



中间包涂料对 GCr15 轴承钢洁净度的影响

姜亚清, 陈 君, 黄成钢, 李 博, 李 倩, 江焱锋
(大冶特殊钢有限公司工艺研究所, 黄石 435001)

摘 要:分析了某钢厂 GCr15 轴承钢生产过程中,在真空处理前后及中间包的钢水中夹杂物演变规律,结果表明,钢水中全氧含量在中间包中大幅度上升,镁铝尖晶石类夹杂物在 RH 软吹及中间包中有不同程度的上升,在中间包中数量上升明显。用后中间包涂料工作层中 MgO 骨料颗粒大量减少,部分 MgO 颗粒溶于钢水中造成钢水中氧含量上升。通过热力学模拟分析,论述了不同 SiO₂ 含量对中间包涂料高温物相的影响,提出将 SiO₂ 控制在 4%~6%,并加强中间包砌制管理,可减少中间包涂料中高温低熔相的生成,可有效提高 GCr15 轴承钢头炉探伤合格率。

关键词:GCr15 轴承钢; 夹杂物; 中间包涂料; 侵蚀

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2022-00178 **中图分类号:**TF702. 9

Effect of Tundish Coating on Cleanliness of GCr15 Bearing Steel

Jiang Yaqing, Chen Jun, Huang Chenggang, Li Bo, Li Qian, Jiang Yanfeng
(Institute of Technology, Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China)

Abstract: The evolution of inclusions in molten steel in tundish before and after vacuum treatment during the production of GCr15 bearing steel in a steel plant is analyzed, the results showed that total oxygen content in molten steel increased greatly in tundish. Magnesium aluminum Spinel inclusions increased in RH soft blowing and tundish to varying degrees, and the number increased significantly in tundish. The MgO aggregate particles in the working layer of the tundish coating are greatly reduced, and some MgO particles are dissolved in the molten steel, resulting in the increase of oxygen content in the molten steel. The effect of different SiO₂ content on the phase of tundish coating was discussed by thermodynamic simulation analysis. It was proposed that the control of SiO₂ content at range 4%~6% and the strengthening of tundish masonry management can reduce the formation of high temperature low melting phase in tundish coating and effectively improve the flaw detection eligibility rate of bearing steel GCr15 head slab.

Key Words: GCr15 Bearing Steel; Inclusions; Tundish Coating; Erosion

轴承钢作为优质洁净钢的代表品种,钢中非金属夹杂物对其疲劳性能有显著影响^[1-3]。冶金工作者对 GCr15 轴承钢夹杂物演变与控制进行了大量研究^[4-6],众多耐火材料工作者对中间包涂料的侵蚀损毁进行了研究^[7-9]。大多将钢水与耐火材料作为整体分析,对两者之间的相互影响鲜有报道^[10-12]。本文对轴承钢冶炼过程中氧含量及夹杂物的变化进行跟踪,对用后中间包涂料进行解剖与热力学模拟,分析了中间包涂料对 GCr15 轴承钢钢水洁净度的影响。

1 试验材料及方法

在某钢厂对 GCr15 轴承钢进行工业试验,采用的炼钢工艺为:70 t EBT→LF→RH→CC。EBT 出钢过程完成主要的钢水成分合金化;LF 精炼过程完成钢水成分的调整,并进行脱氧、脱硫等操作;RH 真

空过程主要进行脱气处理和夹杂物去除;最后经过精炼的钢水通过连铸浇注成铸坯。

为了分析 GCr15 轴承钢在冶炼过程中夹杂物的演变行为,分别在 RH 进站、RH 出站、RH 软吹、连铸中间包中对钢水取样,连铸结束时对铸坯取样,取 2 炉钢水的平均检验结果进行分析。采用全自动夹杂物分析系统(ASPEX)对钢样中的夹杂物进行分析。对用后中间包涂料进行取样,利用扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析仪(EDS)对用后中间包涂料进行侵蚀情况分析。利用 FactSage 软件对中间包涂料进行高温下热力学模拟分析。

2 试验结果与分析

2.1 钢水中氧含量和氮含量

GCr15 轴承钢在冶炼过程中,钢水及铸坯中全氧、全氮含量情况如图 1 所示,钢水中全氧含量情况

总体较好, RH 进站全氧含量 5.7×10^{-6} , 真空后全氧含量迅速下降至 2.4×10^{-6} , 软吹后全氧含量变化不大。中间包中全氧含量大幅度上升至 6.6×10^{-6} , 在铸坯中回落至 3.7×10^{-6} 。同时可以看出, 氮含量在 RH 真空前后迅速从 53×10^{-6} 下降至 32×10^{-6} , 在后续 RH、中间包、连铸过程保持稳定。

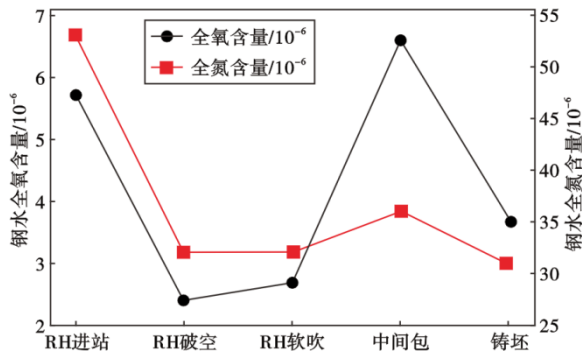


图1 钢水及铸坯中全氧和全氮含量

Fig. 1 Content of total oxygen and total nitrogen in molten steel and casting billet

2.2 钢水中夹杂物尺寸、个数

对在扫描区域内的镁铝尖晶石类、含钙类夹杂物平均尺寸进行统计, 统计结果如图2(a)所示。结果显示, RH 破空前镁铝尖晶石类、含钙类夹杂物平均尺寸均呈下降趋势, 在 RH 软吹及铸坯中镁铝尖晶石类夹杂物平均尺寸从 $3 \mu\text{m}$ 下降至 $2 \mu\text{m}$, 含钙类夹杂物平均尺寸逐渐从 $2 \mu\text{m}$ 上升至 $3 \mu\text{m}$ 。同样, 对扫描区域内的镁铝尖晶石类、含钙类夹杂物个数统计结果如图2(b)所示。两类夹杂物的全流程个数变化也有较明显的特征。其中镁铝尖晶石类、含钙类在 RH 软吹及中间包中有不同程度的上升, 镁铝尖晶石类夹杂物数量上涨明显, 从 22 个夹杂物上涨至 65 个夹杂物。该结果与各工序钢水全

氧含量分析结果关联性较强, 认为中间包全氧含量增加的原因有二: 镁铝尖晶石类夹杂物的个数上升; 含钙类夹杂物的个数与尺寸的上升。钢中镁铝尖晶石类及含钙类夹杂物形貌如图3所示, EDS 分析结果见表1。

2.3 中间包涂料侵蚀

通过用后涂料(渣线部位、钢水部位)成分对比, 对比结果见表2, 渣线部位 MgO 含量比钢水部位低, CaO 含量比钢水部位高, 且都与涂料原始成分相差明显, 说明覆盖剂、钢水都会对中间包涂料有侵蚀, 覆盖剂对涂料侵蚀更严重。

利用 SEM 对用后涂料渣线部位原质层、工作层进行物相分析, 显微结构形貌如图4所示, EDS 分析结果见表3。结果表明, 从渣线部位涂料工作层到原质层, 残衬各层中的 CaO 、 SiO_2 含量逐渐降低, 这与化学分析结果一致, 同时生成的镁硅橄榄石系低熔点物质逐渐减少。与原质层相比, 工作层中 MgO 大量减少, 部分 MgO 颗粒溶于钢水中。

2.4 夹杂物形成探讨

经 RH 真空处理后, 钢水中夹杂物尺寸与数量大幅下降, 但在中间包中细小镁铝尖晶石类、含钙类夹杂物数量上升。中间包中镁铝尖晶石类夹杂物的产生主要由于钢水中溶解 Al 与中间包涂料中的 MgO 发生反应, 如式(1)。



GCr15 轴承钢真空后未进行钙处理, 但在中间包中含钙类夹杂物数量同样上升明显, 主要由于含钙类中间包覆盖剂对中间包涂料的侵蚀, 造成中间包涂料剥落溶于钢水中。从式(2)可以看出, 当温度为 554°C 时, 镁铝尖晶石类夹杂物即可向铝酸钙转变, 最终形成含钙类复合型夹杂物。

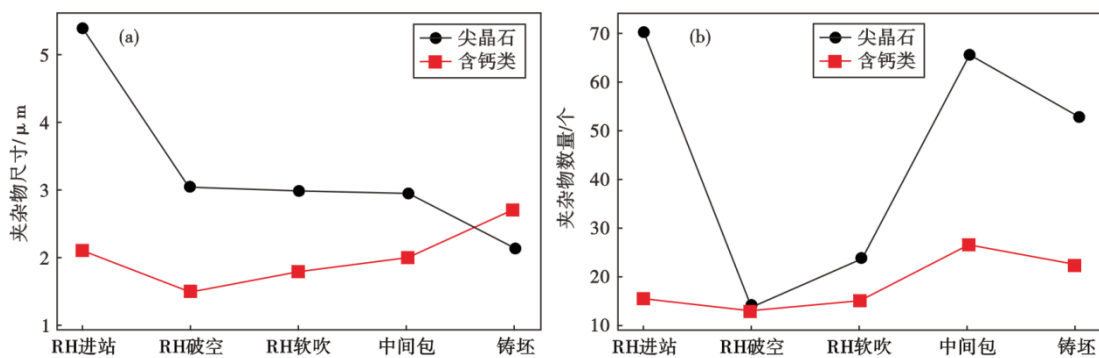
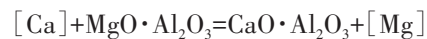


图2 钢水及铸坯中夹杂物变化情况:(a)平均尺寸,(b)数量

Fig. 2 Changes of inclusions in molten steel and casting billet: (a) average size, (b) quantity

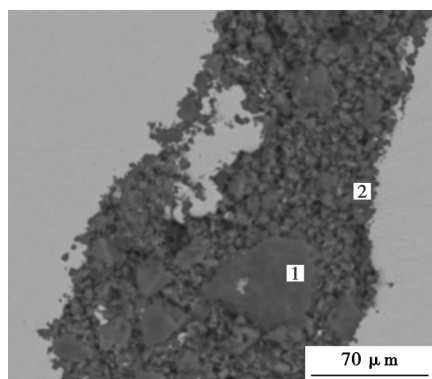


图 3 GCr15 轴承钢中夹杂物形貌
Fig. 3 Morphology of inclusions in GCr15 bearing steel

表 1 图 3 中各点的 EDS 分析结果(质量分数)
Table 1 EDS results of points in figure 3 %

微区	O	Mg	Al	Ca	物相
图 3-1	59.92	3.31	27.19	9.76	铝酸钙
图 3-2	65.10	11.65	23.25	-	镁铝尖晶石

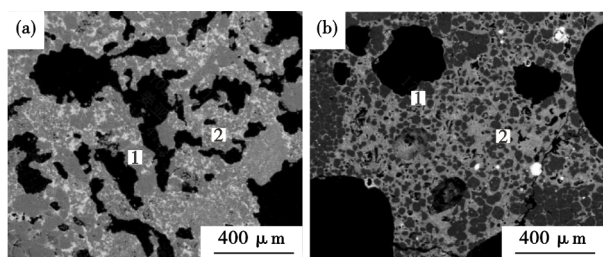


图 4 用后涂料渣线部位的物相形貌:(a)原质层,(b)工作层
Fig. 4 Phase morphology of slag line of used coating: (a) raw material layer, (b) working layer

表 2 覆盖剂及中间包涂料化学成分(质量分数)
Table 2 Chemical composition of covering agent and tundish coating %

试样名称	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	Na ₂ O
覆盖剂	51.38	4.12	6.05	31.55	0.96	-	-	-
中间包涂料未用	1.75	4.60	87.10	1.97	1.83	0.09	0.18	0.35
用后涂料(渣线部位)	14.06	5.76	66.19	10.71	2.43	0.15	0.19	0.20
用后涂料(钢水部位)	6.76	6.75	78.08	5.35	2.24	0.23	0.18	0.14

$$\Delta G = 43\ 807 - 55.33T \quad (2)$$

式中: ΔG 为自由能, J/mol; T 为温度, °C。

利用 FactSage 软件计算 1 480 °C 中间包涂料在不同 SiO₂ 含量时, 涂料中物相组成变化如图 5 所示。

表 3 图 4 中各点的 EDS 分析结果(质量分数)

Table 3 EDS results of points in figure 4 %

微区	O	Mg	Si	Ca	Mn	物相
图 4(a)-1	50.00	49.25	-	-	0.75	方镁石
图 4(a)-2	54.07	34.78	7.10	3.76	0.64	玻璃相
图 4(b)-1	50.00	49.33	-	-	0.67	方镁石
图 4(b)-2	57.19	13.74	14.37	14.06	0.65	玻璃相

结果表明,随着涂料中 SiO₂ 含量增加,涂料中生成的低熔相逐渐增加,当涂料中 SiO₂ 成分在 4%~7% 波动时,计算得出,生成相应的低熔相镁硅橄榄石为 0.76%~7%,在中间包开浇阶段,这些低熔相逐渐向钢水中溶解,对钢水洁净度造成一定影响,使钢水中夹杂物增多。因此,建议将中间包涂料中的 SiO₂ 控制在 4%~6%,既能保证中间包涂料具有一定的烧结强度,又不会因为大量低熔相污染钢水。通过严格控制中间包涂料中的 SiO₂ 含量及中间包砌制管理后,统计了 30 炉 GCr15 轴承钢头炉探伤合格率和中间包涂料 SiO₂ 含量关系,如图 6 所示,发现随着中间包涂料中 SiO₂ 含量增加, GCr15 头炉探伤合格率呈下降趋势,表明控制中间包涂料中的 SiO₂ 含量,可有效改善 GCr15 轴承钢头炉产品质量。

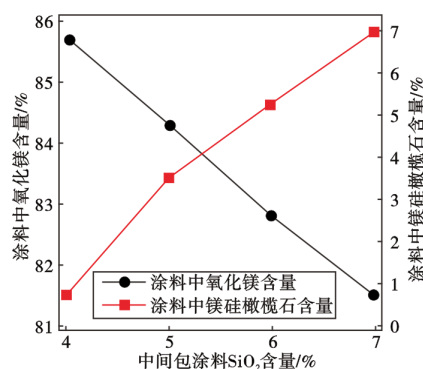


图 5 不同 SiO₂ 含量对中间包涂料高温物相影响
Fig. 5 Effect of different SiO₂ content on high temperature phase of tundish coating

3 结论

(1) GCr15 轴承钢在冶炼过程中,经 RH 真空处理后,虽然夹杂物尺寸与数量大幅下降,但中间包中镁铝尖晶石类夹杂物、含钙类夹杂物的数量上升造成中间包全氧含量增加。中间包中镁铝尖晶石

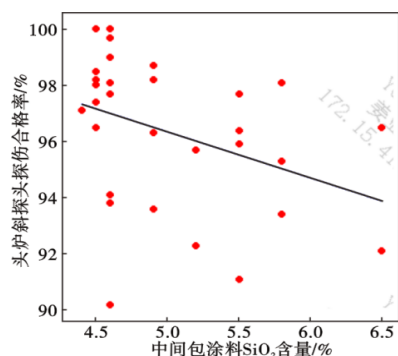


图6 中间包涂料SiO₂含量对GCr15钢头炉斜探头探伤合格率影响

Fig. 6 Effect of SiO₂ content of tundish coating on qualified rate of GCr15 steel head heat oblique probe flaw detection

参考文献

- [1] 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+101.
- [2] 顾超, 王仲亮, 肖微, 等. 高疲劳寿命轴承钢洁净度现状及研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(3): 299-310.
- [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, 44(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] 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): 33-38.
- [6] 贾楠, 吴华杰, 包燕平, 等. 转炉流程生产GCr15轴承钢洁净度研究[C]. 第十五届全国炼钢学术会议论文集. 北京: 2008: 187-190.
- [7] 郁书中, 彭学峰, 崔任渠, 等. 含不烧镁橄榄石的镁质中间包涂料对汽车板钢洁净度的影响[J]. 耐火材料, 2019, 53(2): 101-105.
- [8] 何成, 魏耀武, 郭龙超. 中间包覆盖剂对镁钙质涂料侵蚀的研究[J]. 材料工程, 2010(S2): 414-416.
- [9] 贺中央, 黄江文, 宋世锋. 薄板坯中间包镁质喷涂料的侵蚀机理[J]. 耐火材料, 2007, 41(4): 267-270.
- [10] 王硕明. 转炉流程轴承钢中非金属夹杂物行为的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [11] 沈万林, 张志成, 罗小燕. 60 t LF精炼终点GCr15轴承钢中氧化物夹杂特性的研究[J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 18-23.
- [12] 王昆鹏, 王海洋, 徐建飞, 等. 120 t BOF-LF-RH-CC流程GCr15轴承钢洁净度研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 14-17.

类夹杂物主要来源于中间包涂料的MgO与钢水中的溶解Al反应产生。

(2)覆盖剂、钢水都会对中间包涂料造成侵蚀,根据相似相溶原理,覆盖剂对中间包涂料侵蚀更严重。用后中间包涂料工作层中MgO骨料大量减少,部分MgO颗粒溶于钢水中,对钢水洁净度造成一定影响。

(3)通过控制中间包涂料中SiO₂含量,将中间包涂料中的SiO₂控制在4%~6%,并加强中间包砌筑管理,可减少中间包涂料中低熔点物质的产生,有利于缓解中间包涂料中MgO颗粒的剥落,减少中间包中夹杂物数量,提升轴承钢头炉探伤合格率。