

RH 真空脱碳精炼过程的模拟研究 *

朱苗勇

黄宗泽

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110006) (上海宝钢集团, 上海 201900)

摘要 在研究 RH 精炼装置内钢液湍流场的基础上, 结合 RH 内钢液的脱碳机理, 建立了描述 RH 装置内钢液流动与脱碳过程的耦合数学模型, 利用现场数据验证所建立的模型, 在此基础上, 用此模型来考察操作参数对 RH 真空脱碳过程的影响, 为工艺优化提供依据和指导。

关键词 RH 真空精炼, 钢液流动, 脱碳, 数值模拟

中图分类号 TF13, TB115

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)01-0091-04

NUMERICAL SIMULATION OF DECARBURIZATION IN RH DEGASSER

ZHU Miaoyong

School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006

HUANG Zongze

Shanghai Baosteel Group Corporation, Shanghai 201900

Correspondent: ZHU Miaoyong, professor, Tel: (024)23893000-7720, Fax: (024)23890559,

E-mail: myzhu@ramm.neu.edu.cn

Manuscript received 2000-03-18, in revised form 2000-06-04

ABSTRACT Based on the study of molten steel flow in RH degasser and the reaction mechanism of decarburization, a coupled mathematical model describing processes the turbulent flow and decarburization processes was established. The validity of the model was verified by the comparison of simulation results to the measured process data and can be used in optimizing the refining technology.

KEY WORDS RH vacuum refining, fluid flow, decarburization, numerical simulation

RH (Ruhrstahl & Heraus) 真空精炼作为炉外精炼的重要手段之一, 目前在高质量钢的生产中发挥着越来越重要的作用。RH 最主要的功能是脱碳, 了解 RH 过程的脱碳行为对更有效脱碳和开发新的精炼技术至关重要。为此, 许多研究者建立了各种模型来描述 RH 处理过程的脱碳行为^[1-4]。虽然前人的工作在脱碳机理的研究方面有较大进展, 但诸多模型将 RH 装置内的流动假设成理想流动, 没有考虑 RH 装置内的湍流流动, 也没能给出钢液内碳在处理过程中随时间和空间的变化情况, 而实际脱碳过程与钢液的流动密切相关。

本文在研究 RH 精炼装置内钢液湍流场的基础上^[5], 依据 RH 处理中的脱碳机理, 建立 RH 装置内钢液流动与脱碳的数学模型, 以此来描述 RH 真空处理过程中碳的行为, 为工艺优化提供依据和指导。

1 数学模型

1.1 流体流动

用连续方程、Navier-Stokes 方程及湍流模型来描述 RH 精炼装置内 (真空槽 + 钢包) 钢液的流动, 即

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \cdot \vec{u}) + \vec{F} \quad (2)$$

式中, \vec{u} 为速度矢量; μ_{eff} 为有效粘度系数, 由 $\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_t$ 确定 (其中 μ_l 为钢液的粘度, μ_t 为湍流粘度系数, 由 $k-\varepsilon$ 模型确定^[6]); \vec{F} 为体积力, 上升管吹氩时为气泡浮力, 即 $\alpha \rho_l g$ (其中 α 为气体分率, 由 Castillejos 和 Brimacombe 提出的实验关系式确定^[7])。

1.2 脱碳

RH 处理过程中钢液内碳浓度的变化可由下式描述

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho [C]) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} [C]) = \nabla \cdot (\Gamma_{\text{eff}} \nabla [C]) + S_c \quad (3)$$

* 国家教育部优秀年轻教师基金资助项目

收到初稿日期: 2000-03-18, 收到修改稿日期: 2000-06-04

作者简介: 朱苗勇, 男, 1965 年生, 教授, 博士

式中, Γ_{eff} 为有效扩散系数, $\Gamma_{\text{eff}} = \mu_l/S_{c1} + \mu_t/S_{c2}$ (其中 S_{c1} 和 S_{c2} 分别为层流和湍流的 Schmidt 数). RH 处理过程中脱碳的反应区域为上升管的氩气泡表面、真空室钢液的自由表面和真空室钢液内部脱碳反应形成的 CO 气泡表面. 根据 Takahashi 等人的研究结果^[8], 表明脱碳过程主要是在真空室进行. 因此, 式 (3) 中源项 S_c 在描述真空室内碳的行为时, 可表达成 $-\rho K_C[C]$, K_C 为脱碳的速率常数, 在 RH 装置的其它区域 S_c 为零. 对于脱碳过程, 须考虑过程所进行的不同控制环节. 在高碳时, 钢中的氧成为反应的控制环节, 在 $[C] < 200 \times 10^{-6}$ 时, 钢中的碳成为反应的控制性环节^[3], 为此, 本文用下式来表达脱碳过程的不同特点

$$K_C = \frac{12}{16} \cdot \frac{[O]}{[C]} \cdot \frac{1}{m\{1/Q_1 + 1/(ak_O\rho)\}} \quad [C] \geq 200 \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$K_C = \frac{1}{m\{1/Q_1 + 1/(ak_C\rho)\}} \quad [C] < 200 \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中, m 为大包中钢液的质量 (t); Q_1 为钢液的循环流量 (t/min), 由计算的流场获得; ρ 为钢液的密度 (t/m³); ak_C 和 ak_O 分别为碳和氧的容积传质系数 (m³/min). 本文由 Yamaguchi 等^[4] 提出的表达式来确定 ak_C , 即

$$ak_C = 2.6 \times 10^{-3} Q_1^{0.64} \cdot S_v \cdot [C] \quad [C] \leq 100 \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$ak_C = 2.6 \times 10^{-3} Q_1^{0.64} \cdot S_v \quad [C] > 100 \times 10^{-6} \quad (7)$$

其中, S_v 为真空槽的表面积 (m²).

由此可见, K_C 不仅与循环流量有关, 而且与钢液中碳和氧浓度有关. 故 S_c 实际是随空间和时间变化的.

1.3 边界条件

RH 装置内钢液流动场的边界条件见文献 [5]. 对于碳, 在固体壁面、自由表面和对称面上均设梯度为零.

1.4 数值计算方法

本文所有的控制方程采用有限控制体法进行离散, 并采用 SIMPLE 法^[9] 进行流场计算. 计算网格的构造与文献 [5] 的描述相同. 计算程序是在 TPS-3D^[10] 基础上开发的, 采用 Fortran 语言编制. 计算在 PII-450 微机完成. 本文计算的对象为宝钢 300 t RH 处理站. 其钢包内径为 3.9 m, 钢液深度为 3.8 m, 真空槽内径为 2.56 m, 真空槽内钢液的深度为 0.42 m, 上升管的内径分别为 0.50 m 和 0.75 m.

2 实验结果

2.1 脱碳行为

图 1 是上升管直径 D_{up} 为 500 mm, 吹氩量 Q_g 为 1150 NL/min, 初始碳含量 $[C]_0$ 为 300×10^{-6} 时 RH

处理过程中钢液中碳随空间和时间的变化情况. 从图可以看出, 在脱碳前 5 min, 真空槽内的碳浓度较大包中的低得多. 大包内上升管下方即包内的大回流区碳浓度最高, 但经过真空槽循环后, 浓度明显下降. 此时脱碳的速率较大; 随着脱碳的进行, 真空槽与大包和内部碳浓度的差别越来越小, 脱碳速率也明显降低, 尤其是 15 min 以后, 碳的变化不很显著.

为直观地反映钢中碳含量的变化情况, 图 2 给出了 RH 反应器内在初始碳含量 $[C]_0$ 分别为 300×10^{-6} 和 330×10^{-6} 时碳的平均浓度 $\overline{[C]}(\sum [C]_i V_i / V)$, 其中 $[C]_i$ 和 V_i 分别为微元体的碳浓度和体积, V 为钢液的总体积) 随时间的变化规律 (图中的小圆圈为实测数据). 从图可以看出, 在处理初期脱碳速度较大, 10 min 以后变得比较缓慢. 本计算与实测结果比较吻合.

2.2 脱碳的影响因素

2.2.1 KTB 吹氧 图 3 是上升管直径 D_{up} 为 750 mm, 初始碳含量 $[C]_0$ 为 409×10^{-6} , 初始氧含量 $[O]_0$ 为 376×10^{-6} , 平均吹氩量 \overline{Q}_g 为 1552 NL/min, 在有 KTB 吹氧 (共吹 7 min) 和无吹氧时 RH 处理过程中钢液中碳和氧随时间变化情况. 从图中可以看出顶吹氧时, 钢液中的氧明显增加, 从而明显加速初期的脱碳, 在初始氧含量较低时, 如果不实行 KTB 操作, 将无法在 RH 装置中实现超低碳精炼, 相反, 如果在 RH 处理中进行 KTB 操作, 不仅可以加速脱碳, 缩短冶炼时间, 而且可以将初始碳含量提高. 至于 KTB 操作的氧流量控制, 原则上保证吹炼过程中传给熔池的氧高于碳浓度 $100 \times 10^{-6} - 200 \times 10^{-6}$. 计算表明, 在 RH 处理过程顶吹氧的流量分别为 5500 和 4167 NL/min 时, 只是对熔池中的氧浓度产生了影响, 而对整个碳行为影响不大.

2.2.2 提升气量 图 4 是上升管的直径 D_{up} 为 750 mm, 吹氩量 Q_g 分别为 1150 和 1500 NL/min 时 RH 处理过程中钢液里碳的平均浓度 $\overline{[C]}$ 随时间变化情况. 从图可以看出, 上升管吹气量增加, 脱碳速率也有所增加, 但不很明显. 到 20 min 时, 整体碳浓度有所下降, 因此, 仅从增加喷吹气量来增加脱碳速率是相当有限, 需寻求别的手段.

2.2.3 上升管直径 图 5 是上升管直径 D_{up} 分别为 500 和 750 mm, 吹氩量 Q_g 为 1150 NL/min 时 RH 处理过程中钢液中碳含量 $[C]$ 随时间变化情况. 由图可见, 上升管直径不同, 在不同时期, 碳浓度有明显的差别, 即脱碳速率不同. 上升管直径增大, RH 装置内的循环流量明显增加, 从而使 RH 处理过程中的脱碳速率明显增加. 经 20 min 处理后可以将其碳含量从 300×10^{-6} 降至 34×10^{-6} , 而采用直径为 500 mm 的上升管碳含量则为 46×10^{-6} . 由此可见, 与增加吹气量相比, 增加上升管直径的效果更明显.

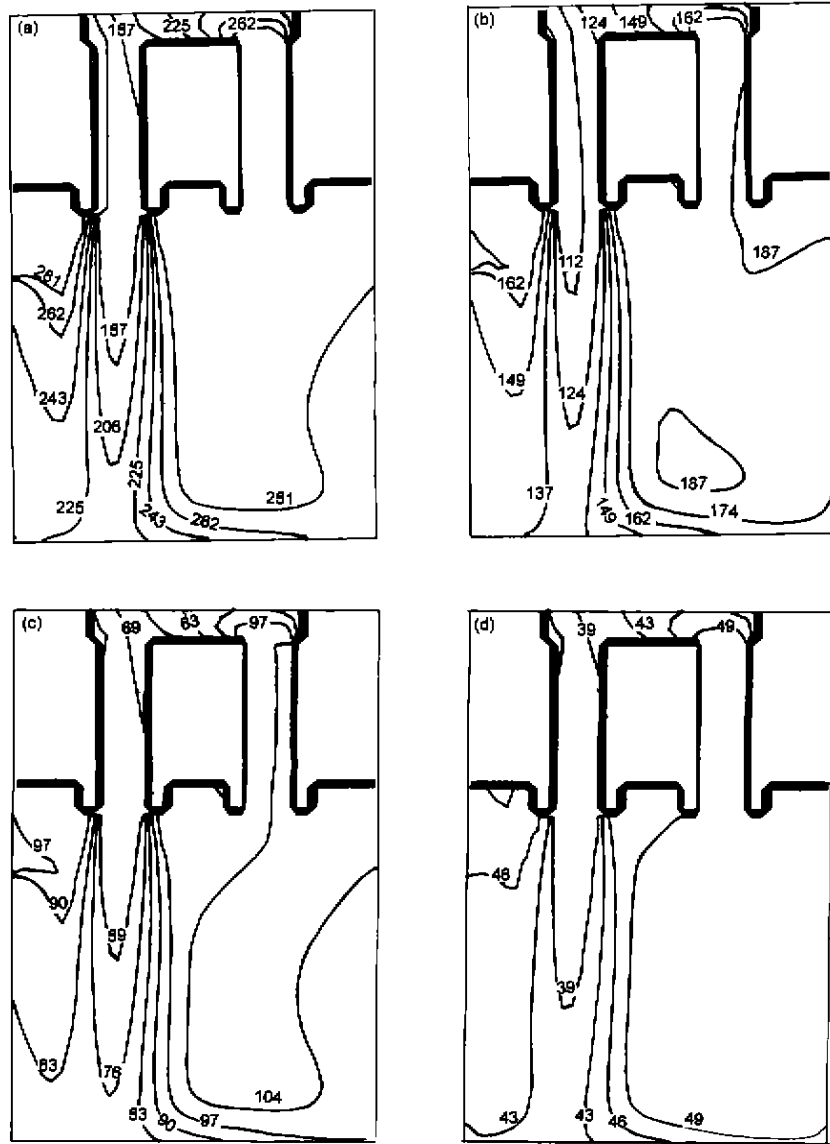


图 1 RH 处理过程中主截面上的碳浓度分布

Fig.1 Distributions of carbon content (mass fraction, 10^{-6}) at the symmetry plane of RH degasser (up-leq diameter $D_{up}=500$ mm, Ar flowrate $Q_g=1150$ NL/min, initial carbon content $[C]_0=300 \times 10^{-6}$)

(a) 1 min (b) 5 min (c) 10 min (d) 20 min

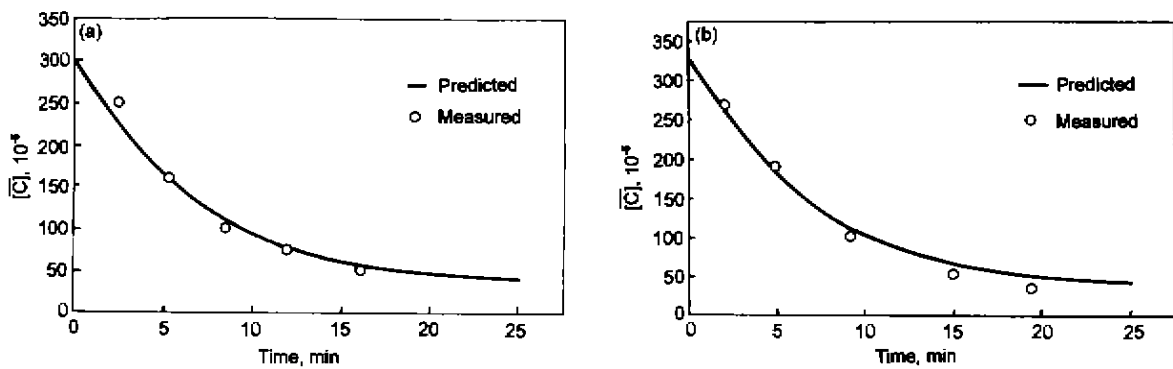


图 2 RH 装置中碳的平均浓度随处理时间的变化规律

Fig.2 Variation of average carbon content $[C]$ (mass fraction) with time in RH degasser

(a) $[C]_0=300 \times 10^{-6}$ (b) $[C]_0=330 \times 10^{-6}$

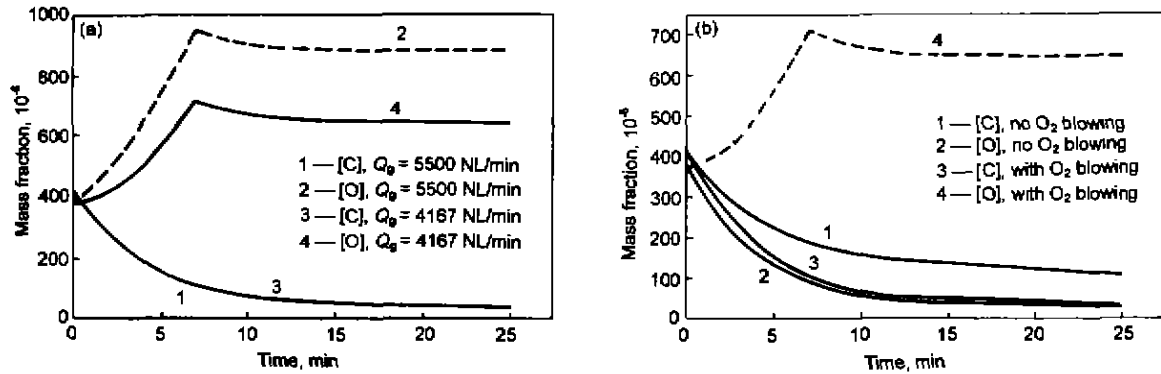


图3 顶吹氧量对RH脱碳过程的影响

Fig.3 Effect of top oxygen blowing flowrate on the decarburization in RH degasser

($D_{up}=750$ mm, $[C]_0=409 \times 10^{-6}$, $[O]_0=376 \times 10^{-6}$, $\bar{Q}_g=1552$ NL/min)

(a) with oxygen gas blowing (b) with/without oxygen gas blowing

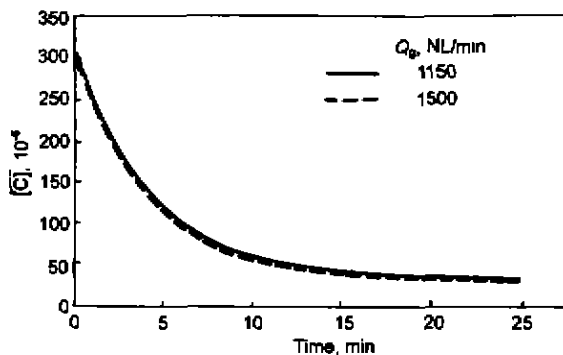


图4 提升气体流量对RH脱碳过程的影响

Fig.4 Effect of lifting gas flowrate Q_g on the decarburization in RH degasser ($D_{up}=750$ mm)

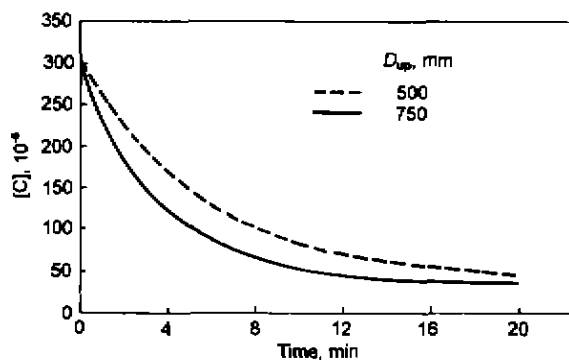


图5 上升管直径对RH脱碳过程的影响

Fig.5 Effect of up-leg diameter D_{up} on the decarburization in RH degasser ($Q_g=1150$ NL/min)

3 结论

(1) 本文建立的模型能预报和优化RH装置内钢液的脱碳过程。

(2) RH处理过程中,脱碳前期,真空槽内的碳浓度较大包中的低得多,大包内的大回流区碳浓度最高,但经过真空槽循环后,浓度明显下降,此时脱碳的速率较大;

随着脱碳的进行,真空槽与大包和内部碳浓度的差别越来越小,脱碳速率也明显降低。

(3) 有无KTB吹氧操作对RH精炼脱碳影响很大。顶吹氧能显著加速初期的脱碳,在初始氧含量较低时,如果不实行KTB操作,将无法在RH装置中实现超低碳精炼。相反,如在RH处理中进行KTB操作,不仅可以加速脱碳,缩短冶炼时间,而且可以提高初始碳含量。

(4) 增大提升气量有利于RH脱碳速率的增加,但效果不是特别明显,尤其是处理初期。因此,仅从增加喷吹气量来增加脱碳速率是相当有限。

(5) 上升管直径增加明显加快了RH处理过程的脱碳速率。与增加吹气量相比,增加上升管直径效果更明显。

参考文献

- [1] Kishimoto Y, Yamaguchi K, Sakuraya T, Fujii T. *ISIJ Int*, 1993; 33: 391
- [2] Kleimt B, Kohle S, Ponten H J, Matissik W, Schewe D. *Ironmaking Steelmaking*, 1993; 20: 390
- [3] Yamaguchi K, Kishimoto Y, Sakuraya T, Fujii T, Aratani M, Nishikawa H. *ISIJ Int*, 1992; 32: 126
- [4] Yamaguchi K, Kishimoto Y, Kato Y, Fujii T. *Proc Sweden-Japan Steelmaking Conference*, Japan, ISIJ, 1996: 129
- [5] Zhu M Y, Huang Z Z. *Acta Metall Sin*, 2000; 36: 1175 (朱苗勇, 黄宗泽. 金属学报, 2000; 36: 1175)
- [6] Launder B E, Spalding D B. *Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press, 1972: 1
- [7] Castillejos A H, Brinacombe J K. *Metall Trans*, 1987; 18B: 659
- [8] Takahashi M, Matsumoto H, Saito T. *ISIJ Int*, 1995; 35: 1452
- [9] Patankar S V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere, 1980: 1
- [10] Zhu M Y. *PhD Thesis*, Northeastern University, Shenyang, 1994 (朱苗勇. 东北大学博士学位论文, 沈阳, 1994)