

## 80 t 圆柱形 LF 精炼炉的水模型和三维数值模拟的研究

崔荣峰<sup>1</sup> 钱永辉<sup>1</sup> 周 俐<sup>2</sup>

(1 中冶华天工程技术有限公司, 马鞍山 243005; 2 安徽工业大学冶金与资源学院, 马鞍山 243002)

**摘 要** 通过建立的水模型和三维 Euler 数学模型, 试验研究了 80 t LF 底吹偏心位置对钢水混匀时间和钢包纵截面流场的影响。结果表明, 最佳底吹偏心位置为 0.550R (钢包半径), 使混匀时间短, 具有较佳的流场分布, 有利于夹杂物上浮与去除。

**关键词** 80 t LF 水模型 数值模拟 钢水流场

## A Study on Water and Three Dimensional Numerical Models for an 80 t Cylindric Ladle Refining Furnace

Cui Rongfeng<sup>1</sup>, Qian Yonghui<sup>1</sup> and Zhou Li<sup>2</sup>

(1 Zhongye Huatian Engineering and Technology Corp Ltd, Maanshan 243005;  
2 School of Metallurgy and Resource, Anhui University of Technology, Maanshan 243002)

**Abstract** The effect of bottom blown location of an 80 t LF on mixing time of liquid steel and liquid flow field of ladle longitudinal section have been tested and studied by established water model and three dimensional Euler model. Results showed that the optimum bottom blown location was 0.550R (ladle radius), it was available to decrease mixing time and promote inclusions floating up and removed with optimum distribution of liquid flow field.

**Material Index** 80 t LF, Water Model, Numerical Simulation, Liquid Steel Flow Field

因钢厂 80 t LF 精炼炉 (钢包直径 2.6 m) 存在着钢包开浇率不高、钢水温降大、夹杂物较多等缺点, 为此, 根据相关物性参数, 对 LF 进行了物理模型试验和数值模拟研究。

### 1 物理模型试验

#### 1.1 试验原理

(1) 几何相似。模型与原型之间比例为 1:2, 主要考虑钢包内型参数 ( $H/D$ ) 的相等。

(2) 动力学相似。根据全浮力模型理论, 气泡浮力是驱动钢水循环流动的源动力, 所以需要保证原型与实物的  $Fr$  准数的相等, 就能保证动力学相似。

$Fr_{模} = Fr_{原}$ , 则有:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \sqrt{\frac{\rho_{g1}(\rho_{l2} - \rho_{g2})}{\rho_{g2}(\rho_{l1} - \rho_{g1})}} \times \frac{d_2}{d_1} \quad (1)$$

式中:  $\frac{d_2}{d_1} = 0.5$ ;  $Q_1$ - 原型气体流量/( $m^3 \cdot min^{-1}$ );

$Q_2$ - 模型气体流量/( $m^3 \cdot min^{-1}$ );  $d_1$ - 原型直径/m;

$d_2$ - 模型直径/m;  $\rho_{g1}$ - 氩气密度 ( $1.786 kg/m^3$ );  $\rho_{l1}$ -

钢液密度 ( $7000 kg/m^3$ );  $\rho_{g2}$ - 空气密度 ( $1.205$

$kg/m^3$ );  $\rho_{l2}$ - 水的密度 ( $1000 kg/m^3$ )。

所以,  $Q_2 = 0.0813Q_1$  (2)

#### 1.2 试验方案

物理试验采用空气模拟惰性气体氩气, 空压机供气压力为 0.2~0.4 MPa, 采用液态水模拟钢水流动。根据吹气口位置和探测点位置空间分布特点, 以饱和食盐水作为刺激响应源, 调节气量值, 测定钢水混匀时间。

#### 1.3 试验结果及分析

在圆台形钢包试验的基础上, 圆柱形钢包混匀试验设置有 4 种偏心位置: 0.512R、0.525R、0.550R、0.575R ( $R$  为钢包内型半径)。南钢原型钢包吹气口位置为 0.512R, 试验测量混匀时间结果见图 1。

水模型试验过程中发现, 钢包内形成明显的气液两相区结构, 呈一定倒锥角的倒锥型结构, 符合全浮力模型理论所描述底吹气体的浮力是钢水上升, 形成循环流动的源动力的结论。

试验首先模拟了钢包原型, 结果表明在此条件下, 随着钢包吹气量的增大, 混匀时间逐步降低, 线性相关系数  $\eta = 0.94$  则表明, 钢包混匀时间与气量之间存在高度幂函数变化关系。其他偏心位置下进行钢包混匀时间试验, 结果同样表明, 随着气量的增加, 气体驱动钢包进行循环流动的源动力相应增加, 从而导致钢包混匀时间减少; 线性相关系数均高于 0.94 同样表明, 混匀时间与吹气量之间存在高度幂

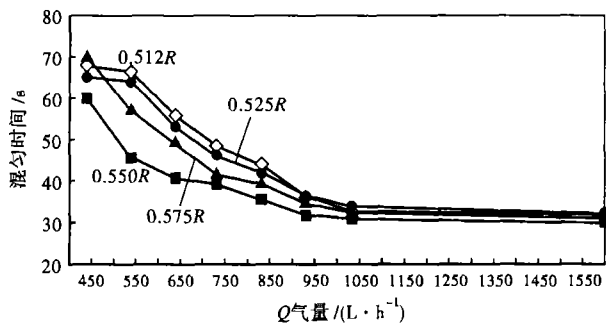


图1 LF 气体流量和底吹位置对 85 t 钢包中钢水混匀时间的影响

Fig.1 Effect of gas flow rate and bottom blown location on mixing time of liquid steel in an 85 t ladle

函数变化关系。

试验结果发现:软吹阶段时,吹气口的偏心位置对钢包混匀时间影响较大,混匀时间各偏心位置间相差较大,但随着底吹气量的增大,该因素的影响逐步降低。在同等气量条件下,偏心位置在 0.550R 时的钢包混匀时间最少,说明该偏心位置条件下钢包循环流发展最为充分。

## 2 三维 Euler 数值模拟

### 2.1 数学模型的建立

假设条件为:(1)钢包内的流体处理成均相介质,气液两相区与周围的循环流具有不同的密度;(2)钢液循环流动的主要驱动力是气泡的浮力;(3)气液两相区采用 Euler 两相流模型;(4)忽略钢液表面渣层,钢液表面流动视为自由流动。

钢包内钢水流动可视为不可压缩流,因此,描述圆柱形反应器内三维流动可用连续性方程、Navier-Stokes 方程及湍流模型来描述。描述两相区气泡分布比较有代表性的是 Castillejos 和 Brimacombe<sup>[1,2]</sup> 的研究结果。

对钢水精炼反应器过程数值模拟最基本的边界条件应该包括熔池表面、壁面、对称面及气液两相区:

(1)熔池表面。不考虑渣层,则钢液直接与气相接触,表面切应力很小,可忽略不计。平行于熔池表面的速度分量和其它标量( $k, \varepsilon, \rho, C$ )的梯度均为 0。

(2)固体壁面。在固体壁面上,对速度、压力和浓度用无滑移边界条件(设为 0),对  $k$  和  $\varepsilon$  设为 0。

(3)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,其它各变量的梯度均设为 0。

(4)两相区。气液两相区采用 Euler 两相流模型,气液两相是微元体内共存的连续流体。

### 2.2 计算结果及分析

根据钢包底部粒子试验和现场工艺实际得到软吹阶段的吹气量为  $Q \leq 90$  L/min,合金化阶段的吹气量为 150 L/min,  $Q \leq 190$  L/min。

初始模拟条件:气量 90 ~ 250 L/min;钢包的偏心位置为 0.512R, 0.525R, 0.550R, 0.575R。

气泡在两相区的顶部由于内外气压的作用下破碎,钢水由于惯性力的作用在液面形成一个有一定直径的圆凸区,不断上涌的钢水和圆凸区造成的势压头,迫使钢水流向四周,在钢包顶面形成一层水平流。气液两相区的结构形式完全符合全浮力模型所描述的倒锥型结构,侧面也论证了 Euler 模型应用的可行性。

软吹阶段时,钢包原型( $r = 0.512R$ , 图 2a<sub>1</sub>)流场分布极不合理,气液两相区极其不活跃,钢水流速慢,气体浮力驱动钢包内钢水做循环流动而形成的旋涡位置较偏下,不利于非金属夹杂物的上浮、去除。钢包吹气口偏心位置为  $r = 0.525R$  和  $r = 0.575R$  时的钢水流场与钢包原型所形成的流场很类似,均分布不合理。

当吹气口偏心位置为  $r = 0.550R$ (图 2a<sub>2</sub>)时,钢包纵截面流场分布比较理想,旋涡中心位置在 4/5 钢包高度位置,有利于钢包流场的充分混匀和夹杂物的上浮、去除。

钢包合金化阶段,钢包底部和表面的搅拌动能分布良好,无明显死区存在,同时钢包流场分布很合理,近包壁处的钢水有旋涡形成,两相区未发生倾斜靠近,而远包壁处则形成许多股侧向流动,钢包内钢水流速较大,混合效果较好,非常适合钢水合金化阶段的进行;继续提高气量则发现旋涡消失,不利于夹杂物的上浮、去除,而且此时钢水对近包壁冲刷严重,影响钢包长寿使用。同时,气液两相区的结构形式完全符合全浮力模型所描述的倒锥型结构,侧面也论证了 Euler 模型应用的可行性。

流场结果(图 2b<sub>1</sub> ~ c<sub>3</sub>)表明,钢包两相区的位置分布直接导致钢包流场的样式,合理确定两相区参数如惰性气体气量、吹气口偏心位置以及气孔率等对于消除钢包流动死区、钢包流场优化起着非常重要的作用。钢包偏心位置为 0.575R 时(图 2b<sub>3</sub>, 图 2c<sub>3</sub>),钢包内两相区离包壁较近,对钢包耐火材料的消耗较大;同时,动能消耗大,搅拌动能降低,不利于整个钢包钢水的循环流动和夹杂物的上浮。对照各种偏心流场,偏心位置 0.550R 时的钢包气液两相区不发生偏移,旋涡中心位置位于钢包高度 4/5,有利于夹杂物的上浮、去除。

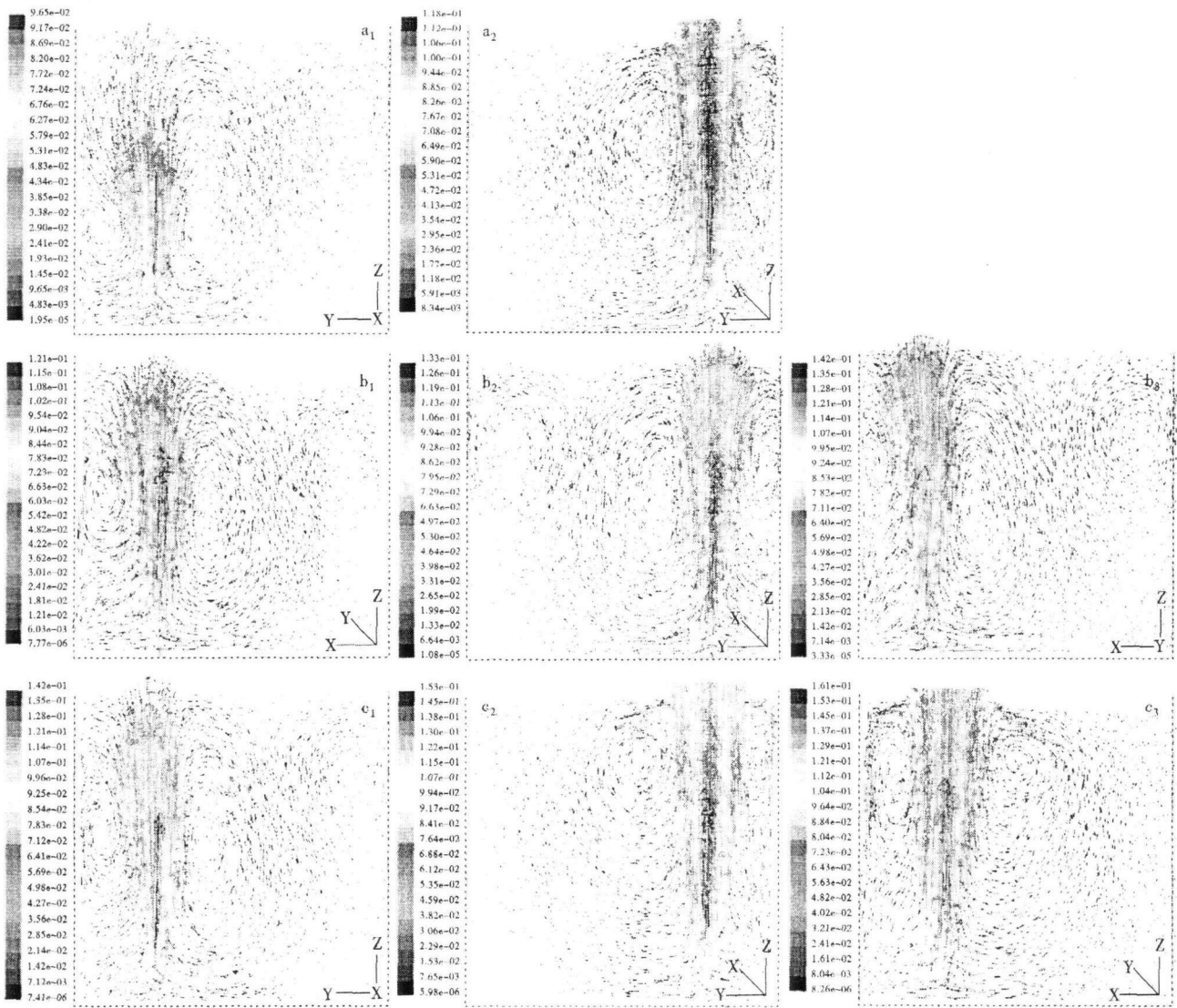


图 2 钢包纵截面流场图:流量 90 L/min (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>), 150 L/min (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>) 和 190 L/min (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub>); 底吹位置 0.512R (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>), 0.550R (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) 和 0.575R (b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>)

Fig. 2 Flow field of ladle longitudinal section: flow rate- 90 L/min (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>), 150 L/min (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>), and 190 L/min (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>3</sub>); bottom blown location- 0.512R (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>), 0.550R (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>), and 0.575R (b<sub>3</sub>, c<sub>3</sub>)

另外,该 LF 钢包出现的开浇率不高、钢包开浇砂损失率高的问题经试验研究和现场工艺分析进行了如下的处理:(1)钢水冲击点的位置需进一步优化,由原先的中心位置调整为水口对面1/3R处,钢水冲击点的第二落点位置正对钢包水口,导致开浇砂外溢,严重影响开浇;(2)水口处的开浇砂需进行必要的检查,数量要能完全保证钢包的顺利开浇。

### 3 结论

(1)物理模型试验和 Euler 三维数值计算表明,80 t 圆柱形钢包最佳偏心位置为 0.550R;钢包位于该偏心位置时,混匀时间短,循环流动发展充分,旋涡中心位于钢水高度的4/5,有利于夹杂物的上浮、去除。

(2)研究结果表明气液两相区符合全浮力模型

所描述的倒锥型结构。

(3)物理模型试验和数值计算结果还需工业试验进一步的验证和修正。

### 参考文献

- 1 Castilejos A H, Brimacombe J K. Fluid Flow and Bath Temperature Destratification in Gas-stirred Ladles. Metall. Trans, 1989, 20B:603
- 2 Brimacombe J K. Role of Mathematical Modeling in Metallurgical Engineering In: Proc. of Intern. Conf. on Progress in Metallurgical Research: Fundamental and Applied Aspects. Kanpur, India; 1985, Feb. 11 ~ 15:241

崔荣峰(1982-),男,助理工程师,2007年安徽工业大学毕业,炼钢工艺设计。

收稿日期:2008-03-21