

# 首钢转炉一连铸轴承钢的研制与开发

张慧峰, 邓素怀, 张 玮, 王 坤, 林志峰

(首钢技术研究院, 100041)

**摘 要:** 本文叙述了首钢转炉轴承钢生产的控制环节, 通过对转炉终点、LF 炉精炼、VD 真空处理及全保护连铸的严格控制, 首钢生产的轴承钢满足了 GB18254-2002 的标准要求, 得到了用户的认可。

**关键词:** 轴承钢; 转炉; 氧含量

## 前言

轴承钢是特殊钢中重要的钢种之一, 其主要代表钢种为高碳铬轴承钢 GCr15。传统的生产工艺路线是电炉—模铸生产, 但随着连铸及精炼技术的发展, 电炉—连铸工艺及转炉—连铸工艺生产轴承钢的厂家越来越多。并且试验证明, 转炉连铸生产的轴承钢其疲劳寿命并不低于其它工艺。但转炉—连铸生产的轴承钢成本却有较大的优势, 因此 2003 到 2006 年间首钢开始进行了轴承钢的冶炼开发。现在首钢轴承钢已达到批量生产, 产品质量达到了国内同行水平, 受到了用户的好评。

## 1 生产工艺及设备

轴承钢在三炼钢—高线精棒车间进行生产, 主要生产工艺路线是:

首钢三炼钢 80t 顶吹转炉—80tLF 钢包精炼炉—VD 真空处理—全自动全保护连铸 (200mm×200mm)—铸坯缓冷—铸坯检查—步进式加热炉—20 架控轧控冷轧制—分段剪切—打捆称重—轧材缓冷—检查出库。

### 1.1 转炉

原料主要采用高炉铁水, 在三炼钢转炉冶炼。采用 Al 强脱氧, 挡渣锥挡渣出钢; 为控制钢水磷含量, 转炉采用双渣操作, 提高前期脱磷效果, 控制 P 含量平均在 0.010%, 范围在 0.003~0.016% 之间。

转炉要求适当提高终点碳含量及减少后吹, 因为低的终点碳及过多的后吹, 大大提高了转炉钢水氧含量。虽然通过 Al 脱氧降低了钢水氧活度, 但大量的脱氧产物弥散在钢液中, 如不能很好排出, 势必增加钢中夹杂物, 提高了钢材的全氧含量。

### 1.2 LF 炉精炼

转炉出钢加 CrFe、碳粉等进行脱氧合金化后进入 LF 钢包炉精炼。LF 炉采用氩气搅拌、高碱度低氧化性渣精炼, 目标及主要任务就是去除钢中的夹杂物, 降低氧含量; 降低硫含量; 调整钢水成分和温度, 为 VD 炉和连铸做准备。

炉渣的性能对提高钢的洁净度十分重要。CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值、渣碱度、流动性以及氧活度均对洁净度有直接影响。

为了去除轴承钢中的主要夹杂物 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 必须控制炉渣的成分。炉渣对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的吸收能力可通过降低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的活度, 降低炉渣的熔点, 促进 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的物质传递而得到提高。故此在实际生产应用中产生了两种截然不同的渣系, 国外一些钢厂如日本山阳采用的渣系 (见表 1)<sup>[1]</sup>, 倾向于高碱度 (大于 4.0), 低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 操作, 以提高 LF 炉脱硫脱氧效率。MgO 一般控制较低, 因为 MgO 一旦大于 10%, 炉渣流动性变差, 不利于吸收 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂。这样的渣系一般需要添加较多的 CaF<sub>2</sub>, 以提高炉渣流动性。而国内一些科研院所及钢厂进行了较多的低碱度渣的研究, 且控制 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比值, 控制炉渣流动性, 促进 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的吸收为主要目的。但这一般要求在精炼工序前进行铁水预处理, 降低初始硫含量, 减轻 LF 炉的脱硫任务。

表 1 山阳轴承钢高碱度渣实例

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
含量 %	57.8	13.3	15.8	4.3

兴澄特钢采用的炉渣成分见表 2, 从中看到, 也是采用高碱度炉渣路线, 但 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有所提高, 目的是为了控制 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的比值, 降低炉渣的熔点。

表 2 兴澄特钢轴承钢精炼渣成分

成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
含量 %	50~60	8~12	20~30	5~8

结合首钢实际, 钢水初始硫含量较高, 没有铁水预处理, LF 炉采用高碱度渣的操作路线, 降低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量, 以降低炉渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活度。同时进一步研究炉渣的扩散脱氧, 降低渣中 FeO 含量。

### 1.3 VD 真空处理

精炼结束进行 VD 真空脱气处理, VD 炉的主要功能是去除氢、氮等气体, 进一步降低钢中夹杂物含量。现在 VD 真空处理已经基本顺行, 蒸汽良好的情况下, 5~6min 就可以达到深真空 (100Pa 以下), 并保持在 10min 或是更长时间。对氩气流量, 需根据钢水沸腾情况调节, 一般控制在 100~200l/min。

表3 成品成分统计情况

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ca
平均值	0.98	0.23	0.33	0.012	0.007	1.48	0.022	0.0009
最大值	1.03	0.31	0.38	0.021	0.019	1.63	0.055	0.0017
最小值	0.95	0.20	0.29	0.006	0.001	1.40	0.008	0.0004

1.4 连铸

轴承钢采用的是达涅立公司设计的4流全自动矩形坯连铸机,坯型200mm×200mm。整个浇注过程采用全保护浇注自动控制,结晶器电磁搅拌。连铸采用低拉速浇注,拉速现一般控制在1.1~1.4m/min;过热度控制在35℃以下。

生产的铸坯高温进入铸坯缓冷坑缓冷,目的是降低铸坯的氢含量,释放铸坯应力。铸坯检查后运送到高线厂精棒车间进行轧制。

1.5 轧制

采用全连续轧制工艺,最高轧制速度为16m/s。主轧线配置20架轧机:全部为高刚度短应力线轧机,并呈平立交替布置。全线轧机分为粗轧机组、中轧机组、预精轧机组、精轧机组;轧机均为直流电机单独传动。

主要直条产品规格为Φ14.0~80.0mm的热轧直条圆钢轧制结束后,分段剪切称重入缓冷罩进行轧材缓冷。缓冷的目的也是为降低轧制应力及钢中气体含量,保证轧材的低倍质量。

2 产品质量

2.1 氧含量

氧含量平均11ppm,≤12ppm的批次在100%,≤10ppm的批次在33%(图1),满足了用户要求。

图2为Al含量与氧含量的散点图,以分析钢中Al和氧含量的关系。从图2中看,关联性不是非常明显,但Al含量在0.025%以下时,氧含量偏高的批次增加。

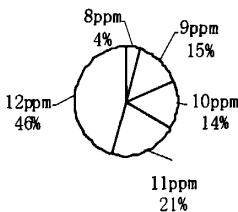


图1 氧含量分布情况

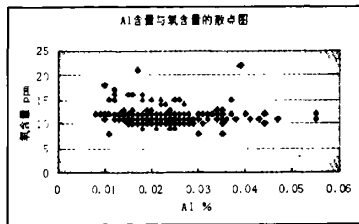


图2 钢中Al含量与氧的关系

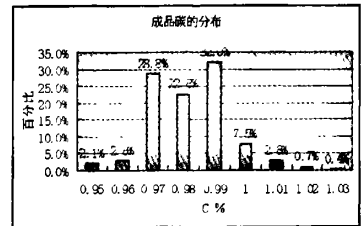


图3 成品碳的分布

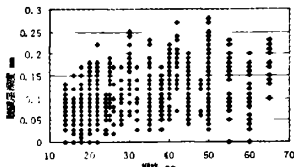


图4 规格与脱碳层深度关系

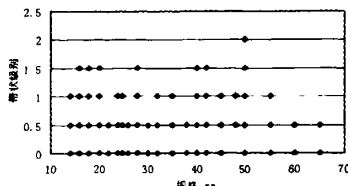


图5 带状级别分布情况

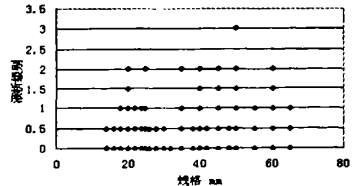


图6 碳化物液析分布情况

2.2 成分

成分控制较好,P含量偏高平均0.012%,S含量平均0.007%;平均碳含量0.98%,C含量在0.97~0.99%之间(即0.98±0.01)占83.6%的比例;

表3为成品成分统计情况,成分控制较好,平均碳含量0.98%,C含量在0.97~0.99%之间(即0.98±0.01)占83.6%的比例,如图3。

2.3 脱碳层深度

加热炉温度和炉内气氛控制较好,总体脱碳层深度较浅,范围在0~0.3mm,平均0.10mm,未有超标情况(图4)。

2.4 带状及液析水平

碳化物带状、液析级别主要通过合理的加热制度来进行控制,带状级别在0~2.0级,平均0.3级;液析级别平均0.3级,控制较好,如图5、图6。

2.5 碳化物网状

小规格轴承钢(Φ≤25mm)一般用于轴承滚动体使用,退火材要求网状碳化物小于2.5级。热轧材对网状碳化物无要求,但用户希望控制在3.0级以下,以降低球化退火的负担。通过控轧控冷工艺,碳化物网状级别平均1.6级,具体分布情况如图7,83.5%的试样网状碳化物级别达到3.0以下。

2.6 夹杂物

表4为夹杂物平均控制情况,整体上轴承钢夹杂物控制较好。夹杂物尤其是B类夹杂物对轴承钢疲劳寿命影响较大。图8为B类细系夹杂物的分布情况,B类细系夹杂物级别平均0.19级,88.3%的批次在0.5级以下。

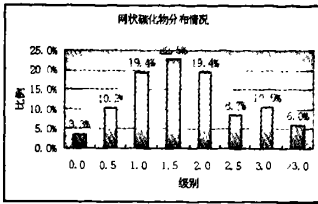


图7 网状碳化物分布情况

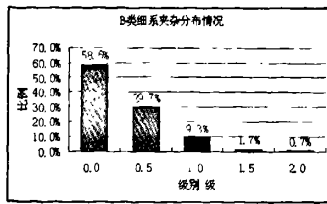


图8 B类细系夹杂物分布

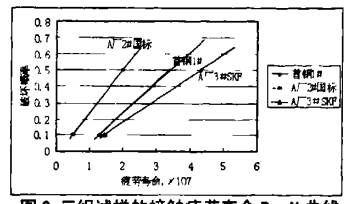


图9 三组试样的接触疲劳寿命P-N曲线

表4 非金属夹杂物级别

	非金属夹杂物类型							
	A类		B类		C类		D类	
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系
平均值	0.68	0.33	0.19	0.03	0	0	0.52	0.25
最大	1.5	1	2	1	0	0	1	1
最小	0	0	0	0	0	0	0	0

表5 三组试样的接触疲劳寿命P-N曲线参数估计结果

组号	斜率 b	Vs		L10		L50	
		×10 <sup>7</sup>	比率	×10 <sup>7</sup>	比率	×10 <sup>7</sup>	比率
1#	1.9935	4.0839	1.55	1.3208	2.57	3.3980	1.68
2#	1.3748	2.6382	1	0.5134	1	2.0209	1
3#	1.7586	5.3028	2.01	1.4750	2.87	4.3052	2.13

### 3. 轴承疲劳寿命的测定

首钢轴承钢主要用户轴承套圈和滚动体的使用，而接触疲劳寿命是评价用户使用的最终指标。为了解轴承钢的实物质量水平，在洛阳轴承研究所进行了接触疲劳寿命对比检测。试样选用Φ60mm轴承钢棒材，同时选用国内A厂的两组实物进行对比，试样制成D8206球轴承，采用TLP接触疲劳试验机组检测，试验组数16组。首钢轴承钢标为1#，A厂两组轴承钢标为2#和3#。

滚动接触疲劳寿命服从两参数韦布尔函数，其表达式如下：

$$P(N)_s = 1 - e^{-\left(\frac{N}{V_s}\right)^b} \quad (1)$$

式中：P(N)<sub>s</sub>—表示在某一试验应力水平S下，试样寿命小于N的概率，%；b—韦布尔分布的斜率参数；N—试样寿命，应力循环次数；V<sub>s</sub>—韦布尔分布的特征寿命，即失效概率为63.2%时的疲劳寿命。

韦布尔分布函数的两个参数b和V<sub>s</sub>，采用最佳线性不变估计方法进行数据处理，其最终三组试样的接触疲劳寿

命P-N曲线参数估计结果见表5，P-N曲线见图9。

试验表明首钢1#试样的L<sub>10</sub>（额定寿命）、L<sub>50</sub>（中值寿命）和V<sub>s</sub>（特征寿命）均略低于A厂3#试样，1#试样和3#试样的L<sub>10</sub>（额定寿命）、L<sub>50</sub>（中值寿命）和V<sub>s</sub>（特征寿命）均远远高于A厂2#试样。而3#试样为国际SKF标准生产，A厂与首钢一样采用GB18254-2002标准生产。这说明首钢轴承钢实物已达到国内中上等水平。

### 4 结论

首钢采用转炉—连铸工艺生产轴承钢，可以满足GB18254-2002的标准要求，其主要指标氧含量可以控制的12ppm以下，现在已批量生产，产品质量受到了用户的好评。同时通过轴承接触疲劳寿命的测定对比，表明首钢轴承钢实物已达到国内中上等水平。

### 参考文献

- [1]钟顺思等 轴承钢，冶金工业出版社，2002年，162。
- [2]刘昊 UHP EAF-LF-VD-CCM 轴承钢氧含量的控制，江苏冶金，2002年30卷第4期，22。

## Research and Development of Converter—Casting for Bearing Steel in Shougang

Zhang Huifeng, Deng suhuai, Zhang Wei, Wangkun, Lin zhifeng

(Shougang Research Institute of Technology, 100041)

**Abstract:** The present paper introduces the key processes of bearing steel production by converter route in Shougang. With the strict control about termination of converter, ladle furnace refining, vacuum handling and whole protected casting, the product property has met the GB18254-2002 and obtained customers' recognize.

**Key Words:** bearing steel; converter; oxygen content