

130 t 单嘴精炼炉真空室内覆盖脱硫渣的钢液流场数值模拟

芮其宣 成国光

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要 用 Fluent 软件和 VOF 模型模拟了 130 t 单嘴精炼炉内覆盖脱硫渣时钢包底吹氩流量 (150 ~ 450 L/min) 和吹氩位置 (中心至 3/4 浸渍管半径) 对钢渣界面平均速度的影响。结果表明, 吹气位置为 1/2 浸渍管半径 (R) 处最合理, 钢渣界面平均速度随吹气流量的增加而增加, 当流量一定时吹气位置为 1/2 R 时界面平均速度最大; 吹气位置 $> 1/2R$ 时才会对界面上渣相体积分数变化有显著影响。

关键词 单嘴精炼炉 钢渣界面 流场 数值模拟

Numerical Simulation on Flow Field in Vacuum Chamber of 130 t Single Snorkel Furnace with Desulphurizing Top Slag

Rui Qixuan and Cheng Guoguang

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The effect of argon blowing rate (150 ~ 450 L/min) and argon blowing location at ladle bottom (ladle center to 3/4 radius of submerged snorkel) on average flow rate at metal-slag interface in 130 t single snorkel furnace with desulphurizing top slag is simulated by Fluent software and VOF model. Results show that the suitable blowing location is at 1/2 radius (R) of submerged snorkel, the average flow rate at metal-slag interface increases with increasing blowing rate, with definite blowing rate and blowing at 1/2 R the average flow rate at interface is maximum, and only as blowing location is $> 1/2R$, the effect of blowing location has obvious effect on variation of slag phase volume fraction at interface.

Material Index Single Snorkel Refining Furnace, Metal-Slag Interface, Flow Field, Numerical Simulation

国内多有采用 RH 投入法进行脱硫, 但是该方法脱硫率不理想^[1-2], 这些限制了高品质钢种的生产。单嘴精炼炉是一种新颖的真空钢水精炼装置^[3-5], 在工业试验中证明了具有良好的脱硫能力^[6-7]。钢渣混合提高了钢液和熔渣的接触面积从而提高了脱硫传质系数^[8], 因此钢渣混合对脱硫有着重要意义。本文使用了 Fluent 软件, 利用 VOF 模型模拟了单嘴精炼炉真空室内覆盖脱硫渣情况下的系统内流体流动的变化。

1 数学模型的建立

单嘴精炼炉 (图 1a) 工艺中将连接真空室的一个大型浸渍管浸入钢包钢水中, 并通过钢包底部的透气砖吹入氩气搅动钢水进行精炼操作, 根据需要可以在真空室内加入脱硫渣脱硫。

1.1 基本假设

数值模拟中有以下基本假设: (1) 气液两相均为粘性不可压缩牛顿流体, 两相流动为稳态; (2) 模拟为钢液已经被吸入插入管并保持高度时的情况, 插入管周围的渣层按 wall 处理; (3) 假定气泡为球形, 不考虑气泡在上升过程中的变形且忽略气泡之间的聚合和破裂行为; (4) 假定模拟的整个过程

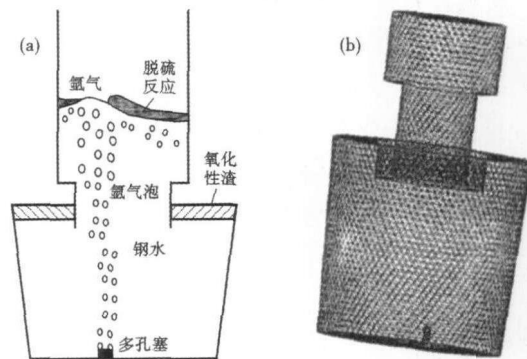


图 1 单嘴精炼炉简图 (a) 和模型网格图 (b)

Fig. 1 Schematics of single snorkel refining furnace (a) and model mesh pattern (b)

中气液两相流动为等温绝热过程。

1.2 基本方程

数学模型中考虑了液钢、氩气、精炼渣。它们的行为受到 N-S 方程及湍流方程和体积流模型 (VOF) 控制。

VOF 模型通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的体积分数来模拟 2 种或 3 种不能混合的流体。在每个控制容积内, 所有相的体积分数的和为 1。VOF 跟踪相之间的界面是通过求解

一相或多相的容积比率的连续方程来完成的。对第 q 相, 这个方程如下:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (1)$$

式中: α_q - q 相容积比率; ρ_q - q 相密度; \vec{v} - 速度。默认情形, 方程右端的源项为 0。其连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (2)$$

单一的动量方程在整个域的解和由此产生的速度场在相之间是共享的, 等式通过参数 ρ 和 μ 依赖于所有相的体积分, 在惯性(非加速)坐标系中的动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + F \quad (3)$$

式中: p - 静压; $(\rho \vec{g})$ 、 F - 重力体积力和外部体积力。湍流方程选用了标准 k - ϵ 方程。

边界条件为:(1)入口定义为速度入口, 速度根据所给气体流量和入口界面计算;(2)出口为自由表面定义为压力出口, 压力为冶炼时的真空压力;(3)墙为无滑移, 入口处氩气体积分数为 1;(4)入口出口均不直接给出 k 和 ϵ 值, 用当量直径确定。

1.3 模型的建立和求解程序

图 1(b)为模型的网格简图。模型在确立求解方案的基础上利用 CFD 软件 Fluent 进行计算。模型使用 Fluent 自带的前处理软件 Gambit 进行建模, 使用 Fluent 进行计算和进行后处理。具体步骤如下:(1)使用建模软件 Gambit 建立几何区域, 并进行网格划分;(2)使用 Fluent 软件读入网格文件, 并进

行边界条件、初始条件、多相模型、湍流模型等方面的设置;(3)离散化方程后进行迭代求解, 得到结果;(4)对求解结果进行后处理, 得到需要说明的各方面的切片图片;(5)对图片和数据进行分析总结。

1.4 计算方案及后处理方案

模型计算中的各个参数见表 1。计算方案为: 吹气位置(r)- 中心、 $1/4R$ 、 $1/2R$ 、 $3/4R$ (R - 浸渍管内半径), 吹氩气流量- 150、300、450 L/min。

表 1 单嘴精炼数值模拟参数值

Table 1 Parameters value for single snorkel refining numerical simulation

项目	数值
钢包直径/m	下口 2.69, 上口 2.924
钢包内液面高度/m	2.81
浸渍管插入深度/mm	500
耐火材料厚度/mm	350
钢水吨位/t	130
浸渍管内径/mm	1100
浸渍管内钢水高度/mm	1450
真空室压力/Pa	67
钢水密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7020
氩气密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.6228
渣密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3500
钢水粘度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	6×10^{-4}
渣粘度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.2664
渣厚度/m	0.1
氩气粘度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	2.125×10^{-5}

2 结果和讨论

2.1 不同吹气位置时流场分析

图 2(a)为中心位置的流场矢量图, 可以看出在中心位置吹气时, 下降流是顺着两侧浸渍管壁流回钢包内, 下降流的流速明显小于其他 3 种位置时的流场。图 2(c)所示 $r/R = 1/2$ 位置与其他相比, 上升流与下降流分布对称, 上升流股能够完全进入浸渍

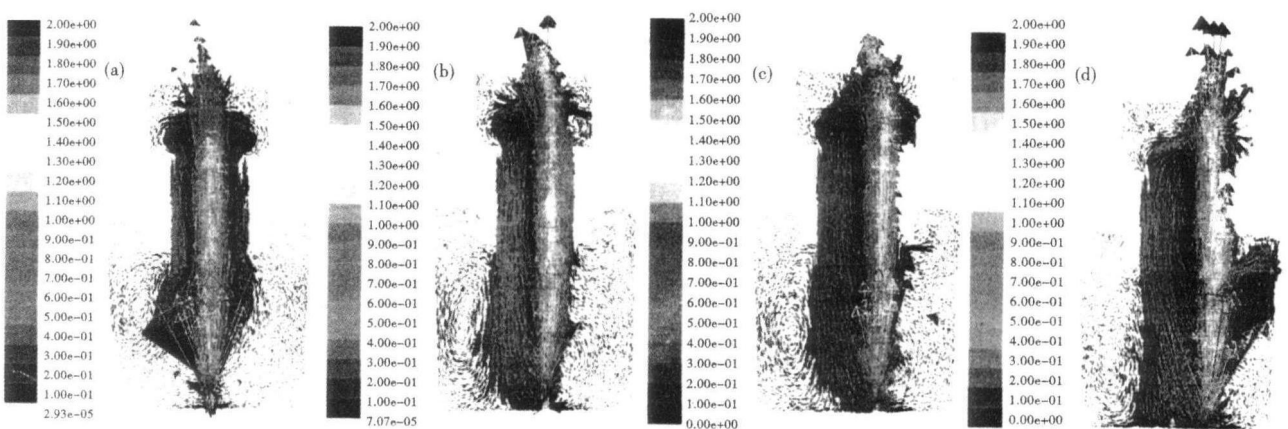


图 2 流场矢量图, 吹气流量- 300 L/min, 吹气位置- (a) 中心; (b) $1/4R$; (c) $1/2R$; (d) $3/4R$

Fig. 2 Vector diagram of flow field; blowing rate- 300 L/min, blowing location- (a) center; (b) $1/4R$; (c) $1/2R$; (d) $3/4R$

管内。与之相比图 2(b) 所示 $r/R = 1/4$ 位置的流场下降流受到上升流的排挤;图 2(d) 所示位置的流场中,上升流股不能完全进入浸渍管内而使得部分流体碰撞到浸渍管面后上升到钢包表面。综上所述,单嘴精炼炉内吹气位置偏离中心位置可以在整个炉内系统形成一个包含上升流和下降流的流体循环。这个流体循环在吹气位置为 $r/R = 1/2$ 位置时上升流和下降流最为均衡,偏心距离过少会抑制下降流而偏心距离过大会使得上升流不能完全进入浸渍管,这样就会造成上升动能的损失和影响浸渍管耐火材料寿命。

图 3(a,b) 分别是吹气位置 $r/R = 1/2$ 处流量为 150、450 L/min 时的流场矢量图。可以看出图 2 中的各个流场形状相似,区别主要是不同流量下主要流体部分的流速不同。

2.2 钢渣界面速度分析

图 4 给出了 4 个吹气位置在流量 300 L/min 时钢渣界面处的速度分布云图。从图 4 中可以看出, $r/R = 1/2$ 位置时,钢渣界面速度明显比其他吹气位置要大。模型中不同位置、流量下的面平均速度计

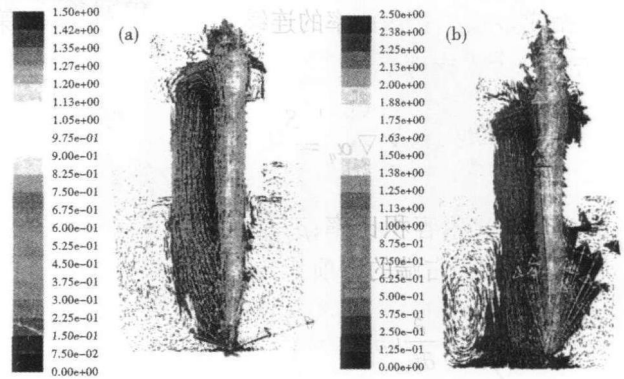


图 3 流场矢量图,吹气位置- $1/2R$,吹气速率- (a)150 L/min; (b)450 L/min

Fig.3 Vector diagram of flow field; blowing location- $1/2R$, blowing rate- (a) 150 L/min; (b) 450 L/min

算后给出如图 5。

图 5(a,b) 分别给出了不同流量下 $z = 4.28$ m 面(钢渣界面)上平均速度与吹气位置的关系以及不同位置时 $z = 4.28$ m 面上平均速度与吹氩流量关系。其中 z 为钢水高度。

由图 5(a) 可以看出,在低入口速度时,随着吹气位置的偏移, $z = 4.28$ m 面平均速度呈逐步上升

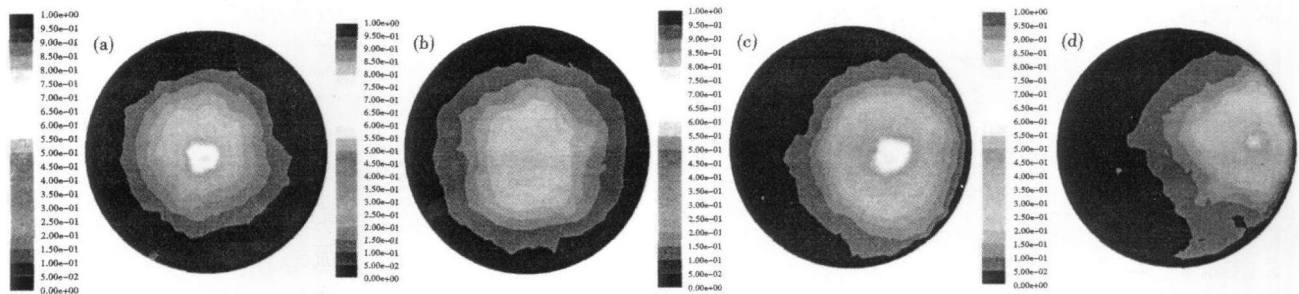


图 4 钢渣界面流速云图,吹气速率 300 L/min,吹气位置(a)中心;(b)1/4R;(c)1/2R;(d)3/4R

Fig.4 Flow rate cloud diagram at metal-slag interface, blowing rate 300 L/min, blowing location (a) center; (b) $1/4R$; (c) $1/2R$; $3/4R$ (d)

趋势,而且从中心偏移一点位置就能显著提高 $z = 4.28$ m 面平均速度。当入口速度提高后,可以看出在 $r/R = 1/2$ 处达到最大值,这与水模型实验结果一致。从图 5(b) 上可以看出在低的吹气流量时, $z = 4.28$ m 面上的平均速度随吹氩流量而上升。

2.3 钢渣界面钢渣混合的分析

图 6 给出了流量 300 L/min 时,4 种吹气位置时钢渣界面 ($z = 4.28$ m) 上的渣相体积分数的分布图。钢渣界面的渣相体积分数

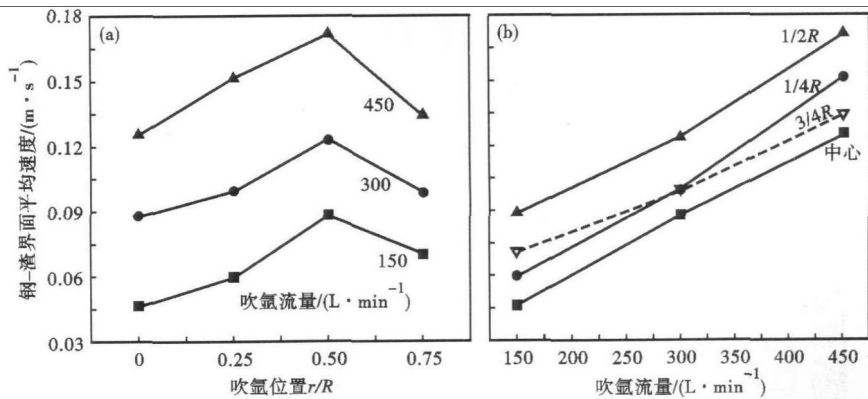


图 5 不同吹气速率下吹气位置(a)和不同吹气位置下吹气速率(b)对钢渣界面液流平均速度的影响

Fig.5 Effect of blowing location with different blowing rate (a) and blowing rate with different blowing location (b) on average flow rate at metal-slag interface

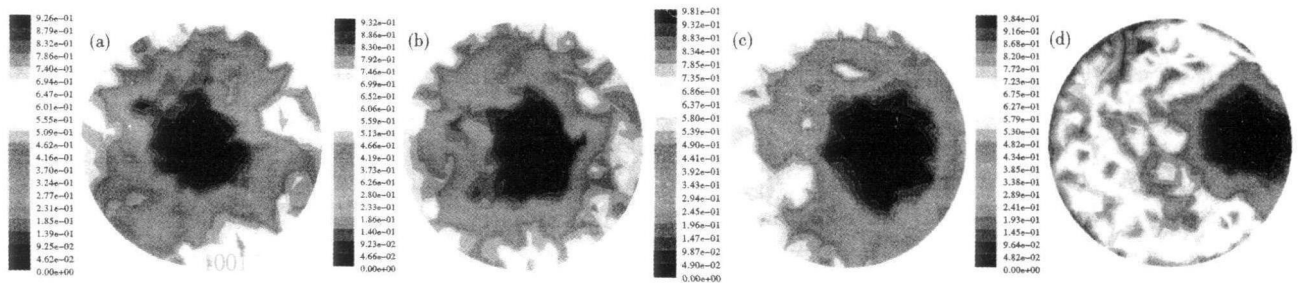


图 6 钢-渣界面($z=4.28\text{ m}$)上渣相体积分数分布图,吹气速率 300 L/min ,吹气位置- (a)中心;(b) $1/4R$;(c) $1/2R$;(d) $3/4R$
Fig. 6 Distribution figure of slag phase volume fraction at metal-slag interface ($z=4.28\text{ m}$), blowing rate 300 L/min , blowing location- (a) center; (b) $1/4R$; (c) $1/2R$; (d) $3/4R$

初始为 1,当钢水流动后导致界面上渣相体积分数下降,渣相体积分数越低表明界面上紊流越大,结合观察渣相体积分数分布图可以了解界面上钢渣混合情况。

图 7(a, b)分别为不同流量下钢渣界面的渣相体积分数与吹气位置关系以及不同吹气位置时钢渣界面的渣相体积分数与吹气流量关系图。

图 7(a)可以看出在流量相同时各个吹气位置时钢渣界面上的渣相体积分数相差不大,表明此时钢渣混匀情况相差不大。只有在 $r/R=3/4$ 时,钢渣混匀情况较差,这应该是图 2(d)显示的部分气体外溢且上升流过于靠近浸渍管内壁有关。图 7(b)显示了在相同吹气位置下随流量上升,钢渣界面混匀进一步加剧,界面上渣的体积分数下降。因此可以看出,流量是钢渣界面渣相体积分数变化的主要因素,吹气位置只有在 r/R 比较大时才会对钢渣界面渣相体积分数变化产生较大影响。

3 结论

(1)覆盖渣下,单嘴精炼炉流场在吹气位置 $r/R=1/2$ 处上升流和下降流为均衡流场最为合理。

(2)加入渣后随着 r/R 的增加,钢渣界面上的平均速度增加并在 $r/R=1/2$ 达到最大;而钢渣界面上的平均速度随吹气流量的增加而增加。

(3)在流量相同时, r/R 的变化对钢渣界面上渣相体积分数影响不明显,但是 $r/R>1/2$ 后 r/R 增加钢渣界面上渣相体积分数也是增加的;而流量的增加会降低钢渣界面上的渣相体积分数。其中流量是钢

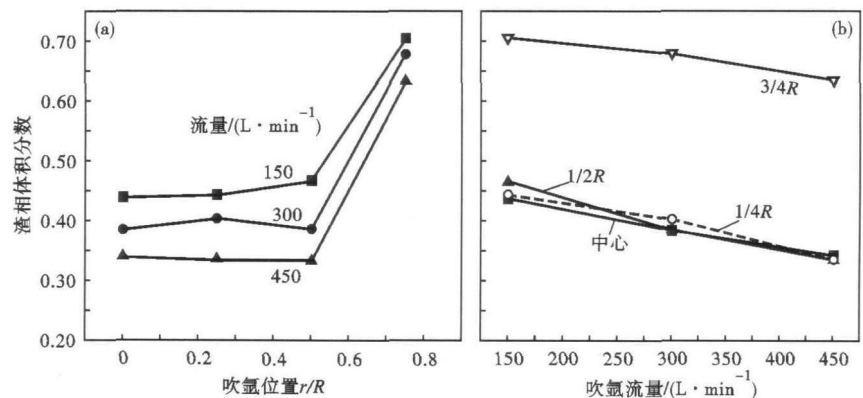


图 7 不同流量吹气位置(a)和不同吹气位置吹气流量(b)对钢-渣界面渣相体积分数的影响

Fig. 7 Effect of blowing location with different blowing rate (a) and blowing rate with different blowing location (b) on slag phase volume fraction at metal-slag interface

渣界面渣相体积分数变化的主要因素。

参考文献

- [1] 艾立群,蔡开科. RH 处理过程钢液脱硫[J]. 炼钢,2001,17(3): 53-57.
- [2] 于学斌,时启龙,陈清泉,等. RH 用新型脱硫剂的开发[J]. 炼钢,2006,22(4):51-54.
- [3] 赵均良,张 鉴,杨念祖,等. 单嘴精炼炉吹氧精炼的水模型研究[J]. 特殊钢,1994,15(2):22-25.
- [4] 秦 哲,朱梅婷,成国光,等. 单嘴精炼炉合金料加入方式及混匀特性水模型研究[J]. 特殊钢,2010,31(2):5-7.
- [5] 秦 哲,朱梅婷,成国光,等. 单嘴精炼炉真空处理过程气泡行为及冶金效果研究[J]. 特殊钢,2010,31(5):18-21.
- [6] 段建平,张永亮,杨学民,等. 80t 多功能单嘴真空精炼炉脱硫冶金特性[J]. 炼钢,2011,17(6):44-48.
- [7] 段建平,张永亮,杨学民,等. 80t 单嘴真空精炼炉冶金功能的生产实验分析[J]. 特殊钢,2012,33(1):26-29.
- [8] Mietz J, Schneider S, Oeters F. Emulsification and Transfer in Ladle Metallurgy[J]. Steel Research, 1991, 62(1):10-15.

芮其宣(1975-),男,博士研究生,1997 年华东冶金学院(安徽工业大学)毕业,钢液二次精炼研究。

收稿日期:2012-07-15