

低氧含量 GCr15 轴承钢生产工艺实践

巩 飞¹ 董大西¹ 刘 勇¹ 杨锋功¹ 战东平² 姜周华²

(1 石家庄钢铁有限责任公司炼钢厂, 石家庄 053001; 2 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘 要 针对石钢 60 t LD-LF-VD-CC 生产工艺, 通过开发高碳低氧出钢、控制 LD 出钢下渣量、LF 到位白渣技术、轴承钢专用精炼造渣工艺、分阶段吹氩工艺、优化连铸工艺等系统控制技术, 使 GCr15 轴承钢平均全氧含量 ($T[O]$) 明显降低, 平均 $T[O]$ 从原工艺的 9.6×10^{-6} 降低到 6.34×10^{-6} , $T[O] \leq 7 \times 10^{-6}$ 的炉数占到总炉数的 82.8%, 工艺改进效果显著。

关键词 60 t LD-LF-VD-CC 轴承钢 GCr15 氧含量

Practice of Production Technology for Bearing Steel GCr15 with Low Oxygen Content

Gong Fei¹, Dong Daxi¹, Liu Yong¹, Yang Fenggong¹, Zhan Dongping² and Jiang Zhouhua²

(1 Steelmaking Plant, Shijiazhuang Iron and Steel Co Ltd, Shijiazhuang 050031;

2 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract According to the 60 t LD-LF-VD-CC production process at Shijiazhuang steel, the average total oxygen content ($T[O]$) in bearing steel GCr15 decreases obviously by improving a series of process control technology such as tapping at condition of high carbon and low oxygen content in steel, controlling LD tapping slag amount, white slag technology at LF refining station, applying special slagging process for bearing steel, changing argon blowing rate at different refining period and optimizing casting process, the average $T[O]$ decreases from original 9.6×10^{-6} to 6.34×10^{-6} and the heats with $T[O] \leq 7 \times 10^{-6}$ account for 82.8% of the total melting heats to get marked effect by improved process.

Material Index 60 t LD-LF-VD-CC, Bearing Steel GCr15, Oxygen Content

随着新一代钢铁材料、超级钢、超细晶粒钢等项目的研制和开发, 进一步推动钢铁材料向着更高性能的方向发展。高档特殊钢品种的发展趋势是更高性能、更低成本、更易加工、更长寿命。轴承钢作为这些高档洁净钢的代表品种, 对钢中全氧含量和夹杂物有着更严格的要求^[1,2], 因此各国普遍将轴承钢全氧含量控制在较低水平^[3,4], 如瑞典 SKF 公司 OVAKO 厂轴承钢平均全氧含量为 4.9×10^{-6} , 日本山阳特殊钢厂达到 5.4×10^{-6} , 德国蒂森公司达到 6×10^{-6} 。

我国近年来也开展大量的研究工作, 但普遍来说, 与国外还有一定的差距, 全氧含量 ($T[O]$) 普遍控制在 $(6 \sim 9) \times 10^{-6}$ 水平^[5]。本文结合石钢的实际生产情况, 重点讨论了 60 t LD-LF-VD-CC 工艺生产低氧轴承钢过程的关键技术。

1 生产工艺概况

石钢 GCr15 轴承钢的生产工艺流程为: 铁水预处理-60 t 氧气顶吹转炉 (LD)-60 t LF 钢包精炼-60 t VD 真空精炼-连铸。铁水预处理进行脱硫扒渣处理; 转炉主要任务是脱磷和合适的终点成分控制, 出

钢过程完成主要的化学成分的合金化; LF 主要任务是造还原渣并完成化学成分的调整; VD 真空处理的任务是脱气、去除夹杂物; 连铸的主要任务是保护浇铸、控制铸坯组织。

2 生产工艺改进

2.1 转炉终点控制及出钢合金化

石钢的生产数据统计结果表明, 转炉终点 $[C] \cdot [O] = 0.0027$, 由此可得转炉终点 $[C]$ 每降低 0.01%, 钢中溶解氧含量则增加 135×10^{-6} 。石钢采用出钢 $[C] = 0.04\% \sim 0.10\%$ 条件下, 钢中氧含量波动在 $(270 \sim 675) \times 10^{-6}$ 。出钢碳越低, 氧含量越高, 则脱氧剂加入量越大, 对应的产生夹杂物总量越多, 对钢的洁净度不利, 而且增加了后期夹杂物去除的负担。基于此理论, 转炉冶炼轴承钢时采用高拉碳操作, 将 $[C]$ 控制在 0.1% ~ 0.4%。同时, 为了减少铝脱氧时大量 Al_2O_3 夹杂物的生成, 脱氧用的铝在添加完增碳剂后再加入, 其加入量根据碳含量确定, 减少脱氧初期 Al_2O_3 夹杂物的生成量。

2.2 钢中酸溶铝的控制

理论分析表明^[6], 当钢中 $[Al]_s = 0.025\%$ 时,

$a_{[O]} = 3.6 \times 10^{-6}$; 当 $[Al]_s > 0.06\%$ 时, $a_{[O]} < 2 \times 10^{-6}$ 。因此, 石钢在轴承钢冶炼全过程分阶段控制钢中的酸溶铝含量。采用出钢加铝沉淀脱氧和 LF 精炼过程控制目标铝含量技术, 始终将钢中酸溶铝含量保持在合适的范围内, 使 LF-VD 精炼过程中氧活度始终保持在 $< 4 \times 10^{-6}$, 较好地控制了轴承钢中的氧含量。

2.3 炉渣成分控制

在渣-钢反应平衡的条件下, 炉渣中的 FeO 与钢水 [O] 有以下平衡反应^[7,8]:

$$(FeO) = Fe + [O] \quad \lg K = -\frac{6150}{T} + 2.60 \quad (1)$$

因为平衡常数 $K = \frac{a_{[O]}}{a_{FeO}}$, $a_{FeO} = \gamma_{FeO} \cdot x_{FeO}$, 则:

由 Ohta 和 Suito^[9] 的如下回归方程可得:

$$\lg \gamma_{FeO} = \frac{0.676(MgO) + 0.267(Al_2O_3) - 19.07}{SiO_2} + 0.0214(CaO) - 0.047 \quad (2)$$

因此, 钢中氧活度 $a_{[O]}$ 可由(3)式计算:

$$\begin{aligned} \lg a_{[O]} &= \lg a_{FeO} - \frac{6150}{T} + 2.6 = \lg x_{FeO} + \lg \gamma_{FeO} - \frac{6150}{T} + 2.6 = \\ &= \lg x_{FeO} + \frac{0.676(MgO) + 0.267(Al_2O_3) - 19.07}{SiO_2} + \\ &+ 0.0214(CaO) - \frac{6150}{T} + 2.553 \end{aligned} \quad (3)$$

由此可得图 1。由图 1 中可以看出, 降低渣中 FeO 含量, 有利于降低钢中氧活度。在出钢阶段若能将渣中 FeO 含量控制到 2% 以下, 则可降低出钢脱氧后的钢液被炉渣氧化的程度。因此, 出钢过程严格实施挡渣操作, 控制下渣量 $\leq 5 \text{ kg/t}_{\text{钢}}$, 并在出

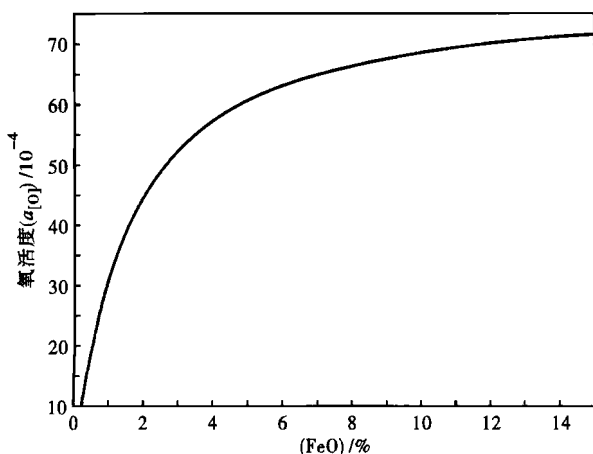


图 1 渣中 FeO 含量对钢中氧活度 $a_{[O]}$ 的影响

Fig. 1 Effect of FeO content in slag on activity of oxygen in steel $a_{[O]}$

钢过程对炉渣实行强改质处理, 根据冶炼终点情况, 加入专用炉渣改质剂 $2 \sim 5 \text{ kg/t}_{\text{钢}}$ 。通过炉渣改质工艺的实行达到以下目的和效果: (1) 对炉渣实施强脱氧, LF 进站炉渣中 $(FeO + MnO) \leq 2\%$, 现场观察炉渣接近“白渣”, 实现 LF 到位白渣; (2) 提高炉渣碱度, 使碱度达到 3.5 以上, 有利于精炼过程脱氧、脱硫; (3) 获得流动性较好的炉渣, 使钢包顶渣保持较好的反应能力; (4) 获得较强夹杂物吸附能力的炉渣。

在精炼过程中, 通过强化对钢水的沉淀脱氧和炉渣的扩散脱氧, 确保精炼过程实行全程埋弧和白渣操作。另外, 为了增强炉渣的吸附夹杂物能力, 降低钢中全氧含量。开发了非 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ 的轴承钢专用预熔渣渣系和造渣工艺。图 2 为改进前后的精炼终点的炉渣成分范围。可以看到, 新渣系的采用和通过精炼过程实施全程炉渣目标成分控制技术, 稳定了精炼终渣成分, 提高了炉渣吸附夹杂物能力, 改善精炼终点炉渣结壳现象, 获得了较好的精炼效果。

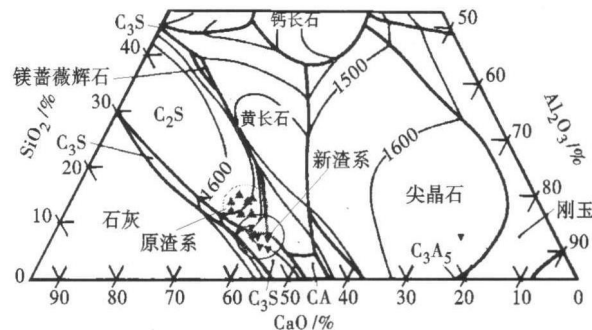


图 2 原渣系和新渣系在 $CaO-Al_2O_3-SiO_2-5\% MgO$ 渣系相图中的位置

Fig. 2 Location of original slag series and improved slag series in phase diagram of $CaO-Al_2O_3-SiO_2-5\% MgO$ slag series

2.4 吹氩制度改进

通过理论分析, 将精炼过程恒流量吹氩工艺改为变流量吹氩工艺, 根据钢包透气砖的透气状况和精炼的不同阶段确定吹氩量, 根据各阶段的精炼目的不同调整底吹搅拌模式, 达到较好的搅拌和去除夹杂物效果。

VD 精炼前期在真空度小于 100 Pa 条件下采用较强的吹氩模式, VD 后期适当降低吹氩气量, 减少强搅拌带来的卷渣。在 VD 破真空后, 采用长时间软吹模式, 在保证钢液不裸露前提下将轴承钢软吹时间控制在 25 min 以上。这种制度可使钢液和炉渣充分均匀化和反应, 钢中的夹杂物充分上浮并被

炉渣吸收。

2.5 连铸工艺

连铸过程中通过采用保护浇铸、优化中间包流场和结晶器流场、防止钢包和中间包下渣、采用高碱度中间包覆盖剂等措施,减少钢水二次氧化,使钢中夹杂物充分上浮。

3 工艺改进效果

表 1 为改进前后的主要操作工艺参数对比,表 2 为工艺改进前后的炉渣成分控制。

表 3 为工艺改进前后钢中全氧含量变化情况。可以看出,工艺改进前,钢中全氧含量波动范围较宽,平均全氧含量较高,达到 9.6×10^{-6} 。工艺改进后,当月(2009 年 7 月)钢中全氧含量明显降低,最高全氧含量为 9×10^{-6} ,至 2010 年 1 月平均全氧含量达到 6.34×10^{-6} , $T[O] \leq 5 \times 10^{-6}$ 的炉数占到总炉数的 25.6%, $T[O] \leq 7 \times 10^{-6}$ 的炉数占到总炉数的 82.8%。

4 结论

(1) 转炉采用高拉碳、高碳出钢操作,采用严格

表 1 工艺改进前后的操作参数

Table 1 Operation parameters of original and improved process

项目	改进前	改进后
出钢[C]/%	0.04 ~ 0.10	0.10 ~ 0.40
出钢[O]/%	>0.035	<0.032
加铝量/(kg·炉 ⁻¹)	250	50 ~ 300(根据终点[C])
Als 控制	不控制	分阶段控制,VD 结束 [Al] _s ≥ 0.06%
造渣	石灰、萤石或加部分火砖块造渣,SiC 和铝渣扩散脱氧	石灰 + 非 12CaO·7Al ₂ O ₃ 的轴承钢专用预熔渣,SiC 和铝扩散脱氧
吹氩	全程 0.4 ~ 0.6 MPa,软吹 8 ~ 15 min	分阶段调整压力,软吹 25 min
连铸	钢包长水口,普通中间包保护渣,中间包用挡墙和坝控流	钢包长水口吹氩,高碱度(≥2.5)中间包覆盖剂,中间包用挡墙、稳流器和坝配合控流

表 2 工艺改进前后的炉渣成分/%

Table 2 Ingredient of slag for original and improved process

工艺	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	T. Fe	MnO
改进前	45 ~ 55	14 ~ 25	8 ~ 17	5 ~ 12	0.3 ~ 1.8	0.2 ~ 1.2
改进后	45 ~ 58	10 ~ 20	14 ~ 22	5 ~ 12	0.2 ~ 1.4	0.1 ~ 1.0

表 3 工艺改进前后冶炼的 GCr15 轴承钢全氧含量

Table 3 Total oxygen content in bearing steel GCr15 melted by original and improved process

项目	统计炉数/炉	全氧含量最小值/10 ⁻⁶	T[O] ≤ 5 × 10 ⁻⁶ 炉数/炉	T[O] ≤ 7 × 10 ⁻⁶ 炉数/炉	平均全氧含量/10 ⁻⁶	T[O] ≤ 5 × 10 ⁻⁶ 炉数所占的比例/%	T[O] ≤ 7 × 10 ⁻⁶ 炉数所占的比例/%
改进前	352	5	4	31	9.6	1.14	8.8
改进后(2009 年 7 月)	73	5	12	30	7.53	16.4	41.1
改进后(2010 年 1 月)	273	4	70	226	6.34	25.6	82.8

挡渣和控制下渣,出钢过程对炉渣采用强改质处理,LF 进站炉渣中(FeO + MnO) ≤ 2%、碱度达到 3.5 以上。

(2) 冶炼全过程分阶段控制钢中的酸溶铝含量,采用非 12CaO·7Al₂O₃ 的轴承钢专用预熔渣渣系和造渣工艺,分阶段变流量吹氩工艺及优化的连铸工艺技术,通过上述系统工艺措施的实施,使石钢轴承钢平均全氧含量明显降低,从原工艺的 9.6×10^{-6} 降低到 6.34×10^{-6} , $T[O] \leq 7 \times 10^{-6}$ 的炉数占到总炉数的 82.8%,工艺改进效果显著。

参考文献

- 虞明全,王治政,徐明华,等.超纯轴承钢的精炼工艺.钢铁,2006,41(9):26
- Toshikazu U. Production of High-Carbon Chromium Steel in Vertical Type Continuous Caster. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan,1986,26(7):614

- 战东平,姜周华,龚伟,等.轴承钢中氮化钛的生成与控制热力学.第十二届(2008)冶金反应工程学会论文集,武汉,2008
- Pak J J,Jeong Y S,Hong I K,et al. Thermodynamics of TiN Formation in Fe-Cr Melts. ISIJ International,2005,45(8):1106
- 傅杰,王平.轴承钢中微量元素氧-氮-钛-钙的作用与控制.特殊钢,1998,19(6):31
- 龚伟.连铸轴承钢氧含量和夹杂物控制研究:[博士学位论文].沈阳:东北大学,2006
- 梁连科,车荫昌,杨怀.冶金热力学与动力学.沈阳:东北工学院出版社,1990
- 战东平.钢的二次精炼过程预熔渣深脱硫理论与工艺研究:[博士学位论文].沈阳:东北大学,2003
- Ohta H,Suito H. Activities of SiO₂ and Al₂O₃ and Activity Coefficients of FeO and MnO in CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO Slags. Metallurgical and Materials Transactions B,1998,29(2):119

巩飞(1968-),男,高级工程师,1991 年华东冶金学院毕业,特殊钢冶炼、精炼和连铸工艺研究。

收稿日期:2010-06-28