

## 80 t BOF-LF-VD-CC 流程生产 GCr15 轴承钢控氧的工艺实践

刘发友<sup>1,2</sup> 王国承<sup>1</sup> 孙长余<sup>1</sup> 赵昌明<sup>1</sup> 汪琦<sup>1</sup> 毛福来<sup>2</sup>

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051;2 山东寿光巨能特钢有限责任公司,潍坊 262711)

**摘要** 分析了 BOF 终点 [C] 对终点 [O] 的影响,LF 精炼渣 (FeO + MnO) 和 [Als] 对钢水 [O] 和钢材 T[O] 的影响。通过控制 BOF 终点 [C] 0.12% ~ 0.15%,下渣量 < 0.10%,LF 精炼控制 [Als] 0.015% ~ 0.025%,采用高碱度中间包覆盖剂和专用 GCr15 钢连铸保护渣等工艺措施,在稳定工艺控制的条件下,可使钢中 T[O]  $\leq 10 \times 10^{-6}$ ,平均 T[O] 为  $6.62 \times 10^{-6}$ 。

**关键词** 80 t BOF-LF-VD-CC 流程 GCr15 轴承钢 T[O] 终点 [C] [Als] 精炼渣 保护浇铸

## Process Practice of Control Oxygen Content in Bearing Steel GCr15 Produce by 80 t BOF-LF-VD-CC Flowsheet

Liu Fayou<sup>1,2</sup>, Wang Guocheng<sup>1</sup>, Sun Changyu<sup>1</sup>, Zhao Changming<sup>1</sup>, Wang Qi<sup>1</sup> and Mao Fulai<sup>2</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051;  
2 Shandong Shouguang Juneng Special Steel Co Ltd, Weifang 262711)

**Abstract** The effect of BOF end [C] on end [O] and the effect of LF refining slag (FeO + MnO) and [Als] in steel on liquid [O] and finished products T[O] are analyzed. With using the process measures including controlling BOF end [C] 0.12% ~ 0.15% and amount of slagging out < 0.10%, controlling [Als] 0.015% ~ 0.025% in LF refining, using high basicity tundish shielding agent and special bearing steel GCr15 casting powder, in stable process control condition the T[O] in steel  $\leq 10 \times 10^{-6}$  and the average T[O] is  $6.62 \times 10^{-6}$ .

**Material Index** 80 t BOF-LF-VD-CC Flowsheet, Bearing Steel GCr15, T[O], end [C], [Als], Refining Slag, Shielding Casting

以 GCr15 为代表的高碳铬轴承钢诞生至今已有百年历史,虽然钢种化学成分没有太大变化,但轴承钢疲劳寿命却有数倍提高,原因之一是钢的洁净度获得了很大提高。影响轴承钢洁净度的因素很多,最关键的因素是氧含量以及氧化物夹杂的数量、尺寸、形态和分布等,特别是硬脆性氧化物,如氧化铝。实践和研究表明,钢中氧化物夹杂数量与总氧含量大致呈正比关系<sup>[1,2]</sup>。可见,降低总氧可以控制氧化物夹杂数量和尺寸。

多年来,轴承钢生产企业均致力于研究氧含量控制技术和超低氧洁净钢生产技术。如日本山阳特钢生产的超纯轴承钢(EP 钢)总氧含量(T[O])已达  $5.0 \times 10^{-6}$  以下<sup>[3]</sup>。兴澄特钢采用电弧炉流程生产轴承钢,T[O] 低于  $6.0 \times 10^{-6} \sim 7.0 \times 10^{-6}$ <sup>[4]</sup>。山东寿光巨能特钢有限公司(巨能特钢)采用铁水→80 t BOF→LF→VD→CC 工艺生产 GCr15 轴承钢,

钢坯经缓冷后轧制,轧材经缓冷后精整和包装,GCr15 轴承钢成品规格(/%)为:0.95 ~ 1.05C,0.15 ~ 0.35Si,0.25 ~ 0.45Mn,P $\leq$ 0.025,S $\leq$ 0.025。为降低轴承钢氧含量,针对轴承钢冶炼各工序生产实践,探索了具体的控氧原则和措施。

### 1 转炉高拉碳和挡渣

在转炉冶炼工序,进行了降低终点钢水氧含量以及减少出钢下渣量两方面研究。为了最终降低轴承钢氧含量,首先应获得较低氧含量的初炼钢水,为精炼脱氧和夹杂物去除打下基础<sup>[5]</sup>。该转炉炉型为顶底复吹转炉,主要采用石灰和生白云石造渣,采用铁矿石(烧结矿)和铁钒土促进化渣。转炉出钢成分(/%)控制为:0.10 ~ 0.20C,P $\leq$ 0.012,0.08 ~ 0.15Mn。在转炉冶炼阶段,根据碳氧平衡原理,获得终点钢水较低氧含量需保证钢水有较高的碳含量。因此,转炉冶炼采用高拉碳操作控制。

通讯作者:王国承,博士,教授,辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051

E-mail:wang\_guocheng@163.com

图1所示为80 t转炉现场实验测得的出钢温度在1 893 ~ 1 923 K,终点钢水氧含量与碳含量之间的变化关系。实验中,终点钢水氧活度采用 Multi-Lab Celox 定氧仪测定,碳含量取终点钢水样化学分析。由图1可见,随着终点钢水碳含量的增加,钢水氧含量呈现快速降低趋势。当碳含量([C]) < 0.10%时,随着碳含量增加,氧含量([O])快速下降;当碳含量控制在0.10%左右时,钢水氧含量基本上可以稳定在0.03%以下;当碳含量控制在0.15%时,钢水氧含量可以稳定控制在0.02%以下;随后,随着终点碳含量的继续增加,终点氧含量下降趋势变得平缓。因此,巨能特钢在转炉冶炼过程中,在考虑脱磷(入炉铁水平均磷含量约0.12%,出钢磷含量内控要求 $\leq 0.012\%$ )以及终点温度(1 893 ~ 1 923 K)要求下,通过底吹和造渣过程优化,目前多炉次终点钢水碳含量可以稳定控制在0.12% ~ 0.15%。

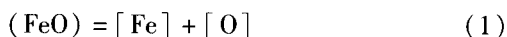
转炉出钢过程中,若终点氧化渣进入钢包,高氧势炉渣必然造成钢水增氧,一方面不利于LF精炼,

延长白渣形成和调整时间,同时造成精炼后钢水中氧化铝等有害夹杂含量增加。为此,转炉出钢时采用以挡渣锥为主、挡渣球为辅的挡渣方式出钢。如图2所示,在出钢口使用的前期和中期,挡渣成功率较高,下渣量占总渣量比例基本上稳定控制在小于0.10%。在出钢口服役后期,挡渣效果逐渐降低,下渣量逐渐增加。通过实践摸索确定,挡渣成功率稳定在99.2%以上时的出钢口寿命不超过120炉次。

综上,转炉通过高拉碳控制,终点钢水氧含量可稳定在0.02%左右,通过有效挡渣出钢,下渣量基本可稳定在0.8%以内,为LF精炼操作提供了良好的钢水基础。

## 2 精炼过程控制

巨能特钢 GCr15 轴承钢精炼包括 LF 精炼和 VD 精炼。LF 精炼主要通过钢水-炉渣之间的界面反应控制钢水的氧含量,同时,对钢水喂 Al 线进行深脱氧,通过全程吹氩促进脱氧反应和夹杂物上浮去除。根据渣-金界面反应机理,氧元素在钢水和炉渣之间的界面反应可用式(1)表示:



同时,由于精炼渣中(MnO)与(FeO)的性质十分相近,同样具有较强的氧化性,所以常用渣中(MnO)和(FeO)的总质量百分数(FeO + MnO)表征精炼渣的氧化性(氧势)高低。当精炼渣的氧势高于与其接触钢水的氧势时,氧元素将从炉渣通过钢渣界面反应(1)向钢水中传递,造成钢水二次氧化。根据化学平衡原理,由式(1)可得 LF 中氧元素在钢水与炉渣之间的分配比( $L_0$ )如式(2)。

$$L_0 = (\text{FeO} + \text{MnO}) / [\text{O}] \quad (2)$$

式中:(FeO + MnO)-渣中(FeO)和(MnO)质量百分含量之和/%;[O]-钢液中氧的质量分数/%; $L_0$ -氧元素在炉渣与钢液之间的分配比,当温度及炉渣组成一定时, $L_0$ 为常数。

根据式(2),在一定炉温下,降低精炼渣中(FeO + MnO),控制炉渣氧势低于钢水时,氧元素从钢液向渣中传递,发生扩散脱氧,降低钢水氧含量。

图3所示为LF精炼终渣中(FeO + MnO)与钢液氧含量[O]之间的变化关系。可见,随着渣中(FeO + MnO)增大,钢液中氧的质量分数呈快速上升趋势。据此,为了将钢水氧含量控制在较低水平,精炼过程要求LF精炼渣中(FeO + MnO)低于0.5%。同时,为了保证炉渣具有良好的流动性和吸

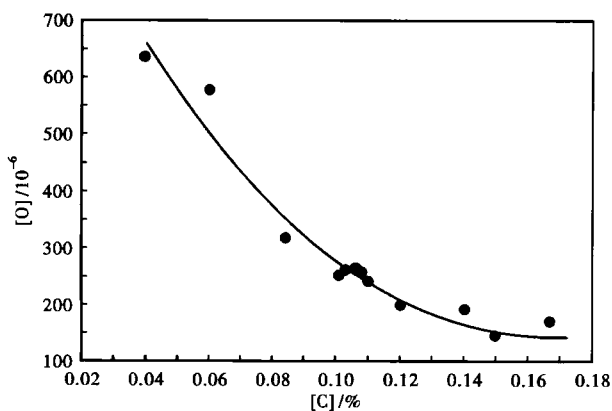


图1 80 t转炉终点钢水[C]对[O]的影响

Fig.1 Effect of 80 t BOF end liquid [C] on [O]

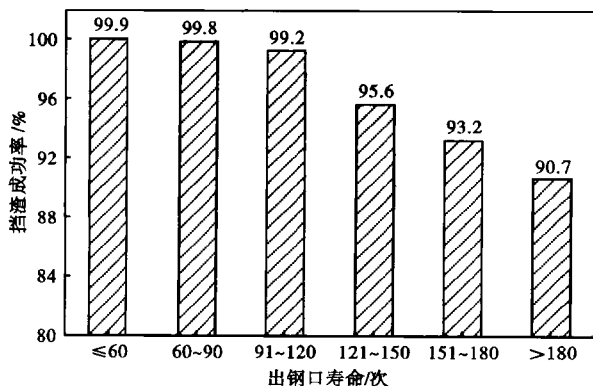


图2 出钢口寿命与挡渣成功率的关系

Fig.2 Relation between service life of steel-tapping hole and complete slag-stop rate

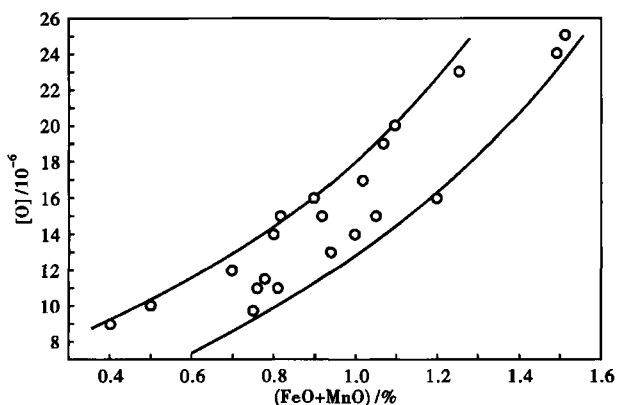


图 3 精炼渣 (FeO + MnO) 对钢水 [O] 的影响  
Fig. 3 Effect of refining slag (FeO + MnO) on liquid [O]

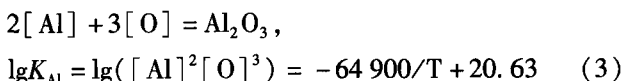
表 1 LF 精炼渣化学成分和碱度  
Table 1 Ingredient and basicity of LF refining slag

| 成分/%    |                  |                                |             | 碱度 (R)    |
|---------|------------------|--------------------------------|-------------|-----------|
| CaO     | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | (FeO + MnO) |           |
| 50 ~ 60 | 10 ~ 20          | 15 ~ 25                        | ≤ 0.5       | 4.0 ~ 5.0 |

附夹杂物的性质,特别是吸收氧化铝夹杂的能力,要求精炼渣碱度 R 控制在 4.0 ~ 5.0,并保证一定的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量。

经过成分优化设计和实验探索,确定采用的 LF 精炼渣的化学成分如表 1 所示。在实际操作上,为了保证上述精炼要求并控制精炼渣成分,采用少量、多批原则往精炼渣面加入 Si-C 粉和 Al 粉等扩散脱氧剂,以保持精炼渣在整个过程稳定的强还原性,同时保持炉内良好的还原性气氛;适时调控除尘风流量,使得炉内处于微正压状态,杜绝空气吸氧。

Al 用于深脱氧时的脱氧反应及 [Al] 和 [O] 之间的平衡关系可用式(3)表示。



Al 脱氧操作时,控制使钢水获得合适的 [Al] 十分重要,[Al] 过高可能造成连铸过程由于 Al 的氧化而导致水口堵塞严重,[Al] 过低则难以实现深脱氧要求。研究认为,轴承钢较为合适的酸溶铝的含量控制范围为 [Als] = 0.010% ~ 0.026%<sup>[6]</sup>。

图 4 所示为总结的巨能特钢的 GCr15 轧材的 T[O] 与成品钢中 [Als] 之间的变化关系,可见,[Als] 控制在 0.18% ~ 0.20% 可将总氧含量控制在较低水平。根据巨能特钢的生产实践,一般 [Als] 控制在 0.015% ~ 0.025%,氧含量基本上可以稳定在 9.0 × 10<sup>-6</sup> 左右。在实际操作中,加 Al 时机尤为重

要,应以精炼早期、一次加入为原则,便于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有足够的上浮时间去。

精炼过程吹氩初期以尽快化渣、埋弧和调温为原则,通常采取中流量控制;在合金微调期,为了促进钢水成分快速均匀化,采用较大流量控制;精炼中期和末期适当降低流量,以钢水不裸露为原则。氩气流量控制受出钢量、透气砖状况、渣厚度等因素影响,现场实际操控不易。经摸索不同阶段的目视搅拌状态依据见表 2。同时由于精炼时间对氧含量控制有一定影响,稳定的白渣形成后,延长白渣精炼时间有利于深脱氧,一般控制在 20 min 以上。

LF 出站后进入 VD 真空精炼。考虑到脱氢和脱氮要求,VD 实际操作时,100 Pa 以下真空度的持续时间保持在 15 min 以上。为保证脱气效果,及时通过透视孔观察调整氩气流量,使钢水裸露便于快速脱气。真空处理结束后开始软吹,软吹流量以控制渣面轻微波动为原则,严禁钢水裸露,时间控制在 20 ~ 30 min,以促进夹杂物进一步上浮排出。

### 3 连铸过程控制

在连铸过程中,对钢水浇铸全过程进行严格保护,防止发生二次氧化,主要包括物理保护、气体保护和固体保护 3 种方式。物理保护包括在钢包与中间包之间采用长水口保护,在中间包与结晶器之间采用整体浸入式水口保护,减少浇注过程吸气。气

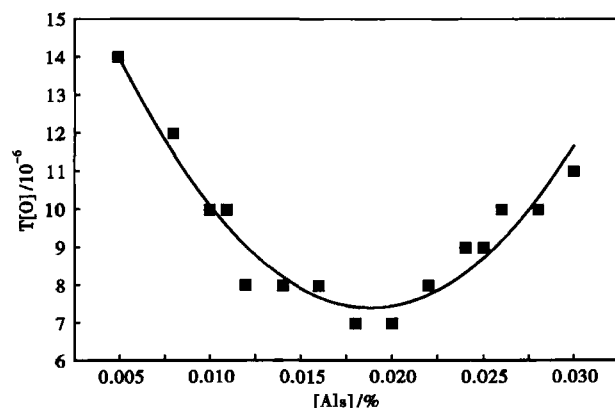


图 4 GCr15 轴承钢轧材 [Als] 对 T[O] 的影响  
Fig. 4 Effect of bearing steel GCr15 rolled products [Als] on T[O]

表 2 LF 精炼供氩制度  
Table 2 Argon supply scheme during LF refining process

| 精炼阶段  | 底吹流量/<br>(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> ) | 搅拌半径/<br>mm |
|-------|--|-------------|
| 初期    | 5 ~ 8  | 400 ~ 500   |
| 合金微调期 | 18 ~ 20                                      | 500 ~ 600   |
| 中末期   | 5 ~ 8  | 300 ~ 400   |

体保护操作包括在钢包长水口连接处采用透气环吹入惰性气体形成气幕保护,以及开浇前对中间包通入氩气排除包内空气等措施。固体保护包括采用中间包覆盖剂和结晶器预熔保护渣。为了强化中间包过程覆盖剂吸收夹杂物的效果,采用的高碱度覆盖剂的理化指标如表3所示,碱度( $R$ ) = 2.7, ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) = 6.8%, 熔化温度  $T = 1593\text{ K}$ 。

另一方面,为了提高结晶器保护渣的净化功能,在结晶器保护渣方面,通过控制液态渣合适的粘度,以保证良好流动性,利于吸收夹杂物颗粒,并保持较高的液渣碱度,尽可能提高液态渣溶解氧化物夹杂的能力,同时,尽可能地将渣中原始的( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )控制在较低含量,以避免因高熔点化合物析出导致粘度增大,促进  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的吸收和溶解<sup>[7]</sup>。为此,结晶器保护渣采用轴承钢连铸专用保护渣,其理化性能指标如表4所示,初始( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) = 3.87%, ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) = 2.19%。

表4 GCr15 轴承钢连铸专用保护渣理化指标

Table 4 Index of physico-chemistry of special shielding slag for bearing steel GCr15 casting

| 组分 / %         |                         |                         |       |      |                      |      | 碱度<br>( $R$ ) | $\text{C}_{\text{固}} /$<br>% | 熔速(1350℃) /<br>s | 粘度(1300℃) /<br>( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) | $\text{H}_2\text{O} /$<br>% | 密度 /<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------|------|----------------------|------|---------------|------------------------------|------------------|---|-----------------------------|---|
| $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | CaO   | MgO  | $\text{R}_2\text{O}$ | F    |               |                              |                  |   |                             |   |
| 42.99          | 3.87                    | 2.19                    | 23.37 | 0.96 | 7                    | 4.11 | 0.54          | 11.8                         | 43               | 1.088   | 0.30                        | 0.81  |

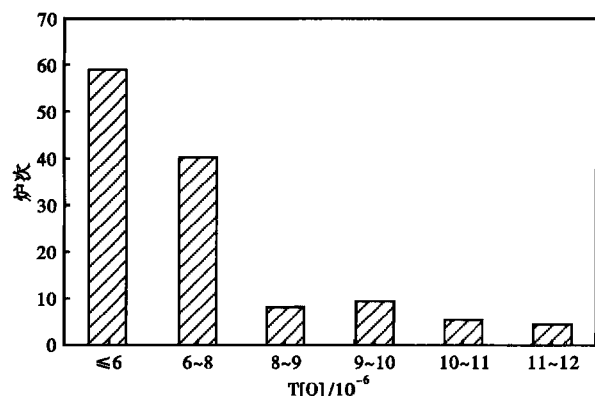


图5 GCr15 轴承钢轧材中总氧含量T[O]控制水平

Fig. 5 Controlling level of bearing steel GCr15 rolled products T[O]

分数达到  $6.62 \times 10^{-6}$ , 其中低于  $8.0 \times 10^{-6}$  炉次比达到 79.2%。另外,发现部分炉次钢中T[O]大于  $10 \times 10^{-6}$ ,是生产过程工艺控制不稳定引起的,因此,保持工艺过程的稳定性十分关键。

#### 4 结论

(1) 轴承钢控氧既涉及到炼钢各道工序本身的控制,同时又涉及各工序之间相互影响和配合,必须全面严格控制各工序环节中影响氧的工艺因素。

(2) 采用转炉流程 80 t BOF-LF-VD-CC 生产

中间包容量对连铸坯中夹杂物含量有显著影响,增加中间包容量可以提高钢液在中间包内的平均停留时间,促进夹杂物上浮去除和钢水均匀化<sup>[8]</sup>。针对巨能特钢的 25 t 的 T 型中间包,通过水模研究确定,增设挡渣墙可以延长钢液平均停留时间至 15 ~ 18 min,同时有利于消除中间包死区。

图5所示为全程控氧措施实施后,连续生产 125 炉次,轴承钢轧材中总氧的质量分数的控制水平。采用这些综合保护措施后,从钢液到连铸坯,钢中铝含量损失减小了 70% ~ 80%; T[O] 平均质量

表3 高碱度中间包覆盖剂理化指标

Table 3 Index of physico-chemistry of high basicity tundish shielding agent

| (CaO + MgO) /<br>% | $\text{Al}_2\text{O}_3 /$<br>% | $\text{SiO}_2 /$<br>% | $\text{C}_{\text{固}} /$<br>% | 碱度<br>( $R$ ) | 熔化温度 /<br>K |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------|-------------|
| 48                 | 6.8                            | 18                    | 2.3                          | 2.7           | 1320        |

GCr15 轴承钢的实践表明,转炉采用高拉碳和严格挡渣出钢、LF 优化精炼渣、保证 VD 精炼条件以及严格全程保护浇注,可以稳定实现较低氧含量水平。

辽宁省自然科学基金项目资助(2015020181)

#### 参考文献

- [1] 殷瑞钰,王新华. 适用于冷轧薄板类钢种的合理炉外精炼工艺的探讨[J]. 钢铁,2007,42(5):1-6.
- [2] Hiroki G, Ken-ichi M, Kazuaki T. Effect of Oxygen Content on Size Distribution of Oxides in Steel[J]. ISIJ International, 1995, 35(3): 286-291.
- [3] 张丹. 国外超纯净轴承钢的工艺特点(一)[N]. 中国冶金报, 2013-04-25.
- [4] 杨虎林,何平,翟玉春. 高品质轴承钢超低氧含量和非金属夹杂物控制的进展[J]. 特殊钢,2013,34(2):16-19.
- [5] 刘跃,吴伟,刘浏,等. 100 t 转炉-LF(VD)工艺冶炼轴承钢的氧含量控制[J]. 特殊钢,2005,26(6):47-49.
- [6] 庞洪亮,边延君. 90 t LF(VD)精炼工艺对 GCr15 轴承钢氧含量的影响[J]. 特殊钢,2006,27(1):57-58.
- [7] 谢兵. 连铸结晶器保护渣相关基础理论的研究及其应用实践[D]. 重庆:重庆大学,2004:58-59.
- [8] Wang Guocheng, Yun Maofan, Zhang Chongmin, et al. Flow Mechanism of Molten Steel in a Single-Strand Slab Caster Tundish Based on the Residence Time Distribution Curve and Data[J]. ISIJ International, 2015, 55(5):984-992.

刘发友(1970-),男,博士生,山东大学(本科)毕业,轴承钢冶炼研究。

收稿日期:2016-05-04