

## 120 t BOF-LF-RH-CC 流程 GCr15 轴承钢洁净度研究

王昆鹏 王海洋 徐建飞 赵 阳 林 俊 万文华 王 郢

(中天钢铁集团有限公司技术中心,常州 213011)

**摘 要** 对“120 t BOF-LF-RH-CC”流程 GCr15 轴承钢的洁净度研究结果表明,LF 精炼结束以  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  尖晶石和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$  夹杂为主,RH 真空处理后, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  尖晶石几乎全部消失,钢中夹杂物以液态钙铝酸盐为主,T. O 含量降至  $5.3 \times 10^{-6}$ ;浇注过程中间包重新生成  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  尖晶石;RH 终点和中间包钢水以及连铸坯未发现  $\geq 20 \mu\text{m}$  钙铝酸盐夹杂。

**关键词** GCr15 轴承钢 精炼 洁净度 夹杂物

## Investigation on Cleanliness of GCr15 Bearing Steel Produced by 120 t BOF-LF-RH-CC Process

Wang Kunpeng, Wang Haiyang, Xu Jianfei, Zhao Yang, Lin Jun, Wan Wenhua and Wang Ying  
( Technology Center, Zenith Steel Group Co Ltd, Changzhou 213011)

**Abstract** Cleanliness in GCr15 bearing steel produced by 120 t BOF-LF-RH-CC process investigated results show that the inclusions dominated in steel are  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  spinel and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-CaO}$  type after LF refining and the  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  spinel is almost disappeared and the inclusions in steel are mainly liquid calcium aluminate after RH treatment. T. O content decreases to  $5.3 \times 10^{-6}$  after RH treatment and  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  spinel regenerates in tundish liquid during casting, and the  $\geq 20 \mu\text{m}$  calcium aluminate inclusions are not found in liquid at end RH and tundish, and in casting bloom.

**Material Index** GCr15 Bearing Steel, Refining, Cleanliness, Inclusions

钢中大型点状夹杂(Ds 类夹杂)对轴承的疲劳寿命影响很大<sup>[1]</sup>。国家特优轴承钢标准要求  $D_s \leq 1.0$  级,高端轴承用户对钢中 Ds 夹杂要求更加严格。Ds 类夹杂的来源包括内生夹杂,中间包覆盖剂或精炼渣的卷入等<sup>[2-5]</sup>,但其生成机理尚未明确。Ds 类夹杂通常是  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  复合夹杂,因此,轴承钢冶炼过程需严格控制钢中 Ca 含量,当钢中 Ca 含量极低,强还原性渣精炼条件下,钢中容易生成  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  尖晶石,严重影响钢水的浇注性能。

高品质轴承钢常采用“BOF-LF-RH-CC”流程生产<sup>[1,6-7]</sup>,本文系统研究采用该工艺流程生产 GCr15 时钢水洁净度变化,重点关注  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$  尖晶石与 Ds 类夹杂相关的钙铝酸盐在冶炼过程中的变化规律。

### 1 试验过程和取样检测

GCr15 轴承钢主要化学成分为( $\%$ ): 1.0C, 0.3Si, 0.35Mn, 1.5Cr,  $\leq 0.006\text{S}$ ,  $\leq 0.008\text{P}$ 。炼钢工艺流程为:120 t BOF-LF 精炼-RH 真空处理-连铸方坯(220 mm  $\times$  260 mm)。主要精炼操作及要求包括:(1)转炉出钢后加入合金脱氧,合金化主要在出钢过程中完成;(2)精炼渣碱度( $\text{CaO/SiO}_2$ )控制在

6~8, $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量控制在 25%~30%,渣钢比为 8~10 kg/t;(3)RH 深真空时间不低于 25 min,连铸过程采用全保护浇注,防止钢水二次氧化。

分别在 LF 精炼初期、中期、结束、RH 破空以及中间包采用无铅取样器取钢水样,同时对相应铸坯取样。夹杂物分析采用 Thermo-Fisher 公司 Explorer 4,对钢中  $1\mu\text{m}$  以上夹杂进行统计分析,包括夹杂的成分、尺寸和数量等信息,每个试样扫描面积  $\geq 100 \text{mm}^2$ 。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 钢中主要元素和精炼渣成分变化

C、Si、Mn、Cr 等合金主要在转炉炉后加入,LF 精炼 30 min 后基本完成合金化,后期成分仅做微调,钢中各元素的含量变化见表 1。钢水脱硫主要在 LF 精炼过程完成,S 含量由进站时的 0.019% 降低至 LF 精炼结束的 0.003%。钢中 Al 全部在出钢过程加入,LF 精炼过程钢中 Als 含量由进站的 0.040% 降低到精炼结束的 0.020%,这主要是 Als 参与了钢中的脱硫和脱氧反应。RH 真空处理过程 Als 降为 0.005%。LF 精炼前期 T. O 由开始的  $18.3 \times 10^{-6}$  降低至  $12.8 \times 10^{-6}$ ,LF 精炼中后期 T. O

表 1 精炼和连铸过程 GCr15 钢中主要元素含量变化 / %  
Table 1 Variation of main element content in GCr15 steel during refining and casting process / %

取样点	C	Si	Mn	Cr	S	Als	N	T. O	备注
LF 进站	0.524	0.110	0.255	1.064	0.019	0.040	0.002 52	0.001 83	开始
精炼前期	0.840	0.180	0.260	1.160	0.010	0.038	0.003 01	0.001 28	15 min
中期	0.920	0.220	0.320	1.310	0.005	0.038	0.004 09	0.001 11	30 min
结束	0.970	0.230	0.360	1.460	0.003	0.020	0.004 32	0.001 16	72 min
RH 破空	0.960	0.220	0.350	1.430	0.002	0.015	0.002 73	0.000 53	循环 25 min
中间包	0.966	0.235	0.359	1.471	0.003	0.014	0.002 76	0.000 57	钢包浇注 90 t
铸坯	0.965	0.233	0.358	1.470	0.003	0.013	0.002 75	0.000 55	-

变化不明显, LF 结束 T. O 含量为  $11.6 \times 10^{-6}$ 。LF 精炼过程 N 含量由开始的  $25.2 \times 10^{-6}$  增加到结束的  $43.2 \times 10^{-6}$ 。RH 真空处理结束, T. O 降至  $5.3 \times 10^{-6}$ , N 降至  $27.3 \times 10^{-6}$ 。中间包 T. O 和 N 含量增加不明显, 最终铸坯 T. O 含量为  $5.5 \times 10^{-6}$ , N 含量为  $27.5 \times 10^{-6}$ 。

LF 处理结束精炼渣碱度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) 为 5.8, 炉渣氧化性极低,  $\text{FeO} + \text{MnO} = 0.40\%$ , T. Fe 含量为 0.40%。RH 破空后, 精炼渣碱度略有降低, 炉渣氧化性增加, 碱度为 5.08, 渣中  $\text{FeO} + \text{MnO} = 0.68\%$ , T. Fe 增加至 1.01%。

### 2.2 冶炼过程氧化物夹杂数量变化

本文所计算的夹杂物数量密度是指每百平方毫米氧化物夹杂的数量, 结果如图 1 所示。夹杂物数量密度由 LF 精炼前期的 243 个/ $100 \text{ mm}^2$  增至精炼结束的 351 个/ $100 \text{ mm}^2$ , 夹杂物数量密度与钢中 T. O 含量变化趋势不吻合。这主要是由于 LF 精炼前期钢中存在簇群状的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂, 如图 2(a) 所示。这些夹杂物颗粒之间的距离很小, Explorer 4 在统计夹杂物数量时会把间距小于  $40 \mu\text{m}$  的颗粒算作 1 个夹杂。LF 中后期, 簇群状的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂上浮去除, 夹杂物多以单个粒子存在, 如图 2(b)。LF 精炼结束钢中氧化物夹杂数量密度为 351 个/ $100 \text{ mm}^2$ , RH 真空处理后降至 61 个/ $100 \text{ mm}^2$ , RH 真空处理过程夹杂物数量减少 83%。连铸中间包氧化物夹杂的数量密度剧增至 366 个/ $100 \text{ mm}^2$ , 此时夹杂物数量密度甚至超过 LF 精炼结束。铸坯氧化物夹杂数量为 192 个/ $100 \text{ mm}^2$ 。

### 2.3 冶炼过程夹杂物成分变化

图 3 为冶炼过程氧化物夹杂中各组元平均含量

表 2 RH 处理前后精炼渣成分

Table 2 Ingredient of refining slag before and after RH treatment

取样点	渣成分 / %							CaO/ SiO <sub>2</sub>	CaO/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	T. Fe	FeO		
LF 结束	51.4	8.9	0.03	3.7	27.7	0.40	0.37	5.80	1.85
RH 破空	49.5	9.7	0.00	4.6	26.9	1.01	0.68	5.08	1.84

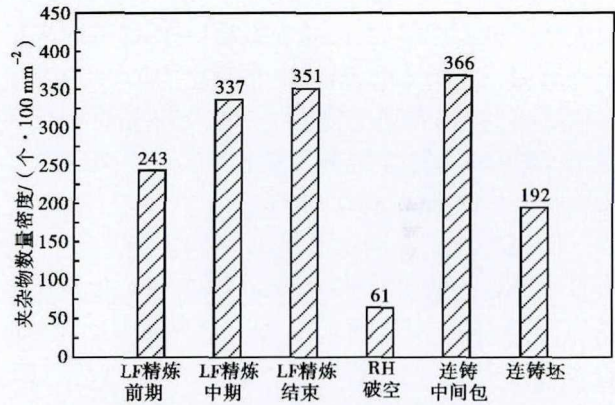


图 1 炼钢过程 GCr15 钢中氧化物夹杂数量密度变化  
Fig. 1 Number density variation of oxide inclusions in GCr15 steel during steelmaking process

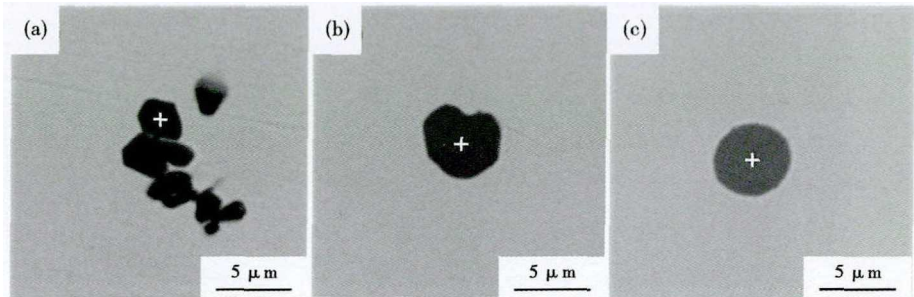


图 2 LF-RH 过程夹杂物典型形貌:(a)LF 前期钢簇群状  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; (b)LF 中后期典型单颗粒夹杂; (c)RH 破空后球形钙铝酸盐类夹杂

Fig. 2 Typical morphologies of inclusions during LF-RH process: (a) cluster  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in early stage of LF refining; (b) single inclusion in mid-to-late stage of LF refining; (c) spherical calcium aluminate inclusion after RH treatment

变化。LF 精炼前期, 夹杂物中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 93%, CaO 为 4%, MgO 和 CaS 含量极低。随着精炼的进行, 夹杂物中 MgO 和 CaO 含量均呈增加趋势, 但 MgO 含量的增加速度比 CaO 快, LF 精炼中期 (LF 处理

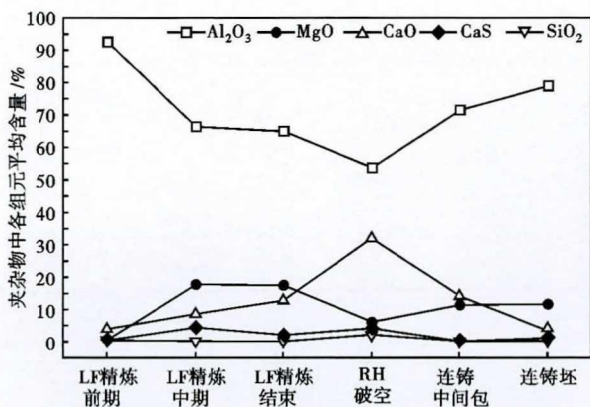


图 3 炼钢过程 GCr15 钢中夹杂组元平均含量变化  
Fig.3 Average ingredient variation in GCr15 steel inclusions during steelmaking process

15 min) 夹杂物中 MgO 含量增加到 18%, 继续至 LF 精炼结束 (LF 处理 72 min) 夹杂物中 MgO 平均含量不再增加。随精炼的进行, 夹杂物中 CaO 平均含量由精炼前期的 4% 增至精炼中期的 9%, 精炼结束时增至 13%。LF 精炼结束夹杂物 (%) 为: 65Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-18MgO-13CaO-2.7CaS-0.3SiO<sub>2</sub>。

RH 破空后, 夹杂物中 MgO 平均含量急剧下降, 由真空处理前的 18% 降至 6%, CaO 平均含量急剧增加, 由真空处理前的 13% 增至 32%, SiO<sub>2</sub> 和 CaS 较真空处理前稍有增加, 但含量均在 5% 以下, RH 破空后夹杂物平均组成 (%) 为: 53Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-32CaO-6MgO-5CaS-2SiO<sub>2</sub>, 这些夹杂在电镜下呈球形, 炼钢温度下为液态夹杂。

浇注过程夹杂物中 CaO 平均含量降低, 由破空时的 32% 降至中间包的 14%, 而夹杂物中 MgO 平

均含量则明显增加, 由破空时的 6% 增加到 12%, CaS 和 SiO<sub>2</sub> 平均含量降低至 1% 以下。连铸中间包夹杂物平均组成 (%) 为: 72Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-14CaO-12MgO-0.5CaS-0.3SiO<sub>2</sub>。连铸坯中 CaO 平均含量继续降至 4%, MgO 平均含量无明显变化, 保持在 12%, 铸坯中夹杂物平均组成 (%) 为: 79Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-12MgO-4CaO-1.4CaS-0.5SiO<sub>2</sub>。

2.4 夹杂物成分与尺寸分布

LF 精炼前期夹杂物主要是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO · 6Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO · 6Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂占比 85%, 此外, 部分夹杂物中 MgO 含量在 10% 以上, 部分夹杂物中 CaO 含量在 20% 以上, 如图 4(a) 所示。275 个夹杂物中有 6 个尺寸在 10 ~ 40 μm, 从成分落点上看, 10 μm 以上的夹杂均处于钙铝酸盐 1500 °C 液相区。由于 LF 精炼前期夹杂物中 CaO 和 MgO 平均含量在 5% 以下, 推断此时渣-钢-耐材之间的反应并不剧烈, 钢液并不具备生成钙铝酸盐的条件, 因此, 此时钢中大尺寸钙铝酸盐应主要来源于精炼渣的乳化或卷入。

LF 精炼中期, 钢中夹杂物以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石为主, 约占比 70%, 同时存在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-CaO 和 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 类夹杂。691 个氧化物夹杂中尺寸 10 ~ 40 μm 夹杂共 10 个, 其中 8 个处于钙铝酸盐 1500 °C 液相区, 如图 4(b) 所示。LF 精炼结束, 钢中夹杂物仍以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石为主, 比例达 68%。516 个氧化物夹杂物中尺寸 10 ~ 40 μm 夹杂共 12 个, 8 个处于钙铝酸盐 1500 °C 液相区, 如图 4(c) 所示。

RH 破空后夹杂物以液态钙铝酸盐为主, 液态

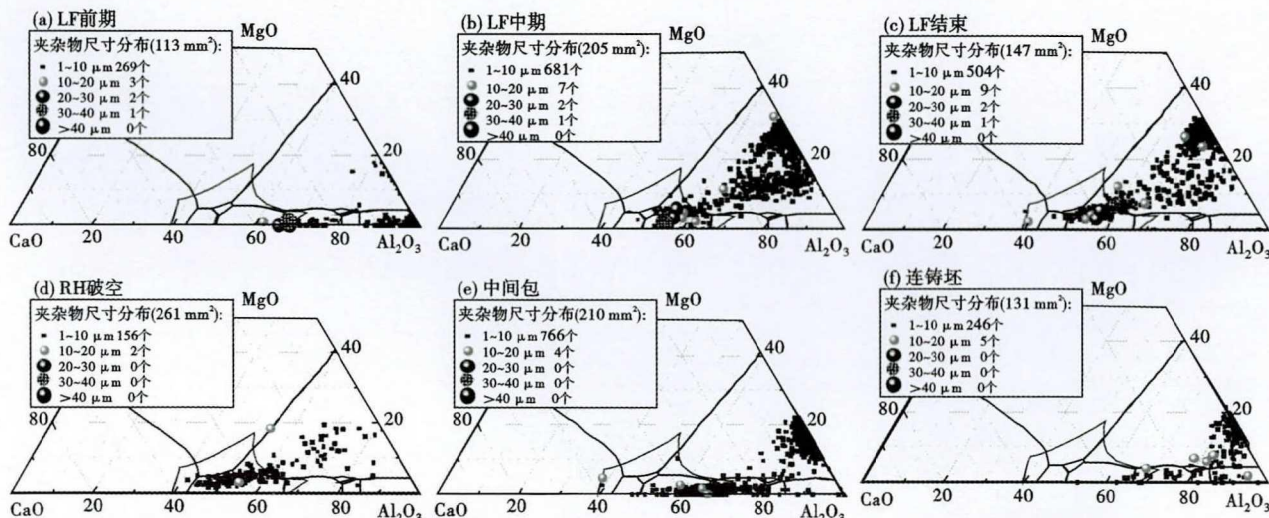


图 4 炼钢过程 GCr15 钢中氧化物夹杂成分和尺寸分布: (a)LF 前期; (b)LF 中期; (c)LF 结束; (d)RH 破空; (e)中间包; (f)连铸坯  
Fig.4 Ingredient and size distribution of oxide inclusions in GCr15 steel during steelmaking process: LF refining at (a) earlier, (b) medium, (c) end ; and (d) end RH, (e) tundish, (f) casting bloom

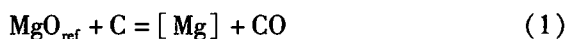
钙铝酸盐占比 74%, 261 mm<sup>2</sup> 扫描面积中仅发现 1 个 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石, 占比仅 0.6%。158 个氧化物夹杂物仅有 2 个夹杂物尺寸在 10 ~ 20 μm, 未发现 20 μm 以上的夹杂。

中间包夹杂物以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石和钙铝酸盐为主, 其中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石占比 54%, 钙铝酸盐占比 31%, 如图 4(e) 所示, 而 RH 破空后钢中几乎无 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石, 说明浇注过程中重新生成了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石。770 个氧化物夹杂中仅有 4 个尺寸在 10 ~ 20 μm, 均处于钙铝酸盐 1 500 °C 液相区, 未发现 20 μm 以上夹杂。

连铸坯夹杂以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石为主, 占 74%。10 ~ 20 μm 夹杂仅有 5 个, 1 个处于钙铝酸盐 1 500 °C 液相区附近, 4 个为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-CaO 夹杂。

## 2.5 结果讨论

随着 LF 精炼的进行夹杂物中 MgO 和 CaO 含量均增加, 钢中夹杂物类型由精炼前期的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 转成精炼结束的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-CaO 夹杂。夹杂物类型的变化主要受钢中 Mg 和 Ca 含量或活度的影响, 有关 LF 精炼过程 Mg 和 Ca 来源的研究很多, Mg 的来源主要有两个方面:



一方面, 钢包耐火材料中的 MgO 在高温时可被 C 还原进入钢液, 成为钢中 Mg 的来源, 如反应方程式(1)所示<sup>[8]</sup>; 另一方面, 精炼渣中的 MgO 被钢中的 Al 还原, 向钢中供 Mg, 如反应方程式(2)所示。Ca 主要来源于合金中的杂质, 比如硅铁中的 Ca, 也有少部分 Ca 来源于钢中 Al 还原精炼渣中的 CaO<sup>[9]</sup>。由于钢厂生产过程耐火材料、合金、精炼渣等条件不尽相同, Ca 和 Mg 来源还有待进一步研究。

为高效去除钢中夹杂, 降低 T. O 含量, RH 深真空 (< 15 Pa) 处理时间不低于 20 min。此外, RH 破空后不进行软搅拌, 直接浇注, 避免软搅拌过程钢水裸露和长时间的耐材侵蚀。除常规保护浇注措施以外, 还采用了中间包包盖吹氩技术, 防止连铸过程钢水的二次污染。RH 真空处理过程 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石全部消失, 钢中存在的夹杂物为处于 1 500 °C 液相区的钙铝酸盐。浇注过程中间包重新生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石, 这些新生成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石在浇注温度条件下非常容易在塞棒棒头聚集并烧结, 造成浇注过程的塞棒上扬和液面波动, 严重影响

轴承钢的生产和产品质量。由表 1 可见, 中间包 T. O 和 N 含量相比于真空处理结束并没有明显增加, 因此, 可排除中间包发生二次氧化。浇注过程的温降可能是造成中间包重新生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石的原因。

## 3 结论

(1) LF 精炼结束钢中夹杂物以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-CaO 为主, RH 真空处理后, 钢中几乎不存在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO, 钢中夹杂物以液态钙铝酸盐为主。同时, RH 真空处理后, 钢中 T. O 和 N 含量显著下降, 降至  $5.3 \times 10^{-6}$  和  $27.3 \times 10^{-6}$ 。

(2) 浇注过程, 钢中重新生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石, 新生成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · MgO 尖晶石会导致塞棒上涨, 液面波动。

(3) 20 μm 以上大尺寸夹杂主要以液态钙铝酸盐为主, 在 LF 精炼过程更容易发现此类夹杂, RH 破空、中间包钢水以及铸坯中均未发现 ≥ 20 μm 钙铝酸盐夹杂。

## 参考文献

- [1] Kato Y, Masuda T and Kawakami K, et al. Recent Bearing Improvements in High Carbon Chromium Steel [J]. ISIJ International, 1996, 36. Supplement: S89-S92.
- [2] 缪新德, 徐国庆, 陈情华, 等. GCr15 钢中大颗粒夹杂 (Ds 类) 的生成原因分析 [J]. 炼钢, 2007, 23(2): 21-24.
- [3] 徐迎铁, 陈兆平, 杨宝权. 轴承钢 Ds 类大颗粒夹杂物研究 [J]. 炼钢, 2016, 32(4): 49-53.
- [4] 姜敏, 王昆鹏, 侯泽旺, 等. 低氧特殊钢中 Ds 类夹杂物生成机理 [J]. 工程科学学报, 2016, 38(6): 780-786.
- [5] 吉岡孝宜, 中畑憲一郎, 河村崇紀, 等. 二次精錬工程における介在物組成構成変化 [J]. Sanyo Technical Report, 2016, 23(1): 36-46.
- [6] 刘佳伟, 岳峰, 王子健. 100 t BOF-LF-RH-CC 流程冶炼 GCr15 轴承钢非金属夹杂物演变 [J]. 特殊钢, 2017, 38(3): 61-65.
- [7] 刘明, 柯晓涛, 邓通武, 等. 120 t 转炉-LF-RH-CC 流程生产 GCr15 轴承钢的工艺和冶金质量 [J]. 特殊钢, 2009, 30(3): 38-39.
- [8] 松野英寿, 菊地良輝. 高炭素鋼の MgO 系介在物の起源 [J]. 鉄と鋼, 2002, 88(1): 48-50.
- [9] Matsumoto T, Watanabe Y and Yamauchi T. Recent Development to Decrease Spinel-Type Inclusions by Modification of Slag Composition at Ladle Furnace [C]. AISTech Proceedings, Warrendale: Association for Iron & Steel Technology, 2018: 1273-1283.

王昆鹏(1988-), 男, 博士(2017年北京科技大学), 副主任工程师, 2010年昆明理工大学(本科)毕业, 特殊钢中夹杂物控制技术。E-mail: kunpengwang@foxmail.com

收稿日期: 2020-09-16