

# GCr15 轴承钢 EAF-LF-RH-CCM 流程夹杂物演变规律研究

尹德福, 汪开忠, 丁雷, 谢钊远, 张晓瑞

马鞍山钢铁股份有限公司技术中心, 安徽 马鞍山 243000

## Study on the Evolution of inclusions of GCr15 Bearing Steel in EAF-LF-RH-CCM process

Yin Defu, Wang Kaizhong, Dong Lei, Xie Zhaoyuan, Zhang Xiaorui

Technology Center, Ma'anshan Iron & Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243000, Anhui, China

### 1. 前言

GCr15 轴承钢被广泛应用于航空航天、轨道交通和机械制造等领域, 在复杂、严苛的运行环境下, 要求轴承具有高的洁净度、高的可靠性和高的疲劳寿命<sup>[1-4]</sup>。钢中氧化物夹杂物是显著影响轴承的可靠性和疲劳寿命的主要因素之一。因此, 钢厂一般都是采用 Al 脱氧和高碱度精炼渣工艺<sup>[5-8]</sup>进行脱氧, 获得较低的氧含量和氧化物夹杂物。在强还原剂条件下, 钢水中会生产镁铝尖晶石和钙铝酸盐复合型夹杂物<sup>[9-10]</sup>, 其易于在连铸水口聚集, 从而恶化钢水的可浇性, 并产生宏观夹杂物, 从而严重影响了轴承钢的产品质量。

本文系统研究了某钢厂“EAF→LF 精炼→RH 真空脱气→CCM 连铸”全流程生产 GCr15 轴承钢过程中的夹杂物演变规律, 通过针对性的过程取样, 使用 ASPEX 自动扫描电镜结合 FE-SEM 扫描电镜对试样进行检测和分析, 从而为轴承钢生产过程中的夹杂物控制提供一定的指导意义。

### 2. 生产工艺和研究方法

#### 2.1. 生产工艺

GCr15 轴承钢的生产工艺为: EAF→LF 精炼→RH 真空脱气→CCM 连铸, 其化学成分主要见表 1 所示。

表 1 GCr15 轴承钢的化学成分/wt%

Table 1 Composition of GCr15 bearing steel/wt%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti
0.95~1.01	0.15~0.35	0.25~0.45	≤0.015	≤0.010	1.43~1.65	≤0.20	≤0.10	≤0.0020

#### 2.2. 试验方法

在 LF 精炼初期、LF 精炼中期、LF 出站、RH 破空后、RH 出站和 CCM 连铸中包采用特制的桶样取样器进行取样, 然后切割成圆饼状样块, 和对应的成品试样进行粗磨、细磨和抛光, 制成金相试样。将金相试样在 ASPEX 自动扫描电子显微镜下进行检测分析, 主要对 1 $\mu$ m 以上的夹杂物进行统计。

同时, 将所取过程桶样加工成  $\Phi 5 \times 30$ mm 的圆棒状试样, 对其表面进行打磨和抛光, 使用惰性气体熔融红外吸收法检测钢中氧含量。

表 2 GCr15 轴承钢取样位置示意图

Table 2 Sample positions of GCr15 bearing steel

LF 精炼初期	LF 精炼中期	LF 出站	RH 破空后	RH 出站	CCM 连铸
√	√	√	√	√	√

### 3. 试验结果和分析

### 3.1. 全流程氧含量变化

GCr15 轴承钢生产过程中的氧含量变化情况如图 2 所示。在 LF 精炼初期,钢中氧含量达到了 16ppm,随着铝脱氧剂与钢水中的氧发生脱氧反应,LF 精炼中期的氧含量降低到 10ppm,随着 LF 精炼的持续,氧含量上升至 12ppm,这可能与 LF 精炼后期条件不好,钢水被一定程度的氧化导致。RH 真空脱气过程中,钢中的氧含量明显下降,到 RH 出站时钢中的氧含量达到了 4.1ppm。在随后的连铸浇铸过程中,全氧含量有所上升,这可能与中包保护浇筑效果不佳,钢水受到一定的二次氧化导致。

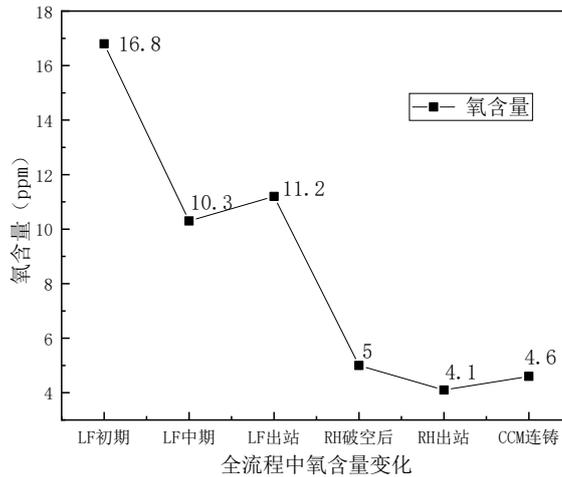


图 1 全流程氧含量变化情况

Fig.1 Change of oxygen content during whole process

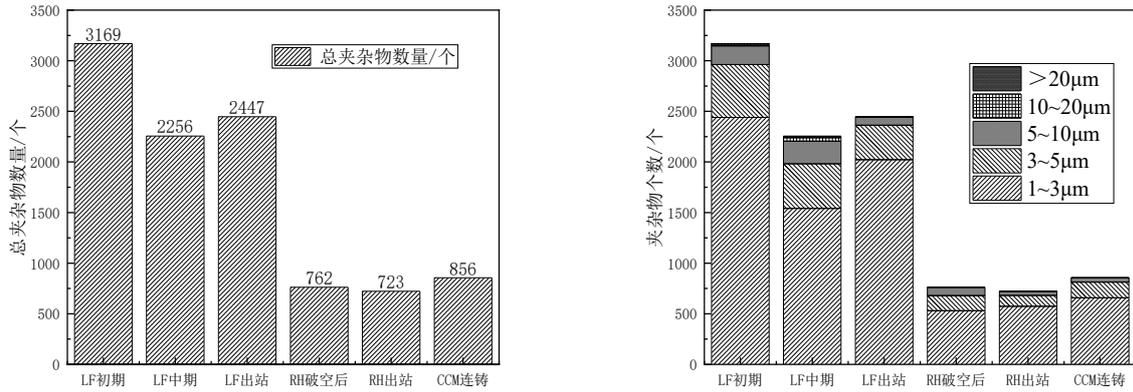
### 3.2. 全流程夹杂物数量及尺寸变化

采用 ASPEX 自动扫描电子显微镜对是响应进行扫描分析,每个试样的扫描面积约为 105mm<sup>2</sup>,对扫描出的夹杂物数量和尺寸进行数据统计。

从图 2 可以看出,LF 初期夹杂物数量最多,达到了 2869 个,主要是以 MnS 夹杂物居多,达到了夹杂物总数的 57.6%。随着 LF 炉精炼的开始,大氩气搅拌脱硫及强还原剂铝铁与氧发生反应,MnS 夹杂物减少,氧化物夹杂物数量明显增多,主要以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO+CaS 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 类复合夹杂物为主,占夹杂物总量占的 76%,同时,因为 LF 精炼过程中小尺寸夹杂物相互碰撞、吸附,形成大尺寸的夹杂物,大尺寸的夹杂物数量增多。但随着 LF 精炼的持续,夹杂物数量增多,与过程氧含量增加趋势一致,说明 LF 精炼后期保护不好。

在 RH 极度真空条件下,钢水不断的循环,不断的剧烈搅拌,导致夹杂物不断地发生碰撞聚集长大。同时,在软吹的作用下,夹杂物不断的上浮,夹杂物数量去除率达 68.9%。

在连铸过程中,非金属夹杂物个数有所上升,主要为氧化物类。与过程氧含量增加趋势一致,说明连铸保护浇筑效果不佳,钢水存在一定的二次氧化。



(a) 全流程夹杂物数量变化情况 (b) 全流程夹杂物不同尺寸的夹杂物数量变化情况

图2 全流程夹杂物数量和尺寸变化情况

Fig.2 Changes of number and size process of inclusions during whole process

### 3.3. 全流程 CaO+CaS-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 夹杂物成分变化

对影响 GCr15 轴承钢可浇性的主要夹杂物的过程变化进行分析，将全流程中的 CaO+CaS、MgO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三种氧化物夹杂物通过三元相图进行表征分析，观察冶炼过程中氧化物夹杂的变化。

从图 3 可以看出，到 LF 精炼中期，由于钢-渣间的复杂反应、耐材的侵蚀以及强还原剂铝铁与氧发生反应等，且钢水中 O 处于高位，生产的夹杂物类型主要以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO+CaS 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 类夹杂物为主，且随着 LF 精炼的持续，CaO+CaS 和 MgO 类夹杂均有增加趋势。

经过 RH 真空精炼，RH 破空后夹杂物明显减少，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO+CaS 夹杂物去除率为 76.5%，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 夹杂物去除率为 99.6%。

连铸过程中，由于温降引起的铝氧继续反应、浇注过程中二次氧化以及耐材的侵蚀等，钢水中重新生成了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 类夹杂物，并复合 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO+CaS 类夹杂物。

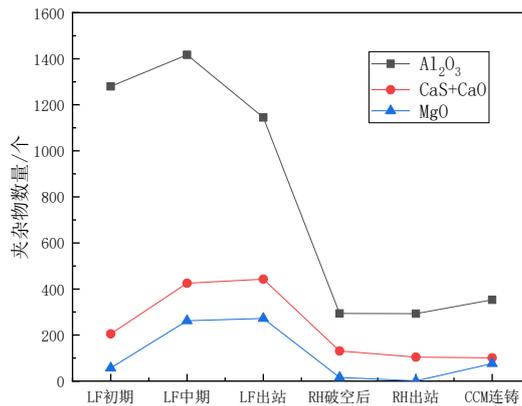


图3 全流程 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO+CaS 和 MgO 夹杂物数量变化情况

Fig.3 Change of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO+CaS or MgO inclusions during whole process

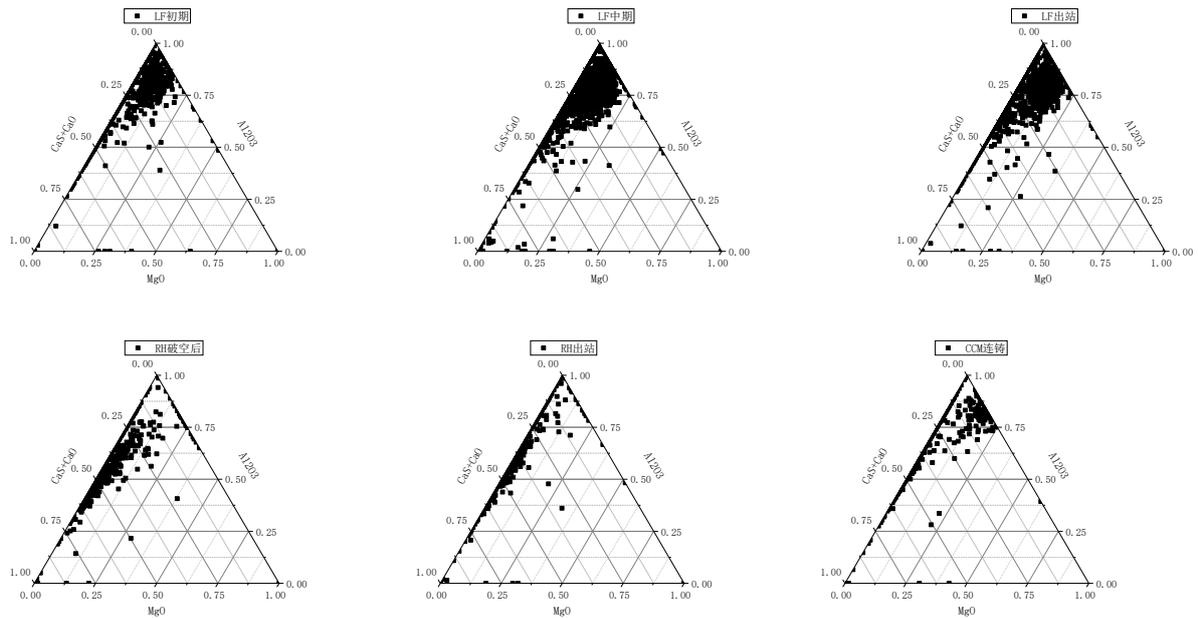


图4 全流程中夹杂物成分变化情况

Fig.4 Change of composition of inclusions during whole process

## 4. 结论

(1) LF 精炼过程中生成的主要以  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO+CaS}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  类复合夹杂物为主，最终占夹杂物总量的 76%，且随着 LF 精炼的进行，大尺寸夹杂物有所增加。

(2) 经过 RH 真空精炼，氧含量降到了 4.1ppm，夹杂物数量去除率达 68.9%。其中， $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO+CaS}$  夹杂物去除率为 76.5%， $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  夹杂物去除率为 99.6%。

(3) 连铸过程中，由于温降引起的铝氧继续反应、浇注过程中二次氧化以及耐材的侵蚀等，钢水中重新生成了  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  类夹杂物，并复合  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO+CaS}$  类夹杂物，是导致可浇性不好的主要原因。

## 参考文献

- [1] LI S, CHENG G, MIAO Z, et al. Effect of slag on oxide inclusions in carburized bearing steel during industrial electroslag remelting [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2019, 26(3):291-300.
- [2] Chao Gu, Wen-qi Liu, Jun-he Lian, et al. In-depth analysis of the fatigue mechanism induced by inclusions for high-strength bearing steels [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(5):826-834
- [3] 李永德, 杨振国, 李守新, 等. GCr15 轴承钢超高周疲劳性能与夹杂物相关性 [J]. 金属学报, 2008(8):968-972.
- [4] 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.
- [5] 梁振华, 何少松, 赵华森, 等. 高炉冶炼低钛铁水的生产实践 [J]. 河北冶金, 2019(1):25-27.
- [6] 李伟东, 舒耀, 杨辉. 含钛铁水脱硫及转炉冶炼实践 [C]//2014 全国炼钢—连铸生产技术会论文集. 唐山:中国金属学会, 2014:122-125
- [7] 战东平, 邱国兴, 牛奔, 等. 氮在钢液中溶解的热力学及动力学研究 [J]. 炼钢, 2015, 31(5):7-11.
- [8] 雷家柳, 杨玲, 李德胜, 等. GCr15 轴承钢 LF 精炼过程中夹杂物的演变机理研究 [J]. 炼钢, 2021, 37(1):33-37
- [9] 车晓健, 杨卯生, 唐海燕, 等. 高性能 GCr15 轴承钢中夹杂物控制与疲劳性能 [J]. 钢铁, 2018, 53(5):76-85
- [10] Moghaddam S M, Sadeghi F. A Review of microstructural alterations around non-metallic inclusions in bearing steel during rolling contact fatigue [J]. Tribology Transactions, 2016, 59 (6) :97-112.