

## 带过滤器 63 t 中间包钢液流场的物理和数学模拟

赵丹婷<sup>1,2</sup> 刘爱强<sup>2</sup> 仇圣桃<sup>2</sup> 赖朝彬<sup>1</sup>

(1 江西理工大学冶金与化学工程学院, 赣州 341000; 2 钢铁研究总院连铸中心, 北京 100081)

**摘要** 通过采用几何相似比0.29:1的水模型和数学模型分别对(a)湍流抑制器和挡墙+坝(原结构), (b)湍流抑制器, 挡墙+坝和过滤器, 以及(c)湍流抑制器, 挡墙和过滤器3种结构两流板坯连铸中间包钢液流场、温度场和夹杂物运动轨迹进行模拟研究。结果表明, 原中间包结构(a)活塞区体积偏小, 死区体积偏大; 加入通道式钢液过滤器(b)后短路流基本消失, 中间包死区减小6.83%, 钢液的平均停留时间由287.04 s延长至373.76 s, 有利于夹杂物的上浮去除, 且过滤器的加入对钢液的温降影响不大; 用钢液过滤器代替挡坝(c)后优化效果最为明显, 中间包钢液平均停留时间由287.04 s延长至404.26 s, 峰值时间由原来的95.4 s延长至190.8 s, 死区体积由36.10%减小至8.76%。

**关键词** 63 t 中间包 板坯连铸 水模型 停留时间分布(RTD)曲线 通道式钢液过滤器 数值模拟

## Physical and Mathematical Simulation on Flow Field of Liquid in 63 t Tundish with a Filter

Zhao Danting<sup>1,2</sup>, Liu Aiqiang<sup>2</sup>, Qiu Shengtao<sup>2</sup> and Lai Chaobin<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgical and Chemical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000; 2 Center for Continuous Casting, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The simulation research on liquid flow field, temperature field and inclusions moving trace in tundish for two strands slab casting with 3 kinds of structure- (a) turbulence inhibitor and wall + dam (original structure), (b) turbulence inhibitor, wall + dam and channel filter and (c) turbulence inhibitor, wall and channel filter has been carried out by using geometric similarity 0.29:1 water model and mathematical model. Results show that in tundish with original structure (a) the plug flow area is relatively small and the dead area is rather large; by adding channel liquid filter (b) the short circuit flow basically disappears, the dead volume in tundish decreases by 6.83% and the average resident time of liquid increases from 287.04 s to 373.76 s, it is available to remove the inclusions from liquid and the effect of filter on drop in temperature of liquid is not obvious; by using the filter to replace the dam (c) the effect of optimization is particularly obvious, that is the average residence time of liquid in tundish increases from 287.04 s to 404.26 s, the peak time increases from original 95.4 s to 190.8 s and the dead volume decreases from 36.10% to 8.76%.

**Material Index** 63 t Tundish, Slab Casting, Water Model, Residence Time Distribution Curves, Channel Liquid Filter, Mathematical Simulation

随着中间包冶金技术的不断发展和完善, 作为连接钢包与结晶器的过渡容器, 中间包不仅能提高钢液温度和成分的均匀性, 还能起到促进夹杂物的上浮排除和纯洁钢液的作用<sup>[1]</sup>。中间包内钢液的流动状态和平均停留时间对夹杂物去除率有直接的影响, 因此冶金工作者采取了一系列措施来改善中间包流场<sup>[2-6]</sup>, 但夹杂物去除率依然较低。研究发现, 安装过滤器后夹杂物去除率显著增大<sup>[7-9]</sup>, 过滤器不仅能改善流场, 而且为多孔形状, 增加了夹杂物被过滤器吸附的可能性, 所以安装过滤器对更好地混匀中间包内钢液、提高夹杂物上浮去除率具有重要意义。

本文以国内钢厂两流板坯连铸中间包为研究对象, 采用物理模拟实验和数值模拟相结合的方法研究过滤器对中间包内流场、温度场及夹杂物运动轨迹的影响。

### 1 物理模拟实验

#### 1.1 实验原理及方法

中间包模型与原型中液体流动相似的基本条件是几何相似和动力相似<sup>[10]</sup>。由于中间包在湍流流动时, 流动过程的雷诺数非常相近, 处于第二自模化区, 所以只要保证模型和原型的  $Fr$  相等即可保证动力相似, 即:

通讯作者: 仇圣桃, 博士, 教授级高工, 钢铁研究总院国家连铸中心, 北京 100081

E-mail: qwist@vip.sina.com

$$Fr_p = \frac{u_p^2}{gl_p} = \frac{u_m^2}{gl_m} = Fr_m \quad (1)$$

$$\text{可推出: } Q_m = Q_p \cdot \lambda^{5/2} \quad (2)$$

式中:  $u$ - 特征速度/ $(m \cdot s^{-1})$ ;  $l$ - 特征长度/ $m$ ;  $g$ - 当地的重力加速度/ $(m \cdot s^{-2})$ ;  $Q$ - 中间包内钢液体积流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$ ;  $\lambda$ - 几何相似比。下标  $p$  和  $m$  分别表示原型和模型。

本实验根据实验室条件选取几何相似比  $\lambda = 0.29$ , 以 63 t 两流板坯连铸中间包为原型, 现场铸坯断面尺寸为  $1150 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$ , 拉坯速度  $0.8 \text{ m/min}$ , 具体工艺参数见表 1。

本实验采用“刺激-响应”的方法, 待中间包液面平稳后在入口处迅速加入含有定量黑色墨水的 300 mL 饱和 NaCl 溶液作为脉冲信号, 在出口利用电导率仪采集电导率数据, 采集时间为流体在中间包内理论平均停留时间的 2 倍, 并用摄像机拍摄黑墨水在中间包内的运动轨迹, 最后根据 Sahai 提出的修正混合理论模型<sup>[11]</sup> 计算出中间包内活塞区比例、死区比例和全混区比例。

### 1.2 实验方案

实验过程设计了 3 种控流装置, 方案 1 (原方

案) 采用湍流抑制器、挡墙 + 挡坝的控流方式, 方案 2 在方案 1 的基础上在挡墙下方安装过滤器, 方案 3 则去掉挡坝, 只在挡墙下方反方向安装过滤器。

### 1.3 实验结果与分析

表 2 为方案 1、2、3 的实验结果。从表 2 可看出, 原中间包控流装置 (方案 1) 峰值时间短, 仅为 95.4 s, 活塞流体积仅占有有效容积的 19.26%, 死区体积较大, 占有有效容积的 36.10%, 可见, 原方案的控流效果并不理想, 对中间包内控流装置进行优化是很有必要的。

方案 2 在方案 1 的基础上安装钢液过滤器后, 峰值时间和钢液实际停留时间分别延长至 168.0 s 和 373.76 s, 死区体积由方案 1 的 36.10% 减小至 16.8%, 说明安装过滤器后中间包内流场得到明显改善。

方案 3 优化效果最明显, 峰值时间较长, 由方案 1 的 95.4 s 延长至 190.8 s, 说明钢液从长水口注入以后和原中间包内钢液混合较好后才从出水口流出。钢液的实际平均停留时间延长至 404.26 s, 活塞流体积由方案 1 的 19.26% 延长至 28.73%, 死区体积减小至 8.76%, 中间包容积得到有效利用, 钢液的流动路径延长, 有利于夹杂物的上浮去除。

图 3 为方案 1、2、3 RTD 曲线图。方案 1 曲线呈窄高形, 出现多峰和尖峰, 说明存在短路流, 曲线上升很快, 且峰值较大。方案 2、3 曲线尖锐程度明显改善, 呈宽矮形, 曲线上升较缓, 多峰和尖峰基本消失, 峰值小, 说明不存在短路流, 而且长水口流入的钢液和原中间包内钢液混合均匀后从出水口流出, 所以过滤器的加入有利于中间包内钢液流动状态

表 1 中间包原型与模型的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of prototype and model of tundish

工艺参数	原型	模型
工作液面高度/mm	1 000	290
体积流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	25.6	1.16
长水口插入深度/mm	200	58
长水口内径/mm	90	26.1
出水口内径/mm	70	20.3

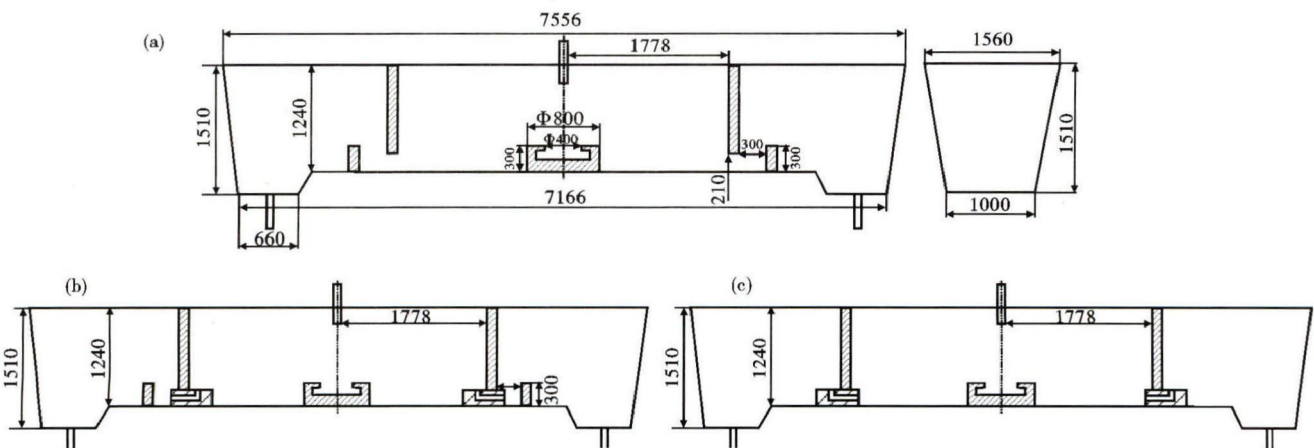


图 1 中间包水模型控流装置布置图: (a) 方案 1 (原结构中间包) - 湍流抑制器和挡墙 + 挡坝; (b) 方案 2 - 湍流抑制器和挡墙 + 挡坝 + 过滤器; (c) 方案 3 - 湍流抑制器 + 挡墙 + 过滤器

Fig. 1 Layout of control devices in water model of tundish with scheme No1, original tundish structure- turbulence inhibitor and wall + dam (a); scheme No2, turbulence inhibitor and wall + dam + filter (b) and scheme No3, turbulence inhibitor + wall + filter

的改善。方案 3 峰值时间、钢液的实际停留时间最长,死区体积最小,优化效果最好。

原方案中间包长水口注入钢液,冲击到抑湍器底部,在抑湍器内壁的引导下上浮至中间包液面,并向挡墙方向流动,钢液遇挡墙后下沉并流至挡墙与挡坝之间,后在挡坝引导下向上流向液面,钢液刚到达液面便在出水口的抽吸作用下直接向下流向中间包出口,中间包上层存在较大死区,不利于夹杂物上浮。

优化(方案 3)中间包安装过滤器后分成注流区和浇注区,钢液只能通过过滤器通道由注流区流向浇注区。新注入的钢液在注流区充分混合,并在过

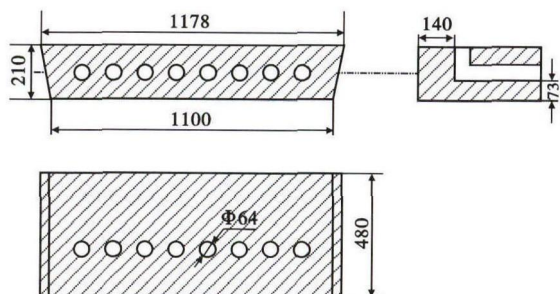


图 2 通道式钢液过滤器结构图  
Fig. 2 Schematics of structure of channel liquid filter

表 2 水模型中间包控流方案 1(a), 2(b) 和 3(c) 的实验结果  
Table 2 Experiment results of water model of tundish with flow control scheme No1 (a), No2 (b) and No3 (c)

方案	控流装置	滞留时间/s	峰值时间/s	实际平均停留时间/s	活塞区/%	死区/%	全混区/%
1(a)	挡墙 + 挡坝	77.6	95.4	287.04	19.26	36.10	44.64
2(b)	挡墙 + 挡坝 + 过滤器	66.4	168.0	373.76	26.09	16.80	57.11
3(c)	挡墙 + 过滤器	63.8	190.8	404.26	28.73	8.76	62.51

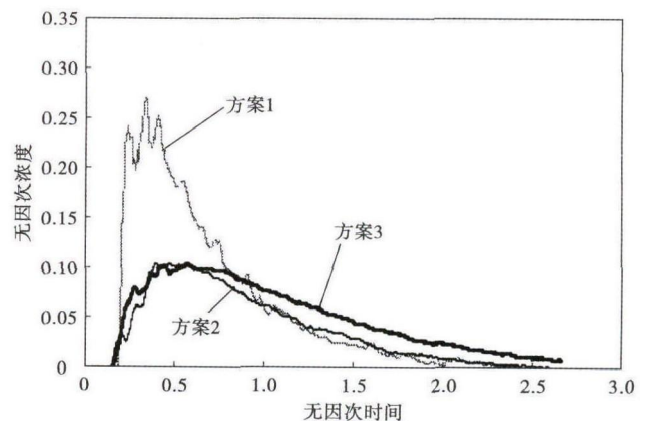


图 3 中间包水模型方案 1、2、3 RTD 曲线图  
Fig. 3 Residence time distribution curves of water model of tundish by scheme No1, No2 and No3

滤器通道的作用下向上流动,到达液面后并没有因出水口的抽吸直接流向水口,而是保持一定的流速

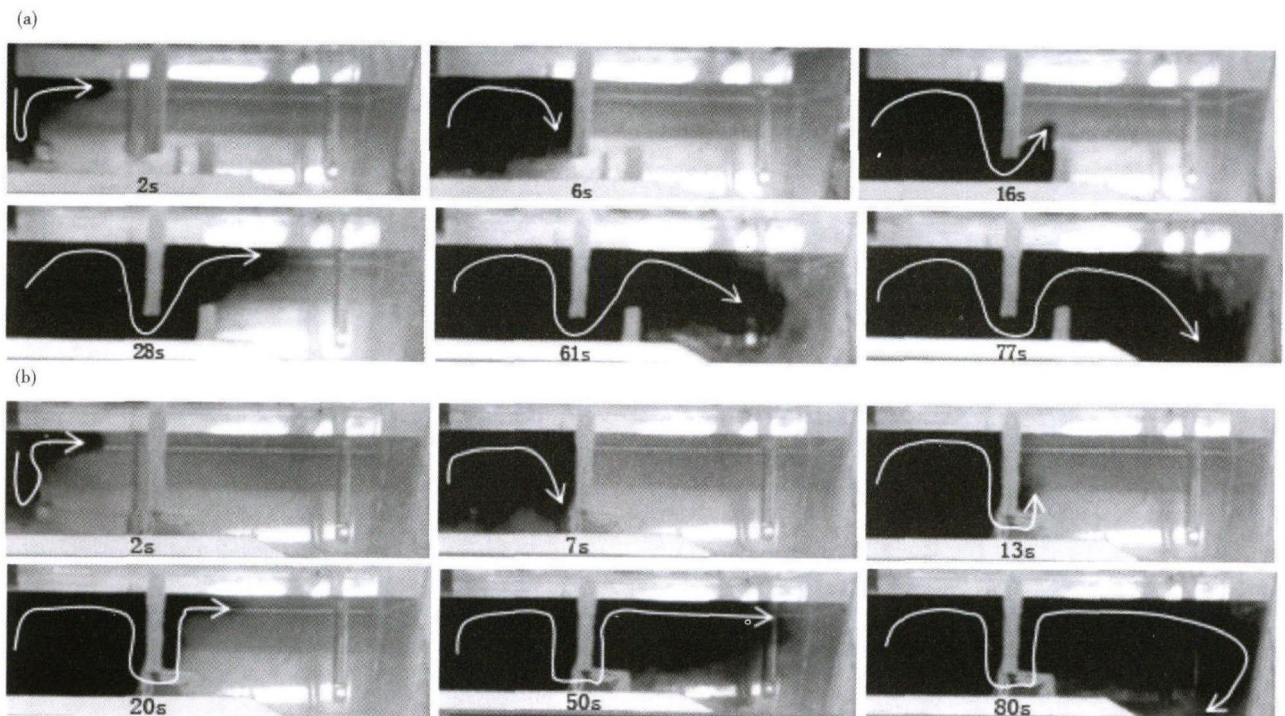


图 4 优化前[(a)原中间包,方案 1]后[(b)方案 3]中间包不同时刻流场图  
Fig. 4 Diagram of flow field in tundish at different time before [(a) original tundish, scheme No1] and after [(b) scheme No3] optimization

冲击中间包窄面后流向出水口,中间包内死区体积小,钢液的流动路径长,延长了钢液的平均停留时间,有利于夹杂物的上浮去除。

综上所述,由物理模拟实验可知,方案3即去掉挡坝、只在挡墙下方反方向安装过滤器为最佳方案。

## 2 数值模拟

### 2.1 数学模型

采用数值模拟方法模拟实际钢液在中间包内的流动状态,原型与模型比例为1:1,钢液在中间包内的流动行为可用连续性方程、动量方程即 Navier-Stokes 方程、 $k-\varepsilon$  双方程、能量方程来描述<sup>[12]</sup>。边界条件设置为:

(1)中间包入口设置为速度入口,入口速度方向垂直于入口面,入口速度由铸坯断面面积和拉坯速度计算得出。

(2)固体表面即中间包四周壁面及挡墙、挡坝等,均采用无滑移边界条件。

(3)中间包出口设置为流出出口,对称面上,各物理量如  $T$ 、 $U$ 、 $V$ 、 $W$  的法向微商都等于0。中间包液面设置为自由滑移液面,并用指定热通量的方法定义液面的传热条件。

### 2.2 数值模拟结果分析

图5为方案1、2、3出口截面流线图。由图5可以看出,原方案钢液经过挡坝后直接向出口流去,没有形成很明显的贴近液面的流动,钢液很难运动到中间包右上方,挡坝后也存在较大死区,不利于夹杂物的上浮去除。

在方案2的中间包模型中,由于挡墙、过滤器

和挡坝距离较近,钢液遇挡坝后急剧地改变方向,向上流动的趋势更强,沿液面流动的速度更快,中间包右侧的死区非常小,且在中间包窄面和挡墙挡坝的作用下形成了1个较大的旋涡,钢液在液面的停留时间更长,夹杂物上浮条件更好。

方案3钢液在过滤器通道的作用下以较大速度向上流至液面,钢液沿液面流动至中间包窄面后向下流向出水口,中间包内死区体积小,钢液流动平稳,对液面的冲击相对较小,降低了钢液卷渣的可能性,且有足够沿液面的水平流动,更有利于夹杂物被保护渣吸收。

图6为方案1、2、3中间包内夹杂物颗粒( $d = 50\mu\text{m}$ )的运动轨迹。可以看到,方案1夹杂物随钢液注入中间包后有较大一部分随钢液流向出口。方案2在有过滤器的情况下,夹杂物随钢液通过过滤器通道后向液面流动,而且在挡墙和挡坝之间形成回流,夹杂物在中间包内停留时间延长,增大了其与顶面接触的概率,夹杂物几乎都被保护渣吸收。方案3夹杂物运动到注流区后有足够的沿液面的流动,只有一少部分流向出水口。

通过计算可知,钢包长水口钢液注入温度为  $1562\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $1835\text{ K}$ ),方案1(原结构)中间包内钢液最低温度约为  $1506\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $1779\text{ K}$ ),在中间包出口上方钢液顶面靠近壁面处存在较大低温区,钢液温度不均匀。

方案2、3安装了通道式钢液过滤器后,出口处温度分别比方案1仅低了  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,说明通道式钢液过滤器的加入对温降影响不大。方案2温度最低

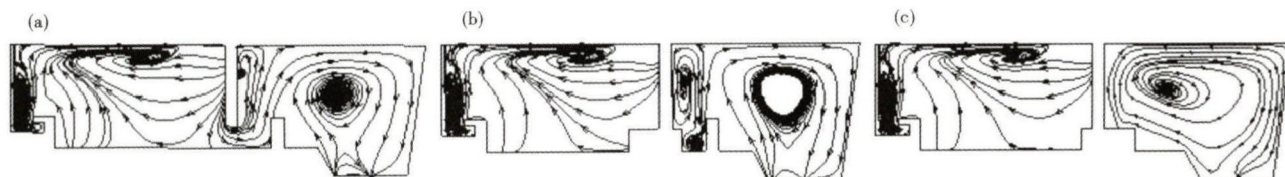


图5 不同控流装置中间包流线图:(a)方案1;(b)方案2;(c)方案3

Fig. 5 Diagram of flow lines in tundish with different flow control devices: (a) scheme No1; (b) scheme No2 and (c) scheme No3

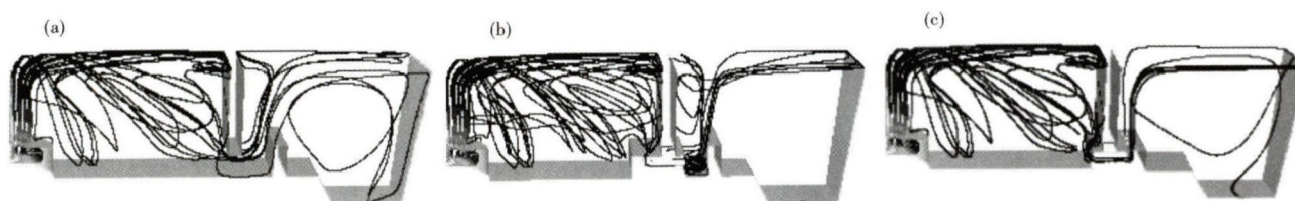


图6 不同控流装置中间包内  $50\mu\text{m}$  夹杂物运动轨迹:(a)方案1;(b)方案2;(c)方案3

Fig. 6 Diagram of moving tracks of  $50\mu\text{m}$  inclusions in tundish with different flow control devices: (a) scheme No1, (b) scheme No2 and (c) scheme No3

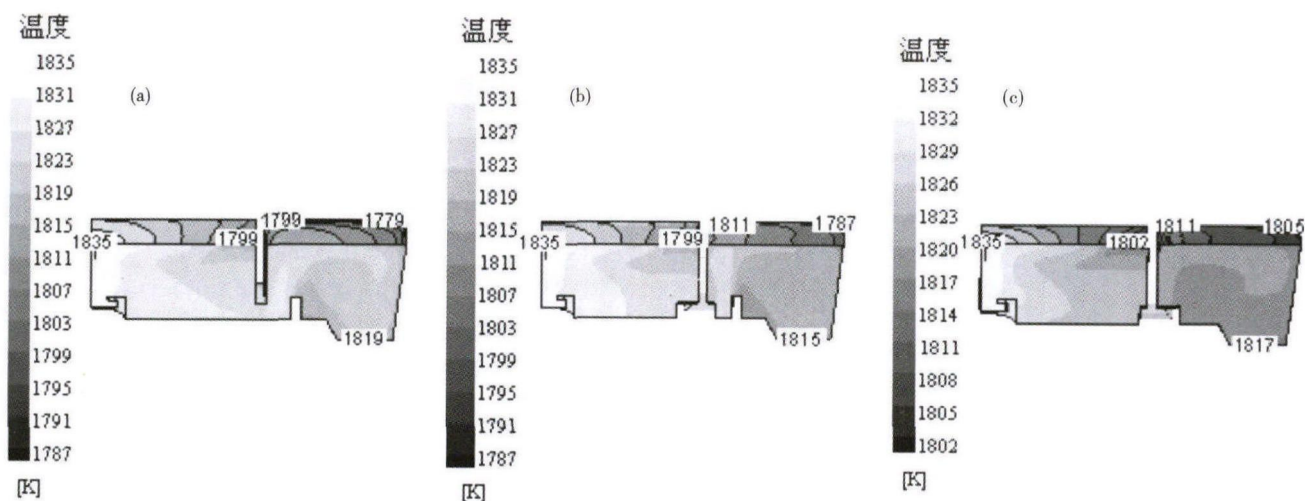


图 7 不同控流装置中间包温度场图:(a)方案 1;(b)方案 2;(c)方案 3

Fig. 7 Diagram of temperature field of liquid in tundish with different flow control devices: (a) scheme No1, (b) scheme No2 and (c) scheme No3

处在钢液顶面两端处,最低温度 $1\ 514\ ^\circ\text{C}$  ( $1\ 787\ \text{K}$ ),方案 3 最低温度出现在注流区顶端,为 $1\ 529\ ^\circ\text{C}$  ( $1\ 802\ \text{K}$ ),高于方案 1、2,中间包内低温区最少,注流区温度分布更加均匀,所以,由数值模拟可知,方案 3 为最优方案。

综上所述,物理模拟实验结果和数值模拟计算结果相一致,方案 3 即去掉挡坝,挡墙下方反方向安装过滤器为最佳方案。

### 3 结论

(1)原型中间包内活塞区比例仅占 19.26%,死区比例达到 36.10%,峰值时间和实际平均停留时间短,不利于夹杂物上浮。

(2)加入过滤器后,中间包内钢液流场得到有效改善,RTD 曲线由窄高形变为宽矮形,峰值时间和平均停留时间均明显延长,活塞区体积增大,死区体积减小,夹杂物上浮条件较好,且过滤器的加入对温降影响不大。

(3)方案 3 即去掉挡坝、挡墙下方反方向安装过滤器为最优方案,峰值时间和实际平均停留时间由方案 1 的 95.4 s 和 287.04 s 延长至 190.8 s 和 404.26 s,活塞区体积增大至 28.73%,死区体积减小至 8.76%,且安装简单,成本低,也便于现场的应用,避免了挡墙和挡坝的耐火材料熔损进入钢液中增加夹杂物含量。

### 参考文献

- [1] 李光强,付勇,陈先红,等. 两流中间包流场的物理模拟与结构优化[J]. 重庆大学学报,2015,38(2): 64-71.
- [2] 李洋,金焱,冯学武,等. 挡墙结构对 46 t 中间包钢液流动特性影响的数值和物理模拟[J]. 特殊钢,2014,35(5): 15-18.
- [3] 田永华,包燕平,李怡宏,等. 80t 两流板坯连铸中间包挡墙结构优化研究[J]. 钢铁钒钛,2013,34(2): 67-72.
- [4] 李怡宏,包燕平,赵立华,等. 多流中间包导流孔对钢液流动轨迹的影响[J]. 钢铁,2014,49(6): 37-42.
- [5] 苑品,包燕平,崔衡,等. 板坯连铸中间包挡坝结构优化的数学与物理模拟[J]. 特殊钢,2012,33(2): 14-17.
- [6] 冯捷,唐德池,包燕平,等. 控流装置对板坯中间包流场优化的影响[J]. 特殊钢,2010,31(2): 17-20.
- [7] 卢艳青,张崇民,戴云朵,等. 中间包 CaO 质陶瓷过滤器滤除夹杂效果的研究[J]. 冶金能源,2003,22(6): 9-11.
- [8] 陈阳,张炯明. 板坯连铸中间包内夹杂物去除的数值模拟[J]. 钢铁研究,2014,42(1): 22-26.
- [9] 赵新宇,张炯明,吴苏州,等. 带过滤器中间包钢水夹杂物行为的非稳态模拟[J]. 北京科技大学学报,2011,33(5): 539-543.
- [10] 王建军,包燕平,曲英. 中间包冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2001. 4-6.
- [11] Sahai Y, Emi T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundish[J]. ISIJ International,1996,36(6): 667-672.
- [12] 蒋国璋,孔建益,李公法,等. 中间包温度分布的模拟研究[J]. 钢铁,2007,42(4): 27-29.

赵丹婷(1991-),女,硕士研究生(江西理工大学),2014年吉林大学(本科)毕业,中间包冶金研究。

收稿日期:2016-07-22