

TiO₂ 对高铝高炉渣性能和结构的影响研究

闫 华¹, 刘华军¹, 陈布新², 扈玫珑^{2*}

(1. 重庆惠能标普科技有限公司, 重庆 401121; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要:随着国内各钢铁企业高炉配加经济性较高的高铝原料的增加, 炉渣中 Al₂O₃ 含量增加, 渣铁流动性变差, 给高炉冶炼带来一系列问题。以 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-TiO₂ 五元渣系为研究对象, 通过相图理论计算结合试验研究和炉渣结构分析, 研究了高铝渣中不同 TiO₂ 含量(低钛: 5%, 中钛: 15%, 高钛: 25%)对高铝高炉渣黏度、熔化性温度的影响, 并通过炉渣结构研究解析了影响炉渣物化性能的原因。结果表明: 固定碱度 R₂ 为 1.25, TiO₂ 质量分数增加至 25% 过程中, 炉渣熔化温度先下降后增高, 当 TiO₂ 质量分数为 7% 时, 炉渣液相析出相由斜长石类的钙铝硅酸盐 (Ca₂Al₂SiO₇) 转变为高熔点钛酸钙 (CaTiO₃), 其熔点为 1975 °C, 炉渣熔化温度增加; TiO₂ 含量由低钛 5% 增加至高钛 25% 时, 炉渣黏度和熔化性温度均降低。温度越高, 炉渣流动性越好, 渣中 TiO₂ 以 [TiO₆]⁸⁻ 八面体结构存在, 可使渣中复杂硅氧网状结构解体; TiO₂ 含量由 5% 增加至 25% 时, 炉渣中复杂结构单元 Si(Q² + Q³) 的含量降低, 简单结构单元 Si(Q⁰ + Q¹) 的含量升高, Si(Q² + Q³)/Si(Q⁰ + Q¹) 降低, 炉渣结构简单化, 即炉渣中无论是在低钛、中钛、还是高钛含量, TiO₂ 在炉渣中起炉渣修饰子作用, 对降低炉渣黏度、改善炉渣流动性有积极作用, 可作为高铝冶炼调控手段之一。

关键词:高铝高炉渣; TiO₂; 理化性能; 炉渣结构

中图分类号: TF534.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)02-0118-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.02.018

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of TiO₂ on physicochemical properties and structure of high-alumina blast furnace slag

Yan Hua¹, Liu Huajun¹, Chen Buxin², Hu Meilong^{2*}

(1. Chongqing Huineng BiaoPu Technology Co., Ltd., Chongqing 401121, China; 2. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: With the increase of the high-alumina raw materials with high economy in blast furnace (BF) of domestic iron and steel enterprises, the content of Al₂O₃ in slag increases and the fluidity of the slag iron becomes worse, which brings a series of problems to BF smelting. Taking five-component CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO-TiO₂ slag system as the research object, through phase diagram theoretical calculation, experimental research and slag structure analysis, the effects of different TiO₂ content (low titanium 5%, medium titanium 15%, and high titanium 25%) in high-alumina slag on the viscosity and melting temperature of high-alumina BF slag were studied. The reasons affecting the physicochemical properties of slag are analyzed by slag structure. The results show that the fixed alkalinity R₂ is 1.25, the mass fraction of TiO₂ increases from 1% to 25% and the melting temperature of slag in the phase diagram first decreases and then increases. When the mass fraction of TiO₂ is 7%, the liquid phase of slag first precip-

收稿日期: 2021-12-18

基金项目: 国家重大专项研发计划项目 (2018YFC190050404)。

作者简介: 闫华 (1982—), 男, 重庆人, 高级工程师, 主要研究方向为冶金工程及工程设计, E-mail: 54927517@qq.com;

* 通讯作者: 扈玫珑 (1980—), 女, 甘肃白银人, 教授, 主要研究方向为冶金工程, E-mail: hml@cqu.edu.cn。

itates from plagioclase calcium aluminosilicate (Ca₂Al₂SiO₇) to calcium titanate (CaTiO₃) with melting point of 1975 °C, and the melting temperature of slag increases. When the TiO₂ content increases from 5% (low titanium) to 25% (high titanium) the slag viscosity and melting temperature decrease. The higher the temperature, the better the fluidity of slag, that is, TiO₂ in slag exists in [TiO₆]⁸⁻ octahedron structure, which can disintegrate the complex silica network structure in slag. When the content of TiO₂ increases from 5% to 25%, the content of complex structural unit Si(Q²+Q³) in the slag decreases, the content of simple structural unit Si(Q⁰+Q¹) increases, Si(Q²+Q³)/Si(Q⁰+Q¹) decreases, and the slag structure is simplified, that is, TiO₂ acts as a slag modifier in the slag whether in low, medium or high titanium content, which is helpful to reduce the viscosity and it plays a positive role in improving slag fluidity.

Key words: high-alumina blast furnace slag, TiO₂, physicochemical properties, slag structure

0 引言

随着钢铁工业快速发展, 矿石资源消耗量不断增加^[1]。国际矿石价格不断上涨和矿石品位劣化, 致使我国进口矿中 Al₂O₃ 含量不断增高, 另外我国也有丰富的高铝铁矿石资源。随着高铝铁矿石的大量使用, 炉渣中 Al₂O₃ 含量增大, 影响炉渣的冶金性能, 特别是炉渣的流动性^[2-6]。

TiO₂ 在高炉渣中可一定程度上改善炉渣流动性, 但含量高时可能导致还原形成高熔点 TiC 而影响炉渣性能。文献 [7-8] 研究表明, Ti 能够和 C、N 生成高熔点化合物 TiC 及 Ti(C,N), 具有保护炉底炉缸侵蚀的作用。袁襄等^[9] 发现, 对于高铝低钛渣, 增加 TiO₂ 含量有稀释炉渣降低熔化温度的作用。施丽丽^[10] 等研究指出, TiO₂ 含量增加, 炉渣的熔化温度和黏度下降, 可避免渣中 Al₂O₃ 含量增加引起的炉渣流动性变差。也有文献 [11-14] 指出, 高铝渣中, TiO₂ 作为碱性氧化物能降低炉渣黏度。Nakamoto^[15] 等针对 CaO-SiO₂-MgO-TiO₂ 渣系, 发现炉渣粘度随 TiO₂ 浓度的增加而降低。在添加 TiO₂ 对炉渣结构改变影响的研究中, 普遍认为 TiO₂ 在炉渣中起网络修饰子, 即降低炉渣黏度的作用。如, Chang Z Y 等^[16] 发现, TiO₂ 会改变硅酸盐网状结构, 打破硅酸盐和铝酸盐的联动, 从而使炉渣解聚, 降低炉渣黏度。Zhang S^[17] 等人采用分子动力学模拟和 FT-IR 光谱法在 1 500 °C 下研究了 CaO-SiO₂-14%Al₂O₃-TiO₂ 五元渣中 CaO/TiO₂ 值改变对结构的影响, 结果表明 TiO₂ 取代 CaO 只能导致聚合程度的轻微变化, 表明 TiO₂ 具有与 CaO 相似的作用, 是碱性氧化物。Shi Chengbin 等人^[18] 针对 CaF₂-CaO-Al₂O₃-MgO-(TiO₂) 五元含钛钢电渣,

进行了黏度测试和拉曼光谱分析, 发现炉渣的黏度随着炉渣中 TiO₂ 含量的增加而降低, 随着炉渣中 TiO₂ 含量的增加, Al-O-Al 结构单元和 Q⁴ 单元被破坏, 简单结构的 Q² 和 Ti₂O₆⁴⁻ 链结构单元含量增加。因此, 随着 TiO₂ 含量的增加, 炉渣的聚合度降低, 炉渣结构的变化与测得黏度的变化一致。但梁小平^[19] 等人针对 CaO-B₂O₃-SiO₂-TiO₂ 渣系的研究指出, 随着 TiO₂ 含量的增加, Si-O 四面体的含量从 76% 增加到 92%, 说明 TiO₂ 有利于 Si-O 四面体单元的形成, 对熔渣稳定性具有促进作用。综上所述, 目前研究对 TiO₂ 在影响炉渣结构及炉渣性能方面的认识不太统一, 没有系统的用于指导高炉冶炼高铝原料的结论, 基于此, 笔者采用理论计算结合试验, 针对高铝渣开展不同 TiO₂ 含量对炉渣性能和结构的影响研究, 包括低钛 (5%TiO₂)、中钛 (15%TiO₂) 和高钛 (25%TiO₂)。

1 试验

本研究首先采用 FactSage 计算软件中的 Phase Diagram 计算模块, 对高炉渣 CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃-TiO₂ 五元体系进行相平衡计算, 分析了 TiO₂ 含量对高炉渣液相区的影响, 并找到合适的造渣区间。计算采用标准大气压, 温度 1 350 ~ 1 500 °C, 数据库采用 Ftoxid 氧化物和 Fact 纯物质数据库, 体系含 O₂。

图 1 为 CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 渣系的液相线图, 由图 1 可知, 随着 TiO₂ 质量分数增加, 炉渣液相区先宽后窄。图中圆点为表 1 炉渣组分。TiO₂ 质量分数由 5% 增加至 25%, 该组分炉渣始终处于液相区内, 理论证实了基于当前高炉炉缸温度, 试验方案的炉渣成分能满足高炉操作要求。

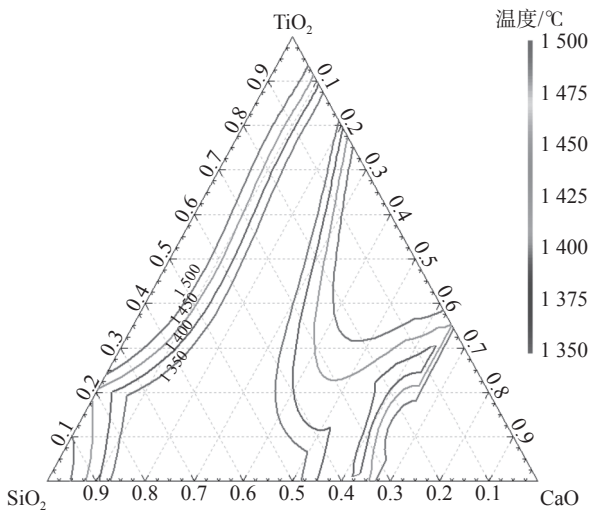


图1 CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 五元渣系液相线
Fig.1 Liquidus diagram of five-component CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ slag system

1.1 试验方案

基于以上理论计算结果, 制定试验方案如表1所示。根据表1中炉渣组分, 采用分析纯试剂配制试验所用渣样 180 g。配置前将分析纯试剂置于马弗炉中, 在 800 °C 条件下恒温 2 h, 以去除试剂中的水分。将黏度炉升温到 1 500 °C, 在 300 °C 时保持 5 min, 1 000 °C 以下升温速度为 8 °C/min, 1 000 °C 以上升温速度为 5 °C/min。升到 1 500 °C 后, 恒温 2 h, 保证炉渣充分熔化, 同时每隔 15 min 用钼棒搅拌一次, 确保炉渣混匀。之后测定该温度下炉渣的黏度, 得到 1 500 °C 时的炉渣定温黏度。再以 3 °C/min 的降温速度降到 1 300 °C, 在降温同时测定每个温度点下的炉渣黏度, 获得炉渣的黏温曲线。最后将炉渣再次升到 1 520 °C, 恒温 0.5 h 之后, 将炉渣取出进行水淬, 方便后续炉渣结构分析。

表1 CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 渣系黏度和熔化性温度测试结果
Table 1 Viscosity and melting temperature test results of CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ slag system

编号	R ₂	w/%				
		CaO	SiO ₂	MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃
1	1.25	38.89	31.11	8	5	17
2	1.25	36.11	28.89	8	10	17
3	1.25	27.78	22.22	8	25	17

1.2 试验设备

试验装置如图2所示^[20]。试验采用 Brookfield 旋转柱体黏度计, 测量炉渣 1 500 °C 时的定温黏度以及黏温曲线。黏度计由控制柜、高温加热炉、软件系统和黏度计四部分组成。发热元件为硅钼棒, 最高温度可以加热至 1 650 °C, 加热元件与试验坩埚之间隔着刚玉材质的炉管以均匀温度场, 试验所用的测头和坩埚均为钼材质。黏度计上的钼质测头浸入熔渣中心, 并以一定速度旋转, 熔渣产生的内摩擦作用于测头上产生扭矩。在测试范围内扭矩的大小与熔渣的黏度和测头的转速有关。

2 结果与分析

2.1 理论计算

图3为 CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 五元渣系液相投影, 三角形以液相等温线划分为若干区域, 每个区域以在冷却过程中首先析出的矿物命名。图4表示五元渣系熔化温度与 TiO₂ 质量分数的关系。炉渣熔化温度是液态炉渣冷却时开始析出固相的温度, 由图3、4可知, 固定碱度 R₂ 为 1.25,

随着 TiO₂ 质量分数由 1% 增加至 25%, 相图中炉渣熔化温度先下降后增高, 当 TiO₂ 质量分数为 7% 时, 炉渣液相首先析出相由斜长石类的钙铝硅酸盐 (Ca₂Al₂SiO₇) 转变为钛酸钙 (CaTiO₃), 钛酸钙的熔点为 1 975 °C, 炉渣熔化温度增加。虽然 TiO₂ 质量分数增加, 炉渣熔化温度总体呈上升趋势, 但熔化温度对炉渣流动性的影响较小。

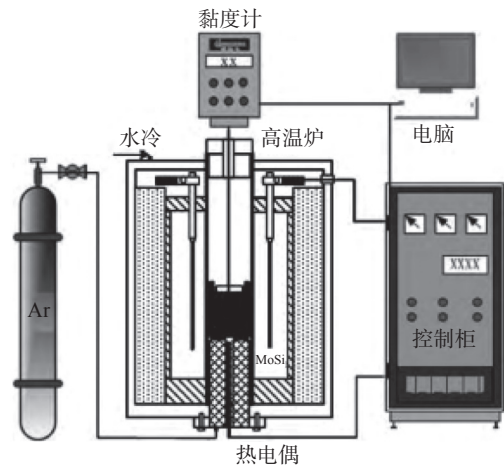


图2 黏度试验装置
Fig.2 Viscosity test device

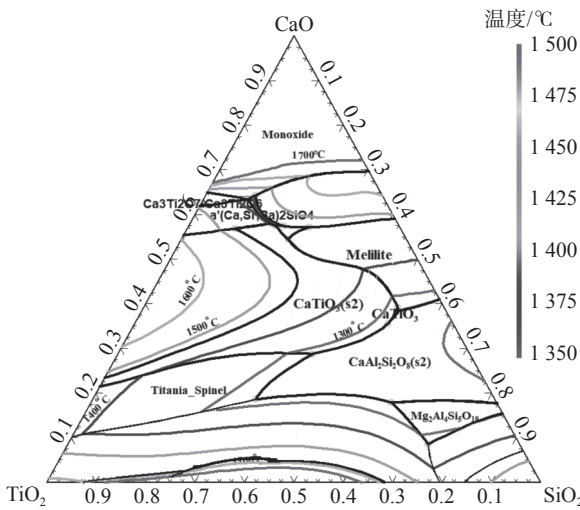


图 3 CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 五元渣系液相投影
 Fig. 3 Liquid phase projection of five-component CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ slag system

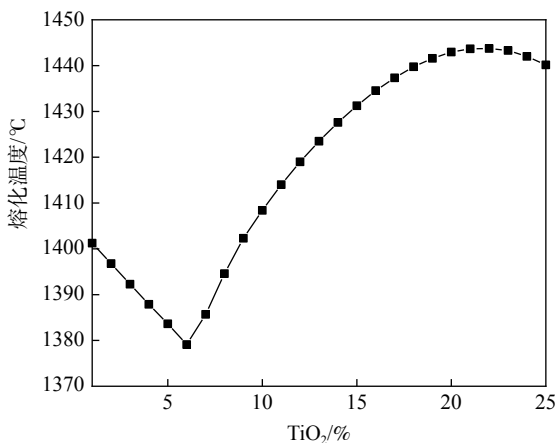


图 4 五元渣系熔化温度随 TiO₂ 含量变化曲线
 Fig. 4 Temperature change curve of the five-component slag system with TiO₂ increasing

图 5 为 CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 渣系理论黏度计算。由图 5 可知, 当 TiO₂ 质量分数由 1% 增加至 40% 时, 炉渣理论计算黏度从 0.255 Pa·s 降低至 0.173 Pa·s。随着 TiO₂ 质量分数的增加, 炉渣黏度降低的速率逐渐降低。

2.2 物化性能

CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 渣系黏度和熔化性温度测试结果如图 6、7 所示, 黏温曲线如图 8 所示。TiO₂ 含量由 5% 增加至 25% 时, 炉渣黏度和熔化性温度降低。温度越高, 炉渣黏度越低。TiO₂ 含量由 5% 增加至 10% 时, 炉渣黏度降低速度较慢, 炉渣熔化性温度降低速度较快; TiO₂ 含量由 10% 增加至 25% 时, 炉渣黏度降低速度较快, 炉渣

熔化性温度降低速度变得缓慢。TiO₂ 含量为 25% 时, 炉渣黏度(1 500 °C)和熔化性温度最低, 分别为 0.204 Pa·s 和 1 387 °C。因为 TiO₂ 是弱酸性氧化物, Ti⁴⁺ 的静电势比 Si⁴⁺ 的静电势小得多。因而 Ti-O 键比 Si-O 键弱得多, 中性气氛下在渣中是以 [TiO₆]⁸⁻ 八面体结构存在, 因而 Ti-O 键比 Si-O 键弱得多, 弥散地嵌在硅氧复合阴离子网状结构中, 使网状结构部分解体。

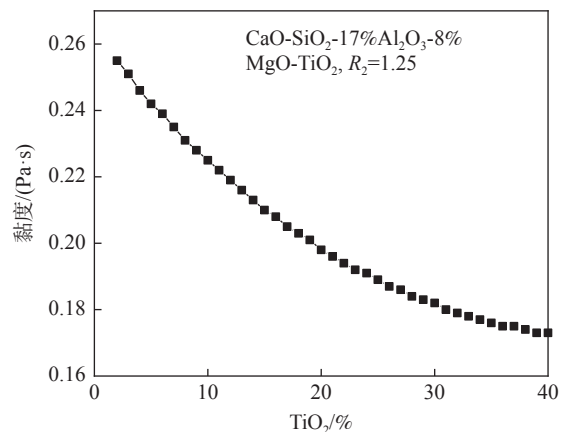


图 5 五元渣系理论黏度计算图随 TiO₂ 变化曲线
 Fig. 5 Viscosity change curve of the five-component slag system with TiO₂ increasing

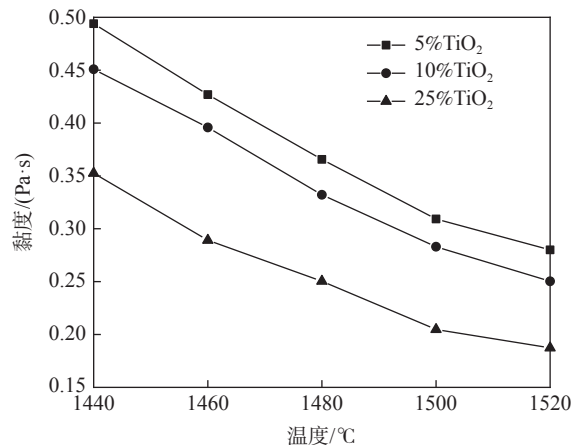


图 6 TiO₂ 含量对 CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 渣系黏度的影响
 Fig. 6 Effect of w(TiO₂) on viscosity of CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ slag system

2.3 炉渣结构

拉曼光谱分析检测了 TiO₂ 含量对熔渣结构的影响, 结果如图 9 所示, 可见随着 TiO₂ 含量的增加, 简单结构单元 Q¹ 的峰强增加, 说明炉渣中简单结构单元增加, 炉渣结构简单化。

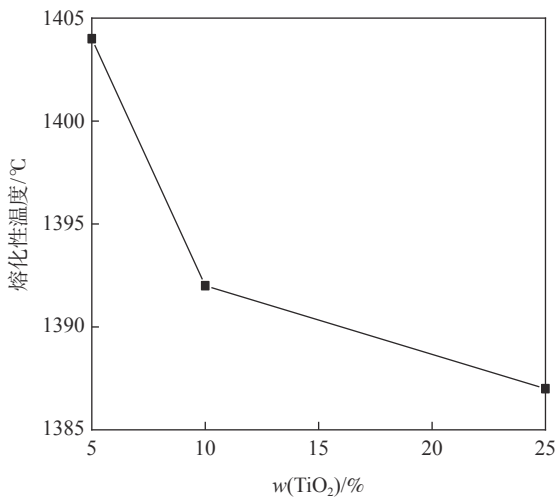


图7 $w(\text{TiO}_2)$ 对 $\text{CaO-SiO}_2-17\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO-TiO}_2$ 渣系熔化性温度的影响

Fig. 7 Effect of $w(\text{TiO}_2)$ on melting temperature of $\text{CaO-SiO}_2-17\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO-TiO}_2$ slag system

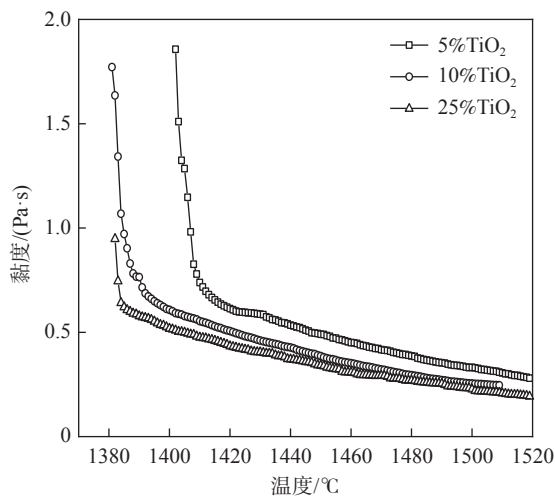


图8 $\text{CaO-SiO}_2-17\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO-TiO}_2$ 渣系黏温曲线 ($R_2=1.25$)

Fig. 8 Viscosity temperature curve of $\text{CaO-SiO}_2-17\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO-TiO}_2$ slag system ($R_2 = 1.25$)

800 ~ 1 200 cm^{-1} 波峰的峰强度高, 信号强, 易测得, 试验误差较小, 对各渣样的拉曼谱线按照表 2 进一步进行 Gaussian 解谱, 获得各结构单元的相对含量。 Q^0 为岛状结构, 对应晶谱为正硅酸盐单晶; Q^1 为二聚体, 对应晶谱为焦硅酸盐单晶; Q^2 为环状/链状结构, 对应晶谱为一硅酸盐单晶; Q^3 为片状结构, 对应晶谱为二硅酸盐单晶。其中, Q^2 和 Q^3 表示较为复杂的聚合结构, 其含量较高时说明炉渣结构比较复杂, 炉渣聚合度较高; Q^0 和 Q^1 表示较为简单的聚合结构, 其含量较高时说明炉渣结构比较简单, 炉渣聚合度较低。

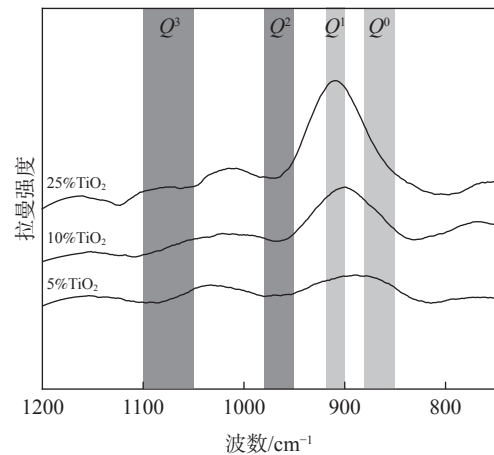


图9 $\text{CaO-SiO}_2-17\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO-TiO}_2$ 渣系 Raman 光谱
Fig. 9 Raman spectra of $\text{CaO-SiO}_2-17\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO-TiO}_2$ slag

表 2 熔渣结构单元拉曼光谱特征峰

Table 2 Raman-active vibrations for various structure units of slag

结构单元	NBO/T[Qn]	波数/ cm^{-1}
$[\text{SiO}_4]^{4-}$	4(Q^0)	850 ~ 880
$[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$	3(Q^1)	900 ~ 920
$[\text{SiO}_3]^{2-}$	2(Q^2)	950 ~ 980
$[\text{Si}_2\text{O}_7]^{2-}$	1(Q^3)	1 050 ~ 1 100

图 10 为 $\text{CaO-SiO}_2-17\%\text{Al}_2\text{O}_3-8\%\text{MgO-TiO}_2$ 渣系 Raman 光谱分峰拟合结果, 结合表 2 可知, 谱峰主要存在 850 ~ 880、900 ~ 920、1 000 ~ 1 050、1 050 ~ 1 100 cm^{-1} 四个特征谱峰带, Q^2 结构单元波谱峰带由 850 ~ 880 cm^{-1} 波段向更高频波段 1 050 ~ 1 100 cm^{-1} 转移, 炉渣结构变复杂。各特征峰的面积百分比在一定程度上能反应相对应的结构单元的相对含量。将图 10 中的各特征峰的面积百分比在图 11(a) 中更直观地表示, 获取各结构单元相对含量的变化信息。由图 11(a)可知, TiO_2 含量由 5% 增加至 25% 时, 炉渣中复杂结构单元 Q^2 的含量降低, Q^3 的含量先降低后增加, 简单结构单元 Q^0 的含量降低, Q^1 的含量增加。用复杂聚合结构和简单聚合结构比值 $\text{Si}(Q^2 + Q^3) / \text{Si}(Q^0 + Q^1)$ 来反映炉渣聚合度, $\text{Si}(Q^2 + Q^3) / \text{Si}(Q^0 + Q^1)$ 越高, 炉渣越复杂。由图 11(b)可知, 随着 TiO_2 质量分数增加, $\text{Si}(Q^2 + Q^3) / \text{Si}(Q^0 + Q^1)$ 降低, 炉渣结构简单化。可以说明 TiO_2 起网络修饰子的作用, 破坏炉渣网状结构。

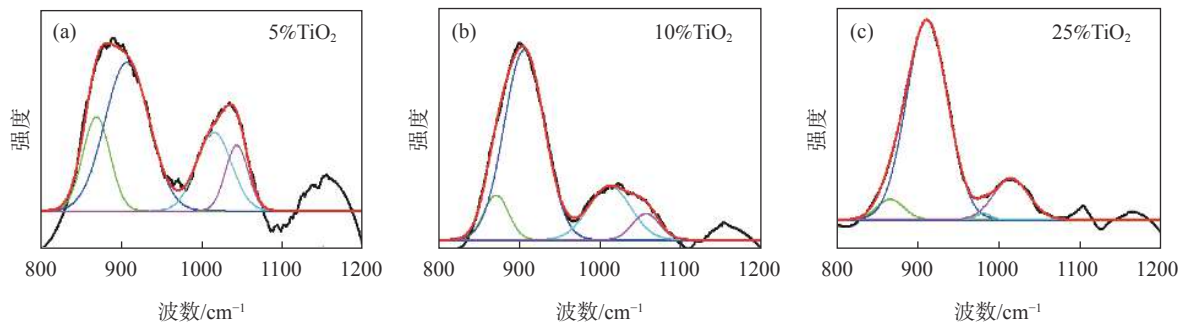


图 10 CaO-SiO₂-8%MgO-17%Al₂O₃-TiO₂ 渣系 Raman 光谱分峰拟合
Fig. 10 Raman spectral peak fitting of CaO-SiO₂-8%MgO-17%Al₂O₃-TiO₂ slag system

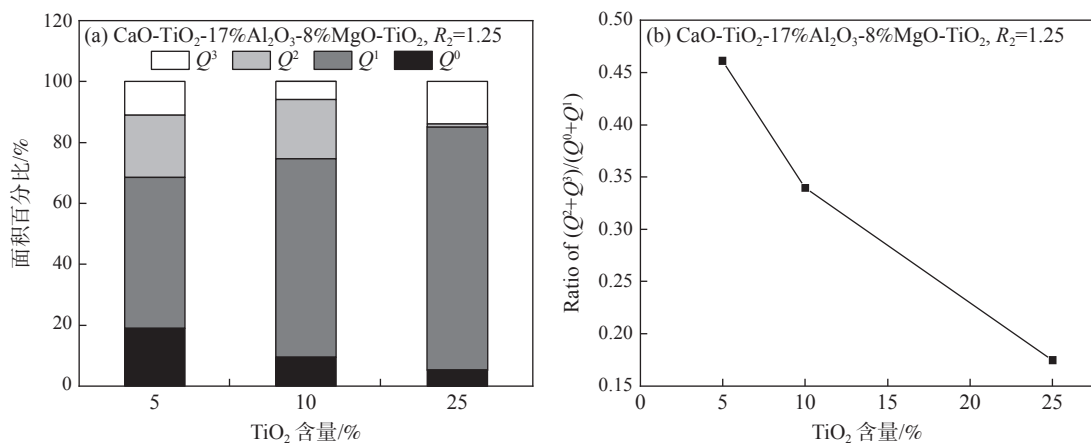


图 11 CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ 渣系炉渣各结构单元与 TiO₂ 含量的关系
Fig. 11 Relationship between structural units of CaO-SiO₂-17%Al₂O₃-8%MgO-TiO₂ slag and TiO₂ content

3 结论

1) 固定碱度 R_2 为 1.25, TiO₂ 质量分数增加至 25% 时, 炉渣熔化温度先下降后增高, 当 TiO₂ 质量分数为 7% 时, 炉渣液相先析出相由斜长石类的钙铝硅酸盐 (Ca₂Al₂SiO₇) 转变为高熔点钛酸钙 (CaTiO₃), 炉渣熔化温度增加。

2) 渣中 TiO₂ 含量由 5% 增加至 25% 时, 炉渣黏度和熔化性温度降低。温度越高, 炉渣黏度越低,

流动性越好。TiO₂ 以 [TiO₆]⁸⁻ 八面体结构存在, 使硅氧复杂网状结构部分解体, 降低炉渣黏度。

3) 渣中 TiO₂ 含量由 5% 增加至 25% 时, 炉渣中复杂结构单元 Si(Q² + Q³) 的含量降低, 简单结构单元 Si(Q⁰ + Q¹) 的含量升高, Si(Q² + Q³)/Si(Q⁰ + Q¹) 降低, 炉渣结构简单化, 即炉渣中无论是在低钛、中钛、还是高钛含量, TiO₂ 在炉渣中起炉渣修饰子作用, 对降低高铝炉渣黏度、改善炉渣流动性有积极作用, 可用于调整高铝渣高温物化性能。

参考文献

- [1] Yu Wen, Ding Guoxuan, Fan Xiaopeng, *et al.* Study on mine geological ecological environment evaluation based on analytic hierarchy process fuzzy comprehensive model[J]. Three Gorges Ecological Environment Monitoring, 2021, 6(2): 26–35. (郁文, 丁国轩, 樊小鹏, 等. 基于层次分析-模糊综合模型的矿山地质生态环境评价研究[J]. 三峡生态环境监测, 2021, 6(2): 26–35.)
- [2] Sun Changyu, Chen Yachun, Li Jing, *et al.* The effect of MgO on the desulfurization of high-aluminum blast furnace slag and its kinetic analysis[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(4): 82–87. (孙长余, 陈亚春, 李静, 等. MgO对高铝高炉渣脱硫的影响及其动力学分析[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(4): 82–87.)
- [3] Kim J R, Lee Y S, Dong J M, *et al.* Influence of MgO and Al₂O₃ contents on viscosity of blast furnace type slags containing

- FeO[J]. *ISIJ International*, 2004, 44(8): 1291–1297.
- [4] Kim G H, Sohn I. Effect of Al_2O_3 on the viscosity and structure of calcium silicate-based melts containing Na_2O and CaF_2 [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, 358(12-13): 1530–1537.
- [5] Machin J S, Yee T B, Hanna D L. Viscosity studies of system $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$: III, 35, 45, and 50% SiO_2 [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1952, 35(12): 322–325.
- [6] Tang X L, Zhang Z T, Guo M, *et al.* Viscosities behavior of $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ slag with low mass ratio of CaO to SiO_2 and wide range of Al_2O_3 content[J]. *Journal of Iron & Steel Research International*, 2011, (2): 1–17.
- [7] Kurunov I F, Loginov V N, Lyapin S S, *et al.* New technological solutions to protect the lining of blast-furnace hearths[J]. *Metallurgist*, 2007, 51: 425–433.
- [8] Zhao Y. The impact of titanium on Skull formation in the blast furnace hearth[C]//In: AIST. org, editor. AISTech-2013. Pittsburgh, Pa, USA. 2014: 95-103.
- [9] Yuan Xiang, Zhang Jianliang, Mao Rui, *et al.* Viscosity and melting properties of blast furnace low titanium slag[J]. *Journal of Process Engineering*, 2014, 14(4): 664–670.
(袁襄, 张建良, 毛瑞, 等. 高炉低钛渣粘度和熔化性能[J]. *过程工程学报*, 2014, 14(4): 664–670.)
- [10] Shi Lili, Li Rong, Long Ping, *et al.* Effect of Al_2O_3 and TiO_2 content on viscous flow characteristics and mineral composition of titanium bearing blast furnace slag[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2017, 40(5): 1–3.
(施丽丽, 李容, 隆平, 等. Al_2O_3 和 TiO_2 含量对含钛高炉渣黏流特性及矿物组成的影响[J]. *山西冶金*, 2017, 40(5): 1–3.)
- [11] Yan Z, Pang Z, Lv X W, *et al.* Effect of TiO_2 on the viscous behavior of high alumina blast furnace slag[C]//9th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. 2018: 725-733.
- [12] Wang Z, Shu Q F, Chou K. Viscosity of fluoride-free mold fluxes containing B_2O_3 and TiO_2 [J]. *Steel Research International*, 2013, 84(8): 766–776.
- [13] Park H, Park J Y, Kim J H, *et al.* Effect of TiO_2 on the viscosity and slag structure in blast furnace type slags[J]. *Steel Research International*, 2012, 83(2): 150–156.
- [14] Xu Renze, Zhang Jianliang, Zhang Heshun, *et al.* Effect of TiO_2 on properties of Jingtang blast furnace slag and thermodynamic analysis[J]. *Iron and steel*, 2017, 52(9): 104–109.
(许仁泽, 张建良, 张贺顺, 等. TiO_2 对京唐高炉渣性能的影响及热力学分析[J]. *钢铁*, 2017, 52(9): 104–109.)
- [15] Nakamoto M, Tsugawa Y, Kiyose A, *et al.* Effect of TiO_2 on the viscosity of molten slag in $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ system[J]. *Journal of High Temperature Society*, 2007, 32(1): 74–77.
- [16] Chang Z Y, Jiao K X, Zhang J L, *et al.* Effect of TiO_2 and MnO on viscosity of blast furnace slag and thermodynamic analysis[J]. *ISIJ International*, 2018, 58(12): 2173–2179.
- [17] Zhang S, Zhang X, Peng H, *et al.* Structure analysis of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ slag by molecular dynamics simulation and FT-IR spectroscopy[J]. *Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan*, 2014, 54(4): 734–742.
- [18] Shi Chengbin, Zheng Dingli, Shin Seungho, *et al.* Effect of TiO_2 on the viscosity and structure of low-fluoride slag used for electroslag remelting of Ti-containing steels[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2017, 24(1): 18–24.
- [19] Liang Xiaoping, Lu Dongxu, Wang Yu, *et al.* Computational simulation on the coordination structure of $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ mold fluxes system[J]. *Journal of Chongqing University*, 2015, 38(5): 135–141.
(梁小平, 陆东旭, 王雨, 等. $\text{CaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ 系保护渣配位结构的计算模拟[J]. *重庆大学学报*, 2015, 38(5): 135–141.)
- [20] Pang Zhengde, Lv Xuewei, Yan Zhiming, *et al.* Viscosity and free running temperature of ultra-high TiO_2 bearing blast furnace slag[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(8): 181–186.
(庞正德, 吕学伟, 严志明, 等. 超高 TiO_2 高炉渣黏度及熔化性温度[J]. *钢铁*, 2020, 55(8): 181–186.)