



## VD 低碱度渣对 GCr15 轴承钢夹杂物的影响

刘春伟<sup>1</sup>, 张昊<sup>2</sup>, 曹磊<sup>2</sup>, 王国承<sup>2,3</sup>

(1 山东钢铁股份有限公司莱芜分公司, 莱芜 271104; 2 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051;

3 辽宁省高校冶金工程重点实验室, 鞍山 114051)

**摘要:**为了减轻铝脱氧 GCr15 轴承钢中 B 类和 D 类夹杂物的危害, 开展了 VD 低碱度渣和正常碱度渣精炼的对比工业试验研究。结果显示, 与正常碱度精炼渣相比, 碱度为 1.96 的精炼渣可使连铸坯中塑性夹杂物比例由 14.81% 上升为 40.65%; 同时, 全氧(T. O)含量由  $7.7 \times 10^{-6}$  下降至  $4.9 \times 10^{-6}$ , 全铝(T. Al)和酸溶铝( $Al_s$ )含量由  $279 \times 10^{-6}$ 、 $210 \times 10^{-6}$  分别下降至  $80 \times 10^{-6}$ 、 $75 \times 10^{-6}$ 。热力学计算表明, 低碱度精炼渣引起钢液中[Si]活度增大复合夹杂中  $Al_2O_{3(incl)}$  含量下降, 钢中酸溶铝( $Al_s$ )含量落在与塑性夹杂物平衡对应的等铝浓度线范围内, 理论计算与试验结果吻合。VD 低碱度渣精炼有利于实现轴承钢夹杂物塑性化控制。

**关键词:** GCr15 轴承钢; 夹杂物; 塑性; VD 低碱度渣

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00098 **中图分类号:** TF775

## Effect of VD Low Basicity Slag on Inclusions of GCr15 Bearing Steel

Liu Chunwei<sup>1</sup>, Zhang Hao<sup>2</sup>, Cao Lei<sup>2</sup>, Wang Guocheng<sup>2,3</sup>

(1 Laiwu Company, Shandong Iron and Steel Company Ltd., Laiwu 271104, China; 2 School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 3 Key Laboratory of Metallurgy Engineering Liaoning Province, Anshan 114051, China)

**Abstract:** In order to reduce the harm of B-type and D-type inclusions in Al deoxidized GCr15 bearing steel, a comparative industrial experimental study was conducted on refining VD low alkalinity slag and normal alkalinity slag. The results showed that when refining slag alkalinity was reduced from 9.34 to 1.96, the proportion of plastic inclusions in the steel increased from 14.81% to 40.65%. As the same time, the content of total oxygen (T. O) decreased from  $7.7 \times 10^{-6}$  to  $4.9 \times 10^{-6}$ ; the content of total aluminum (T. Al) and acid-soluble aluminum ( $Al_s$ ) decreased from  $279 \times 10^{-6}$  and  $210 \times 10^{-6}$  respectively to  $80 \times 10^{-6}$  and  $75 \times 10^{-6}$ . Thermodynamic calculation shows that the increase of [Si] activity in the liquid steel causes the decrease of  $Al_2O_{3(incl)}$  content in the composite inclusion, and the acid soluble aluminum ( $Al_s$ ) content in the steel falls within the range of equal aluminum concentration lines corresponding to plastic inclusions, the theoretical calculations are consistent with experimental results. The VD refining with low basicity slag is beneficial for achieving control over the plasticization of inclusions in bearing steel.

**Key Words:** GCr15 Bearing Steel; Inclusions; Plasticity; VD Low Basicity Slag

轴承作为机械设备中必不可少的关键零部件, 在高载荷长时间服役条件下将出现疲劳失效。非金属夹杂物是降低轴承钢疲劳性能的主要因素之一, 其尺寸、数量、类型和分布决定了夹杂物的破坏性<sup>[1-4]</sup>, 降低硬质脆性夹杂物比例是提升轴承钢抗疲劳性能的有效途径<sup>[5-6]</sup>。目前, 国内外生产高品质轴承钢主要采用铝脱氧配合高碱度炉渣进行 LF、VD 精炼的生产工艺, 但高碱度炉渣不可避免地存在 D 类和 DS 类脆性夹杂物, 易造成应力集中, 从而在夹杂物与钢基体的交界处产生疲劳裂纹源, 最终在高循环负荷条件下发生疲劳断裂<sup>[7-11]</sup>, 所以, 对此类夹

杂物的去除或改性至关重要<sup>[12-13]</sup>。目前, 部分学者尝试硅锰脱氧和低碱度精炼渣操作控制轴承钢中 D 类和 DS 类夹杂物, 得到了变形能力较好的硅酸盐夹杂, 一般来说, 硅锰脱氧轴承钢中氧含量相比于铝脱氧较高<sup>[13-14]</sup>。因此, 在保证钢中氧含量较低的情况下, 控制 D 类和 DS 类夹杂物显得尤为关键。

本试验以 GCr15 轴承钢为研究对象, 通过提出合理低碱度 VD 精炼渣代替传统高碱度精炼渣对铝脱氧轴承钢进行精炼。通过提高 VD 精炼渣中的  $SiO_2$  含量, 将钢中夹杂物成分控制在塑性区范围内, 稳定控制塑性夹杂物的生成。这一变渣操作大幅

度降低钢中脆性夹杂物的比例,使连铸坯中形成以硅酸盐类为主的塑性夹杂物,在保证钢液全氧含量控制在 $4 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ 的情况下,实现钢中D类和DS类夹杂的低含量控制。

## 1 试验材料及方法

国内某钢厂GCr15轴承钢的生产流程为电弧炉(EAF)→钢包精炼炉(LF)→真空脱气装置(VD)→连铸(CC)。产线额定容量为50 t,连铸坯尺寸为 $220 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 。低碱度精炼渣试验方法为钢包进入VD精炼之前,将原有顶渣进行变渣操作,主要调整了VD精炼过程精炼渣的碱度以及渣中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和MgO的含量。工业试验中将VD精炼开始的炉渣二元碱度 $R(w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2))$ 由9.34调整至2.0。主要操作步骤如下:

(1)按 $R=2.0$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=25\%$ 、 $w(\text{MgO})=6\%$ 为目标,根据上一炉LF出站的精炼渣成分进行计算,得出试验炉次变渣操作所需的炉渣添加量。

(2)钢包入VD工序前进行扒渣操作加入目标成分所需的硅石、石灰和氧化镁(按其收得率加入钢包)。

试验分别在LF出站、VD破空阶段和连铸坯上取钢样或渣样,连铸坯取样位置为连铸坯横截面中心位置上四分之一处。

利用X射线荧光光谱仪(X-ray fluorescence spectrophotometer, XRF)对精炼渣成分进行测量;总铝含量(T.Al)通过电感耦合等离子体质谱法测定(inductively coupled plasma mass spectrometry),酸溶铝( $\text{Al}_s$ )含量采用铬天青-S分光光度法检测,其他组分的含量采用直读光谱仪(型号:OBLF QSN750)进行检测。

线切割制备 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 试样,并磨抛,应用场发射扫描电镜(FESEM,型号ZEISS SIGMA HD)、能谱仪(EDS,型号Oxford-X-Max 50  $\text{mm}^2$ )分析试样中夹杂物形貌、成分、分布,应用OTS全自动钢中非金属夹杂物分析系统,对连铸坯钢样中非金属夹杂物颗粒进行成分、尺寸和数量分

析,扫描面积为 $100 \text{ mm}^2$ 。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 钢和精炼渣组成

VD精炼渣成分变化见表1。1号试验为高碱度VD精炼渣,在进入VD工序前碱度为9.34,VD破空后精炼渣碱度下降至7.83;2号试验为低碱度VD精炼渣,在进入VD工序前碱度为1.96,VD破空后精炼渣碱度上升至3.14。

表1 不同碱度VD精炼渣成分变化(质量分数)

		%				
试验	工序	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	R
1	进VD前	55.59	5.95	34.47	5.33	9.34
	VD破空后	52.86	6.75	34.54	5.66	7.83
2	进VD前	46.26	23.65	24.87	4.96	1.96
	VD破空后	44.12	14.06	26.82	13.51	3.14

1号、2号试验钢的成分见表2,由表2中数据可以看出,变渣操作前后,钢中全氧(T.O)含量、全铝(T.Al)含量、酸溶铝( $\text{Al}_s$ )含量和[Ca]含量有所下降,[S]含量有所上升,能够满足GCr15轴承钢成分要求。

### 2.2 夹杂物形貌和尺寸分布

1号和2号试验连铸坯试样中夹杂物分析如图1所示,其中图1(a)~(c)为1号试样,图1(d)~(f)为2号试样。图1(a)为硅酸盐夹杂物,其形貌多为不规则块状,尺寸都小于 $4 \mu\text{m}$ ;图1(b)为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物,形貌多为块状,尺寸都小于 $5 \mu\text{m}$ ;图1(c)为TiN夹杂物,形貌多为棱角分明的块状,尺寸都小于 $5 \mu\text{m}$ ;图1(d)为硅酸盐夹杂物,其形貌多为不规则块状,尺寸都小于 $2 \mu\text{m}$ ;图1(e)为MnS-钙铝酸盐复合夹杂物,其形貌多为类球状,尺寸都小于 $3 \mu\text{m}$ ;图1(f)为MnS包裹的以 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 为核心的复合夹杂物,其形貌多为类球状,尺寸都小于 $4 \mu\text{m}$ 。OTS颗粒分析报告中的颗粒尺寸得出1号和2号连铸坯中 $13 \mu\text{m}$ 以下的夹杂物分别占总数的93.90%和97.29%。

表2 不同VD精炼渣碱度的连铸坯成分(质量分数)

		%								
试验	工序	C	Si	Mn	P	S	T.Al	$\text{Al}_s$	T.O	Ca
1	进VD前	0.968	0.219	0.305	0.010 4	0.002 2	0.046 3	0.039 5	0.001 09	0.001 0
	VD破空后	0.977	0.222	0.301	0.010 7	0.001 8	0.027 9	0.021 0	0.000 77	0.001 0
2	进VD前	0.946	0.221	0.300	0.012 5	0.004 4	0.037 4	0.030 5	0.001 13	0.001 0
	VD破空后	0.979	0.243	0.291	0.012 2	0.004 7	0.008 0	0.007 5	0.000 49	0.000 2

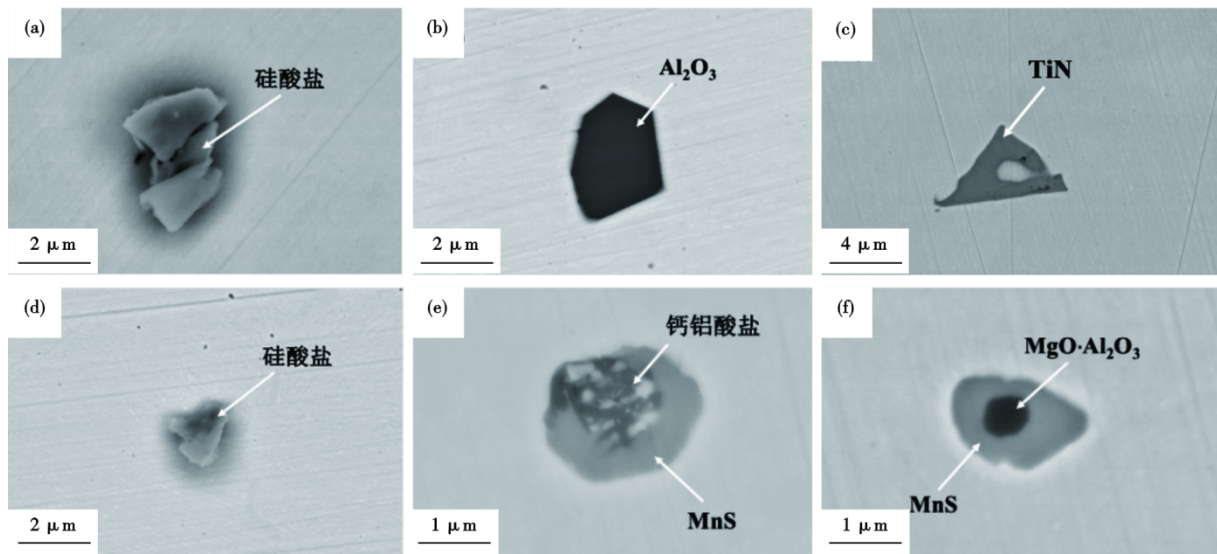


图 1 不同 VD 精炼渣碱度的连铸坯中原始夹杂物形貌: (a) ~ (c) 1 号试验; (d) ~ (f) 2 号试验

Fig. 1 Morphology of original inclusions in continuous casting billet with different basicity of VD refining slag : (a) ~ (c) experiment 1 ; (d) ~ (f) experiment 2

铸坯样品的夹杂物颗粒尺寸分布如图 2 所示, OTS 分析相同检测面积发现, 1 号、2 号试验的连铸坯中夹杂物数量分别为 1 032、850 个。其中, 1 号、2 号试验的连铸坯中大于 3 μm 的 TiN 夹杂物分别检为 14 个和 0 个。因此, 低碱度 VD 精炼渣对控制大于 3 μm 的 TiN 可能有益。从图 2 中还可以发现, 经变渣处理后的轴承钢中夹杂物的颗粒尺寸有细化趋势, 2 号试样连铸坯中未发现尺寸大于 38 μm 夹杂物。

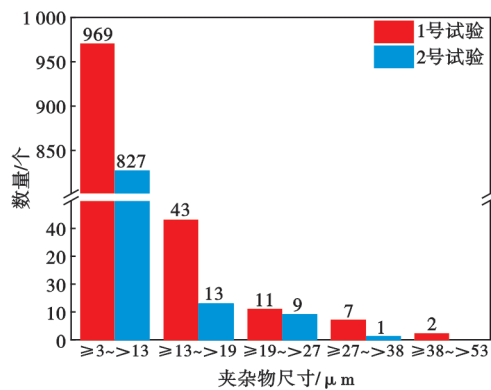


图 2 1 号和 2 号连铸坯中夹杂物尺寸分布

Fig. 2 Size distribution of inclusions in No. 1 and No. 2 continuous casting billets

### 2.3 夹杂物塑性化分析

用 FactSage 7.2 热力学软件的 Phase Diagram 模块计算得到的等温截面相图如图 3 所示。对于 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO 系三元相图, 本文将小于 1 400 °C 等

温截面定义为塑形区<sup>[15]</sup>, 将 1 400 ~ 1 500 °C 等温截面定义为次塑形区, 并分别将两次试验连铸坯中夹杂物 OTS 检测结果按其成分置于 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO 系等温截面相图。由图 3 可知, 钢中夹杂物随着炉渣-钢液-夹杂物反应后, 夹杂物组成倾向于假硅灰石、钙斜长石和钙黄长石相交界中生成, 多为熔点 ≤ 1 500 °C 塑性较好的复合夹杂物。图 3(a) 夹杂物塑化率为 14.81%; 图 3(b) 夹杂物塑化率为 40.65%。因此, 降低 VD 精炼渣碱度可以有效地增加塑性夹杂物的数量。

### 2.4 钢液-夹杂物反应热力学

精炼过程渣-钢反应控制夹杂物是通过控制钢液成分来实现的<sup>[16]</sup>, 在炼钢温度下, 精炼渣通过与钢液中的脱氧元素建立化学反应平衡关系, 对夹杂物的成分进行控制, 通过调节轴承钢 VD 精炼渣的碱度、组成来实现对钢中夹杂物的塑性化控制。根据钢中 Al、Si 和 O 的相互作用活度系数<sup>[17]</sup>, 计算得出 1873K 下钢中各元素的活度系数:  $f_{Si} = 1.60$ ,  $f_{Al} = 1.22$ 。

钢中 [Si] 与复合夹杂物中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3(inc)</sub> 之间发生的化学反应方程式和标准吉布斯自由能变化分别如式(1)和式(2)<sup>[18]</sup>。



$$\Delta G^0 = 658\,200 - 107.1T \quad (2)$$

平衡常数如式(3)所示, 根据式(2)和式(3)得到钢中等铝浓度线计算公式(4)。

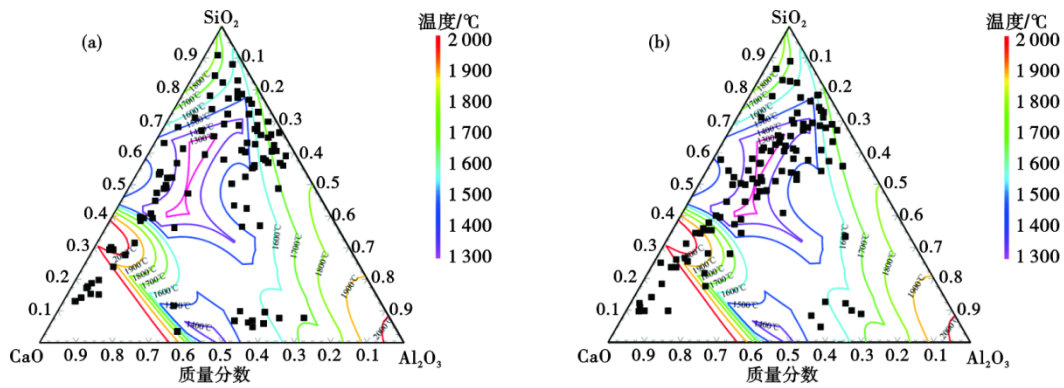


图3 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO系轴承钢中的夹杂物成分分布图: (a) 1号试验, (b) 2号试验

Fig. 3 Composition distribution diagram of inclusions in SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO series bearing steel: (a) experiment 1, (b) experiment 2

$$K = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2 \cdot a_{[\text{Si}]}^3}{a_{[\text{Al}]}^4 \cdot a_{\text{SiO}_2}^3} = \frac{f_{\text{Si}}^3 \cdot [\% \text{Si}]^3 \cdot a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2}{f_{\text{Al}}^4 \cdot [\% \text{Al}]^4 \cdot a_{\text{SiO}_2}^3} \quad (3)$$

$$[\% \text{Al}] = \left( \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2 \cdot f_{\text{Si}}^3 \cdot [\% \text{Si}]^3}{a_{\text{SiO}_2}^3 \cdot f_{[\text{Al}]}^4 \cdot e^{-\frac{\Delta G_{\text{Al-SiO}_2}^0}{RT}}} \right)^{1/4} \quad (4)$$

式中,  $\Delta G^0$  为吉布斯自由能, J/mol;  $a_i$  为反应物  $i$  的活度;  $f_i$  为反应物  $i$  在溶液中的活度系数;  $[\%i]$  为组分  $i$  的质量分数。

根据图3的SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO系等温线可知,当夹杂物处于钙斜长石、磷石英和假硅灰石及相邻的低熔点区域时,复合夹杂物中SiO<sub>2</sub>的含量为30%~70%,根据以上条件使用FactSage 7.2的Phase Diagram模块计算复合夹杂物中等SiO<sub>2</sub>活度线,如图4所示。等SiO<sub>2</sub>活度线随着SiO<sub>2(inc)</sub>浓度的提高而升高,计算结果表明当复合夹杂物中SiO<sub>2(inc)</sub>的含量为30%~70%时, SiO<sub>2</sub>的活度为0.001~0.9。

将式(4)结合复合夹杂物中SiO<sub>2</sub>活度0.001~0.9计算1873 K下等铝浓度线:利用FactSage 7.2和FToxid数据库以及Phase Diagram模块计算了SiO<sub>2</sub>-

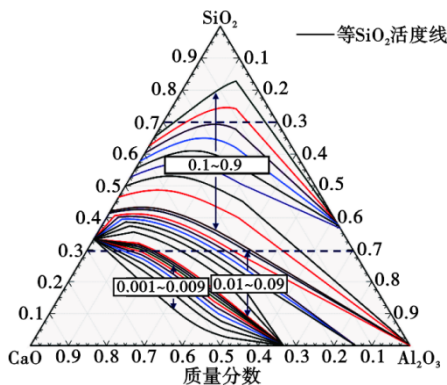


图4 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO系中等SiO<sub>2</sub>活度图

Fig. 4 Activity diagram of SiO<sub>2</sub> in SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO series.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO系等铝浓度图并与钢中实际铝含量结合。FactSage 7.2计算后的等铝浓度线与钢中实际铝含量如图5所示,当夹杂物中SiO<sub>2</sub>的含量为30%~70%时,等铝活度线范围0~100 × 10<sup>-6</sup>为本试验的目标[Al]含量。有研究表明,随着Al<sub>s</sub>的上升,夹杂物偏离低熔点区域的趋势增大,当Al<sub>s</sub>上升到150 × 10<sup>-6</sup>以上时,大部分夹杂物成分偏离了低熔点区域<sup>[19]</sup>。因此,保证合理的Al<sub>s</sub>含量有益于塑性夹杂物控制,根据表2,2号试验钢中Al<sub>s</sub>含量75 × 10<sup>-6</sup>与理论计算的目标[Al]含量吻合,并与图3(b)夹杂物成分分布吻合。

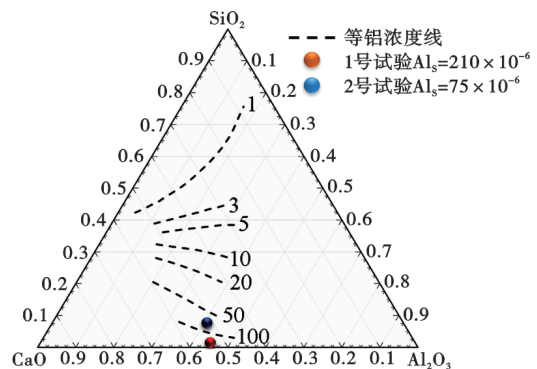


图5 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO系等铝浓度线与钢中Al<sub>s</sub>含量对照

Fig. 5 Comparison of Iso-[Al] lines in SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO series and the Al<sub>s</sub> contentt in the steel

在VD精炼过程中,渣中(SiO<sub>2</sub>)被钢液还原化学反应方程式如式(5)<sup>[20]</sup>:



首先考虑渣-钢反应,随着精炼渣碱度的降低,渣中(SiO<sub>2</sub>)的活度增加,使式(5)正向进行,即渣中SiO<sub>2</sub>含量减少、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量增加,钢中[Al]含量减少、[Si]含量增加,并结合式(1)夹杂物-钢反应可知,反

应正向进行,复合夹杂物中 $\text{Al}_2\text{O}_{3(\text{inc})}$ 和钢中 $[\text{Si}]$ 含量下降,复合夹杂物中 $\text{SiO}_{2(\text{inc})}$ 和钢中 $[\text{Al}]$ 含量上升。综上所述,降低VD精炼渣碱度,明显有利于复合夹杂物中 $\text{Al}_2\text{O}_{3(\text{inc})}$ 向 $\text{SiO}_{2(\text{inc})}$ 的转变,即脆性夹杂物向塑性夹杂物的转变。

### 3 结论

以铝脱氧GCr15轴承钢为研究对象,在VD精炼过程中采用变渣处理,所得结论如下。

(1)通过变渣操作将VD过程初渣碱度调整至 $R = 1.96$ ,渣中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 24.87\%$ 、 $w(\text{MgO}) = 4.96\%$ 时,夹杂物塑化比例由14.81%上升至40.65%,将大部分夹杂物成分控制在塑性区和半塑性区内。

(2)采用VD初渣碱度 $R = 1.96$ 精炼,连铸坯中全氧(T.O)含量为 $4.9 \times 10^{-6}$ 、全铝(T.Al)含量为 $80 \times 10^{-6}$ 、酸溶铝 $\text{Al}_s$ 含量为 $75 \times 10^{-6}$ 。热力学计算表明,钢中酸溶铝( $\text{Al}_s$ )含量与塑性夹杂物平衡对应的等铝浓度线范围吻合。低碱度精炼渣引起钢液中 $[\text{Si}]$ 活度上升,导致复合夹杂中 $\text{Al}_2\text{O}_{3(\text{inc})}$ 含量下降、 $\text{SiO}_{2(\text{inc})}$ 含量上升,使复合夹杂物向塑性夹杂物转变。

(3)两次不同VD精炼渣碱度对比,采用VD初渣碱度 $R = 1.96$ 时,夹杂物数量同比下降21.01%,基本消除了大于 $38 \mu\text{m}$ 的夹杂物。在夹杂物种类统计中,低碱度VD精炼渣的轴承钢中以 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (-MgO)系复合夹杂物为主,低碱度对控制大于 $3 \mu\text{m}$ 的TiN可能有益。

### 参考文献

- [1] 蒋鲤平,徐建飞,王昆鹏,等.高碳铬GCr15轴承钢中镁铝夹杂物形成与控制工艺实践[J].特殊钢,2022,43(4):41-45.
- [2] 曹文全,俞峰,王存宇,等.高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向[J].特殊钢,2021,42(1):1-10.
- [3] Gu C, Wang M, Bao Y, et al. Quantitative Analysis of Inclusion Engineering on the Fatigue Property Improvement of Bearing Steel [J]. Metals, 2019, 9(4): 476.
- [4] Gillner K, Henrich M, Münstermann S. Numerical study of inclusion parameters and their influence on fatigue lifetime [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111(6): 70-80.
- [5] Hashimoto K, Hiraoka K, Kida K, et al. Effect of sulphide inclusions on rolling contact fatigue life of bearing steels [J]. Materials Science and Technology, 2012, 28(1): 39-43.
- [6] Bertrand C, Molinero J, Landa S, et al. Metallurgy of plastic inclusions to improve fatigue life of engineering steels [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2003, 30(2): 165-169.
- [7] 张立峰,王升千,段加恒.轴承钢中非金属夹杂物和元素偏析[M].北京:冶金工业出版社,2017:14-73.
- [8] 雷家柳,杨玲,廖凯,等.GCr15轴承钢120 t LF精炼终点 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂的特性研究[J].特殊钢,2021,42(5):11-15.
- [9] 沈万林,张志成,罗小燕.60 t LF精炼终点GCr15轴承钢中氧化物夹杂特性的研究[J].特殊钢,2018,39(1):18-23.
- [10] Gu C, Bao P Y, Gan P, et al. An experimental study on the impact of deoxidation methods on the fatigue properties of bearing steels [J]. Steel Research International, 2018, 89(9): 1800129.
- [11] 赵新凯,石永生,刘世义,等.GCr15轴承钢精炼渣对夹杂物祛除行为的研究[J].特殊钢,2022,43(3):14-20.
- [12] 王昆鹏,王海洋,徐建飞,等.120 t BOF-LF-RH-CC流程GCr15轴承钢洁净度研究[J].特殊钢,2021,42(2):14-17.
- [13] 王仲亮,包燕平,顾超,等.基于非铝脱氧工艺的高品质轴承钢关键冶金技术研究[J].工程科学学报,2022,43(6):8-12.
- [14] 肖微,包燕平,王敏,等.非铝脱氧GCr15轴承钢的夹杂物演变和控制[J].钢铁,2021,56(1):37-42.
- [15] Zhang J C, Di Y Z, Hu H J, et al. Inclusion control of automotive spring steel in the basic oxygen furnace and ingot casting process [J]. Baosteel Technical Research, 2010, 4(2): 44-47.
- [16] Wang X H, Jiang M, Chen B, et al. Study on formation of non-metallic inclusions with lower melting temperatures in extra low oxygen special steels [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(7): 1863-1872.
- [17] Sigworth G K, Elliott J F. The thermodynamics of liquid dilute iron alloys [J]. Metal Science, 2013, 8(1): 298-310.
- [18] 何肖飞,王新华,陈书浩,等.低碱度低氧化铝精炼渣对帘线钢夹杂物控制[J].钢铁,2014,49(6):30-36.
- [19] 陈书浩,王新华,何肖飞,等.帘线钢中酸溶铝含量的变化及其对夹杂物的影响[J].钢铁,2011,46(10):42-47.
- [20] 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.