

MgO 耐火材料对轴承钢中夹杂物的影响

程玉杰¹ 任强¹ 张立峰^{2*}

(1.燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2.北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘要: 利用实验室硅钼炉使工业用 MgO 耐火材料和轴承钢在 1873K 温度和 Ar 气氛保护条件下以 120 rpm 旋转速度进行动态反应 60 min, 研究 MgO 耐火材料和轴承钢界面形貌和成分, 和钢中夹杂物成分和数量的变化。结果表明: MgO 耐火材料和轴承钢动态反应在界面处会生成 CaO-Al₂O₃ 或 MgO-Al₂O₃, 反应后的夹杂物平均成分几乎没有变化, 主要是 Al₂O₃ 含量较高的 CaO-Al₂O₃ 和 MgO-Al₂O₃ 夹杂物, 夹杂物数密度会由 12.18 /mm² 降低至 1.74 /mm²。

关键词: MgO 耐火材料 轴承钢 夹杂物

Effect of MgO Refractory on Inclusions in Bearing Steel

Cheng Yujie¹ Ren Qiang¹ Zhang Lifeng^{2*}

(1.School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004; 2.School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144)

Abstract: Industrial MgO refractory reacted with the bearing steel dynamically for 60 min at 120 rpm under 1873K and Ar atmosphere by using the laboratory silicon-molybdenum furnace. The interfacial morphology and composition between the MgO refractory and the bearing steel and the changes of the composition and the number density of inclusions in the steel were studied. The results show that CaO-Al₂O₃ or MgO-Al₂O₃ are formed at the interface when the MgO refractory reacted with the bearing steel dynamically. The average composition of inclusions is almost unchanged and is the CaO-Al₂O₃ and MgO-Al₂O₃ inclusions with high Al₂O₃ content. The number density of inclusions decreases from 12.18 /mm² to 1.74 /mm².

Key words: MgO refractory, bearing steel, inclusion

1 前言

随着对高品质钢材的需求不断增加, 钢包精炼工艺对于获得具有合适成分和洁净度的钢水变得越来越重要。在炼钢过程中, 钢包耐火材料内衬会与钢水直接接触, 在界面上发生化学反应和物理冲刷, 影响钢中夹杂物的形成的演变, 降低钢包的使用寿命和钢材质量^[1-4]。MgO 耐火材料是典型的碱性耐火材料, 是钢包和中间包常用耐火材料。因此, 研究 MgO 耐火材料对钢中夹杂物成分的影响, 可为实际生产中对耐火材料的选择和应用提供一定指导。目前, 已很多学者研究了 MgO 耐火材料和钢液之间的反应。Harada 等^[5]和 Liu 等^[6]研究表明, MgO 耐火材料和 Al 脱氧钢反应会在界面生成 MgO-Al₂O₃ 层, 且根据热力学计算, 钢中[Mg]和[Al]的含量与界面处生成的 MgO-Al₂O₃ 处于平衡状态。耐火材料会影响钢中夹杂物的形成和演变, Chi 等^[7]研究发现 MgO 耐火材料会比含 MgO 的精炼渣向钢液中提供更多的 Mg, 由于[Mg]的形成更快, 导致在 Al₂O₃ 演化过程中 MgO-Al₂O₃ 夹杂物的形成早于 CaO-Al₂O₃。A. Harada 等^[5]研究结果表明, 增加 MgO 耐火材料棒在钢液中的旋转速率和钢中[Al]含量, MgO 耐火材料棒中的 Mg 在钢液中的溶解速率会增加。

耐火材料的化学组成和结构组织不同，对钢液的影响不同^[8]。目前，大多数学者研究 MgO 耐火材料和钢液的反应机理，使用实验室自制 MgO 耐火材料与钢液静态反应，而实际生产中使用的工业 MgO 耐火材料与其成分和结构不同，与钢液在发生化学反应的同时也会发生物理冲刷作用。因此，本文研究了工业用 MgO 耐火材料和轴承钢动态反应对钢中夹杂物的影响。

2 实验方法

实验用钢为国内某厂生产的轴承钢铸坯，成分如表 1 所示。使用的 MgO 耐火材料为国内某耐火材料厂生产的镁砖，成分如表 2 所示，将耐火材料切后用砂纸打磨为长 110 mm，高和宽为 10 mm 的长方体耐火材料棒进行实验。

表 1 轴承钢的成分 (wt%)

Table 1 Composition of bearing steel (wt%)

Al	Mg	Ca	Si	Mn	O	C	S	Cr	Ti
0.013	0.0003	0.002	0.23	0.3	0.0005	0.99	0.004	1.47	0.012

表 2 MgO 耐火材料的成分 (wt%)

Table 2 Composition of MgO refractory (wt%)

MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	C
95.94	1.626	1.027	0.908	0.398	0.101

实验步骤如图 1 所示，Ar 气氛下，使用 SiMo 电阻炉将 Al₂O₃ 坩埚中的轴承钢升温到 1873 K，钢液完全熔化时通过石英管取样器取出约 30 g 钢试样，在水中快速冷却凝固，保证钢中夹杂物成分和形貌。然后将 MgO 耐火材料棒插入钢液中进行偏心转作为起始时间 0 min，旋转速度是 120 rpm，偏心旋转半径为 12.5 mm，其目的是增加搅拌的线速度，提高钢水对耐火材料棒的冲刷效果。反应 60 min 后取出第二个钢试样，然后关闭电阻炉随炉冷，温度降到 673 K，坩埚中钢液凝固，将 Al₂O₃ 坩埚、钢液和 MgO 耐火材料一起从炉中取出在水中冷却。使用自动扫描电镜 (SEM-EDS) 分析钢和耐火材料的界面形貌和钢中夹杂物成分和数量的变化。

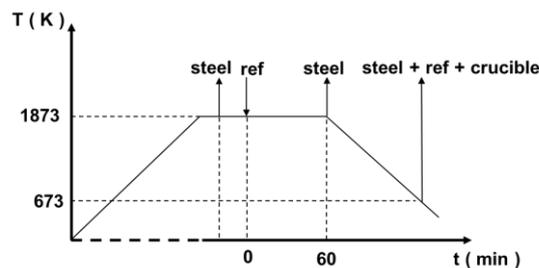


图 1 实验过程

Fig. 1 Experimental procedure

3 结果与分析

图 2 (a) 和 (b) 分别为 MgO 耐火材料棒和轴承钢反应前和反应 60 min 横截面界面宏观形貌图，通过比较可以得出反应前耐火材料棒界面凹凸不平较粗糙，与轴承钢动态反应 60 min 后，耐火材料和钢的界面变得较平整。产生这个现象的原因可能是 MgO 耐火材料具有较差的高温稳定性，和钢液动态反应容易受到钢液的冲刷，边界处颗粒脱落到钢液中^[9]。

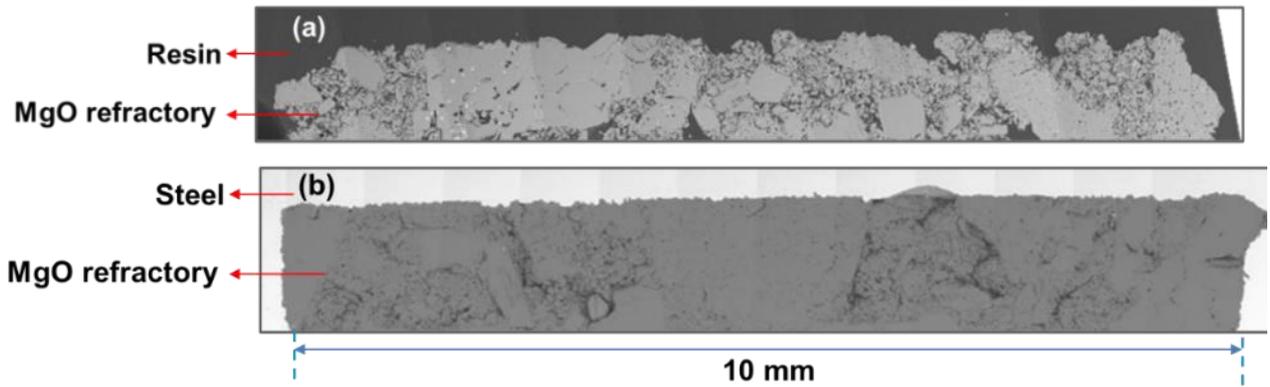


图 2 MgO 耐火材料棒与钢液反应前后横截面界面处宏观图：（a）0 min，（b）60 min
Fig. 2 Macroscopic images of MgO refractory rod cross-section interface before and after reacted with molten steel: (a) 0 min, (b) 60 min

初始 MgO 耐火材料由方镁石颗粒组成，方镁石边界呈直线状，晶间相为大量网状的 CaO-SiO_2 ^[10]。图 3 为 MgO 耐火材料棒和轴承钢动态反应 60 min 后两种不同的界面形貌和成分。图 3（a）中钢和耐火材料界面处和靠界面处耐火材料内部方镁石颗粒间主要成分都是 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ ，图 3（b）中钢和耐火材料界面处主要成分是 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ ，导致两种界面成分不同的原因是与图（a）相比，图（b）中与钢液接触的方镁石颗粒较大，直接与钢液中[Al]反应生成 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 。

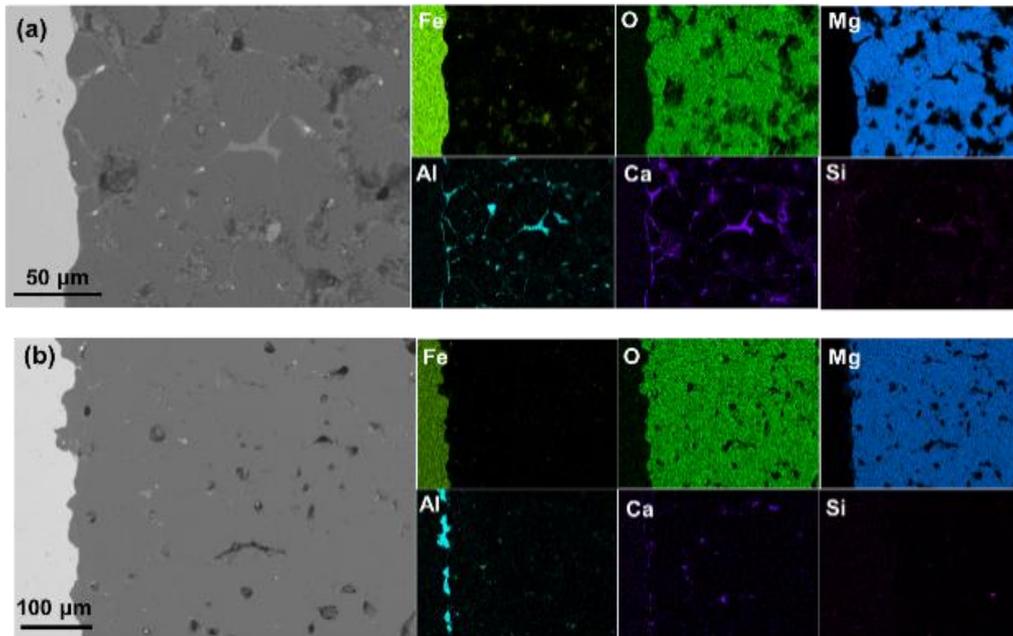


图 3 MgO 耐火材料和轴承钢边界面扫图

Fig. 3 The elemental mapping analysis of the interface between bearing steel and the MgO refractory

图 4 为轴承钢和 MgO 耐火材料动态反应 0 min 和 60 min 后，钢中夹杂物在 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 三元相图中的分布，每个空心圆代表一个夹杂物，圆的大小代表夹杂物的等效圆直径。夹杂物的平均成分被标记为红色五角星，红色实线为用 FactSage 7.1 计算出的 1873 K 温度线。可以看出，轴承钢和 MgO 耐火材料动态反应 60 min 后，夹杂物的平均成分几乎没有变化，主要是 Al_2O_3 含量较高的 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$

夹杂物，反应 60 min 后 Al_2O_3 含量为 95.85wt%，MgO 含量为 2.61wt%，CaO 含量为 1.54wt%。夹杂物的数密度由 12.18 / mm^2 降低至 1.74 / mm^2 ，这是由于耐火材料棒在钢液中的搅拌有利于夹杂物上浮导致。

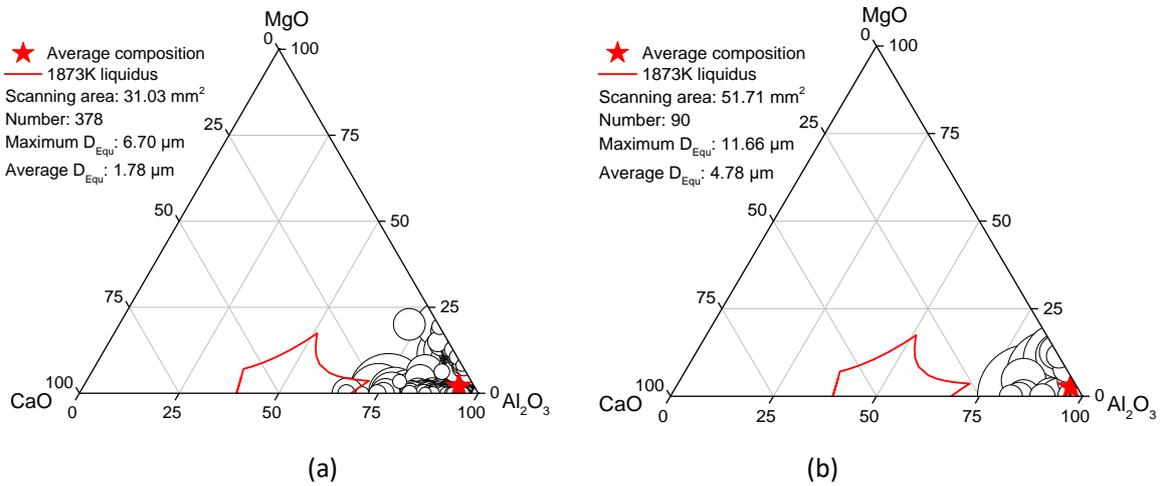


图 4 轴承钢中夹杂物的成分随反应时间的变化: (a) 0 min, (b) 60 min

Fig. 4 Distribution of size and composition of inclusions in bearing steel at different reaction time: (a) 0 min, (b) 60 min

4 结论

(1) MgO 耐火材料以 120 rpm 旋转速度和轴承钢反应 60 min，因为方镁石颗粒大小不同，会在界面处生成 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ ；

(2) 反应后夹杂物的平均成分几乎没有变化，反应 60 min 后夹杂物平均成分 Al_2O_3 含量为 95.85wt%，MgO 含量为 2.61wt%，CaO 含量为 1.54wt%。夹杂物的数密度由 12.18 / mm^2 降低至 1.74 / mm^2 。

参考文献

- [1] L. Zhang, B.G. Thomas. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness[J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 271-291.
- [2] L. Zhang, C. Guo, W. Yang, Y. Ren, H. Ling. Deformability of Oxide Inclusions in Tire Cord Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 49(2): 803-811.
- [3] F. Huang, L. Zhang, Y. Zhang, Y. Ren. Kinetic Modeling for the Dissolution of MgO Lining Refractory in Al-Killed Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(4): 2195-2206.
- [4] J. Wang, L. Zhang, G. Cheng, Q. Ren, Y. Ren. Dynamic Mass Variation and Multiphase Interaction among Steel, Slag, Lining Refractory and Nonmetallic Inclusions: Laboratory Experiments and Mathematical Prediction[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(8): 1298-1308.

- [5] A. Harada, G. Miyano, N. Maruoka, H. Shibata, S.Y. Kitamura. Dissolution Behavior of Mg from MgO into Molten Steel Deoxidized by Al[J]. ISIJ International, 2014, 54(10): 2230-2238.
- [6] C. Liu, F. Huang, X. Wang. The Effect of Refining Slag and Refractory on Inclusion Transformation in Extra Low Oxygen Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(2): 999-1009.
- [7] Y. Chi, Z. Deng, M. Zhu. Effects of Refractory and Ladle Glaze on Evolution of Non-Metallic Inclusions in Al-Killed Steel[J]. Steel Research International, 2017, 88(9): 160047001-160047010.
- [8] 游杰刚. 钢铁冶金用耐火材料[M]. 冶金工业出版社, 2014: 128-129.
- [9] 闫学强, 郑万, 王国伟, 鄢文, 李光强. 微孔 MgO 耐火材料对钢液洁净度的影响[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(6): 483-490.
- [10] 李红霞. 耐火材料手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021: 78-79.