

基于非铝脱氧工艺的 GCr15 轴承钢中 Ds 类夹杂物控制

王仲亮¹,包燕平¹,顾超¹,刘宇²,黄永生²

(1 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083;2 中天钢铁集团有限公司,常州 213011)

摘要:当前在轴承钢中氧含量已经能够控制在极低水平的情况下,Ds 类夹杂物成为影响其质量稳定性的主要因素之一。为解决这一问题,本研究提出了利用非铝脱氧工艺,不使用铝作为脱氧剂,而采用硅锰预脱氧、渣面扩散脱氧、真空终脱氧、精炼过程造低碱度渣的方式生产 GCr15 轴承钢。与传统铝脱氧生产工艺相对比,非铝脱氧工艺轴承钢中主要夹杂物为硅酸盐,含有少量钙铝硅复合夹杂物,减少了形成 Ds 类夹杂物的镁铝尖晶石和钙铝酸盐,显著降低了 Ds 类夹杂物的含量,在轧材中能够将 Ds 类夹杂物稳定控制在 0.5 级以下,评级为 0 级的样品占比高达 91.67%。该工艺能够获得稳定的生产效果和产品质量,并为高品质轴承钢生产提供理论及技术指导。

关键词:非铝脱氧;GCr15 轴承钢;Ds 类夹杂物;全流程;高品质钢

Control of Ds Inclusions in GCr15 Bearing Steel Based on Non-aluminum Deoxidation Process

Wang Zhongliang¹, Bao Yanping¹, Gu Chao¹, Liu Yu², Huang Yongsheng²

(1 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;
2 Zenith Steel Group Co., Ltd., Changzhou 213011)

Abstract: At present, the oxygen content in bearing steel has been controlled at a very low level, and Ds inclusions have become one of the main factors affecting its quality stability. In order to solve this problem, a non-aluminum deoxygenation process is proposed to produce GCr15 bearing steel. Instead of using aluminum as deoxidizer, silicon-manganese pre-deoxidation, slag surface diffusion deoxidation, vacuum final deoxidation and low basicity slag formation in refining process are adopted. Compared with the traditional aluminum deoxidation production process, the main inclusions in the bearing steel of non-aluminum deoxidation process are silicate with a small amount of calcium aluminum-silicon composite inclusions, which reduces the magnesium aluminum spinel and calcium aluminate forming Ds inclusions, and significantly reduces the number of Ds inclusions. Ds inclusions can be stably controlled below grade 0.5 in rolled products, and the proportion of samples graded at grade 0 is as high as 91.67%. This process can obtain stable production results and product quality, which will provide theoretical and technical guidance for the production of high-quality bearing steel.

Key Words: Non-aluminum Deoxidation; GCr15 Bearing Steel; Ds Inclusions; the Whole Process; High-quality Steel

近年来,我国高品质轴承钢的生产技术取得了长足进步,部分企业的轴承钢实物质量已经达到国际先进水平,但是在轴承钢实物质量的稳定性方面,与国际领先水平还有差距^[1-3]。目前,国内外生产高品质轴承钢主要采用铝脱氧工艺,通过控制脱氧条件和高碱度渣快速降低钢液中氧含量并吸附氧化铝夹杂,部分企业的高质量轴承钢全氧含量已经可以控制在 5×10^{-6} 以下^[4]。常规铝脱氧轴承钢中主要氧化物夹杂类型为 D 类(球状氧化物)、Ds 类(以钙铝酸盐为主)和 B 类(镁铝尖晶石)夹杂物,其中钙

铝酸盐类夹杂物被认为是对于轴承钢疲劳寿命影响最大的氧化物夹杂^[5]。钢中 Ds 类夹杂物主要来源于钢中 Al 对钢液的脱氧产物和对渣及耐材的还原产物,因此,实际生产中,一味追求钢液的超低全氧含量并不能消除钢中的钙铝酸盐类夹杂物。

本研究通过硅锰预脱氧-扩散脱氧-真空脱氧的组合脱氧方式,代替常规工艺的铝脱氧,能够将钢液中全氧含量控制在 8×10^{-6} 以下,并且从源头上减少了钢中含铝类夹杂物的生成。由于精炼渣不再需要大量吸附氧化铝夹杂物,可采用碱度为 1.0 左右

基金项目:国家自然科学基金(52174297)

作者简介:王仲亮(1995-),男,博士生; E-mail:b20200576@xs.ustb.edu.cn; 收稿日期:2022-09-08

通讯作者:包燕平(1963-),男,北京科技大学,教授; E-mail:baoyp@ustb.edu.cn

的低碱度渣。降低精炼渣中的氧化钙含量,将其成分控制在低熔点范围内,使钢中夹杂物主要为塑性夹杂物。这一工艺大幅减少了钢中尖晶石类和钙铝酸盐类夹杂物的含量,在铸坯中形成了以硅酸盐类为主要氧化物类型的塑性夹杂物体系,保证了高品质轴承钢中 Ds 类夹杂的极低量控制。

1 非铝脱氧轴承钢工艺及试样制备

1.1 生产工艺

钢厂在生产高品质轴承钢时为实现夹杂物塑性化,减少 Ds 类夹杂物产生,采用非铝脱氧方式,即硅锰预脱氧-LF 扩散脱氧-真空终脱氧的组合脱氧工艺,历经 120 t 转炉初炼-LF 变渣操作-RH 真空深脱氧-160 mm × 160 mm 小方坯连铸等工序生产 GCr15 轴承钢。该生产工艺主要包括如下关键技术:基于硅锰预脱氧与扩散脱氧的轴承钢前期控氧技术、基于真空碳氧平衡的轴承钢深脱氧技术、低碱度 CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO 四元渣系及钢液关键成分控制和非铝脱氧轴承钢的夹杂物控制及流动性改善关键技术。

1.2 试样制备及表征

首先在全流程不同工序位置处取提桶样、精炼渣样及铸坯样。然后在提桶样上利用线切割切取 10 mm × 10 mm × 10 mm 的金相样,Φ5 mm × 40 mm 的氧氮样,在铸坯样上切取同样规格的金相样和氧氮样,另外取 40 mm × 40 mm × 120 mm 的电解样,

精炼渣采用 DF-4 型粉碎机破碎至 ≤0.074 mm(200 目)。之后将各钢样表面进行清洁,保证无锈迹和油污,渣样在真空烘箱中充分烘干,防止水分干扰。最后在表 1 所示的设备中进行试样表征。

表 1 分析表征类型及所用设备

Table 1 Types of analysis and equipment used			
表征类型	设备名称	型号	产地
夹杂物形貌和微区成分	扫描电镜	Pro-X	荷兰
钢中氧氮	氧氮分析仪	TCH-600	美国
钢渣成分	X 射线荧光光谱仪	EDX-8000	日本
夹杂物自动扫描	夹杂物分析系统	EVO18 + MAX80	德国

2 Ds 类夹杂物成因分析

2.1 典型形貌

利用扫描电镜对采用传统铝脱氧工艺生产的轴承钢中 Ds 类夹杂物进行分析,其典型形貌及能谱如图 1 所示。Ds 类夹杂物以复合相形式存在,成分主要包括 CaO、Al₂O₃、MgO 和 CaS。形态上主要呈现出以镁铝尖晶石为核心,包裹钙铝酸盐后聚集长大,最终在外层包覆 CaS 的三层结构。从图 1 中可以观察到 Ds 类夹杂物尺寸较大,可达 50 μm 以上,对轴承钢基体连续性破坏明显。并且部分 Ds 类夹杂物存在尖锐边界,容易成为疲劳裂纹源,造成轴承钢部件使用过程中断裂,严重影响产品质量稳定性。

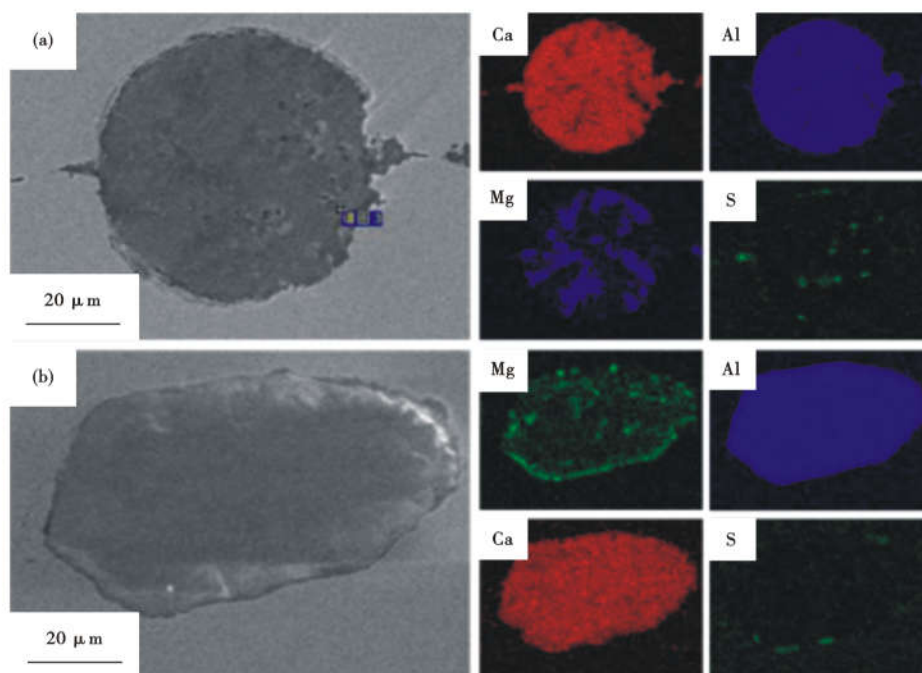


图 1 Ds 类夹杂物形貌及 EDS 能谱分析

Fig. 1 SEM morphology and EDS analysis of Ds inclusions

2.2 形成机理与控制手段

Ds 类夹杂物是直径大于 $13\ \mu\text{m}$ 的球状单颗粒夹杂物。有研究表明,钢中 Ds 类夹杂物主要来源于精炼过程中渣钢反应形成的 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂^[6-9]。兴澄特钢对轴承钢中大型夹杂物进行检测发现,其主要成分为 Al-Mg-Ca-O-S ^[9]。徐迎铁等在感应炉试验中发现轴承钢中 Ds 类夹杂物主要包括中心不含硅的内生型 Ds 夹杂物、周围被 MgO 包裹的中间包覆盖剂卷入型 Ds 类夹杂物和中心含有硅的精炼渣卷入型 Ds 类夹杂物三种类型^[8]。根据 Ds 类夹杂物成分和结构可以剖析其形成机理,如图 2 所示。

第一步:大量加入的铝与钢液中氧生成脱氧产物 Al_2O_3 ;

第二步:钢液中的酸溶铝与渣或耐材中的 MgO 反应,将 Mg 还原到钢液中,并与 Al_2O_3 结合生成 Ds 类夹杂物的形核中心镁铝尖晶石;

第三步:钢液中的酸溶铝与渣中 CaO 反应,将 Ca 还原到钢液中,与镁铝尖晶石结合形成 Ca-Mg-Al-O 复合夹杂。最后,浇注过程钢中 CaS 在该夹杂物周围析出,形成最外层的包裹层。

针对 Ds 类夹杂物形成过程,在铝脱氧生产轴承钢过程中通常采用几种方式减少其生成^[10-13]。

(1) 根据生产实际选择合适的耐火材料。由于酸溶铝能够还原耐材中的 MgO ,应尽量使用耐火度高、抗侵蚀性好的耐火材料,减少耐材与钢液之间的反应。

(2) 通过控制精炼渣成分,降低钢液增钙量。在保证精炼渣对 Al_2O_3 足够的去除效果前提下,适当降低炉渣碱度,将碱度 $(R) [(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)]$ 控制在 $3 \sim 4$,可以有效阻止 Ca-Mg-Al-O 复合夹杂的生成。

(3) 控制合理的吹氩及浇注工艺。精炼渣和中间包覆盖剂卷入,也是形成 Ds 类夹杂物的重要原因,应制定合理的钢液软吹和浇注液面控制制度,防止卷渣发生。

(4) 使用稀土和镁元素对 Ds 类夹杂物进行改性。有学者研究表明,在轴承钢中添加稀土元素和镁元素时,随着其含量的不断增加 ($0 \sim 1.2 \times 10^{-4}$),钢中 Ds 类夹杂物的含量呈下降趋势,夹杂物表面变得更光滑,长宽比逐渐变小。

本研究所采取的非铝脱氧工艺,不同于上述控制手段,而是在源头杜绝了脱氧产物 Al_2O_3 的形成,同时钢液中的低铝环境也减少了对耐材中 MgO 和渣中 CaO 的还原。而且低碱度精炼渣进一步降低

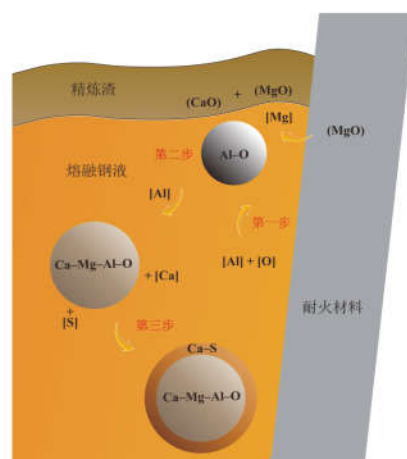


图 2 Ds 类夹杂物形成过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of Ds inclusion formation

了 (CaO) 活度,实现了夹杂物塑性化。

3 非铝脱氧轴承钢中 Ds 类夹杂物控制

3.1 全流程氧氮变化

为评价非铝脱氧工艺全流程氧氮控制水平,对 2 炉次采用该工艺生产的 GCr15 轴承钢氧含量和氮含量随工序的变化进行分析,如图 3 和图 4 所示。氧含量在 LF 精炼阶段经过硅锰预脱氧和精炼渣扩散脱氧,于精炼结束时低于 2×10^{-5} 。经过 RH 梯级真空度控制,在 $67\ \text{Pa}$ 以下的高真空保持 $15\ \text{min}$ 以上,未出现大的喷溅,氧含量降低到 8×10^{-6} 以下。浇注过程钢液面、长水口和浸入式水口保护浇注效果良好,未出现明显增氧,部分炉次略有增长。氮含量在 LF 精炼末期达到最高,这主要是由于出钢后及 LF 精炼过程加入的大量铁合金带入了氮,并且在电极周围形成钢液裸露区吸入空气。经过 RH 精炼氮含量出现明显降低,脱气效果明显,之后变化趋势与氧相同。所以,采用非铝脱氧工艺可以将氧含量控制在极低水平,提高钢液洁净度,同时可以控制夹杂物的类型。

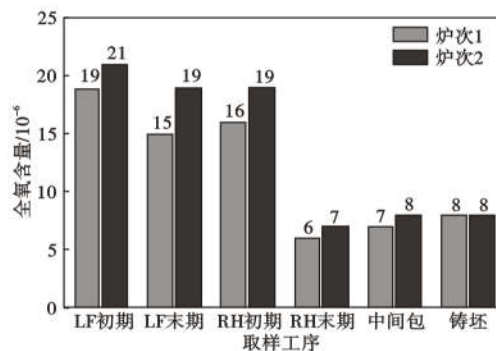


图 3 非铝脱氧工艺生产过程钢液中全氧含量变化
Fig. 3 Change of total oxygen content in liquid steel during non-aluminum deoxidation production process

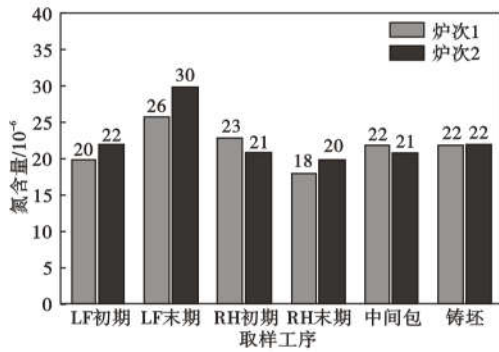


图4 非铝脱氧工艺生产过程钢液中氮含量变化

Fig.4 Change of nitrogen content in liquid steel during non-aluminum deoxidation production process

3.2 精炼渣系变化

铝脱氧轴承钢在 LF 精炼时渣碱度一般在 5.0 以上,这有利于降低平衡时钢中的全氧含量,并能大量吸附氧化铝夹杂。然而,高碱度炉渣中 (CaO) 活度高,因此钢液中酸溶铝能将 (CaO) 还原为 [Ca] 而进入钢液,为钙铝酸盐类夹杂物生成提供条件。由表 2 可知,对比传统铝脱氧工艺精炼渣成分,非铝脱氧工艺精炼渣具有碱度低, MgO 含量高, Al₂O₃ 含量

表 2 不同脱氧工艺生产轴承钢 LF 精炼渣成分及碱度
Table 2 Composition and basicity of LF refining slag of bearing steel produced by different deoxidation production process

工艺	序号	CaO/%	SiO ₂ /%	MgO/%	Al ₂ O ₃ /%	碱度(R)
铝脱氧	1	54.29	8.81	3.18	27.34	6.17
	2	50.25	9.96	4.85	28.04	5.05
	3	50.75	8.58	3.54	30.49	5.92
	4	52.17	9.77	3.81	26.89	5.34
非铝脱氧	1	40.12	40.49	11.30	5.06	0.90
	2	37.88	42.02	12.27	4.71	0.90
	3	41.53	39.66	11.43	4.92	1.05
	4	38.27	41.91	10.88	5.45	0.91

低的特点。在本课题的前期研究工作中,使用 Fact-Sage7.2 计算了非铝脱氧的低碱度渣系成分对 (CaO) 和 (Al₂O₃) 活度的影响,如图 5 所示,表明 (CaO) 的活度主要决定于 CaO 浓度,渣碱度越高, CaO 浓度越高,则 (CaO) 活度越高^[14]。非铝脱氧冶炼轴承钢工艺中,精炼渣碱度在 1.0 左右,渣中 (CaO) 活度在 0.01 ~ 0.03,远低于高碱度精炼渣中 (CaO) 活度。因此,在非铝脱氧工艺中一方面避免了因铝脱氧生成的大量镁铝尖晶石夹杂物,另一方面渣中 (CaO) 活度降低导致 [Ca] 不能被还原进入

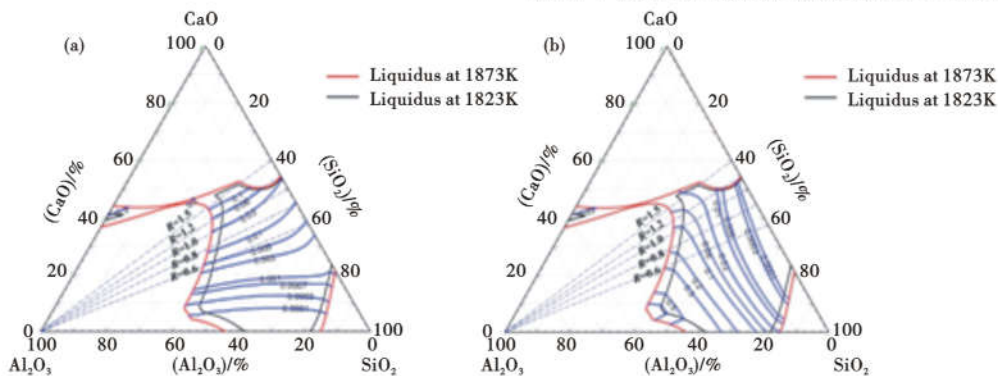


图 5 精炼渣成分对 (a) CaO 和 (b) Al₂O₃ 活度的影响

Fig.5 Effects of refining slag composition on the activities of (a) CaO and (b) Al₂O₃

钢液,两者结合形成的 Ds 类夹杂物数量锐减。同时渣中低的 CaO 含量,也有利于降低精炼渣熔点,防止软吹后渣面结壳,提高覆盖保护效果。

3.3 夹杂物演变规律

对铝脱氧和非铝脱氧两种工艺不同工序位置进行取样,根据夹杂物自动扫描结果,探究了夹杂物中各氧化物比例随工序变化规律,如图 6 和图 7 所示。

采用铝脱氧工艺冶炼的轴承钢,在出钢时夹杂物基本全部为 Al₂O₃,伴随精炼渣化渣完成,渣金反应开始,在 LF 阶段夹杂物中开始出现 MgO、CaO 和 SiO₂, Al₂O₃ 所占比例逐渐下降,此时会形成大量镁

铝尖晶石夹杂物。在 RH 阶段渣中 CaO 被酸溶铝还原至钢液中,夹杂物中 CaO 比例升高, SiO₂ 比例下降。最终铸坯中以 Al₂O₃ 所占比例最高, CaO 和 MgO 其次, SiO₂ 最低,可形成 Al₂O₃ 夹杂物、镁铝尖晶石夹杂物、钙铝酸盐夹杂物及大颗粒的 Ds 类夹杂物。

采用非铝脱氧工艺冶炼的轴承钢,在转炉出钢后由于加入硅锰作为脱氧剂,夹杂物成分以 Al₂O₃ 和 SiO₂ 为主。LF 精炼过程中的夹杂物 Al₂O₃ 比例增加, CaO 比例降低。RH 精炼进站后 CaO 比例增加,这是由于 RH 初期钢渣界面波动剧烈,渣中的 CaO 卷入钢液中,导致夹杂物中的 CaO 含量增多。最终铸

坯中以 Al_2O_3 和 SiO_2 所占比例最高,达到 90% 以上, CaO 和 MgO 所占比例较低,可形成低熔点硅酸盐类夹杂物及部分 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 类复合夹杂物。

3.4 Ds 类夹杂物评级

参照国标 GB/T 10561-2005 对超过 200 炉次采用不同脱氧工艺生产的轴承钢轧材中的 Ds 类夹杂

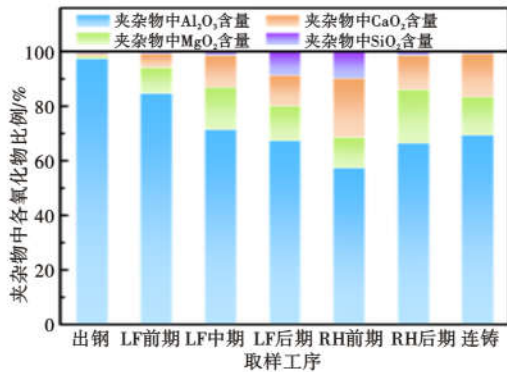


图6 铝脱氧工艺夹杂物中各氧化物随工序变化

Fig. 6 Changes of oxides in inclusions during aluminum deoxidation process

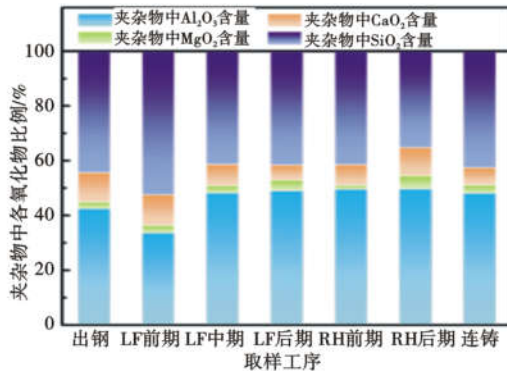


图7 非铝脱氧工艺夹杂物中各氧化物随工序变化

Fig. 7 Changes of oxides in inclusions during non-aluminum deoxidation process

参考文献

- [1] 曹文全, 俞峰, 王存宇, 等. 高端装备用轴承钢冶金质量性能现状及未来发展方向. 特殊钢[J], 2021, 42(1):1-10.
- [2] 宗男夫, 黄健, 刘军, 等. 轴承钢质量提升的关键冶金技术现状及展望[J]. 轴承, 2020(12):60-66.
- [3] Neishi Y, Makino T, Matsui N, et al. Influence of the inclusion shape on the rolling contact fatigue life of carburized steels. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(5): 2131-2140.
- [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] 李新生, 李闯, 刘国强, 等. 高强轴承钢 GCr15 的疲劳性能与寿命预测研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55(4):141-144.
- [6] 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.
- [7] 刘浏. 高品质特殊钢关键生产技术[J]. 钢铁, 2018, 53(4): 1-7.
- [8] 徐迎铁, 陈兆平, 杨宝权. 轴承钢 Ds 类大颗粒夹杂物研究[J].

表3 不同脱氧工艺生产的 GCr15 轴承钢 Ds 类夹杂物评级的占比/%

Table 3 Proportion of Ds inclusion rating of GCr15 bearing steel produced by different deoxidation process/%

工艺	0级	0.5级	1级	1.5级	2级
铝脱氧	45.45	38.53	13.64	2.16	0.22
非铝脱氧	91.67	8.33	0	0	0

物进行评级,发现非铝脱氧工艺的 Ds 类夹杂物评级明显好于铝脱氧工艺,评级结果见表 3。因此,可以认为通过非铝脱氧工艺生产轴承钢能够将 Ds 类夹杂物稳定控制在 0.5 级以下,实现大幅减少该类夹杂物的目的。

4 结论

(1) 采用硅锰预脱氧,渣面扩散脱氧,真空终脱氧,精炼过程造低碱度渣的非铝脱氧工艺冶炼高品质 GCr15 轴承钢,能够在将氧含量控制在 8×10^{-6} 以下水平的同时,从源头减少钢中含铝类夹杂物的生成。由于精炼渣不再需要大量吸附氧化铝夹杂,可采用碱度为 1 左右的低碱度渣,降低精炼渣中的氧化钙含量,有利于 Ds 类夹杂物控制。

(2) 非铝脱氧工艺不使用铝脱氧,减少了常规铝脱氧轴承钢中 Ds 类夹杂物的包裹核心即镁铝尖晶石的形成。精炼渣碱度在 1.0 左右,渣中(CaO)活度远低于高碱度渣,且钢液中铝含量极低,因此,被酸溶铝还原得到的[Ca]极少,钙铝酸盐类夹杂物数量锐减。

(3) 采用非铝脱氧工艺生产 GCr15 轴承钢,在轧材中能够将 Ds 类夹杂物稳定控制在 0.5 级以下,实现大幅减少该类夹杂物的目的,评级为 0 级的样品占比高达 91.67%。

炼钢, 2016, 32(4): 49-53.

- [9] 耿克, 吴明, 翁韶华, 等. 高纯净 GCr15 轴承钢脆性夹杂物的控制[J]. 特殊钢, 2008, (5): 54-55.
- [10] 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]. 工程科学学报, 2016, 38(S1): 206-212.
- [11] 任宏志. 稀土 Ce 元素对轴承钢中 Ds 类夹杂物的影响[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2019.
- [12] 赵亚斌, 王福明, 李长荣, 等. 镧在含残余锡、铋 GCr15 钢中的作用[J]. 中国稀土学报, 2007, (2): 229-233.
- [13] 常立志, 高岗, 郑福舟, 等. 稀土-镁复合处理对 GCr15 轴承钢中夹杂物的影响[J]. 工程科学学报, 2019, 41(6): 763-771.
- [14] 王仲亮, 包燕平, 顾超, 等. 基于非铝脱氧工艺的高品质轴承钢关键冶金技术研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1607-1619.