

## RH 真空精炼系统的混合行为

齐凤升, 李宝宽, 陈海耿

(东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:** 采用数值分析与水模型实验相结合的方法对 RH 装置的混合行为进行了研究. 研究对象针对整个 RH 循环系统, 并发展一种新的均相流方法建立流场模型. 混合行为分析以真空室钢液表面示踪剂的混合速率为基准进行. 研究结果表明, 示踪剂的扩散速度在开始阶段非常迅速, 只有上升管下部区域示踪剂的扩散较慢. 数值计算的示踪剂浓度分布与实验观察的结果基本一致.

**关键词:** 真空精炼; 混合行为; 钢液流动

**中图分类号:** TF769.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2008)S1-0031-04

### 1 前言

在钢的精炼方法中, RH 真空处理以其精炼效率高、适应批量处理、装备投资少和易操作等优点, 在炼钢生产技术中被广泛应用. 混合行为是考察 RH 性能的最主要参数之一, 混合能力大意味着单位时间内 RH 装置能够更好地完成祛除夹杂、脱碳等精炼工作. 浓度扩散数学模型是以钢液湍流场为基础建立的, 许多研究者建立了各种模型来描述 RH 系统内的钢液湍流流动, 李宝宽等<sup>[1]</sup>早在 1998 年就试图建立包括钢包、真空室、上升管和下降管整个装置系统内流动与传输模型. Domgin 等<sup>[4]</sup>的模型忽略了真空室和两个管, 只分析了整个装置的部分流场, 即钢包流场. 朱苗勇等<sup>[5,6]</sup>也建立了类似的数学模型, 但在求解流场时依然采用文献[1, 2]使用的底吹钢包模型. 本工作采用修正的均相流法<sup>[7]</sup>建立完整的 RH 装置内钢液湍流流动与脱碳的数学模型, 并结合水模型实验系统, 通过研究示踪剂在 RH 系统内的浓度扩散速度研究了 RH 系统混合行为.

### 2 水模型实验

#### 2.1 实验装置与系统

在 RH 真空精炼装置中, 惯性力和重力是支配流动的最主要因素, 遵循 Froude 准则<sup>[8]</sup>, 即

$$Fr = v^2 / gl, \quad (1)$$

对于气液两相流动, 引入修正的 Froude 准则:

$$Fr = \rho_l v^2 / gl(\rho_l - \rho_g), \quad (2)$$

式中  $v$  为气流速度(m/s),  $l$  为特征尺寸(m),  $\rho_l$  为液体密度(kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_g$  为气体密度(kg/m<sup>3</sup>),  $g$  为重力加速度(m/s<sup>2</sup>).

水模型以修正的 Froude 准则为基础, 按照 300 t 钢包和 RH 真空脱气装置的尺寸, 采用透光性较好的有机玻璃制作 1:7 的模型. 水模型几何参数如表 1 所示.

表 1 RH 真空精炼装置水模型的几何参数

| Parameter     | Up-leg | Down-leg | Ladle | Vacuum vessel |
|---------------|--------|----------|-------|---------------|
| Height (mm)   | 300    | 300      | 550   | 600           |
| Diameter (mm) | 80     | 80       | 500   | 350           |

实验系统由氮气瓶、转子流量计、超声波流量计、输气管、配气盘以及 RH 装置水模型等组成, 见图 1.

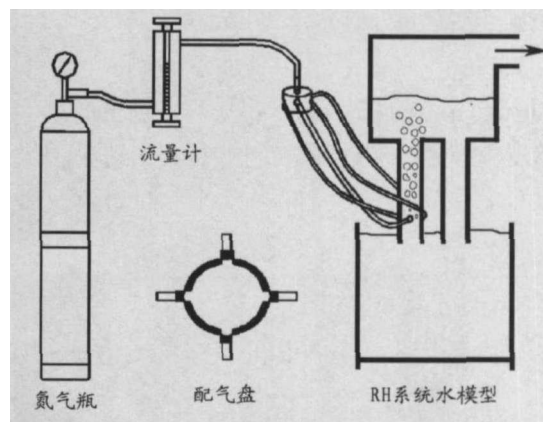


图 1 水模型系统图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

#### 2.2 实验方法

流动状态的观察是流体实验研究的一个重要方法. 流动可视化的任务是把透明的流体, 如水和空气中的流动现象用图像显示出来, 以供定性分析用, 并力图做到根据流动图形作流场中某种物理量的定量分析. 实验过程中, 用墨水作为示踪剂注入真空室, 同时开始录制墨水在装置内的扩散过程. 采用录像的方法, 循环流动过

收稿日期: 2007-11-13, 修回日期: 2008-03-28

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(编号: 20052017)

作者简介: 齐凤升(1980-), 男, 辽宁省沈阳市人, 博士研究生, 化工冶金专业, E-mail: qifeng@smm.neu.edu.cn.

程完整, 并且可以截取各时间的混合扩散状态图像。

### 3 数学模型

#### 3.1 流体流动模型

模型中将气液两相流动视为变密度的单一液体的流动。气液两相区与纯液体区的密度差是 RH 系统循环流动的源动力。不计气泡和液体之间的作用力。熔融金属的流动主要由质量守恒、动量守恒和湍流模型方程控制。在直角坐标系下的通式分别表示为

连续方程

$$\nabla \cdot (\rho V) = 0. \quad (3)$$

动量方程

$$\rho(V \cdot \nabla)V = \mu_e \nabla^2 V - \nabla p + \rho g. \quad (4)$$

虽然流场中包含气液两相流动, 但由于气相对整个流场分布的影响非常小, 故仍采用标准的  $k-\epsilon^{[5,9,10]}$  湍流模型计算流体的粘度分布。

混合区域的气泡弥散可以通过求解含气率守恒方程获得。

$$(u + u_{slip}) \frac{\partial(\rho\alpha)}{\partial x} + (v + v_{slip}) \frac{\partial(\rho\alpha)}{\partial y} + (w + w_s) \frac{\partial(\rho\alpha)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_a} \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_a} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_a} \frac{\partial \alpha}{\partial x} \right), \quad (5)$$

其中,  $u_{slip}$  和  $v_{slip}$  分别为  $x$ ,  $y$  方向穿透速度,  $\sigma_a$  为湍流 Schmidt 数,  $w_s$  为最终速度,  $\mu_e$  为有效动力粘度。引入穿透速度概念并不改变含气率守恒方程的性质, 只改变值的分布。

#### 3.2 浓度迁移模型

钢液中某种溶剂浓度变化可以用下式描述:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho[X]) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u[X]) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v[X]) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w[X]) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial [X]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial [X]}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial [X]}{\partial z} \right), \quad (6) \end{aligned}$$

其中,  $\Gamma = \mu_e / Sc_i$  且  $Sc_i = 1$ ,  $[X]$  为某溶剂浓度, 本模型中为无量纲示踪剂浓度。

#### 3.3 边界条件

RH 装置流场边界条件参见文献[3, 4]。对于浓度迁移模型, 在固体壁面和自由表面均设梯度为 0。

#### 3.4 数值方法

采用有限体积法离散微分方程, 流场的求解采用 SIMPLEC 法, 应用空度技术<sup>[3]</sup>处理三维复杂几何装置的计算区域, 求解代数方程采用交替方向隐式迭代(ADI)与块修正技术<sup>[10]</sup>相结合的方法。程序全部用 Fortran 高级语言编写。

### 4 结果与分析

图 2 所示为采用修正的均相流模型模拟的 RH 真空精炼系统的循环流动情况。使用底吹模型计算的上升管内的  $z$  方向速度<sup>[2,5,6]</sup>分量接近概率分布, 最大值位于管中心, 近壁处速度值小; 使用修正均相流模型的模拟结果则相反, 呈 M 型分布,  $z$  方向速度分量最大值位于近管壁处, 管中心速度小。存在这一差异的原因是两个模型中上升管内气液两相的分布不同。

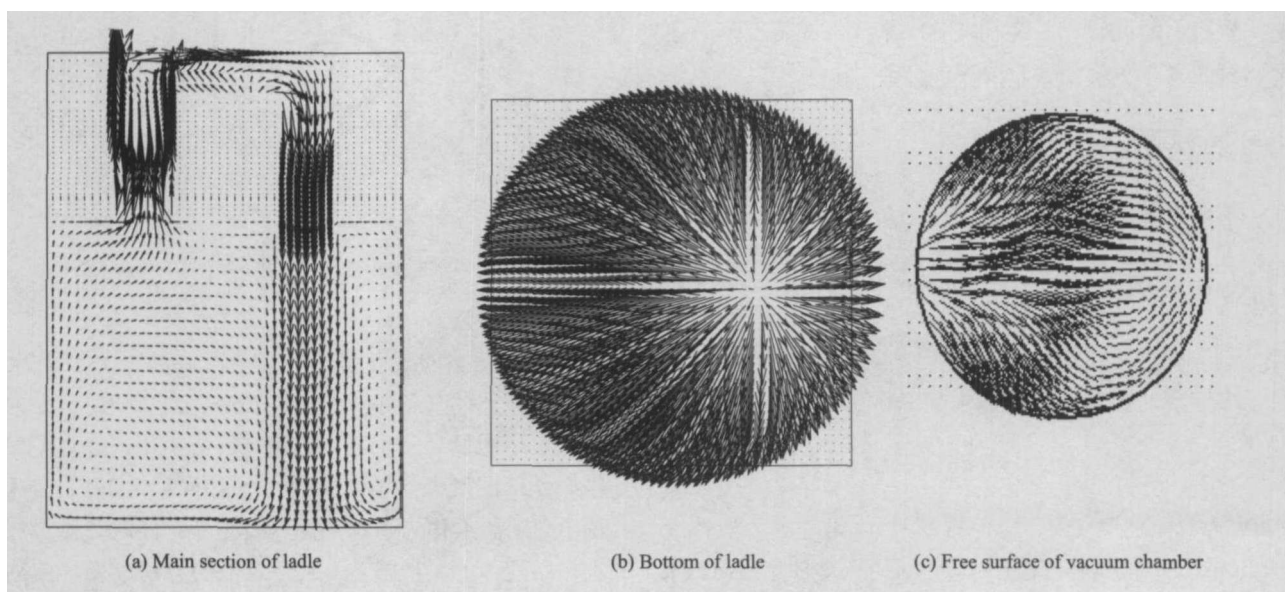


图 2 RH 系统各截面流场分布  
Fig.2 Flow fields in RH vacuum vessel

图 3 为水模型实验获得的不同时刻示踪剂浓度分布, 图 4 和 5 分别为通过数值模拟获得的 RH 装置主截面和钢包上表面示踪剂浓度随时间的变化情况。浓度扩散趋势与水模型实验结果符合的很好, 开始阶段浓度扩散很快, 而在上升管下部区域示踪剂浓度扩散较慢。最

后整个装置内示踪剂浓度趋于一致。这是由于示踪剂在流场内经下降管流入钢包, 需要一定的时间才能到达记录点处, 而随着时间的不断增加, 溶剂随流场不断运动逐渐弥散到整个流场区域。

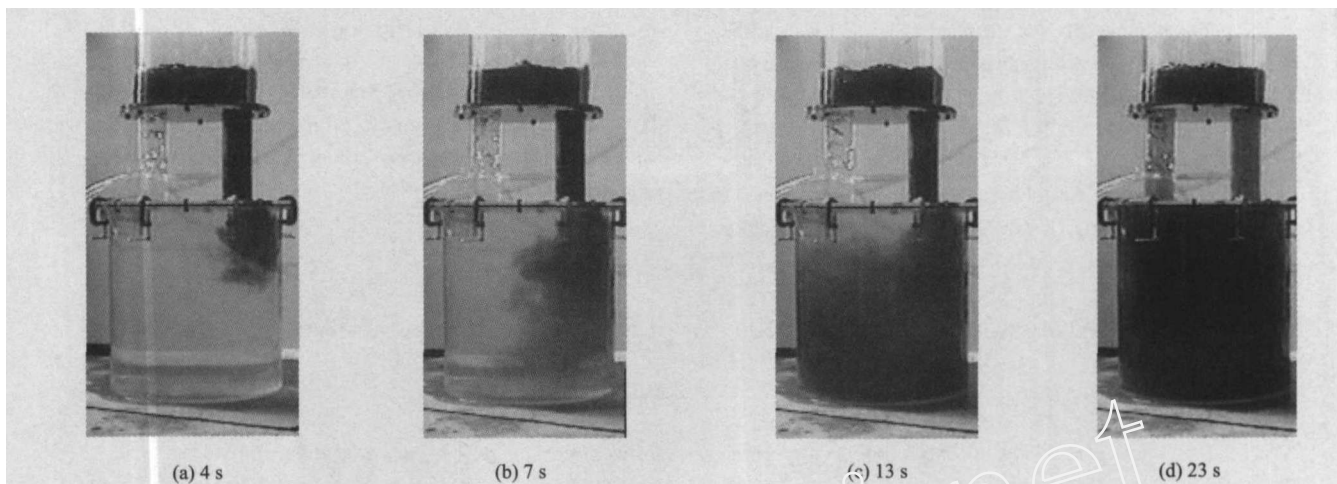


图 3 RH 装置水模型不同时刻示踪剂分布  
Fig.3 Distributions of colorant content in RH water model

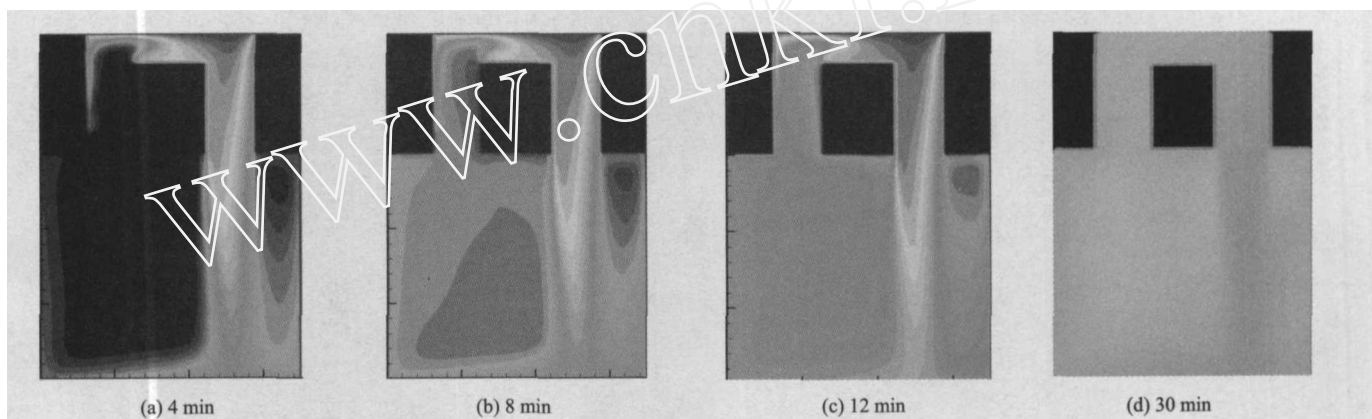


图 4 RH 系统主截面内不同时刻示踪剂浓度分布  
Fig.4 Distributions of colorant content at middle plane in RH system

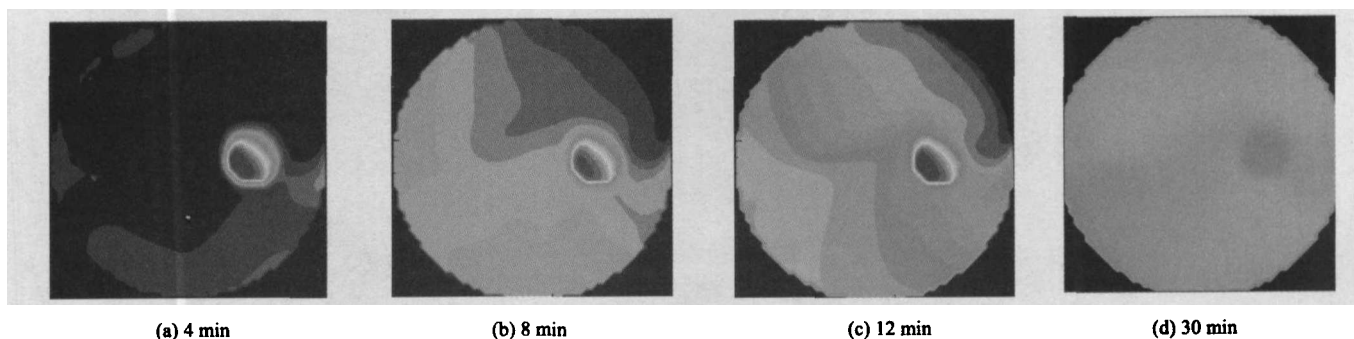


图 5 RH 系统钢包表面示踪剂浓度随时间分布  
Fig.5 Distributions of colorant content at top of ladle in RH system

## 5 结论

(1) 针对整个 RH 循环系统发展了 RH 真空脱气装

置内流动与混合过程数学模型, 并以真空室钢液表面示踪剂在设备内的混合过程为基准分析整个装置的混合行为。

(2) 计算的示踪剂浓度场与实验观察很接近, 开始阶段浓度扩散很快, 在上升管下部区域示踪剂浓度扩散较慢, 最后整个装置内示踪剂浓度趋于一致。

#### 参考文献:

- [1] 李宝宽, 赫冀成. 炼钢中的计算流体力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [2] Li B K, Tsukihashi F. Modeling of Circulating Flow in RH Degassing Vessel Water Model Designed for Two- and Multi-legs Operations [J]. ISIJ Int., 2000, 40(12): 1203-1209.
- [3] 樊世川, 李宝宽, 赫冀成. 多管循环真空脱气系统循环流动模型 [J]. 金属学报, 2001, 37(10): 1100-1106.
- [4] Domgin J F, Gardin P, Saint-Raymond H. Carbon Concentration in ULC Steels Numerically Tracked in Vacuum Processes [J]. Steel Res. Int., 2005, 76(1): 5-12.
- [5] 朱苗勇, 沙骏, 黄宗泽. RH 真空精炼装置内钢液流动行为的数值模拟 [J]. 金属学报, 2000, 36(11): 1175-1178.
- [6] 刘中兴, 陈义胜, 贺友多, 等. RH 真空精炼过程中钢液循环流动的数学模型 [J]. 包头钢铁学院学报, 2001, 20(1): 19-22.
- [7] 李宝宽, 霍慧芳, 栾叶君. RH 真空精炼系统气液两相循环流动的均相流模型 [J]. 金属学报, 2005, 45(1): 60-66.
- [8] 孔珑. 工程流体力学 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1992. 52.
- [9] Guthrie R I L. Fluid Flows in Metallurgy—Friend or Foe [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2004, 35(3): 417-437.
- [10] Huo H F, Li B K. Revised  $k-\epsilon$  Turbulent Model in Electromagnetic Flow Field in Continuous Casting of Melt [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 16(5): 395-400.

## Investigation on Mixing Behavior of RH Vacuum Degassing Vessel

QI Feng-sheng, LI Bao-kuan, CHEN Hai-geng

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

**Abstract:** The mixing behavior of RH vacuum degassing vessel was investigated by combination of numerical analysis and water model experiment. The present investigation focused on the whole RH equipment system, and flow field was calculated using a new mixture model. Mixing processes are analyzed based on the diffusion of tracer at upper surface of molten steel in vacuum chamber. Results showed that the tracer mixing was very fast at first stage, the mixing in below the up-leg was slow somewhat. The calculated tracer concentration distribution was in good agreement with the experimental observation.

**Key words:** RH vacuum refining; mixing behavior; molten steel flow