

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 05. 013

电渣重熔中脱氧剂种类影响炉渣脱氧的热力学分析

侯 栋¹,姜周华¹,董艳伍¹,周伟基²

(1. 东北大学 冶金学院,辽宁 沈阳 110819 ;2. 大连特殊钢有限责任公司,辽宁 大连 116100)

摘 要 :以工业纯铁为研究对象 ,熔渣 - 金属中各个组元间的热力学平衡反应和质量守恒为基础 ,计算了不同的脱氧剂添加量下钢中的 Si ,Al 的平衡质量分数 ,建立了脱氧剂 Al ,CaSi ,CaSiBa 的脱氧热力学模型。结果表明 :基于本模型对多种脱氧剂进行的研究能够符合实验结果 ,在采用 Al ,CaSi ,CaSiBa 脱氧时 ,渣中 FeO 质量分数分别能降低到 0. 04% ,0. 08% ,0. 08% ,铝脱氧可以使得熔渣中氧势降到最低 ,且渣中 Al₂O₃ 由于脱氧而增加的量相对于原始质量分数变化幅度较小 ,与 CaSi ,CaSiBa 相比具有良好的氧势控制能力。
关 键 词 :炉渣离子分子共存理论 ;电渣重熔 ;脱氧 ;热力学模型
中图分类号 :TF 142 文献标志码 :A 文章编号 :1005 - 3026(2016)05 - 0668 - 05

Thermodynamics Analysis of Slag Deoxidization with Different Deoxidizers During Electroslag Remelting Process

HOU Dong¹ ,JIANG Zhou-hua¹ ,DONG Yan-wu¹ ,ZHOU Wei-ji²

(1. School of Metallurgy ,Northeastern University ,Shenyang 110819 ,China ;2. Dalian Special Steel Co. Ltd. ,Dalian 116100 ,China. Corresponding author :JIANG Zhou-hua ,professor ,E-mail :jiangzh@ smm. neu. edu. cn)

Abstract : A thermodynamics model for deoxidation in industrial pure iron system with Al ,CaSi ,CaSiBa as deoxidizers was developed by calculating the equilibrium mass fractions of Si ,Al in steel based on the thermodynamics equilibrium and mass conservation. The results from the thermodynamics model can be in a good agreement with the experimental results. The deoxidizers of Al ,CaSi and CaSiBa can make the FeO content in slag decrease to 0. 04% ,0. 08% and 0. 08% ,respectively. Meanwhile ,not only can Al make the oxygen potential of slag decrease to the lowest value ,but also its deoxidizing product of Al₂O₃ change little ,which shows the excellent performance of stabilizing slag composition.
Key words : slag ion and molecule coexistence theory ; electroslag remelting ; deoxidation ; thermodynamic model

在电渣冶金过程中脱氧主要是脱除熔渣中的不稳定氧化物(FeO 等) ,以控制熔渣的氧化能力 ,从而达到降低钢中氧及夹杂物含量的目的。目前 ,电渣重熔过程中脱氧剂的选择与应用尚未进行深入的机理研究。因此 ,本文拟将炼钢过程中的复合脱氧剂引入到电渣重熔过程 ,采用热力学计算和热态模拟实验方法 ,分析不同脱氧剂对电渣过程熔渣中氧势控制能力。

本文以炉渣分子离子共存理论为基础 ,Al ,CaSi ,CaSiBa 为脱氧剂 ,工业纯铁为目标钢种 ,对不同脱氧剂加入量下的金属 - 熔渣中各物质的平

衡质量分数进行了计算 ,建立了电渣重熔过程中的脱氧热力学模型 ,同时在实验室下进行热态模拟实验 ,对模型进行了验证。分析了各物质的平衡质量分数随脱氧剂添加量的变化规律 ,比较了不同脱氧剂对渣中氧势的控制能力 ,为电渣重熔中脱氧剂的选择与应用提供了指导。

1 活度模型的建立

电渣重熔作为一个多相冶金反应体系 ,在冶炼过程中由于熔渣的挥发以及选分结晶 ,熔渣组

元的含量均发生不同程度的变化,同时,电渣重熔体系的温度也会随着反应的进行而不断变化.为方便研究电渣重熔过程中的热力学脱氧问题,作如下假设:①金属-熔渣之间的反应动力学良好,达到热力学平衡;②渣系在某一时刻为稳定渣系;③金属-熔渣界面反应的温度变化很小;④在金属和熔渣两相内,各反应物的浓度分布均匀;⑤气相不参与反应.

1.1 脱氧剂及渣系成分

本文所用到的脱氧剂成分见表 1,采用 $w(\text{CaF}_2):w(\text{CaO}):w(\text{Al}_2\text{O}_3)=60:20:20$ 渣系,同时配入 0.5% 的 FeO.

表 1 脱氧剂的成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of deoxidizer
(mass fraction) %

种类	Al	Si	Ca	Ba	Fe
Al	100	0	0	0	0
CaSi	0	52.54	30.13	0	余
CaSiBa	0	56.34	6.48	13.71	余

1.2 熔渣和钢液组元的活度

根据炉渣的分子离子共存理论^[1-2],基于熔渣的高温相图事实可概括为 3 点:即熔渣由简单离子和氧化硅、硅酸盐、铝酸盐等分子组成;简单离子和分子间进行着动态平衡反应;熔渣内部的化学反应服从质量分配定律.查阅了 $\text{CaO}-\text{SiO}_2$, $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{CaF}_2$, $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ 等相图^[3],确定 1 473 ~ 1 973 K 下的结构单元如下.

简单离子: Ca^{2+} , Fe^{2+} , F^- , O^{2-} .

分子化合物: Al_2O_3 , SiO_2 , $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, $12\text{CaO}\cdot7\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot2\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot6\text{Al}_2\text{O}_3$, $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot2\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaF}_2$, $11\text{CaO}\cdot7\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaF}_2$, $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot2\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2\cdot\text{CaF}_2$.

确定熔渣的结构单元后,将炉渣熔体视作理想溶液,单离子和分子间存在着动态平衡反应,其反应常数可根据文献[4-8]得到.根据熔渣的结构单元的质量平衡和反应平衡建立了熔渣的活度模型.

设 $N_1=N_{\text{CaO}}$, $N_2=N_{\text{CaF}_2}$, $N_3=N_{\text{SiO}_2}$, $N_4=N_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, $N_5=N_{\text{FeO}}$, $N_{c1}=N_{\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2}$, $N_{c2}=N_{\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}$, $N_{c3}=N_{2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2}$, $N_{c4}=N_{3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}$, $N_{c5}=N_{12\text{CaO}\cdot7\text{Al}_2\text{O}_3}$, $N_{c6}=N_{\text{CaO}\cdot2\text{Al}_2\text{O}_3}$, $N_{c7}=N_{\text{CaO}\cdot6\text{Al}_2\text{O}_3}$, $N_{c8}=N_{3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot2\text{SiO}_2}$,

$N_{c9}=N_{3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2}$, $N_{c10}=N_{\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}$, $N_{c11}=N_{2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2}$, $N_{c12}=N_{3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2}$, $N_{c13}=N_{\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot2\text{SiO}_2}$, $N_{c14}=N_{2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2}$, $N_{c15}=N_{3\text{CaO}\cdot3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaF}_2}$, $N_{c16}=N_{11\text{CaO}\cdot7\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaF}_2}$, $N_{c17}=N_{3\text{CaO}\cdot2\text{SiO}_2\cdot\text{CaF}_2}$. 其中, N_i ($i=1, 2, \dots, 5, c1, c2, \dots, c17$) 为平衡时熔渣中各组元的作用浓度,即定义为各组元的活度.

根据熔渣各个结构单元的质量平衡,建立了式(1)~式(6):

$$(1/2N_1 + N_{c1} + N_{c2} + 2N_{c3} + 3N_{c4} + 12N_{c5} + N_{c6} + N_{c7} + 3N_{c9} + 3N_{c12} + N_{c13} + 2N_{c14} + 3N_{c15} + 11N_{c16} + 3N_{c17}) \sum n_i = n_{\text{CaO}}^\circ, \quad (1)$$

$$(1/3N_2 + N_{c15} + N_{c16} + N_{c17}) \sum n_i = n_{\text{CaF}_2}^\circ, \quad (2)$$

$$(N_3 + N_{c2} + N_{c4} + 7N_{c5} + 2N_{c6} + 6N_{c7} + 3N_{c8} + N_{c10} + N_{c13} + N_{c14} + 3N_{c15} + 7N_{c16}) \sum n_i = n_{\text{Al}_2\text{O}_3}^\circ, \quad (3)$$

$$(N_4 + N_{c1} + N_{c3} + 2N_{c8} + N_{c9} + N_{c11} + 2N_{c12} + 2N_{c13} + N_{c14} + 2N_{c17}) \sum n_i = n_{\text{SiO}_2}^\circ, \quad (4)$$

$$(0.5N_5 + N_{c10} + 2N_{c11}) \sum n_i = n_{\text{FeO}}^\circ, \quad (5)$$

$$N_1 + N_2 + \dots + N_5 + N_{c1} + N_{c2} + \dots + N_{c17} = \sum N_i = 1. \quad (6)$$

其中: $\sum n_i$ 为平衡时各结构单元总的物质的量; n_{CaO}° , $n_{\text{CaF}_2}^\circ$, $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}^\circ$, $n_{\text{SiO}_2}^\circ$, n_{FeO}° 为反应前 CaO , CaF_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , FeO 的摩尔分数.

钢液组元的活度的计算为

$$a_{[i]} = f_i \times w_{[i]}, \quad (7)$$

式中: $w_{[i]}$ 为金属中组分 i 的质量分数, $a_{[i]}$ 为组分 i 的活度, f_i 为组分 i 的活度系数.考虑到工业纯铁为稀溶液,视为理想溶液,因此在钢液中各物质的活度系数为 1.

1.3 反应平衡常数

在熔渣-金属的多相反应体系中,各个体系间相互发生反应.当脱氧剂铝加入后,金属与熔渣中主要存在反应式(8),相应的反应平衡常数为式(21);当脱氧剂 CaSi 加入后,存在反应式(9)~式(13),分析可得到 3 个独立的反应式(18)~式(20)^[9-11],反应平衡常数为式(21)~式(23);当脱氧剂 CaSiBa 加入后,存在平衡关系式(9)~式(17),由于 Ba 的活泼性很强且渣中不含 BaO,因此假设 Ba 全部参与 FeO 的还原反应,得到 3 个独立的反应式(18)~式(20),反应平衡常数为式(21)~式(23).

$$2[\text{Al}] + 3(\text{FeO}) = (\text{Al}_2\text{O}_3) + 3[\text{Fe}], \quad (8)$$

[Si] + 2(FeO) = (SiO₂) + 2[Fe] , (9)

3[Si] + 2(Al₂O₃) = 3(SiO₂) + 4[Al] (10)

[Ca] + (FeO) = (CaO) + [Fe] , (11)

2[Ca] + (SiO₂) = [Si] + 2(CaO) , (12)

3[Ca] + (Al₂O₃) = 2[Al] + 3(CaO) (13)

[Ba] + (FeO) = (BaO) + [Fe] , (14)

2[Ba] + (SiO₂) = [Si] + 2(BaO) , (15)

3[Ba] + (Al₂O₃) = 2[Al] + 3(BaO) (16)

[Ba] + (CaO) = (BaO) + [Ca] , (17)

2[Al] + 3(FeO) = (Al₂O₃) + 3[Fe] , (18)

lgK_{Al} = $\frac{45\,550}{T}$ - 12.758 = lg $\frac{a_{(Al_2O_3)} \cdot a_{[Fe]}^3}{a_{(FeO)}^3 \cdot a_{[Al]}^2}$,
[Si] + 2(FeO) = (SiO₂) + 2[Fe] ; (19)

lgK_{Si} = $\frac{18\,100}{T}$ - 6.372 = lg $\frac{a_{(SiO_2)} \cdot a_{[Fe]}^2}{a_{(FeO)}^2 \cdot a_{[Si]}}$,
[Ca] + (FeO) = (CaO) + [Fe] ; (20)

lgK_{Ca} = $\frac{32\,909.57}{T}$ - 10.63 = lg $\frac{a_{(CaO)} \cdot a_{[Fe]}}{a_{(FeO)} \cdot a_{[Ca]}}$,
 $K_{Al} = \frac{N_{Al_2O_3}}{N_{FeO}^3 \cdot w_{[Al]}^2 f_{[Al]}^2}$; (21)

$\frac{3w_{(Al_2O_3)_e}}{M_{Al_2O_3}} + \frac{w_{(FeO)_e}}{M_{FeO}} = \frac{3w_{(Al_2O_3)_o}}{M_{Al_2O_3}} + \frac{w_{(FeO)_o}}{M_{FeO}} = \frac{w_O}{M_O}$, (24)

$\frac{w_{[Al]_e}}{M_{Al}} \times m_m + \frac{2w_{(Al_2O_3)_e}}{M_{Al_2O_3}} \times m_s = \frac{Al_{加}}{M_{Al}} + \frac{w_{[Al]_o}}{M_{Al}} \times m_m + \frac{2w_{(Al_2O_3)_o}}{M_{Al_2O_3}} \times m_s = \frac{w_{Al}}{M_{Al}}$, (25)

$\frac{w_{[Si]_e}}{M_{Si}} \times m_m + \frac{w_{(SiO_2)_e}}{M_{SiO_2}} \times m_s = \frac{Si_{加}}{M_{Si}} + \frac{w_{[Si]_o}}{M_{Si}} \times m_m + \frac{w_{(SiO_2)_o}}{M_{SiO_2}} \times m_s = \frac{w_{Si}}{M_{Si}}$, (26)

$\frac{w_{[Ca]_e}}{M_{Ca}} \times m_m + \frac{w_{(CaO)_e}}{M_{CaO}} \times m_s = \frac{Ca_{加}}{M_{Ca}} + \frac{w_{[Ca]_o}}{M_{Ca}} \times m_m + \frac{w_{(CaO)_o}}{M_{CaO}} \times m_s = \frac{w_{Ca}}{M_{Ca}}$, (27)

$\frac{w_{(CaO)_e}}{M_{CaO}} + \frac{2w_{(SiO_2)_e}}{M_{SiO_2}} + \frac{3w_{(Al_2O_3)_e}}{M_{Al_2O_3}} + \frac{w_{(FeO)_e}}{M_{FeO}} = \frac{w_{(CaO)_o}}{M_{CaO}} + \frac{2w_{(SiO_2)_o}}{M_{SiO_2}} + \frac{3w_{(Al_2O_3)_o}}{M_{Al_2O_3}} + \frac{w_{(FeO)_o}}{M_{FeO}} = \frac{w_O}{M_O}$, (28)

$\frac{w_{(CaO)_e}}{M_{CaO}} + \frac{2w_{(SiO_2)_e}}{M_{SiO_2}} + \frac{3w_{(Al_2O_3)_e}}{M_{Al_2O_3}} + \frac{w_{(FeO)_e}}{M_{FeO}} = \frac{w_{(CaO)_o}}{M_{CaO}} + \frac{2w_{(SiO_2)_o}}{M_{SiO_2}} + \frac{3w_{(Al_2O_3)_o}}{M_{Al_2O_3}} + \frac{w_{(FeO)_o}}{M_{FeO}} - \frac{Ba_{加}}{M_{Ba}} \times \frac{m_m}{m_s} = \frac{w_O}{M_O}$ (29)

$n_i^o = \frac{w_{(i)_e}}{M_i \sum n_i^o}$. (30)

式中 $w_{(i)_e}$ ($i = Si, Al, Ca$) , $w_{(j)_o}$ ($j = SiO_2, Al_2O_3, FeO$) 分别为金属和熔渣中各组元的初始质量分数 ; $w_{Ca}, w_{Si}, w_{Al}, w_O$ 分别为钢液和熔渣中 Ca , Si , Al 和 O 的总(原子)质量 ; $w_{(i)_e}, n_i^o$ ($i = CaO, CaF_2, Al_2O_3, SiO_2, FeO$) 分别为平衡时各个物质的质量分数和摩尔分数.

2 实验与热力学分析

2.1 实验室下的热态模拟实验

本实验在二硅化钼电阻炉内进行. 选择 500 g

$K_{Si} = \frac{N_{SiO_2}}{N_{FeO}^2 \cdot w_{[Si]} f_{[Si]}}$; (22)

$K_{Ca} = \frac{N_{CaO}}{N_{FeO} \cdot w_{[Ca]} f_{[Ca]}}$. (23)

1.4 平衡质量分数

在采用铝脱氧时 , 根据物质守恒得到平衡质量分数关系式(24) ~ 式(25) ; 在采用 CaSi 脱氧时 , 得到平衡质量分数关系式(25) ~ 式(28) ; 在采用 CaSiBa 脱氧下 , 得到平衡质量关系式(25) ~ 式(27) 、式(29) . 各物质的摩尔分数的求解见式(30) , 将 n_i^o 代入到式(1) ~ 式(6) , 应用 Matlab 求解方程组式(1) ~ 式(6) 、式(21) 、式(24) ~ 式(25) 即可得到 Al 脱氧时的各物质 ($w_{[Al]_e}, w_{(Al_2O_3)_e}, w_{(FeO)_e}$) 的平衡质量分数 ; 求解方程组式(1) ~ 式(6) 、式(21) ~ 式(23) 、式(25) ~ 式(28) 即可得到 CaSi 脱氧时各物质 ($w_{[Al]_e}, w_{[Si]_e}, w_{[Ca]_e}, w_{(Al_2O_3)_e}, w_{(SiO_2)_e}, w_{(CaO)_e}, w_{(FeO)_e}$) 的平衡质量分数 ; 求解方程组式(1) ~ 式(6) 、式(21) ~ 式(23) 、式(25) ~ 式(27) 、式(29) 即可得到 CaSiBa 脱氧时各物质 ($w_{[Al]_e}, w_{[Si]_e}, w_{[Ca]_e}, w_{(Al_2O_3)_e}, w_{(SiO_2)_e}, w_{(CaO)_e}, w_{(FeO)_e}$) 的平衡质量分数.

工业纯铁为目标钢种 , Al , CaSi , CaSiBa 脱氧剂为研究对象 , 各个脱氧剂总用量为 1 g , 分 5 次加入 , 具体步骤如下 :

1) 将质量为 500 g 的工业纯铁放入坩锅中 , 通电升温 , 整个过程通氩气保护 ;

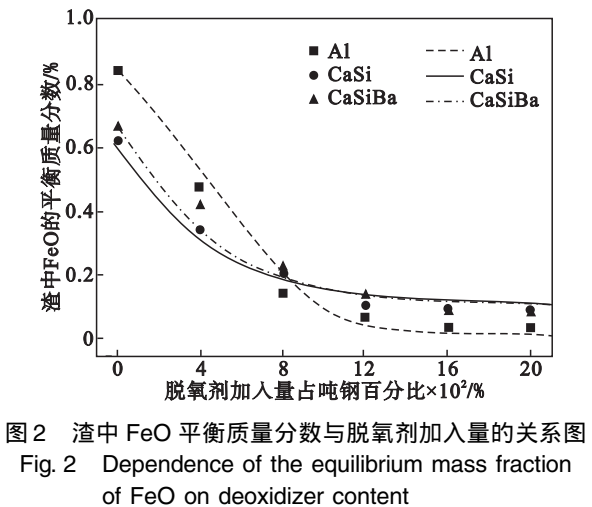
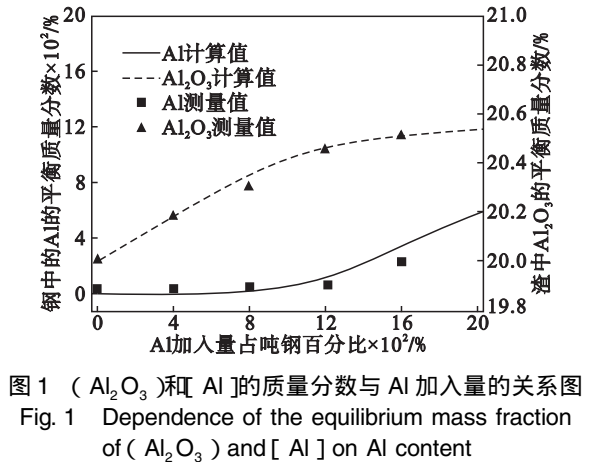
2) 通电升温至 1 550 ℃ 后取空白 0[#] 钢样 , 随后加入质量为 150 g 的由化学试剂配制好的渣料 ;

3) 待渣熔清 10 min 后取 1[#] 钢样 , 同时捞取渣样 S1 . 取完 1 号样后加入脱氧剂 0.2 g , 4 min 后取样 2[#] 和 S2 ; 取完 2 号样后加入脱氧剂 0.2 g , 4 min 后取 3[#] 和 S3 ; 相应的 , 有 4[#] 和 S4 , 5[#] 和 S5 , 6[#] 和 S6 ;

4) 对所取样品进行化学成分分析。

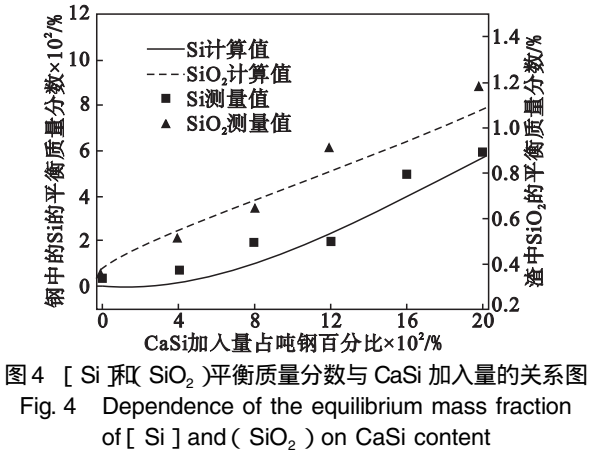
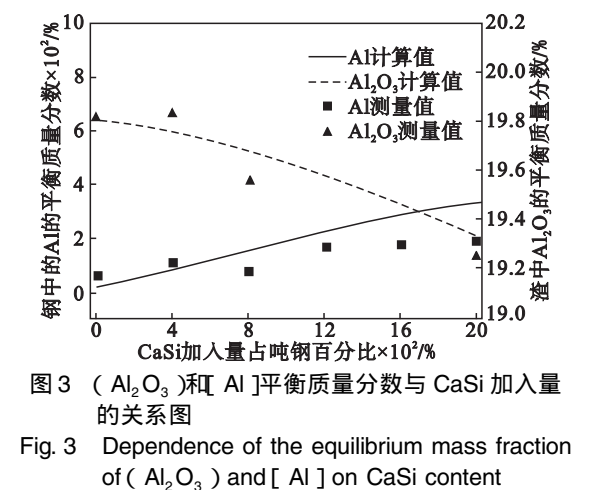
2.2 铝脱氧剂的热力学分析

图 1 和图 2 为本文脱氧热力学计算模型与实验测得的(FeO)(Al₂O₃)和[Al]质量分数的对比图 ,计算值与实验值符合良好。当渣中 FeO 质量分数较高时 ,加入脱氧剂后 ,根据反应式(18) ,大量 FeO 被还原 ,渣中氧势大大降低 ,脱氧剂 Al 大部分被氧化进入渣中 ,导致渣中的 Al₂O₃ 大量增加 ,而钢中[Al]的质量分数还维持在较低水平 ;当脱氧剂加入到吨钢 0. 16% 时 ,渣中的 FeO 质量分数达到极限值 0. 04% ,此时钢液大量增铝。



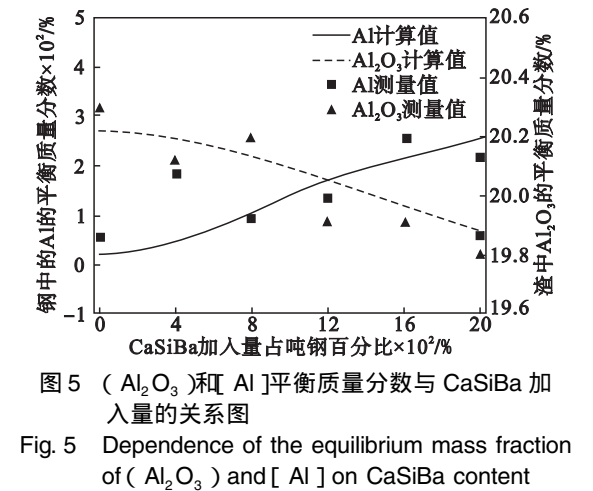
2.3 CaSi 脱氧剂的热力学分析

图 2 ~ 图 4 为本文脱氧热力学计算模型与实验测得的(FeO)(Al₂O₃)(SiO₂)和[Al][Si]质量分数的对比图 ,计算值与实验值吻合较好。当渣中 FeO 质量分数较高时 ,加入 CaSi 后 ,在渣中分解成 Ca 和 Si ,由于 Ca 非常活泼 ,几乎全部用于还原反应。Si 一部分在加入过程中被氧化 ,一部分用于还原 FeO ,一部分用于还原少量的 Al₂O₃ ,使得渣中氧势逐渐降低 ,钢中出现增铝现象 ,最终渣中 FeO 降低到极限值 0. 08% 。



2.4 CaSiBa 脱氧剂的热力学分析

图 2 ,图 5 ~ 图 6 为本文脱氧热力学计算模型与实验测得的(FeO)(Al₂O₃)(SiO₂)和[Al] , [Si]质量分数的对比图 ,计算值与实验值吻合良好。当渣中 FeO 质量分数较高时 ,加入 CaSiBa 后 ,在渣中分解成 Ba ,Ca 和 Si ,由于 Ba ,Ca 非常活泼 ,几乎全部用于还原反应。Si 一部分在加入过程中被氧化 ,一部分用于还原 FeO ,一部分用于还原少量的 Al₂O₃ ,使得渣中氧势逐渐降低 ,钢中出现增铝现象 ,最终渣中 FeO 降低到极限值 0. 08% 。



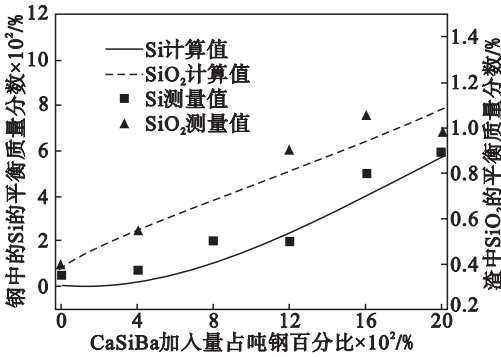


图 6 [Si]和(SiO₂)平衡质量分数与 CaSiBa 加入量的关系图

Fig. 6 Dependence of the equilibrium mass fraction of [Si] and (SiO₂) on CaSiBa content

2. 5 不同脱氧剂对渣中氧势的控制

将采用 Al ,CaSi ,CaSiBa 进行的脱氧实验下测得的 FeO 的质量分数进行作图分析 ,如图 2 所示. 在脱氧剂吨钢加入量相同的情况下 ,铝的脱氧速率最快 ,且使得渣中 FeO 的质量分数达到最低水平 ,为 0. 04% . 而 CaSi ,CaSiBa 二者对渣中的氧势能力控制基本相当 ,为 0. 08% .

3 结 论

1) 基于炉渣分子离子共存理论进行的如 Al ,CaSi ,CaSiBa 多种脱氧剂的脱氧热力学研究能够良好地符合实验结果 ,说明本脱氧热力学模型较为准确 ,能够对电渣重熔中脱氧剂的选择与应用进行指导.

2) Al 脱氧时渣中 FeO 的质量分数降低到极限值 0. 04% ,CaSi ,CaSiBa 脱氧剂时渣中 FeO 降低到 0. 08% ,在不考虑夹杂物类型时 ,铝脱氧可以使得熔渣中氧势降到最低.

3) 采用铝脱氧时 ,渣相中的 Al₂O₃ 由于脱氧而增加的量相对于原始含量变化幅度很小 ,对于

大型电渣锭的长时间重熔而言 ,与 CaSi ,CaSiBa 相比具有渣系稳定 ,氧势控制能力良好等优点.

参考文献 :

[1] Guo P M ,Li Z B ,Liu G W. Activity model and its application in CaO-FeO-SiO₂-MoO₃ quaternary system[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing* , 2004 ,11(5) :406 - 410.

[2] Shi C B ,Yang X M ,Jiao J S. A sulphide capacity prediction model of CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ ironmaking slags based on the ion and molecule coexistence theory [J]. *ISIJ International* 2010 ,50(10) :1362 - 1372.

[3] Chen J X. Handbook of common figures ,tables and data for steelmaking[M]. 2nd ed. Beijing :Metallurgical Industry Press 2010.

[4] Yang X M ,Shi C B. A thermodynamic model for prediction of iron oxide activity in some FeO-containing slag systems [J]. *Steel Research International* 2012 ,83(3) :244 - 257.

[5] Turkdogan E T. Physical chemistry of high temperature technology[M]. New York :Academic Press Inc ,1980 :8 - 12.

[6] Liu Z Z ,Wu W ,Guo X L. SiO₂-TiO₂-CaO- MgO-FeO-MnO slag system and thermodynamic model of Ti-Si equilibrium in titanium removing process[J]. *Iron and Steel* ,2013 ,48(6) :35 - 49.

[7] Barin J. Thermochemical data of pure substances [M]. Germany :Wiley-vch Verlag Gmbh Press ,1995 :1012 - 1233.

[8] Barin J. Knacke O ,Kubaschewski O. Thermochemical properties of inorganic substances[M]. New York :Springer Verlag Press ,1977 :392 - 445.

[9] Deng Z Y ,Zhu M Y. Evolution mechanism of non-metallic inclusions in Al-killed alloyed steel during secondary refining process[J]. *ISIJ International* 2013 ,53(3) :450 - 458.

[10] Suzuki K ,Ban Y S ,Hino M. Deoxidation equilibrium of chromium stainless steel with Si at the temperatures from 1823 to 1923 K[J]. *ISIJ International* ,2001 ,41(8) :813 - 817.

[11] Suzuki K ,Ban-ya S ,Hino M. Deoxidation equilibrium of Cr-Ni stainless steel with Si at the temperatures from 1823 to 1923 K[J]. *ISIJ International* 2002 ,42(2) :146 - 149.