

## 150 t 钢包底吹氩的水模型研究

李文双 朱 荣 鲍 翔 刘福海 吕 明

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘 要** 采用几何相似比 1: 4.5 的水模型对 150 t 钢包底吹氩的工艺参数进行模拟试验, 研究了喷孔圆周 (0.40 ~ 0.70 R)、同圆周夹角 (60° ~ 120°) 流量 (189 ~ 378 L/h) 对混匀时间的影响, 测定吹氩流量与表面流速的关系以及分析了不同流量下的卷渣现象。结果表明, 最佳的底吹方案是 120° 夹角, 0.7 R 双孔同圆周, 流量 378 L/h (对应实际流量 600 L/min); 最佳喂线位置为 0.4 R; 软吹时临界卷渣流量为 110 L/h (对应实际流量 175 L/min)。

**关键词** 150 t 钢包 底吹氩 水模型 卷渣

## A Study on Water Modeling of an 150 t Ladle Bottom Argon Blowing

Li Wenshuang, Zhu Rong, Bao Xiang, Liu Fuhai and Lü Ming

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

**Abstract** The simulation test on process parameters for an 150 t ladle bottom argon blowing with geometric similarity ratio 1: 4.5 water model has been carried out to study the effect of blowing nozzle circle (0.40 ~ 0.70 R), angle of nozzle at same circle (60° ~ 120°) and flow rate (189 ~ 378 L/h) on mixing time, define the relationship between argon flow rate and surface gas velocity and analyze on slag entrapment phenomena at different flow rate. Results show that the parameters of optimum bottom argon blowing scheme are angle 120°, 0.7 R double nozzle at same circle and blowing flow rate 378 L/h (corresponding to real flow rate 600 L/min); the optimum wire feeding location is at 0.4R; and in soft blowing the critical slag entrapment bottom flow rate is 110 L/h (corresponding to real flow rate 175 L/min).

**Material Index** 150 t Ladle, Bottom Argon Blowing, Water Model, Slag Entrapment

底吹氩钢包具有成本低、操作简单等<sup>[1]</sup>优点。在实际生产中, 经常存在喷吹方式不合理造成混匀时间变长, 底部吹气量过大造成卷渣, 吹氩时间难以把握等问题, 目前水模型实验研究是解决这些问题的有效手段<sup>[2]</sup>。为此, 对承钢 150 t 底吹氩钢包进行 1: 4.5 水模型实验研究。

### 1 实验原理

根据相似理论, 除保证模型与原型几何相似外, 对于钢包底吹氩系统, 引起体系内流动的动力主要是气泡浮力, 而不是湍流的粘性力。因此保证模型与原型的修正弗鲁德准数相等<sup>[3-5]</sup>, 就能保证两者之间的动力学准数相似:

$$Fr' = \frac{\rho_{\text{气}} \cdot V^2}{\rho_{\text{液}} \cdot g \cdot H} \quad (1)$$

式中:  $Fr'$ - 修正弗鲁德准数;  $V$ - 特征速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $g$ - 重力加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $\rho_{\text{气}}$ - 气体的密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\rho_{\text{液}}$ - 液体的密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $H$ - 熔池深度/m。

$$Fr'_{\text{模型}} = Fr'_{\text{原型}} \quad (2)$$

采用压缩空气代替氩气作为底吹气体。由于粘性力并非影响实验的主要因素, 实验可以采用自来水 (运动粘度  $0.9 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ) 代替钢液并使用液体石蜡来模拟钢-渣界面。钢包模型尺寸如表 1 所示, 模型底部喷嘴布置如图 1 所示。

供气参数的确定:

$$\frac{Q_{\text{原}}}{Q_{\text{模}}} = \sqrt{\left(\frac{d_{\text{原}}}{d_{\text{模}}}\right)^5 \cdot \frac{\rho_{\text{钢}}}{\rho_{\text{水}}} \cdot \frac{\rho_{\text{氩气}}}{\rho_{\text{氩气}}}} \quad (3)$$

表 1 150 t 钢包原型与模型的几何参数和气体流量  
Table 1 Geometric Parameters and gas flow rate of prototype and model for 150 t ladle

项目	原型	模型
顶直径/mm	3 144	700
底直径/mm	2 765	614
炉深/mm	3 939	875
液面高度/mm	2 902	645
渣层厚度/mm	75	16.7
气体流量/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	300	3.15
	400	4.20
	500	5.25
	600	6.30

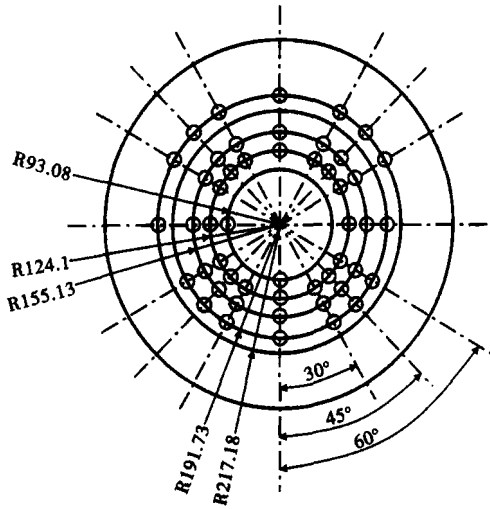


图1 模型底部喷嘴布置图

Fig. 1 Layout of model bottom blowing nozzle

式中： $d_{原}$ - 原型熔池直径/m； $d_{模}$ - 模型熔池直径/m； $\rho_{钢}$ - 原型钢水密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )； $\rho_{水}$ - 模型介质密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )； $\rho_{氩气}$ - 原型出口氩气密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )； $\rho_{氮气}$ - 模型出口氮气密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )； $Q_{原}$ - 原型气体流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )； $Q_{模}$ - 模型气体流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )； $g$ - 重力加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )。

根据公式(3)即可确定模型与原型之间供气参数的对应关系,如表1所示。

模型介质的选取。对于渣层的模拟,要根据  $We$  准数的计算结果来选定模拟介质<sup>[6]</sup>。即:

$$\rho_{油} = \rho_{水} - \frac{\rho_{氩气}^2 \cdot \rho_{水}^4 \cdot \sigma_{钢-渣}^2 \cdot \lambda^2 \cdot (\rho_{钢} - \rho_{渣})}{\rho_{氮气}^2 \cdot \rho_{钢}^4 \cdot \sigma_{水-油}^2} \quad (4)$$

取  $\sigma_{水-油} = 44 \text{ N/m}$ ,  $\sigma_{钢-渣} = 1220 \text{ N/m}$ ,  $\rho_{渣} = 3400 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{钢} = 7000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{水} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{氮气} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{氩气} = 1.783 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = \frac{1}{4.5}$  代入式(4)得到  $\rho_{油} = 891.6 \text{ kg/m}^3$ 。因此选取液体石蜡(密度  $0.86 \sim 0.905 \text{ kg/m}^3$ )作为钢渣模拟介质。

## 2 实验方法

### 2.1 混匀时间和喂线位置

两个电极放置在模型侧壁不同位置,饱和 KCl 溶液作为示踪剂,每次倒入 80 mL,实验开始时快速将其倒入正在进行实验的模型中,对电导率进行测定,使用函数记录仪进行记录,形成一条连续的曲线。每一炉次记录时间为 120 s。实验结束后观察生成的电导率变化曲线,观察两个电极测得的电导率值,直到其电导率相差小于 5% 时<sup>[7-8]</sup>,认为模型已经

混匀,通过这种方法可以测定出流场的混匀时间。

在得出底吹喷嘴最佳布置方案后,开始往不同的位置不同的方向快速将 80 mL 示踪剂倒入正在进行实验的模型中,测定方法同上。作图比较各个方案下的混匀时间数据并得出最稳定及最有效率的喂线位置。

### 2.2 表面流速和卷渣现象

将两支表面流速测定仪置于钢包液面隆起的边缘并将其固定于相距  $90^\circ$  的夹角,于最佳吹氩喷吹方案下的各个流量条件下进行试验,每个吹气量下测量 4 个有效数据,数据采集时间间隔 20 s,选取测量结果的最大值作为该流量下的液面最大流速。

在最佳底吹布置喷嘴方案下进行卷渣实验。实验采用液体石蜡代替渣层。实验开始前先将液体石蜡均匀的布置在钢液表面(水面),待液体石蜡表面平静时开始进行底吹。流量从小到大逐渐升高,在升高的过程中仔细观察液体石蜡界面。当开始有液体石蜡滴被卷入熔池时,即得到临界卷渣流量。用数码摄像机拍摄记录。

## 3 实验结果分析

### 3.1 混匀时间

#### 3.1.1 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 同圆周在各圆周下混匀时间比较

通过图 2(a)可以看出, $60^\circ$ 双喷嘴方案在低流量下,混匀时间在各个喷嘴位置普遍较高。而当流量逐渐提高后,混匀时间随着喷嘴位置逐渐接近炉壁而逐渐升高的趋势会慢慢变成下降的趋势,而变化的拐点位于  $315 \text{ L/h}$  附近。这说明在高流量下,靠近炉壁的喷嘴位置提供的搅拌力可以有效的形成环流。

从图 2(b)可以看出, $120^\circ$ 双喷嘴方案除  $189 \text{ L/h}$  流量,其他 3 条曲线均在  $0.618 R$  处汇集,且 3 条曲线的变化趋势相近。3 条曲线中  $378 \text{ L/h}$  流量的平均混匀时间最低。这说明在中高流量下,由于  $120^\circ$  的布置方案在喷嘴产生环流的促进作用较为明显,因此喷嘴位置相比流量变化对混匀时间的影响更加明显。

图 2(c)可以看出, $180^\circ$ 方案  $315 \text{ L/h}$  及  $378 \text{ L/h}$  两条曲线均遵循相似的变化规律,在  $0.618 R$  处出现最低点。4 条曲线均在  $0.4 R$  处有汇集,这说明  $180^\circ$  方案由于对称的喷嘴位置布置,存在较大的抵消作用,在低流量下这种作用十分明显,而当流量提高后,环流作用逐渐增强,搅拌力提高,抵消作用便

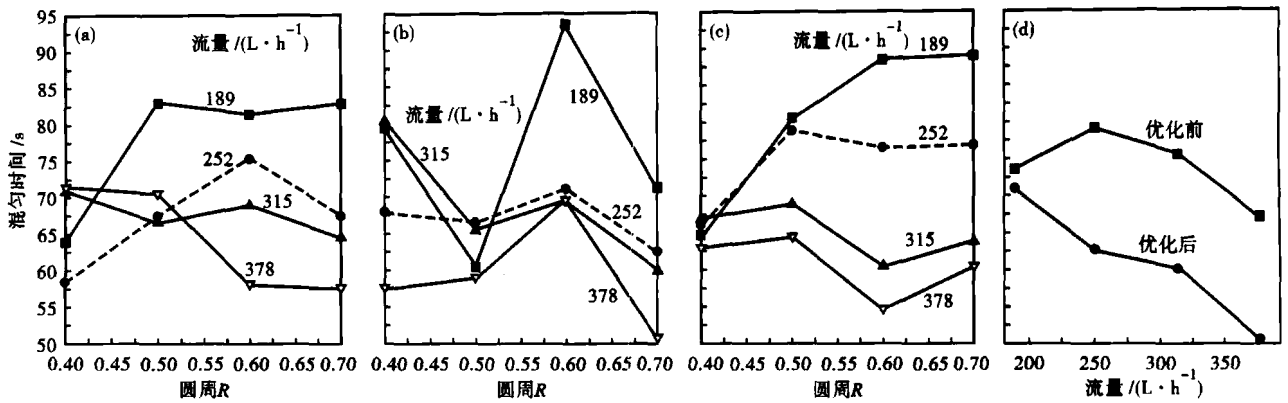


图 2 60°(a)、120°(b)和 180°(c)夹角同圆周双喷孔圆周半径 R 对混匀时间的影响;(d)底吹优化前后在各流量下混匀时间  
Fig. 2 Effect of circle radius R for two nozzle in same circle at angle 60° (a), 120° (b) and 180° (c) on mixing time; (d) mixing time for each bottom blowing gas flow rate before and after optimization

不再明显。

### 3.1.2 钢包优化前后混匀时间比较

钢包优化前底吹布置方案为 0.5 R 圆周 90° 夹角, 优化后为 0.7 R 圆周 120° 夹角。从图 2(d) 可以看出, 优化后的方案在各流量上的混匀时间均较优化前方案短。优化后流量提升的能量转化为搅拌能, 转化效率明显更强, 混匀效果更好。

### 3.2 喂线位置

由于钢包最佳方案为 120° 方案, 为了避免喂线位置距离底吹位置过近, 因此只进行 180° 喂线位置试验。从图 3 分析得知, 在靠近熔池中心以及靠近炉壁的位置进行喂线可以较快地混合均匀。其中靠近熔池中心的 0.4 R 方案混匀时间更低。考虑到 0.4 R 位置距离液面裸露区更远, 因此选择 0.4 R 为钢包喂线最佳位置。

### 3.3 表面流速测定实验

图 4 中位置(1)为靠近钢包壁的液面气泡隆起边缘位置。位置(2)为与位置(1)相对的靠近钢包中心的液面气泡隆起边缘位置。从图 4 中可以发现, 位置(1)与位置(2)的流速此消彼长, 其曲线的变化趋势完全相反。将同一流量下两个位置的表面流速相加可以发现, 当流量为 180 ~ 300 L/h 时, 液体表面的总能量保持不变。而当流量大于 300 L/h 后, 总流速提高, 表面搅拌力逐渐增强。

#### 3.3.1 渣-液界面实验分析

图 5(a) 流量为 100 L/h, 熔池喷吹平静, 看不到

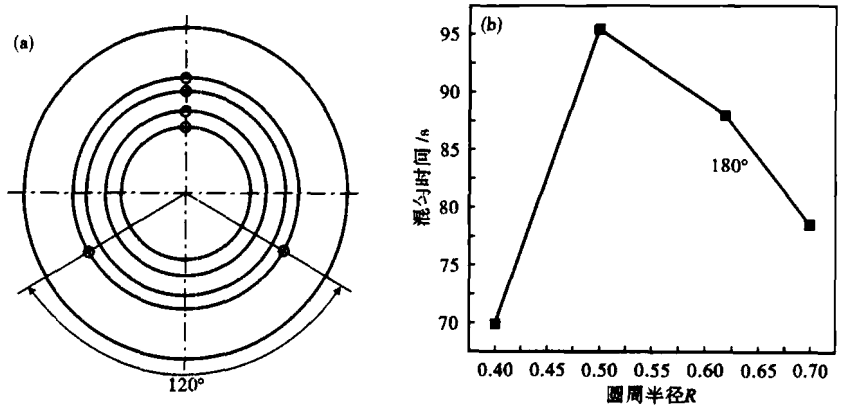


图 3 (a)喂线位置示意图;(b)180°夹角不同喂线位置下的混匀时间  
Fig. 3 (a) Schematics of wire feeding location; (b) Mixing time for different wire feeding location at angle 180°

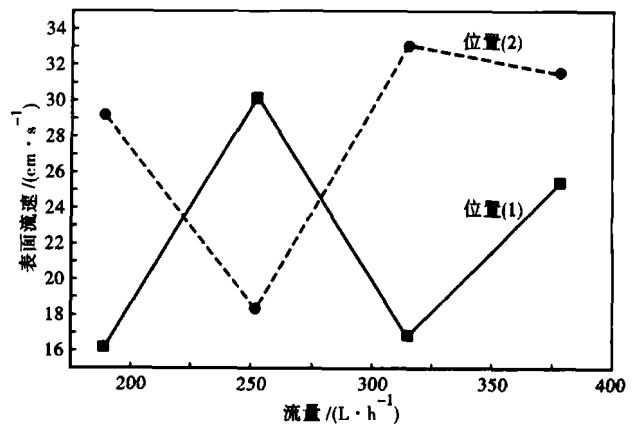


图 4 各流量下近钢包壁(1)和近钢包中心(2)的表面流速  
Fig. 4 Surface velocity of at near ladle wall (1) and near ladle center (2) with different flow rate

气泡, 没有渣滴出现; 图 5(b) 中可以看出, 流量为 110 L/h, 渣-液界面开始浮现出渣滴, 并且有即将脱离渣层的趋势, 出现了临界卷渣现象。

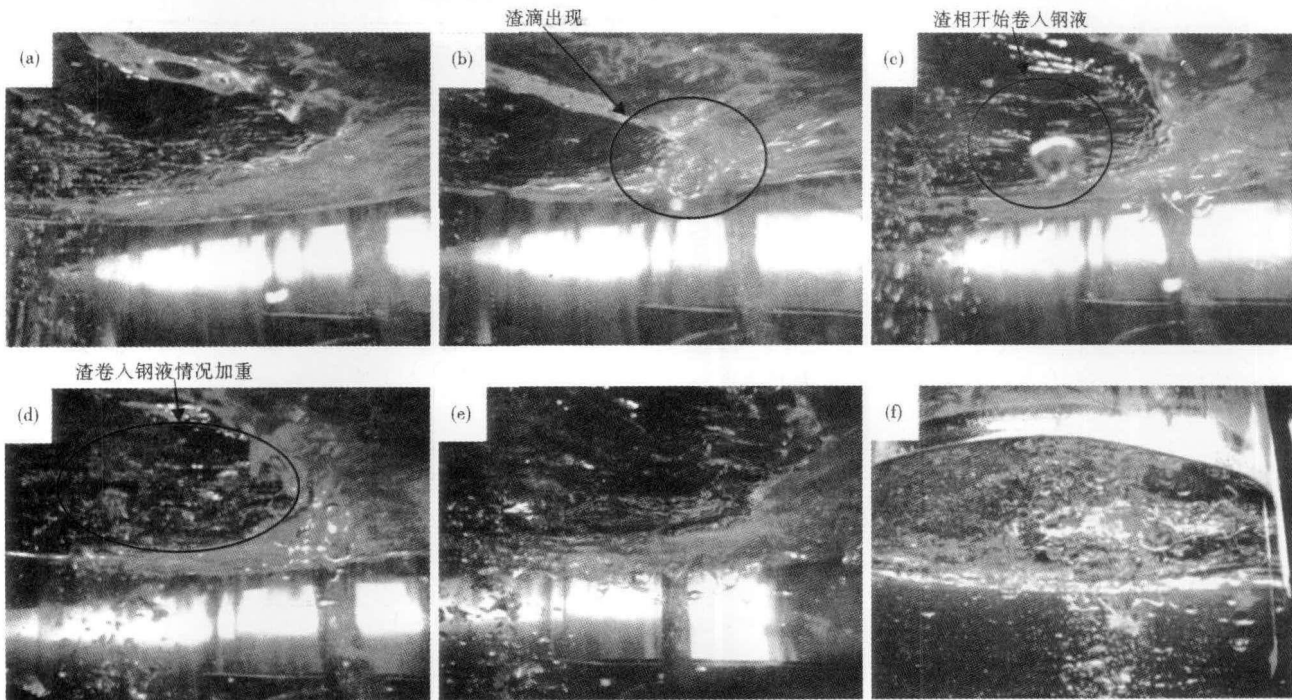


图5 不同流量下的卷渣现象,流量/( $L \cdot h^{-1}$ ):(a)100;(b)110;(c)189;(d)252;(e)315;(f)378

Fig.5 Slag entrapment phenomena with different flow rate /( $L \cdot h^{-1}$ ): (a) 110; (b) 110; (c) 189; (d) 252; (e) 315; (f) 378

当流量继续升高至 189 L/h 及 252 L/h 时,如图 5(c) 及图 5(d),渣-液界面卷渣现象明显。渣滴数量多体积小,整个界面形状开始逐渐模糊,在界面处的搅拌开始渐渐激烈。

当流量达到 315 L/h 及 378 L/h 时(图 5e, f),渣-液界面形状十分模糊,渣与上层熔池混合在一起,大量大块渣滴在渣-液表面翻滚,界面处气泡明显增多。

### 3.3.2 临界卷渣现象分析

通过各流量下的卷渣实验可以发现,当流量为 110 L/h 时,渣-液界面出现渣滴,且渣滴即将脱离渣层,有向熔池液体中混合的趋势。因此可以认为 110 L/h 下发生临界卷渣现象。该流量下的渣层裸露区位置趋于钢包边缘,裸露区形状为椭圆形,渣-液界面处的惯性力较小,裸露区有继续增大的趋势。

在软吹时,可以选用该流量作为软吹流量以使夹杂物的上浮效果达到最佳。若流量继续增大,则会使得渣-液界面处的惯性力大于气泡产生的浮力与剪切力,影响夹杂物的上浮。

## 4 结论

(1)  $120^\circ$  夹角,  $0.7 R$  同圆周双喷孔为最佳方案。喷吹流量为 378 L/h (对应实际流量 600 L/min)。

(2) 调整喂线位置可以提高混匀效率,减少混匀时间。最佳喂线位置为  $0.4 R$ 。

(3) 临界卷渣流量为 110 L/h (对应实际流量 175 L/min),软吹时不超过此流量即可避免卷渣。

### 参考文献

- [1] 黄奥,汪宁,顾华志. 300 t 精炼钢包透气砖应用的数学物理模拟[J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32(2): 113-117.
- [2] 张鲁芳. 钢包底吹氩水模型实验研究[J]. 河南冶金, 2006, 14(2): 11-14.
- [3] 朱苗勇,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.
- [4] 李红星,邹文喜,侯自兵. 兴澄特钢新型钢包钢液流动物理模拟研究[J]. 特殊钢, 2011, 32(1): 1-4.
- [5] 周俐,戴伟,曹成虎. 120 t 钢包底吹工艺水模型研究[J]. 特殊钢, 2012, 33(4): 6-9.
- [6] 艾新港,包燕平,吴华杰,等. 钢包底吹氩卷渣临界条件的水模型研究[J]. 特殊钢, 2009, 30(2): 7-9.
- [7] Han J W, Heo S H. Transient Fluid Flow Phenomena in a Gas Stirred Liquid Bath with Top Oil Layer-Approach Numerical Simulation and Water Model Experiments [J]. ISIJ International, 2001, 41(10): 1165-1172.
- [8] Jonsson L. Modeling of Fluid Flow Conditions Around the Slag/Metal Interface in a Gas-stirred Ladle [J]. ISIJ International, 1996, 36(9): 1127-1134.

李文双(1987-),男,硕士研究生,冶金工艺和理化研究。

收稿日期:2012-12-17