

焊瓶钢 LF 精炼过程夹杂物衍变研究

郭路召^{*}, 韩凯峰, 赵艳宇, 毛锋, 冀建立, 王建辉, 赵潇

北京首钢股份有限公司 炼钢作业部, 唐山 064404

Study on Inclusion Evolution of Welding Bottle Steel in LF Refining

Process

GUO Luzhao^{*}, HAN Kaifeng, ZHAO Yanyu, Mao feng, Ji jianli, WANG Jianhui, ZHAO

Xiao

Steelmaking Department, Beijing Shougang Co., Ltd., Tangshan 064404

1. 前言

随着市场对高附加值钢种的需求量越来越大, 严格控制钢中夹杂物水平成为钢铁冶炼流程中的热门课题^[1-3]。目前, 钢中夹杂物的控制主要通过 LF 精炼过程中底吹搅拌、钙处理和 RH 纯循环手段进行成分和数量控制。随着冶金工艺的优化, 夹杂物控制技术也取得了长足的进步。然而, 在生产焊瓶类钢种时, 由于该钢种的 Si 含量较低, 在生产过程中, 钢中的铝很容易氧化生成氧化铝类夹杂物, 这类夹杂物通常在浇注过程中粘附在上水口的内壁, 影响钢水可浇性。研究在 LF 工序中夹杂物的成分、尺寸、数量等因素的变化规律对于提高夹杂物水平有着重要的指导意义。

关于精炼的夹杂物控制问题, 国内外的很多学者进行了研究。王勇等人^[4]通过对国内某钢厂 BOF-LF-CC 工艺生产 50CrVA 弹簧钢进行全流程连续取样, 发现可通过适当提高精炼渣碱度, 或喂入适量钙线促使夹杂物充分转变为成分更加均匀的低熔点夹杂物。Jiang 等人^[5]研究通过研究 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 系精炼渣碱度由 3 至 8 升高的过程中, 碱度越高能够使夹杂物接近球形, 同时大多数夹杂物尺寸 < 5μm。Tang 等人^[6]报道了顶渣中 Al₂O₃ 含量对 CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO 成分类夹杂物的低熔点化起到重要作用, 当顶渣中 Al₂O₃ 含量在 18~35% 范围内变化时, 氧化铝含量越低, CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO 成分类夹杂物的熔点越低, 越容易形成球形夹杂物。Michelic 和 Bernhard^[7] 发现 Ti₂O₃ 类夹杂物可以在很短的时间内溶解进入渣中。Wang 等人^[8]当精炼渣碱度为 2.28, 加入 16% 的 Al₂O₃, 可以在 45min 内使夹杂物完成塑性化。Wang^[9]发现硅锰脱氧钢在低碱度精炼渣下冶炼, CaO-SiO₂-MnO-(MgO) 会转变为 CaO-SiO₂-Al₂O₃-(MgO) 类夹杂物。Li^[10] 等人通过确定钢水成分, 可以用热力学计算得到塑性化 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 夹杂物。Liu 等人^[11] 认为 MgO 耐火材料和 55%CaO-8%SiO₂-25%Al₂O₃-12MgO 对夹杂物成分产生影响, 夹杂物从 Al₂O₃ 转变为 CaO-Al₂O₃-MgO 类夹杂物。本文在借鉴前人的基础上, 研究了焊瓶钢在 CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO 系精炼渣以及钙处理工艺模式下, 夹杂物在进站、合金化后、喂线前和软吹后的成分、尺寸以及数量密度的变化规律, 以期来控制夹杂物水平上提供工艺优化的指导。

2. 试验研究方法

2.1. 工业生产流程

焊瓶钢的生产工艺流程为: KR 预处理→BOF→LF 精炼炉→CCM。表 1 和表 2 分别为分别为焊瓶钢的钢液目标成分控制范围和精炼渣成分控制范围。经过 KR 脱硫搅拌的铁水, 兑入转炉进行造渣脱磷, 终点碳含量(质量分数)控制在 0.02~0.04%, 在出钢过程中, 钢包中加入铝铁、锰铁等进行脱氧合金化, 加入烧结石灰和化渣剂进行预造渣。LF 过程的冶炼流程和取样环节如图。如图 1 所示, 进站后进行预吹氩、升

温造渣、强搅脱硫、成分微调 and 结束喂线软吹等操作，为探究造渣、合金化和喂线软吹对夹杂物类型变化的影响，分别在该环节取样。

表 1 焊瓶钢成分 (%)
Table 1 The composition of welding bottle steel

C	Si	Mn	P	S	Als
0.10~0.35	≤0.15	0.60~1.00	≤0.018	≤0.025	0.02~0.10

表 2 精炼渣成分 (%)
Table 2 The composition of refining slag

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	其它
进站	35~45	5~8	35~45	6~7	2~6	2~3	余量
结束	48~55	4~7	27~37	6~9	0.4~1.0	0.05~0.25	余量

2.2. 实验步骤

实验选取同一浇次的两炉钢作为研究对象，按照图 1 所示取样，对样品进行粗磨、细磨、抛光后，用扫描电镜 (SEM) 进行观察，并结合能谱仪 (EDS) 对其元素组成进行定量分析，然后对所得到的数据进行进一步处理和统计。

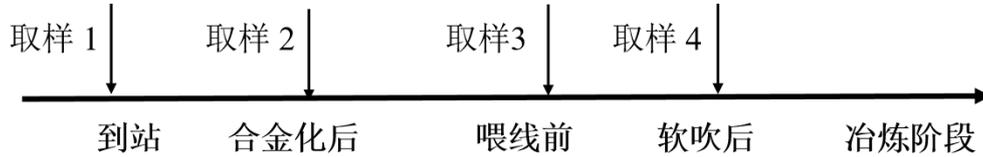


图 1 取样过程示意图

3. 结果与分析

通过扫描电镜对试样的检测，可以得出不同精炼环节夹杂物的形貌和成分类型，如图 2 所示。LF 进站时，夹杂物从成分上划分为两类，一类是 Al₂O₃-CaO-SiO₂，一类是 Al₂O₃-CaO-MgO，这是由于随着转炉炉后铝脱氧和冶炼的进行，渣钢之间产生反应使得夹杂物开始变性，同时炉后合金化过程也会带入一些杂质元素，比如 Ca、Mg 等物质，参与反应影响夹杂物的成分喂线前和随着钙处理和软吹的进行，夹杂物的成分类型未发生明显变化。

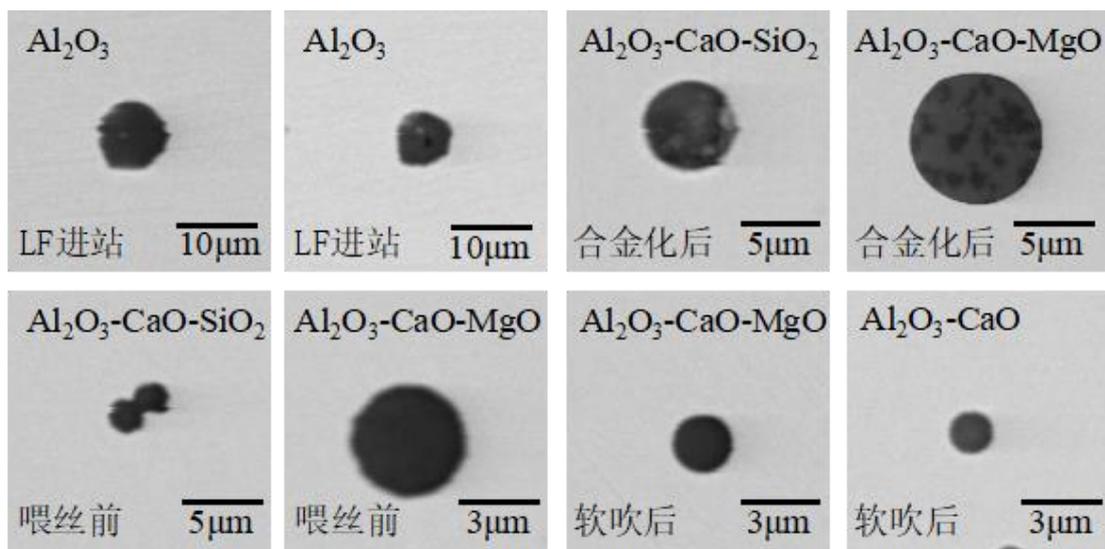


图 2 各工位典型微型夹杂物形貌与类型

Fig.2 Morphology and type of typical micro-inclusions in each process

将夹杂物分别绘入 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 三元相图中，得到冶炼过程各阶段的夹杂物成分分布如图 3 所示。由图 3 可见，LF 到站时钢液中主要是高 Al_2O_3 夹杂物，并且存在很多 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 类夹杂物，这是由于在生产过程中合金不纯含有一些 Ca 和 Mg 等元素，以及出钢加铝铁过程，渣钢之间的还原反应，使得夹杂物成分呈现此两类。精炼合金化后，钢中夹杂物的成分体系未发生明显变化，在 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 三元相图中，整体上夹杂物的成分沿着向 CaO 升高的方向进行演变，在 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 三元相图中，软吹结束后，夹杂物中镁铝尖晶石和钙铝酸盐仍存在，而 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 三元成分的夹杂物逐渐减少。

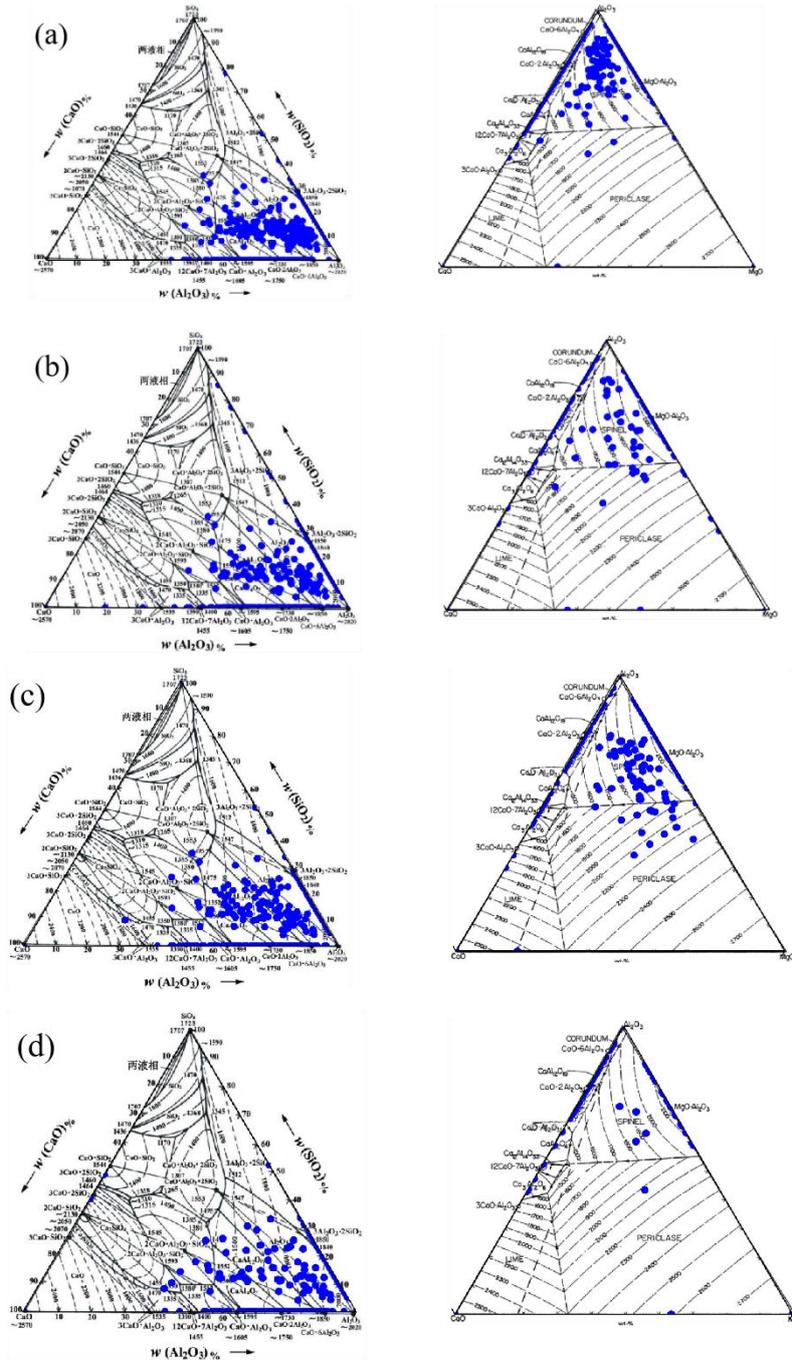


图 3 各工序夹杂物成分 (a) 进站；(b) 合金化后；(c) 喂线前；(d) 软吹后

Fig.3 Composition of inclusions during refining processes

4. 结论

(1) 在整个精炼流程中, 夹杂物的形貌主要为球形和近球形夹杂物, 在钢液循环中, 夹杂物通过运动、碰撞结合, 形成大尺寸夹杂物进行上浮。

(2) 钢液中夹杂物的转变主要是由高 Al_2O_3 夹杂物和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 以及 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 类夹杂物, 在经过精炼合金化后, 钢中夹杂物的成分体系未发生明显变化, 在 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ 三元相图中, 整体上夹杂物的成分沿着向 CaO 升高的方向进行演变, 在 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 三元相图中, 软吹结束后, 夹杂物中镁铝尖晶石和钙铝酸盐仍持续存在, 而 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ 三元成分的夹杂物逐渐减少。

参考文献

- [1] 刘南, 成功, 任英, 张立峰. 硅铁合金中金属钙元素对铝脱氧钢中夹杂物的影响[J]. 工程科学学报, 2022, 44(12):2069-2080.
- [2] 陈牒斌, 李光强, 张战, 黄世辉. 精炼渣和稀土 Ce 对 Fe-30Mn-10Al-1.1C 钢中非金属夹杂物的影响[J]. 武汉科技大学学报, 2022, 45(06):409-417.
- [3] 耿鑫, 宋波, 刘涛, 陈永峰, 许国方, 黄雁. 38CrMoAl 钢精炼过程夹杂物生成及演变规律[J]. 中国冶金, 2022, 32(11):106-114.
- [4] 王勇, 唐海燕, 吴拓, 李京社, 杨树峰. BOF-LF-CC 工艺生产 50CrVA 弹簧钢洁净度研究[J]. 工程科学学报, 2016, 38(S1):187-194.
- [5] Jiang M, Wang X H, Wang W J. Study on refining slags targeting high cleanliness and lower melting temperature inclusions in Al killed steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2012, 39(1):20-25.
- [6] Tang H Y, Wang Y, Wu G H, et al. Inclusion evolution in 50CrVA spring steel by optimization of refining slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24(9):879-887.
- [7] Michelic S K, Bernhard C. Experimental Study on the Behavior of TiN and Ti_2O_3 Inclusions in Contact with $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ Slags[J]. Scanning, 2017, 2017.
- [8] Wang Q, Wang L, Zhai J, et al. Evolution of Inclusions in Fe-13Cr Treated by $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ -Based Top Slag[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(1):564-572.
- [9] Wang K, Jiang M, Wang X, et al. Formation Mechanism of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(MgO)}$ Inclusions in Si-Mn-Killed Steel with Limited Aluminum Content During the Low Basicity Slag Refining[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016, 47(1):282-290.
- [10] Li J, Ju J T, Yang S, Guo Y P, et al. Influence of Top Slag on the Plasticity of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ Inclusions in 42CrMoA Crankshaft Steel[J]. Materials Science Forum, 2014, 804:285-288.
- [11] Liu C, Huang F, Wang X. The Effect of Refining Slag and Refractory on Inclusion Transformation in Extra Low Oxygen Steels[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2016, 47(2):1-11.