

# LF-RH/TCOB 双联法冶炼超低碳钢工艺优化

周小川

(济南钢铁股份有限公司 第三炼钢厂, 山东 济南 250101)

**摘要:** 济钢第三炼钢厂采用中薄板坯铸机(ASP)生产超低碳钢, 利用LF-RH/TCOB精炼工艺解决了钢水的可浇性及钢水中[C]等成分的控制问题。通过确定精炼过程中各阶段的提升气流量、钢包渣系及TCOB吹氧脱碳处理氧枪参数等, 对关键工艺参数进行优化, 实现了连续浇钢6炉以上, 成品碳含量 $[C] < 50 \times 10^{-6}$ , 全氧含量可达到 $30 \times 10^{-6}$ 以下。

**关键词:** 中薄板坯铸机; 超低碳钢; LF-RH/TCOB 精炼

中图分类号: TF761.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4620(2010)01-0019-03

## 1 前言

RH是具有脱碳、脱气、脱氧、喷粉脱硫、成分微调、化学升温、去除夹杂、净化钢水等功能的快速高效冶炼纯净钢的精炼工艺。为了适应济钢当前技术升级、质量提升、品种开发的需要, 济钢第三炼钢厂从奥钢联(VAI)引进了1套RH/TCOB设备。为开发超低碳钢等新钢种, 针对济钢第三炼钢厂中薄板坯生产工艺特点和设备状况, 对以LF-RH/TCOB为主的相关工艺进行优化, 探索相应工艺操作措施。

## 2 工艺流程的选择

利用RH生产超低碳钢的传统工艺是转炉—RH—厚板铸机, 而利用中薄板坯铸机(ASP)生产超低碳钢普遍存在几个难点: 钢水的可浇性, 钢水中[C]等成分的控制。由于中薄板坯铸机生产铸坯具有如下几个特征<sup>[1]</sup>: 表面积/体积比增加, 夹杂物易集于铸坯的表面或次表面, 硫化物成为后续冷轧工序表面缺陷的来源; 结晶器空间相对较小, 拉速快, 易卷渣, 水口易结瘤。因此, 要求钢水的纯净度更加严格。

由于济钢第三炼钢厂紧凑的现场条件和工艺条件的限制, 钢水到达RH工序前必须利用LF炉作为调节生产组织的重要环节。利用LF炉升温, 为RH/TCOB提供稳定的到站温度, 可避免RH/TCOB吹氧升温。LF炉进行顶渣改质造白渣, 有利于钢水脱硫, 利于真空脱碳合金化后夹杂物的吸附, 防止钢水卷渣二次氧化, 可改善钢水的可浇性。利用LF炉对钢水先行进行处理是成功生产超低碳钢的关键, 是生产节奏组织、钢渣改质、钢水温度控制、钢水脱硫的必备工序。

收稿日期: 2009-07-27; 修回日期: 2010-01-25

作者简介: 周小川, 男, 1981年生, 2004年毕业于东北大学冶金工程专业和材料科学专业, 双学士。现为济钢第三炼钢厂助理工程师, 从事炼钢工艺技术工作。

## 3 RH/TCOB设备与工艺简介

济钢RH/TCOB主要参数如下: 平均每炉钢水量150 t; RH型式为双工位拼合式罐体; 真空泵形式为5个蒸汽喷射真空泵+2个冷凝器+4个水环泵; 真空泵抽吸能力67 Pa时约650 kg/h, 8 kPa时约3 000 kg/h; 吹氧流量1 800 m<sup>3</sup>/h。RH装置示意图见图1。

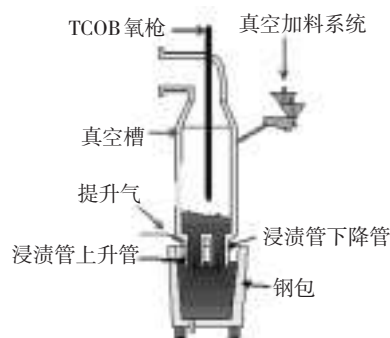


图1 RH装置示意图

济钢RH/TCOB处理有轻处理、本处理和TCOB氧枪处理3种工艺模式。轻处理模式是指在6~26 kPa的真空度下, 对钢水脱氧并调整钢水成分、温度的处理模式; 本处理模式是指在真空度 $< 270$  Pa下, 尽量去除氢、氮、氧等杂质并调整钢水成分、温度的处理模式; TCOB氧枪处理模式是指在较低真空下, 利用顶吹氧枪吹氧并加铝化学升温和超低碳钢的吹氧强制脱碳的处理模式。

## 4 双联法冶炼超低碳钢工艺优化

### 4.1 环流量与提升气流量的确定

环流量是指单位时间内进入真空槽内的钢水量(t/min)。提升气流量是指浸渍管上升管内用来提升钢水促进钢水循环的气体流量。合理的环流量有利于促进钢水的脱气脱碳反应, 促进夹杂上浮, 均匀成分和温度。生产超低碳钢时, 为了利用真空条件快速脱碳, 脱碳期间环流量应该占钢水总量的75%以上, 利于钢水全部进入真空槽, 减少钢

水循环死区,可由下式计算:

$$Q=114G^{1/3}D^{4/3}(\ln P_0/P)^{1/3} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为环流量,  $t/min$ ;  $G$  为提升气流量,  $m^3/min$ ;  $D$  为浸渍管内径,  $m$ ;  $P_0$ 、 $P$  分别是大气压和槽内压力,  $Pa$ 。济钢 150 t RH 设备的  $D=0.55 m$ , 大气压  $P_0=10^5 Pa$ , 槽内气压  $P=67 Pa$ , 提升气流量在  $1 \sim 2.5 m^3/min$  内可调。取不同的提升气流量分别带入公式(1), 可计算出相应的环流量(见表1)。

表1 不同环流气流量下钢水环流量

环流气流量/( $m^3 \cdot min^{-1}$ )	钢水环流量/ $t$	占钢水比/%
1.0	99	0.66
1.2	105	0.70
1.4	110	0.73
1.6	115	0.77
1.8	120	0.80
2.0	124	0.83

考虑到真空状态下钢水脱氧不完全时钢水反应较为激烈,而真空槽由于生产炉次之间进行了喷补作业,烘烤时间短,槽内温度降低,提升气流量过大等原因容易造成钢水飞溅至槽壁形成冷钢。因此,真空处理前 5 min 内提升气流量一般为  $1 \sim 1.2 m^3/min$  可减少钢水飞溅。吹氧之后,为了快速脱碳,要适当提高提升气流量,即提升气流量为  $1.6 m^3/min$  以上,真空脱碳处理时间  $> 18 min$ , 钢水可达  $[C] < 15 \times 10^{-6}$ 。脱碳结束后加铝脱氧和微调合金时,需要适当降低提升气流量,以减少钢水卷渣和过程温降。

## 4.2 钢包渣系的确定

利用中薄板坯铸机生产超低碳钢,水口易结瘤,因此要求钢水脱氧完全,纯净度高,可浇性好,则要求顶渣脱氧效果好。据文献[2]报道,推荐的脱氧顶渣成分见表2。

表2 顶渣成分 %

CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	FeO+MnO
50~55	10~15	10~15	≤5	≤0.5

由表2可知,济钢 RH 顶渣主要有利于 CaO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—SiO<sub>2</sub>三元渣系进行脱氧,吸附脱氧产物主要是钢水中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。其中 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 可生成低熔点化合物 CaO·6Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12CaO·7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。这些复杂分子的生成,消耗了相当比例的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 使 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活度降低。同时由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的存在,渣子熔点降低,使得该渣系与脱氧产物的界面张力很小,可使脱氧产物 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 很快被吸附和融入合成渣,钢水全氧含量可达到  $30 \times 10^{-6}$  以下。

如果不进行钢包渣改质,渣中(FeO+MnO)将是 RH 处理以及浇铸过程中钢水二次氧化的主要影响因素。研究发现<sup>[3]</sup>,在纯脱气 15 min 条件下,

(FeO+MnO)=2%时,钢中总氧含量为  $24.8 \times 10^{-6}$ ; (FeO+MnO)=10%时,钢中总氧含量为  $32.2 \times 10^{-6}$ ; (FeO+MnO)=20%时,钢中总氧含量为  $41.4 \times 10^{-6}$ 。同时从表2可知,要求渣中(FeO+MnO)很低。由此可见,需要严格控制钢包渣中(FeO+MnO)含量。首先,要求出钢时采取有效的挡渣操作,减少下渣;其次,出钢后对钢包渣进行还原改质。由于济钢第三炼钢厂采用 LF—RH/TCOB 工艺,造渣的部分任务可以放到 LF 工序进行,造白渣处理,使渣中(FeO+MnO) < 2%。

## 4.3 TCOB 氧枪吹氧脱碳处理

由于本工艺采用了 LF 先行造渣脱硫,因此钢水到达 RH 工序时已经脱氧完全,要达到超低碳钢种要求,必须吹氧强制脱碳。以约  $1800 m^3/h$  的氧气流量和 5500 mm 的枪位在 0.7~1.2 kPa 的真空中吹氧,氧气收得率约 50%~60%。真空状态下钢水通过激烈的 C—O 反应脱碳,实践表明,脱碳 18 min 后富余氧达到  $300 \times 10^{-6}$  以上,可使  $[C] < 15 \times 10^{-6}$ 。当部分炉次温度较低时,根据钢水的初始温度和过程温降,需要加铝吹氧升温,升温速度一般能达到 4~7 °C/min。吹氧同时也氧化掉钢中部分其他成分,平均吹  $100 m^3$  的氧气, [Mn] 和 [Si] 分别损失 0.01% 和 0.015%。

## 4.4 钢水均匀化优化

### 4.4.1 钢液混均时间的影响

根据 T·Lehner 的研究<sup>[4]</sup>,把循环混合均匀看作各个流体分率  $i$  在反应器内通过多次循环而达到的均匀,则  $T_i/T_c = \ln(100/i)$ , 式中  $T_i$  表示混合达到某种程度所需时间,称为混均时间,  $T_c$  为环流时间。若以不均匀度  $\pm 5\%$  为混合均匀标准时,混均时间记为  $T_5$ ,  $T_5/T_c = \ln(100/5) = 3$ , 即钢液循环 3 次就达到了混合均匀,也即达到了均匀化。根据前文所述,钢水环流量最小为 99 t/min, 则 150 t 钢水循环 1 次最多需要 1.5 min。由此可知,150 t 钢水混匀最多需要 4.5 min。环流量越大,钢水混匀时间越短。

### 4.4.2 浸渍管内口形状的影响

根据文献[5],RH 钢包主截面钢液流向见图2,从下降管流出的钢液基本上不扩展地向下流动,在到达包底后四散,再沿包壁向上流动。而循环流在上升管下方的钢包底部和下降流的右方形成,并且仅在极其接近上升管的端口区域才显现出对其右方流体的抽吸作用。若插入管下口呈喇叭型,从下降管流出的钢液不能直接流到钢包底部,钢液循环就会发生短路,进而影响钢液的均匀化。RH 处理结束后,不时会有残渣从真空室下落并堵塞在下降管内,使浸渍管内径变小,处理下一炉钢液前必须

清理掉这些残渣,否则,严重时下降管将逐渐堵死。当浸渍管内径变小后,处理时间也未延长,就会发生钢液循环不良的情况。因此,必须维护好浸渍管才能保证钢水循环和均匀化。

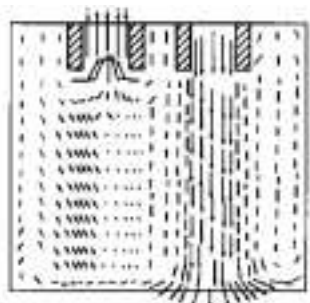


图2 RH钢包主截面钢液流向

#### 4.5 超低碳钢增碳的控制

钢水经过脱碳处理后 $[C] < 15 \times 10^{-6}$ ,但后续工艺会持续增碳,导致成品碳含量超标,必须采取措施减少增碳。分析可能增碳的因素,主要有:

1)合金增碳。钢水脱碳后需要配 $[Mn]$ 、 $[Ti]$ 等成分,添加的合金可能增碳,因此必须采用含碳量极低的合金,尽量控制增碳量。

2)槽内冷钢增碳。如果冶炼超低碳钢前冶炼的是含碳量高的钢种并在真空槽内留有冷钢,冷钢会进入超低碳钢中造成增碳。因此冶炼超低碳钢前必须用不脱氧钢洗槽去掉冷钢。

3)普通钢包耐材、中间包耐材、中间包和结晶器的保护渣以及覆盖剂含有碳成分,易进入钢水增碳,因此必须选用专门无碳材质,才能满足生产要求。

## 5 优化效果

济钢第三炼钢厂采用LF-RH/TCOB双联精炼工艺在中薄板坯铸机上生产超低碳钢,其全氧含量可达到 $30 \times 10^{-6}$ 以下,完全解决了常见的钢水可浇性差的问题,实现了6炉连续浇铸。成品碳含量 $[C] < 50 \times 10^{-6}$ ,合格率100%,其中 $[C] < 30 \times 10^{-6}$ ,内控合格率也达到了60%以上,钢中其他成分控制也取得了很好的效果(见表3)。

表3 典型炉次超低碳钢生产实际成分 %

炉号	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti
500057	0.003 8	0.022	0.15	0.011	0.008	0.028	0.062
500058	0.002 7	0.021	0.15	0.011	0.007	0.036	0.062
500061	0.002 8	0.028	0.17	0.011	0.007	0.032	0.061

LF-RH/TCOB精炼工艺为济钢生产超低碳钢创造了条件,扩大了钢的品种,提升了钢的质量。

#### 参考文献:

- [1] 沈昶,宋超,舒宏富,等.CSP批量生产超低碳钢的RH-LF双联工艺研究[J].钢铁,2008,43(5):26-29.
- [2] 知水,王平,侯树庭.特殊钢炉外精炼[M].北京:原子能出版社,1996:119.
- [3] 杨阿娜,刘学华,蔡开科.炼钢过程钢中氧的控制[J].钢铁研究学报,2005,17(3):21-25.
- [4] T·Lehner.Homogenization, Desulfurization and Deoxidation of Liquid Steel by Powder Injection [J].Mc Master Symp.On Iron and Steelmaking,1979(7):533-547.
- [5] 肖兴国,谢蕴国.冶金反应工程学基础[M].北京:冶金工业出版社,1997.

## Optimization of Refining Ultra-low Carbon Steel in LF-RH/TCOB

ZHOU Xiao-chuan

(The No.3 Steelmaking Plant of Jinan Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** The No.3 Steelmaking Plant of Jinan Iron and Steel Co., Ltd. adopted ASP caster to produce the ultra low carbon steel, solved the pourability of the molten steel and control question of composition such as  $[C]$  by LF-RH/TCOB refining. Through confirming the flow rate of lift gas circulation in the course of refining, the slag system in the ladle and the parameters of the TCOB, the key parameters were optimized. Therefore, continuous casting steel for more than six heats was realized, the carbon content in the finished product was less than  $50 \times 10^{-6}$  and the total oxygen content reached below  $30 \times 10^{-6}$ .

**Key words:** ASP caster; ultra low carbon steel; LF-RH/TCOB refining

信息园地

### 烧结烟气脱硫技术(一)

烧结烟气脱硫是钢铁企业减排 $SO_2$ 的主要途径。我国钢铁企业采用的烧结烟气脱硫技术多达十余种,包括:石灰-石膏法、氨法、离子液法、循环流化床干法脱硫法、湿式氧化镁法、活性炭吸附法、MEROS、喷雾干燥吸收法(SDA)等。

1)石灰-石膏法属典型的湿法脱硫技术,是世界上技术最成熟、实用业绩最多、运行状况最稳定的脱硫工艺技术,但是其副产品石膏在我国应用范围狭小,如果直接废弃会造成二次污染,并且该技术的投资运行成本相对较高。

2)湿式氧化镁法属于湿法脱硫技术,技术成熟度仅次于钙法,采用浆状氢氧化镁作脱硫剂,其副产品是可溶性的亚硫酸镁和硫酸镁,综合利用价值较高。与钙法相比,镁法对烧结烟气工况适应性强,运行费用低,适用于镁质资源丰富的地区。

3)氨法是湿法脱硫技术,其副产品硫酸铵具有一定的市场潜力,钢铁联合企业可利用焦化氨源,降低运行成本,但整个系统需要重视防腐处理。目前我国建成、在建或拟建的15套湿法脱硫技术中有7套为氨法。

(摘自2009-12-08《世界金属导报》)