

# 高碳钢生产工艺及质量分析

李永祥<sup>1</sup>, 廖 明<sup>1</sup>, 李碧春<sup>1</sup>, 黄 艳<sup>1</sup>, 肖时平<sup>1</sup>, 胡 兵<sup>2</sup>, 刘国贵<sup>2</sup>

(1. 重庆钢铁股份有限公司 钢铁研究所, 重庆 400084; 2. 重庆钢铁股份有限公司 炼钢厂, 重庆 400081)

**摘 要:** 介绍了重庆钢铁股份有限公司采用转炉-LF连铸生产高碳钢的工艺, 并对其工艺和质量进行了分析, 总结了工艺操作要点, 认为高碳钢生产控制的重点和难点是控制钢的碳偏析和钢中夹杂物的形态及数量。

**关键词:** 高碳钢; 工艺; 质量; 分析

**中图分类号:** TF761.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1002-1043(2009)04-0001-04

## High-carbon steel production process and quality analysis

LI Yong-xiang<sup>1</sup>, LIAO Ming<sup>1</sup>, LI Bi-chun<sup>1</sup>, HUANG Yan<sup>1</sup>,  
XIAO Shi-ping<sup>1</sup>, HU Bing<sup>2</sup>, LIU Guo-gui<sup>2</sup>

(1. Iron and Steel Research Institute of Chongqing Iron and Steel Co., Ltd.,  
Chongqing 400084, China; 2. Steelmaking Plant of Chongqing Iron and Steel  
Co., Ltd., Chongqing 400081, China)

**Abstract:** The present paper introduces the production of high carbon steel by the technological process of Converter-LF-Conticaster, analyses the characteristics of the technology and quality and generalizes the essential points of the process in Chonggang. It's concluded that the crucial and most difficult points in production of the high carbon steel is to control the carbon segregation and the shape and content of the inclusions in molten steel.

**Key words:** high carbon steel; process; quality; analysis

优质高碳钢高速线材广泛应用于加工低松弛预应力钢丝、钢丝绳、钢绞线、弹簧钢丝及中高强度的紧固件等, 是一种高附加值产品, 具有广阔的市场前景。随着市场对高碳钢质量的要求日益提高, 要求高碳钢线材具有通条性能均匀, 脱碳少, 组织主要为索氏体, 不允许有马氏体和网状渗碳体存在, 并要求强度高, 延伸、韧性好, 以适应冷拔过程的需要。重庆钢铁股份有限公司(以下简称重钢)于2001年9月开始进行高碳钢的试制工作。在前几轮的试制中, 高碳钢铸坯及盘圆存在如下质量问题: 铸坯中心偏析严重, 盘圆拉拔过程中出现较多脆断现象, 抗拉强度超标, 熔炼成分与成品成分(特别是碳成分)的差异较大。针对上述问题, 通过优化炼钢、轧钢工艺, 加强质量控制, 高碳钢质量得到较大提高, 盘圆断丝量小, 质量符合标准要求。目前, 重钢高碳钢产量可达20 000

t/月, 品种数量增加, 已开发出50钢~80钢系列高碳钢, 其轧材产品质量良好。以下介绍重钢在利用转炉-LF精炼-连铸工艺开发高碳钢, 控制高碳钢质量方面的经验。

## 1 生产工艺

### 1.1 工艺流程

铁水 → 900 t 混铁炉 → 50 t 转炉 → 80 t 钢包  
精炼炉 → 150 mm × 150 mm 方坯连铸机 → 切割 →  
热送高线厂轧制 → 检验入库。

### 1.2 工艺要求

采用脱硫铁水, 要求  $w([P]) \leq 0.100\%$ ; 使用优质废钢, 如切边、切头等; 转炉、LF、连铸机等设备处于良好状态, 且具备电磁搅拌条件。

### 1.3 转炉冶炼工艺

(1) 装入制度。总装入量88 t, 其中冷料(生

铁加废钢)比在 20 %左右,冷料比可根据铁水成分、温度灵活调整,以确保 C-T 协调。

(2) 供氧制度。吹氧流量设定为 $17\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ,工作压力在 $0.80\sim 0.85\text{ MPa}$ ,视炉内化渣情况进行恒流量变枪位操作。

(3) 终点控制。采用高拉补吹法,终点目标 $w([\text{C}])\geq 0.10\%$ , $w([\text{P}])\leq 0.015\%$ , $w([\text{S}])\leq 0.030\%$ ,终渣碱度按 $3.0\sim 4.0$ 控制,出钢温度按 $1\,630\sim 1\,650$  控制,其冶炼终点实际控制情况见表 1。

表 1 70 钢的冶炼终点控制

| 项目  | t/    | $w_{\text{B}}/\%$ |       |       |
|-----|-------|-------------------|-------|-------|
|     |       | C                 | P     | S     |
| 平均值 | 1 641 | 0.11              | 0.013 | 0.031 |
| 最小值 | 1 622 | 0.10              | 0.012 | 0.024 |
| 最大值 | 1 693 | 0.15              | 0.018 | 0.039 |

(4) 磷控工艺。充分利用冶炼前期低温的有利条件,适当提高枪位,快速成渣并早化渣,使炉渣碱度控制在 3.0 以下,保证前期去磷效果;冶炼后期控制好炉温,不宜过高,防止回磷;出钢过程使用挡渣帽、挡渣锥挡渣,要求下渣量在 70 mm 以下,以减少钢水回磷。

(5) 碳控措施。在确保终点磷控合格、温度合格的条件下,尽可能提高终点碳控制,钢中不足的碳含量靠出钢过程加入增碳材料增碳。为了确保增碳剂加入后,碳的回收率高且稳定、碳的均匀性好、钢液温降小,高碳钢增碳材料选择以含碳合金球为主,适当加入碳粉,在 LF 使用含碳合金球或碳芯线微调碳。

(6) 脱氧合金化工艺。出钢过程主要加入多元合金进行预脱氧,进 LF 喂入少量铝线或多元合金线脱氧,合金化主要采用 FeSi 和电炉 FeMn。

(7) 出钢过程钢包进行在线吹氩。

1.4 精炼工艺

在精炼环节,LF 除调节温度、调整成分、脱硫外,控制的重点应是钢中夹杂物形态和数量,避免出现大型和脆性夹杂物。

(1) 成分控制。由于出钢过程增碳量大,为达到 LF 精调成分的目的,采用进 LF 站吹氩均匀后的钢液成分作为调整钢液成分的依据。对钢中硅、锰成分分别用硅铁和锰铁调整,用含碳合金球或碳芯线微调碳成分,LF 工艺参数控制情况见表 2。

表 2 70 钢的 LF 工艺参数控制

| 项目  | $t/$  |       | $w(\text{C})/\%$ |      | $w(\text{S})/\%$ |       |
|-----|-------|-------|------------------|------|------------------|-------|
|     | 进站    | 出站    | 进站               | 出站   | 进站               | 出站    |
| 平均值 | 1 546 | 1 544 | 0.47             | 0.70 | 0.027            | 0.009 |
| 最小值 | 1 526 | 1 534 | 0.39             | 0.68 | 0.018            | 0.004 |
| 最大值 | 1 566 | 1 555 | 0.54             | 0.73 | 0.033            | 0.014 |

(2) 温度控制。由于高碳钢液相线温度低,因而其过程温度低,如果钢水进 LF 站硫成分较高,将被迫增加精炼渣料,从而易造成炉渣碱度高、温度低、化渣困难。因此,为确保 LF 化渣良好,要求 LF 第一次升温温度不能过低。

(3) 夹杂物控制。改变夹杂物的形态和分布,降低钢中夹杂物含量是生产高碳钢的重点和难点。为改变夹杂物的形态和分布,利于钢中夹杂物的去除,在钢水离开 LF 站前,利用含 Ca 包芯线对钢水进行钙处理。钙处理后,为保证夹杂物充分上浮,必须对钢包钢液进行较长时间的软吹氩,软吹氩时间要求不少于 8 min。

经 LF 处理后,高碳钢成分控制良好,符合有关工艺规定要求,见表 3。

1.5 连铸工艺

连铸工艺对高碳钢铸坯质量起着极其关键的

表 3 70 钢精炼后中间包钢水成分

| 项目  | $w_{\text{B}}/\%$ |      |      |       |       |                 |      |      |      |       |
|-----|-------------------|------|------|-------|-------|-----------------|------|------|------|-------|
|     | C                 | Si   | Mn   | P     | S     | Al <sub>t</sub> | Cr   | Ni   | Cu   | As    |
| 平均值 | 0.70              | 0.24 | 0.60 | 0.017 | 0.009 | 0.008           | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.011 |
| 最小值 | 0.68              | 0.21 | 0.56 | 0.014 | 0.005 | 0.003           | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.007 |
| 最大值 | 0.72              | 0.29 | 0.67 | 0.020 | 0.014 | 0.015           | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.017 |

作用。合适的保护浇铸,利于防止钢中气体和夹杂物含量增加;浇铸温度、拉速、二冷水的合理控制有利于防止铸坯中心疏松、缩孔、偏析和内裂,并获得结构致密的铸坯。

1.5.1 浇铸温度

确定合适的浇铸温度有利于实现顺利浇铸和获得良好的铸坯质量。由于高碳钢存在凝固区间较宽的特点,铸坯凝固时易发生偏析。铸温过高,

铸坯易产生柱状晶或穿晶组织,造成中心疏松、缩孔和偏析加剧;耐材受侵蚀易引起浇铸控制系统失控或漏钢,并使钢中非金属夹杂物增加。而浇铸温度过低易造成中包水口冻结,迫使浇铸中断,并可能恶化铸坯表面质量<sup>[1]</sup>。因此,考虑到重钢炼钢厂是 5 流方坯铸机,且采用了结晶器电磁搅拌工艺,钢液过热度按 15~30 控制。

1.5.2 拉速制度

随着拉速的提高,铸坯在结晶器内停留时间变短,从而使钢液凝固速度降低。拉速过高,会发生铸坯鼓肚,加重铸坯中心偏析,因此,高碳钢的拉速不宜过快。重钢在钢液浇铸过热度为 15~30 时,相应典型拉速按 2.2 m/min 控制,其生产过程控制情况见表 4。

| 表 4 70 钢浇铸工艺参数控制 |      |                             |
|------------------|------|-----------------------------|
| 项目               | 过热度/ | 拉坯速度/(m·min <sup>-1</sup> ) |
| 平均值              | 22   | 2.25                        |
| 最小值              | 11   | 2.15                        |
| 最大值              | 28   | 2.40                        |

1.5.3 连铸冷却工艺

二次冷却条件直接影响铸坯质量的好坏。固液界面上的冷却条件严重影响固液两相区微观组织的生长,弱的二次冷却能够减少中心偏析和改善铸坯结晶组织,抑制柱状晶生长,增加等轴晶区。重钢高碳钢生产采用弱的冷却制度,采用气水冷却方式,二冷制度经过优化后,目前的比水量控制在 0.58~0.63 L/kg。连铸坯一次切割后自然冷却,在翻滚冷床上不能对铸坯喷水或吹风冷却,否则易造成铸坯表面炸裂和端面裂纹。

1.5.4 电磁搅拌工艺

连铸使用电磁搅拌技术,能减少铸坯皮下气泡、非金属夹杂物缺陷的产生,改善铸坯表面质量,增加微细等轴晶,减轻中心偏析、缩孔和疏松,防止结晶器内的不均匀凝固。目前,电磁搅拌工艺已普遍应用于高碳钢生产中,而应用最广泛的是 M-EMS 单搅拌和 M+F-EMS 组合搅拌,重钢采用 M-EMS 单搅拌工艺技术,搅拌频率为 3~4 Hz,搅拌电流为 300~400 A。

1.5.5 保护浇铸

由于用户对高碳钢盘圆中气体要求较严,因此必须进行全程保护浇铸。钢包到中间包采用长水口加密封环,中间包加覆盖剂,中间包到结晶器之间采用浸入式水口,结晶器采用高碳钢专用保护渣。

2 工艺分析

2.1 冶炼工艺分析

从表 1 可知,冶炼过程中,脱磷工艺操作控制得较好,终点  $w([P])$  较低,平均只有 0.013 %。终点 C 含量虽达到了工艺目标要求,但从总体上看,终点  $w([C])$  偏低,平均仅为 0.11 %,最高只有 0.15 %,因此在能保证终点 P 含量的条件下,应尽可能提高终点 C 含量。而终点  $w([S])$  相对较高,平均达 0.031 %,最低为 0.024 %,最高为 0.039 %,导致终点 S 含量高的主要原因:一是入炉原辅材料铁水、石灰等 S 含量高;二是对转炉冶炼重点是脱磷保碳、C-T 协调,脱硫的任务主要在 LF 完成。

2.2 精炼工艺分析

从表 2 可知,进 LF 的  $w([S])$  平均值为 0.027 %,最低 0.018 %,最高 0.033 %,出 LF 的  $w([S])$  平均值 0.009 %,最低 0.004 %,最高 0.014 %,LF 平均脱硫率达 66.67 %。可见,重钢 LF 脱硫效果较好。

2.3 成分控制分析

从表 3 可知,高碳钢中间包成分控制较好,炉次之间成分波动较小;钢中 P、S 含量低;而钢中  $w(Al_1)$  平均仅为 0.008 %,钢中如此较低的  $Al_1$  含量,利于防止钢中产生大量的  $Al_2O_3$  系夹杂物。结合表 3 可知,经 LF 处理后,钢中回磷较少。

2.4 连铸工艺分析

从表 4 可知,实际生产中,钢液浇铸温度控制在目标温度中下限,拉速基本按典型拉速 2.2 m/min 控制,浇铸温度和拉速控制得较好,在现有连铸工艺制度条件下,所浇铸坯质量良好。

3 质量分析

3.1 钢中气体含量

高碳钢气体含量如表 5 所示。

| 表 5 高碳钢盘圆中气体质量分数 |               |      |    |
|------------------|---------------|------|----|
| 项目               | $w_B/10^{-6}$ |      |    |
|                  | N             | H    | O  |
| 平均值              | 46            | 0.47 | 55 |
| 最小值              | 30            | 0.05 | 42 |
| 最大值              | 62            | 1.01 | 61 |

从表 5 可知,钢中气体含量均不高,特别是盘圆中 H 含量较低,可见高碳钢的脱氧和保护浇铸工艺控制较好。

### 3.2 钢中夹杂物含量

取 10 炉次的 10 件铸坯样分析钢中夹杂物含量,其分析结果显示,钢中夹杂物质量分数平均值为  $44 \times 10^{-6}$ ,最小值  $23 \times 10^{-6}$ ,最大值  $63 \times 10^{-6}$ ,可见钢中夹杂物含量较低。

### 3.3 铸坯低倍和硫印检验

取 20 件铸坯做低倍硫印检验,其结果显示,铸坯无内裂,铸坯缺陷少,缺陷级别均小于 1 级,铸坯质量良好。可见连铸浇铸温度、拉速制度、冷却制度合理,满足了高碳钢铸坯的质量要求,其分类缺陷见表 6。

表 6 高碳钢铸坯低倍硫印检验

| 类别           | 数量/件 | 占比例/% |
|--------------|------|-------|
| 中心疏松 1 级以下   | 4    | 20    |
| 中心偏析 0.5 级以下 | 20   | 100   |
| 皮下夹杂 0.5 级以下 | 2    | 10    |
| 缩孔 0.5 级以下   | 7    | 35    |
| 气孔 0.5 级以下   | 3    | 15    |

### 3.4 碳偏析情况

高碳钢的偏析主要为碳偏析,其它成分偏析较小,而方坯的中心偏析主要起因于铸坯凝固末端固液两相区的凝固收缩。重钢在生产 70 钢时,在大包开浇 5 min 后,开始取中间包钢样,每隔 5 min 取样一次,每炉共取 7 个钢样做碳成分分析,同时对同一炉钢铸坯低倍试样钻样分析碳成分,其分析结果显示,中间包钢液中  $w(C)$  的波动范围为  $0 \sim 0.02\%$ ,其波动范围较小;铸坯中心部位碳偏析度为  $0.96 \sim 1.08$ ,平均 1.02。可见,所生产的高碳钢碳偏析较小。

### 3.5 轧材质量和性能

铸坯经轧制后,盘圆无裂纹、折迭、结疤等缺陷,外形尺寸控制较好。所有盘圆均进行了金相组织和脱碳层深度检验,金相组织均为索氏体+珠光体+铁素体(其中铁素体面积分数极少,索氏体占  $80\% \sim 90\%$ ),脱碳层深度在  $0.02 \sim 0.04\text{ mm}$ ,符合标准要求。从表 7 可知,其轧材性能指标较稳定,波动小,满足了有关标准和用户要求。

表 7 70 钢轧材性能

| 项目  | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 断面收缩率/% |
|-----|----------|-------|---------|
| 平均值 | 1 002    | 13    | 38      |
| 最小值 | 956      | 11    | 29      |
| 最大值 | 1 073    | 16    | 47      |

### 3.6 盘圆拉拔性能

盘圆在钢绳厂拉拔过程中,仅有极少量发生

脆断现象,拉拔过程顺利,而断裂钢丝断面形状各异,有呈锥形  $45^\circ$  斜面断口和齐平断口等。断裂钢丝断口做金相检验分析,其结果显示,造成盘圆在拉拔过程中断裂的主要原因是钢中硅酸盐夹杂物、成分偏析、拉拔中润滑不良等(见图 1~2)。拉拔后线材表面质量好,塑性等性能指标较好,但少量线材强度超标,其原因为 Mn 含量偏高所致。从总体上看,用户对重钢高碳钢盘圆质量满意。

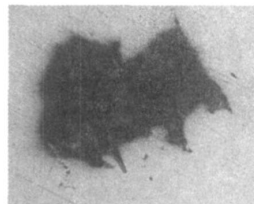


图 1 断裂处的铁锰硅酸盐夹杂物 (100 ×)

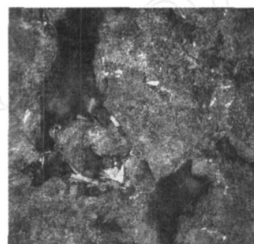


图 2 断裂处的铁素体偏析 (100 ×)

## 4 结 论

(1)在重钢炼钢厂现有装备条件下,所制定的高碳钢工艺技术合理可行,利用该工艺技术完全能生产出符合有关技术标准和满足用户要求的高碳钢产品。

(2)高碳钢生产工艺要点是转炉冶炼脱磷保碳,LF 精炼脱硫、控制钢中夹杂物形态和数量,连铸保护浇铸、较弱的冷却制度、合理的浇铸温度和拉速。

(3)如何尽可能提高高碳钢终点碳含量,还有待进一步研究。

(4)控制钢的碳偏析和钢中夹杂物的形态及数量,是高碳钢生产控制的重点和难点。

(5)重钢生产的高碳钢成分控制较好,炉次之间成分波动小,钢中气体、夹杂物含量低,碳偏析小,盘圆通条性均匀,力学性能良好。

### [参 考 文 献]

[1] 蔡开科. 连续铸钢[M]. 北京:科学出版社,1990.

(修回日期: 2009-01-16)