

60 t BOF-LF(VD)-150 mm × 150 mm 连铸生产 GCr15 轴承钢的 工艺实践

王文虎¹ 李冰¹ 郑高立¹ 许军民¹ 姚书芳²

(1 河南济源钢铁(集团)有限公司, 济源 454650; 2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081)

摘要 济源钢铁公司采用 60 t 顶底复吹转炉高拉碳操作法, 控制转炉终点[C]0.08%~0.20%, 出钢过程钢包底吹氩并加铝铁脱氧, LF 采用 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 高碱度渣精炼, 连铸钢水过热度 20~30℃, M+F 电磁搅拌, 全程吹氩保护浇铸, 铸坯堆垛缓冷工艺生产 150 mm × 150 mm GCr15 轴承钢铸坯。实践表明, GCr15 轴承钢的氧含量为 (6.3~11.9) × 10⁻⁶, 平均氧含量为 9 × 10⁻⁶, 连铸坯的低倍组织良好。

关键词 60 t BOF-LF(VD)-150 mm × 150 mm 连铸 GCr15 轴承钢 工艺实践

Process Practice for Bearing Steel GCr15 Produced by 60 t BOF-LF (VD)-150 mm × 150 mm Casting Flow Sheet

Wang Wenhui¹, Li Bing¹, Zheng Gaoli¹, Xu Junmin¹ and Yao Shufang²

(1 Henan Jiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Jiyuan 454650; 2 National Engineering Research Center for Continuous Casting Technology, Center Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The 150 mm × 150 mm casting billet of bearing steel GCr15 is produced at Jiyuan Iron and Steel Co by using 60t top and bottom combined blowing converter melting with carbon catch operation to control converter end [C] 0.08%~0.20%, ladle bottom argon blowing and adding aluminium-iron in ladle during tapping for oxidation, using CaO-Al₂O₃-SiO₂ high basicity slag in LF refining, controlling casting liquid overheating degree 20~30℃, M+F electromagnetic stirring, whole process argon shielding casting and casting billet stacking slow cooling process. Practice results show that the oxygen content in bearing steel GCr15 is (6.3 × 11.9) × 10⁻⁶, average oxygen content is 9 × 10⁻⁶, and the macro structure of casting billet is better.

Material Index 60 t BOF-LF (VD)-150 mm × 150 mm Casting, Bearing Steel GCr15, Process Practice

生产轴承钢一般是选用较大断面的连铸坯, 借助大压缩比达到改善中心偏析和中心疏松的目的^[1]。2010 年 10 月, 济源钢铁公司采用现有的转炉小方坯(150 mm × 150 mm)连铸设备进行了 GCr15 钢种的小批量试生产, 生产 1 个中间包共 5 炉钢。

1 生产轴承钢的工艺流程、成分控制及技术要点

高炉铁水→600 t 混铁炉→铁水捞渣处理→60 t

顶底复吹转炉→60 t LF→60 t VD→150 mm × 150 mm 方坯连铸机(过程全保护浇注、液面自动控制、结晶器+末端电磁搅拌)→切割→自动打号→铸坯表面撒碳化稻壳堆垛缓冷 48 h→KOCKS 轧机。

GCr15 轴承钢(表 1)的生产技术要点为:

(1) 轴承钢属于高碳钢, 转炉终点应选择合理的拉碳模式, 保持良好的底吹条件, 减少钢水氧

表 1 GCr15 轴承钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of bearing steel GCr15 /%

项目	C	Si	Mn	Cr	P	S	Mo	Ni	Cu	Ni+Cu	Ca	Ti	T[O]
标准	0.95~1.05	0.15~0.35	0.23~0.45	1.40~1.65	≤0.025	≤0.025	≤0.10	≤0.30	≤0.25	≤0.50	-	-	≤0.001 2
内控	0.97~0.99	0.21~0.25	0.31~0.35	1.48~1.52	≤0.020	≤0.010	≤0.10	≤0.30	≤0.25	≤0.50	≤0.000 8	≤0.002 5	≤0.001 0

含量。

(2) C 按中下限控制, 以减小偏析和碳化物的形成: C = (0.98 ± 0.01)%。并要求各炉之间钢水碳含量差别按 ±0.01% 控制。

(3) 控制 Mn = (0.33 ± 0.02)% ; Cr = (1.50 ±

0.02)% ; Si = (0.23 ± 0.02)%。

(4) 控制钢中 P ≤ 0.020% ; S ≤ 0.010%。

(5) 控制钢材氮含量 ≤ 80 × 10⁻⁶。为避免冶炼过程增 N, 物料采用低 N 增碳剂, 低 N 碳锰球及碳线。使用碱性中间包覆盖剂, 完善连铸钢水保护

浇注。

(6) 为避免铸坯产生“白点”缺陷,入炉的渣料、合金料必须干燥,以避免增氢。要求在经过 VD 处理后,钢水氢含量 $\leq 2 \times 10^{-6}$ 。

(7) 目标力争 $Ti \leq 0.0025\%$ 、 $Ca \leq 0.0008\%$ 。为避免生成钙铝酸盐点状不变形夹杂,工艺上不采用 Ca 处理,而采用 Al 脱氧工艺降低钢中 [O], 通过完善保护浇注,使用 $\Phi 40$ mm 大孔径中间包水口,实施快换定径水口及浸入式水口吹氩工艺,以改善钢水流动性。

(8) 该钢种碳含量高,易产生中心偏析和缩孔等缺陷^[2],需制订合理的连铸工艺(浇注温度、拉坯速度等)和二冷配水制度。

(9) 连铸需采用轴承钢的专用结晶器保护渣。

2 转炉生产轴承钢的冶炼控制

转炉装入量为 49 t,使用自产铁水和废钢,其中铁水 46 t,废钢 3 t,出钢量在 46 t 左右。合金提前进行烘烤,烘烤温度达到 100 °C 以上,选用低氮增碳剂。

该钢种碳含量高,转炉冶炼可以采用高碳出钢和低碳出钢两种冶炼模式。两种冶炼方法各有优缺点,提高出钢碳含量可以降低终点钢水氧含量,减轻 LF 脱氧任务,并且可以减少增碳剂的使用量。低碳出钢时,更有利于脱 P、S。保持良好的底吹条件可以显著降低钢水氧含量,特别是低碳出钢时,效果更加明显^[3]。由于该生产厂所用原料质量较差,铁水未经预处理, Si、P 含量较高;石灰粉末多、生过烧率高。因此采用高拉碳双渣操作,转炉终点控制要求(%)为: $[C] 0.08 \sim 0.20$ 、 $[P] \leq 0.015$ 、 $[S] \leq 0.025$,钢水温度为 1 600 ~ 1 680 °C。

由于转炉渣中含有 18% 左右的 FeO,对钢水有继续氧化的作用,并对轴承钢的后续精炼过程带来重要影响,因此对转炉下渣量进行严格控制。该厂的转炉采用多面体挡渣球进行挡渣。下渣量不超过 50 mm。否则要进行扒渣处理。

出钢过程中,在钢包底吹氩搅拌的同时,向钢水内加入铝铁继续脱氧。可以进一步降低钢水氧含量并能保持钢水应有的酸溶铝含量,5 炉钢中,离站氧活度波动范围为 $(8 \sim 15) \times 10^{-6}$ 。离站酸溶铝波动范围为 $(180 \sim 330) \times 10^{-6}$ 。

3 LF 精炼和 VD 脱气

采用 2 台 LF 交替升温供 VD,精炼周期约 55 min,LF 采用炉渣扩散脱氧和吹氩搅拌的方式进行

脱氧去夹杂。加入石灰 470 kg/炉,萤石 40 kg/炉,碳化硅 53 kg/炉。

(1) LF 脱氧控制:LF 主要任务是脱氧、脱硫和净化钢水。生产中为了控制钢中 Ca,不使用电石、AD 粉进行脱氧,不进行 Ca 处理,钢水内加入 SiC、Al 粒进行脱氧,要求白渣保持时间 ≥ 20 min。

(2) 终渣碱度控制:采用高碱度,高 Al_2O_3 精炼渣系工艺。生产超低氧含量特殊钢采用高碱度精炼渣系,能够降低渣中 SiO_2 和 FeO 的活度,从而降低钢的总氧含量。尽管钢中存在 $CaO-Al_2O_3$ 系不变形夹杂物,但由于数量显著减少,因而能够提高钢的抗疲劳性能^[4]。生产中精炼终渣二元碱度控制在 3.90 ~ 4.51,以加速夹杂的去除,结束定氧,目标氧活度 $a_o \leq 4 \times 10^{-6}$,LF 终渣成分见表 2。

表 2 LF 终渣成分/%
Table 2 Ingredient of end LF slag / %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	(FeO + MnO)
55.47 ~ 57.73	12.72 ~ 14.91	16.47 ~ 18.58	4.48 ~ 9.28	≤ 1.0

当温度与成分符合工艺要求后吊入 VD 工位,控制好过程氩气,在 4 ~ 5 min 达到深真空,保持深真空脱气时间 ≥ 10 min;结束定氧,要求目标 $a_o \leq 3 \times 10^{-6}$, $[H] \leq 2 \times 10^{-6}$ 。破空后,加入 5 ~ 6 袋碳化稻壳,软吹氩时间 ≥ 20 min,以不露钢液面为宜,保证钢水的纯净度和可浇性。VD 处理周期为 55 min 左右。

4 连铸工艺控制

在 4[#]连铸机生产 GCr15 轴承钢,4[#]连铸机的弧形半径为 R10 m,用 M + F 电磁搅拌,结晶器液面自动控制,汽雾二次冷却。中间包采用塞棒和快换水口双控流技术。生产中,选用 $\Phi 40$ mm 大孔径中间包水口,保护浇注除保持原有钢包长水口吹氩工艺外,又实施小方坯快换定径水口吹氩及浸入式水口吹氩专利技术。

4.1 温度

生产要求:保证红包出钢,新钢包前两炉不准使用;加强中间包煤气烘烤,开浇前中间包温度 ≥ 1000 °C;钢包和中间包加盖操作;第 1 炉中间包使用低碳覆盖剂,过程中使用碱性覆盖剂 ($R \geq 1.4$)。

采取上述措施后,浇注时中间包内钢水温度波动较小。为避免连铸中碳的严重偏析,在生产中,除开浇炉次外,过程中钢水过热度控制在 20 ~ 30 °C。

表 3 中间包钢水的温度与拉速对照表

Table 3 Relation between liquid temperature in tundish and casting speed

温度/℃	拉速/(m·min ⁻¹)
>1 485	1.0
≤1 485	1.1

4.2 拉速

二冷段弱冷,配合慢拉速,可确保铸坯矫直温度 ≥ 900 ℃。二冷比水量控制为 $0.4 L_{\text{水}}/kg_{\text{钢}}$,钢水的浇注温度与拉速的匹配按表 3 确定。

4.3 铸坯冷却方式

由于生产厂没有铸坯缓冷坑装置,为确保钢中气体有充分条件向外溢出,降低钢中氢等气体,减少

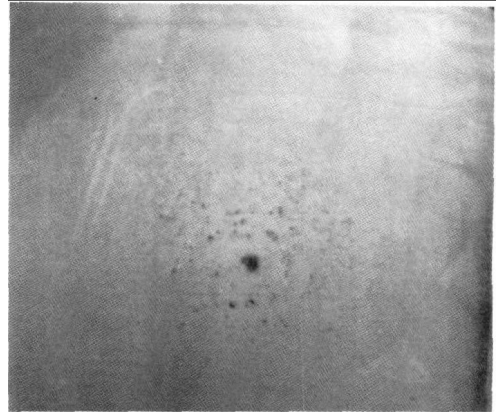


图 1 GCr15 轴承钢 150 mm × 150 mm 连铸坯的低倍组织形貌
Fig. 1 Morphology of macrostructure of bearing steel GCr15 150 mm × 150 mm casting billet

表 4 连铸坯的低倍检验结果

Table 4 Examination results of macrostructure of casting billet

中心疏松/级	缩孔/级	皮下裂纹/级	非金属夹杂物/级	中心裂纹/级	中间裂纹/级	角部裂纹/级	皮下气泡/级	等轴晶率/%	白点
0.5 ~ 2.0	0 ~ 2.5	0 ~ 2.0	0 ~ 0.5	0	0	0	0	22.0 ~ 34.45	无

表 5 Φ30 mm GCr15 轴承钢材的非金属夹杂物和低倍组织级别

Table 5 Rating of nonmetallic inclusions and macrostructure in Φ30 mm bearing steel GCr15 products

炉号	低倍/级			脱碳层/mm	碳化物不均匀性/级			非金属夹杂/级				显微孔隙	布氏硬度值(热轧态)
	一般疏松	中心疏松	偏析		网状	带状	液析	A	B	C	D		
406398	0.5	0.5	无	0.25	2.5	1.0	0.5	0~1.0	0~0.5	0	0~1.0	0	368
406399	0.5	0.5	无	0.25	2.0	1.5	0.5	0~1.0	0~2.0	0	0~1.0	0	359
406400	0.5	0.5	无	0.20	2.5	1.0	0.5	0~1.0	0~0.5	0	0~1.0	0	357
406401	0.5	1.0	无	0.20	2.0	2.0	0.5	0~1.0	0~1.0	0	0~1.0	0	372
406402	0.5	1.0	无	0.20	2.0	1.0	0.5	0~1.0	0~2.0	0	0~1.0	0	352

“白点”,要求铸坯码垛堆放,码垛时上下要有热坯,并在 GCr15 钢上面覆盖一层碳化稻壳进行保温,缓冷时间 ≥ 48 h。

5 连铸坯质量与轧材分析

根据连铸坯低倍检验结果,铸坯低倍组织均匀、致密(图 1),表面质量良好,取 150 mm × 150 mm 铸坯进行酸浸横向低倍检验($N=35$),结果见表 4。

采用 Φ5 mm 钻头,对连铸坯($N=19$)横向低倍样片中心及铸坯角部至中心一半区域 4 个点取样分析,C 偏析指数为 1.02 ~ 1.26。

KOCKS 轧机轧制成 Φ30 mm 钢材,轧材的各项技术指标检验结果均符合 GB/T18254-2002 及用户要求(表 5)。统计 5 炉钢材氧含量为 $(6.3 \sim 11.9) \times 10^{-6}$,平均氧含量 9×10^{-6} ;氮含量 $(32.7 \sim 67.8) \times 10^{-6}$,平均氮含量 48.38×10^{-6} 。

6 结论

(1) 采用 60 t BOF 冶炼 → LF 精炼 → VD 脱气 → CC → 铸坯堆垛缓冷工艺生产 GCr15 轴承钢,生产顺行,质量稳定。

(2) 通过对转炉、精炼、连铸工艺的优化,钢水纯净度较高。GCr15 钢平均 $[O]$ 为 9×10^{-6} ,150 mm × 150 mm 方坯低倍组织良好,碳偏析指数为 1.02 ~ 1.26。棒材质量符合标准及用户要求。

(3) 选用低氮物料,完善保护浇注,降低

钢中 N 含量,钢材 N 含量为 $(32.7 \sim 67.8) \times 10^{-6}$ 。

(4) 在连铸过程中,因拉坯阻力大,间断性发生抖动现象,在改善保护渣润滑的情况下,根据高碳钢凝固收缩特性,后续的生产中,宜选用小锥度结晶器。

参考文献

- 1 于勇,刘浏.品种钢优特钢连铸 900 问.北京:中国科学技术出版社,2007
- 2 毛斌,李晋.方坯连铸电磁搅拌技术的优化.连铸电磁搅拌技术论文集.宁波,2006
- 3 吴巍,吴伟,刘浏,等.转炉冶炼 GCr15 轴承钢的生产工艺研究.钢铁,2006,41 增刊(2):183
- 4 王新华.超低氧含量特殊钢的脱氧、精炼与非金属夹杂物控制.2010 年全国炼钢-连铸生产学术会议论文集.青岛,2010

王文虎(1971-),男,工程师,2005 年内蒙古科技大学毕业,炼钢生产技术研究。

收稿日期:2011-03-28