



高碳铬轴承钢 VD 处理中夹杂物 CaO 含量演变机制

苗志奇¹, 尹青¹, 陆长河¹, 华刘开¹, 官跃辉¹, 成国光²

(1 江阴兴澄特种钢铁有限公司特钢研究院, 江阴 214429;

2 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过工业试验和热力学计算,研究了VD处理过程中夹杂物CaO含量的演变机制,并分析了钢液和炉渣成分对钢渣反应的影响。研究发现,经过VD过程,炉渣中 $w[\text{CaO}]$ 降幅达14%,而钢液中 $w[\text{Al}]$ 的烧损率高达70%,表明在VD过程中发生了剧烈的钢渣反应,且夹杂物中的平均 $w[\text{CaO}]$ 从VD前的6.8%升高到了11.3%,夹杂物尺寸增加。理想的动力学条件和VD过程中Ca的蒸发共同触发并有望进一步增强钢液中Al和炉渣中CaO之间的化学反应,使得炉渣中的Ca进入钢液,其中一部分溶解Ca会与钢液中低CaO或者无CaO的夹杂物接触并发生反应,使得夹杂物中的CaO含量升高。为了抑制VD过程的钢渣反应,可以采取提高炉渣中 Al_2O_3 含量、增加VD过程压力等措施。

关键词:轴承钢; VD; 夹杂物; 钢渣平衡**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00153 **中图分类号:**TF769. 4

The Evolution Mechanism of Inclusion CaO Content in High Carbon Chromium Bearing Steel During VD Treatment

Miao Zhiqi¹, Yin Qing¹, Lu Changhe¹, Hua Liukai¹, Guan Yuehui¹, Cheng Guoguang²

(1 Special Steel Institute of Jiangyin Xingcheng Special Steel Works CO., LTD, Jiangyin 214429, China; 2 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy of University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The evolution mechanism of CaO content in inclusions during VD treatment was studied through industrial experiments and thermodynamic calculations, and the effects of steel liquid and slag composition on steel slag reaction were analyzed. The study found that after the VD process, the CaO content in the slag decreased by 14%, while the Al content in the molten steel had a burning loss rate of up to 70%, indicating that a intense steel slag reaction occurred during the VD process. The average CaO mass fraction in the inclusions increased from 6.8% before VD to 11.3%, and the inclusion size increased. The ideal dynamic conditions and the evaporation of Ca during the VD process jointly trigger and were expected to further enhance the chemical reaction between Al in the molten steel and CaO in the slag, allowing Ca in the slag to enter the molten steel. Some of the dissolved Ca will come into contact with low CaO or CaO free inclusions in the molten steel and react, resulting in an increase in CaO content in the inclusions. In order to suppress the steel slag reaction during the VD process, measures such as increasing the Al_2O_3 content in the slag and increasing the pressure during the VD process can be taken.

Key Words: Bearing Steel; VD; Inclusions; Steel Slag Balance

高碳铬轴承钢是一种典型的铝镇静钢,高的接触疲劳性能是其典型特征^[1-2]。非金属夹杂物往往导致疲劳裂纹,这将大幅降低轴承钢的疲劳寿命^[3]。然而,在炼钢过程中,夹杂物不能完全消除^[4-5]。因此,迫切需要控制高碳铬轴承钢中的夹杂物,包括减少夹杂物数量和尺寸,以及控制适当的夹杂物化学成分^[6-9]。

轴承钢的精炼包括钢包精炼和真空精炼,真空精炼主要包括RH处理和VD处理。以往对RH工艺

中夹杂物的研究主要集中在夹杂物的上浮^[10-12]和去除^[13-15]行为上。由于VD处理过程中的有效搅拌,良好的动力学条件有利于钢-渣和钢-夹杂物的反应,这容易导致钢液中铝损失的增加和夹杂物特性的变化。因此,学者们对VD工艺的夹杂物特征进行了研究。Steneholm等^[16]指出,VD处理约10 min后,夹杂物数量达到最小值。然而,大夹杂物($\geq 22.4 \mu\text{m}$)呈上升趋势。Riyahimalaeri等^[17]揭示,夹杂物的等效圆直径随着夹杂物中CaO含量的增加

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3710100)**作者简介:** 苗志奇(1993-),男,博士,工程师; **E-mail:** miaozihiqi_bj@163.com; **收稿日期:** 2025-06-24

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

而增加,其纵横比趋于统一,这意味着夹杂物的二维形态接近圆形。国内学者对高碳铬轴承钢在VD处理过程中的夹杂特征和炉渣对夹杂物成分的影响进行了研究^[18-19],其他一些研究也发现,VD处理后存在CaO含量高的夹杂物,但对这种情况背后的机制没有深入的研究^[20-21]。

含CaO夹杂物通常具有较低的熔点、较大的尺寸和与钢液良好的润湿性,它们很可能留在钢液中,从而导致产品质量差。以往已有大量研究对LF精炼过程中含CaO夹杂物进行了研究,但对VD精炼过程中此类夹杂物的机理研究有限。为了填补这一空白,研究了GCr15高碳铬轴承钢中含CaO的夹杂物,并重点研究了VD精炼过程,以研究该过程中夹杂物中CaO含量的演变机制。

1 冶炼工艺与取样分析

轴承钢生产流程为:100 t 电弧炉(EAF)→100 t LF炉外精炼→VD真空脱气→模铸。在VD过程中,由于真空处理使得钢液中的H和N的含量进一步降低,另外可以促使夹杂物进一步上浮,从而实现更低的氧含量。VD过程控制的极限真空压力为60 Pa。主要取了VD前后的钢样和渣样进行分析对比,VD前试样编号为“VD-1”,VD后试样编号为“VD-2”。冶炼流程与取样示意图如图1所示。

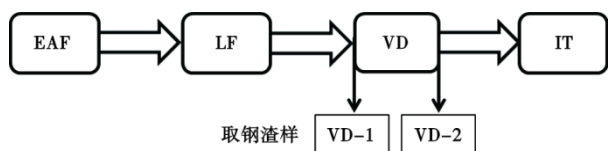


图1 GCr15生产流程与取样示意图

Fig. 1 Diagram of production process and sampling of GCr15

另外还在热轧棒材上取了金相样进行分析,并对钢样成分和炉渣成分进行化学检测。使用夹杂物自动分析系统对钢样中的夹杂物进行分析,统计尺寸、成分等信息。本研究中设定检测的夹杂物最小尺寸为1 μm,选取夹杂物的等效直径作为夹杂物的尺寸。

2 结果分析

2.1 钢渣成分分析

VD前后的钢渣成分检测结果见表1。从表1中可以看出,钢液中的主要元素C、Si、Mn、Cr在VD前后基本没有变化,炉渣中的SiO₂基本没有变化。然而钢液中的Al和Ca含量以及炉渣中的Al₂O₃和CaO

含量在VD前后都有很明显的变化。定义钢液或者炉渣中的组元*i*在VD前后的质量分数变化为 Δw_i ,并用式(1)表示:

$$\Delta w_i = (VD - 2)_i - (VD - 1)_i \quad (1)$$

式中,(VD-1)_{*i*}为VD前钢液或炉渣中组元*i*的质量分数,%;(VD-2)_{*i*}为VD后钢液或炉渣中组元*i*的质量分数,%。

图2为VD前后钢液和炉渣成分的变化 Δw 。从图2中可以看出,炉渣中 $w[\text{CaO}]$ 的变化 Δw_{CaO} 为负值(-7.23%),而钢液中 $w[\text{Ca}]$ 的变化 Δw_{Ca} 为正值,为0.000 7%,这表明钢液中Ca含量的增加主要来自炉渣中减少的CaO的贡献,而且VD前后炉渣中CaO含量的变化是最大的。另外,炉渣中Al₂O₃含量的变化与钢液中Al含量的变化同样也有对应性,即炉渣中 $w[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 的变化为正值,为4.42%,而钢液中 $w[\text{Al}]$ 的变化为负值,为(-0.014%),这同样表明炉渣中Al₂O₃含量的增加主要是来自钢液中减少的Al的贡献。从图2中进一步可以看出,经过VD过程,炉渣中 $w[\text{CaO}]$ 降幅达14%,而钢液中Al含量的烧损率高达70%,以上这些数据均表明在VD过程中发生了剧烈的钢渣反应。

表1 GCr15轴承钢VD前后钢样和渣成分检测结果(质量分数)

Table 1 The test results of steel and slag composition before and after VD of GCr15 bearing steel

试样编号	C	Si	Mn	Cr	Al	Ca	O
VD-1	1.00	0.24	0.33	1.48	0.020	0.001 9	0.003 1
VD-2	1.00	0.25	0.34	1.48	0.006	0.002 6	0.002 6
试样编号	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂		
VD-1	51.25	14.69	6.25	15.81	8.72		
VD-2	44.02	14.66	10.58	20.23	7.31		

2.2 夹杂物特征分析

对VD前后以及热轧棒材中的夹杂物进行了检测分析,发现夹杂物主要类型为CaO-Al₂O₃-MgO类夹杂物,因此,将夹杂物的成分投影到1 873 K的CaO-Al₂O₃-MgO三元相图中。如图3所示,相图由FactSage 8.0计算,使用了FToxid和FTmisc数据库。从图3中可以看出,VD前夹杂物的成分主要集中在高熔点区,液相区夹杂物数量相对较少。经过VD处理后,成分在高熔点区的夹杂物数量明显减少,液相区夹杂物数量有所增加,即夹杂物中CaO含量有所增加,且发现了 $w[\text{CaO}]$ 超过50%的CaO-Al₂O₃-MgO类夹杂物。对比热轧棒材中夹杂物成分特征

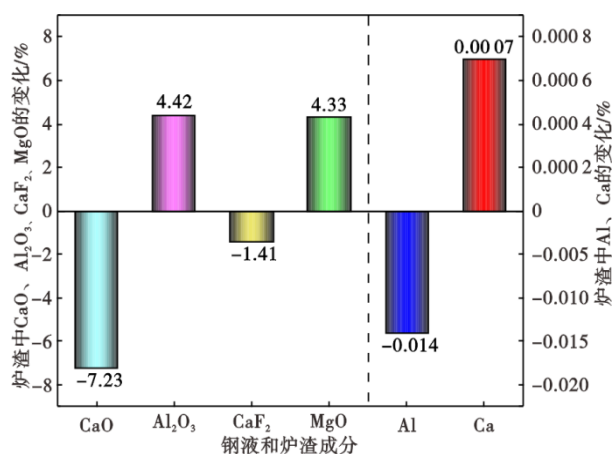


图2 VD前后钢液和炉渣成分变化

Fig. 2 Changes in composition of molten steel and slag before and after VD

发现,高熔点区夹杂物数量有所增加,这与降温过程中夹杂物生成和成分变化有关。另外发现含较高CaO的夹杂物数量没有明显下降,说明此类夹杂物有一定的遗传性,从VD结束后一直遗留到热轧棒中。

图4所示为VD前后以及热轧棒材中典型大尺寸夹杂物的形貌以及面扫结果。从图4中可以看出,VD前夹杂物中Al和Mg元素分布区域所占比例较大,且主要在核心区域,Ca元素则仅在夹杂物的外围区域分布;经过VD处理后,Al、Ca元素分布区域所占比例较大,Mg元素的分布区域显著减小,说明经过VD处理,夹杂物中CaO含量有所增加。在热轧棒材中夹杂物的元素分布与VD夹杂物的元素分布特征基本一致,夹杂物中CaO含量较高,二维形貌接近圆形。

根据夹杂物自动扫描的数据结果进行统计,将VD前后夹杂物中CaO含量与尺寸等进行对比,结果如图5所示。从图5看出,夹杂物中的平均 $w[\text{CaO}]$ 从VD前的6.8%升高到了11.3%,增幅达66%,说明VD过程中钢液中升高的Ca与夹杂物进一步反应,使得夹杂物中CaO含量进一步升高。通过对比VD前后所有夹杂物的平均尺寸发现,在VD后夹杂物的平均尺寸伴随着夹杂物中CaO含量的升高也有所增加,从VD前的 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ 增加到VD后的 $4.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

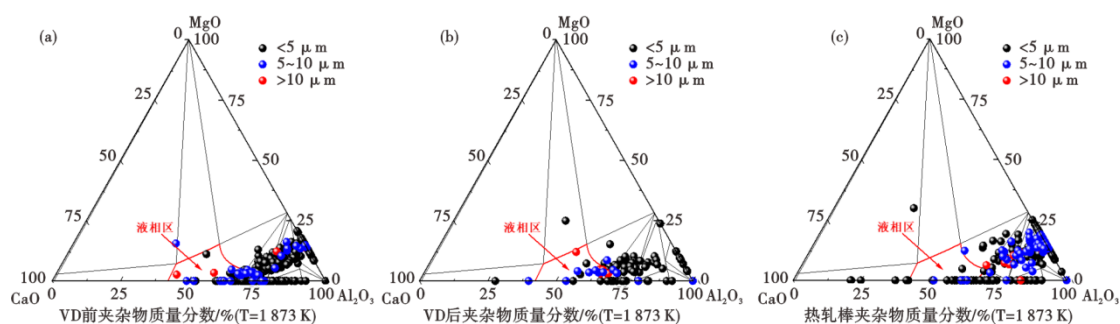


图3 夹杂物成分分布:(a)VD前,(b)VD后,(c)热轧棒材

Fig. 3 Distribution of inclusions : (a) before VD, (b) after VD, (c) in hot-rolled state

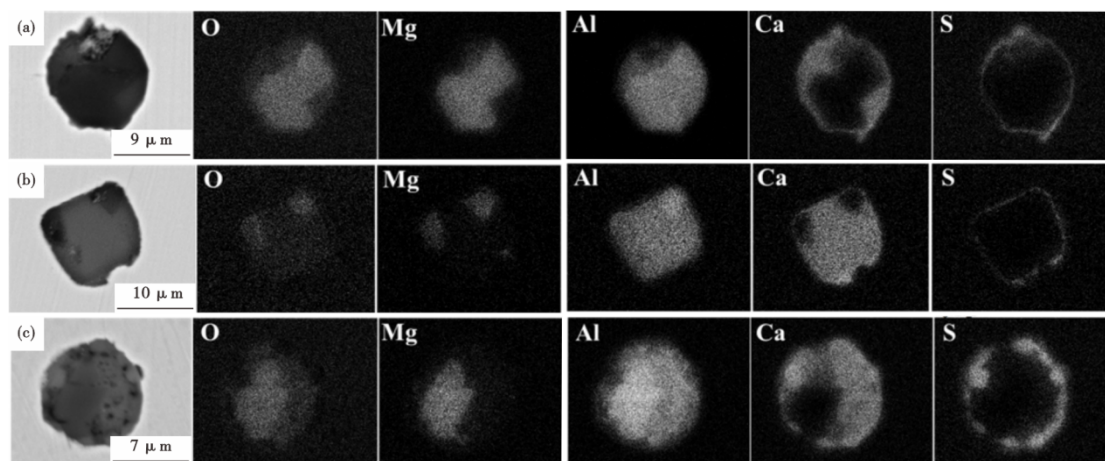


图4 夹杂物形貌与面扫描结果:(a)VD前,(b)VD后,(c)热轧棒材

Fig. 4 Morphology and surface Scanning Results of Inclusions : (a) before VD, (b) after VD, (c) in Hot-rolled state

进一步地对比 VD 前后尺寸在 5 μm 以上的夹杂物平均尺寸,结果发现这部分夹杂物的平均尺寸同样呈现增加趋势,从 VD 前的 6.8 μm 增加到了 VD 后的 9.1 μm 。

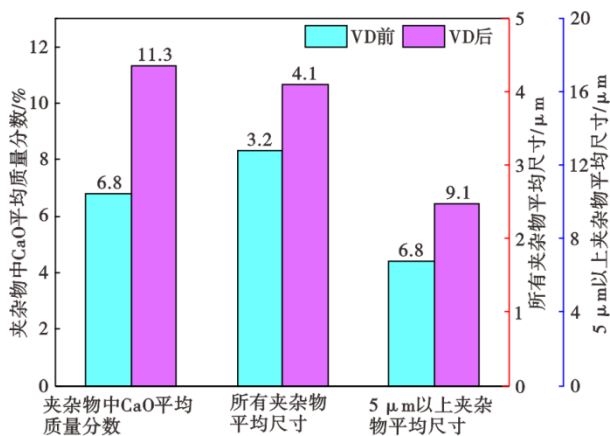


图5 VD前后夹杂物CaO含量与尺寸对比

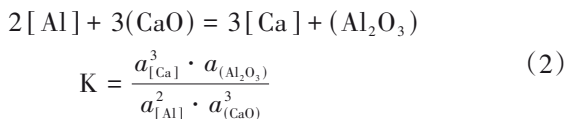
Fig. 5 Comparison of CaO content and size of inclusions before and after VD

从以上夹杂物的成分、形貌、尺寸等特征的分析结果表明,经过 VD 处理后,钢液中夹杂物中 CaO 含量有所增加,伴随着夹杂物尺寸的增大,并且有遗留到热轧棒材中风险,因此,有必要减少 VD 过程中夹杂物中 CaO 含量的增加,从而减少此类夹杂物的数量,提高钢液的洁净度。

3 结果讨论

3.1 VD过程夹杂物中CaO含量增加机理

在 VD 处理之前要先经历 LF 精炼阶段。在 LF 阶段,夹杂物经历了 $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$ 的演变过程。其中, Mg 的来源主要是炉渣和耐材,而 Ca 的来源在排除合金带入后,一般则认为是钢液中的 Al 还原炉渣中的 CaO,表达式如式(2)。



式中, $[\text{Al}]$ 和 $[\text{Ca}]$ 分别为钢液中的 Al 和 Ca; (CaO) 和 (Al_2O_3) 则分别为炉渣中的 CaO 和 Al_2O_3 ; K 为平衡常数; a 为组元活度。

当 LF 精炼结束时,钢液和炉渣之间基本上达到平衡,可以认为两者之间反应很弱。由于 LF 精炼是在大气条件下冶炼,而且冶炼过程炉渣对钢液的覆盖较好,很少有裸露的钢液直接接触大气,因此,在 LF 阶段,钢液中 Ca 挥发的可能性较小。

当 LF 精炼结束,即进入 VD 处理过程。VD 真空处理的一个主要任务就是利用低压环境来降低钢液中 N、H 这类气体元素含量。与脱除 N、H 气体相似,钢液中的 Ca 在钢液和低压气氛的界面也会挥发变成钙蒸气进入气相,表达式如式(3)。

$$[\text{Ca}] = \text{Ca}_{(\text{g})} \quad K = \frac{p_{\text{Ca}}}{a_{[\text{Ca}]}} \quad (3)$$

在 LF 精炼过程中炉渣很好地覆盖在钢液上面,且为大气环境,因此,钢液中的 Ca 在钢液和大气环境界面挥发的可能性较小。进入 VD 处理过程,部分钢液会直接暴露在低压气氛中,随着气相压力逐步降低,钙蒸气在气相中的分压也越来越小,因此,在钢液和低压气氛界面的 Ca 的挥发反应会进一步向右进行,使得钢液中的 Ca 含量进一步降低。在 VD 过程中钢液中 Ca 含量的降低,会使得本来在 LF 过程中接近平衡的钢渣反应继续发生,促进了钢液中的 Al 进一步与炉渣中的 CaO 反应。将式(2)和式(3)合并,可以得到式(4)。

$$2[\text{Al}] + 3(\text{CaO}) = 3\text{Ca}_{(\text{g})} + (\text{Al}_2\text{O}_3)$$

$$\Delta G = \Delta G^0 + R \cdot T \cdot \ln \left\{ \frac{\left(\frac{p_{\text{Ca}}}{p^0} \right)^3 \cdot a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}}{a_{[\text{Al}]}^2 \cdot a_{(\text{CaO})}^3} \right\} \quad (4)$$

式中, ΔG 为吉布斯自由能变, J/mol ; ΔG^0 为标准吉布斯自由能变, J/mol ; R 为理想气体常数, $8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; T 为热力学温度,在 VD 前取 1873 K 。

VD 过程中考虑 Ca 挥发后,为了对钢液中 Al 还原炉渣中 CaO 的反应平衡重新进行评估,需要进行相关的热力学计算。其中炉渣中各组元的活度使用分子和离子共存理论进行计算,数据选取 VD 前的炉渣组元成分。钢液中各组元的活度使用瓦格纳模型进行计算,表达式如式(5)。

$$a_i = f_i \cdot w_i = 10^{\sum e_j^i \cdot w_j} \cdot w_i \quad (5)$$

式中, f_i 为钢液中组元 i 的活度系数; w_i 为钢液中组元 i 的质量分数, %; e_j^i 为各元素之间的一次相互作用系数,相关热力学数据见表 2。式(4)的 ΔG^0 可以通过表 3 中数据计算求得式(6)。

$$\Delta G^0 = 344300 + 54.2T \quad (6)$$

结合 VD 前钢液和炉渣成分以及相关热力学数据,计算了不同 Ca 分压条件下反应式(4)的吉布斯自由能变,结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,随

表 2 一次相互作用系数相关数据 e_i^j
Table 2 Correlation data of primary interaction coefficient e_i^j

e_i^j	C	Si	Mn	Cr	Al	Ca	O
Al	0.091	0.005 6	0.012	0.025	0.045	-0.47	-6.6
Ca	-0.34	-0.097	-0.015 6	-	-0.072	-0.002	-780
Si	0.18	0.11	0.002	-0.000 3	0.058	-0.067	-0.23

着 Ca 分压的增加,反应式(4)的吉布斯自由能变呈现增加的趋势。当 Ca 分压为 66 Pa 时,反应式(4)的吉布斯自由能变为 0,即此时钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 的反应处于平衡状态。当 Ca 分压进一步降低时,反应式(4)的吉布斯自由能变也随之降低而小于 0,此时,反应会继续向右进行,即钢液中的 Al 会进一步还原炉渣中的 CaO,导致钢液中的 Al 和炉渣中的 CaO 含量均出现明显的下降。

表 3 相关标准吉布斯自由能变化数据

Table 3 Data on Gibbs free energy changes of relevant standards

化学反应	自由能 $\Delta G^\theta / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$
$(\text{Al}_2\text{O}_3)=2[\text{Al}]+3[\text{O}]$	$1\,225\,000-393.8T$
$(\text{SiO}_2)=[\text{Si}]+2[\text{O}]$	$576\,440-218.2T$
$(\text{CaO})=[\text{Ca}]+[\text{O}]$	$645\,200-148.7T$
$\text{Ca(g)}=[\text{Ca}]$	$122\,100-35.5T$

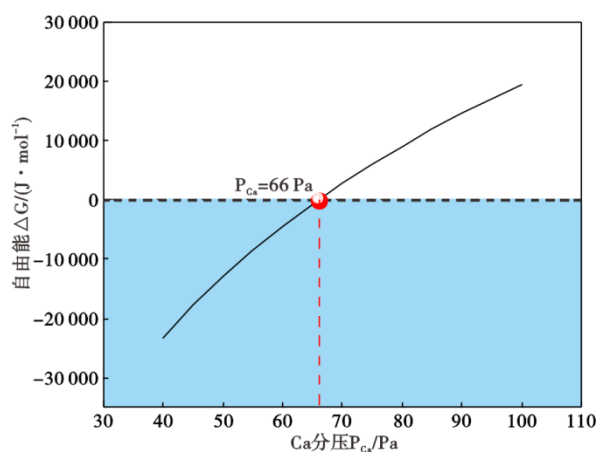


图 6 Ca 分压与吉布斯自由能变的关系

Fig. 6 Relationship between Ca partial pressure and Gibbs free energy change

图 7 所示为 VD 过程夹杂物中 CaO 含量增加机理的示意图。由于钢液中的 Al 还原炉渣中 CaO 而生成的 Ca 首先会进入钢液中,然后在气体搅拌的作用下,进入钢液中的 Ca 会不断在钢液内部扩散。钢液中的溶解 Ca 一部分会在钢液和低压气氛界面挥发进入气相,还有一部分溶解 Ca 会与钢液中低 CaO

或者无 CaO 的夹杂物接触并发生反应。当反应式(4)的吉布斯自由能变小于 0 时,钢液中的 Al 会与炉渣中的 CaO 反应,炉渣不断向钢液中传 Ca,一部分 Ca 会与夹杂物反应对夹杂物进行变性,使得夹杂物中的 CaO 含量升高。 Al_2O_3 或者 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 类夹杂物熔点高,且与钢液润湿性差,容易团聚长大并上浮去除。当这些夹杂物中 CaO 含量开始升高时,会导致夹杂物的熔点降低并且与钢液的润湿性变好,此时,夹杂物则更容易留在钢液中,另外单个夹杂物的尺寸会偏大,最终遗留到轧材影响产品质量。

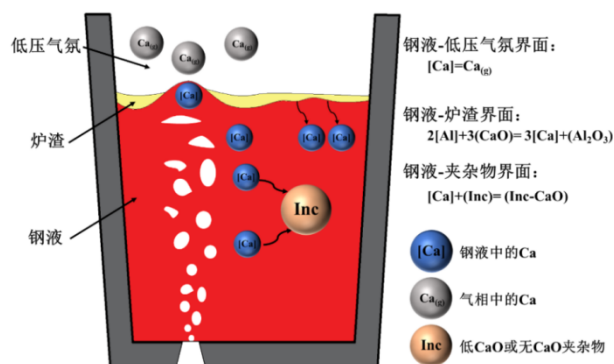


图 7 VD 过程夹杂物中 CaO 含量增加机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the mechanism of increasing of CaO content in inclusions during VD process

在实际的生产中,钢液中 Ca 的挥发行为会更复杂,针对炉渣成分对 VD 过程夹杂物的影响,重点考虑了炉渣之间的热力学平衡问题,对实际的 Ca 挥发行为进行了简化。关于钢液中 Ca 挥发的动力学以及其他方面的影响则需要更进一步的研究。

3.2 钢液和炉渣成分对钢渣反应的影响

为了降低夹杂物中的 CaO 含量,需要减弱 VD 过程中钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 的反应,因此,需要对钢液和炉渣成分对钢渣反应的影响进行研究。从反应式(4)可以看出,为了减弱该反应向右进行,需要提高炉渣中的 Al_2O_3 活度以及 Ca 的分压,需要降低钢液中 Al 的活度以及炉渣中 CaO 的活度。

首先研究了炉渣成分对炉渣中 Al_2O_3 和 CaO 活度的影响。同样使用分子离子共存理论对炉渣中

各组元的活度进行计算,考虑的炉渣成分为 CaO 、 CaF_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 五元渣系。为了简化计算,仅考虑两种组元的变化对炉渣 Al_2O_3 活度和 CaO 活度的影响,比如当炉渣中 CaF_2 含量下降时, CaO 含量相应地升高,此时,固定 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 含量。由于炉渣中 MgO 含量最低,且对 Al_2O_3 和 CaO 活度影响较小,因此计算中固定炉渣 MgO 质量分数为 3%。根据 VD 前炉渣成分,计算了 CaF_2 - CaO 、 CaF_2 - Al_2O_3 、 CaF_2 - SiO_2 成分变化对炉渣中 Al_2O_3 和 CaO 活度的影响,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,当炉渣中 $w[\text{CaF}_2]$ 小于 8.72% 时,随着 CaF_2 含量的降低,升高 Al_2O_3 或者 SiO_2 含量可以显著提高炉渣中 Al_2O_3 活度,也可以比较明显地降低炉渣中 CaO 活度。

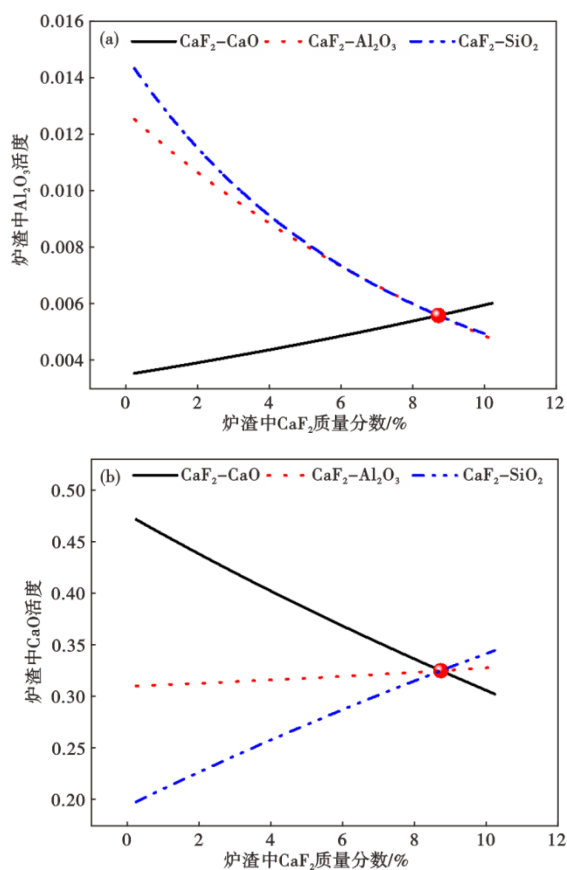


图 8 炉渣成分对 Al_2O_3 和 CaO 活度的影响

Fig. 8 The effect of slag composition on the activities of Al_2O_3 and CaO

轴承钢冶炼在 LF 过程中为了实现较低的氧含量,会选择高碱度的炉渣成分,即炉渣中有较高的 $w[\text{CaO}]$ (在 50% 以上) 和较低的 $w[\text{SiO}_2]$ (在 10% 以内)。这样的炉渣成分会导致炉渣中 CaO 活度偏高,当进入 VD 过程后,炉渣中较高的 CaO 活度会更

有利于钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 反应,进而导致夹杂物中 CaO 含量升高。在考虑到 LF 过程炉渣 CaO 活度偏高的前提下,结合图 8 的计算结果,此时可以通过增加炉渣中 Al_2O_3 活度来抑制钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 反应。

计算分析了炉渣成分对钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 反应的影响后,继续研究了钢液成分对该反应的影响。根据反应式(4)计算了不同 Al 含量和不同 Ca 分压条件下钢液中的 Al 与炉渣 CaO 反应的吉布斯自由能变,结果如图 9 所示。

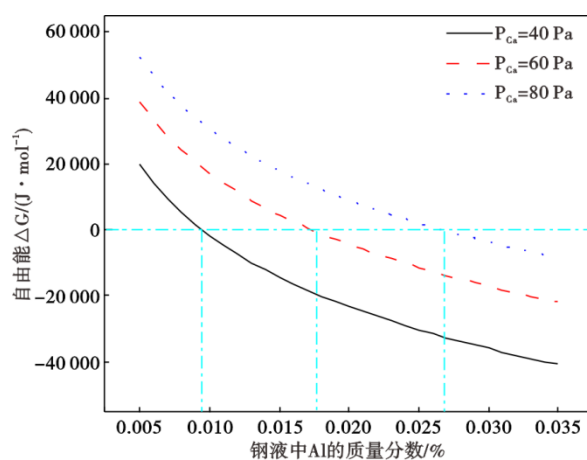


图 9 钢液中 Al 含量对炉渣反应吉布斯自由能变的影响

Fig. 9 Effect of Al content in molten steel on Gibbs free energy change of steel slag reaction

为了使钢液中 Al 与炉渣中 CaO 反应平衡,即反应的吉布斯自由能变为 0,在 Ca 分压为 40 Pa 时,钢液所需要的 $w[\text{Al}]$ 为 0.009%,而当 Ca 分压为 80 Pa 时,钢液中所需要的 $w[\text{Al}]$ 则为 0.027%。从炉渣成分控制角度来看,需要增加炉渣中 Al_2O_3 活度来抑制钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 反应,在此前提下,为了保证反应更好得到抑制,同时需要适当调整钢液中 Al 的含量,使得钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 反应的吉布斯自由能变尽可能大于 0。另外从图 9 的计算结果也可以看出,在保证脱气效率的前提下,适当增加 VD 过程中的压力也有助于抑制钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 反应。

4 结论

研究了 VD 过程夹杂物中 CaO 含量的演变机制,讨论了钢液和炉渣成分对钢渣反应的影响,为后续控制 VD 过程中夹杂物 CaO 含量的增加提供了理论支撑,得出以下结论。

1) 经过 VD 过程, 炉渣中 $w[\text{CaO}]$ 降幅达 14%, 而钢液中 $w[\text{Al}]$ 的烧损率高达 70%, 钢液中 $w[\text{Ca}]$ 增幅达 37%, 这是由于钢液中的 Al 与炉渣中的 CaO 反应, 使得炉渣向钢液中传 Ca。夹杂物中的平均 $w[\text{CaO}]$ 从 VD 前的 6.8% 升高到了 11.3%, 增幅达 66%, 说明 VD 过程中钢液中升高的 Ca 与夹杂物进一步反应, 使得夹杂物中 CaO 含量进一步升高。

2) 理想的动力学条件和 VD 过程中 Ca 的蒸发共同触发并有望进一步增强钢液中 Al 和炉渣中 CaO

之间的化学反应, 使得炉渣中的 Ca 进入钢液, 其中, 一部分溶解 Ca 会与钢液中低 CaO 或者无 CaO 的夹杂物接触并发生反应, 使得夹杂物中的 CaO 含量升高。

3) 钢液和炉渣成分对钢渣反应的影响计算结果表明, 为了抑制 VD 过程钢渣反应, 可以增加炉渣中 Al_2O_3 和 SiO_2 的含量来增加炉渣中的 Al_2O_3 活度和降低炉渣中 CaO 的活度; 还可以采取降低钢液中的 Al 含量和增加 VD 过程压力等措施。

参考文献

- [1] Uesugi T. Recent development of bearing steel in Japan[J]. Tetsu-to-Hagane, 1988, 74(10): 1889-1894.
- [2] 尹青, 曹文全, 吴小林, 等. 高洁净轴承钢 GCr15 滚动接触疲劳机制研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 113-120.
- [3] 規泰小熊, 久原田, 達雄酒井. 軸受鋼の長寿命回転曲げ疲労における内部起点型疲労破壊メカニズム[J]. 材料, 2003, 52(11): 1292-1297.
- [4] Hashimoto K, Fujimatsu T, Tsunekage N, et al. Study of rolling contact fatigue of bearing steels in relation to various oxide inclusions[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1605-1611.
- [5] 张建斌, 徐建飞, 王昆鹏, 等. GCr15 轴承钢连铸过程 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物形成机理[J]. 钢铁, 2023, 58(5): 83-91.
- [6] Monnot J, Héritier B, Cogne J. Relationship of melting practice, inclusion type, and size with fatigue resistance of bearing steels [C]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1988: 149-165.
- [7] Kato Y, Masuda T, Kawakami K, et al. Recent improvements in cleanliness in high carbon chromium bearing steel[J]. ISIJ International, 1996, 36: S89-S92.
- [8] 张蓬朝, 李光强, 胡可, 等. 精炼渣对钢中钛含量和洁净度的影响[J]. 钢铁, 2025, 60(2): 67-75+93.
- [9] 李伟涛, 武法普, 于光富, 等. GCr15 轴承钢冶金生产中非金属夹杂物特性和演变规律[J]. 特殊钢, 2025, 46(1): 79-86.
- [10] Shirabe K, Szekely J. A mathematical model of fluid flow and inclusion coalescence in the R-H vacuum degassing system[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1983, 23(6): 465-474.
- [11] Zhang J, He Y, Liu J H, et al. The effects of Soluble Gas Floation Technology on the flow field of ladle and inclusion removal in RH refine process[J]. Vacuum, 2019, 168: 108803.
- [12] Yang G W, Wang X H, Huang F X, et al. Transient inclusion evolution during RH degassing[J]. Steel Research International, 2014, 85(1): 26-34.
- [13] Treadgold C J. Behaviour of inclusions in RH vacuum degasser [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2003, 30(2): 120-124.
- [14] Kwon Y J, Zhang J, Lee H G. A CFD-based nucleation-growth-removal model for inclusion behavior in a gas-agitated ladle during molten steel deoxidation [J]. ISIJ International, 2008, 48(7): 891-900.
- [15] Zheng S G, Zhu M Y. Modelling effect of circulation flow rate on inclusion removal in RH degasser [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(12): 1243-1248.
- [16] Stenholm K, Andersson M, Jönsson P. Change of inclusion characteristics during vacuum degassing of tool steel [J]. Steel Research International, 2006, 77(6): 392-400.
- [17] Riyahimalayeri K, Ölund P, Selleby M. Effect of vacuum degassing on non-metallic inclusions in an ASEA-SKF ladle furnace [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2013, 40(6): 470-477.
- [18] 刘春伟, 张昊, 曹磊, 等. VD 低碱度渣对 GCr15 轴承钢夹杂物的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(6): 78-82.
- [19] 李伟涛, 武法普, 于光富, 等. GCr15 轴承钢冶金生产中非金属夹杂物特性和演变规律[J]. 特殊钢, 2025, 46(1): 79-86.
- [20] Stenholm K, Andersson M, Nzotta M, et al. Effect of top slag composition on inclusion characteristics during vacuum degassing of tool steel [J]. Steel Research International, 2007, 78(7): 522-530.
- [21] Almcraantz M, Andersson M A T, Jönsson P G. Determination of inclusion characteristics in the asea-SKF process using the modified spark-induced OES technique as a complement in studying the influence of top slag composition [J]. Steel Research International, 2005, 76(9): 624-634.