



## Melting temperature and viscosity characteristic of dephosphorization slag contained $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-B}_2\text{O}_3\text{-MnO}$

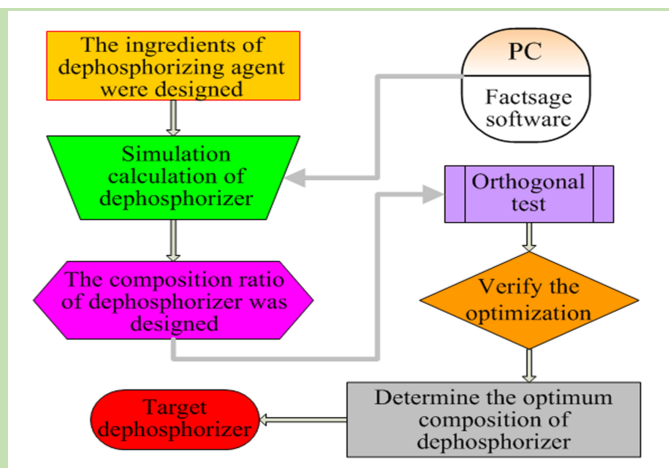
Shuangping YANG\*, Qishu WEI, Chen WANG, Bo YANG, Jinkun PANG

College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

**Abstract:** In order to reduce the melting temperature and viscosity of dephosphorized slag, many metallurgical workers added  $\text{CaF}_2$  as the melting agent, but fluorine ion was very harmful to the environment, and it eroded the lining of the furnace, and dephosphorized slag was difficult to be reused. Therefore, for the sake of solving the above problems, it was necessary to explore a new fluorine-free or low-fluorine dephosphorizer. Boron element were beneficial to the plant, the choice of  $\text{B}_2\text{O}_3$  dephosphorization slag flux, the better preparation of

fertilizer by the dephosphorization slag. Boron resources were rich in our country, therefore, in the hot metal dephosphorization,  $\text{B}_2\text{O}_3$  can displace  $\text{CaF}_2$ . In order to systematically study the melting temperature and the comprehensive effect of viscosity characteristics of iron water pre-melting dephosphorized slag, the melting temperature and viscosity of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-B}_2\text{O}_3\text{-MnO}$  pre-melting dephosphorization slag of type of fluorine-free were calculated and the influence law of alkalinity and composition ratio on melting temperature and viscosity of dephosphorization slag seeking reasonable dephosphorization slag into distribution ratio and control interval, suitable bath temperature were investigated by using FactSage simulation software and the modified Einstein-Roscoe formula. The alkalinity and composition ratio was optimized by orthogonal analysis, variance analysis and main effect analysis. The results showed that the viscosity of the slag decreased with the increase of alkalinity, FeO content and flux content. At  $1400^\circ\text{C}$ , the optimum ratio were alkalinity of 4.0, the content of  $\text{B}_2\text{O}_3$  9%, MnO of 10%, FeO of 45%. By calculation, the melting temperature was  $1195.51^\circ\text{C}$  and the viscosity was  $0.207\text{ Pa}\cdot\text{s}$ . By the experimental verification, the measured melting temperature was  $1192.21^\circ\text{C}$ , the viscosity was  $0.199\text{ Pa}\cdot\text{s}$ . After comparison, the calculated date was similar to the measured data. It was known that the orthogonal method had its rationality and accuracy in the actual production process. Based on the analysis results, the optimal combination of slag components was selected to provide theoretical basis and data support for the dephosphorization production of steelmaking.

**Key words:** FactSage software; dephosphorization slag; melting temperature; viscosity; orthogonal method



收稿: 2017-11-09, 修回: 2018-03-11, 网络发表: 2018-08-20, Received: 2017-11-09, Revised: 2018-03-11, Published online: 2018-08-20  
作者简介: 杨双平(1967-), 男, 陕西省富平县人, 博士, 教授, 主要从事高炉炼铁、冶金节能与环保及冶金过程优化研究, E-mail: yang\_sping@163.com.

**引用格式:** 杨双平, 魏起书, 王琛, 等.  $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-B}_2\text{O}_3\text{-MnO}$  脱磷渣熔化温度和粘度特性. 过程工程学报, 2018, 18(5): 1013-1019.  
Yang S P, Wei Q S, Wang C, et al. Melting temperature and viscosity characteristic of the dephosphorization slag contained  $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-B}_2\text{O}_3\text{-MnO}$  (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(5): 1013-1019, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217385.

# CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO 脱磷渣熔化温度和粘度特性

杨双平\*, 魏起书, 王琛, 杨波, 庞锦琨

西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055

**摘要:** 采用 FactSage 模拟软件和修正后的 Einstein-Roscoe 公式计算了无氟型 CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO 预熔脱磷渣的熔化温度和粘度, 考察了碱度和各成分分配比对脱磷渣熔化温度和粘度的影响, 得到合理的脱磷渣成分分配比及控制区间和适宜的熔池温度, 采用正交法进行了实验验证, 通过直观分析、方差分析和主效应分析优选出最佳配比. 结果表明, 该渣系粘度随碱度、FeO 含量和助熔剂含量提高而降低, 1400℃时最佳配比为碱度  $R=4.0$ , B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 9wt%, MnO 含量 10wt%, FeO 含量 45wt%. 计算的熔化温度为 1195.51℃, 粘度为 0.207 Pa·s, 实验所测熔化温度为 1192.21℃, 粘度为 0.199 Pa·s, 计算值与实测值相近, 表明正交法优选方案可靠.

**关键词:** FactSage 软件; 脱磷渣; 熔化温度; 粘度; 正交法

**中图分类号:** TF704.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2018)05-1013-07

## 1 前言

高磷铁矿是冶金生产的重要原料. 钢材中的有害元素磷易在晶界偏析, 发生冷脆现象, 冶炼低磷洁净钢的关键问题是铁水中 P 含量较高<sup>[1]</sup>. 铁水预处理脱磷剂以 CaO 系为主, 为降低炉渣的熔化温度和粘度, 加入 CaF<sub>2</sub> 作为助熔剂. 氟离子对环境危害极大, 且侵蚀炉衬, 脱磷渣难以再利用<sup>[2]</sup>. 解决以上问题必须开发新的无氟或低氟脱磷剂. 赵晓辉等<sup>[3]</sup>研究了含氟渣系成分对熔化温度的影响, 表明 CaF<sub>2</sub> 含量为 10wt%~70wt%时, 各组分相互作用对精炼渣熔化温度有显著影响, 但 CaF<sub>2</sub> 含量过高. 杨福等<sup>[4]</sup>研究了助熔剂种类与配比对脱磷渣熔点的影响, 测定了脱磷渣在不同温度下的粘度, 得出 CaF<sub>2</sub>/CaO 质量比为 0.50 时最佳, 以 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为助熔剂, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO 的质量比为 0.16 时助熔效果明显.

熔化温度低的脱磷渣粘度不一定低, 流动性不一定好, 结合熔化温度与粘度进行研究具有重要意义. 硼元素对植物有益, 以 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作脱磷渣的助熔剂, 进行铁水脱磷时, 可用 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 代替 CaF<sub>2</sub>. 本工作基于 FactSage 热力学模拟软件<sup>[5]</sup>, 采用正交法<sup>[6]</sup>对无氟型 CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO 预熔脱磷渣的熔化温度和粘度进行研究, 计算预熔脱磷渣的熔化温度和粘度, 考察了碱度和各成分分配比对脱磷渣熔化温度和粘度的影响, 得到合理的脱磷剂成分分配比及控制区间和适宜的熔池温度, 采用正交法进行实验, 优选出最优渣系成分, 为炼钢脱磷生产工艺提供理论指导.

## 2 FactSage 模拟计算

### 2.1 FactSage 模拟及粘度计算方法

采用 FactSage 模拟软件的 Equilib (选择 FToxide 数

据库)<sup>[8]</sup>和 Viscosity 模块<sup>[9]</sup>分别计算预熔渣的熔化温度和粘度. 渣系液相线温度低于指定温度时, 使用 Viscosity 模块计算; 高于指定温度时先用 Viscosity 模块计算析出渣的粘度, 再通过修正后的 Einstein-Roscoe 公式进行粘度的估算校正<sup>[10,11]</sup>. Einstein-Roscoe 公式<sup>[12,13]</sup>为

$$\eta = \eta_0(1 - \alpha f)^{-n},$$

其中,  $\eta$  为包含固相颗粒的液态渣粘度,  $\eta_0$  为不包含固相颗粒的液态渣粘度,  $f$  为固相颗粒在炉渣中的含量,  $\alpha$  为形态修正项,  $n$  为与颗粒形状及可变形性有关的常数, Einstein 模型中颗粒为硬球形,  $n=2.5$ .

由于  $f$  及  $\alpha$  的数据欠缺, 用固相质量分数( $\omega$ )代替原型式中的  $\alpha f$ , 修正后的 Einstein-Roscoe 公式为

$$\eta = \eta_0(1 - \omega)^{-2.5}.$$

铁水预熔脱磷渣的成分见表 1.

表 1 预熔脱磷渣的成分

Table 1 The composition of premelting dephosphor slag					
Component	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
Content/wt%	20~60	10~30	20~60	0~14	0~15

### 2.2 碱度对预熔脱磷渣熔点和粘度的影响

由 FactSage 软件计算得  $\omega_{\text{FeO}}=30\%$ ,  $\omega_{\text{MnO}}=8\%$  和  $\omega_{\text{B}_2\text{O}_3}=6\%$  时碱度对预熔脱磷渣熔化温度与粘度的影响如图 1 所示. 由图可知, 随碱度提高, 预熔渣的熔化温度升高, 而粘度持续降低, 温度越高, 粘度越低. 根据炉渣离子结构理论<sup>[14]</sup>, Si 和 O 复合负离子的结构形态决定了渣的粘度. 渣中的碱性氧化物可释放出 O<sup>2-</sup> 而酸性氧化物会与 O<sup>2-</sup> 结合, 渣中氧与硅的比值不同, 形成了结构形态不同的硅氧复合负离子, 其聚合度越多越繁杂, 渣的粘度越大. 若炉渣中增加碱性氧化物(如 CaO 和 MnO 等), O/Si 增大, 待复杂结构开始裂解和

反应, 渣粘度随之降低. 碱度为 5.5 以上时, 粘度趋于稳定; 如碱度过高, 粘度可能升高, 原因是渣量变大, 在脱磷温度下出现高熔点或不熔的固相物. 铁水脱磷

时较适宜的碱度范围为 2.5~5.5. 脱磷反应为放热反应, 温度过高会造成回磷现象, 降低脱磷率, 温度应控制在约 1400℃.

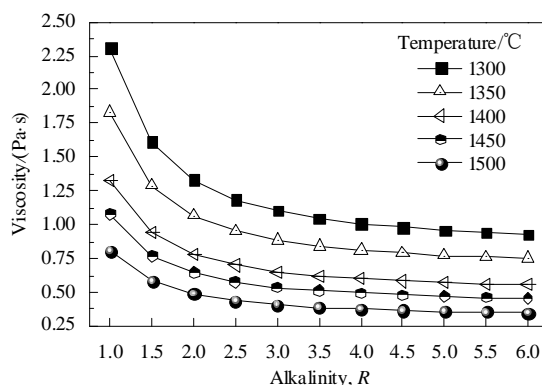
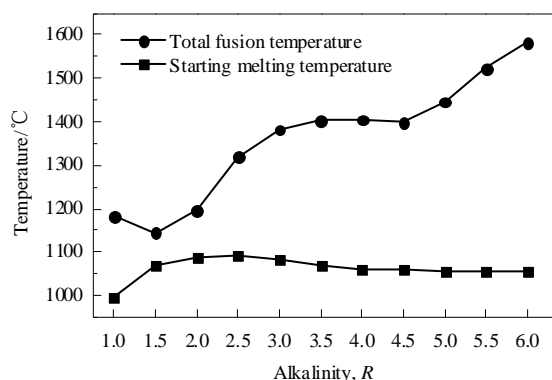


图1 碱度对预熔脱磷渣熔化温度与粘度的影响

Fig.1 Influence of alkalinity on the melting temperature and viscosity of premelt dephosphorization slag

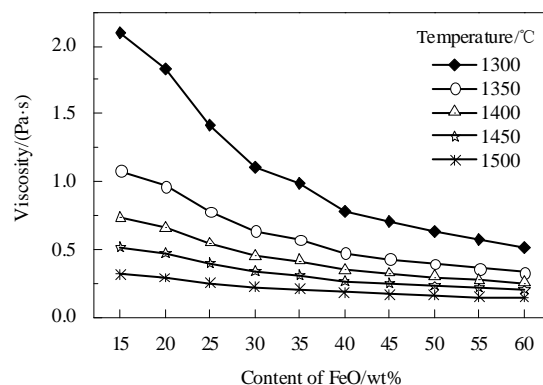
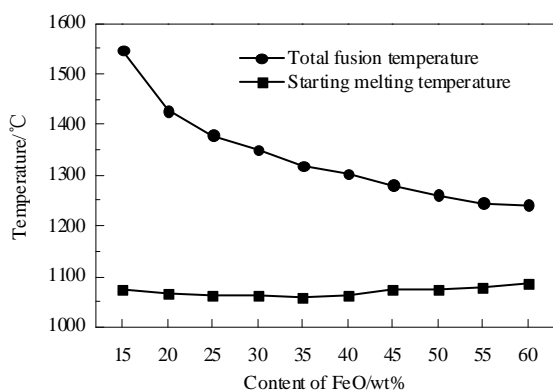


图2 FeO 含量对脱磷渣熔化温度与粘度的影响

Fig.2 Influence of FeO content on the melting temperature and viscosity of dephosphorization slag

### 2.3 FeO 含量对预熔脱磷渣熔点和粘度的影响

$R=4$ ,  $\omega_{\text{MnO}}=8\%$  和  $\omega_{\text{B}_2\text{O}_3}=6\%$  时 FeO 含量对脱磷渣熔化温度与粘度的影响如图 2 所示. 由图可知, 随 FeO 含量增加, 熔化温度和粘度值降低, 降低速率先快后慢. 渣中含足够多的 FeO, 可向钢水中输送氧, 渣中自由氧离子增多, 使添加的固体石灰快速溶进渣中, 降低了渣的熔化温度, 达到快速化渣的效果, 降低了渣的粘性, 渣的流动性变好, 能进一步提高预熔渣的脱磷能力. 但 FeO 含量过高会导致脱磷剂熔点升高, 渣变稠, 严重侵蚀炉衬, 降低冶炼炉的使用寿命. 铁水脱磷时, 较适宜的 FeO 含量为 25wt%~55wt%.

### 2.4 $\text{B}_2\text{O}_3$ 含量对预熔脱磷渣熔点和粘度的影响

$R=4$ ,  $\omega_{\text{FeO}}=30\%$ ,  $\omega_{\text{MnO}}=8\%$  时  $\text{B}_2\text{O}_3$  含量对脱磷渣熔化温度与粘度的影响如图 3 所示. 由图可知, 增加  $\text{B}_2\text{O}_3$  含量, 预熔渣的熔化温度下降, 且影响较大. 这是由于

渣中  $\text{B}_2\text{O}_3$  优先与 CaO 反应, 生成低熔点的  $n\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  后与 CaO 反应, 破坏了包围石灰的致密外壳, 有利于石灰熔解<sup>[15,16]</sup>, 外壳致密且高熔点 ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  2130℃,  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  1900℃). 低温段随  $\text{B}_2\text{O}_3$  含量增加, 预熔渣粘度明显下降, 而高温段粘度下降较缓慢. 预熔渣熔化温度下降, 粘度也下降, 均匀性预熔渣的粘度服从牛顿黏滞液体<sup>[17]</sup>的规律. 温度逐渐升高, 熔点低的相优先裂解, 渣粘度下降. 铁水脱磷时, 较适宜的  $\text{B}_2\text{O}_3$  含量为 5wt%~11wt%.

### 2.5 MnO 含量对预熔脱磷渣熔点和粘度的影响

$R=4$ ,  $\omega_{\text{B}_2\text{O}_3}=6\%$  和  $\omega_{\text{FeO}}=30\%$  时 MnO 含量对脱磷渣熔化温度与粘度的影响如图 4 所示. 由图可知, 随 MnO 含量升高, 完全熔化温度下降, 含量 14% 时熔化温度最低, 含量 14% 以上熔化温度反而上升; 随 MnO 含量提高, 粘度缓慢下降. 增大渣中 MnO 含量, MnO 的活度

变大, 渣的粘度变低, 渣中组分有良好的扩散性, 反应动力学条件变优<sup>[18]</sup>. MnO 含量过高会造成碱度下降, 抵消氧化能力增强的效果, 可能导致熔点上升, 应严格控制其含量<sup>[19]</sup>. 在吹炼初期, 石灰先生成  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Mn}^{2+}$  代替了原硅酸盐类中的  $\text{Ca}^{2+}$ , 初期渣发生相变,

即增加 MnO 含量可促使炉渣向石灰气孔内渗透. 适量的 MnO 可降低炉渣熔点, 改善炉渣流动性, 促进石灰熔解, 有利于脱磷. 铁水脱磷时 MnO 含量为 6wt%~15wt% 较合适.

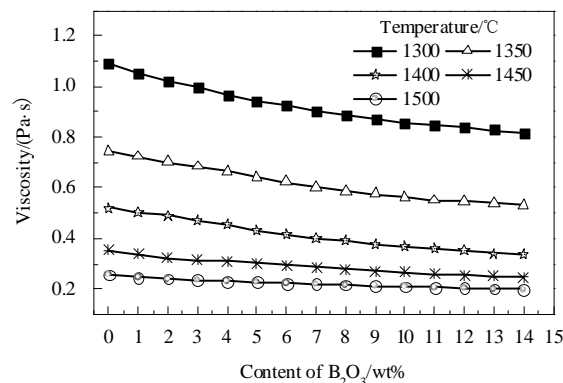
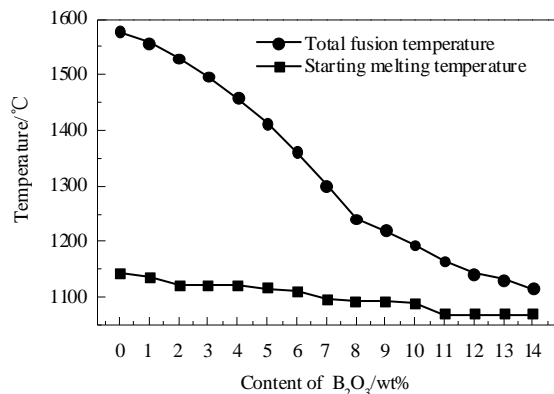


图3  $\text{B}_2\text{O}_3$  含量对脱磷渣熔化温度与粘度的影响

Fig.3 Influence of  $\text{B}_2\text{O}_3$  content on melting temperature and viscosity of dephosphorization slag

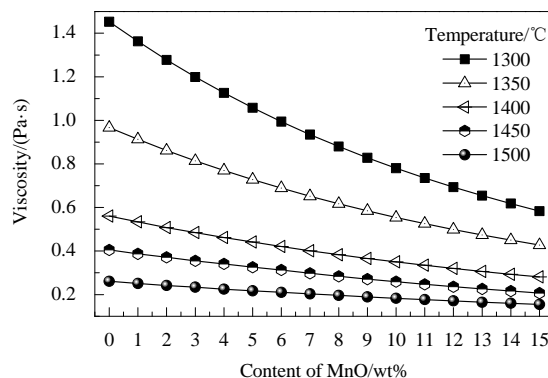
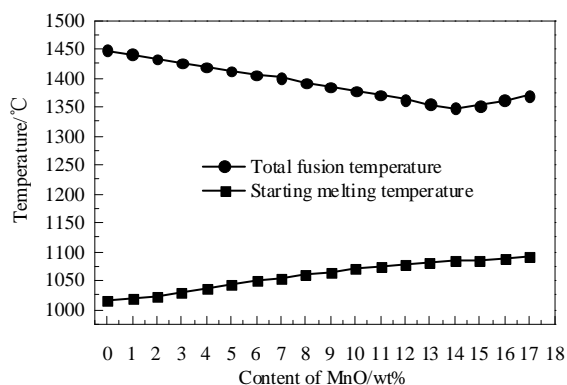


图4 MnO 含量对脱磷渣熔化温度与粘度的影响

Fig.4 Influence of MnO content on melting temperature and viscosity of dephosphorization slag

### 3 正交法实验方案

#### 3.1 实验原料及成分配比

根据 FactSage 模拟软件计算的单因素影响范围进行正交实验.  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  和  $\text{MnO}$  均为分析纯(天津市福晨化学试剂厂), 按  $\text{FeO}$  量换算为需要加入的草酸亚铁( $\text{C}_2\text{FeO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )量<sup>[19-21]</sup>,  $\text{B}_2\text{O}_3$  和  $\text{MnO}$  为助熔剂.

表2 实验因素和水平

Table 2 Experiment factors and levels

Level	Factor			
	$\text{FeO}/\text{wt}\%$	$\text{B}_2\text{O}_3/\text{wt}\%$	$\text{MnO}/\text{wt}\%$	Alkalinity, $R$
1	25	5	6	2.5
2	35	7	9	3.5
3	45	9	12	4.5
4	55	11	15	5.5

采用 4 因素 4 水平正交法进行实验(表 2), 优化实验条件, 探索适宜的脱磷渣温度, 确定最佳实验温度、碱度及预熔渣成分配比.

#### 3.2 实验方法

用 RTW-10 型熔体物性综合测定仪(鞍山科翔仪器仪表有限公司)采用旋转法测定预熔渣粘度. 用 MDLQ-RD-1600 型高温物性测试仪(湘潭乐星仪器科技有限公司)采用试样变形法测定预熔渣熔点. 渣熔化使用白金坩埚, 规格为 70 mm×50 mm×100 mm.

测定粘度的步骤为: 将试剂混匀后倒进坩埚中, 待高温炉中心温度达到 1540°C 后恒温 20 min, 用刚玉棒搅拌改善动力学, 使渣熔化充分, 成分均匀. 将测定仪旋转头插进熔化的渣液中并转动, 以 2°C/min 的速度降温, 直至脱磷渣粘度增大到 2.00 Pa·s 以上. 待渣样完全熔化,

以 5 ℃/min 的速度降温, 每隔 10 ℃恒温 5 min, 待渣温度及成分均匀后记录该温度下渣的粘度, 直至粘度过低无法继续测量为止.

测定熔化温度的步骤为: 取适量渣样破碎至粒径约 0.070 mm 后置于蒸发皿中, 加入适量糊精水溶液均匀研混, 制成  $\varnothing 3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$  的圆柱体试样并烘干. 用高温物性测试仪自动检测, 记录起始温度及变形至原高度 75% 时的熔化开始温度、50% 时的半球点温度和 25% 时的流动温度, 全程采用高纯氩气保护.

4 结果与讨论

4.1 正交实验及结果

共进行 16 组实验, 铁水预熔脱磷渣粘度与完全熔化温度见表 3.

4.2 方差分析与直观分析

根据表 3 的实验结果进行方差分析和直观分析, 方差分析结果见表 4.

表 3 正交实验设计及结果分析  
Table 3 Orthogonal experiment design and result analysis

Sample Number	Factor				Temperature, E/℃	Viscosity/Pa·s	Melting temperature/℃
	FeO, A/wt%	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B/wt%	MnO, C/wt%	Alkalinity, D			
1	25	5	6	2.5	1360	0.872	1452.04
2	25	7	9	2.5	1380	0.604	1269.45
3	25	9	12	4.5	1400	0.381	1314.18
4	25	11	15	5.5	1420	0.286	1260.31
5	35	5	9	4.5	1420	0.256	1376.84
6	35	7	6	5.5	1400	0.327	1358.82
7	35	9	15	2.5	1380	0.296	1185.1
8	35	11	12	3.5	1360	0.356	1157.38
9	45	5	12	5.5	1380	0.198	1297.65
10	45	7	15	4.5	1360	0.205	1276.74
11	45	9	6	3.5	1420	0.221	1164.91
12	45	11	9	2.5	1400	0.244	1160.34
13	55	5	15	3.5	1400	0.123	1302.32
14	55	7	12	2.5	1420	0.139	1240.17
15	55	9	9	5.5	1360	0.194	1215.02
16	55	11	6	4.5	1380	0.207	1178.68
Melting temperature	$K_1$	1323.995	1357.213	1288.612	1259.412	—	—
	$K_2$	1269.535	1286.295	1255.412	1223.515	—	—
	$K_3$	1224.910	1219.802	1252.345	1286.610	—	—
	$K_4$	1234.047	1189.178	1256.117	1282.950	—	—
	$r_r$	99.085	168.035	36.267	63.095	—	—
Viscosity	$K_A$	0.536	0.362	0.407	0.388	0.407	—
	$K_B$	0.309	0.319	0.325	0.326	0.326	—
	$K_C$	0.217	0.273	0.269	0.262	0.269	—
	$K_D$	0.166	0.273	0.227	0.251	0.226	—
	$r_n$	0.370	0.089	0.180	0.137	0.181	—

Note:  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  and  $K_4$  indicate the mean of the total melting temperature corresponding to each horizontal number;  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_C$  and  $K_D$  mean the mean value of the viscosity corresponding to each horizontal number;  $r$  stands for the worst of the list,  $r=\max\{K_i, K_j, K_k, K_l\}-\min\{K_i, K_j, K_k, K_l\}$ .

表 4 方差分析  
Table 4 Analysis of variance

Factor	DevSq		Degree of freedom		F ratio		F critical value		Significance
	Melting temperature	Viscosity	Melting temperature	Viscosity	Melting temperature	Viscosity	Melting temperature	Viscosity	
FeO	24208.529	0.322	3	3	0.924	2.993	3.490	3.290	—
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	66937.513	0.022	3	3	2.556	0.204	3.490	3.290	—
MnO	3497.635	0.072	3	3	0.134	0.669	3.490	3.290	—
Alkalinity	10109.242	0.048	3	3	0.386	0.446	3.490	3.290	—
Temperature	—	0.074	—	3	—	0.688	—	3.290	—
Deviation	104752.92	0.54	12	15	—	—	—	—	—

Note:  $F(3,3)_{0.05}=9.28$ .

由表 3 和 4 可知, 各因子对铁水预熔脱磷渣的熔化温度和粘度均有影响. 熔化温度最低各因子最佳值为  $\omega_{\text{FeO}}=\text{A}_3$ ,  $\omega_{\text{B}_2\text{O}_3}=\text{B}_4$ ,  $\omega_{\text{MnO}}=\text{C}_3$ ,  $R=\text{D}_2$ , 由极差值可知各因素对熔化温度的影响为  $\omega_{\text{MnO}}>R>\omega_{\text{FeO}}>\omega_{\text{B}_2\text{O}_3}$ . 各因子

对粘度的影响均不显著, 原因是通过理论计算的较优渣系的温度范围较窄, 温度约 1400 ℃, 粘度几乎在 0.5 Pa·s 以下, 氧化剂与助熔剂含量和碱度越大, 温度越高, 均有利于降低粘度. 由各因素极差值和平方和可知各因素

对粘度的影响为 $\omega_{B_2O_3} > R > \omega_{MnO} > T > \omega_{FeO}$ .

### 4.3 主效应分析

按各因素各水平的平均值作为预熔脱磷渣的主效应,完全熔化温度和粘度的主效应分析图见图5和6.由图可知,FeO含量对熔化温度和粘度影响很大,FeO含量越高熔化温度越低,含量45wt%时熔化温度最低.但粘度随FeO含量增加先快速减小再缓慢减小,且有继续降低的趋势,综合考虑,取FeO含量为40wt%~50wt%. $B_2O_3$ 含量为5wt%~9wt%时对预熔渣熔化温度及粘度影响较大,9wt%~12wt%时影响较小,含量为9wt%时熔化

温度和粘度都最低,8wt%~10wt%时较适宜.碱度为2.5~4.5时熔化温度波动大,粘度持续降低,碱度为4.5~5.5时二者均较平稳,碱度高则熔化温度高,碱度低则粘度低,碱度为3.5~4.5较适宜.MnO含量为6wt%~12wt%时渣的熔化温度下降,含量为12wt%~14wt%时熔化温度上升,而粘度持续下降,含量为9wt%~12wt%时较适宜.温度越高,预熔渣的粘度越低,但由于脱磷反应为放热反应,温度取1380~1400℃.

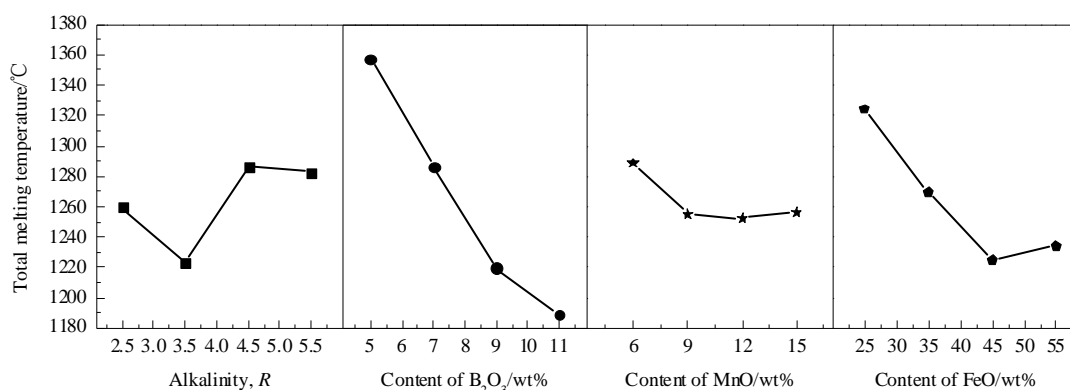


图5 完全熔化温度的主效应分析

Fig.5 Analysis of major effect of total melting temperature

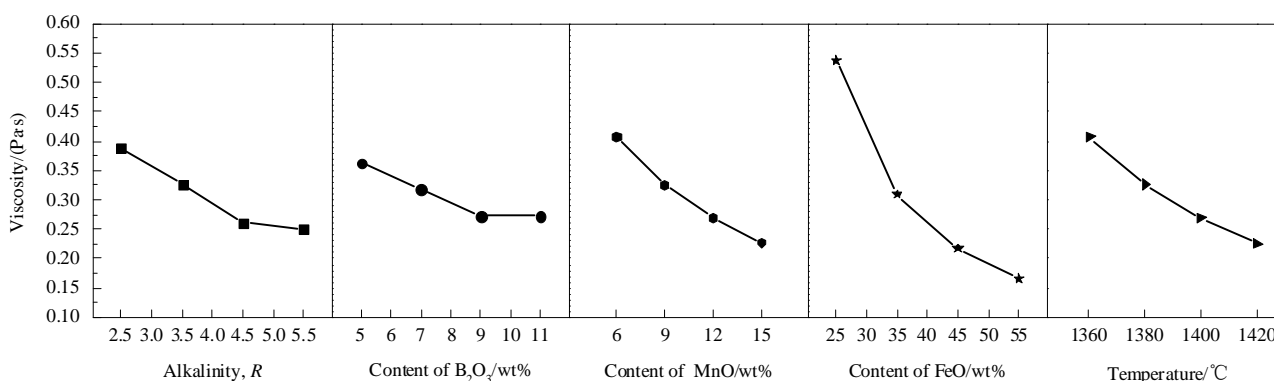


图6 粘度的主效应分析

Fig.6 Analysis of major effect of viscosity

综上可得低熔化温度及低粘度的最优条件为 $R=4.0$ ,  $\omega_{B_2O_3}=9\%$ ,  $\omega_{MnO}=10\%$ 和 $\omega_{FeO}=45\%$ . 计算可得脱磷渣熔化温度为1195.51℃, 粘度为0.207 Pa·s. 实验测得脱磷渣熔化温度为1192.21℃, 粘度为0.199 Pa·s. 二者相近, 正交法优选结果可靠.

## 5 结论

利用 FactSage 热力学模拟软件模拟无氟型  $CaO-SiO_2-FeO-B_2O_3-MnO$  铁水预熔脱磷渣系的熔化温度和粘度, 计算了较合理的组分范围, 通过正交实验

进行方差、直观及主效应分析, 优选出渣系的最优组分组合, 得到如下结论:

(1) 计算的满足铁水预熔脱磷渣熔化温度低及粘度低的条件为  $25wt\% \leq FeO \leq 55wt\%$ ,  $5wt\% \leq B_2O_3 \leq 12wt\%$ ,  $6wt\% \leq MnO \leq 14wt\%$ ,  $3.5 \leq \text{碱度} \leq 5.5$  和  $1380^\circ C \leq \text{温度} \leq 1400^\circ C$ .

(2) MnO 含量对熔化温度影响最大,  $B_2O_3$  含量对粘度影响最大. 为保证熔化温度和粘度都较低, 较适宜的条件为碱度 3.5~4.5, FeO 含量 35wt%~50wt%,  $B_2O_3$  含量 8wt%~10wt%, MnO 含量 9wt%~12wt%, 温度

1380~1400℃.

(3) 1400℃时  $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-B}_2\text{O}_3\text{-MnO}$  铁水预处理脱磷渣系预熔渣成分的最优配比为碱度 4.0、FeO 含量 45wt%、 $\text{B}_2\text{O}_3$  含量 9wt% 和 MnO 含量 10wt%.

#### 参考文献

- [1] 张飞虎, 游香米. 铁水脱磷工艺分析研究 [J]. 工业加热, 2012, 41(4): 55-57.  
Zhang F H, You X M. Analysis and research of molten metal dephosphorization [J]. Industrial Heating, 2012, 41(4): 55-57.
- [2] 邢薇, 吴龙, 李士琦, 等.  $\text{CaO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  渣熔化温度特性实验研究 [J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(5): 603-607.  
Xing W, Wu L, Li S Q, et al. Experimental study on the melting temperature characteristic of the  $\text{CaO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  slag system [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(5): 603-607.
- [3] 赵晓辉, 张朝晖, 巨建涛, 等.  $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$  渣系熔化温度的实验研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(9): 81-84.  
Zhao X H, Zhang Z H, Ju J T, et al. Study on melting temperature of  $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$  Slag [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(9): 81-84.
- [4] 杨福, 毕学工, 周进东. 助熔剂种类与配比对高磷铁水脱磷渣高温性能的影响 [J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(5): 482-485.  
Yang F, Bi X G, Zhou J D. Influence of type and blending ratio of fluxing accelerating agent on high-temperature properties of dephosphorization slag in high phosphorus hot metal [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2010, 33(5): 482-485.
- [5] 刘超, 张玉柱, 康月. Factsage 计算 MgO 含量对高炉渣粘度的影响 [J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 25-29.  
Liu C, Zhang Y Z, Kang Y. Factsage calculation of the influence of MgO on the viscosity of BF slag [J]. Journal of Hebei United University (Natural Science Edition), 2014, 36(4): 25-29.
- [6] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇伟, 等. 正交试验设计和分析方法研究 [J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.  
Liu R J, Zhang Y W, Wen C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.
- [7] Jung I H, Ende M A V, Cho M K, et al. FactSage thermodynamic database for steelmaking refractory research [J]. Chinass Refractories, 2015, 24(1): 15-21.
- [8] 袁海平, 梁钦锋, 刘海峰, 等.  $\text{CaCO}_3$  对煤灰熔融特性和黏温特性影响的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 49-55.  
Yuan H P, Liang Q F, Liu H F, et al. Effects of  $\text{CaCO}_3$  on the fusion characteristic and viscosity-temperature behaviour of coal ashes [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 49-55.
- [9] Gao Y M, Wang S B, Hong C, et al. Effects of basicity and MgO content on the viscosity of the  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-9wt\%Al}_2\text{O}_3$  slag system [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2014, 21(4): 353-362.
- [10] Xin Q I, Wen G H, Tang P, et al. Viscosity and viscosity estimate model of fluoride-free and titanium-bearing mold fluxes [J]. J. Iron. Steel Res. Int., 2010, 17(6): 6-10.
- [11] 张明军, 陈伟庆, 邵俊宁, 等. 高铝钢包渣粘度的计算研究 [J]. 河南冶金, 2014, 22(4): 10-12.  
Zhang M J, Chen W Q, Shao J N, et al. Viscosity calculation of ladle slag with high alumina [J]. Henan Metallurgy, 2014, 22(4): 10-12.
- [12] Wright S, Zhang L, Sun S, et al. Viscosity of a  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  melt containing spinel particles at 1646 K [J]. Metall. Mater. Trans. B, 2000, 31(1): 97-104.
- [13] Seok S-H, Jung S-M, Lee Y-S, et al. Viscosity of highly basic slags [J]. ISIJ Int., 2007, 47(8): 1090-1096.
- [14] 郭靖, 程树森, 赵宏博. 基于结构理论的  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$  熔渣粘度的预报模型 [J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(8): 6-11.  
Guo J, Cheng S S, Zhao H B. Modelling research for estimating viscosity of  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$  system molten slag based on slag structure theory [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(8): 6-11.
- [15] 成国光, 张鉴, 赵沛. 含  $\text{B}_2\text{O}_3$  渣系的热力学计算模型 [J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(2): 30-33.  
Cheng G G, Zhang J, Zhao P. Thermodynamic calculating models for slag melts containing  $\text{B}_2\text{O}_3$  [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1997, 7(2): 30-33.
- [16] 蔡金林, 薛正良, 熊天宇, 等. 高温快速煅烧石灰的物化性质及微观结构的研究 [J]. 炼钢, 2017, 33(1): 43-48.  
Cai J L, Xue Z L, Xiong T Y, et al. Study on the physico-chemical properties and microstructure of lime rapidly calcined at high temperature [J]. Steelmaking, 2017, 33(1): 43-48.
- [17] 吴斌, 徐秀, 高博, 等. 液体黏滞系数测量新方法 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(6): 8-14.  
Wu B, Xu X, Gao B, et al. New method for measuring viscosity of liquids [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(6): 8-14.
- [18] 黄志勇, 袁庭伟, 颜根发, 等.  $\text{MnO}$  基无氟复合造渣剂在沙钢转炉冶炼中应用的试验研究 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2006, 16(1): 7-11.  
Huang Z Y, Yuan T W, Yan G F, et al. Experimental investigation of slag-forming compounds of MnO-based without fluorine in converter smelting process [J]. Journal of Anhui Vocational College of Metallurgy and Technology, 2006, 16(1): 7-11.
- [19] 张少广, 徐宏凯. 二水草酸亚铁分解行为研究现状 [J]. 中国有色冶金, 2016, 45(3): 80-84.  
Zhang S G, Xu H K. Study on decomposition behavior of ferrous oxalate dehydrate [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2016, 45(3): 80-84.
- [20] Hermanek M, Zboril R, Mashlan M, et al. Thermal behaviour of iron(II) oxalate dihydrate in the atmosphere of its conversion gases [J]. Journal of Materials Chemistry, 2006, 16(13): 1273-1280.
- [21] Hermanek M, Zboril R, Medrik I, et al. Catalytic efficiency of iron(III) oxides in decomposition of hydrogen peroxide: competition between the surface area and crystallinity of nanoparticles [J]. JACS, 2007, 129(35): 10929-10936.