

## 底吹氩过程 LF 炉盖内气体流动的数值模拟

储莹<sup>1</sup> 郭汉杰<sup>1</sup> 杨学民<sup>2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083;

2 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 基于流体模型和湍流修正模型, 借助流体工程模拟软件 Fluent 6.3.26 对吹氩过程中 210 t LF 精炼炉盖内气体的流动、混合和质量、动量传输进行了计算模拟, 分析了其流动行为和分布状态。结果表明, 随钢包净空高度增加, 液面上部氩气回旋区扩大, “死区”减小; 当氩气流量增至 500 L/min 时, 吹氩孔位于 0.68 R 的盖内流动效果优于 0.3 R 的效果; 正常工作状态下的合理抽气压力为 -150 Pa; 在合理的抽气压力和吹氩孔位置的情况下, 300 L/min 的氩气流量基本可以满足要求, 强搅拌时可增至 500 L/min。

**关键词** 210 t LF 氩气流量 盖内气体流动 数值模拟

## Numerical Simulation of Gas Flow in Ladle Furnace Lid during Bottom Argon Blowing

Chu Ying<sup>1</sup>, Guo Hanjie<sup>1</sup> and Yang Xuemin<sup>2</sup>

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

2 State Key Lab of Multiphase Complex System of Process Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** Based on fluid model and turbulent correct model, the gas flow, mix and transmission of mass and momentum in 210 t ladle refining furnace lid has been simulated and calculated by using flow engineering simulation software Fluent 6.3.26 to analyze its flow behavior and distribution condition. Results show that with increasing the height of free board in ladle, the circulating region of Ar gas above liquid surface enlarges and the “dead region” decreases; as Ar flow rate increases to 500 L/min, the flow effect in lid with blowing Ar hole at 0.68 R is better than that at 0.3 R; with normal work conditions, the reasonable air exhausting pressure is -150 Pa; and in conditions with rational air exhausting pressure and blowing Ar location, the Ar flow rate 300 L/min basically meet the requirement, in strong stirring it is available to increase up to 500 L/min.

**Material Index** 210 t Ladle Furnace, Argon Flow Rate, Gas Flow in Lid, Numerical Simulation

实验室研究表明, 有保护性气氛的渣系脱硫率 (80%) 明显大于无保护性气氛的渣系脱硫率 (45%), 可见保护性气氛对渣系脱硫有重要影响<sup>[1]</sup>。通过数值模拟并求解分析盖内气体的流量、分布状况, 对防止钢液增 [O], 进而保持较高的脱硫效率具有重要意义<sup>[2]</sup>。同时因影响石墨电极侧面氧化的主要因素是高温和氧化气氛, 防止钢液增 [O] 可以防止氧化气氛增强, 降低电极的消耗, 从而降低成本<sup>[3]</sup>。本文借助专业 CFD 流体工程模拟软件 Fluent 6.3.26, 以 210 t LF 为例进行分析, 旨在探明 LF 精炼炉盖内的气体流动行为。

### 1 流场计算的基本控制方程和边界条件

LF 精炼炉盖内的气体主要是在排烟管道上的抽力作用下, 从炉盖周围吸入的空气、液面溢出的底吹氩气和精炼过程中产生的炉气。精炼时要求炉内保持微正压 (0 ~ 50 Pa), 以便造还原渣, 要控制炉内正压, 烟气就从电极孔、加料取样孔、炉门及炉盖与

钢包结合部位喷出<sup>[4]</sup>。

基本假设为: (1) 计算气体溢出液面速度时, 粘性阻力表征气液两相间的动量传输, 忽略其他阻力; (2) 空气与底吹纯氩气间不发生化学反应, 在炉盖内腔中只有流动和混合; (3) 钢液面是平的, 忽略液面波动; (4) 体系处于稳态。

假设气体在盖内空间的流动为不可压缩的湍流流动, 描述其流动规律的方程主要有: 质量守恒方程、动量平衡方程<sup>[5]</sup>、湍流模型  $k-\varepsilon$  双方程。

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, 它是牛顿第二定律在流体力学中的应用, 表达式为:

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

式中: $p$ - 压强; $\rho$ - 密度; $p$  是  $\rho$  和温度的函数; $\mu_{\text{eff}}$ - 有效动力粘性系数<sup>[6]</sup>; $\bar{g}$ - 重力加速度; $u_i$ 、 $u_j$ - 分别为流体在不同方向上的体积分量。

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  $k-\varepsilon$  模型<sup>[6]</sup>。 $k-\varepsilon$  有关参数取 Launder 和 Spalding<sup>[7]</sup> 给出的值, $C_1 = 1.43$ ,  $C_2 = 1.92$ , 模型系数  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

流场控制的边界条件为:炉盖排烟结构如图 1 所示,缝隙 I、II、III 可能会吸入空气, I 为电极孔, II 为测温取样观察孔, III 为炉盖与钢包结合部位的缝隙, LF 底部为双孔吹氩,此模型的速度入口设为气体刚溢出钢液面处,出口为上部水平烟道及裙边立弯烟道与精炼过程中产生的炉气量相比溢出的氩气和混入的空气很小,本模型忽略不计。

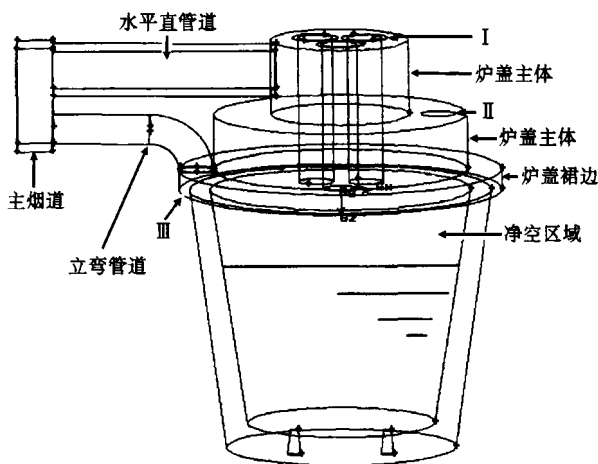


图 1 LF 结构示意图

Fig. 1 Schematics of structure of ladle furnace

气体的密度需要考虑温度的影响,但是炉盖内温度梯度不是很明显,对气体的流动行为没有明显影响,因此模型中不建立温度场。Fluent 默设侧壁与顶部除电极孔以外的部分为 Wall。

## 2 参数确定与求解

LF 炉盖计算模型利用 Fluent 自带的建模工具 GAMBIT2.0 建立,考虑到炉盖各部分尺寸相差较大,因此将几何体分开划分网格。即钢包内净空区域,炉盖裙边,炉盖主体,上部水平直管道,下部立弯管道,主烟道几部分。

### 2.1 流体参数及属性

(1)从钢液进入炉盖内的氩气认为其与钢液的温度相当,即 1 600 °C 左右,气体因受热体积膨胀,密

度降低,气体的密度与温度的关系式为<sup>[6]</sup>:

$$\rho_t = \rho_0 / (1 + \beta t), \beta = \frac{1}{273} \quad (1/\text{K}) \quad (3)$$

式中: $\rho_0$ 、 $\rho_t$ - 分别为温度 0 °C 及  $t$  °C 时气体的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ ; $\beta$ - 气体的体积膨胀系数。

(2)电极孔可能吸入空气或喷出烟气。

$$F = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \times 3 \quad (4)$$

式中: $F$ - 电极孔有效截面面积/ $\text{m}^2$ ; $d_1$ - 电极孔直径/ $\text{mm}$ ; $d_2$ - 电极直径/ $\text{mm}$ 。

(3)湍流体系中的气泡速度。计算各氩气吹入的速度见表 1。速度入口处气泡流直径为 188 mm。从氩气孔常温吹入的速度与温度升高到 1 600 °C 时由温度和高度引起的参数变化关系为:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (5)$$

式中: $P_1$ 、 $V_1$ 、 $T_1$ - 分别为底吹氩孔处氩气的压强、体积、温度; $P_2$ 、 $V_2$ 、 $T_2$ - 分别为温度升高后氩气的压强、体积、温度; $T_1 = 273 \text{ K}$ ,  $T_2 = 1 873 \text{ K}$ 。

表 1 LF 底吹氩气流量对应的入口速度

Table 1 Flow rate of LF bottom argon blowing and corresponding inlet velocity

氩气流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	入口速度 $(v)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
100	0.124
200	0.284
300	0.437
400	0.586
500	0.734
600	0.885

取渣的粘度为  $0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,渣厚 50 mm,钢的粘度  $0.005 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,钢液高度 3 280 mm。

气体在阻力和动力的双重作用下向上运动的动量传输由式(6)计算:

$$-f \cdot h = \frac{1}{2} m v_i^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (6)$$

式中: $f$ - 粘性阻力; $m$ - 气体质量; $h$ - 钢渣厚度; $v_0$ 、 $v_i$ - 分别为初始和终点速度。

(4)以大气压为基准,炉内保持微正压 0 ~ 50 Pa,烟道出口处抽气压力为 -50 ~ -300 Pa。缝隙处压力为 0。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 净空高度的影响

图 2(a)、(b)均为抽气压力 -150 Pa,氩气入口

流量 300 L/min, 吹氩孔位置 0.3 R, 测温取样孔关闭时的流体流动轨迹图。图 2(a) 的净空高度为 400 mm, 图 2(b) 净空高度为 720 mm。比较两图看出, 净空小的气体流动较紊乱, 随着净空高度增加, 氩气在接近钢液面处的回旋区域扩大, 明显的“死区”减小。并且回旋区附近的速度减小, 易于弥散, 这种状态下的空气不易接触钢液面, 可有效保证钢水质量。

### 3.2 吹氩孔位置的影响

图 2(a)、(c) 同为抽气压力 -150 Pa, 氩气入口流量 300 L/min, 净空高度 400 mm, 测温取样孔关闭时的流体流动轨迹图, 图 2(a) 的吹氩孔位于 0.3 R, 图 2(c) 的吹氩孔位于 0.68 R, 比较可见, 在氩气流量中等的条件下, 不同吹氩孔位置虽已有研究表明对钢液的搅拌影响很大<sup>[8,9]</sup>, 但是对钢液表面处的



图 2 气流轨迹, 抽气压力 -150 Pa, 氩气入口流量 300 L/min, 净空高度和吹气孔位置: (a) 400 mm, 0.3 R; (b) 720 mm, 0.3 R; (c) 400 mm, 0.68 R

Fig. 2 Gas flow trace: air exhausting pressure -150 Pa, Ar flow rate at inlet 300 L/min, height of free board and Ar blowing hole location- (a) 400 mm and 0.3 R; (b) 720 mm and 0.3 R; (c) 400 mm and 0.68 R

气体保护并无明显影响。

增加吹氩量 (500 L/min) 后, 不同吹氩孔位的对比见图 3。在氩气流量较大的情况下, 不同吹氩孔位置对炉盖内腔气体的流动行为影响比较明显, 从图 3(b) 上看吹氩孔位于 0.68 R 时氩气搅动相对剧烈, 氩气能形成左、中、右 4 个大的回旋, 可有效减少“死区”, 从图 3(a) 上看吹氩孔位于 0.3 R 时氩气的流动比较紊乱, 虽都能弥散在钢液表面, 保护钢液, 但图 3(a) 显然捕集烟气的效果不够好。

### 3.3 抽气压力的影响

对比氩气入口速度均为 0.124 m/s, 即流量 100 L/min 的图 4(a) (抽气压力 -300 Pa) 和图 4(b) (抽气压力 -50 Pa) 可以看出, 抽气压力过大, 外部空气会从各孔处进入炉腔, 并在压力作用下顺电极向下运动直到液面 (图 4a)。若此时液渣面在氩气搅拌作用下被吹开, 空气很可能通过渣眼接触钢液, 使钢液增 [O], 并由式 (7) 知会影响反应更好向右进行, 造成增 [S]。

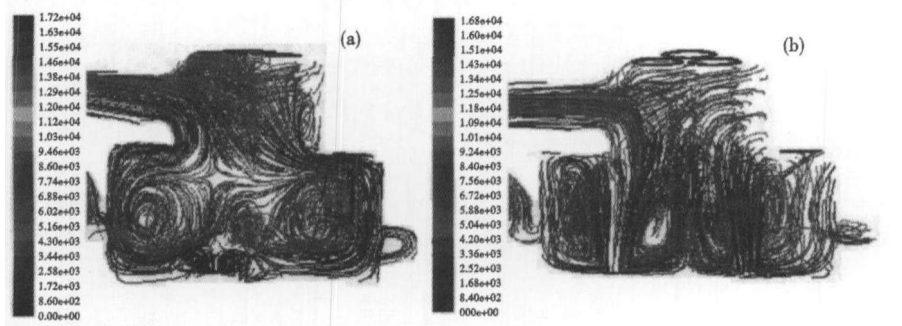


图 3 吹氩量 500 L/min 时流动轨迹的 y=0 处截面视图: 吹氩孔位置 (a) 0.3 R; (b) 0.68 R

Fig. 3 View of gas flow trace at y=0 section: Ar flow rate at inlet 500 L/min, Ar blowing hole location- (a) 0.3 R; (b) 0.68 R

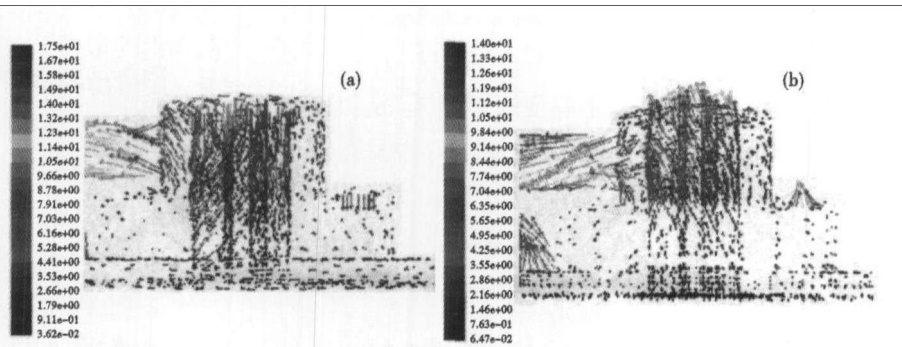


图 4 钢包炉盖中气体流动速度矢量图: 抽气压力- (a) -300 Pa; (b) -50 Pa

Fig. 4 Vectors distribution of gas flow velocity in LF lid: air exhausting pressure- (a) -300 Pa; (b) -50 Pa



在 LF 冶炼高级别钢时, 钢液接触空气形成夹杂物可能对特殊钢种造成致命缺陷<sup>[10]</sup>。当抽气压力太小时炉盖会冒气, 烟道除尘系统没有达到应有

的效果,如图4(b)所示,烟气和粉尘会对工作环境造成污染及对自然环境造成危害。

从抽气压力  $-150\text{ Pa}$  时合金孔打开的条件下  $y=0$  截面的速度矢量图的分析可得:当抽气压力适中时,各孔处会进入少量空气,但空气在抽力作用下绝大部分被上部烟道抽走,虽然测温取样孔处的进气会到达液面,但此孔是在测温、取样、人工加渣等少数情况下才会打开,因此在正常状态下不会使钢液增[O]。

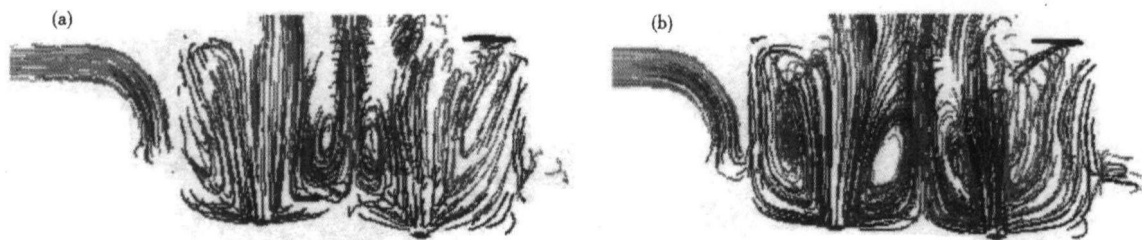


图5 气流轨迹:  $-150\text{ Pa}$ ,  $400\text{ mm}$ ,  $0.68\text{ R}$ , 氩气入口流量- (a)  $100\text{ L/min}$ ; (b)  $300\text{ L/min}$   
Fig. 5 Gas flow trace:  $-150\text{ Pa}$ ,  $400\text{ mm}$ ,  $0.68\text{ R}$ , Ar flow rate at inlet- (a)  $100\text{ L/min}$ ; (b)  $300\text{ L/min}$

行为能较好防止钢液增[N]或增[O]。

继续增大氩气量到  $500\text{ L/min}$  (图3b), 液面附近氩气的流动轨迹回旋更大, 保护钢液的效果更好, 但与图5(b)的区别不是很明显, 分布行为比较相似。因此, 氩气量并非越大越好, 既增加成本, 更重要的是会吹开渣面。可见, 氩气量增加到  $300\text{ L/min}$  时已基本满足要求,  $500\text{ L/min}$  的氩气量是强搅时才需要的阶段性流量。

#### 4 总结

(1) 随着钢包净空高度的增加, 氩气在流体域的回旋区域扩大, “死区”减小。

(2) 在相同净空高度的条件下, 氩气流量  $< 300$

#### 3.4 氩气流量的影响

图5(a)、(b)均为钢包内净空  $400\text{ mm}$ 、抽气压力  $-150\text{ Pa}$ 、吹氩孔位置  $0.68\text{ R}$  测温取样孔关闭时的气体流动轨迹图, 但图5(a)的氩气流量为  $100\text{ L/min}$ , 图5(b)的氩气流量为  $300\text{ L/min}$ 。当氩气流量较小时, 进入炉盖内的氩气在抽力作用下稍作停留便被抽进烟道排出。当氩气量增加为  $300\text{ L/min}$  时, 如图5(b)所示, 氩气离开钢液后弥散在液面上部, 作回旋运动, 然后再进入烟道, 氩气的此种流动

$\text{L/min}$  时, 吹氩孔位置的不同对液面处的流动影响不很大, 当氩气流量增大到  $500\text{ L/min}$  时, 可以较明显看出, 吹氩孔位于  $0.68\text{ R}$  的盖内流动效果优与  $0.3\text{ R}$  的效果。

(3) 在不同的工作条件下, 达到使 LF 炉盖消烟并不进气的抽气压力不尽相同, 但是正常工作状态下(测温、取样孔关闭时)的合理抽气压力为  $-150\text{ Pa}$ 。

(4) 在合理抽气压力、合理吹氩孔位置条件下, 氩气流量对气体流动分布有影响, 流量太小无法在钢液面弥散,  $300\text{ L/min}$  的流量基本可以满足要求, 强搅时可以增加到  $500\text{ L/min}$ 。

#### 参考文献

- 方莉莉, 王建军, 周俐, 等. LF 炉混合型精炼渣脱硫的实验室研究. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2008, 25(1): 14
- 温良英. LF 精炼炉盖内惰性气氛的流动模拟. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 822
- 刘纲, 朱荣. 电炉电极降耗机理及工艺研究. 冶金设备, 2008(3): 56
- 董占荣. LF 型钢包精炼炉排烟除尘相关问题的探讨. 工业加热, 2002, 31(3): 41
- Joo S, Han J W, Guthrie R I L. Metall. Trans. B, 1993, 24(B): 755, 767, 779
- 李文科. 工程流体力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2007
- Lauder B E, Spalding D B. Mathematical Models of Turbulence. London: Academic Press, 1972
- 朱立光, 王硕明, 段云祥, 等. 钢包精炼炉(LF)钢液流动的数学物理模拟与优化. 特殊钢, 2005, 26(6): 10
- Li Baokuan, Yin Hongbin, Zhou Chen Q, et al. Modeling of Three-phase Flows and Behavior of Slag/Steel Interface in an Argon Gas Stirred Ladle. ISIJ International, 2008, 48(12): 1704
- 陈家祥. 钢铁冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 1990

储莹(1986-), 女, 研究生, 炼钢过程中的热力学和动力学及数值模拟。

郭汉杰, 教授, 北京科技大学冶金与生态工程学院。

收稿日期: 2009-09-16