

100 t 底吹氩钢包插入浸渍管对钢液流场影响的数值模拟

吴超 沈明钢 张德慧 周晓东
(辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051)

摘要 以100 t单孔底吹氩钢包为原型,应用三维连续性方程、动量 $N-S$ 方程及湍流 $\kappa-\varepsilon$ 双方程模拟了底吹氩过程中钢包内的钢液流动状态。利用 Mixture 多相流模型对单孔吹氩(0 ~ 700 L/min)过程进行数值模拟,对比分析插入直径 691.05 mm,深 650 mm 浸渍管前后钢包内的流动状态和钢液表面的卷渣。结果表明,无浸渍管时,临界卷渣吹气量为 102 L/min,插入浸渍管后,临界卷渣吹气量增大到 217 L/min。插入浸渍圆筒可以在增加吹氩量的条件下提高钢液搅拌效果,加速钢液混匀。

关键词 100 t 钢包 底吹氩 浸渍管 卷渣

Numerical Simulation of Effect of 100 t Bottom-Blowing Argon Ladle with Immersed Cylinder on Liquid Flow Field

Wu Chao, Shen Minggang, Zhang Dehui and Zhou Xiaodong
(School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract According to the prototype of 100 t ladle with single nozzle bottom-blowing argon, the flow status of liquid in ladle during argon blowing process is simulated by using three dimensional continuity equation, momentum $N-S$ equation and turbulence $\kappa-\varepsilon$ double equations. The numerical simulation on single nozzle argon blowing (0 ~ 700 L/min) process has been carried out by sing Mixture multiphase flow model and the liquid flow status and the phenomenon of slag entrapment at liquid surface in ladle before and after immersing cylinder with diameter 691.05 mm and immersing depth 650 mm are compared and analyzed. Results show that without immersed cylinder the critical slag entrapment argon blowing rate is 102 L/min, while with immersed cylinder the critical slag entrapment argon blowing rate increases to 217 L/min, immersed cylinder may increase liquid stirring effect with increasing argon blowing rate to accelerate liquid mixing.

Material Index 100 t Ladle, Bottom-Blowing Argon, Immersed Cylinder, Slag Entrapment

钢包吹氩搅拌增强了渣-钢之间物质的传递^[1-3],加快渣-钢之间的反应,有利于非金属夹杂物的去除。氩气搅拌可以加快钢液中温度、成分的混匀。随着吹气量的增加,搅拌强度增大,但吹气量过大会引起卷渣^[4-6]。本文以 100 t 底吹氩钢包为原始模型,通过插入浸渍管抑制钢液卷渣,提高底吹临界卷渣气量,改善钢液搅拌效率。

1 数学模型建立

1.1 模型假设

对钢包底吹氩过程作以下假设:

- (1) 钢包底吹氩过程中,气泡浮力是驱使钢液循环流动的主动动力^[7];
- (2) 流体为不可压缩的粘性流体,密度为常数;
- (3) 钢包液面为光滑的自由面;
- (4) 气泡为大小均匀,具有同一直径的球体;
- (5) 气液两相区采用准单相模型,含气率采用蔡志鹏和魏

伟胜的关系式^[8]确定。

1.2 流场数学模型的建立

在正常精炼过程中,钢液流动为准稳态过程,应用稳态过程连续性方程、动量 Navier-Stokes 方程及湍流双方程模型^[9-10]来描述。

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

动量 $N-S$ 方程:

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

式中: ρ - 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); μ_i, μ_j - i 和 j 方向上的速度矢量/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); x_i, x_j - 一个计算元中 i 和 j 方向上的长度/m; P - 压强/Pa; μ_{eff} - 湍流有效粘性系数/[$\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^2)^{-1}$]; F_i - 体积力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)。

计算中采用湍动能 $\kappa-\varepsilon$ 模型,其满足公式:

通讯作者:沈明钢,教授,辽宁科技大学材料与冶金学院,邮编 114051
E-mail:lnassmg@163.com

$$\frac{\partial(\rho\kappa\mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho\varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon\mu_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} G_k + C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

式中： κ - 湍动能/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)； μ - 动力粘度系数/[$(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-2}$]； ε - 湍动能耗散率/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)。
 $G_k = -\rho \mu'_i \mu'_j \partial \mu_j / \partial x_i$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\rho \mu'_i \mu'_j$ 为雷诺应力。

1.3 几何模型

利用 GAMBIT 软件构建目标物理的三维模型及划分网格, 网格如图 1 所示。

1.4 求解策略

确定计算模型: 多相流模型选择 Mixture(混合)模型, 设 Phase-1(相-1)为 Steel(钢液)、Phase-2(相-2)为 Argon(氩气), 气泡直径为 10 mm。选择曳力为气液相的作用力, 湍流模型选择 Realizable 模型。设定初始条件: 初始化时选入口, 各场变量的初始值由入口条件自行得出。定义整个流场在初始时全为钢液。

求解设置为: ①压力 (Pressure): Standard; ②压力速度耦 (Pressure-velocity Coupling): SIMPLEC; ③动量 (Momentum): First Order Upwind; ④湍流动能 (Turbulence Kinetic Energy): First Order Upwind; ⑤湍流耗散速率 (Turbulence Dissipation Rate): First Order Upwind。

设定边界条件: 将模型底部喷孔设为速度入口边界, 自由液面定义为对称边界, 模型包壁和包底定义为静止的壁面边界, 近壁区域选择标准壁面函数^[11]。开始运算时松弛按因子先用默认值, 以后视残差收敛情况而定。设定初始条件: 选入口初始化, 用入口边界条件自动得出各场变量的初值计算, 并用 Patch 补丁命令定义整个流场在初始时全为钢液。

1.5 计算依据

采用钢厂 100 t 钢包原型数据, 模型采用单孔气体底吹, 喷口设置在距离钢包底部中心 520 mm 处, 从钢液面插入直径 691.05 mm、深 650 mm 浸渍管, 浸渍管与底部吹气孔同轴, 模拟中钢包参数见表 1, 材料属性如表 2 所示。

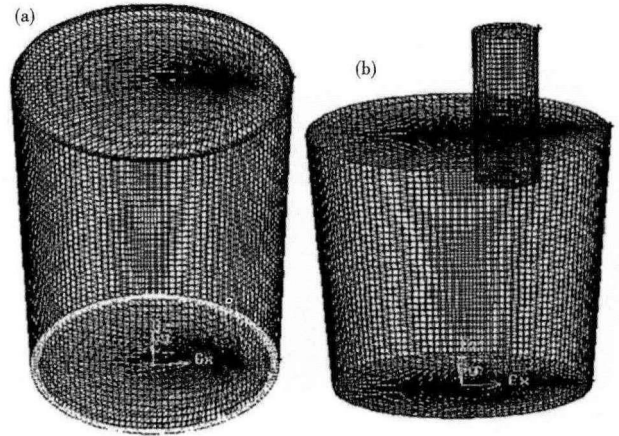


图 1 钢包模型的网格: 无浸渍管(a)和插入浸渍管(b)
 Fig. 1 Grid of ladle model: (a) without immersed cylinder; (b) with immersed cylinder

表 1 原型钢包的主要参数
 Table 1 Main parameters of prototype ladle

钢包上口直径/mm	钢包底部直径/mm	熔池深度/mm	气体流量/(L · min ⁻¹)
3 252	2 764.2	3 400	0 ~ 700

表 2 钢液和氩气的物理性能
 Table 2 Physical properties of liquid and argon

物理量	钢液	氩气
密度/(kg · m ⁻³)	7 000	1.622 8
CP/[J · (kg · K) ⁻¹]	750	520.64
导热系数/[W · (m · K) ⁻¹]	41	0.015 8
黏度/(Pa · s)	0.006	2.125 × 10 ⁻⁵
分子量/(kg · mol ⁻¹)	55.847	39.948
参考温度/K	1 600	25

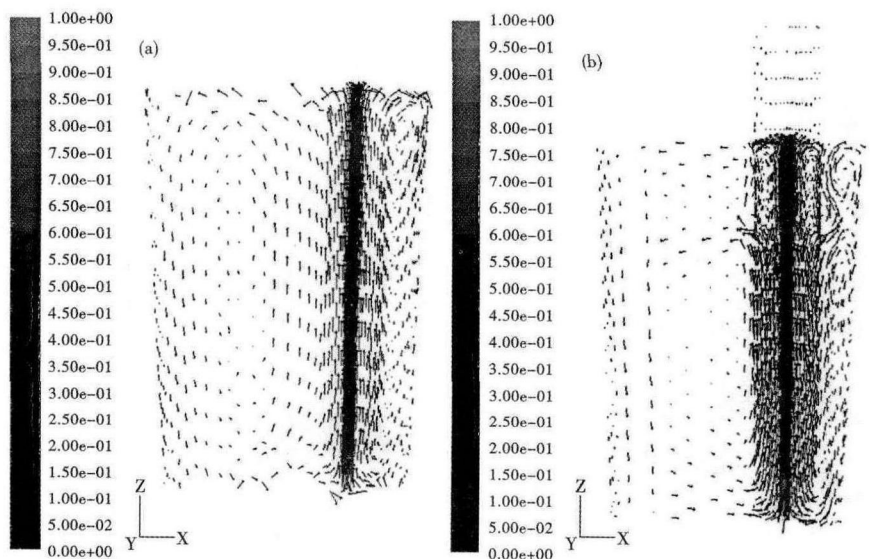


图 2 无浸渍管(a)和插入 650 mm 深浸渍管(b)钢包流场速度矢量图
 Fig. 2 Speed vector diagram of liquid flow field in ladle without immersed cylinder (a) and with immersed 650mm depth cylinder (b)

2 结果与分析

2.1 钢包内钢液流场

图2(a)为无浸渍管时的流场速度矢量图。未插入浸渍管底吹钢包中,偏心底吹氩气进入钢包,底吹气体带动钢液流动,在钢包中形成一个以两相区为轴线的三维循环流动体系。由于是单孔偏心底吹,所以喷嘴两侧钢液流动不对称,沿喷嘴距离包壁较远一侧形成了以气液两相区、钢液面、包壁、包底为轨迹的大循环流,沿喷嘴距离包壁较近一侧形成小循环流。当气液两相流到达钢液表面,气体和液体分开,气体进入大气,而流向液面的钢水在惯性力的驱动下,在钢液面形成一层水平流。水平流在流动过程中速度减弱,同时受到不断上流钢水的推动,最终在包壁附近向下流动。随着两相区不断地驱动钢水向上流动,在包内形成循环流动,随底吹气量增加,水平方向流速相应增加。从流场图中能够看出在循环中心和钢包底部存在很大区域的弱势区。

图2(b)为钢包内插入浸渍管的流场速度矢量图。由图2

(b)可以看出,气液到达液面后气液分离,部分钢液随着底吹气体的驱动进入浸渍管内,在浸渍管内流动效果剧烈,在惯性力的驱动作用下,在管内沿着管壁向下形成局部小循环流。一部分在浸渍管外钢包上部形成小循环流,同时在浸渍管下方形成一股较大的循环流,使管外钢包液面上水平方向流动减弱。插入浸渍管后,分散了液面上的水平流股,与无浸渍管相比,减弱了液面的水平流速使钢液表面稳定。

2.2 底吹不同直线上的XY速度散点图

未插入浸渍管时,从距离包底0.65 H(平行于x轴直线)的XY速度散点图(图3)可以看出,0.65 H高度处包心位置两个拐点速度接近于0,说明了循环钢液的环流中心在0.6~0.7 H。由204 L/min和407 L/min的拐点图(图3a和图3b)可以看出,随着吹氩量的增大,绝对速度有所增大,但是环流中心基

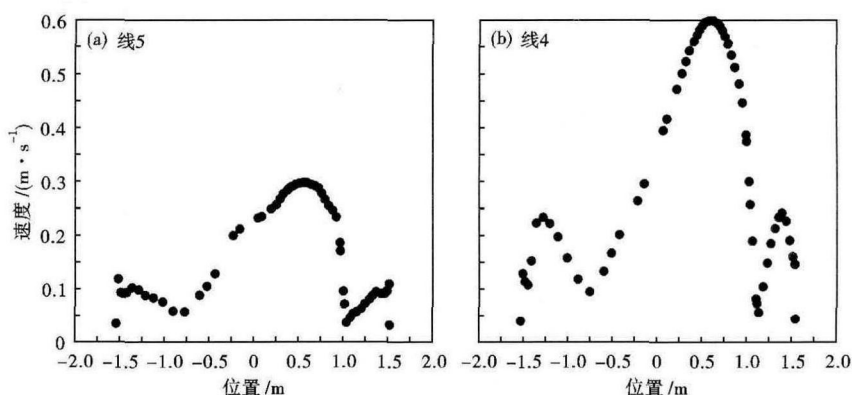


图3 无浸渍管时距离包底0.65 H的XY速度散点图,吹气量/(L·min⁻¹):(a) 204;(b)407,无浸渍管

Fig. 3 XY speed scatter plot at location distance from ladle bottom 0.65 H (ladle height): gas blowing rate/(L·min⁻¹)- (a) 204; (b) 407; without immersed cylinder in ladle

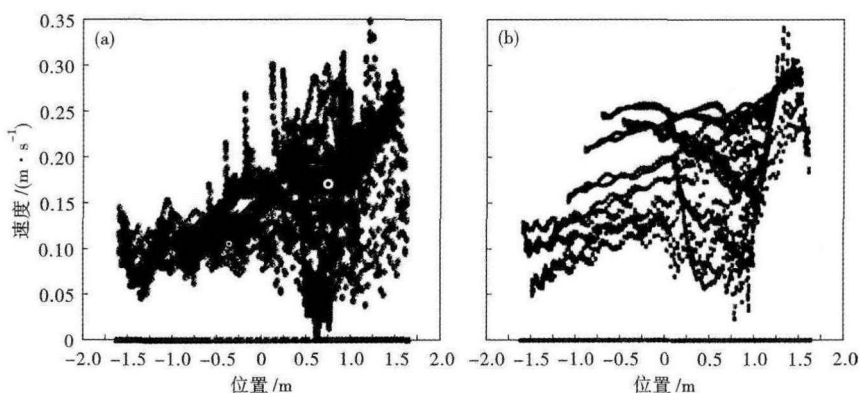


图4 钢液面XY速度散点图:(a)无浸渍管吹气量102 L/min;(b)插入浸渍管吹气量217 L/min

Fig. 4 XY speed scatter plot at liquid surface in ladle: (a) without immersed cylinder, gas blowing rate 102 L/min; (b) with immersed cylinder, gas blowing rate 217 L/min

本不变,吹氩上方是钢液流动很快的区域,因此,它是吹氩钢包内精炼反应的主要场所。本文研究是想通过插入浸渍管,改变钢包内的循环流动,达到优化精炼的目的。

2.3 卷渣临界吹气量

在钢包底吹氩搅拌中,在渣-钢界面的传质过程中存在一个突变的情况,在一相内出现另一相的分散珠滴,这就是钢渣卷混现象^[7]。渣-钢界面韦伯数是钢渣卷混现象中起决定性作用的准数,We_{bc} = 12.3是液-液分层流界面出现卷混的临界条件^[11-12]。渣-钢界面韦伯数可表示如下:

$$We_{bc} = \frac{V_{\text{钢}}^2 \rho_{\text{钢}}}{\sqrt{g(\rho_{\text{钢}} - \rho_{\text{渣}}) \sigma_{\text{钢-渣}}}} \quad (5)$$

式(5)中,代入 $\rho_{\text{钢}} = 7000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{渣}} = 3500 \text{ kg/m}^3$, $\sigma_{\text{钢-渣}} = 0.12 \text{ N/m}$,则渣钢卷混的临界流

速 $V_{\text{钢}}$:

$$V_{\text{钢}} = \left\{ \frac{12.3 \times [0.12 \times 9.81(7\,000 - 3\,500)]^{1/2}}{7\,000} \right\}^{1/2} = 0.34 \text{ m/s} \quad (6)$$

数值模拟中,钢液表面水平流的速度是考虑是否卷渣的判别因素,因此速度 $V_{\text{钢}} = 0.34 \text{ m/s}$ 可以看作是发生钢液卷渣的临界速度。

图 4 为无浸渍管与插入浸渍管后钢包表面流速度的 XY 散点图,从图 4 中可以看出,无浸渍管时,氩气带动周围钢液向上流动的速度很大,到达钢液面后钢液流动转向水平流动,到达液面的钢液的动能一部分转换成循环流动流动的驱动力,一部分动能则在液面形成流动,当速度大于 0.34 m/s 时发生卷渣。当吹气量为 102 L/min 时,其表面流速为 0.34 m/s ,为无浸渍管时的钢液卷渣临界吹气量。

插入浸渍管,氩气带动周围钢液到达液面后,部分钢液随着底吹气体的驱动进入浸渍管内,在管内流动效果剧烈,同时在浸渍管下方形成一股较大的循环流,使管外钢包液面上水平方向流动减弱。改变了钢包内部循环流场,与无浸渍管相比,液面内部

绝对速度相对增加,有利于钢液搅拌,而表面流动速度相对减少,可增加钢液卷渣的临界吹气量。当吹气量为 217 L/min 时,钢液面表面速度为 0.34 m/s ,为插入浸渍管时钢液卷渣临界吹气量。

3 结论

(1)无浸渍管时,随着吹氩量的增大,绝对速度有所增大,钢液面水平流速增加,但是环流中心基本不变。插入浸渍管后,在浸渍管下方形成一股较大的循环流,使管外钢包液面上水平方向流动减弱,可提高底吹临界卷渣气量。

(2)无浸渍管时,临界卷渣吹气量为 102 L/min ,插入直径 691.05 mm 、深 650 mm 浸渍管后,临界卷渣吹气量增大到 217 L/min 。可以在增加吹氩量的条件下提高钢液搅拌效果,加速钢液混匀,而不引起卷渣。

(3)无浸渍管时钢包中部和下部都出现了较大的弱势区,气液两相区速度较大,包内流场分布不均匀;插入浸渍管后,在浸渍管内部和外部都形成循环流,循环中心弱势区域减少,钢液速度分布较均匀。

参考文献

[1] 朱苗勇,尺田郁夫,邹宗树,等. 冶金反应器内三维流动模拟计算软件及应用[J]. 东北大学学报,1994,15(6):618-622.

[2] 任三兵,陈义胜,黄宗泽,等. LF 炉底吹氩时钢液流场的数值模拟[J]. 包头钢铁学院学报,2002,21(4):313-316.

[3] 段云翔. LF 吹氩过程中钢液流动的数学物理模拟[D]. 唐山:河北理工大学,2003.

[4] 幸伟,沈巧珍,土晓红,等. 钢包底吹氩过程数学物理模拟研究[J]. 炼钢,2005,21(6):33-36.

[5] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:79-89.

[6] 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]. 包头钢铁学院学报,1995,14(3):27-33.

[7] 苗勇,萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京:冶金工业出版社,1998.

[8] 蔡志鹏,魏伟胜. 底吹过程喷射区含气率分布及气液上升速度模型[J]. 钢铁,1988(7):17-25.

[9] 贺友多. 传输过程数值方法[M]. 北京:冶金工业出版社,1991.

[10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.

[11] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2003:28-40.

[12] 张东力,毕衍涛,陈传华,等. 钢包处理过程中的液面现象[J]. 上海金属,2004,26(5):19-21.

吴超(1988-),男,硕士研究生(辽宁科技大学),2012年辽宁科技大学(本科)毕业,炼钢研究。
E-mail:417032886@qq.com

收稿日期:2014-10-29

欢迎订阅 2015 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社