

• 试验研究 •

# 重钢 5 流方坯连铸中间包控流装置的数理研究

陈登福<sup>1</sup> 佐祥均<sup>1</sup> 郑辉<sup>1</sup> 黄丽<sup>1</sup> 龙木军<sup>1</sup> 廖明<sup>2</sup> 周远华<sup>2</sup>

(1 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030; 2 重庆钢铁集团有限公司, 重庆 400080)

**摘要** 对重钢 24 t 中间包控流装置进行水力学模型试验和数值模拟, 通过测定停留时间分布 (RTD) 曲线和夹杂物的排除量, 研究了不同尺寸湍流控制器对中间包流体流动特性的影响。研究表明, 使用合适的湍流控制器和现有挡墙设置组合, 可以延长水口响应时间及平均停留时间, 提高活塞流区体积分数 30% 及降低死区体积分数 50%, 中间包内流体流动特性得到改善。

**关键词** 中间包 湍流控制器 水模型 数值模拟

## Physical and Mathematical Study on Flow Control Device of Tundish for 5-Strand billet Casting at Chongqing Steel

Chen Dengfu<sup>1</sup>, Zuo Xiangjun<sup>1</sup>, Zheng Hui<sup>1</sup>, Huang Li<sup>1</sup>, Long Mujun<sup>1</sup>, Liao Ming<sup>2</sup> and Zhou Yuanhua<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Material Science and Engineering Chongqing University, Chongqing 400030;

<sup>2</sup> Chongqing Iron and Steel Co Ltd, Chongqing 400080)

**Abstract** Water modeling experiments and numerical simulation for flow control device of 24 t tundish at Chongqing Steel have been carried out to study influence of turbulence inhibitors with different size on fluid flow behavior by measuring residence time distribution (RTD) curves and removal rate of inclusions. The results showed that it was available to increase response time of nozzle and average residence time, raise plug flow volume by 30%, decrease dead zone volume by 50% and improve fluid flow behavior in tundish by using suitable turbulence inhibitor and existing dam combination.

**Material Index** Tundish; Turbulence Inhibitor; Water Modeling; Numerical Simulation

在重钢 5 流连铸机中间包原有单挡墙设置的基础上增设湍流控制器, 以求解决中间包内夹杂物上浮不充分、停留时间短及钢液温度不均匀等问题。重钢 5 流中间包容量 24 t T 型中间包, 在注流区与中心流出水口之间设有一挡墙, 故称为单挡墙中间包。单挡墙高 500 mm, 宽 560 mm; 铸坯 (mm) 为 150×150、150×200, 浇铸周期为 35 min 炉。

### 1 物理模拟试验

#### 1.1 物理模拟试验模型和装置

模型 ( $l_m$ ) 与实型 ( $l_R$ ) 的几何相似比例选为  $l_m/l_R = 1/3$ <sup>[1~5]</sup>。考虑到在此试验条件下, 模型与实型中的流体流动状态均已处于第 2 自模化区。因此, 该系统的流动状态及流速分布与雷诺准数  $Re$  无关, 只要求保证与重力有关的弗鲁德准数  $Fr$  相等即可达到动力相似。 $Fr$  准数相等可以确定模型与实型中流体的速度、流量、平均停留时间的关系:

$$\begin{aligned} \text{由} \quad & Fr_m = Fr_R \\ \text{即} \quad & \frac{V_m}{l_m} = \frac{V_R}{l_R} \end{aligned} \quad (1)$$

得速度比  $\frac{V_m}{V_R} = \sqrt{\frac{l_m}{l_R}} = \sqrt{\frac{1}{3}} = 0.577$  (2)

流量比  $\frac{Q_m}{Q_R} = \frac{V_m l_m^2}{V_R l_R^2} = 0.577 \times \left(\frac{1}{3}\right)^2 = 0.064$  (3)

平均停留时间比

$$\frac{\bar{t}_m}{\bar{t}_R} = \frac{l_m/V_m}{l_R/V_R} = \frac{l_m V_R}{l_R V_m} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{0.577} = 0.578 \quad (4)$$

式中:  $m$ -模型;  $R$ -实型;  $g$ -重力加速度;  $l$ -特征长度;  $V$ -流体速度;  $Q$ -流体流量;  $\bar{t}$ -流体平均停留时间。

中间包模型和湍流控制器用透明有机玻璃制成。钢包注入中间包的流量和中间包 5 个水口流出的流量按流速 3.0 m/min 和断面为 150 mm×150 mm 小方坯的浇铸流量换算。其中模型流量钢包水口为 1244.36 L/h, 中间包水口为 248.87 L/h。在工作液面为 550 mm (183 mm) 下的稳流状态进行正交实验。

#### 1.2 试验模拟装置与方案

试验设备如图 1。根据计算, 试验中选取密度为 0.9987 g/cm<sup>3</sup>、直径为 1.004 mm 的塑料粒子对

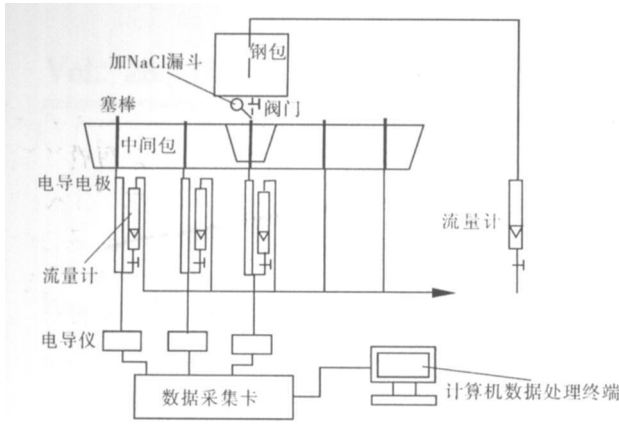


图 1 水模拟装置示意图

Fig 1 Sketch of test apparatus for water modeling

处注入，在中间包出水口处计量过滤器中所捕获粒子数量，并按照 RTD 曲线试验时间进行实验。试验结束后，其余粒子全部从中间包内冲洗干净，确认中间包内没有剩余塑料粒子后，进行下一次实验。所捕获粒子数量即为进入结晶器的夹杂物数量。

1.3 试验结果与分析

试验选取湍流控制器高度、倾角和底面直径作为研究因素，分别取 3 个水平进行正交试验。用饱和 NaCl 溶液作为示踪剂，1 000 mL 次；塑料粒子加入量为 1 000 粒 次，试验结果如表 1。

从表 1 可以看出，单挡墙中间包的 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>水口离注流点较近，所以初次响应时间 ( $t_{in}$ ) 较短，且 3<sup>#</sup>水口  $t_{in}$  比 2<sup>#</sup>水口的稍长。1<sup>#</sup>水口离注流点较远，其  $t_{in}$  较长。另外，2<sup>#</sup>水口浓度衰减到 10% 的时间  $t_t$  和  $\bar{t}$  较短，1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>水口的  $t_t$  和  $\bar{t}$  一般较长。这是因为流体从注流区流出，由于单挡墙的作用，流体直接流向 2<sup>#</sup>水口，流体要绕过挡墙以后才能到达 3<sup>#</sup>水口，1<sup>#</sup>水口离注流点较远，所以  $t_{in}$  和  $\bar{t}$  要长些。

在原有挡墙设置的中间包内，混流区比重都在 50% 以上，死区较大，活塞流比例较小。加设湍流控制器以后，试验数据显示中间包内的流体流动模式得到了一定的改善 (表 1)。特别是方案 5，对流体流场和流动模式改善效果比较明显，其中死区体积减少了 50% 左右，活塞流体积增大了 30% 左右，捕集到塑料粒子数量也明显减少。中间包各水口之间的  $t_{in}$  和  $\bar{t}$  差异也大为减小。这些数据说明湍流控制器对中间包内流场有一定程度的改善。另外，当流体刚开始注入到中间包内的时候，湍流控制器可以有效防止流体飞溅到中间包壁上。

2 数值模拟研究

表 1 3.0 m / m in 拉速下正交实验结果 (液面 550 mm)  
Table 1 Results of orthogonal test at casting rate 3.0 m / m in ( liquid level 550 mm )

| 方案 | 水口序号 | $t_{in} / s$ | $\bar{t} / s$ | $V_m$ | $V_d$ | $V_p$ | 流出口夹杂捕集率 |
|----|------|--------------|---------------|-------|-------|-------|----------|
| 0  | 1    | 22.7         | 220           | 0.63  | 0.22  | 0.15  | 0.145    |
|    | 2    | 16.3         | 223           |       |       |       |          |
|    | 3    | 19.5         | 225           |       |       |       |          |
| 1  | 1    | 45.6         | 210           | 0.67  | 0.16  | 0.17  | 0.101    |
|    | 2    | 40.1         | 207           |       |       |       |          |
|    | 3    | 42.5         | 200           |       |       |       |          |
| 2  | 1    | 46.0         | 203           | 0.68  | 0.15  | 0.17  | 0.096    |
|    | 2    | 43.2         | 209           |       |       |       |          |
|    | 3    | 42.3         | 207           |       |       |       |          |
| 3  | 1    | 35.2         | 198           | 0.70  | 0.16  | 0.14  | 0.110    |
|    | 2    | 30.9         | 189           |       |       |       |          |
|    | 3    | 31.3         | 187           |       |       |       |          |
| 4  | 1    | 41.0         | 190           | 0.66  | 0.17  | 0.17  | 0.120    |
|    | 2    | 38.1         | 200           |       |       |       |          |
|    | 3    | 39.2         | 198           |       |       |       |          |
| 5  | 1    | 43.3         | 189           | 0.67  | 0.11  | 0.22  | 0.082    |
|    | 2    | 40.5         | 210           |       |       |       |          |
|    | 3    | 41.3         | 208           |       |       |       |          |
| 6  | 1    | 43.6         | 210           | 0.65  | 0.19  | 0.16  | 0.113    |
|    | 2    | 40.2         | 205           |       |       |       |          |
|    | 3    | 41.4         | 201           |       |       |       |          |
| 7  | 1    | 42.5         | 210           | 0.64  | 0.19  | 0.17  | 0.118    |
|    | 2    | 38.3         | 206           |       |       |       |          |
|    | 3    | 39.2         | 205           |       |       |       |          |
| 8  | 1    | 45.5         | 215           | 0.67  | 0.16  | 0.17  | 0.125    |
|    | 2    | 41.1         | 207           |       |       |       |          |
|    | 3    | 43.2         | 203           |       |       |       |          |
| 9  | 1    | 43.2         | 213           | 0.68  | 0.17  | 0.15  | 0.117    |
|    | 2    | 39.2         | 201           |       |       |       |          |
|    | 3    | 41.2         | 203           |       |       |       |          |

注：水口序号：1<sup>#</sup>-最靠近中间包窄侧水口；2<sup>#</sup>-中间包中间水口旁边的水口；3<sup>#</sup>-中间包中间水口。 $\bar{t}$ -平均停留时间； $t_{in}$ -初次响应时间； $V_m$ -混合区体积分数； $V_d$ -死区体积分数； $V_p$ -活塞区体积分数。

在物理模型试验的基础上还建立流体力学模型，并用 Fluent 软件对中间包内的流体流动情况进行了数值模拟研究 [2]，并做如下假设：(1) 不考虑中间包内表面波动及表面渣对流动的影响；(2) 钢液流动为不可压缩性稳态流动，流体由纯液相的初始速度来驱动；(3) 针对中间包稳态过程进行研究；(4) 整个过程为一个恒温过程，即密度不变化；(5) 钢液运动属于高雷诺数的紊流流动。

模型边界条件为：

(1) 钢包水口末端为入口，如入口速度  $V_{in}$ 、入口流量  $Q_{in}$ 。

(2) 中间包出口定义为压力出口。

(3) 在中间包内壁面上，对速度、压力使用无滑移边界条件，对  $K$ 、 $\epsilon$  设为零。即有：

$$U = V = W = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_j} = \frac{\partial V}{\partial x_j} = \frac{\partial W}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中:  $U$ 、 $V$ 、 $W$ -各方向上的速度;  $K$ -湍动能;  $\epsilon$ -耗散率。

(4)湍动能和耗散率选用  $K$ - $\epsilon$  双方程模型, 根据文献 [1~8] 可取为:

$$K_m = 0.01 V_m^2 \quad (8)$$

$$\epsilon = 33.33 K^{1.5} \quad (9)$$

式中:  $K_m$ -入口处湍流动能;  $V_m$ -入口处速度。

## 2.2 数值模拟结果分析

对单挡墙中间包和水模试验中各方案进行数值模拟研究, 研究表明, 与水模试验一样, 5<sup>#</sup>湍流控制器的表现最为优异, 图 2 为对单挡墙中间包和方案 5 进行数值模拟的结果。

从图 2 的对比数值模拟结果可以看出: 只有单挡墙的中间包, 其注流形成的湍流区域比较大, 虽然

挡墙起到减轻从钢包水口流出流体对中间包中心流口水口直接冲刷的影响, 但增大了对 2<sup>#</sup>流口水口的影响。同时, 数值模拟结果证明, 物理模拟中 2<sup>#</sup>流口水口的最初响应时间要比 3<sup>#</sup>流口水口短的正确性。在物理模拟试验中还发现, 2<sup>#</sup>流口水口的夹杂物捕集量要高于 3<sup>#</sup>流口水口。图 2(c) 显示, 只有单挡墙的中间包流体流线在 2<sup>#</sup>流口水口比其它流出口更密集, 所以随流体流动不能及时碰撞上浮的微小夹杂物更容易进入 2<sup>#</sup>流口水口。

另外在加设湍流控制器后, 注流区的湍流情况得到了明显的改善。湍流区对中间包内流体流场的影响明显减小, 使得流体流出注流区时相对比较平稳。钢包水口流出流体产生的湍流撞击到注流区壁后产生的反射流也大为减小, 流体表面比较平静, 波动很小。另外从图 2(e)、(f) 可以看出, 湍流对 2<sup>#</sup>流口水口的影响明显减小, 各流口水口的流线也相对

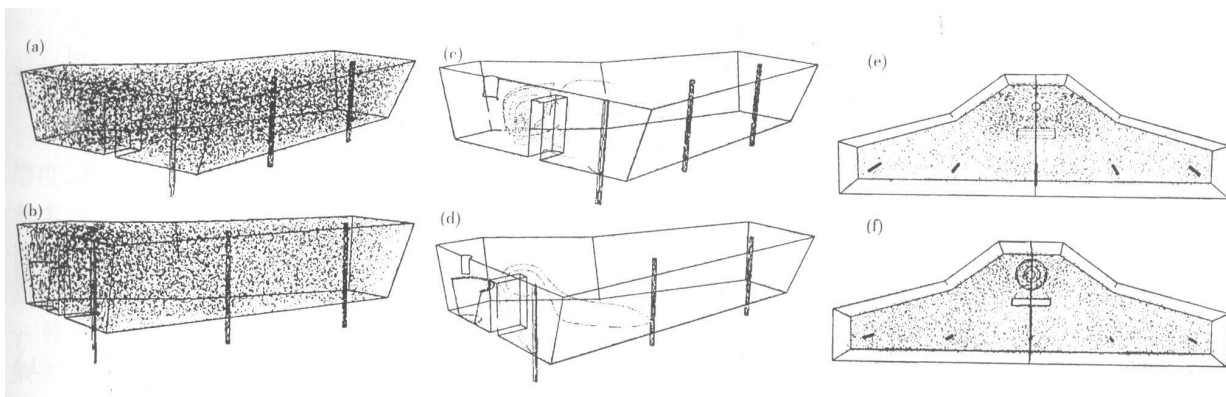


图 2 (a)、(b)-中间包流场; (c)、(d)-中间包流线图; (e)、(f)-中间包 100 mm 液位高度截面图: 单挡墙 - (a)、(c)、(e); 加设 5<sup>#</sup>湍流控制器 - (b)、(d)、(f)

Fig 2 (a)-(b)-Flow field in tundish; (c)-(d)-Flow line in tundish; (e)-(f)-Sectional drawing of flow field at 100 mm liquid level in tundish: with a simple barricade - (a), (c) and (e); with adding 5<sup>#</sup> turbulence inhibitor - (b), (d) and (f)

均匀。

## 3 结论

使用合适的湍流控制器和现有挡墙设置组合可延长水口响应时间和平均停留时间, 提高活塞流区体积分数 30% 及降低死区体积分数 50%, 中间包内流体的流动特性得到了改善。

## 参考文献

- 徐文娟, 韩建勇. 工程流体力学. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002
- 王建军, 包燕平, 曲英. 中间包冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 1999
- 李宝宽, 赫冀成. 炼钢中的计算流体力学. 北京: 冶金工业出版社,

- 曲英, 王利亚. 连铸中间包内钢液流动的数学模型—对中间包内流动过程的分析. 化工冶金, 1985(4): 152
- 张立峰. 纯净钢钢水洁净度的工艺及理论研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 1998
- Heaslip L J, Mclean A, Sommerville I D. Chemical and Physical Interactions during Transfer Operations-Continuous Casting. Vol I. Warrendale PA: ISSA ME, 1983
- Mclean A. The Turbulent Tundish-Contaminator or Refiner. In: Steelmaking Conf Proc 1988, 71: 3
- Wolf M M. Slab Caster Tundish-Contaminator or Refiner. In: Steelmaking Conf Proc 1996, 79: 367

陈登福 (1963-), 博士, 教授, 主要从事连铸技术仿真、冶金资源综合利用和新技术在冶金工程中应用的科研与教学工作。