

废钢 + 铁水-50 t EAF-LF-VD 流程 GCr15 轴承钢中的 非金属夹杂物行为

杨密平^{1,2} 吴兵^{1,2} 林腾昌² 安杰¹ 马传庆¹

(1 山东钢铁股份有限公司莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271105; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要 通过 50 t EAF 配加 30~40 t 铁水和 12~16 t 优质废钢, EBT 无渣出钢, 加 150~200 kg 钢芯铝预脱氧, LF 用 SiC 扩散脱氧, 控制精炼渣碱度 4.0~5.9, VD 前后软吹氩、连铸保护浇注和电磁搅拌等工艺措施, GCr15 轴承钢轧材中的氧含量为 $8 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ 。分析结果表明, LF 前至 VD 后钢中夹杂物尺寸一般 $\leq 10 \mu\text{m}$, 最大尺寸 40 μm , 大部分夹杂物尺寸为 3~6 μm ; LF 前主要夹杂物为 Al_2O_3 , 镁铝尖晶石, 硫化物, Cr_2O_3 , TiO_2 ; VD 前后为镁铝尖晶石, CaS 和 MgO。

关键词 GCr15 轴承钢 EAF-LF-VD 流程 总氧含量 夹杂物

Behavior of Non-Metallic Inclusions in GCr15 Bearing Steel Steelmaking by Scrap + Hot Metal-50 t EAF-LF-VD Flow Sheet

Yang Miping^{1,2}, Wu Bing^{1,2}, Lin Tengchang², An Jie¹ and Ma Chuanqing¹

(1 Special Steel Division, Laiwu Branch, Shandong Iron and Steel Corp Ltd, Laiwu 271105;

2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract With process measures including charging 30~40 t hot metal and 12~16 t quality scrap in 50 t EAF, EBT slag free tapping and adding 150~200 kg steel-clad aluminium to pre-deoxidize, diffusion deoxidation by SiC and controlling refining slag basicity 4.0~6.9 in LF process, soft argon blowing before and after VD, shielding casting and electromagnetic stirring in casting process, the total oxygen content in rolled products of bearing steel GCr15 is $8 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$. Analysis results show that the size of inclusions in steel before LF and after VD is generally $\leq 10 \mu\text{m}$, maximum size is 40 μm , and the sizes of most inclusions are 3~6 μm ; before LF process the main inclusions in steel are Al_2O_3 , magnesia alumina spinel, sulfide, Cr_2O_3 and TiO_2 , before and after VD the main inclusions in steel are magnesia alumina spinel, CaS and MgO.

Material Index GCr15 Bearing Steel, EAF-LF-VD Flow sheet, Total Oxygen Content, Inclusions

1 实验方法和控制要点

实验用轴承钢生产工艺流程: 废钢 + 铁水 (70%~76%) → 50 t UHP EAF (EBT) → 60 t LF → 60 t VD → 矩形坯连铸 (260 mm × 300 mm) → 入坑缓冷 → 轧材 (规格 $\Phi 80$ mm)。

在以下 5 个时期取钢水样和气体样: LF 进站、LF 喂铝线前、LF 出站、VD 前、VD 后, 取对应炉次规格为 $\Phi 80$ mm 的成品轧材 160 mm 长, 用作夹杂物和气体分析。钢水样为圆柱台形, 将其加工成 (mm) 15 × 10 × 10 的实验试样, 用作非金属夹杂物分析。用扫描电镜 (SEM) 观察钢水试样中夹杂物形貌, 用能谱仪 (EDS) 进行夹杂物成分分析。

每炉配加 38~40 t 的铁水和 12~16 t 优质废钢, EBT 无渣出钢, 冶炼过程中严格控制终点碳含量 $\geq 0.30\%$, 实际终点碳含量达到 0.37%~0.83%。电弧炉出钢温度 1630~1655 $^{\circ}\text{C}$, 出钢量达到 1/4 时, 先加入 150~200 kg 的钢芯铝 (含铝 70%) 预脱氧, 再加入石灰、萤石和高铝预熔渣剂造还原渣。

到精炼工位钢水温度 1487~1533 $^{\circ}\text{C}$, LF 精炼采用 SiC 扩散脱氧, 并根据渣况补加石灰或调渣剂, 白渣后喂铝线; 精炼渣碱度 4.0~5.9, 主要成分 (/%) : 47.4~58.7CaO, 9.2~16.7SiO₂, 13.4~21.7Al₂O₃, 5.0~9.2MgO; 精炼完毕出钢后至 VD 处理前进行软吹氩。扒出约 1/3 总渣量后, 快速抽真空, 67 Pa 以下 15 min, 破空后 10~20 min 软吹氩。

连铸采用全程保护浇注, 第 1 炉开浇前向中间包内充入氩气。采用结晶器液面自动控制技术及 GCr15 专用动态配水模型, 比水量为 0.20 L/kg, 260 mm × 300 mm 铸坯拉速 0.40~0.50 m/min, 钢水过热度 22~29 $^{\circ}\text{C}$ 。进行 300 A, 3 Hz 结晶器电磁搅拌和 300 A, 12 Hz 末端电磁搅拌。

2 结果分析与讨论

2.1 各工序 T[O] 和 [N] 变化情况

由图 1 可见, LF 进站 T[O] 为 8.2×10^{-6} ; 喂铝线前全氧含量均有所增加; 喂铝线至成材钢中全氧

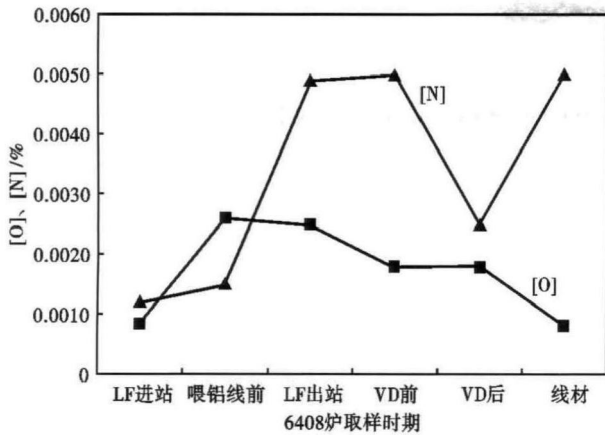


图1 6408 炉次各工序 GCr15 轴承钢中气体含量

Fig. 1 Gas content in GCr15 bearing steel of 6408 heat in each steelmaking period

含量一直呈下降趋势。

VD 解除真空后全氧含量 18×10^{-6} 。但轧材钢中全氧含量均能达到小于国标 12×10^{-6} 的要求,抽检轧材的全氧含量为 $8 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ 。

由图 1 可以发现,钢中氮含量基本呈现出随着精炼的进行先增加后降低的趋势。而连铸过程是一个增氮的过程,如 6408 炉次的钢液氮含量增加 25×10^{-6} 。

2.2 各工序非金属夹杂物分析

2.2.1 LF 进站

氧化铝夹杂主要来源于铝脱氧产物^[1],且发现生成的 Al_2O_3 主要为簇状^[2,3]。钢中残存基本为 $2 \sim 10 \mu m$ 小粒径的夹杂物,发现最大为 $40 \mu m$ 的球形夹杂物。LF 进站时 GCr15 轴承钢主要有 Al_2O_3 、镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO \cdot ySiO_2$ -CaS、硫化物及合金元素的氧化物,如 Cr_2O_3 、 TiO_2 等夹杂(图 2a₁ ~ e₁)。

2.2.2 LF 喂铝线前

LF 喂铝线前夹杂物以含铝-镁-钙-氧元素为主。从检验出的夹杂物来看,钢中残存的均为小粒径夹杂物,其大小基本在 $2 \sim 10 \mu m$,发现最大的夹杂物为 $30 \mu m$ 的球形夹杂物;LF 喂铝线前夹杂物的类型主要有:镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO \cdot ySiO_2$ -CaS、硫化物、CaS 与氧化物的复合夹杂物(图 2a₂ ~ d₂)。

2.2.3 LF 出站

LF 出站时夹杂物仍以含铝-镁-钙-氧元素为主,而钙元素含量明显增加。其余合金元素、硫元素明显降低或消失,而文献[4]研究得出在 LF 末期硫化物所占比例有所升高。钢中基本为 $2 \sim 10 \mu m$ 小粒径的夹杂物,最大为 $10 \mu m$ 球形夹杂物。精炼过程

可以去除钢液中 80% 左右的夹杂物。LF 出站时夹杂物的类型主要有:镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、 Al_2O_3 、少量镁铝尖晶石-CaS、镁铝尖晶石- SiO_2 (图 2a₃ ~ d₃)。

LF 出站时钢液夹杂物中 MgO 含量增加。夹杂物中 MgO 组分来自碱性炉渣时^[5],夹杂物中会同时含有 CaO,且 MgO 的含量不超过 5%,如果 MgO 来自耐火材料则 MgO 含量远高于 5%。试样夹杂物中 MgO 含量约为 20%,所以 MgO 组分应该来自包衬耐火材料。

2.2.4 VD 前

LF 出站至 VD 真空处理前的阶段,钢包继续进行软吹氩气,钢中残存的均为 $2 \sim 10 \mu m$ 小粒径的夹杂物,最大为 $30 \mu m$ 球形夹杂物。VD 真空处理前夹杂物类型主要有:镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、 Al_2O_3 、少量镁铝尖晶石-CaS、单独存在的镁铝尖晶石(图 a₄ ~ d₄)。

2.2.5 VD 后

VD 解除真空后夹杂物的类型主要有:镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、 Al_2O_3 、单独存在的镁铝尖晶石、镁铝尖晶石-CaS、MgO(图 2a₅ ~ e₅)。

VD 解除真空后钢中夹杂物以含铝-镁-氧-钙元素为主,而钙元素比 VD 真空处理前有所增加,其余合金元素、硫元素几乎为 0。此时钢中基本为 $2 \sim 10 \mu m$ 小粒径的夹杂物,发现最大为 $40 \mu m$ 的球形夹杂物。小流量吹氩搅拌,氩气泡会均匀细小稳定地分散在钢液中,这种小气泡要比大气泡俘获夹杂物的概率高^[6]。

表 1 列出各工序钢中的夹杂物尺寸和类型。由

表 1 各工序非金属夹杂物尺寸和类型

Table 1 Size and type of inclusions in each steelmaking period

项目	尺寸/ μm		类型
	小粒径	最大粒径	
LF 进站	2 ~ 10	40	Al_2O_3 、镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO \cdot ySiO_2$ -CaS、硫化物、 Cr_2O_3 、 TiO_2 。
喂铝线前	2 ~ 10	30	镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO \cdot ySiO_2$ -CaS、 Al_2O_3 、硫化物、CaS 与氧化物的复合夹杂物。
LF 出站	2 ~ 10	10	镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、 Al_2O_3 、镁铝尖晶石-CaS、镁铝尖晶石- SiO_2 。
VD 前	2 ~ 10	30	镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、 Al_2O_3 、镁铝尖晶石-CaS、镁铝尖晶石。
VD 后	2 ~ 10	40	镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、 Al_2O_3 、镁铝尖晶石、镁铝尖晶石-CaS、MgO。
轧材	≤ 7	12	镁铝尖晶石- $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 、 Al_2O_3 、镁铝尖晶石、镁铝尖晶石-CaS、MgO。

表1可见,LF进站至VD后夹杂物尺寸基本在 $2\sim 10\ \mu\text{m}$,大部分夹杂物尺寸在 $3\sim 6\ \mu\text{m}$,发现最大的夹杂物为 $40\ \mu\text{m}$ 的球形夹杂物; $\Phi 80\ \text{mm}$ 轧材时检测出的夹杂物基本 $\leq 7\ \mu\text{m}$ 。

实验炉次在LF、VD工序都检测出镁铝尖晶石夹杂物,面心立方结构,熔点高($2135\ ^\circ\text{C}$)、硬度大,轧制时不变形,属D类点状不变形夹杂物,其对轴承钢疲劳寿命的危害性比较大,应在炼钢生产中控制其大小和数量;国内外有的钢厂轴承钢中夹杂物可控制在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,平均氧含量可控制在 5×10^{-6} ;因此本文涉及的轴承钢冶炼工艺在控制夹杂物大小、种类及氧含量方面还有改善的空间。

2.3 钢中四元 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ 型夹杂物转变特点

以轴承钢冶炼中夹杂物的元素质量百分数为基础,经过计算得到夹杂物中 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 的不同比例,绘制成如图3所示直方图。

轴承钢中夹杂物变化特点基本如下: EAF出钢铝脱氧至LF进站期间,钢中残留的夹杂物基本为纯 Al_2O_3 夹杂物。至LF喂铝线前,铝脱氧产物与炉衬、炉渣的反应明显,残留夹杂物中 Al_2O_3 含量降低,而 MgO 、 CaO 含量分别增加至15%和3%左右。

LF出站至VD真空处理前钢中残留夹杂物成分变化较小,主要为发现更多单独的 MgO 夹杂,经过软吹去除,夹杂物中 CaO 含量降低、平均值1%~2%。

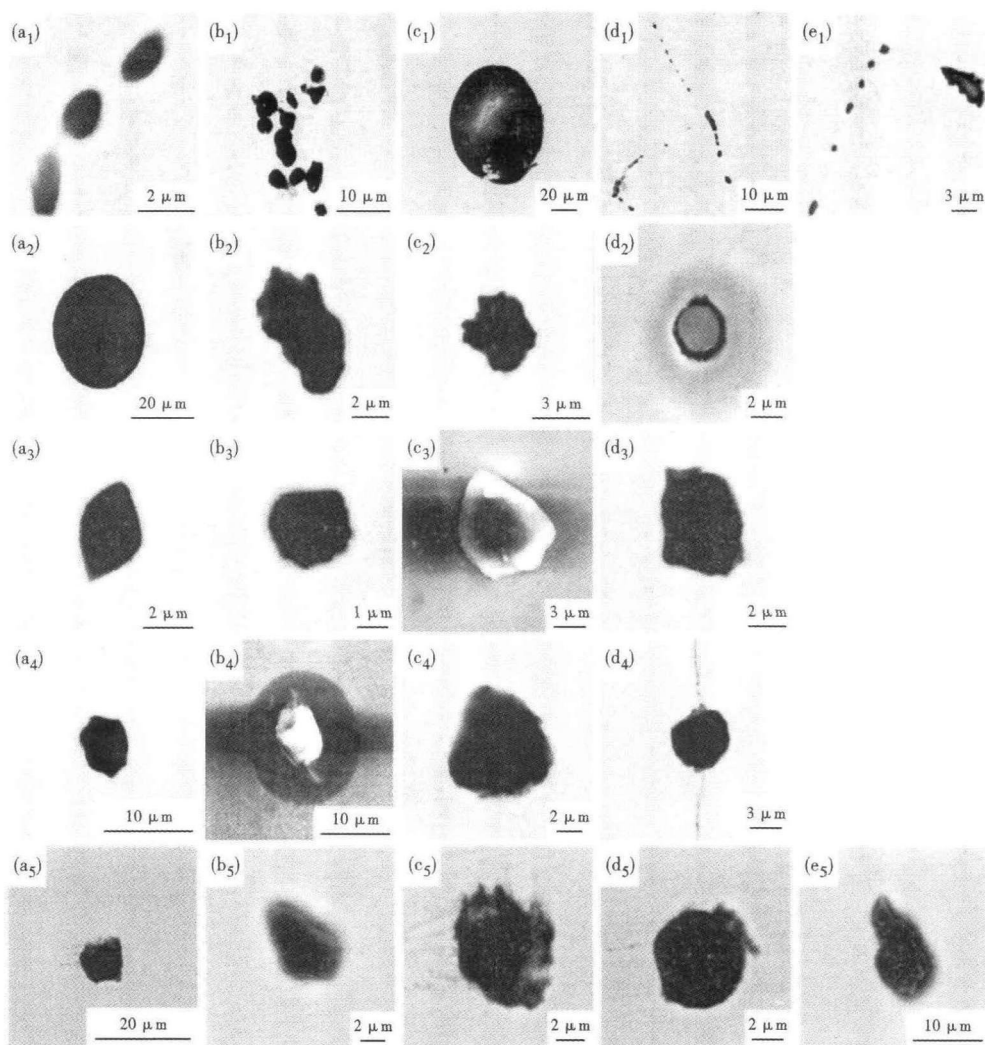


图2 各工序 GCr15 钢中夹杂物形貌。LF 前:(a₁) 硫化物-TiO₂-Cr₂O₃; (b₁) Al₂O₃; (c₁) 镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO · ySiO₂-CaS; (d₁) 硫化物; (e₁) 硫化物-Cr₂O₃。LF 精炼喂铝线前:(a₂) 镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO · ySiO₂-CaS; (b₂) 镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO; (c₂) 镁铝尖晶石-TiO₂-CaS; (d₂) 硫化物-氧化物。LF 精炼结束:(a₃) 镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO; (b₃) 镁铝尖晶石-CaS; (c₃) 镁铝尖晶石-SiO₂; (d₃) 镁铝尖晶石-CaS-TiO₂。VD 前:(a₄) 镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO; (b₄) 镁铝尖晶石-CaS-FeS; (c₄) 镁铝尖晶石-CaS; (d₄) 镁铝尖晶石。VD 后:(a₅) 镁铝尖晶石; (b₅) 硅铝酸钙-CaS; (c₅) 镁铝尖晶石-CaS-TiO₂; (d₅) 氧化镁; (e₅) 硅酸钙, SEM

Fig. 2 Morphology of inclusions in GCr15 bearing steel in each steelmaking period. Before LF: (a₁) sulfide-TiO₂-Cr₂O₃; (b₁) Al₂O₃; (c₁) magnesia alumina spinel-Al₂O₃ · xCaO · ySiO₂-CaS; (d₁) sulfide; (e₁) sulfide-Cr₂O₃. Before feeding aluminium wire in LF refining process: (a₂) magnesia alumina spinel-Al₂O₃ · xCaO · ySiO₂-CaS; (b₂) magnesia alumina spinel-Al₂O₃ · xCaO; (c₂) magnesia alumina spinel-TiO₂-CaS; (d₂) sulfide-oxide. After LF refining process: (a₃) Magnesia alumina spinel-Al₂O₃ · xCaO; (b₃) Magnesia alumina spinel-CaS; (c₃) magnesia alumina spinel-SiO₂; (d₃) magnesia alumina spinel-CaS-TiO₂. Before VD process: (a₄) magnesia alumina spinel-Al₂O₃ · xCaO; (b₄) magnesia alumina spinel-CaS-FeS; (c₄) magnesia alumina spinel-CaS; (d₄) magnesia alumina spinel. After VD process: (a₅) magnesia alumina spinel; (b₅) silicon calcium aluminate-CaS; (c₅) magnesia alumina spinel-CaS-TiO₂; (d₅) magnesium oxide; (e₅) calcium silicate, SEM

经过VD真空强烈搅拌后,钢中残留夹杂物中 CaO 含量明显升高至2%~4%,部分夹杂物 CaO 含量很高。

2.4 钢中三元 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 型夹杂物转变特点

在EAF出站(LF进站)→LF出站→VD出站的过程中,轴承钢中三元夹杂物均为 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ 系转变(图4)。由图4可见, EAF出钢后钢中夹杂

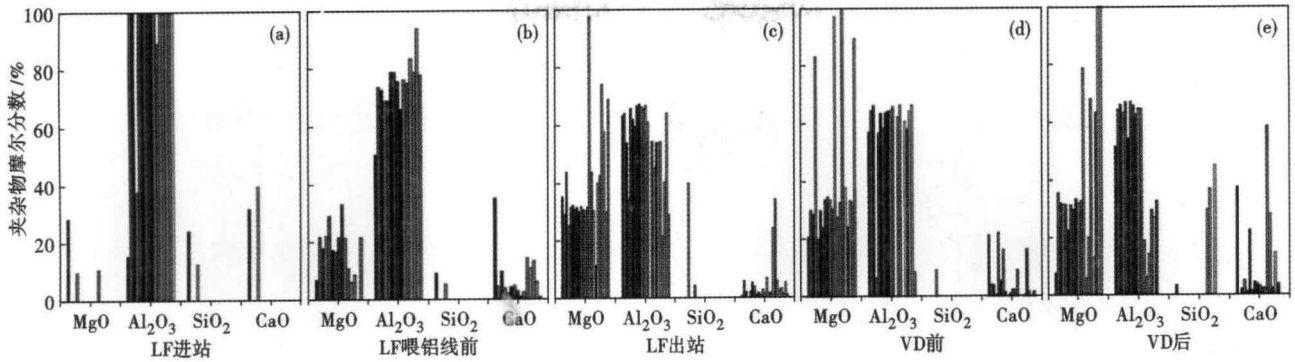


图3 各工序 MgO-Al₂O₃-SiO₂-CaO 四元夹杂物成分:(a)LF 前;(b)LF 精炼喂铝线前;(c)LF 精炼结束;(d)VD 前;(e)VD 后

Fig. 3 Ingredient of MgO-Al₂O₃-SiO₂-CaO quaternary inclusions in steel in each steelmaking period: (a) before LF; (b) before feeding aluminium wire during LF refining process; (c) after LF refining process; (d) before VD; (e) after VD

物基本为纯 Al₂O₃ 夹杂。到 LF 出站时钢中夹杂物由纯 Al₂O₃ 转变为镁铝尖晶石,存在 0 ~ 5% 的 CaO,而极少数夹杂物中 CaO 含量可达到 25%,甚至 50%。LF 出站至 VD 后表现为 MgO 与 Al₂O₃ 的比例更加趋于稳定,夹杂物成分的重合较多,但依然存在高含量 CaO 的三元甚至四元夹杂物。

3 结论

(1) LF 进站至 VD 后夹杂物尺寸基本为 2 ~ 10 μm,大部分夹杂物尺寸为 3 ~ 6 μm,发现最大的夹杂物为 40 μm 的球形夹杂物。

(2) LF 进站时大部分为单独的簇状或球状 Al₂O₃、球形镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO · ySiO₂-CaS 复合夹杂物、少量硫化物及合金元素的氧化物;LF 喂铝线前为球形或不规则形镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO 复合夹杂物、球形镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO · ySiO₂-CaS 复合夹杂物、Al₂O₃、少量硫化物及其与合金元素氧化物的复合夹杂物;LF 出站时为球形镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO 复合夹杂物、Al₂O₃、少量球形镁铝尖晶石-CaS 复合夹杂物;VD 前为球形镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO 复合夹杂物、单独存在的球形镁铝尖晶石、Al₂O₃、少量球形镁铝尖晶石-CaS 复合夹杂物;VD 后为球形镁铝尖晶石-Al₂O₃ · xCaO 复合夹杂物、单独存在的球形镁铝尖晶石、Al₂O₃、MgO。

(3) 轴承钢中 MgO-Al₂O₃-SiO₂-CaO 型夹杂物转变特点为:EAF 出钢至 LF 进站期间,钢中残留的夹杂物基本为纯 Al₂O₃。至 LF 喂铝线前,铝脱氧产物

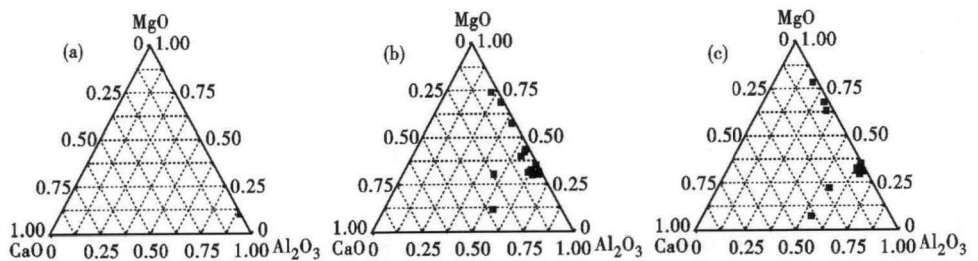


图4 GCr15 轴承钢中残留三元夹杂物转变:(a)EAF 终点(LF 前);(b)LF 后;(c)VD 后

Fig. 4 Transformation of residual ternary inclusions in GCr15 bearing steel: (a) EAF end (before LF); (b) after LF; (c) after VD

显现出对钢包衬、炉渣的反应效果,残留夹杂物中 Al₂O₃ 含量降低,而 MgO、CaO 含量分别增加至 15% 和 3%。LF 出站至 VD 真空处理前钢中夹杂物成分变化较小,主要为更多单独的 MgO 夹杂,经过软吹去除,夹杂物中 CaO 含量降低,平均值为 1% ~ 2%。经过 VD 后,残留夹杂物中 CaO 含量明显升高至 2% ~ 4%,部分夹杂物 CaO 很高。

参考文献

- [1] 刘旭兰,吴晓东,周丹,等. 轴承钢精炼过程非金属夹杂物行为的研究[J]. 钢铁研究,2009,37(2):29-30.
- [2] 贾楠,吴华杰,包燕平,等. 转炉流程生产 GCr15 轴承钢洁净度研究[A]. 第十五届全国炼钢学术会议文集[C]. 中国厦门:中国金属学会炼钢分会,2008:187-190.
- [3] 朱伦才. 高碳轴承钢 VD 精炼过程夹杂物行为的研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版),2011,28(4):341-343.
- [4] 张仰东,吴晓东,谈盛康. GCr15 轴承钢中非金属夹杂物行为的研究[J]. 热加工工艺,2011,40(24):44-46.
- [5] 董履仁,刘新华. 钢中大型夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社,1991:101.
- [6] 薛正良,王义芳. 用小气泡从钢液中去夹杂物颗粒[J]. 金属学报,2003,39(4):431-434.

杨密平(1979-),男,硕士(北京科技大学),工程师,2004 年安徽工业大学毕业,特殊钢工艺技术研究。
E-mail:yangmiping@126.com

收稿日期:2014-03-03