

铝镇静钢连铸保护渣对 Al_2O_3 夹杂物的吸收能力

刘承军 孙丽枫 王德永 姜茂发
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘要 采用 Al_2O_3 溶解速率测定仪测定了 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 连铸保护渣系的 Al_2O_3 溶解速率。通过建立 Al_2O_3 溶解速率和渣成分关系的回归正交设计模型, 精确预测铝镇静钢连铸保护渣的夹杂物吸收能力, 并通过建立的非线性规划模型对该保护渣进行优化设计。结果表明, 在 $\text{CaO/SiO}_2 = 1.15$, Na_2CO_3 20.0%, CaF_2 20.0%, Al_2O_3 2.0%, MgO 8.0% 时, 连铸保护渣的 Al_2O_3 溶解速率的最大值为 $1.73 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

关键词 连铸保护渣 铝镇静钢 Al_2O_3 夹杂 溶解速率 回归分析

Absorption Ability of Casting Mold Powder for Al-Killed Steels to Al_2O_3 Inclusion

Liu Chengjun, Sun Lifeng, Wang Deyong and Jiang Maofa
(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The Al_2O_3 dissolution rate of casting mold powder $\text{CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ series has been measured by Al_2O_3 dissolution rate measuring apparatus. The inclusion absorption ability of mold powder for Al-killed steels could be predicted accurately by established regression analysis model for relation between Al_2O_3 dissolution rate and mold powder ingredient, and the mold powder for Al-killed steels has been optimized and designed by established nonlinear programming model. The results showed that with $\text{CaO/SiO}_2 = 1.15$, Na_2CO_3 20.0%, CaF_2 20.0%, Al_2O_3 2.0%, MgO 8.0%, the Al_2O_3 dissolution rate of casting mold powder was up to maximum value that is $1.73 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Material Index Casting Mold Powder, Al-Killed Steel, Al_2O_3 Inclusion, Dissolution Rate, Regression Analysis

研究发现^[1-3], 熔渣对钢渣界面 Al_2O_3 夹杂的溶解速率是连铸保护渣吸收 Al_2O_3 夹杂的重要控制环节。本实验采用 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 渣系, 通过测定 Al_2O_3 溶解速率, 建立二次回归正交设计模型, 研究连铸保护渣夹杂物吸收能力与成分之间的关系, 在此基础上进行保护渣成分优化设计。

1 实验方法

实验采用物理混合型连铸保护渣, 粒度小于 0.147 mm。渣料由化学纯试剂配制而成, 其中 Na_2O 以 Na_2CO_3 代替。

用 Al_2O_3 溶解速率测定仪测定连铸保护渣的 Al_2O_3 溶解速率, 在 SiC 管高温炉内进行。炉管内衬石墨套筒保护, 以防止高温条件下渣料中碱金属及氟化物的挥发腐蚀。纯度为 99.9% 的 Al_2O_3 棒吊挂于炉管内坩埚中心线上, 升降机构可调整其高度, 传动机构可使其以一定速率旋转。

炉膛温度恒定 1 300 °C。称取 80 g 渣料加入石墨坩埚, 15 min 后渣料均匀熔化。此时将 Al_2O_3 棒下降至一定高度, 使其下端浸入渣中, Al_2O_3 棒以 200 r/min 的速率旋转, 时间 30 min。之后将 Al_2O_3 棒置于 1:1 盐酸溶液中, 浸泡 12 h, 以去除 Al_2O_3 棒表面粘附的熔渣。

实验采用精度为 0.1 g 的电子天平称量浸渍前后 Al_2O_3 棒的质量变化, 采用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量浸渍前后 Al_2O_3 棒的直径变化。测定之前, Al_2O_3 棒须进行高温灼烧处理(温度 1 000 °C, 时间 1 h)。

采用二次回归正交设计^[4], 研究连铸保护渣 Z_1 (CaO/SiO_2)、 Z_2 (Na_2CO_3 含量)、 Z_3 (CaF_2 含量)、 Z_4 (Al_2O_3 含量)、 Z_5 (MgO 含量) 等 5 个因素对 Al_2O_3 溶解速率的影响。水平因素分析见表 1。

2 实验结果与分析

2.1 Al_2O_3 溶解速率的回归方程

表 1 方差分析水平因素表

Table 1 Tabulation of factor-level for variance analysis

因素	Z ₁	Z ₂ /%	Z ₃ /%	Z ₄ /%	Z ₅ /%
基准水平(0)	0.90	15.0	15.0	5.0	5.0
变化间距	0.30	5.0	5.0	3.0	3.0
上水平(+1)	1.20	20.0	20.0	8.0	8.0
下水平(-1)	0.60	10.0	10.0	2.0	2.0
上星号臂(+1.55)	1.36	22.7	22.7	9.6	9.6
下星号臂(-1.55)	0.44	7.3	7.3	0.4	0.4

Al₂O₃ 溶解速率与连铸保护渣 Z₁ (CaO/SiO₂)、Z₂ (Na₂CO₃ 含量)、Z₃ (CaF₂ 含量)、Z₄ (Al₂O₃ 含量)、Z₅ (MgO 含量) 的回归方程为:

$$k = -7.983 + 24.733 3Z_1 - 0.323 0Z_2 - 0.089 5Z_3 - 0.345 4Z_4 - 0.316 2Z_5 - 0.012 0Z_1 Z_2 - 0.096 8Z_1 Z_3 - 0.093 7Z_1 Z_4 + 0.115 1Z_1 Z_5 + 0.024 2Z_2 Z_3 - 0.008 5Z_2 Z_4 + 0.010 4Z_2 Z_5 - 0.005 1Z_3 Z_4 + 0.004 6Z_3 Z_5 - 0.002 0Z_4 Z_5 - 10.095 0Z_1^2 + 0.012 9Z_2^2 + 0.012 4Z_3^2 + 0.032 1Z_4^2 + 0.024 1Z_5^2 \quad (1)$$

对回归方程进行方差分析, 如表 2 所示, Al₂O₃ 溶解速率回归方程在 α = 0.001 水平上显著, 实验数据与回归方程吻合较好。

2.2 连铸保护渣成分对 Al₂O₃ 溶解速率的影响

表 2 Al₂O₃ 溶解速率回归方程的方差分析

Table 2 Variance analysis of regression equation of Al₂O₃ dissolution rate

总偏差平方和	回归平方和	剩余平方和	回归自由度	剩余自由度	统计量
354.93	352.30	2.63	20	6	40.14 > F _{0.001} (20,6)

本实验渣系条件下, 随着 CaO/SiO₂ 的增大, Al₂O₃ 溶解速率先逐渐增大, 而后稍有减小(图 1); 随着渣中 Na₂CO₃、CaF₂ 和 MgO 的含量增加, Al₂O₃ 溶解速率逐渐增大(图 2,3)。

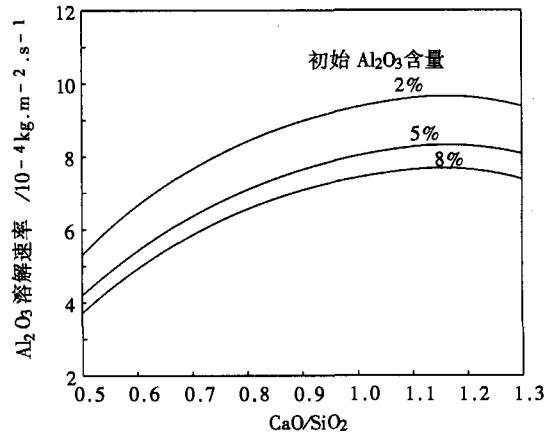


图 1 Al₂O₃ 溶解速率与 CaO/SiO₂ 的关系

Fig. 1 Relation between Al₂O₃ dissolution rate and CaO/SiO₂

在本实验条件下, 随渣中 Al₂O₃ 含量增加, Al₂O₃ 溶解速率逐渐减小(图 1,3)。

2.3 连铸保护渣的成分优化设计

通过建立非线性规划模型, 可以对铝镇静钢连铸保护渣进行优化设计^[5,6]。非线性规划模型的基本形式为:

$$\min_z Y(Z) = \frac{1}{2} Z^T yZ + m^T Z + n \quad (2)$$

$$s. t. VLB \leq G(Z) \leq VUB \quad (3)$$

其中 Y = k (4)

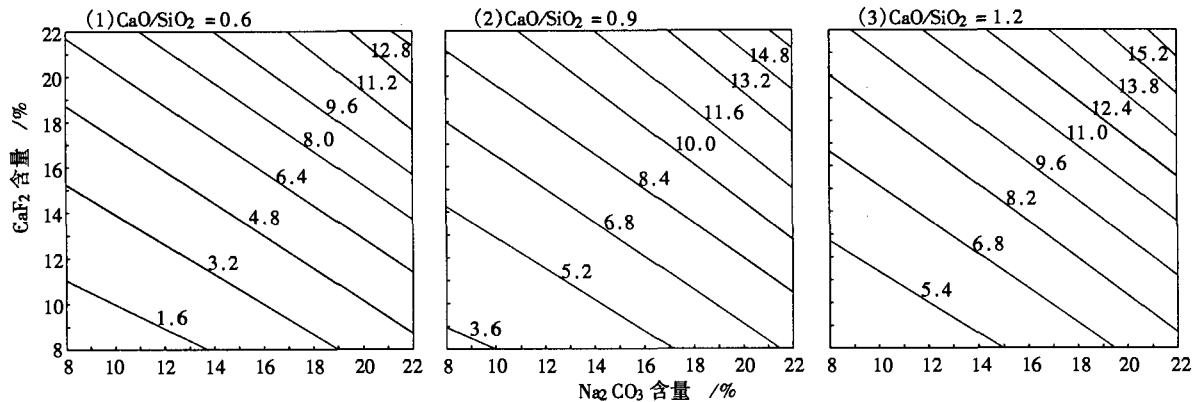


图 2 Al₂O₃ 溶解速率等值线 (Al₂O₃ 含量 = MgO 含量 = 5%)

Fig. 2 Iso-value lines of Al₂O₃ dissolution rate, Al₂O₃ content = MgO content = 5%

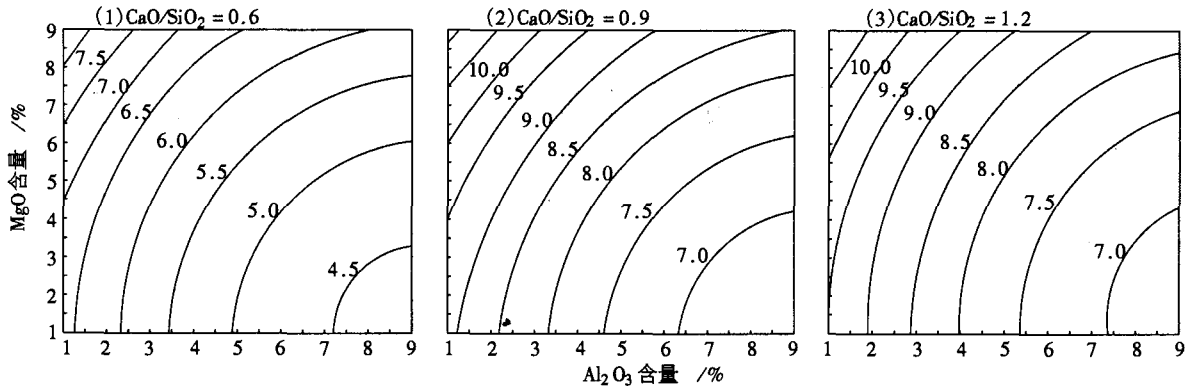


图 3 Al₂O₃ 溶解速率等值线(Na₂CO₃ 含量 = CaF₂ 含量 = 15%)
Fig.3 Iso-value lines of Al₂O₃ dissolution rate, Na₂CO₃ content = CaF₂ content = 15%

$$Z = (Z_1 \ Z_2 \ Z_3 \ Z_4 \ Z_5)^T \quad (5)$$

$$G(Z) = E \cdot Z \quad (6)$$

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$VLB = (0.60 \ 10.0 \ 10.0 \ 2.0 \ 2.0)^T \quad (8)$$

$$VUB = (1.20 \ 20.0 \ 20.0 \ 8.0 \ 8.0)^T \quad (9)$$

$$y = \pm \begin{pmatrix} -20.190 & -0.012 & -0.096 & -0.093 & 0.115 \\ -0.012 & 0.025 & 0.024 & 0.008 & 0.010 \\ -0.096 & 0.024 & 0.024 & 0.005 & 0.004 \\ -0.093 & -0.008 & -0.005 & 0.064 & -0.002 \\ 0.115 & 0.010 & 0.004 & -0.002 & 0.048 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$m = \pm (24.733 \ 4 - 0.323 \ 0 - 0.089 \ 6 - 0.345 \ 4 - 0.316 \ 2)^T \quad (11)$$

$$n = \pm (-7.982 \ 9) \quad (12)$$

这是一个二次规划模型,采用 Active Set Method^[1,2]来求解二次规划模型。模型求解的计算方法通过 MATLAB 语言编程实现^[7,8]。Al₂O₃ 溶解速率二次规划模型的收敛曲线如图 4,优化结果如表 3。

表 3 Al₂O₃ 溶解速率优化结果

Table 3 Results of Al₂O₃ dissolution rate optimization

Al ₂ O ₃ 溶解速率/ kg·m ⁻² ·s ⁻¹	CaO/SiO ₂	Na ₂ CO ₃ / %	CaF ₂ / %	Al ₂ O ₃ / %	MgO/ %
最小值 1.02 × 10 ⁻⁴	0.60	10.0	10.0	8.0	2.0
最大值 1.73 × 10 ⁻³	1.15	20.0	20.0	2.0	8.0

3 结论

(1) 实验连铸保护渣的 Al₂O₃ 溶解速率回归

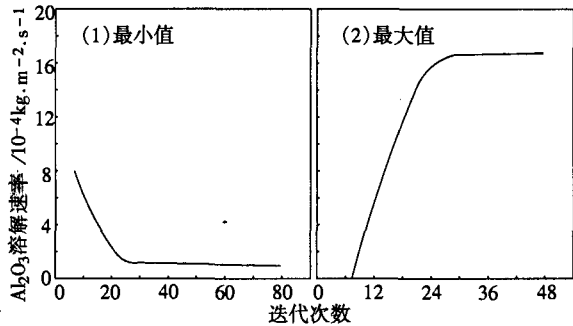


图 4 Al₂O₃ 溶解速率二次规划模型的收敛曲线
Fig.4 Converging curves of Al₂O₃ dissolution rate quadratic programming model

方程在 $\alpha = 0.001$ 水平上显著。

(2) 实验连铸保护渣的 Al₂O₃ 溶解速率的最大值为 $1.73 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

国家自然科学基金项目(50204005)和(50374029)联合资助。

参考文献

- Naito H, Isomoto M, Kishimoto M, et al. International Conference on Molten Slags and Fluxes. Sendai: ISIJ. 1992(4):330
- Ogawa K, Inoue K, Koyama S, et al. International Conference on Molten Slags and Fluxes. Sendai: ISIJ. 1992(4):336
- Nakajima K, Okamura K. International Conference on Molten Slags and Fluxes. Sendai: ISIJ. 1992(4):505
- 朱伟勇,傅连魁.冶金工程试验统计.北京:冶金工业出版社,1991
- 甘应爱,田丰.运筹学.北京:清华大学出版社,1990
- 胡毓达.非线性规划.北京:高等教育出版社,1990
- 施阳,李俊,王惠刚,等.MATLAB 语言工具箱—TOOLBOX 实用指南.西安:西北工业大学出版社,1998
- 王沫然. MATLAB5. X 与科学计算.北京:清华大学出版社,2000

刘承军(1974-),男,博士,副教授,2001年东北大学毕业,从事连铸工艺及理论研究。

收稿日期:2005-09-22