

氩气流量对 100 t 底吹钢包内渣眼形成影响的数值模拟

朱玲莉¹ 高标¹ 向杰¹ 孙冬婷¹ 陶欢¹ 张艳丽¹ 韩芳²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 中船重工武汉重工铸锻有限公司, 武汉 340022)

摘要 通过建立的氩气底吹钢包三维非稳态三相流动数学模型以及 Fluent 软件和 Simple 算法研究了钢包精炼底吹氩过程保护渣的流动特性, 并分析了喷嘴直径 0.1 m 时 200 ~ 3 500 L/min 喷气量对渣眼尺寸、渣层运行的影响。结果表明, 随喷气量增大渣眼增大, 当氩气流量为 400 ~ 2 000 L/min 时渣眼大小和钢包内流场分布较合理, 有利于精炼; 随渣层厚度增加, 渣眼减小, 但渣厚超过 200 mm 时, 渣层厚度的增加对渣眼大小影响不显著。

关键词 100 t 底吹钢包 氩气流量 渣眼大小 保护渣流动特性 数值模拟

Numerical Simulation on Effect of Argon Flow Rate on Slag Eye Formation in a 100 t Bottom Blown Ladle

Zhu Lingli¹, Gao Biao¹, Xiang Jie¹, Sun Dongting¹, Tao Huan¹, Zhang Yanli¹ and Han Fang²

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2 Wuhan Heavy Industry Casting and Forging Co Ltd, Zhongchuan Heavy Industry, Wuhan 340022)

Abstract With established argon bottom blown ladle three dimensional non-stable three-phase flow math model, Fluent software and Simple calculation method the shield slag flow characteristics during ladle refining process in bottom argon blown are studied and the effect of gas flow rate 200 ~ 3 500 L/min of nozzle with diameter 0.1 m on slag eye size and slag layer flow behavior is analyzed. Results show that with increasing gas flow rate the slag eye enlarges and as argon flow rate is 400 ~ 2 000 L/min the slag eye size and distribution of flow field in ladle are reasonable and available to refine; with increasing thickness of slag layer the slag eye range decreases but as the thickness of slag layer is more than 200 mm, the effect of thickness of slag layer on slag eye size is not obvious.

Material Index 100 t Bottom Blown Ladle, Argon Flow Rate, Slag Eye Size, Flow Characteristics of Shield Slag, Numerical Simulation

钢包精炼炉具有加热和渣精炼功能, 投资较少, 冶炼钢种广泛, 成本较低, 所以发展迅速^[1]。吹氩搅拌是钢包炉重要的精炼手段之一, 底部吹氩可以均匀钢液的成分和温度, 促进钢液中夹杂物去除^[2]。但是吹入包底的氩气流量会影响渣眼的大小和钢液流动。

数值模拟技术是一种易于操作, 速度快, 结果相对精确、稳定的好方法^[3]。对 LF 钢包卷渣数值模拟研究也取得了很大的进展。不论是均相流体模型还是两相流体模型, 目前都难以考虑钢包内钢液上部渣层的影响^[4-8]。目前大量研究主要是考虑钢包底部吹氩对钢包内钢液的流场以及温度场的影响, 对渣眼大小影响因素的研究甚少。渣眼大小的控制有利于合金化操作过程中金属的投放, 并且可以避免钢液过多与空气接触而氧化, 导致了钢水收得率

减少^[9]。因而, 系统化地研究吹氩过程中渣眼大小的影响因素, 对于实际生产具有重要的参考和指导意义。

本文建立氩气底吹钢包三维非稳态三相流动数学模型, 对钢包精炼底吹氩过程中保护渣的流动特性进行研究, 并分析了不同喷气量对渣眼尺寸、渣层运动行为的影响。

1 数学模型

基本假设: (1) 流动为不可压缩的粘性流体, 密度为常数^[10]; (2) 钢包吹氩过程中, 气泡浮力是驱使钢液循环流动的主动动力, 忽略气泡惯性力作用; (3) 气泡为大小均匀, 具有同一直径 d 的球体。

基本方程: 钢包吹气搅拌过程是一个气液两相流动过程, 基于两相流流体模型描述底吹钢包内气液两相间的质量、动量的交换。假定在同一个计算

网格内气液两相同时存在,每相都是连续场,并且相互贯穿、相互作用。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i \quad (2)$$

湍流动能 k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍流动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \frac{C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: ρ - 流体密度; p - 压力; μ_{eff} - 有效黏度; F_i - 体积力,在钢包中吹气状态下, $F_i = \alpha \rho_i g_i$,其中: α - 气液两相区的气相分率; ε - 湍流动能耗散率; $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ - 经验常数; u - 速度; k - 湍流动能; $G_k = \mu_1 \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

$\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$,其中: $\mu_{\text{eff}} = \mu_1 + \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; C_μ - 经验常数。

基本条件:

(1)初始条件。初始状态下,钢包内充满钢液,钢液上面覆盖一层浮渣,渣层上表面到钢包出口部分充满氩气,如图1(a)所示。

(2)边界条件。在钢包包底吹氩过程中,数值模拟最基本的边界条件设置包括吹氩入口、钢包上表面、壁面、对称面。

①吹氩入口:氩气入口设置为速度入口,氩气以给定速度喷吹到钢包中;②钢包上表面:直接与大气接触,出口表压为0;③固体壁面:在固体壁面上,对速度、压力和浓度可使用无滑移边界条件(即设为0)或滑移边界条件,对 k 和 ε 设为0;④对称面:在对称面上,垂直于对称面的速度分量或动量设为0,其他各变量的梯度几何模型。

研究的钢包底部直径2.6 m,锥度8°,高度3.24 m,装钢深度2.65 m,氩气喷嘴直径0.1 m,底部中心单孔喷吹,各参数如表1所示。

表1 模型参数

Table 1 Parameters of model

底部直径/m	高度/m	钢液深度/m	喷嘴直径/m	钢液密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	渣密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢渣表面张力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
2.6	3.24	2.65	0.1	7 800	3 500	52.7×10^{-3}

模型求解方法:采用商业软件 FLUENT 求解,计算区域分为约50 000个有限体积单元,计算网格如图1(b)所示,为了更好地获取渣眼的信息,对渣层附近的网格进行了加密。由于几何模型的对称性,本研究只考虑了1/4的区域。采用 Simple 算法计算非稳态的三相流动问题,收敛条件为:变量残差小于 10^{-4} ,总的计算时间为60 s,初始速度设为0,时间步长为 10^{-3} s。

2 计算结果与分析

2.1 不同气量下钢液表面的波动

图2(a₁, b₁, c₁, d₁, e₁, f₁)为不同氩气流量下钢包中心截面上的速度矢量图,从图2(a₁, b₁, c₁, d₁, e₁, f₁)中可以看出,流场基本特征:气体由底部的喷嘴喷出,在钢包中产生气泡,气泡受到液体浮力而上浮。气泡在上浮过程中带动液体流动,使处于喷嘴正上方的液体形成强烈的向上流股,当气液两相区形成的上升流达到熔池液面后,到达液面的钢水将被驱动流向四周,然后再向下流动,最后又被中心上升流抽引,从而形成一种循环流动。

当气量(Q_g)小于400 L/min时,钢包内流场较弱,环流主要在靠近渣层的地方;随着气量增大(500~2 000 L/min),钢包内流动加强,包内钢液开始出现明显环流,下部钢液流动加强,同时,靠近包壁流动也逐渐加强,钢液对包壁的冲刷也更加严重;当气量再增大(>2 000 L/min),钢液内流场相似,

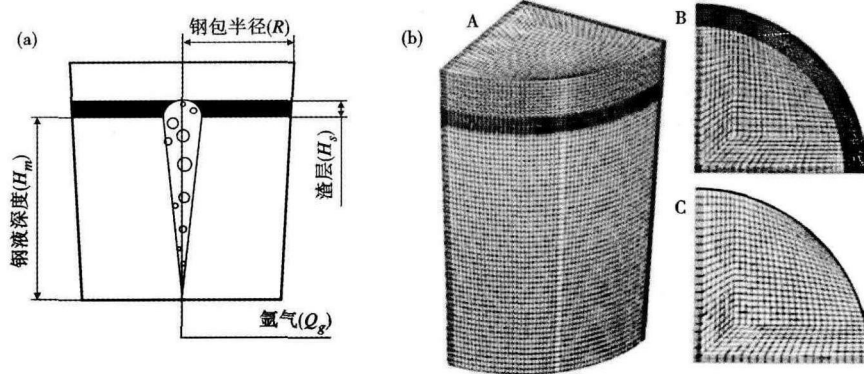


图1 (a)钢包底部吹氩图;(b)三维计算网格

Fig. 1 (a) Schematics of ladle bottom argon blowing; (b) Three dimensional meshes for calculation

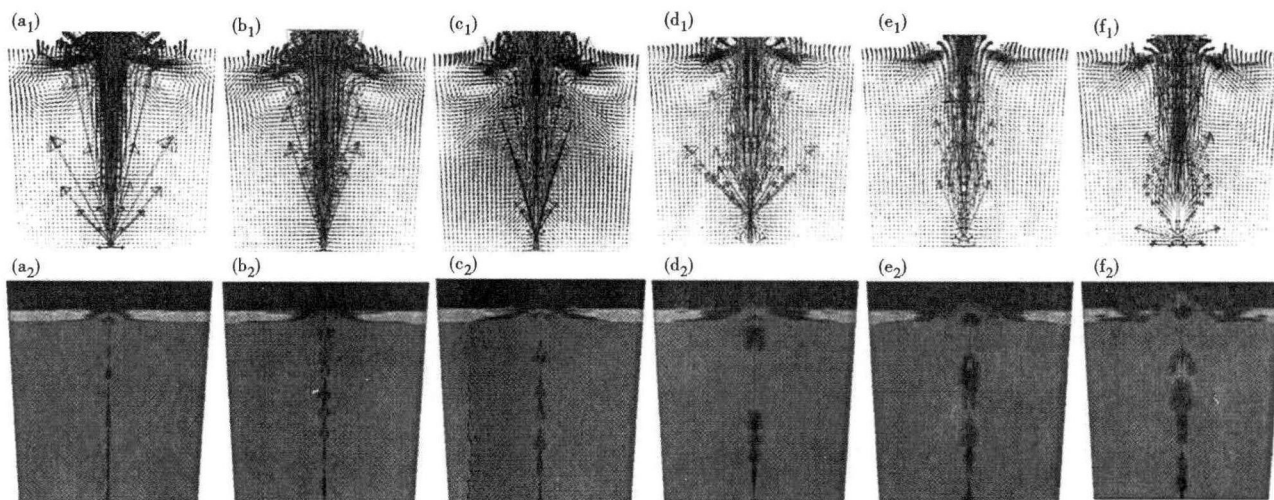


图 2 (a₁ ~ f₁) 纵截面上的速度矢量和 (a₂ ~ f₂) 钢的体积分数等值线云图, 氩气流量/(L · min⁻¹): (a₁) (a₂) 200; (b₁) (b₂) 400; (c₁) (c₂) 500; (d₁) (d₂) 1 420; (e₁) (e₂) 2 000; (f₁) (f₂) 3 500

Fig. 2 Velocity vector (a₁ ~ f₁) and cloud diagram of equivalent volume fraction of liquid (a₂ ~ f₂), longitudinal section, argon flow rate/(L · min⁻¹): (a₁) (a₂) 200; (b₁) (b₂) 400; (c₁) (c₂) 500; (d₁) (d₂) 1 420; (e₁) (e₂) 2 000; (f₁) (f₂) 3 500

但是钢包中上部的包壁受到的冲刷加剧。钢-渣界面处的流速也较大, 这将导致卷渣, 不利于精炼工艺。

图 2(a₂, b₂, c₂, d₂, e₂, f₂) 显示了不同氩气流量下钢包中心截面上钢液体积分数等值线云图, 随着氩气流量增大, 气泡在上升过程中逐渐聚合成较大气泡, 也会有较大气泡破碎成较小的气泡。氩气上升的过程中始终伴随着气泡的破碎与聚合。气泡到达渣-钢界面后, 由于气泡(气柱)周围钢液流速较大, 冲破原来完整的界面, 带动液面波动起来。气量越大, 激起的钢液液面越高。

2.2 不同氩气流量以及渣层厚度条件下的渣层状态

数值模拟得到的不同氩气流量(图 3a)以及不同渣层厚度下(图 3b)的渣眼。从图 3 可以看出, 渣

眼随氩气流量的增大而增大, 随渣厚的增加而减小。但是当渣厚(H_l) ≥ 200 mm 以后, 渣厚的增加对减小渣眼大小影响不是很显著。

2.3 渣眼面积随时间的变化

图 4 显示了计算过程中记录到的不同氩气流量下渣眼面积-时间变化曲线。从图 4 中可以看到, 渣眼面积随氩气流量增大而增大, 渣眼大小的变化波动也越来越明显。这也说明, 随氩气流量逐渐增大, 液面波动加剧。尤其在大的氩气流量下, 渣眼面积的变化很大, 钢包内钢液运动剧烈, 液面波动很大。

3 渣眼面积与渣厚、钢液深度以及氩气流量的定量关系

Yonezawa 和 Schwerdtfeger^[11]曾系统的提出过:

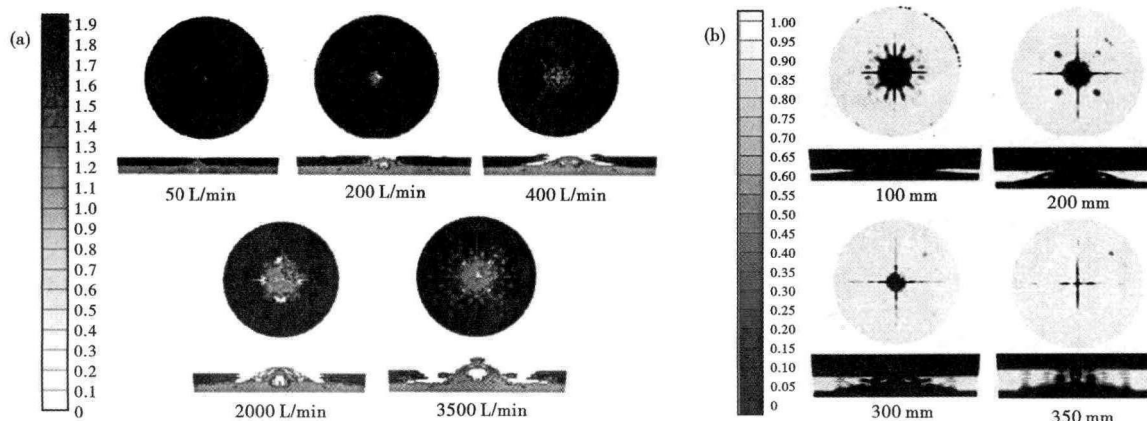


图 3 (a) 渣厚 150 mm, 氩气流量对渣眼的影响; (b) 氩气流量 500 L/min, 渣层厚度对渣眼的影响

Fig. 3 (a) Effect of argon flow rate on slag eye, thickness of slag layer- 150 mm; (b) Effect of thickness of slag layer on slag eye, argon flow rate- 500 L/min

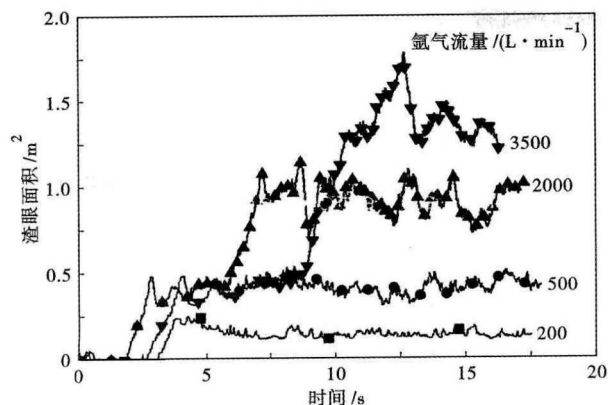


图4 氩气流量对钢包渣眼面积的影响

Fig.4 Effect of argon flow rate on slag eye area of ladle

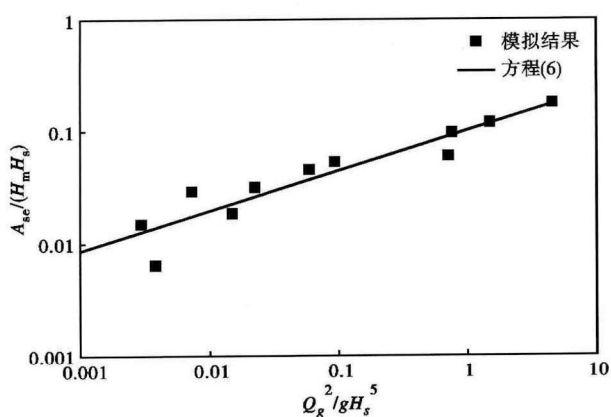


图5 数值模拟结果和方程(6)计算结果对比

Fig.5 Comparison between numerical simulation results and equation (6) calculation results

参考文献

- [1] 赵秀清. LF 精炼法的发展[J]. 大型铸锻件, 1996, 73(3): 42-43.
- [2] 王立涛, 薛正良, 张乔英. 钢包炉吹氩及夹杂物去除[J]. 钢铁研究学报, 2005, 17(3): 35-38.
- [3] 于新刚, 王红卫. 迭加法和数值模拟结合分析弹性薄板的优点[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(2): 40-44.
- [4] 郭长庆. 带有顶渣的 LF 钢包炉熔池流动的数学物理模拟研究[J]. 包头学院学报, 1995, 14(3): 27-33.
- [5] 成国光, 张 鉴. 钢包底吹氩搅拌卷渣机理的水模型研究[J]. 钢铁研究学报, 1994, 2(2): 27-33.
- [6] Lage J, Par J. Modeling of Fluid Flow Conditions around the Slag Metal Interface in a Gas-stirred Ladle[J]. ISIJ International, 1996, 36(9): 1127-1134.
- [7] 曲 英, 扬 健, 徐保美. 熔渣下金属熔池流动现象数学模拟[J]. 金属学报, 1990, 26(3): 157-163.
- [8] Iguchi M, Miyamoto M, Yamashita S. Spout Eye Area in Ladle Refining Process[J]. ISIJ International, 2004, 44(3): 636-638.
- [9] 姜钧普, 王福明, 王新华, 等. 洁净钢-洁净钢生产工艺技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006, 42-43.
- [10] 朱苗勇, 井本键夫, 萧泽强. 多孔喷吹钢包内流动和混合过程的数学物理模拟[J]. 金属学报, 1995, 31(10): 435-439.
- [11] Yonezawa K, Schwerdtfeger K. Spout Eyes Formed by an Emerging Gas Plume at the Surface of a Slag-covered Metal Melt[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1999, 30(3): 411-418.

$$\frac{A_{se}}{H_m H_s} = f \left(\frac{Q_g^2}{g H_s^5} \right) \quad (5)$$

式中: A_{se} - 渣眼面积; H_m - 钢液深度; H_s - 渣层厚度; Q_g - 气量; g - 重力加速度。

此经验式表明, 渣眼面积是氩气喷吹量、钢液深度以及渣层厚度的函数, 并且给出了各量的幂次关系。本文所采用的数值模拟的方法测得的结果进行相应整理, 在双对数坐标图上, 模拟结果如图 5。

如图 5 所示, 利用数据分析工具对模拟结果进行拟合, 得到拟合方程:

$$\frac{A_{se}}{H_m H_s} = 0.102 \cdot 0 \left[\frac{Q_g^2}{(g H_s^5)} \right]^{0.36} \quad (6)$$

本文 100 t 底吹钢包的数值模拟与 Yonezawa 和 Schwerdtfeger^[11] 的水模型测量结果吻合度非常高。

4 结论

(1) 当氩气流量在 400 ~ 2 000 L/min 时, 钢水表面渣眼大小比较合理。渣眼随氩气流量的增大而增大, 随着渣厚的增加而减小。但是当渣厚 ≥ 200 mm 以后, 渣厚的增加对减小渣眼大小影响不显著。

(2) 渣眼面积、渣厚、钢液深度及氩气流量之间关系的拟合方程为:

$$\frac{A_{se}}{H_m H_s} = 0.102 \cdot 0 \left[\frac{Q_g^2}{(g H_s^5)} \right]^{0.36}$$

朱玲莉 (1994-), 女, 硕士研究生 (武汉大学), 2013 年武汉大学 (本科) 毕业, 冶金过程数学模拟。

收稿日期: 2014-06-13