

· 工艺技术 ·

高效 RH 脱碳工艺参数的优化

刘柏松^{1,2} 朱国森² 李本海² 朱立新² 崔爱民³ 李焕喜¹

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院,北京 100083; 2 首钢技术研究院,北京 100041;
3 首钢迁钢公司,迁安 064404)

摘要 基于 RH 脱碳数学模型,研究了 210 t RH 精炼装置的脱碳行为,分析了真空度、提升气体流量及浸渍管内径等因素对脱碳过程的影响;在自然脱碳条件下,根据实际取样分析结果,计算出脱碳速率常数 K_c ,发现整个脱碳过程分为两个阶段,即快速脱碳阶段和脱碳停滞阶段;提高真空度可提高脱碳速率和降低终点 [C];提高气体流量不能显著提高脱碳速率,应选择合适的浸渍管内径;快速脱碳阶段的脱碳速率常数可达 0.287 min^{-1} 。

关键词 脱碳速率 RH 精炼 超低碳钢

Optimization of Parameters for High Efficiency RH Decarburization Process

Liu Baisong^{1,2}, Zhu Guosen², Li Benhai², Zhu Lixin², Cui Aimin³ and Li Huanxi¹

(1 School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083;
2 Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100041;
3 Qianan Iron and Steel Co, Shougang, Qianan 064404)

Abstract Based on decarburization math model for RH process, the decarburization behavior of a 210 t RH unit has been studied to analyze the effect of vacuum, lifting gas flow rate and up-leg inner diameter on decarburizing process. At condition of natural decarburization, according to results of sampling analysis to calculate decarburization rate constant K_c , it was found that the whole decarburization process was divided into two phases: quick decarburization phase and decarburization stagnated phase. The results showed that with increasing vacuum, the decarburizing rate increased and end [C] decreased; with increasing gas flow rate the increase of decarburizing rate was not outstanding; using suitable up-leg inner diameter was available to get larger decarburizing rate; and the decarburizing rate constant could be up to 0.287 min^{-1} at quick decarburization phase.

Material Index Decarburizing Rate, RH Refining, ULC Steel

RH 真空精炼工艺使用最广泛的是用于冶炼超低碳 IF 钢。尤其是低温退火工艺开发以来,钢中的碳含量要求控制在 13×10^{-6} 以下,RH 精炼结束时的碳含量要求控制在 10×10^{-6} 以下。为此,许多学者建立了各种模型来描述 RH 处理过程的脱碳行为。RH 脱碳模型是根据 RH 精炼过程的特点提出的基于脱碳机理的数学模型^[1~6]。前人提出的 RH 脱碳机理大致可分为钢水自由表面的 CO 生成反应(表面脱碳)、环流 Ar 气泡对 CO 的吸附反应(气泡脱碳)及钢水内部的 CO 气泡产生的反应(内部脱碳)。

首钢迁钢公司于 2006 年 11 月投产了新的 RH 设备,容量为 210 t,浸渍管直径为 0.65 m,提升气体流量最大为 1 800 L/min,真空度为 67 Pa 时抽气能力为 750 kg/min,钢水的循环流量为 140 t/min。在性能考核时,15 min 内钢水碳含量最低达到 9×10^{-6} 。为优化 RH 的脱碳工艺,实现高效脱碳,本文基于 Yamaguchi 等人提出的脱碳模型^[7](即假设脱碳反应只发生在真空室内,碳、氧的传质是脱碳的限

制性环节),研究 RH 真空度、吹氩流量以及浸渍管内径的变化对脱碳过程的影响,并且在 RH 冶炼超低碳过程中每分钟取钢水试样,测定脱碳反应的速率。

1 实验条件及结果

1.1 实验条件和模型参数

1.1.1 实验条件

RH 处理前 IF 钢:碳含量在 $(200 \sim 400) \times 10^{-6}$ 、氧含量在 $(500 \sim 800) \times 10^{-6}$ 。处理过程钢液碳含量数值变化是由超低碳取样器取样分析得出,同时记录真空室压力的实时变化情况。

RH 实验的基本条件为:钢包容量 210 t、真空室下部槽内径 2.144 m、浸渍管内径 0.65 m、极限真空度为 67 Pa、提升气体流量为 1 200 ~ 1 800 L/min。

冶炼超低碳钢种的目标化学成分见表 1。

1.1.2 脱碳容积系数的讨论

根据脱碳模型,假设钢包和真空槽内的钢水完全混合,钢包和真空槽内的碳浓度可用式(1)、(2)

表 1 超低碳钢的目标化学成分/%
Table 1 Target chemical composition for ULC steel /%

| C | Mn | P | S | Si | Al | N | Ti |
|---------|------|---------|---------|--------|---------------|---------|------|
| ≤ 0.002 | 0.08 | ≤ 0.008 | ≤ 0.008 | ≤ 0.01 | 0.025 ~ 0.035 | ≤ 0.003 | 0.07 |

表示:

$$W(dC_L/dt) = Q(C_V - C_L) \quad (1)$$

$$w(dC_V/dt) = Q(C_L - C_V) - ak_c \cdot \rho(C_V - C_S) \quad (2)$$

式中: W 、 w - 分别为钢包内和真空槽内钢水量/kg; Q - 钢水循环速度/($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$); C - 碳浓度/%; ρ - 钢水密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); ak_c - 脱碳反应容积系数/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。(下标 L 、 V 、 S 分别代表钢包内、真空槽内、反应界面)。

根据前人研究结果^[8,9]

$$ak/V \propto \varepsilon^n \quad (3)$$

同时, 碳的容积系数随气-液界面面积等的变化而变化, 所以 n 不是固定的常数, 在这里取 $n = a + bt$ 。由于在钢液内主要是提升气体 Ar 气和生成的 CO 气体, 则有:

$$ak_c = A(\varepsilon_{Ar} + \varepsilon_{CO})^n = A(\varepsilon_{Ar} + \varepsilon_{CO})^{a+bt} \quad (4)$$

式中: V - 真空室钢水体积; ε - 真空室比搅拌功率。在本计算中取 $n = 0.77 - 0.025t$, 真空室比搅拌功率根据 Sundberg 等人^[10]研究的公式计算。

1.1.3 钢液循环流量的选择

由于 Kuwabara^[11]的计算公式考虑了压力对循环流量的影响, 所以本文采用该公式进行计算:

$$Q = 11.4 G^{1/3} \cdot d^{4/3} \cdot (\ln P/P_i)^{1.3} \quad (5)$$

式中: G - 提升气体流量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); d - 浸渍管内径/m; P - 标准大气压/Pa; P_i - 真空室内压力/Pa。

1.2 实验结果

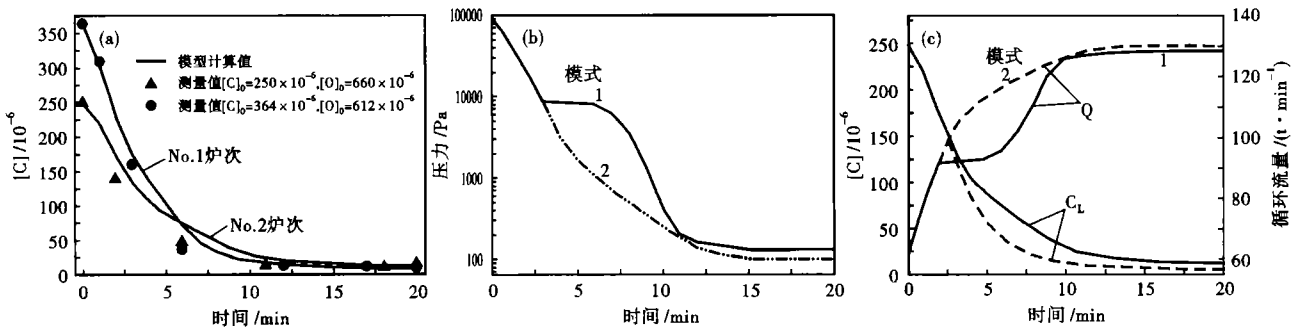


图 1 (a) 钢包内 [C] 测量值和计算值的比较; (b) 两种压降模式的真空度; (c) 压降模式对 [C] 和循环流量的影响
Fig. 1 (a) Comparison between calculated [C] and analyzed [C] in ladle; (b) Vacuum for two kinds of pressure decreasing patterns; (c) Effect of pressure decreasing patterns on [C] and circulating flow rate

图 1(a) 表示了两个炉次 RH 自然脱碳处理过程中钢包内实际碳含量与模型计算值的比较。可见, 在 20 min 脱碳结束时, 两个炉次模型计算值与实际测量值分别相差 1×10^{-6} 和 2×10^{-6} , 而且整个脱碳过程二者数值吻合较好, 说明了模型计算的可靠性, 为后期研究提供了保证。

2 脱碳速率的影响因素

2.1 真空度的变化

为研究 RH 处理过程中真空度对脱碳的影响, 采用两种压降模式进行计算, 如图 1(b) 所示, 其中模式 1 的压力变化曲线为现有工艺的实际测量值, 压力在下降过程中出现明显的压降平台。因而设计一种压降模式(模式 2), 提高压降速率, 消除压降平台。根据两种压降模式计算得到的脱碳曲线和相应的钢液循环流量如图 2(c) 所示。

可见, 压降模式 2 对应的脱碳速率比压降模式 1 大。以真空处理 12 min 碳含量为例, 压降模式 2 对应的碳含量为 10.2×10^{-6} , 比压降模式 1 低 11×10^{-6} 。其主要原因是, 在压降模式 1 下, 由于出现了压降平台, 钢液循环流量增加也出现了平台。总的来说, 真空度的提高促进了真空室钢液脱碳反应的进行, 在相同的处理时间内, 使钢液中碳含量达到更低值。

2.2 提升气体流量

图 2(a) 可见, 提升气体流量增大, 脱碳速率增加, 但增幅不大。在真空处理 12 min 时, 随着提升气体流量的增加, 钢液中碳含量分别为 25.6×10^{-6} 、 21.2×10^{-6} 、 18.3×10^{-6} 、 15.7×10^{-6} , 相邻数值的差值分别为 4.4×10^{-6} 、 2.9×10^{-6} 、 2.6×10^{-6} ; 脱碳终点碳含量分别为 16.5×10^{-6} 、 13.1×10^{-6} 、 10.8×10^{-6} 、 9.0×10^{-6} , 相邻数值的差值分别为 3.4×10^{-6} 、 2.3×10^{-6} 、 1.8×10^{-6} 。可见, 在现有工

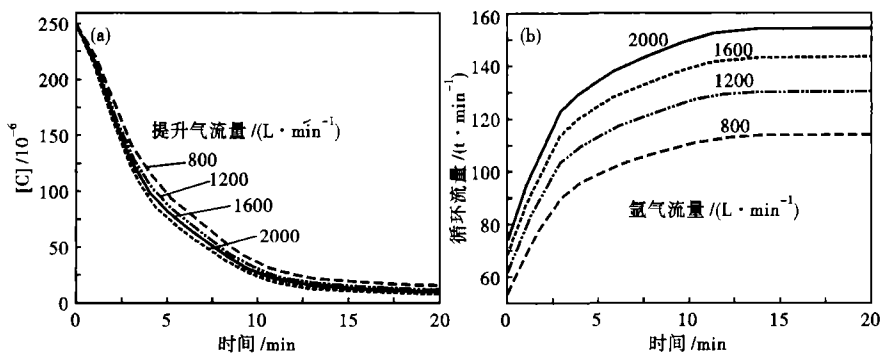


图 2 吹氩流量对 $[C]$ (a) 和循环流量 (b) 的影响

Fig. 2 Effect of Argon blowing rate on $[C]$ (a) and circulating flow rate (b)

艺下,氩气流量在 1 200 ~ 1 600 L/min 就可以满足快速脱碳的要求。

图 2(b) 可以看出,提高吹氩流量能增大钢液循环流量。但是,在上升管内径一定的情况下,氩气流量的增大对钢液循环流量的增加幅度的影响大致可以分为 3 个阶段:(1)氩气流量较小时,气泡在上升管内均匀分散分布,钢液循环流量随氩气喷吹量的加大而显著增加;(2)氩气流量较大时,气泡在上升管内分布稠密,气泡体积所占比例较大,氩气喷吹量加大后,钢液循环流量增加的幅度较小;(3)当氩气流量增加到一定值时,气泡体积所占的比例很大,气泡尺寸增加,抽引效率降低,钢液循环流量达到饱和值。在饱和点后,增大氩气流量,循环流量将不再提高,说明氩气流量的增加对脱碳速率的提高是有限的。因此,在一定抽气能力和固定浸渍管内径下,吹氩达到合理流量后,应该充分考虑其它因素对脱碳的影响^[12]。

2.3 浸渍管内径

图 3(a) 表示了浸渍管内径从 0.45 ~ 0.75 m 变换,每隔 0.1 m 取值时,根据模型计算所得到的不同脱碳曲线。由图 3(a) 可以看出,随着浸渍管内径的增加,脱碳速率也相应增大。浸渍管内径从 0.45 ~ 0.75 m 时,经过 12 min 的处理时间,碳含量分别达到 35.3×10^{-6} 、 26.4×10^{-6} 、 21.2×10^{-6} 、 17.8×10^{-6} ,可见,与提高吹氩流量相比,增大浸渍管内径的脱碳效果更为明显。但是,当浸渍管内径超过一定数值后,再继续增大对脱碳速率影响逐渐减弱,

如图 3(b) 所示,所以不必追求过大的浸渍管内径,选择合适数值即可。

3 脱碳速率的分析

一般脱碳过程的碳含量变化可以表示如下:

$$C_L = C_0 \cdot \exp(-K_C \cdot t) \quad (6)$$

由公式(6)可以计算出表观脱碳速率常数 K_C , K_C 被视为 RH 脱碳速度的特征量,虽然 K_C 值总是被认为是脱碳速率常数,但实际上 K_C 值不是恒定的,而是变化很大的。根据实验取样的时间和分析的碳含量,可以计算出各取样时间的 $-\ln(C_L/C_0)$,从而计算出 K_C 值,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,实际测量所得到的脱碳速率常数 K_C 在整个脱碳过程中明显分为两段,即快速脱碳阶段的 $K_{C,1}$ 和脱碳停滞阶段的 $K_{C,2}$ 。 $K_{C,1}$ 和 $K_{C,2}$ 的值分别为 0.287 、 0.026 min^{-1} 。这不同于传统 RH 的脱碳速率。传统 RH 的脱碳速率分为 3 个阶段,即脱碳初期速率缓慢、快速脱碳和脱碳停滞阶段^[13]。这是因为,在现有的工艺条件下,RH 抽真空速度很大,处理开始后,真空室压力迅速降低,此时的碳含量较高,为快速脱碳创造了条件;而脱碳中后期由于钢水中碳含量的降低,使得反应速度变慢,从而脱碳速率减小。川崎制铁公司在常规的 RH 工艺中前期脱碳速率常数 K_C 为 0.21 min^{-1} ,采用 KTB 法后,脱碳速率常数增加,能达到 0.35 min^{-1} 。可见,目前首钢迁钢公司 RH 工艺在自然脱碳过程下的前期脱碳速率处于较高水平,如何提高脱碳后期的脱碳速率,缩短脱碳时间,进一步降低终点碳含量

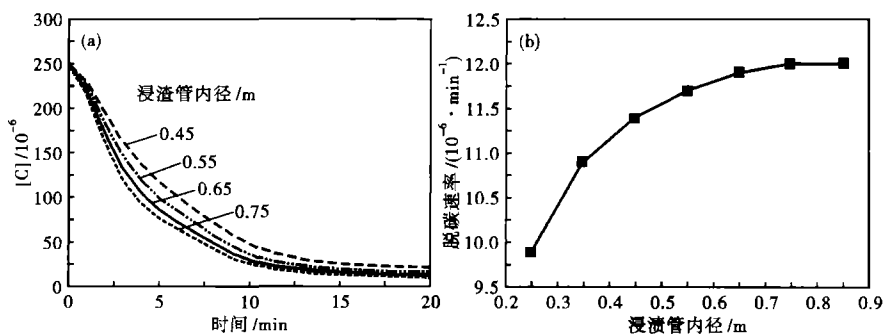


图 3 浸渍管内径对 $[C]$ (a) 和脱碳速率 (b) 的影响

Fig. 3 Effect of up-leg inner diameter on $[C]$ (a) and decarburizing rate (b)

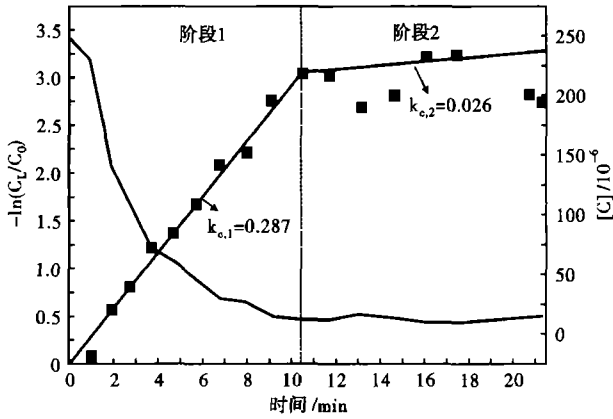


图 4 实际取样测量的脱碳速率
Fig. 4 Decarburization rate measured by actual sampling

将是下一步研究的重点。

4 结论

(1) 提高真空度使得 RH 脱碳速率增加, 缩短或

消除压降过程中的平台, 可以进一步降低脱碳终点碳含量。

(2) 增加提升气体的流量可加快脱碳反应速度, 但效果不明显。因此, 仅从提高提升气体流量来增加脱碳速率是相当有限的。

(3) 浸渍管内径的增加对脱碳速率的影响比较明显, 但是在其它参数确定的条件下, 浸渍管内径增大到一定数值后, 对循环流量的影响减弱。因此, 不必追求过大的浸渍管内径, 应选择合适的浸渍管内径。

(4) 根据实际测量值计算出脱碳速率常数, 可将脱碳过程分为两个阶段, 快速脱碳阶段的脱碳速率常数可达 0.287 min^{-1} 。前期较高的钢液碳含量和较快的抽真空速率, 使得脱碳反应速率大; 而脱碳后期随着钢水碳含量的降低, 反应速度减小, 致使脱碳速率减小。

参考文献

- 1 Kita Y, Satio. Refining Technology for Interstitial Free Steel in Kakogawa Works. Steelmaking Conference Proceedings, 1990, 73: 79
- 2 Chiang Ming-Siang, Lin Chang-Tsun, Chou Chang-Long, et al. Application of Off-gas Analysis for RH Decarburization Process. SEASIS Quarterly, 1997, 26(2): 27
- 3 Yano M, Kitamura S, Harashima K, et al. Improvement of RH Refining Technology for the Production of Ultra Low Carbon and Low Nitrogen Steel. Steelmaking Conference Proceedings, 1994, 77: 117
- 4 Kato Y. Development of Rapid Decarburization Technology by Combined Process of Converter and RH Degasser for Ultra Low Carbon Steel. Kawasaki Steel Technical Report, 1995, 32(5): 25
- 5 Kamo M, Adachi K, Nambu M. Longer Life in RH with Oxygen Top Blowing System. Steelmaking Conference Proceedings, 1997, 80: 483
- 6 Didier Huin, Huberet Saint-Raymond, Francois Stouvenot, et al. Kinetics of Vacuum Decarburization of Ultra Low Carbon Steels. Steelmaking Conference Proceedings, 2001, 601
- 7 Koji Yamaguchi, Yasuo Kishimoto, Toshikazu Sakuraya, et al. Effect of Refining Conditions for Ultra Low Carbon Steel on Decarburization Reaction in RH Degasser. IFIJ International, 1992, 32(1): 126
- 8 Shigeru Inoue, Yoshikazu Furuno, Tsutomu Usui, et al. Acceleration of Decarburization in RH Vacuum Degassing Process. ISIJ International, 1992, 32(1): 120
- 9 Asai S, Okamoto T, He Jicheng, et al. Mixing Time of Gas Blow-in Refining Vessel. Tetsu-to-Hagane, 1982(68): 426
- 10 Sundberg Y. Mechanical Stirring Power in Molten Metal in Ladles Obtained by Induction Stirring and Gas Blow-in. Scand. J. Metall, 1987(7): 81
- 11 Kuwabara. Investigation of Decarburization Behavior in RH Reactor and its Operation Improvement. Trans. ISIJ, 1988(28): 305
- 12 贾 斌, 陈义胜, 贺友多, 等. RH 真空室熔池和钢包内钢液整体流场的数学模拟. 钢铁研究学报, 2000, 12(9): 27
- 13 Kang Soo-Chang, Kim Kwang-Chun, Park Jong-Min, et al. Improvement of Decarburization Capacity of RH Degasser by Revamping at Kwangyang Works, POSCO. Steelmaking Conference Proceedings, 2000: 99

刘 柏松(1979-), 女, 博士研究生, 从事纯净钢的生产研究。

收稿日期: 2008-07-21

下 期 要 目

| | |
|---|------|
| 辊芯表层电渣加热渣池热电场及影响因素的数学模拟 | 罗丽萍等 |
| 高级别管线钢镁处理研究 | 李太全等 |
| 钢包底吹氩卷渣临界条件的水模型研究 | 艾新港等 |
| 0.07% ~ 0.095% C 的 AQ 钢板坯拉速的提高对结晶器传热的影响 | 赵紫锋等 |
| 稀土元素在洁净重轨钢中存在状态的热力学模型研究 | 朱江波等 |
| 300 t 铁水包双枪喷吹脱硫均混时间的水模型研究 | 庞在刚等 |
| RH 处理过程钢液流动行为的三维数值模拟 | 孙 亮等 |
| 厚板坯连铸二次冷却传热数学模拟 | 冯亮花等 |
| 烧结机缝隙磁场密封模拟实验 | 于旭光等 |
| 我国电炉钢生产现状及发展前景 | 李 晓等 |