

## 超低碳钢 210 t RH 脱碳精炼工艺的优化

周剑丰 罗 钢

(湖南华菱涟源钢铁有限公司技术中心, 娄底 417009)

**摘 要** 分析和确定了RH精炼的初始碳含量、提升气体流量和转炉终点氧含量, 并进行生产实践。结果表明, RH进站初始碳含量应控制在  $250 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ , 转炉出钢时终点氧含量应控制在  $250 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 。实际生产数据统计表明, 在RH处理初期(0~3 min), 各炉次脱碳速率最大值可达到  $98 \times 10^{-6}/\text{min}$ , 在脱碳终点时, 碳含量在  $12 \times 10^{-6}$  左右。

**关键词** 210 t RH 超低碳钢 脱碳 工艺优化

## Optimization of 210 t RH Decarburization Process for Ultra-Low Carbon Steel Refining

Zhou Jianfeng and Luo Gang

(Technical Center, Lianyuan Iron and Steel Co Ltd, Hunan Hualing, Loudi 417009)

**Abstract** The RH refining initial carbon content in liquid, rising gas rate and converter end oxygen content in liquid are analyzed and defined, and the production practice has carried out. The results show that the initial carbon content in liquid before RH refining should be controlled from  $250 \times 10^{-6}$  to  $400 \times 10^{-6}$ , the end oxygen content in liquid of converter at tapping should be controlled from  $250 \times 10^{-6}$  to  $400 \times 10^{-6}$ . The statistic data of real production show that in beginning period of RH refining for 0~3 min, the max decarburization rate of each heat is up to  $98 \times 10^{-6}/\text{min}$ , and at end of decarburization the carbon content in liquid is about  $12 \times 10^{-6}$ .

**Material Index** 210 t RH Unit, Ultra-Low Carbon Steel, Decarburization, Process Optimization

超低碳冷轧钢板被广泛应用于汽车和家电外壳等的制造, 随着用户对其深冲性能要求的日益严格, 对钢中的碳含量也提出了更高的要求。RH精炼在生产超低碳钢工艺中起着主导作用<sup>[1-5]</sup>。

本文在理论分析的基础上结合生产实际, 分析各工艺参数对RH脱碳速率的影响, 确定了RH生产的最优工艺参数, 以达到快速地将钢中碳含量降低到目标范围的要求。

### 1 RH 主要设备参数和工艺路线

涟源钢铁公司生产超低碳钢的工艺路线为: KR脱硫→BOF→Ar站→RH→连铸。涟钢采用的是210 t顶底复吹转炉, 带有副枪测温定氧装置。表1为涟钢RH的主要设备参数。冶炼超低碳钢时采用全程吹氩操作, 转炉终点目标为[C] 0.025%~0.050%, [O] ≤ 0.08%, 出钢温度1660~1690℃。转炉出钢采用石灰加入200~400 kg, 出钢结束加入含铝顶渣改质剂200~300 kg。

### 2 RH 主要工艺参数的确定

#### 2.1 初始碳含量的确定

RH进站初始碳含量过低, 则转炉负荷大、钢水

表1 RH 主要设备参数

Table 1 Main parameters of RH unit

项目	参数
公称容量/t	210
布置型式	单工位
日平均处理炉数/炉	24
真空泵抽气能力/(kg·h <sup>-1</sup> )	≥1 000
真空泵工作真空度/Pa	67
真空室内径/mm	2 300
插入管内径/mm	680
氩气流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	270(最大值)
循环流量/(t·min <sup>-1</sup> )	208
氧气流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2400

过氧化严重; 而初始碳含量过高, 则脱碳处理时间延长, 影响生产节奏。在RH处理过程中, 钢液中碳氧反应式(1)所示:



$$\Delta G^\theta = -22\,200 - 38.34 T \quad (2)$$

其平衡常数与温度的关系为:

$$\lg K = \lg \frac{P_{CO}/P}{a_{[C]} \cdot a_{[O]}} = \frac{1\,160}{T} + 2.003 \quad (3)$$

式中: K- 反应平衡常数; P<sub>CO</sub>- CO 气压; P- 真空室压

力; $a_{[C]}$ -钢中碳的活度; $a_{[O]}$ -钢中氧的活度。

当钢液中碳和氧含量不高时,可以认为  $a_{[C]} = [C]$  和  $a_{[O]} = [O]$ , 反应在 RH 真空室内进行, 真空室内气体中除少量  $CO_2$  等气体外, 绝大部分为 CO 气体<sup>[6]</sup>, 所以可认为 CO 的分压  $P_{CO}$  与真空室内压力  $P$  相等, 即  $P_{CO} = P$ 。

由式(1)可知, C、O 反应时原子存在一定的比例关系, 即  $n[C]/n[O] = 1$ 。从而可得到碳消耗量与氧消耗量存在一定比例关系, 即  $\Delta[C] = 0.75 \Delta[O]$ 。在一个标准大气压的条件下, 钢液中的  $[C]$ 、 $[O]$  积约为  $0.25 \times 10^{-2}$ , 当已知钢水中的初始碳含量  $[C]_0$  时, 其初始氧含量为<sup>[6]</sup>:

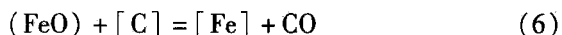
$$[O]_0 = \frac{2.5 \times 10^{-3}}{[C]_0} \quad (4)$$

真空室压力为 100 Pa 时, 碳氧积约为  $0.25 \times 10^{-5}$ 。假设在该真空度下脱碳后, 氧已经被完全消耗, 则有:  $\Delta[O] = \Delta[O]_0$ , 这样计算最大的脱碳量为:

$$\begin{aligned} \Delta[C] &= 0.75 \Delta[O] = 0.75 \Delta[O]_0 = \\ &0.75 \times 2.5 \times 10^{-3} / [C]_0 = \\ &1.875 \times 10^{-3} / [C]_0 \end{aligned} \quad (5)$$

从式(5)可以得出, 当钢中的初始碳含量越小, 经过 RH 真空精炼后的钢水中理论脱碳量越大, 所以在生产时钢中的初始碳含量越低, 越有利于 RH 脱碳的进行。

当转炉终点碳含量达到某一临界值时, 再进行吹炼钢水碳含量不再降低, 吹入的氧气主要用来氧化钢液中的铁, 这一临界值称为转炉临界碳含量<sup>[7-8]</sup>。根据碳和铁的选择性氧化可得到转炉的临界碳含量<sup>[6]</sup>:



$$\Delta G^\theta = 98\,799 - 90.76 T \quad (7)$$

$$\lg K = \lg \frac{P_{CO}/P^\theta}{a_{(FeO)} \cdot a_{[C]}} = \frac{5\,162}{T} + 4.742 \quad (8)$$

取  $P_{CO} = 101.325 \text{ kPa}$ ,  $P^\theta$  为标准大气压, 钢种  $[C]$  的活度系数  $f_{w[C]} = 1$ , FeO 活度由相图查得, 由式(7)、(8)计算得出转炉平均终点温度为  $1\,670 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 相应的临界碳含量约为  $0.025\%$ , 如果低于这个值, 转炉负荷增大降碳困难并且钢水过氧化严重。研究表明<sup>[9]</sup>, 若初始碳含量超过  $0.04\%$ , RH 很难在  $15 \text{ min}$  内将碳降至  $0.002\%$  以下。因此, RH 进站初始碳含量控制在  $0.025\% \sim 0.040\%$ 。

## 2.2 提升气体流量

在考虑真空室压力对循环流量的影响的情况下, 循环流量  $Q$  的公式如式(9)<sup>[2]</sup>:

$$Q = 11.4 G^{1/3} D^{4/3} \left( \ln \frac{P_1}{P_2} \right)^{1/3} \quad (9)$$

式中:  $Q$ -循环流量/ $(t \cdot \text{min}^{-1})$ ;  $G$ -提升气体流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ ;  $D$ -浸渍管直径/cm;  $P_1$ -大气压力/Pa;  $P_2$ -真空室压力/Pa。

由公式(9)可知, 当真空室压力和浸渍管直径一定的时候, 提升气体流量超过  $1\,200 \text{ L/min}$  时, 随着提升气体流量的增大引起循环流量的增幅逐渐减小; 当提升气体流量超过  $1\,700 \text{ L/min}$  时, 提升气体流量每增加  $100 \text{ L/min}$  引起循环流量的增幅小于  $2.0\%$ ; 当提升气体流量超过  $3\,400 \text{ L/min}$  时, 提升气体流量每增加  $100 \text{ L/min}$  引起循环流量的增幅小于  $1.0\%$ 。根据迁钢<sup>[8]</sup>的实际生产经验, 当提升气体流量超过  $2\,000 \text{ L/min}$  时引起的降碳量很微小。提升气体流量在真空室压力降至  $1\,500 \text{ Pa}$  (约为开始抽真空  $4 \sim 5 \text{ min}$ ) 后才有明显影响<sup>[9]</sup>, 因此在开始抽真空前  $5 \text{ min}$  维持提升气体流量在  $1\,200 \text{ L/min}$  左右, 之后再增至  $1\,700 \text{ L/min}$  以上, 一般情况下不需超过  $3\,400 \text{ L/min}$ <sup>[10]</sup>。

## 2.3 转炉出钢终点氧含量

增加钢液中的溶解氧可以显著地提高脱碳反应速率, 但钢液中溶解氧含量过高, 脱氧产生大量的夹杂物, 这不仅会降低钢水的洁净度, 同时还容易造成水口结瘤, 影响生产节奏。图1是由公式(3)计算出温度为  $1\,600 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 真空室压力分别为  $267 \text{ Pa}$  和  $667 \text{ Pa}$  下, 碳氧活度平衡图。

由图1可知, 在仅考虑热力学条件的情况下, 要将钢水中的碳脱至  $0.002\%$ , 在真空度仅为  $667 \text{ Pa}$

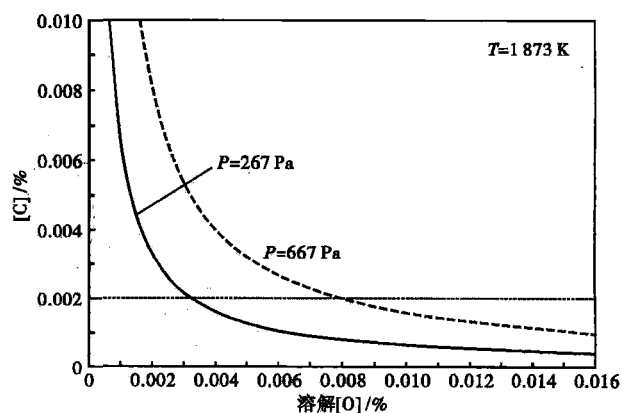


图1 碳氧平衡曲线图

Fig. 1 Curves of equilibrium between carbon and oxygen

时,与之平衡仅需约0.008%的溶解氧浓度,若真空度更低,则与之平衡所需的氧浓度更低。但是考虑到RH处理过程中的脱碳反应速率,钢液中氧含量过低必然严重降低脱碳反应速率。转炉出钢终点氧含量控制在0.025%~0.040%<sup>[11]</sup>。

### 3 RH生产实际效果

复吹转炉的粗炼钢水在RH工序脱碳过程一般分成3个阶段:(1)钢液中的碳由进站碳降至0.01%左右,此时,钢液中的碳氧含量比较高,碳氧反应剧烈,脱碳速度非常快,导致喷溅严重,所以应适当控制真空度和提升气体流量。(2)钢液中的碳可以降低至0.003%,此时真空度要求达到130 Pa以下。(3)钢水中的碳含量降低至0.0015%左右,该阶段由于碳氧含量少,即使在67 Pa真空度下,碳氧反应的速度也极低。在RH冶炼过程中真空度是逐步降低,提升气体的流量是前低后高的操作。

表2为实际生产6炉的RH前[C],[O]和RH真空度。由图2可知,在RH处理初始(0~3 min),各炉平均脱碳速率可达到0.0098%/min。随着脱碳反应的进行,脱碳速率逐渐降低,在冶炼至8 min

表2 RH精炼钢水条件和极限真空度

Table 2 Conditions of liquid and limiting vacuum for RH refining

炉号	转炉终点碳/%	RH前氧/%	极限真空度/Pa
1	0.0425	0.0440	71
2	0.0370	0.0700	88
3	0.0309	0.0714	89
4	0.0324	0.0616	89
5	0.0306	0.0432	90
6	0.0249	0.0601	81

### 参考文献

- [1] Kuwabara T. Progress of RH Refining Process in Japan[J]. Tetsu to Hagané, 1987, 73(12):2157-2164.
- [2] Kuwabara T, Umezawa K, Moro K. Investigation of Decarburization Behavior in RH Reactor and Its Operation Improvement[J]. ISIJ International, 1988, 28(4):305-311.
- [3] Yamaguchi K, Kishimoto Y, Sakuraya T, et al. Effect of Refining Conditions for Ultra Low Carbon Steel on Decarburization Reaction in RH Degasser[J]. ISIJ International, 1992, 32(1):126-134.
- [4] Kitamura S, Yano M, Harashima K, et al. Decarburization Model for Vacuum Degasser[J]. Tetsu to Hagané, 1994, 80(3):213-219.
- [5] Takahashi M, Matsumoto H, Saito T. Mechanism of Decarburization in RH Degasser[J]. ISIJ International, 1995, 35(12):1452-1459.
- [6] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002.
- [7] 李朋欢, 包燕平, 岳峰, 等. RH快速深脱碳研究[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(1):11-17.
- [8] Lei Ze-long, Zhang Li-feng, Gao Jian-wei, et al. Production of Ultra Low Carbon IF Steels by RH-TOP Process[C]. AISTech 2009 Proceedings, St Louis:2009.
- [9] Huin D, Saint-Raymond H, Stouvenot F, et al. Kinetics of Vacuum Decarburization of Ultra Low Carbon Steels[C]. Steelmaking Conference Proceedings, Baltimore:2001.
- [10] Kunitake O, Imai T, Mukawa S, et al. High Speed Decarburization by Modernized RH-OB and New Decarburization Technology Under Pressure by CAS-OB[C]. 2001 Steelmaking Conference Proceedings, Baltimore:2001.
- [11] 贺庆, 刘浏, 庄辉, 等. RH生产超低碳钢的脱碳速率及工艺优化[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(2):26-31.

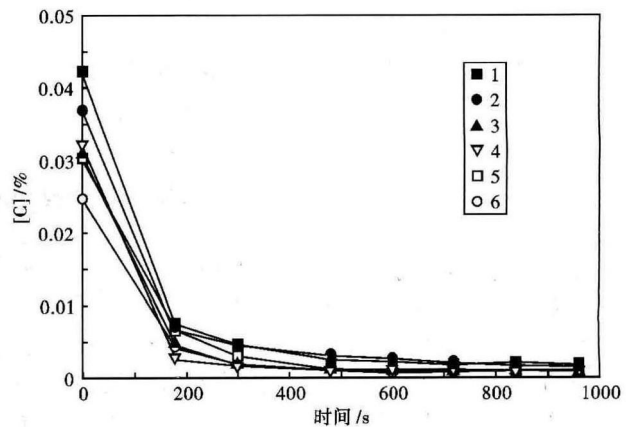


图2 RH脱碳过程的碳含量变化曲线图

Fig. 2 Curves of variation of carbon content in liquid during RH decarburization process

时大部分炉次的钢水碳含量降低至0.0020%以下,脱碳终点时,碳含量均在 $12 \times 10^{-6}$ 左右。

### 4 结论

(1)通过理论分析得出,RH进站初始碳含量应控制在0.025%~0.040%。

(2)钢液中氧含量越低,越有利于提高铸坯洁净度,改善钢水可浇性。但是钢液中氧含量过低,严重降低脱碳反应速率。因此,转炉出钢终点氧含量应控制在0.025%~0.040%。

(3)实际生产过程中RH表现出了良好的脱碳能力,在RH处理初期(0~3 min),各炉平均脱碳速率最大值可达到0.0098%/min,处理至8 min时大部分炉次的钢水碳含量降低至0.002%以下,在脱碳终点时,碳含量均在0.0012%左右。

周剑丰(1977-),男,硕士(2008年武汉大学),工程师,1998年贵州大学(本科)毕业,从事纯净钢冶炼研究。

E-mail:13973875846@163.com

收稿日期:2015-06-19