2O_5$  质量分数分别为 13%, 13%, 7%, 0.30%。该渣系的  $t_m$  低(1 270 °C),  $\eta_0$  (1.10 Pa·s) 和  $\eta_h$  (0.19 Pa·s) 小,稳定性和流动性较好,有利于高炉强化冶炼钒钛磁铁矿。

### 参考文献:

- [1] Sadykhov G B, Karyazin I A. Titanium-vanadium slags produced upon the direct reduction of iron from titanomagnetite concentrates [J]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, 2007(6): 447-454.
- [2] Logachev G N, Gostenin V A, Pishnograev S N, et al. Mobility of blast-furnace slag [J]. *Steel in Translation*, 2013, 43(12): 805-807.
- [3] Shankar A, Gornerup M, Lahiri A K, et al. Experimental investigation of the viscosities in CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> slags [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2007, 38(6): 911-915.
- [4] Ren Z S, Hu X J, Chou K C. Calculation and analysis of sulfide capacities for CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO-TiO<sub>2</sub> slags [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2013, 20(9): 21-25.
- [5] Zhang Y, Tang J, Chu M S, et al. Optimization of BF slag for high Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vanadium-titanium magnetite [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2014, 21(2): 144-150.
- [6] Gao Y M, Wang S B, Hong C, et al. Effects of basicity and MgO content on the viscosity of the SiO<sub>2</sub>-CaO-MgO-9wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag system [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2014, 21(4): 353-362.
- [7] 李福民, 吕庆, 胡宾生, 等. 高炉渣的冶金性能及造渣制度 [J]. *钢铁*, 2006, 41(4): 19-22.  
(Li Fu-min, Lü Qing, Hu Bin-sheng, et al. Metallurgical properties of BF slag and slagging regime [J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(4): 19-22.)
- [8] Jan Y C, Hae G L, Jeong S K. Dissolution rate of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> into molten CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slags [J]. *ISIJ International*, 2002, 42(8): 852-860.
- [9] Zhang G H, Chou K C, Mills K. Modelling viscosities of CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> molten slags [J]. *ISIJ International*, 2012, 52(3): 355-362.
- [10] 储满生, 冯聪, 唐珏, 等. 基于综合加权评分法的钒钛磁铁矿高炉渣系优化 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2014, 35(8): 1146-1150.  
(Chu Man-sheng, Feng Cong, Tang Jue, et al. Optimization of BF slag system for vanadium-titanium magnetite by comprehensive weighted scoring method [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2014, 35(8): 1146-1150.)