



精炼渣碱度对 GCr15SiMn 轴承钢液洁净度的影响

张国磊^{1,2}, 郭云飞^{1,2}, 邱免^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 成国光³, 张涛³

(1 智能采矿装备技术全国重点实验室, 太原 030032; 2 山西太重智能采矿装备技术有限公司, 太原 030032;

3 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过实验室渣-钢平衡实验和热力学模型计算,研究不同精炼渣碱度对 GCr15SiMn 轴承钢液洁净度的影响。采用三种不同精炼渣碱度(分别为 6.32、5.28 和 4.27)与相同成分的钢试样分别进行了渣-钢平衡实验。实验结果显示,精炼渣碱度为 4.27 的实验组钢中 $w[\text{O}]$ 和 $w[\text{Mg}]$ 均为最低(分别为 0.000 6%、0.000 9%),且夹杂物数量密度最小(0.31 个/mm²),在钢液洁净度控制方面展现出优异效果。同时,还发现该实验组对应的炉渣中 SiO₂ 和 FeO 的变化量也为最小,表明降低初始精炼渣碱度有助于快速达到渣-钢冶金反应平衡,减少钢中夹杂物的生成。热力学模型计算进一步证实,降低精炼渣碱度可提高 SiO₂ 与 Al₂O₃ 的活度对数比,抑制 Al 与炉渣中 SiO₂ 反应,降低 SiO₂ 向钢液传氧。最后,将实验结果应用于工厂实践。结果表明,适当降低精炼渣碱度能够显著提升 GCr15SiMn 轴承钢的钢液洁净度。这项研究为冶炼高洁净度轴承钢的工业实践提供了较为有力的理论支持和指导。

关键词:GCr15SiMn 钢; 洁净度; 精炼渣碱度; 渣钢反应; 热力学

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00286 **中图分类号:**TF135

Effect of Refining Slag Basicity on the Molten Steel Cleanliness of GCr15SiMn Bearing Steel

Zhang Guolei^{1,2}, Guo Yunfei^{1,2}, Qiu Mian^{1,2}, Chen Gang^{1,2}, Cheng Guoguang³, Zhang Tao³

(1 State Key Laboratory of Intelligent Mining Equipment Technology, Taiyuan 030032, China; 2 Shanxi Taizhong Intelligent Equipment Co., Ltd., Taiyuan 030032, China; 3 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: This article studies the effect of different refining slag basicity on the cleanliness of GCr15SiMn bearing steel by combining laboratory slag-steel equilibrium experiments and theoretical calculations. Slag-steel equilibrium experiments were conducted with three different refining slag basicity ratios (6.32, 5.28 and 4.27 respectively) and steel samples with the identical chemical composition. The experimental results show that the experimental steel group with a basicity of 4.27 had the lowest oxygen and magnesium contents (0.000 6% and 0.000 9%, respectively), and the smallest number density of inclusions (0.31 per mm²), demonstrating excellent performance in controlling molten steel cleanliness. Additionally, the changes in SiO₂ and FeO in the corresponding slag for this experimental group were also the smallest, indicating that reducing the initial refining slag basicity helps to quickly achieve equilibrium in the slag-steel metallurgical reaction and reduce the formation of inclusions in the steel. Further calculations using the slag-steel equilibrium thermodynamic model confirmed that reducing the refining slag basicity can increase the logarithmic ratio of SiO₂ to Al₂O₃, inhibit the reaction between Al and SiO₂ in the slag, and reduce the transfer of oxygen from SiO₂ to the molten steel. Finally, the experimental results were applied to factory practice. The results showed that appropriately reducing the refining slag basicity can significantly improve the cleanliness of the GCr15SiMn molten steel. This research provides strong theoretical support and guidance for the industrial practice of smelting high-cleanliness bearing steel.

Key Words: GCr15SiMn Steel; Cleanliness; Refining Slag Basicity; Slag-steel Reaction; Thermodynamics

GCr15SiMn 钢作为我国风电主轴轴承材料之一,已得到了广泛应用。其成分特点是在 GCr15 轴承钢的基础上,提高了 Si、Mn 的合金含量,以改善轴承材料的淬透性和耐磨性。由于其使用环境恶劣(腐蚀、风沙、潮湿和低温),因此,对主轴轴承材料的可靠性和使用寿命提出了严格的要求。为了确保

其无故障运行和长期可靠性,卓越的疲劳性能至关重要。众所周知,降低钢中氧含量并严格控制夹杂物的数密度,能够显著提升轴承材料的疲劳寿命^[1-3]。目前,优化炉渣成分以提升钢液洁净度是冶金工艺中一种常见的改进手段^[4-7]。因此,合理设计炉渣成分对于实现 GCr15SiMn 钢液洁净化具有至关

基金项目: 山西省创新生态服务支撑专项-创新平台基地建设专项(202404010911010Z)

作者简介: 张国磊(1992—),男,博士,工程师; **E-mail:** zhangguolei327@163.com; **收稿日期:** 2024-12-29

重要的作用。

炉渣成分对精炼过程中钢液的脱氧和夹杂物去除有着重要影响。研究表明^[8-12],提高精炼渣碱度可以有效促进钢液脱氧,从而降低钢中的总氧(T.O)含量。例如:在Al脱氧合金钢生产中,将二元炉渣碱度(CaO/SiO₂质量比)从原先的3~4.5提升到改进后的5~8,钢中 w [T.O]可以从0.001 2%~0.001 7%降低至0.000 7%~0.001 0%^[8]。日本学者Eguchi等^[13]的研究也支持这一结论,即在超低氧钢的冶炼过程中,提高二元精炼渣碱度有利于降低T.O含量,最佳的碱度范围应控制在5~7之间。葛金朋等^[14]进一步证明了高碱度精炼渣能够显著地降低GCr15轴承钢钢液中氧含量的结论。此外,炉渣中CaO/Al₂O₃的比值也会影响钢中的总氧含量。Yoon等^[8]提出,降低炉渣中CaO/Al₂O₃的比例有利于控制钢中的T.O含量,特别强调当二者比率从2.0~4.4降低到1.2~2时,平均 w [T.O]含量从0.001 2%降低到0.000 8%。成田贵一等^[15]研究发现,在炉渣中 w [SiO₂]≤10%时,当CaO/Al₂O₃≥1.0时,钢中 w [T.O]不高于0.001 5%。韩国浦项钢铁公司的实践也验证了这一结论将炉渣中的CaO/Al₂O₃由2.0~4.4降低至1.7左右,钢中平均 w [T.O]由0.001 2%降低至0.000 8%^[16]。由此可见,炉渣中CaO/Al₂O₃并非越高越好,而应控制在适当的范围之内。目前,诸多研究已经定性评估了炉渣成分对GCr15轴承钢冶炼过程的影响,然而,针对硅含量较高的GCr15SiMn轴承钢(w [Si]约0.6%)的相关研究报道却相对较少。

本研究通过开展渣-钢平衡反应实验和热力学计算,深入探究了精炼渣碱度对冶金过程的影响,旨在为提高轴承钢洁净化水平提供科学指导。具体地,通过分析三种不同初始精炼渣碱度对渣钢平衡反应后钢中成分、炉渣成分以及夹杂物的影响,以获得最佳的精炼渣成分范围;同时,结合工业生产实践,进一步讨论了精炼渣碱度对钢液洁净度的影响。

1 实验材料及方法

本研究利用实验室2 kg真空感应炉中进行了渣-钢反应平衡实验,实验装置如图1所示。

实验开始前,预熔钢和炉渣试样均是利用真空感应炉制备获得的。首先,按照GCr15SiMn轴承钢的成分(质量分数)/%:1.0 C,0.6 Si,1.05 Mn,1.5 Cr,0.004 0 S配置,制得预熔钢试样A,其化学成分见

表1。其次,将不同比例的CaO, SiO₂, Al₂O₃和MgO粉末混合,并在钼坩锅熔化,制得高、中、低三种不同碱度的精炼渣S1、S2、S3,其碱度值分别为6.33、5.18、4.27,见表2。

随后,将上述获得的钢试样和炉渣试样置于在高纯氧化镁坩锅中,进行渣-钢反应,以探究不同精炼渣碱度对冶金过程的影响。具体实验步骤如下:1)将250~300 g预熔钢试样放入高纯氧化镁坩锅中;2)利用感应炉对试样进行加热,使预熔钢熔化;3)通过真空感应炉内的加料口,加入25~30 g预熔渣;4)温度控制在约1 560 °C,进行保温30 min处理,待反应结束后,取出相应的钢、渣试样,空冷。渣-钢反应过程观察图和反应结束后获得的钢样和渣样,如图2所示。

实验结束后,对实验后所取的钢样进行成分检测和夹杂物分析。利用等离子发射光谱仪检测试样钢中酸溶铝和镁含量,使用惰性气体熔融红外吸收法测定钢中氧含量。其他合金成分使用直读光谱仪ARL8860测定。然后,将实验钢样制成抛光金相样,利用MLA 250扫描电镜和EVO18-INCASteel夹杂物自动分析系统对金相样进行观察,分析了夹杂物特征。此外,还使用荧光光谱仪AXIOSmax检测了炉渣试样的化学成分。

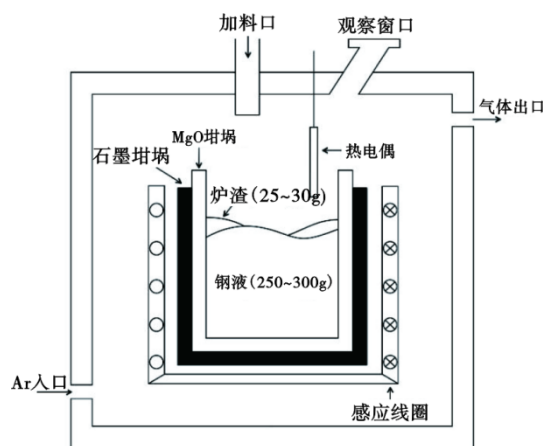


图1 GCr15SiMn渣-钢反应真空感应炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum induction furnace for GCr15SiMn slag-steel reaction

表1 GCr15SiMn渣-钢反应前预熔钢试样A的成分(质量分数)

Table 1 Composition of premelted steel sample A before GCr15SiMn slag-steel reaction						
						%
C	Si	Mn	Cr	Als	O	Mg
1.00	0.59	1.07	1.53	0.023	0.000 5	0.000 4

表 2 GCr15SiMn 渣-钢反应前的预熔渣成分和碱度
Table 2 Ingredient and basicity of premelted slag before GCr15SiMn slag-steel reaction

试样	钢渣成分(质量分数)/%					碱度 R (CaO/SiO ₂)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	
S1	59.3	9.37	24.6	3.10	0.43	6.33
S2	58.0	11.2	23.0	3.28	0.39	5.18
S3	55.5	13.0	23.8	3.60	0.28	4.27

2 结果与讨论

2.1 精炼渣碱度对冶金反应过程的影响

基于之前的实验结果^[17],本研究将冶炼 GCr15SiMn 钢的渣-钢反应准平衡时间确定为 30 min,以探究不同精炼渣碱度(6.33、5.18 和 4.27)对平衡钢成分、炉渣成分以及夹杂物的影响。需要指出,在实际冶金过程中,钢液/夹杂物/炉渣之间完全达到热力学平衡状态是比较困难的,但找到一种近似的平衡状态是可行的。因此,这里提及的渣钢反应平衡时间均被视为准平衡时间来处理。

(1) 钢成分

表 3 显示了预熔钢 A 与精炼渣 S1、S2、S3 分别反应 30 min 后的钢样成分结果,其编号依次命名为 A1、A2 和 A3。由表 3 可以清晰地看出,三组试样中的 C、Si、Mn、Cr、Al 等合金元素均符合 GCr15SiMn 钢种的成分标准,但钢中的 T.O 和 Mg 含量却呈现出明显的差异。这一现象表明:在渣-钢反应过程中,精炼渣碱度对钢液洁净度确实存在着显著影响。图 3 描绘了钢中 T.O 含量的变化情况。可以发现,与碱度较高的试样 A1 和 A2 相比,较低碱度试样 A3(初始碱度为 4.27)平衡 $w[\text{T.O}]$ 最低,其含量仅为

0.000 6%。这与传统的 Al 镇静钢中精炼渣碱度对钢中氧含量的影响规律有所不同,其原因与钢液含有较高的硅含量有密切关系^[18]。此外,试样 A3 的平衡 $w[\text{Mg}]$ 也最低,约为 0.000 9%。基于此结果可推断,在合理的精炼渣碱度范围内(碱度大于 4),适当降低碱度值有助于使 GCr15SiMn 轴承钢获得更低的平衡氧和镁含量。

表 3 GCr15SiMn 渣-钢反应后钢样的化学成分(质量分数)
Table 3 Chemical composition of steel sample after GCr15SiMn slag-steel reaction

试样	C	Si	Mn	Cr	Als	T.O	Mg
A1	0.98	0.55	1.07	1.43	0.015	0.000 8	0.001 2
A2	0.99	0.55	1.08	1.43	0.014	0.000 7	0.001 3
A3	0.97	0.55	1.05	1.41	0.012	0.000 6	0.000 9

(2) 炉渣成分

在渣钢反应过程中,炉渣体系的稳定性对于钢液中夹杂物的生成和去除起着至关重要的作用。在铝镇静钢冶炼过程中,钢中 Al 与炉渣中 SiO₂ 和 FeO 之间发生的化学反应,是最容易实现炉渣和钢水之间热力学平衡的,这一点已被文献^[19-20]所证实。换言之,渣-钢反应前后炉渣中 SiO₂ 和 FeO 的变化量越小,则钢液中生成的夹杂物越少,对于提高钢液洁净度越有利。因此,这里可以利用 SiO₂ 和 FeO 变化量来反映冶金过程中炉渣的稳定性,如式(1)。

$$\Delta M_x O_y = M_x O_y^{\text{eq}} - M_x O_y^0 \quad (1)$$

式中, $M_x O_y$ 表示炉渣中 M 元素氧化物的组成,上标 eq 表示渣-钢反应后测量的氧化物含量,上标 0 代表初始氧化物的含量。其中,当 $\Delta M O_x$ 越趋近于 0 时,表示炉渣中 $M O_x$ 与钢液中 M 元素成分处于平衡状态。

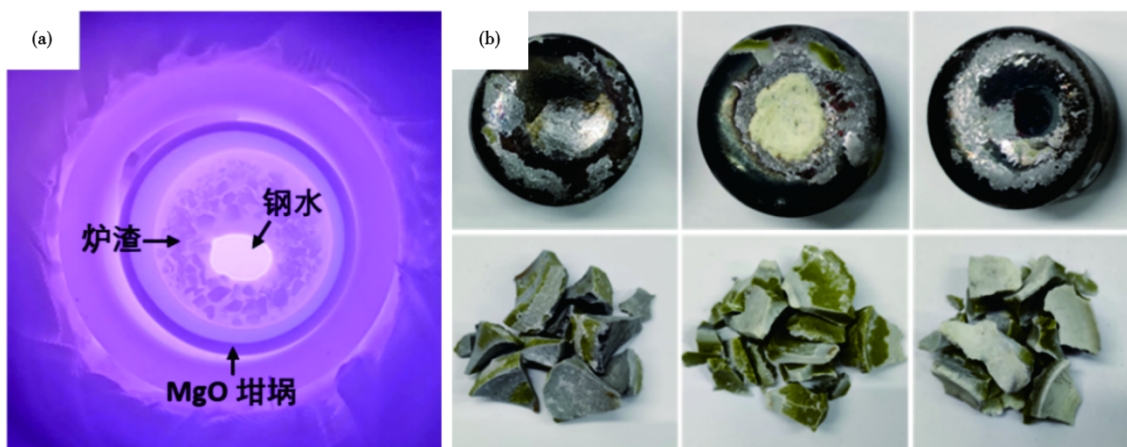


图 2 GCr15SiMn 渣-钢反应的实验过程(a)以及获得的钢、渣试样(b)

Fig. 2 The experiment process of GCr15SiMn slag-steel reaction (a) and the obtained steel and slag samples (b)

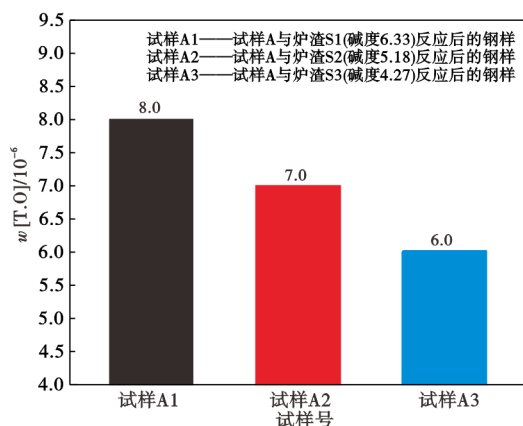


图3 精炼渣碱度对GCr15SiMn钢中氧含量的影响

Fig. 3 Effect of refining slag basicity on T. O content in GCr15SiMn steel

表4列出了预熔钢A分别与炉渣S1、S2、S3反应30 min后的渣样成分结果,其编号依次命名为SA1、SA2和SA3。不同初始精炼渣碱度(6.33、5.18和4.27)对反应前后炉渣组元 SiO_2 和 FeO 变化量的影响,如图4和图5所示。通过对比分析,可以发现A1组试样在炉渣反应后 $w[\text{SiO}_2]$ 和 $w[\text{FeO}]$ 的变化量最大,其数值分别为1.13%和0.18%;A2组炉渣的变化量次之,分别为0.9%和0.1%;而A3组试样(初始碱度为4.27)的炉渣中 $w[\text{SiO}_2]$ 和 $w[\text{FeO}]$ 的变化量均为最小,其数值分别为0.1%和0.04%。这一结果表明,在初始炉渣碱度在4.27~6.33范围内,随着初始精炼渣碱度的降低,在渣-钢反应达到平衡时,炉渣中 SiO_2 和 FeO 的变化量也相对较低。综上分析,初始精炼渣碱度为设定为4.27有利于渣-钢冶金反应体系快速达到渣-钢平衡,进而间接地影响着钢液的洁净度。此时,A3组试样对应的平衡炉渣 $w[\text{CaO}]$ 为50.7%, $w[\text{SiO}_2]$ 为13.1%, $w[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 为23.6%,这对实际冶炼过程中炉渣成分的设计具有重要的参考价值。

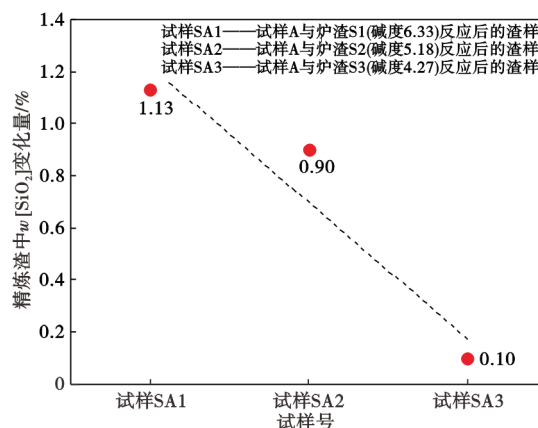
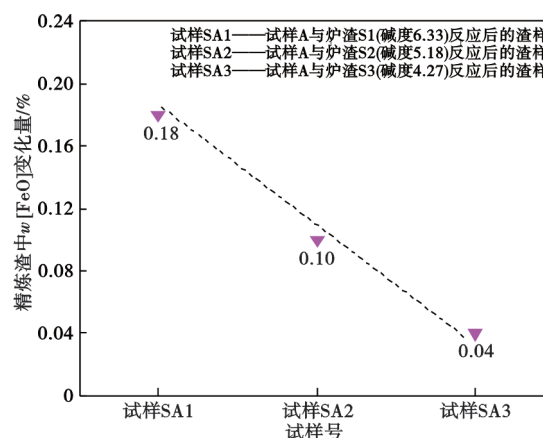
(3) 夹杂物数量密度

在实际生产过程中,精炼渣碱度会直接影响钢中微量元素的生成,如Ca、Mg含量,进而影响钢中

表4 渣钢反应后炉渣的化学成分和碱度

Table 4 Chemical composition and basicity of slag samples after the slag-slag reaction

试样	炉渣成分(质量分数)/%					碱度R (CaO/SiO ₂)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	
SA1	57.3	10.5	24.1	5.22	0.25	5.46
SA2	55.8	12.1	23.1	6.09	0.29	4.61
SA3	50.7	13.1	23.6	7.30	0.32	3.87

图4 精炼渣碱度对渣中 $w[\text{SiO}_2]$ 的影响Fig. 4 Effect of refining slag basicity on SiO_2 content in the slag图5 精炼渣碱度对渣中 $w[\text{FeO}]$ 的影响Fig. 5 Effect of refining slag basicity on FeO content in the slag

非金属夹杂物的生成^[21-23]。图6(a)展示了渣钢反应后A1、A2、A3三个试样中典型夹杂物的微观形貌及能谱分析结果。通过观察发现,三个试样中钢中夹杂物均为尺寸在 $5\ \mu\text{m}$ 以内的 Al_2O_3 夹杂物,这属于Al脱氧钢中的典型脱氧产物。同时,还在A1、A2试样中发现了一些 MgO 和镁铝尖晶石夹杂物,如图6(b)所示,这种夹杂物的形成与试样中含较高的镁含量有关。

为更准确地比较三组试样中夹杂物的数量密度,利用夹杂物自动分析系统对试样中夹杂物(尺寸大于 $1\ \mu\text{m}$)的数量进行了定量统计,如图7所示。结果显示,在相同观察视场下,相比于A1和A2试样,炉渣碱度较低的A3试样(初始碱度为4.27)中氧化类夹杂物数量密度最低,约为 0.31 个/ mm^2 。此结果进一步证实了:适当降低精炼渣碱度可以有效减少GCr15SiMn轴承钢中夹杂物的数量密度,进而可以提高钢材的洁净度。这与前面图3所提

及的 A3 试样拥有更低的氧含量的结果基本吻合。综上,适当降低精炼渣碱度有利于提高 GCr15SiMn 轴承钢的洁净度。

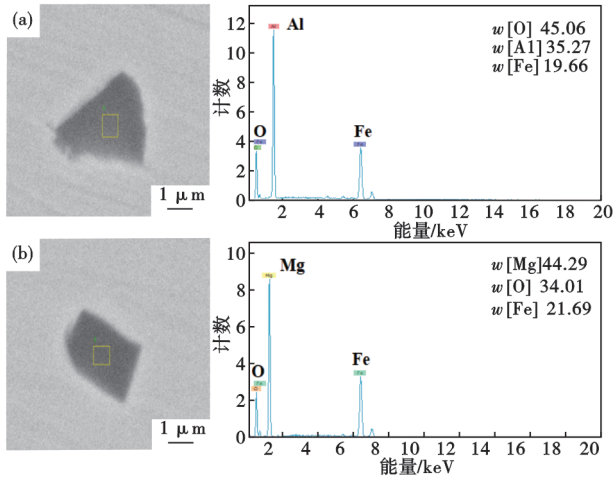


图 6 渣-钢反应后 GCr15SiMn 钢中典型的夹杂物类型:(a) 氧化铝,(b) 氧化镁
Fig. 6 Typical types of inclusions in GCr15SiMn steel after slag-steel reaction : (a) Al₂O₃, (b) MgO

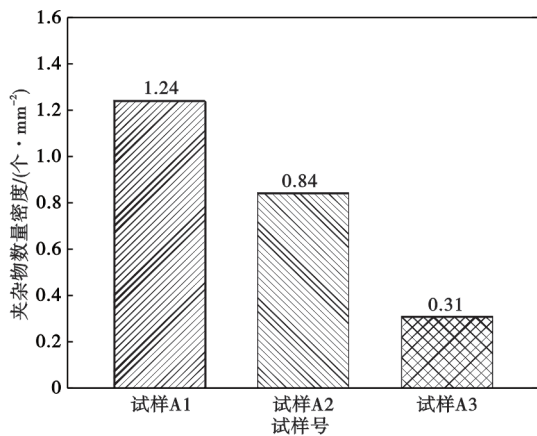


图 7 渣-钢反应后 GCr15SiMn 钢中夹杂物的数量密度统计结果
Fig. 7 Statistical results of the number and density of inclusions in GCr15SiMn steel after slag-steel reaction

2.2 钢液与精炼渣之间的反应热力学

基于渣-钢平衡理论和炉渣共存理论^[24],利用炉渣与钢液平衡的热力学模型^[25],分析了 CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-FeO 渣系下炉渣成分中各组元活度对钢液成分的影响。

在渣-钢反应过程中,炉渣中 SiO₂ 的活度会直接影响渣中 SiO₂ 向钢液供氧的能力^[26],如式(2)。图 8 为 1873 K 条件不同精炼渣碱度条件下炉渣中 SiO₂、

Al₂O₃ 和 MgO 的活度。计算结果表明:提高炉渣二元碱度,炉渣中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的活度会逐渐降低。同时,由计算公式(3),可得到 log(a_{SiO₂}³/a_{Al₂O₃}²) 随精炼渣碱度的变化情况,如图 9 所示。随着炉渣二元碱度的降低,log(a_{SiO₂}³/a_{Al₂O₃}²) 会呈现增加的趋势。根据等式(4)可知,log(a_{SiO₂}³/a_{Al₂O₃}²) 的增加会使得钢液中硅与铝的活度比值(log(a_[Si]³/a_[Al]⁴)) 升高,从而抑制钢液中 Al 与炉渣 SiO₂ 的反应,减少炉渣中 SiO₂ 向钢液供氧。这意味着钢-渣反应开始前炉渣组元越接近平衡状态时,反应后钢液中氧含量的变化也越小。故而,实验组 A3 试样中钢液表现出更低的氧含量(0.000 6%)。这一计算结果与实验结果基本吻合。



$$\lg K_1 = \lg \frac{a_{Al_2O_3}^2 \cdot a_{[Si]}^3}{a_{SiO_2}^3 \cdot a_{[Al]}^4} \quad (3)$$

$$\lg \frac{a_{[Si]}^3}{a_{[Al]}^4} = \lg \frac{a_{SiO_2}^3}{a_{Al_2O_3}^2} + \lg K_1 \quad (4)$$

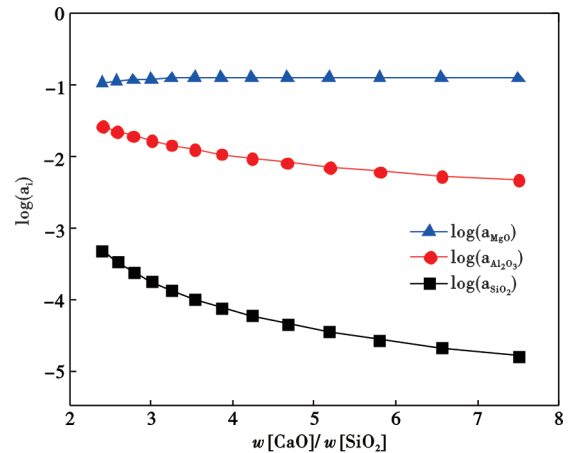


图 8 精炼渣碱度对 CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-FeO 渣系中各组元活度的影响
Fig. 8 Effect of refining slag basicity on the activity of various ingredients in CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-FeO slag system

2.3 工业试验效果

为进一步验证上述实验结果的可靠性,在国内钢厂进行了工业试验。GCr15SiMn 轴承钢冶炼工业路线为:110 t EAF→70 t LF→70 t VD→IC。在 LF 精炼过程中,采用 3 种不同碱度的目标精炼渣:D、E 炉次使用的精炼渣碱度为 5.5~6.5、4.5~5.5,F 炉次则采用精炼渣碱度为 3.5~4.5,而其他精炼条件保持一致。其中,造渣材料主要在 EAF 出钢时添加,少部

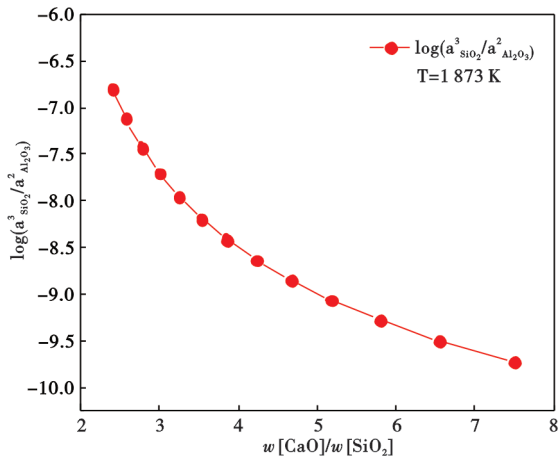


图9 CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-FeO 渣系下精炼渣碱度对 log(a³_{SiO₂}/a²_{Al₂O₃}) 的影响}}

Fig. 9 Effect of refining slag basicity on log(a³_{SiO₂}/a²_{Al₂O₃}) in CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃-FeO slag system}}

分在 LF 精炼时加入。随后,将这三个方案应用于工厂实践,并在 LF 初期、LF 结束以及 VD 结束阶段进行取样。

三组工业试验各阶段钢中 T.O 含量的变化及夹杂物数量密度的情况如图 10 所示。由图 10 可知,在 LF 结束后,D、E 炉次钢中 w[T.O] 基本控制在 0.001 8%~0.001 9%,夹杂物数量密度分别为 12.9、10.5 个/mm²,且钢中 5 μm 以上的大尺寸夹杂物数量较多;而炉次 F,在 LF 结束后钢中 w[T.O] 含量可降低至 0.001 3% 左右,夹杂物数量密度仅为 8.8/mm²,在 VD 后,这两项数值会进一步显著下降。相比而言,拥有较低碱度的 F 炉次在钢液洁净度控制方面表现更加优异。综上,通过合理优化精炼渣碱度,不仅能够有效控制钢中的氧含量,还能显著降低夹杂物尺寸和数量,为生产高洁净轴承钢奠定

坚实的基础。

3 结论

通过实验室 GCr15SiMn 渣-钢平衡反应实验,分析了在不同精炼渣碱度(CaO/SiO₂质量比)条件下冶金反应过程对钢、渣以及夹杂物成分的影响规律。同时,结合渣-钢平衡热力学模型和工业生产实践,进一步讨论了精炼渣碱度对钢液洁净度的影响。得出了以下结果:

1) 当初始精炼渣碱度设置为 6.33、5.18、4.27,且钢中的 w[Al] 为 0.023% 时,在渣-钢反应 30 min 后,钢中平衡的 w[T.O] 分别为 0.000 8%、0.000 7%、0.000 6%,钢中生成的典型夹杂物为 Al₂O₃,夹杂物数量密度依次为 1.24、0.83、0.31 个/mm²。相比而言,精炼渣碱度设置为 4.27 时,实验组在钢液洁净度控制方面展现出优异效果。

2) 初始精炼渣碱度为 4.27 的实验组,在渣-钢反应接近平衡时,炉渣中 SiO₂ 和 FeO 变化量最小。这表明,在此炉渣碱度体系下,降低初始精炼渣碱度,有助于快速达到渣-钢冶金反应平衡,减少钢中的夹杂物数量。热力学模型计算结果也表明,降低精炼渣碱度,可以提高 SiO₂ 与 Al₂O₃ 活度对数比,抑制 Al 和炉渣中 SiO₂ 反应,减少 SiO₂ 向钢液传氧。计算结果和实验结果基本吻合。

3) 工艺试验表明,LF 精炼过程中控制精炼渣碱度为 3.5~4.5 范围内,在 LF 精炼结束时,钢中 w[T.O] 控制在 0.001 3% 左右,夹杂物数量密度为 8.8 个/mm²。结果充分说明:适当降低精炼渣碱度有助于提高 GCr15SiMn 轴承钢的钢液洁净度。这项研究为冶炼高洁净度轴承钢的工业实践提供了较为有力的理论支持和指导。

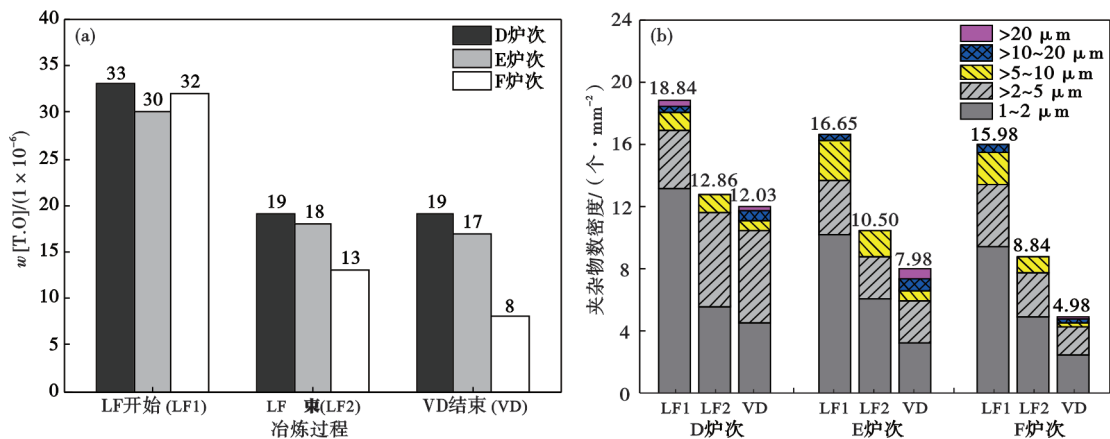


图 10 GCr15SiMn 钢精炼过程中全氧(T.O)含量(a)和夹杂物数密度(b)的变化

Fig. 10 Changes in total oxygen content (a) and inclusion number density (b) during the refining process of GCr15SiMn steel

参考文献

- [1] Uesugi T. Recent development of bearing steel in Japan[J]. *Tetsu-to-Hagane*, 1988, 74(10): 1889-1894.
- [2] Lund T, Åkesson J. Oxygen content, oxidic microinclusions, and fatigue properties of rolling bearing steels [M]. *Effect of Steel Manufacturing Processes on the Quality of Bearing Steels* [J]. ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1988: 308-330.
- [3] Wakoh M, Sawai T, Mizoguchi S. Effect of S content on the MnS precipitation in steel with oxide nuclei [J]. *ISIJ International*, 1996, 36(8): 1014-1021.
- [4] Suito H, Inoue R. Thermodynamics on control of inclusions composition in ultra-clean steels [J]. *ISIJ International*, 1996, 36(5): 528-536.
- [5] Iwamasa P K, Fruehan R J. Effect of FeO in the slag and silicon in the metal on the desulfurization of hot metal [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1997, 28(1): 47-57.
- [6] Sridhar S, Cramb A W. Kinetics of Al_2O_3 dissolution in CaO-MgO-SiO₂-Al₂O₃ slags: *in situ* observations and analysis [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000, 31(2): 406-410.
- [7] Liu C Y, Gao X, Ueda S, et al. Composition changes of inclusions by reaction with slag and refractory: A review [J]. *ISIJ International*, 2020, 60(9): 1835-1848.
- [8] Yoon B H, Heo K H, Kim J S, et al. Improvement of steel cleanliness by controlling slag composition [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2002, 29(3): 214-217.
- [9] Ma W J, Bao Y P, Wang M, et al. Influence of slag composition on bearing steel cleanliness [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2014, 41(1): 26-30.
- [10] 徐匡迪, 肖丽俊. 特殊钢精炼中的脱氧及夹杂物控制 [J]. *钢铁*, 2012, 47(10): 1-13.
- [11] 周德光, 傅杰, 王平, 等. 高质量轴承钢的生产技术 [J]. *中国冶金*, 2000, 10(6): 14-17.
- [12] 吴翔宇, 董丙成, 王梓菲, 等. La-Ce 对 GCr15 轴承钢中夹杂物的改质效果及机理 [J]. *特殊钢*, 2024, 45(2): 39-45.
- [13] Eguchi J, Fukunaga M, Sugimoto T, et al. Manufacture of high quality case-hardening low alloy steel for automobile use [C]// *Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress*. Nagoy: ISIJ international, 1990: 644-650.
- [14] 葛金朋, 李晶, 史成斌, 等. 高碱度精炼渣对 GCr15 轴承钢洁净度的影响 [J]. *钢铁*, 2016, 51(11): 30-35.
- [15] 成田贵一, 牧野武久, 松本洋, 等. 溶銑中シリコンの酸化反応機構 [J]. *鉄と鋼*, 1983, 69(15): 1722-1729.
- [16] 赵沛. 高品质钢冶炼工艺及关键技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2024.
- [17] 张国磊. 模铸 GCr15SiMn 轴承钢高净化冶金机理及关键工艺 [D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [18] Zhang G L, Cheng G G, Zhang T, et al. Evolution of oxide inclusions and cleanliness control in Al-killed GCr15SiMn bearing steel during secondary refining process [J]. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 2024, 51(2): 152-162.
- [19] Deng Z Y, Zhu M Y. Deoxidation mechanism of Al-killed steel during industrial refining process [J]. *ISIJ International*, 2014, 54(7): 1498-1506.
- [20] Ohta H, Suito H. Activities in CaO-SiO₂-Al₂O₃ slags and deoxidation equilibria of Si and Al [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1996, 27(6): 943-953.
- [21] Chen S H, Jiang M, He X F, et al. Top slag refining for inclusion composition transform control in tire cord steel [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2012, 19: 490-496.
- [22] He X F, Wang X H, Chen S H, et al. Inclusion composition control in tyre cord steel by top slag refining [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2014, 41(9): 676-684.
- [23] Liu Z H, Song G D, Deng Z Y, et al. Effect of slag adjustment on inclusions in Si-Mn-killed steel during ladle furnace (LF) refining process [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2021, 48(8): 893-900.
- [24] 张鉴, 成国光, 王力军, 等. 冶金熔体和溶液的计算热力学: 金属熔体·炉渣熔体·熔盐·熔盐·水溶液·有机溶液·总结·计算方法和程序 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [25] Zhang G L, Cheng G G, Wang Y P, et al. A thermodynamic model of the Ti distribution behavior between slag and molten steel during LF refining process [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2022, 49(7): 679-69.
- [26] 朱苗勇, 邓志银. 钢精炼过程非金属夹杂物演变与控制 [J]. *金属学报*, 2022, 58(1): 28-44.