

## 210 t LF 精炼底吹氩过程气、渣、钢液三相流场优化的数值模拟

储莹<sup>1</sup> 霍朝宾<sup>2</sup>

(1 北京矿冶研究总院,北京 100160;2 北京华胜高技术股份有限公司,北京 100083)

**摘要** 基于湍流模型和 VOF 模型,通过 CFD 流体工程模拟软件 FLUENT6.3.26,对吹氩过程 210 t 钢包炉(LF)内气、渣、钢液三相流场进行了数值模拟和分析,得出底吹氩孔位(单孔中心,单孔偏心,双孔)和氩气流量(100~500 L/min)对钢液循环流动、渣眼尺寸和卷渣等行为的影响。研究显示,单孔底吹钢包的孔位不同,混合速度和渣眼尺寸不同;渣眼处易卷渣;双孔底吹比单孔底吹死区小得多;氩气流量越大渣眼越大,但渣眼尺寸大于 611 mm 时,其尺寸变化不大;210 t 钢包的双孔底吹钢包内合适的吹氩量为 200~300 L/min。

**关键词** 210 t LF 数值模拟 气、渣、钢液三相流场 VOF 模型 渣眼 氩气流量

## Numerical Simulation of Gas-Slag-Liquid Three-Phase Flow Field in 210 t Ladle Furnace Refining Bottom Argon Blowing Process

Chu Ying<sup>1</sup> and Huo Chaobin<sup>2</sup>

(1 Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160;  
2 Beijing Huasheng Hi-Tech Co Ltd, Beijing 100083)

**Abstract** Based on turbulent model and VOF model, the numerical simulation and analysis on gas-slag-liquid three-phase flow field in 210 t ladle furnace (LF) during argon blowing have been carried out by using CFD fluid engineering simulation software FLUENT6.3.26 to get the effect of bottom blowing porous plug position (single center plug, single eccentric plug and double plugs) and argon flow rate (100~500 L/min) on behavior of liquid circle flow, size of slag eye and slag entrapment. Study results show that with different bottom porous plug position the liquid mixing speed and size of slag eye are different; the slag is easily entrapped by liquid at slag eye; the stagnation zone with double plugs bottom blowing is quite small than that with single plug bottom blowing; the more argon flow rate the more dimension of slag eye, as diameter of slag eye is more than 611 mm the change of dimension of slag eye is small; the suitable argon flow rate for 210 t ladle with double plugs bottom blowing is 200~300 L/min.

**Material Index** 210 t LF, Numerical Simulation, Gas-Slag-Liquid Three-Phase Flow Field, VOF Model, Slag Eye, Argon Flow Rate

LF(钢包炉)的主要冶金功能包括:脱硫、脱氧、去夹杂、合金化和均匀温度等<sup>[1]</sup>。决定脱硫效率的主要因素是钢液与渣层的相互作用,底吹氩气可促进夹杂物上浮、增大钢渣反应接触面积、提高脱硫效率,但同时也带来了卷渣、氧化、氮化等问题<sup>[2]</sup>。本文借助专业 CFD 流体工程模拟软件 FLUENT6.3.26,以 210 t LF 为例进行分析,旨在分析不同孔位、不同吹氩量对钢液及渣层运动行为的影响。

### 1 数学模型

在 Ar 气喷吹过程中,由气泡上浮所抽引的熔体达到上液面后转向四周流动,完成熔池中钢液的循环<sup>[3]</sup>。LF 中要求造还原渣,渣有一定泡沫性,渣厚一般为 50~80 mm。

#### 1.1 基本假设

(1)模型不考虑传热,故忽略钢液中的温差;  
(2)初始状态时,钢包内处于静止状态,渣层在钢液的上表面;(3)忽略电弧现象对钢液循环的影响。

#### 1.2 控制方程

描述多相流体流动规律的方程有:质量守恒方程、动量平衡方程、湍流模型  $\kappa$ - $\epsilon$  双方程<sup>[4,6]</sup>和 VOF 模型特有的密度、粘度描述方程。

质量守恒方程:通常称连续性方程,表达式为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量平衡方程是牛顿第二定律在流体力学中的应用,表达式为:

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

式中: $p$ - 压强; $\rho$ - 密度; $\mu_{\text{eff}}$ - 有效动力粘性系数; $\vec{g}$ - 重力加速度; $u_i$ 、 $u_j$ - 流体在不同方向上的速度分量。

湍流模型:根据所作的假设,仅需对液相求解湍动能及其耗散率的传输方程,即广泛应用的双相  $\kappa$ - $\epsilon$  模型, $\kappa$ - $\epsilon$  有关参数取 Launder 和 Spalding<sup>[6]</sup>给出

的值,  $C_1 = 1.43$ ,  $C_2 = 1.92$ , 模型系数  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

为了研究钢液、Ar 气和保护渣的三相流动行为采用多相流动体积法 (VOF) 进行求解。每个控制容积中, 所有相的体积分数之和为 1。某个计算单元密度表示为:

$$\rho = \varphi_g \rho_g + \varphi_{sl} \rho_{sl} + \varphi_{si} \rho_{si} \quad (3)$$

式中:  $\rho_g, \rho_{sl}, \rho_{si}$ - Ar 气、钢液和渣的密度。

某个计算单元粘度表示为:

$$\mu = \varphi_g \mu_g + \varphi_{sl} \mu_{sl} + \varphi_{si} \mu_{si} \quad (4)$$

式中:  $\mu_g, \mu_{sl}, \mu_{si}$ - Ar 气、钢液和渣的粘度。

### 1.3 模拟计算条件

本文研究对象为一个 210 t 双孔底吹氩钢包, 底吹氩有单孔中心、单孔偏心、双孔 3 种形式。钢包底半径 1 628 mm, 钢包顶半径 1 943 mm, 高 4 000 mm, 钢包内熔池深度为 3 280 mm, 喷嘴半径 59 mm, Ar 气流量 100 ~ 500 L/min。图 1(a) 为双喷嘴钢包的网格结构图, 各个喷嘴到钢包中心距均为 730 mm。

## 2 参数确定与求解

Ar 气进口速度表示为<sup>[7]</sup>:

$$v_m = \frac{Q}{A} = \frac{P_s T_L}{P_L T_s} \cdot \frac{Q_s}{A}, P_L = \rho_s + \rho gh \quad (5)$$

式中:  $L$ - 钢包;  $S$ - 标准状态,  $T_s = 298$  K,  $T_L = 1 873$  K,  $P_s = 100$  kPa;  $h$ - 钢包内熔池深度;  $A$ - 喷嘴面积;  $Q_s$ - 标准状态下 Ar 气流量。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 钢包截面上钢相云图

图 1(b) 为 LF 钢包内 Y 截面上钢液相云图, 由

图 1(b) 中可见 Ar 气的上浮通道。钢包底吹时, Ar 气由喷嘴处喷出, 透气砖上方形成气液两相流, 在气液界面形成了涌泉状的隆起区。

图 1(c) 为 LF 内 Z 截面上渣层处钢液相云图, 从图 1(c) 中可见, 喷嘴上方渣面处被上升流气体吹开, 形成渣眼, 近渣眼处渣层变薄, 近包壁处渣层变厚。

### 3.2 不同孔位的钢包速度场

图 2 描述了钢包内的速度矢量分布, 图 2(a) 为喷嘴的 Y 截面上局部放大图, 图 2(b) 为 Z 截面图, 从图 2 中可清楚看到, 在底吹氩气作用下钢液和渣层的运动状态, 在钢渣界面处速度场复杂多变, 向两边平行运动和向上运动的速度都很大, 特别是渣眼处产生很大的剪切力, 钢液易卷入渣滴, 渣层的频繁波动显然对包壁冲刷较大。

### 3.3 双孔位的钢包速度云图分析

图 3 为双孔底吹时的速度云图, 图 3 中显示了整个钢包中速度最大的区域为上升流附近和渣眼周围, 可见低吹氩强度可以避免渣眼处的卷渣, 更主要是可获得分散细小的气泡流, 有利于去除更多的夹杂物。

### 3.4 不同孔位的钢包三相运动轨迹分析

图 4 为不同孔位的单孔底吹钢包内的三相流动轨迹图, 图 4(a) 为中心底吹, 图 4(b) 为偏心底吹, 当钢包为中心底吹时, 钢液形成两个对称的环流, 显然流动速度较小。偏心吹时在钢液上部有较强的水平流动, 钢液从吹 Ar 一侧向另一侧流动, 在钢包底部有向喷嘴聚集的底流层, 这种吹 Ar 方式能够在钢液内形成较完整的大循环, 从而提高了钢液的混合速度。但在远离吹 Ar 孔一侧的钢包底部钢液流动

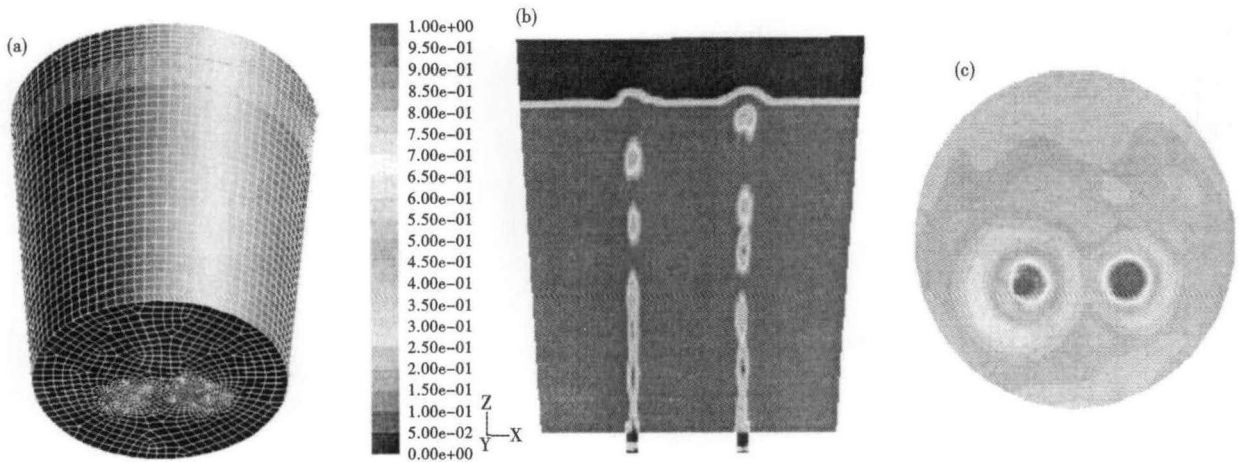


图 1 钢包网格结构(a);钢包内 Y 截面(b)和 Z 截面(c)的钢液相云图

Fig. 1 Meshes structure of ladle (a); contour cloud diagram of liquid in ladle at Y section (b) and Z section (c)

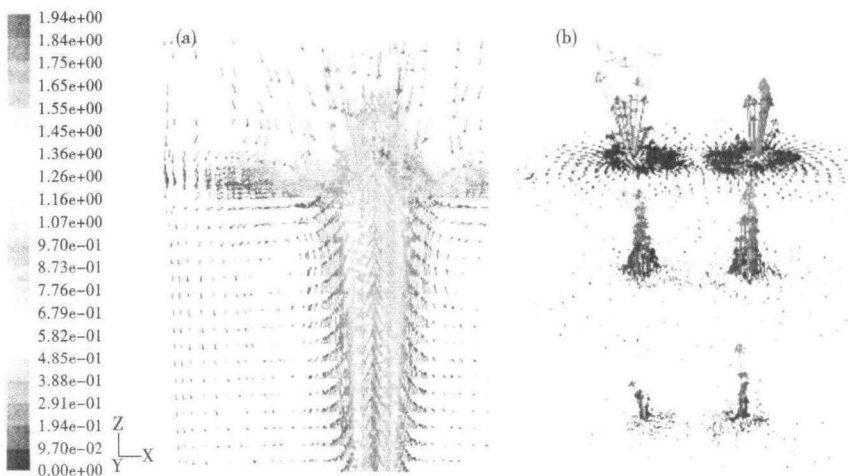


图 2 钢包内速度场分布:(a)Y 截面;(b)Z 截面

Fig. 2 Distribution of velocity field of liquid in ladle: (a) Y section; (b) Z section

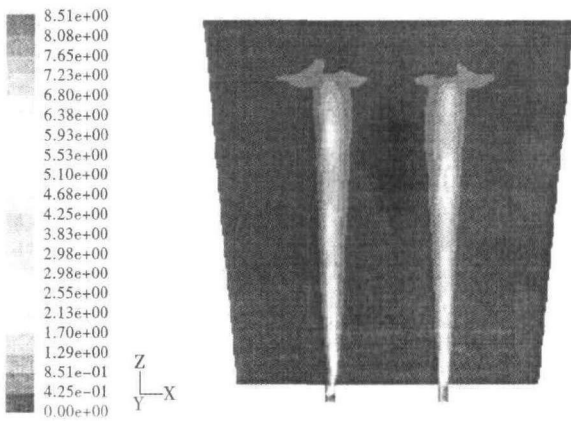


图 3 双孔底喷吹的速度场云图

Fig. 3 Contour cloud diagram of velocity field with double plugs bottom blowing

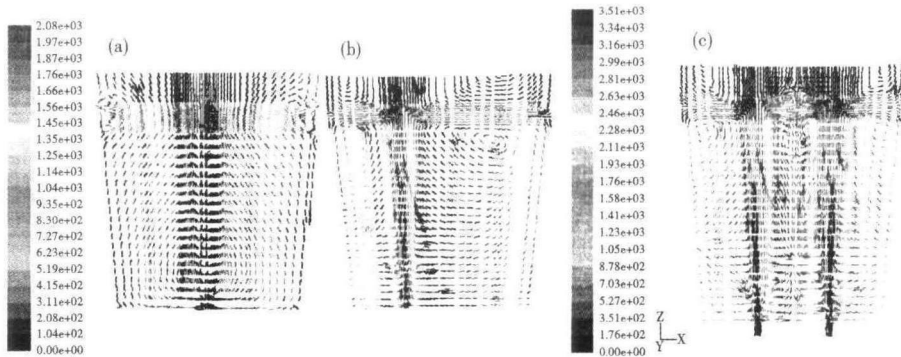


图 4 单孔中心(a)和偏心(b)底喷吹和双孔底喷吹(c)的钢包内三相运动轨迹

Fig. 4 Locus of three-phase flow in ladle with single center plug (a), single eccentric plug (b) double plugs and bottom blowing (c)

速度很小,这个区域对温度和浓度的响应较慢。因此,在同一底吹气量下,中心喷吹时的均混时间比偏心喷吹时的长。

图 4(c)为 Y 截面上双孔喷吹的钢包内三相运动轨迹图,与单孔相比,随着两股气流的上升,周围

的钢液向其流动的速度都要大得多,两股气流在钢渣顶面相汇和交叠,相应的角向速度也更大。除在两流股间的中间形成了较小的漩涡外,还在两侧近包壁处的上部形成两个对称的大漩涡。尽管与单孔时一样,在钢包底壁交汇部位流速也很小,但整个钢液的紊流强度显著增大,两个角部死区少得多,减少了混匀时间,显示了优于单孔底吹的搅拌和混合效果<sup>[8]</sup>。双孔底吹氩气在利于去除细小夹杂物的同时可以节

省喷吹气体<sup>[9]</sup>。

图 5 为不同吹氩量条件下钢液运动场弱流区体积比率变化,视绝对速度值小于 0.01 m/s 的区域为弱流区。比较不同吹氩量下的死区体积变化可见,在吹 Ar 量小时,随着吹 Ar 量的增加,死区体积比迅速减小,但在吹 Ar 量较大时,再增加吹 Ar 量,死区体积比减小的很少。

### 3.5 不同孔位的渣层状态对比

图 6(a,b)为单孔中心底吹和单孔偏心底吹的渣层状态对比,图 6(a)的渣眼直径较大,渣层处局部湍流较剧烈,易卷渣,同时剧烈的波动易由于钢液面的裸露造成二次氧化,图 6(b)的渣眼直径较小,能量大部分用于带动钢液做循环流动,而不是消耗于渣层的隆起和翻滚。

图 6(c,d,e,f)为双孔底吹的渣层状态。对比图 6(a,b),双孔喷吹形成的渣眼直径不大,但是气-液两相区在渣层表面所占的面积大为增加。出现部分炉渣液滴卷入钢水中在脱硫阶段有利,因为可以形成大的渣钢反应接触面积,但是卷渣不可严重。

比较不同氩气量下双孔喷吹的渣眼直径,210 t 钢包条件下,图 6(c)为氩气流量 100 L/min 时的渣层,喷嘴上方的渣层明显变薄,但还未完全吹开,图 6(d)为氩气流量 200 L/min 时的渣层,已形成明显渣眼,直径为 393 mm,图 6(e)为氩气流量 300

L/min时的渣层,渣眼有所扩大,直径为 524 mm,图 6(f)为氩气流量 500 L/min时的渣层,渣眼直径为 611 mm。氩气流量继续增加,渣眼直径变化不大。由此可见,在氩气流量较小时,渣眼的尺寸随着氩气流量的增加而增大,当增大到一定程度后,渣眼基本变化不大。此时再增加氩气量,尽管总能量增大,但用于液体环流的能量增加不多。可见,通过增大吹氩量来改变流场,作用是有限的。分析图 5 和图 6(c, d, e, f)可以得到最佳吹 Ar 量为 200 ~ 300 L/min,不宜过大,此时渣眼不是很大,死区体积也较小,在加料造白渣阶段需要强搅拌时可以阶段性增至 500 L/min。

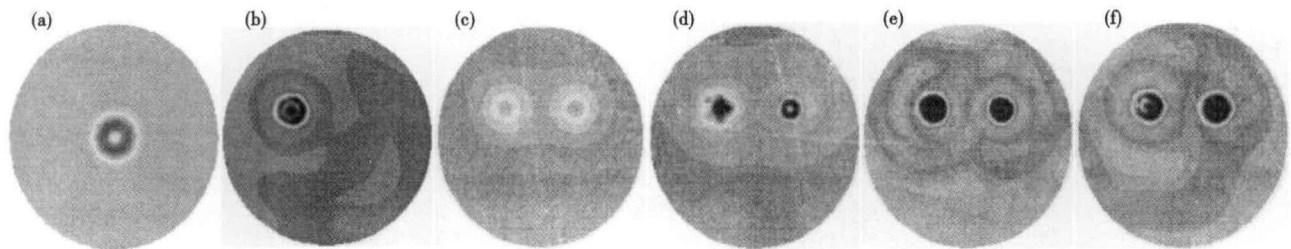


图 6 单孔中心(a)和偏心(b)底吹时的渣层状态;双孔底吹氩气流量/(L·min<sup>-1</sup>):100(c),200(d),300(e),500(f)时渣眼直径形貌

Fig. 6 Status of slag layer with single center (a) and eccentric (b) plug bottom blowing; Morphology of slag eye dimension by double plugs bottom blowing with argon flow rate/(L·min<sup>-1</sup>) 100(c), 200(d), 300(e) and 500(f)

#### 4 总结

(1)气-液界面处的大剪切力使渣层频率性波动,包壁处渣层变厚,渣眼处易卷渣。

(2)比较两种单孔底吹的钢包流场可见,偏心底吹下的钢液比中心底吹的回旋更大,混合速度快,但其远离孔位一侧的包底区域流速缓慢。

(3)单孔偏心底吹时,渣层上的渣眼较小,能量利用率较高。

(4)双孔喷吹下的钢液相比单孔时死区小得多,混匀效果佳,且死区体积比随着吹 Ar 量的增加迅速减小,但在吹 Ar 量较大时,死区体积比变化不大。

(5)渣眼直径随着氩气流量的增加而增大,当增大到一定程度后,渣眼尺寸基本变化不大,继续增加吹 Ar 量对钢液搅拌效率的提高不多。为了避免卷渣和钢水二次氧化、节约成本,建议 210 t 钢包的双孔同时喷吹时最佳吹 Ar 量为 200 ~ 300 L/min。

#### 参考文献

[1] 陈家祥. 钢铁冶金学(炼钢部分)[M]. 北京:冶金工业出版社, 1990:260-280.

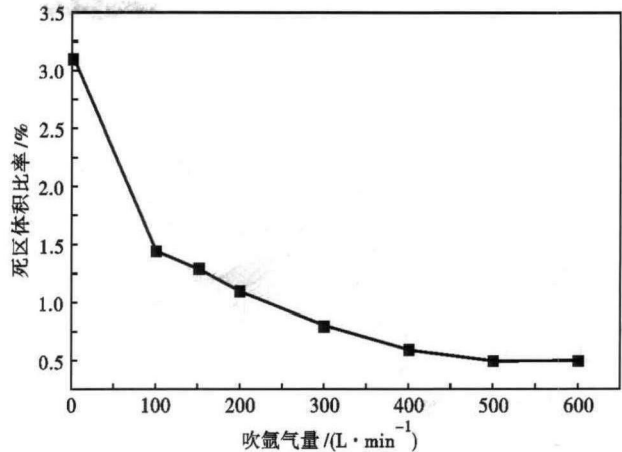


图 5 吹氩量对钢液流动场死区体积比率的影响

Fig. 5 Effect of blowing argon flow rate on stagnation zone volume rate of liquid flow field

- [2] Li Baokuan, Yin Hongbin, Zhou Che Q, et al. Modeling of Three-phase Flows and Behavior of Slag/Steel Interface in an Argon Gas Stirred Ladle[J]. ISIJ International, 2008, 12(48): 1704-1710.
- [3] 宿立伟,程树森,成国光. LF 炉吹氩数值模拟研究[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(增刊): 159-161.
- [4] Joo S, Han J W, Guthrie R I L. Inclusion Behavior and Heat-transfer Phenomena in Steelmaking Tundish Operations; Part II. Mathematical Model for Liquid Steel in Tundishes. Metallurgical Transactions, 1993, 24B(5): 755-779.
- [5] Liu Song-xia, Yang Xue-min, Du Lin, et al. Hydrodynamic and Mathematical Simulations of Flow Field and Temperature Profile in an Asymmetrical T-type Single-strand Continuous Casting Tundish[J]. ISIJ International, 2008, 12(48): 1714-1715.
- [6] Launder B E, Spalding D B. Mathematical Models of Turbulence [M]. Academic Press, London, 1972: 191-198.
- [7] 温良英,陈登福,张生富,等. LF 精炼炉盖内惰性气氛的流动模拟[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 822-825.
- [8] 幸伟,沈巧珍. 钢包底吹氩过程数学物理模拟研究[J]. 炼钢, 2005, 21(6): 33-36.
- [9] 颜慧成,贺庆,郭征,等. 钢包弱搅拌水模型实验研究[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(2): 15-20.

储莹(1986-),女,硕士(北京科技大学),工程师,2007年 华北科技学院(本科)毕业,冶金冶炼过程动力学研究。

E-mail: chu@ sarva. cn

收稿日期:2014-03-08