

100 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼 GCr15 轴承钢非金属夹杂的演变

刘佳伟¹ 岳峰² 王子健³

(北京科技大学1 工程技术研究院,2 钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083;
3 江苏沙钢集团淮钢特钢股份有限公司总工办,淮安 223002)

摘要 试验 GCr15 轴承钢(∕% : 1.00C, 0.20Si, 0.39Mn, 0.015P, 0.005S, 1.50Cr, 0.003Ti, 0.015Als) 的冶炼工艺流程为预脱硫铁水-100 t BOF-LF-RH-200 mm × 200 mm 坯连铸。主要工艺特点为 BOF 出钢过程加 1.2 kg/t 铝脱氧, LF 精炼采用白渣操作, 精炼初渣主要成分为(∕% : 22Al₂O₃, 56CaO, 10SiO₂, 5MgO), RH 67 Pa, 25 min, 连铸过程保护浇注。两炉钢冶炼分析结果表明, 钢中氧氮含量在 RH 破空样品中同时达到最低分别为 $7 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ 和 $24 \times 10^{-6} \sim 26 \times 10^{-6}$, 钢中非金属夹杂尺寸主要集中在 3 ~ 8 μm, 并且单位面积夹杂物数量在 RH 破空样中达到最小; 铸坯中非金属夹杂以 Al₂O₃-CaO 夹杂为主; 在高碱度渣的条件下, 钙铝酸盐与镁铝尖晶石很容易发生反应, 碱度为 2 ~ 3 时会出现少量 MgO-Al₂O₃, 在渣碱度达到 4 以上时不会出现 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物, 并且高碱度条件下 MgO-Al₂O₃-CaO 系夹杂物中 MgO 含量会降低。

关键词 100 t BOF-LF-RH-CC 流程 轴承钢 GCr15 夹杂物 尺寸 成分 演变

Evaluation of Nonmetallic Inclusions in Bearing Steel GCr15 Steelmaking by 100 t BOF-LF-RH-CC Flowsheet

Liu Jiawei¹, Yue Feng² and Wang Zijian³

(1 Institute of Engineering Technology, 2 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083; 3 Chief Engineer Office, Huaigang Special Steel Co Ltd, Jiangsu Shagang Group, Huai'an 223002)

Abstract The steelmaking flowsheet of tested bearing steel GCr15 (∕% : 1.00C, 0.20Si, 0.39Mn, 0.015P, 0.005S, 1.50Cr, 0.003Ti, 0.015Als) is pre-desulphurized hot metal-100 t BOF-LF-RH-200 mm × 200 mm billet casting. The main process characteristics are adding 1.2 kg/t aluminium for pre-deoxidation in BOF tapping, using white slag operation in LF refining with initial slag main ingredient (∕% : 22Al₂O₃, 56CaO, 10SiO₂, 5MgO), RH 67 Pa for 25 min and shield casting in cast process. Analysis results of two heats melting show that the oxygen and nitrogen content in liquid at end RH are lowest respectively $7 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ and $24 \times 10^{-6} \sim 26 \times 10^{-6}$, the size of majority inclusions in steel is 3 ~ 8 μm, and the number of inclusions in steel at unit area is lowest at end RH, and the main nonmetallic inclusions in cast billet are Al₂O₃-CaO; with condition of high basicity refining slag the calcium aluminate easily reacts with magnesium-aluminum spinel, with slag basicity 2 ~ 3 the small amount of MgO-Al₂O₃ occurs and with slag basicity more than 4 the MgO-Al₂O₃ series inclusions don't occur, besides with condition of high basicity the MgO content in MgO-Al₂O₃-CaO series inclusions is able to decrease.

Material Index 100 t BOF-LF-RH-CC Flowsheet, Bearing Steel GCr15, Inclusions, Size, Ingredient, Evaluation

轴承钢中的全氧含量和夹杂物对轴承钢的疲劳寿命具有重要影响,降低钢中的全氧含量,控制夹杂物类型,减少其数量可以提高轴承钢的使用寿命^[1]。为提高轴承钢质量,对全氧含量控制越来越严格,国际先进企业对轴承钢的全氧控制水平达到了 5×10^{-6} 左右^[2]。

夹杂物可分为如下 4 类:A(硫化物)、B(氧化铝)、C(硅酸盐)、D(球状不变形夹杂物),各夹杂物对轴承钢疲劳寿命的危害性按大小可以排成 D > B > C > A 的次序。对夹杂物形态来说,球状不变形夹杂对轴承钢寿命危害极大,而且夹杂物的尺寸对轴承钢疲劳极限的影响极为明显,尺寸越大,疲劳寿命越短^[3]。

本次研究了在高碱度炉渣下, RH 工艺冶炼轴承钢的氧氮含量和氧化物夹杂数量、尺寸变化规律。重点讨论了高碱度炉渣下夹杂物成分的变化带来夹杂物类型的转变。

1 生产工艺和研究方法

1.1 生产工艺

试验 GCr15 轴承钢(∕% : 1.00C, 0.20Si, 0.39Mn, 0.015P, 0.005S, 1.50Cr, 0.003Ti, 0.015Als) 工艺流程为 100 t BOF → LF → RH → CC。

脱硫预处理后硫含量 ≤ 0.003 5% 的铁水送入 100 t 的顶底复吹转炉,出钢量为 90 t。转炉冶炼采用高拉碳操作,终点碳含量不低于 0.1%,出钢温度为 1 630 ~ 1 650 °C。出钢过程加入 4.5 kg/t 石灰和

4.5 kg/t 的专用渣,加入 1.2 kg/t 的铝饼脱氧。LF 精炼采用白渣操作,初渣主要成分(/%) 22Al₂O₃, 56CaO, 5MgO, 10SiO₂;终渣主要成分(/%) 23Al₂O₃, 53CaO, 6MgO, 10SiO₂。精炼时间 60 min。RH 真空度小于 67 Pa,钢包钢水装入量 90 t,真空处理 25 min,破空后进行软吹 30 min。连铸操作时,采用保护浇注,防止钢水二次氧化,中间包容量为 40 t,铸坯尺寸为 200 mm × 200 mm。

1.2 研究方法

实验利用红外吸收法(GB/T 11261-2006)检测钢棒样的T[O],利用热导法(GB/T 20124-2006)检测钢棒样中的[N],在利用 ZEISS ULTRA 55 热场发射扫描电镜中的连续扫描功能观察金相样品。

轴承钢中夹杂物的尺寸越大,其危害越大,而小尺寸夹杂物危害相对较小,一般认为 3 μm 以下的夹杂物对钢的性能基本没有危害。大型夹杂物(当量直径 ECD > 13 μm)随机性较强,小型夹杂物更能间接体现与T[O]的关系。参考国内外常用的非金属夹杂物评定标准 GB/T10561-2005 和 ISO4967, D_细、D_粗 和 D_s 类夹杂物的最小宽度分别为 3, 8, 13 μm,因此,扫描过程中设置忽略当量直径 ECD < 3 μm 的夹杂物,按 3 ~ 8 μm、8 ~ 13 μm 分类统计,分析夹杂物的尺寸、数量、成分、形貌的变化规律。

此次实验采用随机 100 视场,每个视场面积 0.25 mm²,总面积为 25 mm²。然后观察有代表性的夹杂物,对检索到的典型夹杂物进行面扫描分析。

2 实验结果讨论

2.1 氮含量

从图 1 可以看出,在 LF 精炼过程有明显的增氮现象,增加 12 × 10⁻⁶ ~ 13 × 10⁻⁶,增氮 57% ~ 60%。随着精炼过程的进行,钢液中[O]、[S]等表面活度

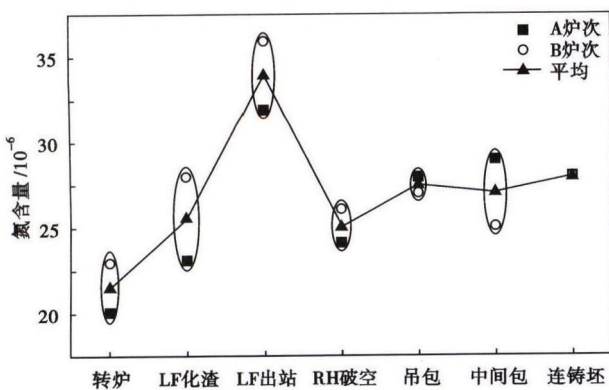


图 1 GCr15 轴承钢冶炼各工序氮含量变化

Fig. 1 Variation of nitrogen content of bearing steel GCr15 in each steelmaking period

元素的浓度不断降低,[O]、[S]对钢液增氮的抑制作用减少,当钢液与空气接触时,造成钢液增氮^[4]。在 LF 精炼开始阶段,加入的渣料未完全熔化,电弧不能埋于渣中,电弧区钢液极易吸氮,增氮 3 × 10⁻⁶ ~ 5 × 10⁻⁶。此外,电弧吹出的弧坑深度可达 60 ~ 90 mm,当渣层较薄时,电极下的钢液会暴露在大气中,电弧温度一般可达 2 400 ~ 2 600 K,此时吸氮较为严重^[5]。RH 具有一定的脱氮能力,RH 真空阶段脱氮量为 8 × 10⁻⁶ ~ 10 × 10⁻⁶,脱氮率在 25% ~ 28%。钢液中的氮在 RH 真空室内主要以氮气的形式析出。连铸环节,氮含量基本保持不变,增加 1 × 10⁻⁶ ~ 2 × 10⁻⁶。

2.2 氧含量检测结果讨论与研究

从图 2 可以看出,LF 精炼结束后的全氧含量控制在 12 × 10⁻⁶ ~ 14 × 10⁻⁶,经过 RH 真空处理钢水氧含量降低 5 × 10⁻⁶ ~ 6 × 10⁻⁶,降低 42%,RH 真空处理脱氧效果明显。在 RH 软吹过程氧含量基本没

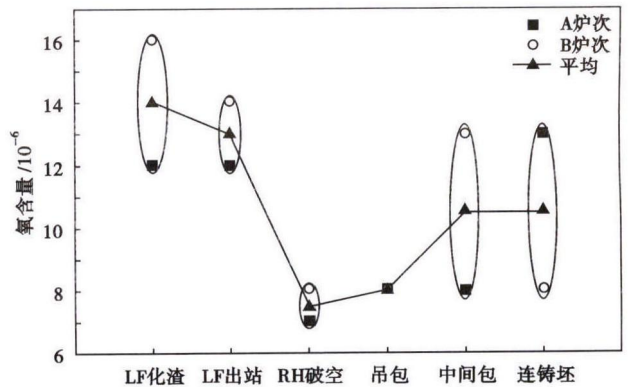


图 2 GCr15 轴承钢冶炼各工序氧含量变化

Fig. 2 Variation of oxygen content of bearing steel GCr15 in each steelmaking period

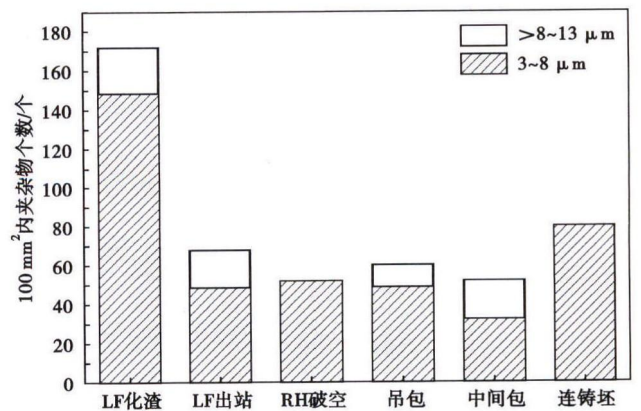


图 3 GCr15 轴承钢 100 mm² 面积内冶炼各工序夹杂物的个数

Fig. 3 Number of inclusions in bearing steel GCr15 at 100 mm² area in each steelmaking period

有变化,因此软吹对于降低钢液氧含量作用不显著。

2.3 A 炉次各工序夹杂物数量分布

由图3和表1可以看出,RH破空时期夹杂物的数量达到最少,由LF化渣时期的120个/100 mm²降低到RH破空时期48个/100 mm²。吊包和中间包时期T[O]为8×10⁻⁶,夹杂物总数中间包较吊包时期有所降低,但大颗粒夹杂物所占比例明显升高,说明夹杂物在中间包中处在聚集长大的阶段。

2.4 各工序夹杂物成分含量

由表2可以看出,LF刚刚化渣结束,夹杂物成分分布均匀,经过LF工序后,渣中大量的[Ca]进入钢液,夹杂物类型转变为以Al₂O₃-CaO和MgO-Al₂O₃-CaO夹杂为主,说明夹杂物成分受渣成分的显著影响。

由图4和表3可以看出,在铸坯夹杂物成分中MgO和SiO₂含量较低,夹杂物成分逐渐向CaO-Al₂O₃夹杂物转变。在铸坯中夹杂物中Al₂O₃稳定在60%,CaO稳定在36.5%。表3统计的为典型夹杂物CaO/Al₂O₃的变化,总变化上可以看出夹杂物中CaO/Al₂O₃基本维持在70%左右。

将取得渣样进行破碎、研磨,寄送到钢研院纳克检测中心检测,表4为检测结果。

结合图5和表3可以看出,夹杂物和渣中CaO含量不断接近,说明夹杂物中的CaO基本完全来源于钢渣,废钢和炼钢过程添加料中的CaO较少,最终夹杂物中CaO含量与渣中CaO含量达到平衡。

2.5 夹杂物的成分变化研究及热力学分析

由图6(a₁,b₁,c₁,d₁)和表5可以看出,各阶段夹杂物主要成分是Al₂O₃和CaO,Al₂O₃占60%左右,CaO占30%左右,含有少量的MgO,约占4%。

2.5.1 夹杂物Al元素的变化

由图6(a₂,b₂,c₂,d₂)可见,Al元素在各工序夹杂物中分布均匀,Al₂O₃在任何阶段都是存在钢液中的主要夹杂成分,在夹杂物Al₂O₃-CaO和MgO-Al₂O₃-CaO中Al₂O₃的平均质量分数均超过50%。

表1 GCr15 轴承钢 A 炉冶炼各工序夹杂物粒径的分布
Table 1 Distribution of particle size of inclusions in bearing steel GCr15 of A heat in each steelmaking period

工序	夹杂物个数/(个·100 mm ⁻²)		100 mm ² 面积 夹杂物总数/个
	3~8 um	8~13 um	
LF 化渣	148	24	172
LF 出站	48	20	68
RH 破空	52	0	52
吊包	48	12	60
中间包	32	20	52
连铸坯	80	0	80

表2 GCr15 轴承钢 A 炉次夹杂物数量按成分分类/个

Table 2 Number of inclusions in bearing steel GCr15 of heat A by ingredient classification

工序	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO-Al ₂ O ₃	MgO-CaO	SiO ₂ -CaO	Al ₂ O ₃ -SiO ₂	Al ₂ O ₃ -CaO	MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	MgO-Al ₂ O ₃ -CaO	Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -CaO	MgO-Al ₂ O ₃ -CaO-SiO ₂
LF 化渣	2	3	5	7	1	3	4	3	1	4	7	
LF 出站	-	3	1	-	-	1	3	8	4	6	2	2
RH 破空	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	1
吊包	1	2	1	-	-	-	4	-	4	4	-	-
中间包	-	2	-	-	-	-	1	6	-	2	-	1
连铸坯	2	1	1	3	-	-	1	9	-	3	-	-

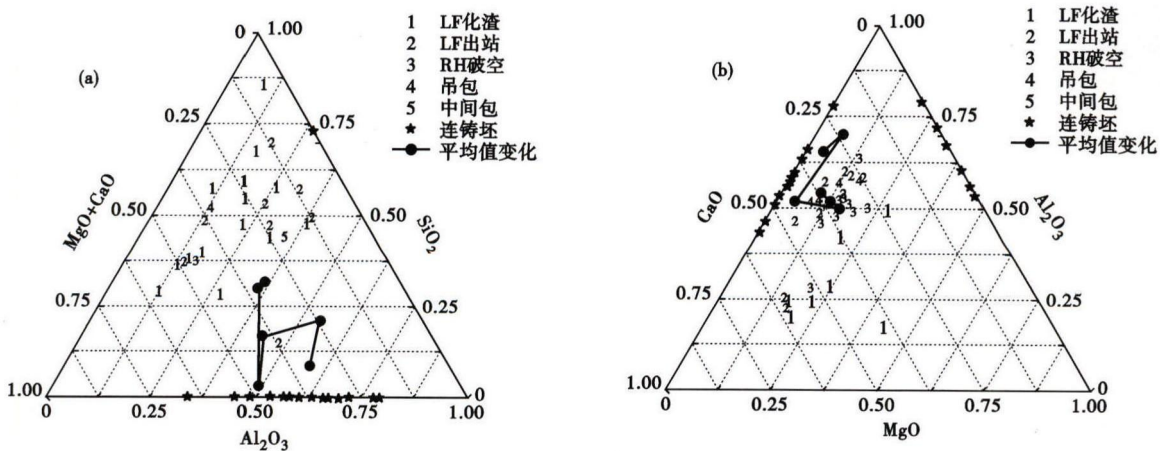


图4 夹杂物分布三元相图:(a)含SiO₂;(b)不含SiO₂

Fig.4 Distribution of inclusions in steel at ternary phase diagram: (a) containing SiO₂; (b) non-containing SiO₂

表 3 GCr15 轴承钢冶炼各工序 Al₂O₃-CaO 和 MgO-Al₂O₃-CaO 夹杂物中 Al₂O₃ 和 CaO 含量 / %
Table 3 Al₂O₃ and CaO content in Al₂O₃-CaO and MgO-Al₂O₃-CaO inclusions in bearing steel GCr15 in each steelmaking period / %

工序	Al ₂ O ₃ -CaO 和 MgO-Al ₂ O ₃ -CaO 中 Al ₂ O ₃ 的平均含量	Al ₂ O ₃ -CaO 和 MgO-Al ₂ O ₃ -CaO 中 CaO 的平均含量	(CaO/Al ₂ O ₃) × 100
LF 化渣	92.3	7.7	8.34
LF 出站	52.0	32.3	62.12
RH 破空	52.4	42.6	81.30
吊包	52.2	42.0	80.46
中间包	67.1	32.2	47.99
连铸坯	60.5	36.5	60.33

表 4 LF 精炼和连铸时渣样成分和碱度

Table 4 Ingredient and basicity of slag sample in LF refining and casting

A 炉次	钢渣成分 / %					碱度	CaO/Al ₂ O ₃
	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	FeO	BaO		
LF 化渣	22.12	55.76	10.07	0.77	0.47	5.54	2.52
LF 出站	23.81	53.91	10.30	1.40	2.96	5.23	2.26
吊包	24.01	51.64	10.83	0.97	2.83	4.77	2.15
连铸坯	26.01	41.97	18.16	2.61	-	2.31	1.61

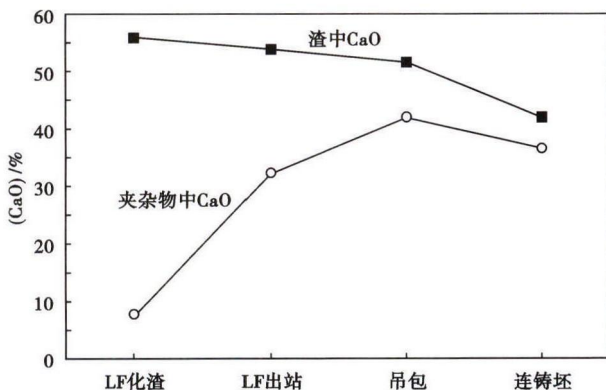


图 5 GCr15 轴承钢冶炼各工序渣和夹杂物中 CaO 含量变化
Fig. 5 Variation of CaO content in inclusions of bearing steel GCr15 in each steelmaking period

表 5 GCr15 轴承钢冶炼各工序典型夹杂物成分 / %

Table 5 Ingredient of typical inclusions of bearing steel GCr15 in each steelmaking period / %

工序	MgO	Al ₂ O ₃	CaO
LF 出站	14.85	72.52	12.63
RH 破空	3.47	63.60	32.93
吊包	3.54	60.45	36.01
中间包	3.97	54.25	41.78
连铸坯	5.10	60.53	34.37

在 LF 初期加入 Al 脱氧:

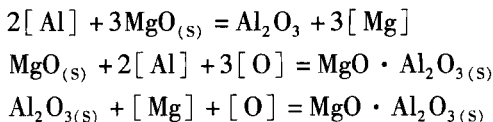


2.5.2 夹杂物 Mg 元素的变化

由图 6(a₃, b₃, c₃, d₃) 可知, LF 出站夹杂物中

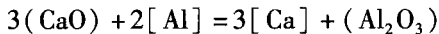
MgO 局部含量较高,随着冶炼的进行,反应趋向平衡,钢液中的[Ca]将夹杂物 MgO 中的[Mg]置换出来,进入钢液,钢液中的[Mg]随后在钢渣界面反应, [Mg] + [O] = (MgO)_s,生成 MgO 进入到渣中。所以最终夹杂物中 MgO 的含量较低。连铸阶段的典型夹杂物尺寸较大,应考虑动力学因素,对此夹杂物反应还未达到平衡,故出现 MgO 局部含量较高的现象。

镁由渣和钢包耐火材料中进入到钢液,与酸溶铝发生反应如下^[6]:

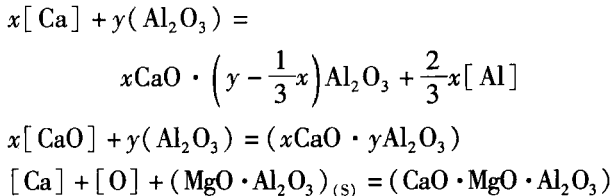


2.5.3 夹杂物 Ca 元素的变化

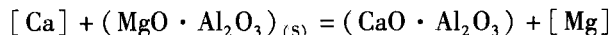
由图 6(a₄, b₄, c₄, d₄) 可知,随着[Ca]在钢液中的升高,[Ca]在夹杂物局部和 Al₂O₃ 形成钙铝酸盐,同时将夹杂物中的 MgO 置换出来。渣中的 CaO 和钢液酸溶铝发生反应:



钢液中钙含量达到一定程度时,会发生以下反应^[7-8]:



在高碱度和高[Ca]的条件下,镁铝尖晶石很容易转换为钙铝酸盐,反应如下^[9]:



3 结论

(1) LF 精炼过程增氮明显,增加 12 × 10⁻⁶ ~ 13 × 10⁻⁶,增氮 57% ~ 60%,主要原因是钢液裸露增氮。采用提高 LF 到站温度,大功率供电加热缩短加热时间和泡沫渣埋弧加热的办法,防止电弧区钢液裸露。RH 真空阶段有理想的脱氧效果,LF 精炼结束后的全氧含量控制在 12 × 10⁻⁶ ~ 14 × 10⁻⁶,经过 RH 真空处理钢水氧含量降低 5 × 10⁻⁶ ~ 6 × 10⁻⁶,降低 42%。RH 软吹对降低氧含量效果不明显。

(2) RH 破空时期夹杂物的单位面积内数量达到最少,夹杂物数量由 LF 化渣时期的 120 个/100 mm² 降低到 RH 破空时期 48 个/100 mm²。

(3) 渣对复合夹杂物成分起主导作用。铸坯中

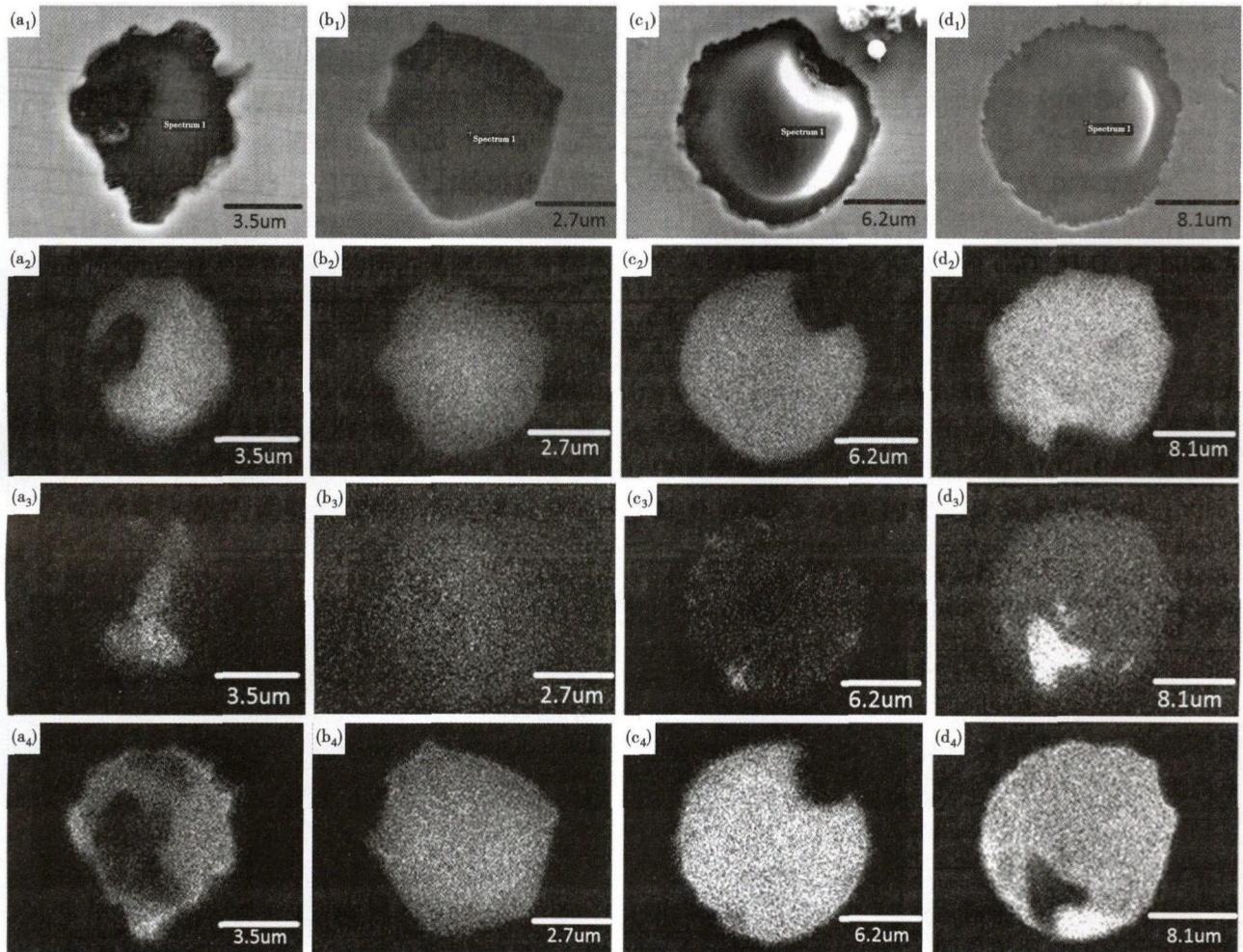


图6 GCr15 轴承钢冶炼各工序典型夹杂物形貌(a₁)(b₁)(c₁)(d₁), MgO-Al₂O₃-CaO 系夹杂物中的元素 Al(a₂)(b₂)(c₂)(d₂), Mg(a₃)(b₃)(c₃)(d₃)和 Ca(a₄)(b₄)(c₄)(d₄):(a₁)(a₂)(a₃)(a₄)LF 出站;(b₁)(b₂)(b₃)(b₄)RH 后吊包;(c₁)(c₂)(c₃)(c₄)中间包;(d₁)(d₂)(d₃)(d₄)连铸坯

Fig. 6 Morphology of typical inclusion (a₁)(b₁)(c₁)(d₁), and element Al (a₂)(b₂)(c₂)(d₂), Mg (a₃)(b₃)(c₃)(d₃) and Ca (a₄)(b₄)(c₄)(d₄) in MgO-Al₂O₃-CaO series inclusions of bearing steel GCr15 in each steelmaking period: (a₁)(a₂)(a₃)(a₄) end LF; (b₁)(b₂)(b₃)(b₄) after RH; (c₁)(c₂)(c₃)(c₄) tundish; (d₁)(d₂)(d₃)(d₄) casting slab

复合夹杂物以 Al₂O₃-CaO 夹杂为主,其中 CaO 含量由渣中 CaO 含量决定。

(4)高碱度渣和高[Ca]条件下,镁铝尖晶石很容易转换为钙铝酸盐。碱度在 2~3 时会出现少量 MgO-Al₂O₃ 系夹杂,渣碱度达到 4 以上时不会出现 MgO-Al₂O₃ 系夹杂物。同时 MgO-Al₂O₃-CaO 系夹杂物中 MgO 含量也会降低。

参考文献

- [1] 钟顺思,王昌生. 轴承钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:427.
- [2] 吴华杰,包燕平,岳峰,等. RH 真空处理 GCr15 轴承钢中全氧及显微夹杂物的行为研究[J]. 北京科技大学学报,2009,31(S1):121-124.
- [3] 缪新德,于春梅,石超民,等. 轴承钢中钙铝酸盐夹杂物的形成及控制[J]. 北京科技大学学报,2007,29(8):771-775.
- [4] 王伟,仇圣桃,颜慧成,等. GCr15 轴承钢 LF 控氮工艺分析[J]. 铸造,2014,63(6):617-619.

- [5] 薛正良,吴映江,吴丽嘉,等. BOF-LF-RH-CC 流程钢液增氮控制研究[J]. 武汉科技大学学报,2011,34(2):86-88.
- [6] 吴华杰,郭浩,魏崇一,等. 高品质轴承钢 LF-VD 过程非金属夹杂物演变规律[J]. 北京科技大学学报,2016,38(S1):206-212.
- [7] 董履仁,刘新华. 钢中大型非金属夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社,1991:46.
- [8] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:51.
- [9] 张鉴. 冶金熔体的计算热力学[M]. 北京:冶金工业出版社,1998:360.

刘佳伟(1990-),男,硕士研究生,2014 年华北理工大学(本科)毕业,RH 工艺冶炼高品质轴承钢夹杂物控制。

E-mail:455408379@qq.com

岳峰,高级工程师。E-mail:yuefeng@necar.ustb.edu.cn

收稿日期:2016-12-05