

· 工艺技术 ·

氧气顶吹转炉 - LF + VD 流程生产高碳铬轴承钢的工艺实践

林 纲^{1,2} 曹立国^{1,3} 郝 健¹ 李士琦¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 中咨工程建设监理公司总工办,北京 100044;

3 石家庄钢铁有限责任公司炼钢厂,石家庄 050031)

摘 要 石钢采用 60 t 氧气顶吹转炉 - LF + VD - CC 流程生产高碳铬轴承钢。602 炉次至 2 449 炉次的统计数据表明,转炉冶炼时采用高拉碳操作,平均终点碳为 0.15%、[P]0.012%、[S]0.034%。LF + VD 精炼后,钢中平均氧含量为 9.4×10^{-6} ,Ti 含量为 52×10^{-6} ,但存在钛、氧含量波动较大,需进一步改善工艺和操作。

关键词 氧气顶吹转炉 LF + VD 高碳铬轴承钢 工艺实践

Operation Practice of High Carbon Chromium Bearing Steel Produced by LD - LF + VD Process

Lin Gang^{1,2}, Cao Ligu^{1,3}, Yu Jian¹ and Li Shiqi¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Chief Engineer Office, CIECC Engineering & Construction Project Management Corp, Beijing 100044;

3 Steelmaking Plant, Shijiazhuang Iron and Steel Co Ltd, Shijiazhuang 050031)

Abstract The high carbon bearing steel is produced by 60 t LD - LF + VD - CC flow sheet at Shijiazhuang Steel. The statistical data with 602 ~ 2 449 heats showed that in LD steelmaking the average end-point carbon was 0.15% by catch carbon practice, the average end-point [P] 0.012% and the [S] 0.034%. After LF + VD refining the average oxygen content in steel was 9.4×10^{-6} , and the Ti content was 52×10^{-6} , but the fluctuating range of [Ti] and [O] was relatively large needs to further improve process and operation.

Material Index LD, LF + VD, High Carbon Chromium Bearing Steel, Process Practice

近年来氧气转炉冶炼洁净钢技术发展迅速^[1],国内外许多转炉钢厂生产高碳铬轴承钢也取得了较大进展。本文介绍石家庄钢铁有限责任公司(石钢)用氧气转炉生产高碳铬轴承钢 GCr15 的工艺实践。

1 工艺流程及设备技术参数

石钢 GCr15 生产执行国标 GB/T18254-2002,其工艺流程为:高炉炼铁→铁水预处理→60 t 氧气顶吹转炉(LD)炼钢→60 t LF 钢包炉精炼→60 t VD 真空脱气→矩形坯连铸→热轧→棒材。其中 LD、LF、VD 和连铸机(CC)的主要技术参数见表 1。

2 工艺操作

石钢氧气转炉冶炼轴承钢采用高拉碳操作,以防止转炉吹炼终点熔池内氧含量过高,其技术操作依据源于转炉冶炼优质碳素钢和低合金钢的终点碳数据。石钢曾对 62 炉终点碳[C]、氧活度 a_O 和温度 T 进行了测定,结果表明终点碳波动范围为 0.05% ~ 0.20%,平均值 0.107%;氧活度 a_O 波动范围为 $(113 \sim 534) \times 10^{-6}$,平均 290×10^{-6} ;温度 T 波动范围为 1 844 ~ 1 956 K,平均 1 913 K。图 1 是石钢氧气转炉吹炼终点碳和熔池中氧活度关系图。

表 1 LD、LF、VD 和连铸机(CC)主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of LD, LF, VD and concaster

LD		LF		VD		CC	
项目	参数	项目	参数	项目	参数	项目	参数
公称容量/t	60	额定处理量/t	60	真空处理工位/个	2	弧形半径/m	12/16.5/30 (多点矫直)
炉身内径/mm	4 790	钢包内直径/mm	2 360	工作真空度/Pa	67(阀后)	铸坯断面/ mm × mm	180 × 220; 220 × 300; 280 × 320; 300 × 360
设计熔池深度/mm	1 060	自由空间/mm	600	处理钢水量/t	55 ~ 60	拉坯速度/ (m · min ⁻¹)	1.0 ~ 1.3; 0.6 ~ 0.9; 0.5 ~ 0.8; 0.5 ~ 0.7
有效容积/m ³	47.7	变压器容量/kVA	10 000	真空泵系统级数	5	流数	3 机 3 流
熔池直径/mm	3 400	升温速度/(°C · min ⁻¹)	3 ~ 5	抽气能力/(kg · h ⁻¹)	300		
炉容比/(m ³ · t ⁻¹)	0.8			抽气时间/min	≤5(冷态) ≤7(热态)		

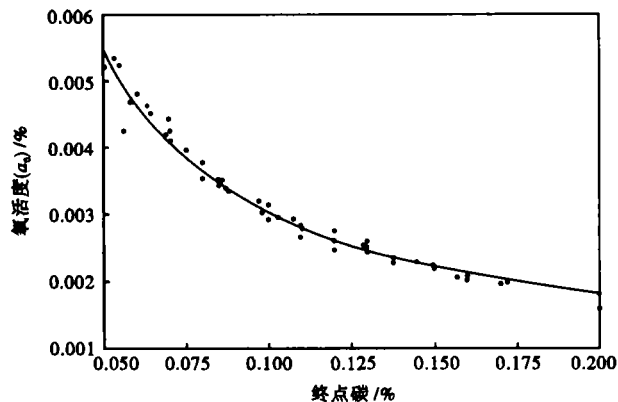


图 1 氧气顶吹转炉炼钢时终点碳和氧活度的关系

Fig.1 Relation between end-point carbon and oxygen activity in LD smelting

根据文献[2],同时上述实测数据进行回归,可得到信度水准非常高的经验公式(1)和(2)。

$$[O] \cdot [C] = 0.0027 \quad (1)$$

$$\ln a_o = -10.56 - 1.02 \ln [C] \quad (2)$$

式中: a_o - 氧活度/%; $[C]$ - 终点碳含量/%。

2006 年石钢转炉冶炼轴承钢的终点成分情况(1 177 炉)见表 2。由表 2 可见:

表 2 氧气转炉吹炼钢水终点温度和成分(1 177 炉)

Table 2 End-point temperature and analysis of liquid steel of LD smelting (1 177 heats)

项目	温度/K	终点成分/%		
		C	P	S
波动范围	1 789 ~ 1 977	0.06 ~ 0.44	0.007 ~ 0.023	0.006 ~ 0.061
平均值	1 908	0.154	0.012	0.034
标准差	18.3	0.051	0.002	0.006

表 4 GCr15 轴承钢的主要成分(2 029 炉)和 Ti、气体含量(602 炉)

Table 4 Main chemical compositions (2 029 heats) and Ti, gas content (602 heats) of GCr15 bearing steel

项 目	主要化学成分/%							气体含量/ 10^{-6}		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	O	N	
实测值	最小值	0.95	0.16	0.27	0.003	0.008	1.40	0.003	5.2	40.5
	最大值	1.05	0.34	0.37	0.025	0.016	1.65	0.010	18.9	152.0
	平均值	0.98	0.23	0.31	0.011	0.005	1.49	0.005	9.4	78.0
	标准差	0.02	0.02	0.01	0.004	0.002	0.03	0.001	2.1	19.2
国标	下限	0.95	0.15	0.25	≤ 0.025	≤ 0.025	1.40	-	≤ 12.0	-
	上限	1.05	0.35	0.45			1.65			

脱氧方式和连铸保护浇铸 3 个环节,尤其是严格控制连铸保护浇铸。

由表 4 和图 2 可以看出:

(1) 钛含量变化范围也较大,其标准差为 12×10^{-6} ,平均值 52×10^{-6} ,同日本山阳公司的钛含量 35×10^{-6} 相比,还存在一定的差距;

(1) 轴承钢平均终点碳 0.154%,比冶炼一般优质钢的 0.107% 提高了 0.047%,按公式(1)计算,钢液熔池中相应的平均氧活度可降至 175×10^{-6} ,为一般优质碳素钢的 60%。

(2) 高拉碳操作控制还不够稳定,终点碳的波动从 0.06% 到 0.44%,标准差 0.051%。由公式(1)和图 1 可知,相应的溶解氧的变动范围是 450×10^{-6} 到 61×10^{-6} ,最大值与最小值相差近 7 倍。

(3) 终点碳在 0.06% ~ 0.15% 变化,估算相应的氧活度值变化 270×10^{-6} ,终点碳在 0.15% ~ 0.44% 之间变化,氧活度值变化 119×10^{-6} 。可见,在转炉冶炼中应特别注意不要出现低碳的情况。

LF 主要技术参数见表 1,所用精炼渣组成见表 3。

表 3 LF 精炼渣组成和碱度

Table 3 Ingredient and basicity of LF refining slag

精炼渣成分/%				碱度(R)
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	
50 ~ 60	10 ~ 20	10 ~ 25	≤ 1.0	3.0 ~ 4.0

3 分析和检验结果

3.1 化学成分和气体含量

2006 年,VD 处理后 2 029 炉 GCr15 轴承钢的主要成分见表 4。可以看出:(1)主要化学成分均满足国标的要求。(2)Si 和 Cr 的成分在允许范围内,但标准差较大,有待进一步提高。

高碳铬轴承钢中钛的主要来源为铬铁合金。

钢中氮的控制应重点在于转炉终点控制、出钢

(2) 钢中氧含量平均值为 9.4×10^{-6} ,绝大多数满足国标 $\leq 12 \times 10^{-6}$ 的要求,但是还有大约 6.8% 的超标;

(3) 氮含量波动在 $(40.5 \sim 152.0) \times 10^{-6}$,波动范围较大。与国内外生产轴承钢的平均水平相比,石钢轴承钢中的氮含量偏高。

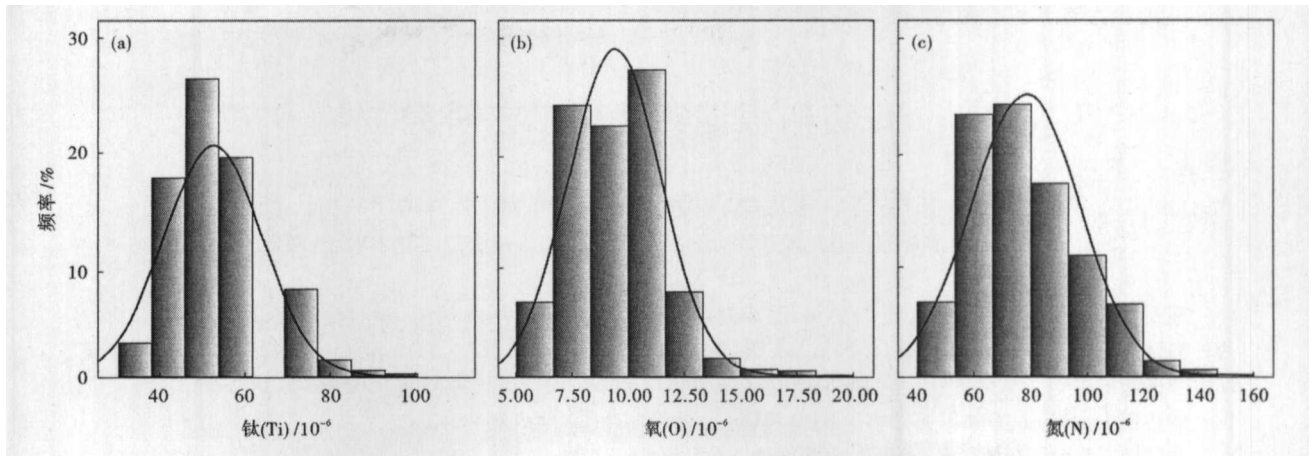


图2 GCr15 轴承钢中钛、氧、氮含量的频率分布图

Fig. 2 Frequency distribution of titanium, oxygen and nitrogen content in GCr15 bearing steel

表5 GCr15 轴承钢中的铝和残余元素含量(2 029炉)/%

Table 5 Aluminium and residual element content in GCr15 bearing steel, 2 029 heats / %

项目	Mo	Al	Als	Ni	Cu	Ni + Cu
波动范围	0 ~ 0.02	0.001 ~ 0.055	0.001 ~ 0.048	0.01 ~ 0.07	0.01 ~ 0.10	0.02 ~ 0.12
平均值	0.02	0.013	0.010	0.02	0.019	0.04
国标要求	≤0.10	-	-	≤0.30	≤0.25	≤0.50

铝是强脱氧元素,既可以显著地降低钢中的氧活度,还可以细化钢的晶粒、改善韧性。但是含铝较高会给浇铸带来困难,所以轴承钢中酸溶铝量应控制在一定范围内^[3,4]。

轴承钢中的残余元素主要考查 Mo、Ni 和 Cu。

表5是2006年2 029炉 GCr15 中铝和残余元素含量的实际情况,可以看出石钢对轴承钢残余元素的控制较好。

3.2 非金属夹杂物

轴承钢冶炼中主要通过降低全氧(T[O])来控制夹杂物含量,包括我国在内的许多国家轴承钢标准中规定T[O] ≤ 12 × 10⁻⁶,实际生产中多数控制在10 × 10⁻⁶以下。

2006年石钢检验了轴承钢2 449炉次,其中夹杂物合格的为2 424炉次,合格率99%。由表6可见:

表6 GCr15 轴承钢中夹杂物评级(2 449 炉)

Table 6 Inclusion rating in GCr15 bearing steel, 2 449 heats

项目	A(硫化物)		B(氧化物)		C(硅酸盐)		D(铝酸盐)	
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细
国标	≤1.5	≤2.5	≤1.0	≤2.0	≤0.5	≤0.5	≤1.0	≤1.0
实测	最低	0	0.5	0	0	0	0	0
	最高	1.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	0
平均值	0.02	1.03	0.09	0.69	0.05	0.03	0	0.99

(1)A 和 D 类夹杂均符合国标的要求,B、C 类夹杂均有不合格的炉次出现,需进一步降低氧含量。

(2)4 类夹杂物平均评级均符合国标要求。

4 结论

(1)石钢 60 t 转炉流程生产高碳铬轴承钢可行,钢中金属残余元素含量较低。

(2)石钢 2006 年全年生产轴承钢2 000余炉次,钢中平均氧含量为 9.4 × 10⁻⁶,最低达到 5.2 × 10⁻⁶,达到了国标的要求。但也存在化学成分波动范围较大,钛、氧、氮的含量控制不够稳定等问题,需要在今后的生产实践中进一步研究和改进。

参考文献

- 魏果能,许 达,俞 峰. 高质量轴承钢的需求、生产和发展. 2005 中国特殊钢年会论文集,北京,2005:106
- 黄希祐. 钢铁冶金原理. 北京:冶金工业出版社,1990
- 韦泽洪,郭元奎. 高碳铬轴承钢 GCr15 冶炼工艺探索及质量控制. 河南冶金,2006,14(增刊):88
- 傅 杰,王 平,徐君浩,等. 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

林 纲(1965-),男,博士研究生,高级工程师,1989年北京科技大学毕业,从事钢铁冶金研究、工程咨询与工程监理。

收稿日期:2007-06-08