

文章编号:1000-582X(2013)05-051-05

## CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系熔化性能实验

郝以党<sup>1</sup>, 吴龙<sup>1,2</sup>, 李士琦<sup>2</sup>

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要:**含钛炉渣的研究往往关注于其对炼铁的影响,较少涉及精炼渣应用。为完善前人研究,确定 TiO<sub>2</sub> 对精炼渣系熔点的影响和促进含钛废渣的资源化再利用,通过实验和 Factsage 理论计算对 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系的熔化性能进行了研究。实验以炉渣熔点为指标,考察了二元碱度、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 含量对渣系熔点的影响。3 个因素的变化范围分别为:二元碱度 4~7.9, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 30%~45% 和 TiO<sub>2</sub> 含量 1%~7%。研究表明:二元碱度对渣系熔点的影响显著,其他因素的影响不显著;试验条件下该渣系最低熔点炉渣的二元碱度为 6.6, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 35% 和 TiO<sub>2</sub> 为 5%, 对应熔点为 1354℃; TiO<sub>2</sub> 含量低于 3% 时,渣系液相区面积变化很小可以忽略, TiO<sub>2</sub> 含量在 3%~10% 的范围, TiO<sub>2</sub> 含量越高液相区面积越大。实验条件下该渣系的熔化性能能够满足炼钢精炼渣要求。

**关键词:** 熔点; 炉渣; TiO<sub>2</sub>; Factsage**中图分类号:** TF703**文献标志码:** A

## Experiments on the melting properties of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> slag

HAO Yidang<sup>1</sup>, WU Long<sup>1,2</sup>, LI Shiqi<sup>2</sup>

(1. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group, Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Iron and Steel Making Department of Metallurgical and Ecological Engineering School,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to promote the resource recycling of titanium contained in waste slag, the melting properties of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> slag are studied through melting experiment and theoretical calculation by using thermodynamic software Factsage. The experimental index is the melting temperature of the slag, and the effect factors are binary basicity, the mass percent of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub>. The three factors' change range are as follows, binary basicity 4~7.9, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30%~45% and TiO<sub>2</sub> 1%~7%. The research results are as follows. The effect of binary basicity is significant, but other factors' effects are not. Under the experimental conditions, the optimal combination of the lowest melting temperature for the slag are binary basicity 6.6, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 35% and TiO<sub>2</sub> 5%, and the corresponding melting temperature is 1354℃. While the content of TiO<sub>2</sub> is lower than 3%, the liquid region area has little change and can be ignored. While the content of TiO<sub>2</sub> is under the range of 3%~10%, the liquid region is larger when the content of TiO<sub>2</sub> is higher. Under the experimental study conditions, the melting properties of this slag system can meet the requirements of refining slag in steelmaking.

**Key words:** melting point; slag; TiO<sub>2</sub>; Factsage**收稿日期:** 2012-12-16**基金项目:** 国家科技支撑计划课题(2007BAF08B01-03)**作者简介:** 郝以党(1975-),男,中冶建筑研究总院有限公司环保事业部高级工程师,主要从事冶金废渣资源循环利用研究,(E-mail)hyidang@126.com。

吴龙(联系人),男,工学博士,(E-mail)jieke8857@126.com。

铝业拜尔法赤泥中含有较高的铁、铝金属资源<sup>[1-2]</sup>,本课题组使用提铁后的赤泥尾渣用于制备炼钢精炼渣。但其中含有约 5% 的  $\text{TiO}_2$  可能影响到精炼渣的熔点,是需要特别关注的问题。常用精炼渣主要有  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  渣系、 $\text{CaO-SiO}_2$  渣系、 $\text{CaO-Ca}_2\text{F}$  渣系以及含  $\text{BaO}$  的渣系,生产中多以  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  渣系为基础渣。文献[3-6]对常用炉渣熔点做了大量工作。使用赤泥提铁尾渣制备的精炼渣实际为  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$  渣系。

含钛炉渣的研究往往关注其对炼铁的影响<sup>[7]</sup>,较少涉及精炼渣应用。文献[8-9]对  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-TiO}_2$  系炉渣的熔化性能研究发现当碱度  $R > 1.5$  时,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数为 25%~35% 时,  $\text{TiO}_2$  的质量分数超过 1% 可显著提高渣系熔点。文献[10-11]研究  $\text{TiO}_2$  对  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$  渣系黏度的影响发现,  $\text{TiO}_2$  含量低于 15%,  $\text{TiO}_2$  的增加炉渣黏度降低。文献[12-13]成功应用含钛高炉渣提铁尾渣制备精炼渣,精炼渣中  $\text{TiO}_2$  含量为 1.86%。关于  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$  渣系还没有系统的研究,上述文献研究渣系均为含钛渣但具体渣系又有所不同,为相关的渣系研究。文献[8-9]认为  $\text{TiO}_2$  含量会造成研究渣系熔点显著升高,而文献[10-11]认为会造成熔点和黏度降低,可见相关研究间也存在着不同的观点。

为完善前人研究,确定  $\text{TiO}_2$  对精炼渣系熔点的影响,笔者对  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$  渣系进行了熔点实验研究,并使用 Factsage 热力学软件对该渣系的熔化性能进行了理论计算。以期使用提铁后的赤泥渣制备精炼渣,促进含钛废渣的资源化再利用。

## 1 实验设计

### 1.1 实验方法

首先根据实验测试炉渣成分进行配渣,每个试样为 4 g,配好后放置于白金坩埚中。将配好的炉渣放置于白金坩埚中,用马弗炉在 1 600 °C 条件下对炉渣进行预熔,然后自然冷却至室温,取出白金坩埚。预熔后的炉渣经研磨粉碎后,制备  $\phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的圆柱体试样。使用全自动炉渣熔点熔速测定仪(RDS-04)采用试样变形法(YB/T185-2001)对试样熔点进行测试。每次实验物料测试 2~5 次,试验结果取平均值。

### 1.2 实验方案

实验考察指标为炉渣熔点,考察了炉渣二元碱度( $\text{CaO}$  和  $\text{SiO}_2$  的质量比)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量和  $\text{TiO}_2$

含量 3 个因素对  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$  渣系熔点的影响。实验各因子水平列于表 1,设定炉渣碱度、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(%)以及  $\text{TiO}_2$  含量(%) 3 个因子分别为 A、B、C 因子,1、2、3、4 分别标志为每因子的某个水平。实验方案按照  $L_{16}(4^5)$  正交表安排进行。

表 1 实验因子水平

| 因子 | A   | B/% | C/% |
|----|-----|-----|-----|
| 1  | 4.0 | 30  | 1   |
| 2  | 5.3 | 35  | 3   |
| 3  | 6.6 | 40  | 5   |
| 4  | 7.9 | 45  | 7   |

## 2 实验结果及分析

### 2.1 实验结果

按照实验方案进行实验,各实验对应的炉渣组分及实验结果列于表 2。

表 2 实验结果

| 实验号 | $w(\text{CaO})$<br>/% | $w(\text{SiO}_2)$<br>/% | $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$<br>/% | $w(\text{TiO}_2)$<br>/% | 熔点<br>/°C | 因子<br>水平<br>排列 |
|-----|-----------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------|----------------|
| 1   | 55.20                 | 13.80                   | 30                               | 1                       | 1 501     | $A_1 B_1 C_1$  |
| 2   | 49.60                 | 12.40                   | 35                               | 3                       | 1 501     | $A_1 B_2 C_2$  |
| 3   | 44.00                 | 11.00                   | 40                               | 5                       | 1 419     | $A_1 B_3 C_3$  |
| 4   | 38.40                 | 9.60                    | 45                               | 7                       | 1 469     | $A_1 B_4 C_4$  |
| 5   | 56.37                 | 10.63                   | 30                               | 3                       | 1 498     | $A_2 B_1 C_2$  |
| 6   | 53.84                 | 10.16                   | 35                               | 1                       | 1 411     | $A_2 B_2 C_1$  |
| 7   | 44.59                 | 8.41                    | 40                               | 7                       | 1 464     | $A_2 B_3 C_4$  |
| 8   | 42.06                 | 7.94                    | 45                               | 5                       | 1 412     | $A_2 B_4 C_3$  |
| 9   | 56.45                 | 8.55                    | 30                               | 5                       | 1 392     | $A_3 B_1 C_3$  |
| 10  | 50.37                 | 7.63                    | 35                               | 7                       | 1 414     | $A_3 B_2 C_4$  |
| 11  | 51.24                 | 7.76                    | 40                               | 1                       | 1 414     | $A_3 B_3 C_1$  |
| 12  | 45.16                 | 6.84                    | 45                               | 3                       | 1 379     | $A_3 B_4 C_2$  |
| 13  | 55.92                 | 7.08                    | 30                               | 7                       | 1 439     | $A_4 B_1 C_4$  |
| 14  | 53.26                 | 6.74                    | 35                               | 5                       | 1 343     | $A_4 B_2 C_3$  |
| 15  | 50.60                 | 6.40                    | 40                               | 3                       | 1 414     | $A_4 B_3 C_2$  |
| 16  | 47.93                 | 6.07                    | 45                               | 1                       | 1 414     | $A_4 B_4 C_1$  |

## 2.2 实验结果分析

根据实验结果,对实验结果进行方差和主效应分析,得表3和图1。

表3 方差分析

| 因素                                | 偏差平方和     | 自由度 | F比    | 显著性 |
|-----------------------------------|-----------|-----|-------|-----|
| 二元碱度                              | 14 965.50 | 3   | 12.02 | *   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量 | 4 226.50  | 3   | 3.39  |     |
| TiO <sub>2</sub> 含量               | 8 413.00  | 3   | 6.76  |     |
| 误差                                | 1 245.50  | 3   |       |     |

1)由表3方差分析结果可知,炉渣二元碱度对渣系熔点的影响显著,而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>含量对炉渣熔点的影响不显著。

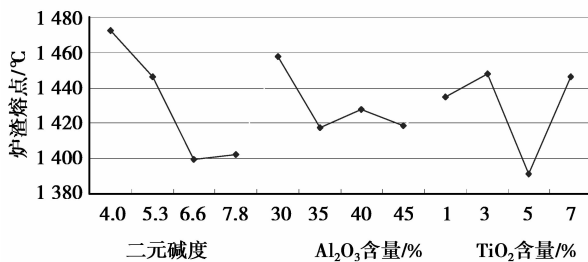


图1 主效应分析

2)由图1主效应分析结果可知:

①炉渣熔点随着二元碱度的增加降低,二元碱度为6.6时炉渣熔点最低为1 399.75 °C,比碱度为4的熔点低72.75 °C,然后二元碱度继续增大炉渣熔点变化较小;

②炉渣熔点随着Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的增加而降低,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为35%时炉渣熔点最低,然后Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量继续增加熔点变化较小;

③TiO<sub>2</sub>含量为1%、3%和7%时,炉渣熔点变化较小,而当TiO<sub>2</sub>含量为5%时炉渣熔点出现低谷。

3)由实验条件下各因子均值大小可知,该渣系最低熔点的组合为A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>,即二元碱度为6.6,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为35%和TiO<sub>2</sub>含量为5%,该条件下的炉渣熔点最低。按照1.1中方法对熔点最低的炉渣进行熔点测试,得该渣熔点为1 354 °C,能够满足炼钢精炼渣的熔点要求。

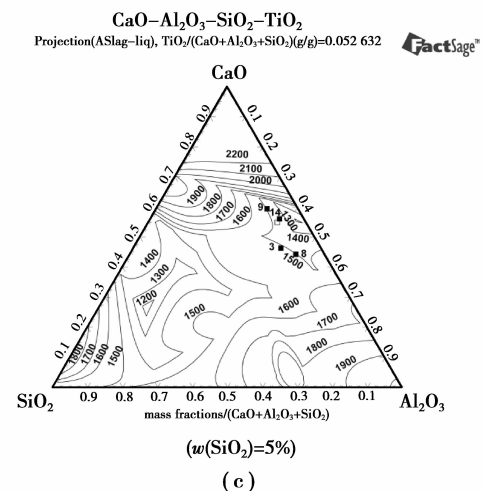
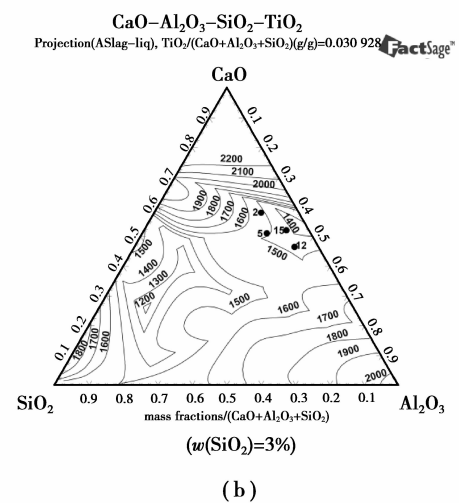
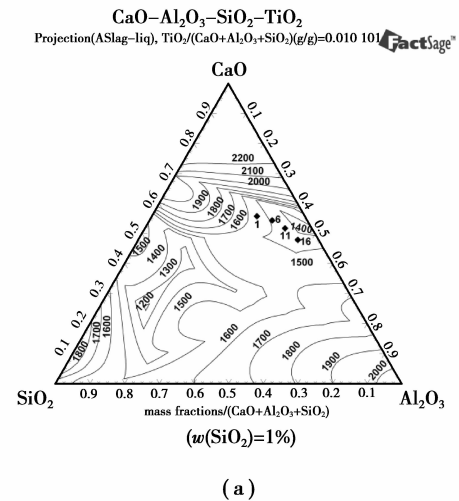
## 3 Factsage 理论计算分析

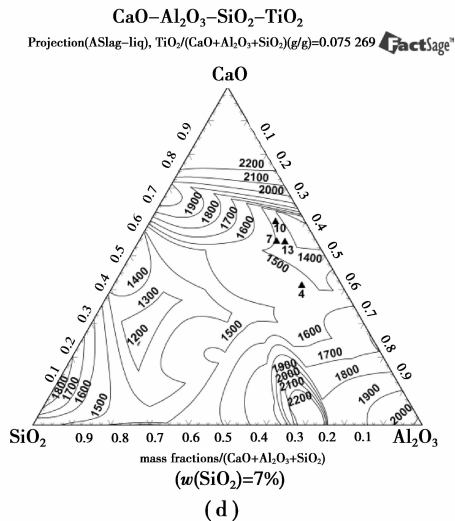
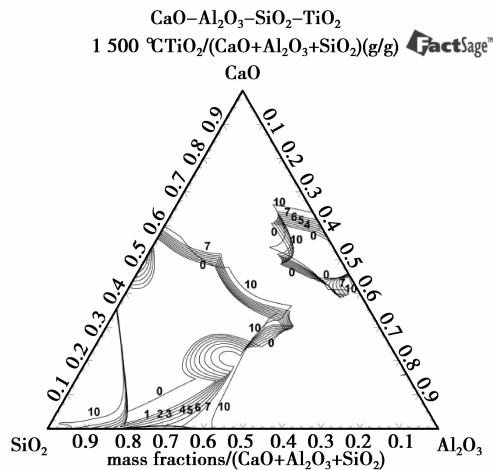
Factsage热力学软件是一个采用热化学应用模块进行计算的数据库系统,包含FToxid、FTsalt、FThall等数据库共4 500多种化合

物,具有Reaction、Predom、PhaseDiagram和Equilib等6个计算模块<sup>[14-16]</sup>。笔者基于其中Ftoxid数据库资源,使用PhaseDiagram计算模块对CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>渣系熔化性能进行了研究。

### 3.1 理论计算与实验结果对比

使用Factsage计算可得CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>渣系的等液相线图2(各熔点实验号分别对应标在各等液相线图中)和1 500 °C的液相区图3。



图 2 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系的等液相线图图 3 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系 1 500 °C 液相区

由图 2 和图 3 可见:

1) 各实验点分布在 CaO 40%~60%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30%~45%, SiO<sub>2</sub> 5%~20% 的范围内, 各实验点对应图中温度基本在 1 400~1 500 °C 范围内; 对比表 2 中数据可发现, 图中各实验点 Factsage 计算温度稍高于试验实测温度。如 1、2、4、5、7 号实验实测温度在 1 450~1 500 °C 范围内, 而图中 Factsage 计算温度约为 1 500 °C, 试验测试结果比 Factsage 计算结果低 0~50 °C。

2) 在实验点对应的区域, 当 SiO<sub>2</sub> 含量从 15% 附近降低至 5% 附近时所对应液相线温度由 1 500 °C 降低至 1 400 °C, 相应的二元碱度由 3~4 增大至 8~12。对比表 2 中数据可发现, 碱度较低的 1~8 号实验在图中的位置液相温度在 1 500 °C 附近, 而碱度较高的 9~16 号实验在图中的位置液相温度显著降低至 1 450 °C 附近的位置。1~8 号实验实测熔

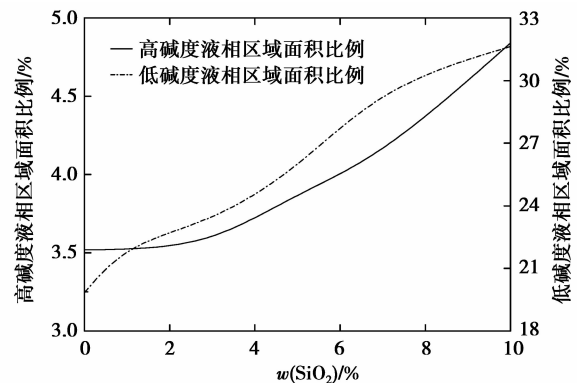
点多在 1 450~1 500 °C, 9~16 号实验实测温度多在 1 400 °C 左右。可见计算结果和实测值虽然有一定的偏差, 但整体趋势相同。

3) 随着 TiO<sub>2</sub> 含量的增加, 相同温度的等液相线区域面积呈增大趋势, 尤其在 TiO<sub>2</sub> 含量为 5% 时, 在 CaO 55%, SiO<sub>2</sub> 2% 附近出现了 1 300 °C 的超低熔点温度。将实验最优结果以空方块为标记表征其在图 2 中的位置, 其位置和 14 号实验十分接近, 可进一步降低炉渣中 SiO<sub>2</sub> 含量, 促进渣系熔点的降低。

### 3.2 模拟计算结果的理论分析

1) 二元碱度的影响。由实验和 Factsage 计算结果可知, 二元碱度对该渣系熔点的影响比较显著, 在实验考察范围内, 二元碱度增大炉渣熔点显著降低。在固定的 TiO<sub>2</sub> 含量下, 二元碱度降低、SiO<sub>2</sub> 含量的降低, 则 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量相对增高, 造成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的组成形态由高熔点的 CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 和 Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub> 向低熔点的 Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> 转变, 因此降低了渣系熔点。

2) TiO<sub>2</sub> 含量的影响。图 3 为 1 500 °C 下 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系的液相区图, 可分为 SiO<sub>2</sub> 含量低于 20% 的高碱度液相区域和 SiO<sub>2</sub> 含量高于 30% 的低碱度液相区域。根据图 3 数据可绘制得到图 4。

图 4 不同 TiO<sub>2</sub> 含量下 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系 1 500 °C 液相区面积

由图 4 可知, 当 TiO<sub>2</sub> 含量低于 3% 时, 高碱度区域液相区面积比例保持不变, 该部分液相区分布类似于 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 渣系; 当 TiO<sub>2</sub> 含量高于 3% 时, 该部分液相区面积显著增加; 高、低碱度液相区域面积都随着 TiO<sub>2</sub> 含量的增加而增大, 因此总的液相区面积是增加的。当 TiO<sub>2</sub> 含量为 5% 和 10% 时, 总的液相区域面积分别为 26.8% 和 36.48%, 分别比 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 渣系 23.6% 的液相区面积高

出 3.44% 和 13.12%。

在高碱度液相区渣系中 TiO<sub>2</sub> 的组成形态由高熔点的物质依次向低熔点的物质转变,转变轨迹为 CaTiO<sub>3</sub>→Ca<sub>5</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>13</sub>→Ca<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>;在低碱度液相区渣系中 TiO<sub>2</sub> 的组成形态由高熔点的 CaTiO<sub>3</sub> 向低熔点的 CaSiTiO<sub>5</sub> 转变。TiO<sub>2</sub> 含量的增加,促进了这种 TiO<sub>2</sub> 的组成形态的变化,协同其他物质的转变共同增大了低熔点区域的面积。

总结可知,TiO<sub>2</sub> 含量(<10%)的增加并没有降低 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系熔点,反而在一定程度上增加了低熔点区域面积。对比常用 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 三元渣系,可见其熔点没有降低,能够满足炼钢精炼渣的熔点要求。

## 4 结 论

笔者通过 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系熔点实验对前人工作进行了补充,确认了 TiO<sub>2</sub> 含量对精炼渣熔点的影响,得出结论如下:

1) 实验条件下 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系熔点最低的组合为 A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>,即二元碱度为 6.6,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 35% 和 TiO<sub>2</sub> 含量为 5%,对应熔点为 1354 ℃。

2) 炉渣二元碱度的变化对 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系熔点的影响显著,而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 含量变化的影响不显著,降低 SiO<sub>2</sub> 含量可进一步降低炉渣熔点。

3) TiO<sub>2</sub> 含量低于 3%,CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 渣系液相区域面积变化较小和 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 渣系液相区域分布相似。TiO<sub>2</sub> 含量在 3%~10% 的范围,低熔点区域面积随着其含量的增大显著增大。

### 参考文献:

[1] 曲永新,关文章,张永双,等. 炼铝工业固体废物(赤泥)的物质组成与工程特性及其防治利用研究[J]. 工程地质学报,2000,8(3):296-305.  
QU Yongxin, GUAN Wenzhang, ZHANG Yongshuang, et al. Study on material composition and engineering properties, prevention and application of the solid waste (red mud) in aluminium industry[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(3): 296-305.

[2] 朱军,兰建凯. 赤泥的综合回收与利用[J]. 矿产保护与利用,2008(2):52-54.  
ZHU Jun, LAN Jiankai. Comprehensive recovery and utilization of red mud[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2008(2): 52-54.

[3] Mauro P. A new generation of ultra-high strength

X100/120 pipelines: a breakthrough for economic long-distance gas transportation [C/OL] // Proceedings of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, June 19-24, 2005, Seoul, Korea. [2012-01-16]. http://124.205.233.36/zg/zgDetail.do?ids=165305&dbVal=0.

- [4] Kimiaki S. Technology for production of austenite type clean stainless steel[J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 2006, 46(12): 1795-1799.
- [5] Turkogan E T. Slags and fluxes for ferrous ladle metallurgy [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1985, 12(2): 64-78.
- [6] Jönsson P, Jonsson L, Sichen D. Viscosities of ladle slags and their impact on ladle refining[J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 1997, 37(5): 484-491.
- [7] 林衍先,尹文超. 高炉低钛渣脱硫能力的研究[J]. 钢铁, 1987, 22(2): 1-6.  
LIN Yanxian, YIN Wenchao. Desulphurization ability of the blast furnace slag with low titanium oxide content[J]. Iron and Steel, 1987, 22(2): 1-6.
- [8] 徐冉,宋波,毛璟红. CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-TiO<sub>2</sub> 钢渣体系熔化性能[J]. 北京科技大学学报, 2011, 32(11): 1421-1427.  
XU Ran, SONG Bo, MAO Jinghong. Melting performance of CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-TiO<sub>2</sub> slag system [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 32(11): 1421-1427.
- [9] 徐冉,宋波,何为,等. 钢渣熔化温度理论研究[J]. 中国稀土学报, 2010, 28: 106-111.  
XU Ran, SONG Bo, HE Wei, et al. Theoretical study on melting temperature of steel slag [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2010, 28: 106-111.
- [10] 豆志河,姚建明,张延安,等. TiO<sub>2</sub> 对 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub> 渣系黏度的影响[J]. 材料导报, 2008, 22(5): 152-154.  
DOU Zhihe, YAO Jianming, ZHANG Ting'an, et al. Effect of TiO<sub>2</sub> on viscosities of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaF<sub>2</sub> slag systems[J]. Materials Review, 2008, 22(5): 152-154.
- [11] 乔瑞庆,杜鹤桂. TiO<sub>2</sub> 对含氟熔渣粘度和熔化性温度的影响[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(4): 1-4.  
QIAO Ruiqing, DU Hegui. Influence of TiO<sub>2</sub> on the viscosity and free running temperature of the slag containing fluorine [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1998, 10(4): 1-4.
- [12] 李有奇,柯昌明,甘霖,等. 基于攀钢含钛高炉渣提钛尾渣的精炼脱硫剂研究[J]. 钢铁钒钛, 2008, 29(4): 26-31.

- Machine Learning, 1995, 20(3): 273-297.
- [22] 占勇,程浩忠,丁屹峰,等. 基于S变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-56.
- ZHAN Yong, CHENG Haozhong, DING Yifeng, et al. S-transform-based classification of power quality disturbance signal by support vector machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 51-56.
- [23] 雷肖,陈清泉,刘开培,等. 电动车蓄电池荷电状态估计的支持向量机方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 114-118.
- LEI Xiao, CHEN Qingquan, LIU Kaipei, et al. Support vector machine based SOC estimation for electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 114-118.
- [24] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, November 27-December 1, 1995, Perth, WA. Piscataway: IEEE Press, 1995, 4: 1942-1948.
- [25] 袁荣湘,陈彧,吴昊. 采用 PSO 算法的反时限过流保护配合方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1730-1735.
- YUAN Rongxiang, CHEN Yu, WU Hao. Method of inverse-time overcurrent protection coordination using PSO algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1730-1735.
- [26] 李元诚,刘克文. 面向大规模样本的核心向量回归电力负荷快速预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 33-38.
- LI Yuancheng, LIU Kewen. A rapid electric load forecasting method using core vector regression for large scale data set [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 33-38.

(编辑 王维朗)

~~~~~

(上接第 55 页)

- LI Youqi, KE Changming, GAN Lin, et al. Development and application of refining desulfurizing agent based on Panzhihua Iron and Steel Co. blast furnace slag extracted titanium [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2008, 29(4): 26-31.
- [13] 杨宝斌,宋波,何为,等. 含钒含钛精炼渣硫容量研究[J]. 中国稀土学报, 2010, 28: 376-380.
- YANG Baobin, SONG Bo, HE Wei, et al. Sulfur capacity of refining slag containing vanadium and titanium [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2010, 28: 376-380.
- [14] Pelton A D. Thermodynamic database development: modeling and phase diagram calculations in oxide systems [J]. Rare Metals, 2006, 25(5): 473-480.
- [15] 金利玲,王海涛,许中波,等. CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO 系低熔点区域控制[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(6): 574-577.
- JIN Liling, WANG Haitao, XU Zhongbo, et al. Control on low melting point area in a CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO system [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(6): 574-577.
- [16] 董凌燕,陈登福,白晨光,等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub> 系截面图的计算与验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2004, 27(1): 96-100.
- DONG Lingyan, CHEN Dengfu, BAI Chenguang, et al. The calculation of section of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub> system and its verification [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2004, 27(1): 96-100.

(编辑 王维朗)