

· 试验研究 ·

## 兴澄特钢新型钢包钢液流动物理模拟研究

李红星<sup>1</sup> 邹文喜<sup>1</sup> 侯自兵<sup>2</sup> 安邦<sup>2</sup> 任振海<sup>1</sup> 杜建峰<sup>1</sup> 朱惠刚<sup>1</sup> 成国光<sup>2</sup>

(1 兴澄特种钢铁有限公司, 江阴 214432; 2 北京科技大学, 北京 100083)

**摘要** 通过几何相似比1:3.4的水模型对41~45 t原有圆形钢包和新型钢包冶金特性进行了对比,并得出最佳吹Ar的位置。结果表明,原有圆形钢包高径比较大、混匀时间较长并且工艺稳定性不高;新型钢包降低了高径比,混匀时间显著缩短。同时发现新钢包底部使用单透气砖吹气比双透气砖吹气效果更好。生产实践表明,新型钢包加碳粉后混匀时间从原来的8~10 min减少到4 min,水口自动开浇率由80%提高至95%以上,钢材中大颗粒夹杂出现率由原来的3%降至1.5%以下。

**关键词** 新型钢包 钢液流动 水模型 混匀时间

## A Study on Physical Simulation for Liquid Flow in a New-Type Ladle at Xingcheng Special Steel

Li Hongxing<sup>1</sup>, Zou Wenxi<sup>1</sup>, Hou Zibing<sup>2</sup>, An Bang<sup>2</sup>, Ren Zhenhai<sup>1</sup>, Du Jianfeng<sup>1</sup>, Zhu Huigang<sup>1</sup> and Cheng Guoguang<sup>2</sup>  
(1 Xingcheng Special Steel Co Ltd, Jiangyin 214432; 2 University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** Comparison between the metallurgical characteristics of 41~45 t original circular ladle and new-type ladle has been carried out by using geometric similarity ratio 1:3.4 water model and the optimum location of argon blowing is obtained. Results show that for original ladle the height-diameter ratio is rather large, the mixing time is longer and the process isn't stable; and for new ladle the height-diameter ratio decreases and the mixing time reduces obviously. While it is found that the blowing effect of single porous brick is better that of double porous bricks at new-type ladle bottom. Production practice indicates that with using new-type ladle the mixing time after adding carbon powder decreases from original 8~10 min to 4 min, the nozzle auto-open pouring ratio increases from 80% to more than 95%, and the large inclusion occurrence ratio in steel products decreases from original 3% to 1.5%.

**Material Index** New-Type Ladle, Liquid Steel Flow, Water Model, Mixing Time

一段时期以来,兴澄特钢花山分厂在钢包精炼过程中出现钢液增碳不稳定、水口自动开浇率低、钢材中常发现大颗粒夹杂物等方面的问题。同时随着电弧炉产量的增加,迫切希望能相应提高钢包的容量,但由于受钢包耳轴的限制,故提出了将原有圆形钢包改造为近似椭圆形的新型钢包。

由于在钢包底部进行吹氩能提高二次精炼的冶金效果,在过去的30多年里对吹氩钢包内的传输过程进行了大量的研究<sup>[1~6]</sup>。本研究在对原有圆形钢包进行钢液流动物理模拟研究的基础上,重点对新型钢包内的钢液流动进行研究,并与前者进行对比。

### 1 物理模型的原理与实验方法

对于原有圆形钢包,实验室采用4个相同的电导率,实验装置如图1所示。在找出原有圆形钢包所存在问题的基础上,提出了把原有圆形钢包改造成为近似椭圆形的新型钢包。由于耳轴位置受到天车宽度的限制,这种近似椭圆形的新型钢包是在原有圆形钢包的两边耳轴部位分别镶入长度为200

mm的直形段而形成的,见图2。原有圆形钢包与新型钢包底部圆形部分半径均为1200 mm,并且在几何相似方面都采用了1:3.4的比例。钢厂原有圆形钢包的装入量最大可以达到45 t,本模型选取装入量41 t和45 t为研究对象。根据几何相似原理,两种装入量对应原有圆形钢包模型的高度分别是545 mm和640 mm,对应新型钢包模型的高度分别是485 mm和550 mm。对于钢包底吹Ar系统来

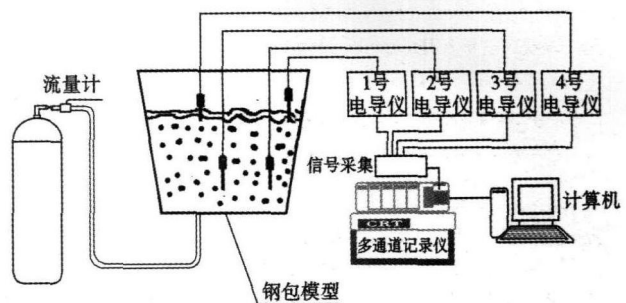


图1 原有圆形钢包水模型实验装置图

Fig. 1 Schematics of water model experimental device for original circular ladle

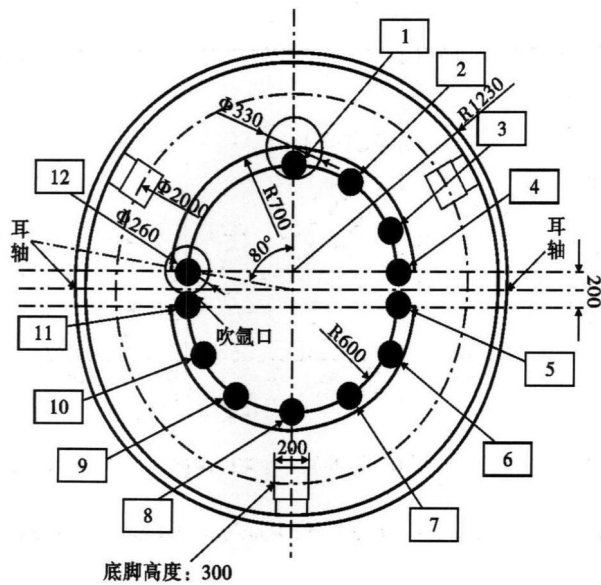


图 2 新型钢包水模型透气砖位置分布示意图

Fig. 2 Schematics of distribution of porous brick location of water model for new-type ladle

说,除了几何相似应保证外,还应该满足动力学相似。本研究用氮气来模拟氩气,采用豆油模拟精炼渣(厚 40 mm)。根据大量实验表明,气液两相间的动力学相似性可用修正的弗鲁德准数来描述,由相似原理可知,模型与原型之间的相似准数应该相等,即:

$$Fr'_m = Fr'_f \quad (1)$$

$$Fr'_f = \frac{\rho_g v^2}{(\rho_l - \rho_g) g H} \approx \frac{\rho_g v^2}{\rho_l g H} \quad (2)$$

式中: $Fr'$ -修正的弗鲁德准数; $v$ -特征速度/( $m \cdot s^{-1}$ ); $g$ -重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ ); $\rho_g$ 、 $\rho_l$ -分别为气体和液体的密度/( $kg \cdot m^{-3}$ ); $H$ -熔池深度/m。利用气体流量的计算方法则有:

$$Q_m = \sqrt{\frac{H_m}{H_f} \left(\frac{d_m}{d_f}\right)^4 \frac{\rho_{Ar} \rho_w}{\rho_{N_2} \rho_{st}}} \cdot Q_f \quad (3)$$

式中: $m$ -模型; $f$ -原型; $Ar$ -氩气; $N_2$ -氮气; $w$ -水; $st$ -钢液。

将相关数据代入则有: $Q_m = 0.0086 Q_f$  (4)

利用式(4)就能得到模型吹气量与原型吹气量的对比关系。

新型钢包的实验装置与原有圆形钢包相似,只是采用 6 台电导率仪同时多点监控测量钢包不同位置电导率的变化。实验时,先打开氮气的阀门,通过调整流量计来控制吹气量。待模型中流动稳定后,将 200 mL 的浓度为 2.683 mol/L 的 KCl 溶液从吹气口的上方通过漏斗加至模型中,每次加入量是固定的,距离液面高度也是固定的。用电导率仪测

量模型中溶液的电导率变化。当电导率的变化量在平衡值  $\pm 5\%$  范围内变化时,就认为此时钢包内部已经达到了混匀状态,把该时间定为钢包在此工况下的混匀时间。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 原有圆形钢包的实验结果与分析

实验时,首先在钢包底部沿直径方向选择了 3 个不同位置安装喷嘴,喷嘴到底部中心间距  $L$  分别为  $0.33 R$ 、 $0.50 R$ 、 $0.67 R$ ,钢厂目前使用的喷嘴到底部中心的间距为  $0.50 R$ 。实验结果图 3 表明,在不同位置进行喷吹的 3 种情况中,喷吹位置在  $0.33 R$  处混匀时间最短,喷吹效果最好。因透气砖在  $0.33 R$  ( $1/3$  半径) 处偏心布置时,钢包内循环流动的横向传递与上部流动发展得比较充分,下部的水平层流也能充分发展,从而使包内的整个流场十分活跃,有利于成分和温度的均匀。当靠近包壁布置喷嘴时(即  $0.67 R$  处),水平的大环流在横向发展,但是循环流将受到包壁影响,局部流动不畅,使动能损失。虽然靠近包壁布置喷嘴对包壁的冲刷比较大,但也不能使透气砖的布置过分靠近中心。因靠近中心布置,是一个中心对称的流动,在靠近包壁的部分流动就比较滞后,从而会促使底部形成一个较大的死区。综合前人研究结果<sup>[7]</sup>以及本实验的数据,认为在单孔喷吹时,该钢包的底吹孔位置距包底中心  $1/3$  到  $1/2$  之间比较合理。

对比图 3(a) 与 (b) 可见,当液面高度降低以后,不同吹气位置情况下的混匀时间均有所缩短。液面高度降低后,气泡区域变得比较活跃,液面的流动变快。对比混匀时间,混匀时间缩短最多的是在  $0.5 R$  处,吹气流量 60 L/h 时混匀时间缩短 27%,可见其稳定性不高。综合分析可得, $0.33 R$  处是一个相对较好的位置。

实验发现,当在顶部加入豆油以后,混匀时间明显延长,对比没有油时最多增加 58%,最少增加 45%。实验过程中还发现,在钢包内进行偏心吹气时,在钢包的上部存在一个环流,在钢包底部主要是水平流动。

### 2.2 新型钢包的实验结果与分析

图 2 显示的为新型钢包模型分布图,采用 6 台电导率仪同时监控测量。透气砖位置的方案首先保持目前正在使用的透气砖的半径位置不变,然后在同半径不同弧形上均匀分布不同的吹气点。测量分为单透气砖和双透气砖两类。对于单透气砖,考虑到对称性和以前的方案,在方案选取上首先分别对

比 4、6、7、8 号的合理性。从图 4 可见, No6 方案比其他方案的混匀时间相对较短。随着吹气量增加, 不同方案的混匀时间都有一定的缩短, 但是随着吹气量的增加, 吹气量对混匀时间的敏感程度降低。

图 5 为 No6 方案的优化结果。由此可知, 在 No6 位置吹气时, 最佳的吹气位置应该在半径 0.33 ~ 0.50 R 处, 该位置的混匀时间比较短。

由图 6 可见, 在不同的双透气砖试验方案下, 液面高度在 485 mm 时, 混匀时间分布不很均匀, 也就是流场不够稳定, 对于吹气量比较敏感, 钢包内部某些区域搅动比较强烈。而液面高度在 550 mm 时, 随着吹气量增加, 混匀时间均匀减少。No4-No10 方案的混匀时间最短, No4-No12 方案的混匀时间最长, No4-No8 和 No6-No10 方案的混匀时间居中。No4-No12 处于耳轴位置附近, 对于钢包的搅动局限于一部分, 在远离耳轴的区域搅拌不够。因此 No4-No10 组合在双透气砖吹气中是一个比较理想的方案。

由图 7 可见, 无论液面高度高还是低, 单透气砖吹气方案的混匀时间均明显低于双透气砖吹气中的两个较好方案。同时也可以看出在相近的吹气流量下, No6 方案的各个电导电极位置的浓度曲线均比 No4-No10 和 No6-No10 组合方案的要活跃, No6 方案的各个曲线呈现出明显的波峰和波谷, 说明在内部处于比较活跃的区域, 平均停留时间要短。

研究了在 No6 方案下液面高度为 550 mm, 62 mm 和 31 mm 两个渣层厚度对于混匀时间的影响。研究表明, 随着油的加入混匀时间有所延长, 但油加到一定程度后随着油层厚度的增加, 混匀时间反而缩短。这主要是由于当油层厚

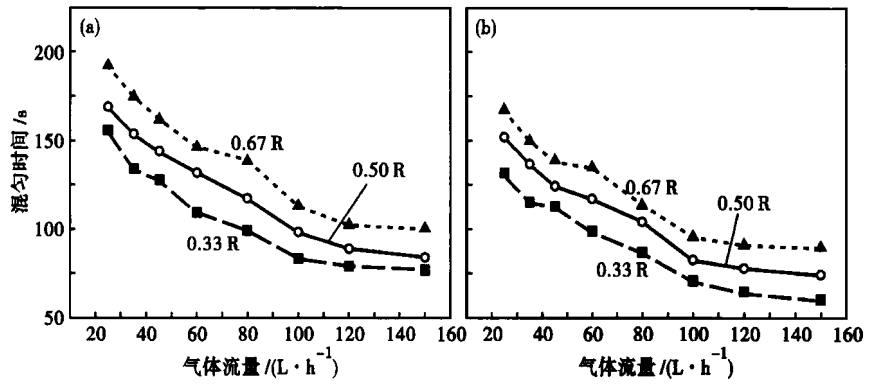


图 3 圆形钢包不同吹气位置吹气量对混匀时间的影响: 液面高度- (a) 640 mm; (b) 545 mm

Fig. 3 Effect of gas flowing rate at different blowing location on mixing time, circular ladle; liquid level- (a) 640 mm; (b) 545 mm

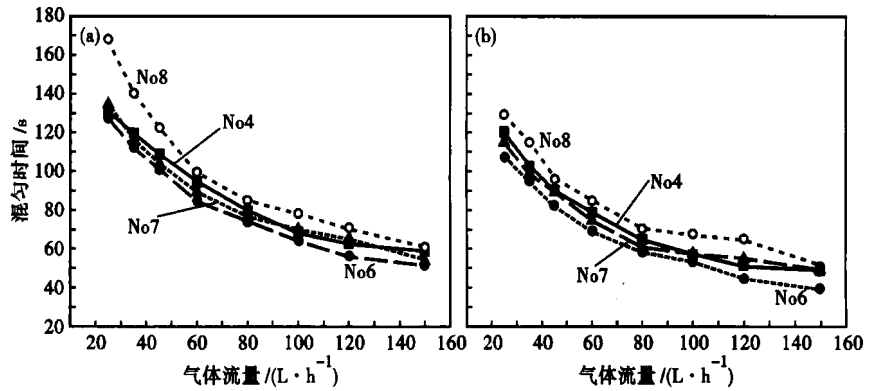


图 4 新型钢包不同吹气位置吹气量对混匀时间的影响: 液面高度- (a) 485 mm; (b) 550 mm

Fig. 4 Effect of gas flowing rate at different blowing location on mixing time, new-type ladle; liquid level- (a) 485 mm; (b) 550 mm

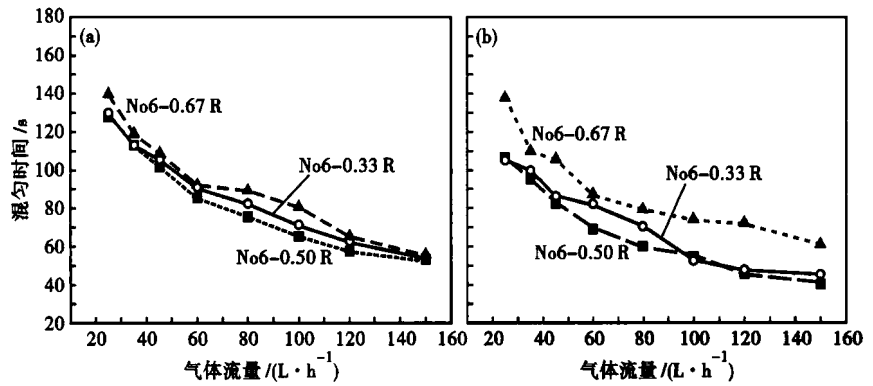


图 5 新型钢包 No6 吹气位置气体流量对混匀时间的影响: 液面高度- (a) 485 mm; (b) 550 mm

Fig. 5 Effect of gas flowing rate at No 6 location of new-type ladle on mixing time; liquid level- (a) 485 mm; (b) 550 mm

度增至一定程度后, 气体吹开油层比较困难, 气体消耗在气-油乳化的能量减少, 从而使大部分的容量都消耗在驱动内部液体的循环流动上面。

### 2.3 原有圆形钢包与新型钢包的对比

由图 8 可见,新型钢包与圆形钢包相比,混匀时间最多缩短了 33%,效果明显。到目前为止,这种近似椭圆形的新型钢包在兴澄特钢已使用了 2 年多时间,运行稳定,不仅增加了产量,而且在钢包内加 C 粉后增碳的混匀时间从原来的 8 ~ 10 min 缩减为 4 min 左右,水口自动开浇率从 80% 上升到了 95% 以上,钢材中大颗粒夹杂物的出现率也从原来的 3% 降低到 1.5% 以下。

### 3 结论

(1)原有圆形钢包工艺稳定性不高,装入量太大,混匀时间相对较长。同时,其合理的吹气位置在包底半径的 1/3 到 1/2 之间,并且在有豆油模拟顶渣的情况下其混匀时间明显变长。

(2)新型钢包在单透气砖下的合理吹气位置为 No6 (0.50 R),双透气砖的合理位置为 No4-No10,并且单透气砖的吹气效果好于双透气砖。同时,在大的装入量下其混匀效果要相对更好,取得了良好的应用效果。

#### 参考文献

- 1 Szekely J, Wang H J, Kaiser K M. Flow Pattern Velocity and Turbulence Energy Measurement and Prediction in a Water Model of and Argon-stirred Ladle. Metallurgical Transactions B, 1976, 7B(2): 287
- 2 Szekely J, Dilawari A H, Metz K. The Mathematical and Physical Modeling of Turbulent Recirculating Flow. Metallurgical Transactions B, 1979, 10B(1): 34
- 3 Szekely J, Lehner T, Chang C W. Flow Phenomena, Mixing and Mass Transfer in Argon-stirred. Ironmaking and Steelmaking, 1979, 6(6): 285
- 4 Hsiao T C, Lehner T, Kellberg B. Fluid Flow in Ladles-experimental Results. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1980, 9(3): 105
- 5 萧泽强. 钢包喷吹时气泡现象的全浮力模型. 东北工学院学报, 1981, 27(2): 67
- 6 成国光, 张 鉴, 佟福生, 等. 钢包底吹氩搅拌卷渣机理的水模型研究. 钢铁研究, 1994, 22(2): 3
- 7 朱苗勇, 萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟. 北京: 冶金工业出版社, 1998

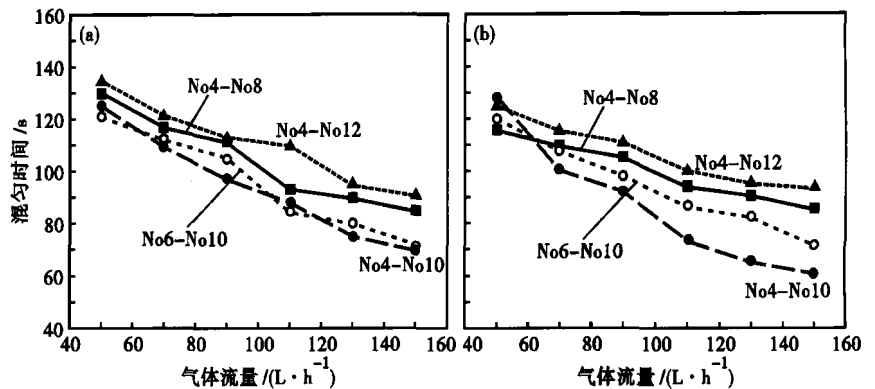


图 6 新型钢包双透气砖吹气流量对混匀时间的影响:液面高度- (a)485 mm; (b)550 mm

Fig. 6 Effect of gas flowing rate with double porous brick on mixing time, new-type ladle; liquid level- (a) 485 mm; (b) 550 mm

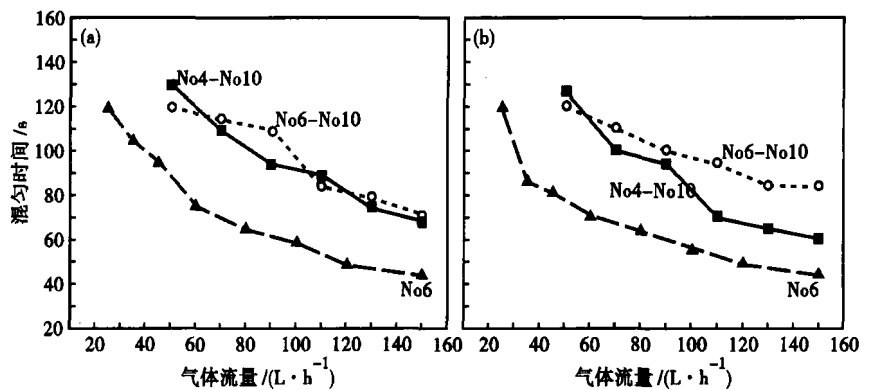


图 7 新型钢包单双透气砖吹气实验结果的对比:液面高度- (a)485 mm; (b)550 mm

Fig. 7 Comparison of gas blowing experimental results between single and double porous brick, new-type ladle; liquid level- (a) 485 mm; (b) 550 mm

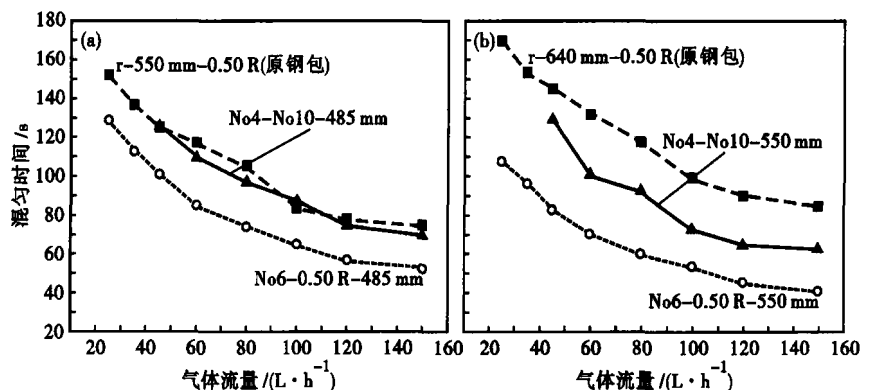


图 8 原钢包和新型钢包混匀时间对比:装入量- (a)41 t; (b)45 t

Fig. 8 Comparison of mixing time between original ladle and new-type ladle; charging amount- (a) 41 t; (b) 45 t

李红星 (1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 2003 年北京科技大学毕业, 炼钢、轧钢以及热处理研究。

收稿日期: 2010-07-30