

## 五流大方坯中间包控流装置优化的数值和物理模拟

罗荣华<sup>1</sup> 倪红卫<sup>1</sup> 张 华<sup>1</sup> 赵中福<sup>2</sup> 陈迪庆<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 武汉钢铁股份公司条材总厂一炼钢分厂, 武汉 430083)

**摘 要** 针对 280 mm × 350 mm 五流连铸 35 t 中间包第 3 流铸坯质量探伤不合格率较高的问题, 采用数值模拟和几何相似比 1:3 水模型模拟, 研究了控流装置对中间包钢液流动特性的影响, 优化中间包流场。结果表明, 原型中间包控流装置结构不合理, 各流一致性差, 尤其第 3 流短路流明显; 采用中端开两孔的 2<sup>#</sup> 挡墙 + 圆形加檐的 B 型湍流控制器后, 各流一致性明显改善, 第 3 流短路流消除, 其平均停留时间延长了 242.1 s, 同时中间包活塞区体积增加了 5.7%, 死区体积减小了 1.1%, 冲击区钢液流动平稳。

**关键词** 中间包 数值模拟 水模型 流场 平均停留时间

## Numerical and Physical Simulation on Optimization of Flow Control Devices in Tundish for Five-Strand Bloom Casting

Luo Ronghua<sup>1</sup>, Ni Hongwei<sup>1</sup>, Zhang Hua<sup>1</sup>, Zhao Zhongfu<sup>2</sup> and Chen Diqing<sup>2</sup>

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 No.1 Steelmaking Division, General Strip Plant, Wuhan Iron and Steel Co Ltd, Wuhan 430083)

**Abstract** In accordance with the status of high reject rate in nondestructive test of third strand bloom casting with a 35 t tundish for five-strand 280 mm × 350 mm blooms, the effect of different flow control device on flow characteristics of liquid in tundish has been studied by numerical simulation and water model simulation with geometrical similarity ratio 1:3 to optimize the tundish flow field. Results show that the structure of flow control device of original tundish is not reasonable, the each strand is out of step especially the short circuit flow in No.3 strand is obvious; after using 2<sup>#</sup> baffle with two diversion holes at wall middle + round B type turbulence controller with eaves, the each strand is in step and the short circuit flow in No.3 strand is eliminated its average residence time is prolonged by 242.1 s, and in tundish the plug zone flow volume increases by 5.7%, the dead zone volume decreases by 1.1%, the impact zone flow is steady and smooth.

**Material Index** Tundish, Mathematical Simulation, Water Model, Flow Field, Average Residence Time

连铸中间包流场对钢液中非金属夹杂物的上浮去除以及温度和成分的均匀有着非常重要的影响<sup>[1]</sup>。对于多流连铸中间包, 控流装置结构不合理不仅会造成钢液流动状态不理想, 而且会导致各流间流动特性的一致性较差, 直接影响到各流铸坯洁净度的稳定性和生产的稳定顺行。采用数值模拟和水力学物理模拟的方法, 利用停留时间分布 (RTD) 曲线定量描述中间包内流体的流动特性已经成为了冶金学者评价中间包流场的重要手段<sup>[2]</sup>。早期的 RTD 曲线分析模型仅适用于单流中间包, 目前国内诸多学者也针对多流中间包提出了不同的分析模型<sup>[2-5]</sup>, 并应用于实际研究, 但对 RTD 曲线分析模型还未形成统一的认识。

武钢第一炼钢厂 5 机 5 流连铸机生产中发现第 3 流铸坯因内部夹杂引起的探伤不合格率明显高于

其他 4 流, 说明该五流中间包流场不合理, 造成各流间钢液存在明显的不均匀性。本研究结合该厂实际生产情况, 应用数值模拟和水力学物理模拟, 利用 RTD 曲线, 研究控流装置对中间包流场的影响, 确定最佳控流方案。基于多种多流中间包 RTD 曲线分析模型比较, 本研究利用潘宏伟提出的分析模型<sup>[4]</sup>, 将实际流动模式与理想活塞流动之间的偏差用方差描述来定量计算多流中间包钢液中各种流动状态的体积分数, 同时引用郑淑国对各流流动特性一致性的判别方法<sup>[6]</sup>, 定量评价中间包各流流动特性的一致性。

### 1 研究方法

#### 1.1 数值模拟

假设钢液为不可压缩的粘性流体, 忽略温度对

钢液密度的影响,忽略渣层对钢液流动的影响。中间包内钢液为单相稳态流动,示踪剂的流动是一个非稳态传质过程。描述钢液三维湍流流动的方程包括连续性方程、动量方程、湍流模型采用  $k-\varepsilon$  双方程,描述钢液中示踪剂扩散的方程为湍流传质方程,以上基本方程的具体形式可以参考文献[7]。

现场使用的原型中间包结构如图 1 所示。模拟时根据中间包实际尺寸建立模型,取中间包 1/2 作为计算区域,采用 CFD 商业软件对中间包数学模型进行数值求解,计算的边界条件、初始条件以及 RTD 曲线求解的方法参考文献[8,9]。为了保证计算精度,采用正交 6 面体网格,网格总数控制在 120 000 个左右。

### 1.2 物理模拟

水模型实验的理论基础是原型和模型的几何相似和动力相似。实验相似比为 1:3,物理模型采用有机玻璃制作,实验装置如图 2 所示。

有研究表明<sup>[10,11]</sup>,在湍流流动的情况下中间包不论几何形状和尺寸大小,流动过程的湍流的雷诺数  $Re$  都是十分相近的。因此,只需保证模型与原型的  $Fr$  准数相等即可达到动力相似,即有:

$$v_p^2/gL_p = v_m^2/gL_m \quad (1)$$

式中: $p, m$ - 原型和模型; $v, L, g$ - 流速、特征长度和重力加速度。由上式可得,模型与原型的流速比为 0.577,流量比为 0.061 45,停留时间比为 0.577。

采用“刺激-响应”实验技术。将 50 mL 的 20% KCl 溶液快速注入长水口中,同时在出口处设置电导探头测量各流电导随时间的变化,通过信号转换系统实现计算机数据采集和保存。考虑到中间包结构对称,只对第 3、4、5 流进行数据采集。

### 1.3 RTD 曲线分析

根据数值模拟得到的 RTD 曲线,利用多流中间包 RTD 曲线分析模型<sup>[4]</sup>可计算中间包各流和总体平均停留时间、流动状态的体积分数。同时采用各流的示踪剂浓度的总体平均标准差  $\bar{S}_N$ <sup>[6]</sup> 来定量评价各流流动特性的一致性,  $\bar{S}_N$  越小,表示各流流动特性的一致性越好,其值由式(2)算出。

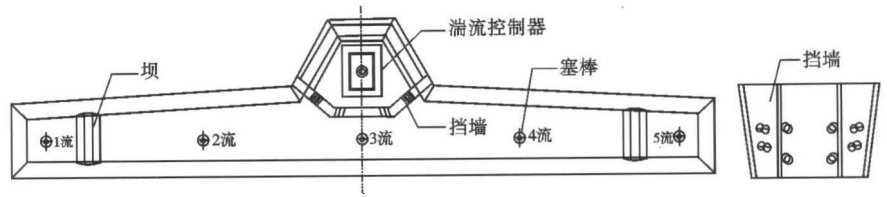


图 1 原型中间包结构  
Fig.1 Structure of original tundish

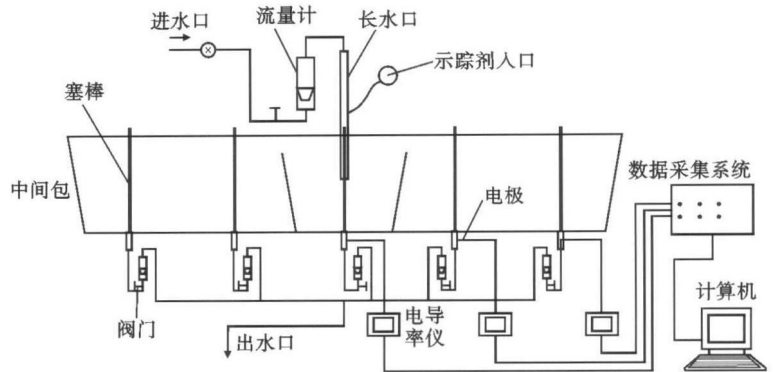


图 2 实验装置示意图  
Fig.2 Schematic diagram of experimental equipment

$$\bar{S}_N = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z \sqrt{\sum_{j=1}^N [C_i(\theta_j) - \bar{C}(\theta_j)]^2 / (N-1)} \quad (i=1 \sim N, j=1 \sim Z) \quad (2)$$

### 1.4 研究方案

本研究模拟的大方坯连铸机主要生产 U71Mn、U75V 等重轨钢,铸坯断面尺寸为 280 mm × 380 mm,典型拉坯速率 0.7 m/min,中间包工作容量为 35 t。根据之前工作<sup>[9]</sup>,坝对该 5 流中间包钢液流动特性的影响有限,故本文主要考察挡墙和湍流控制器结构的影响。中间包挡墙均为 U 型挡墙,导流孔布置有 0# 现场原型结构,1# 中墙不开孔侧墙开 2 方孔,2# 中墙开 2 孔侧墙各开 2 方孔 3 种方式,湍流控制器采用矩形无檐 (Type A) 和圆形加檐 (Type B) 两种结构,方案设计见表 1。

表 1 中间包原型和优化控流装置方案

Table 1 Flow control device for original tundish and optimum flow control device schemes for simulated tundish

方案	控流装置	
	挡墙	湍流控制器
A0 (原型)	0#- 中墙两排 4 个圆孔,两侧墙各 2 个圆孔	A- 矩形无檐
A1	1#- 中墙不开孔,两侧墙各开 2 个方孔	A- 矩形无檐
A2	2#- 中墙上部开 2 个圆孔,侧墙各开 2 个方孔	A- 矩形无檐
B1	1#- 中墙不开孔,两侧墙各开 3 个方孔	B- 圆形加檐
B2	2#- 中墙上部开 2 个圆孔,两侧墙各开 2 个方孔	B- 圆形加檐

2 结果与分析

2.1 数值模拟结果验证

原型方案 A0 的数值模拟与水模型 RTD 曲线比较如图 3 所示,各控流方案中间包第 3 流和总体平均停留时间两者误差比较见表 2。

从图 3 可以看出,数值模拟和水模型两种不同方式得到的各流 RTD 曲线在变化趋势上保持了很

好的一致性,中间包各流响应时间、峰值时间以及峰值浓度都比较吻合。由表 2 可知,水模型实验的中间包总体平均停留时间(换算值)略大于数值模拟结果,误差最大方案 A0 仅为 7.5%,其它方案都在 4.2% 以下,两者之间的相对误差在合理范围之内。综合以上分析,数值模拟与水模型换算值的 RTD 曲线结果吻合较好,数值模拟结果能准确反映出中间

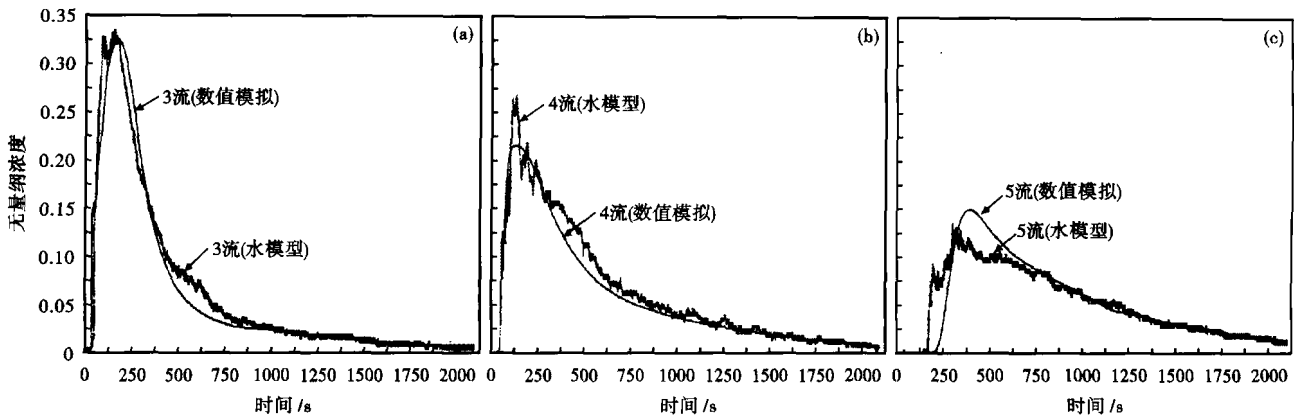


图 3 原方案 A0 数值模拟和水模型的停留时间分布 (RTD) 曲线比较:(a)3 流;(b)4 流;(c)5 流

Fig. 3 Comparison between math simulation and water model residence time distribution curves for original scheme A0: (a) 3- strand; (b) 4- strand; (c) 5- strand

表 2 中间包平均停留时间数值模拟与水模型(换算值)的误差比较

Table 2 Comparison of deviation of average residence time in tundish between math simulation and water modeling (scaled value)

方案	水模型实验值/ 0.577 s	数值模拟值/ s	相对误差/ %
A0	603.8	561.7	7.5
A1	617.7	594.6	3.9
A2	616.3	591.6	4.2
B1	610.4	591.2	3.2
B2	618.5	594.2	4.1

包钢液实际流动状态。

2.2 计算结果与分析

使用不同控流方案数值模拟所得的中间包 RTD 曲线分析结果见表 3。

2.3 原型中间包

原型中间包的 RTD 曲线和流场如图 4 所示。

从表 3 和图 4(a) 可以看出,原型中间包的第 3 流的响应时间和峰值时间均较短,分别只有 21.0、162.5 s,并且峰值浓度远高于其它两流;而远端流第 5 流的响应时间和峰值时间则远滞后于第 3、4 流。结合图 4(b) 可知,第 3、4 流间流线十分密集,说明第 3 流附近钢液分配充足,流动较强,钢液容易从中墙下部两个导流孔穿出后直接从第 3 流流出,

表 3 水模型实验各方案停留时间分布 (RTD) 曲线分析结果  
Table 3 Analysis results of residence time distribution curves for each scheme by water modeling experiment

方案	出水口	$T_r/s$	$T_p/s$	$T_a/s$	$T_{a-}/s$	$V_p/\%$	$V_d/\%$	$V_m/\%$	$\bar{S}_N$
A0	3 流	21.0	162.5	367.7					
	4 流	42.5	134.0	492.5	561.7	49.2	14.0	36.8	0.022 6
	5 流	199.0	389.0	728.0					
A1	3 流	83.5	214.5	678.6					
	4 流	48.0	142.5	576.3	594.6	53.3	13.7	33.0	0.007 8
	5 流	81.5	204.5	570.8					
A2	3 流	67.0	213.0	626.3					
	4 流	48.0	133.0	589.4	591.6	53.1	13.6	33.3	0.005 3
	5 流	86.5	194.0	576.5					
B1	3 流	78.5	177.0	620.8					
	4 流	51.0	152.5	585.2	591.2	51.6	13.1	35.3	0.006 3
	5 流	94.0	213.5	582.4					
B2	3 流	68.5	208.5	609.8					
	4 流	50.5	243.5	593.6	594.2	54.9	12.9	32.2	0.006 6
	5 流	99.0	244.0	587.0					

注:  $T_r$ - 响应时间;  $T_p$ - 峰值时间;  $T_a$ - 每流平均停留时间;  $T_{a-}$ - 中间包总体平均停留时间;  $V_p$ - 活塞区体积比;  $V_d$ - 死区体积比;  $V_m$ - 全混流体积比;  $\bar{S}_N$ - 各流浓度总体标准差。

形成短路流;而 5 流附近流线相当稀疏,反映出中间包对远流钢液分配不足,在第 5 流附近流动偏弱而使其上方出现较大的死区。由表 3 可知,中间包各流平均停留时间差别非常大,分别为 367.7、492.5、728.0 s,尤其是第 3 流明显过短,仅为第 5 流的一

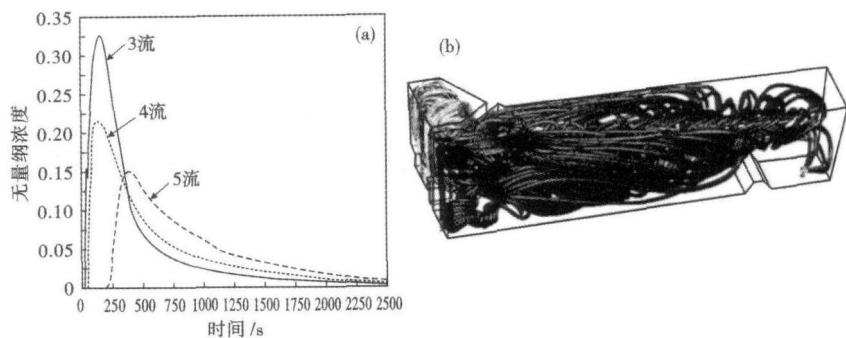


图 4 原型中间包的停留时间分布 (RTD) 曲线 (a) 和流场图 (b)  
Fig. 4 Residence time distribution curves (a) and flow field diagram (b) of original tundish

半,势必造成 3 流钢液中夹杂物上浮困难;而各流示踪剂浓度的总体平均标准差  $\bar{S}_N$  达到 0.022 6,说明各流的流动状态有较大的差别,中间包内各流成分和温度难以达到一致,从而影响铸坯质量和生产稳定顺行。从 RTD 曲线分析结果和流线来看,原型中间包控流装置结构不合理。

2.4 优化中间包

原型中间包的流场不合理、各流流动特性一致性差,主要由于中间包挡墙上导流孔设计不合理造成的。为了改善中间包浇注区的流场,保证各流钢液均衡分配,挡墙优化的基本思路是控制第 3 流钢液供给,消除短路流,同时加强对第 5 流的钢液分配,减小死区体积。本研究提出了两种挡墙优化结构,因此,在原型中间包挡墙的基础上,设计了中墙不开孔的 1#挡墙和中墙开两孔的 2#挡墙。

由表 3 可知,采用 1#和 2#挡墙,中间包流场和各流流动特性一致性得到明显改善。其中第 3 流的响应时间是优化前 3 倍以上,平均停留时间均有较大的延长,从 367.7 s 提高到 609.8 s 以上,短路流

消除,解决了第 3 流响应时间和停留时间过短使夹杂物来不及上浮的问题。同时中间包内总体平均停留时间也延长了 30 s 左右,钢液流动状态得到改善,活塞区体积增加了 2.4% ~ 5.7%,死区体积减小了 0.3% ~ 1.1%,各流总体浓度标准差也从 0.022 6 显著降到 0.007 8 以下,各流流动状况的差别明显减小,钢液分配趋于合理。

比较表 3 中 A1 和 A2 及 B1 和 B2 可知,采用 1#挡墙,第 3 流较其它 4 流的响应时间和平均停留时间明显偏长,各流平均停留时间之间的差值也较大;而采用 2#挡墙,有利于减小第 3 流响应时间和平均停留时间与其它 4 流的差值,各流一致性得到改善,尤其是采用矩形湍流控制器的方案 A2 明显优于 A1 方案,各流示踪剂浓度的总体平均标准差  $\bar{S}_N$  由 0.007 8 下降到 0.005 3。由此可见,采用中墙开两孔的 2#挡墙更有利于获得合理的中间包流场。

中间包采用 2#挡墙时,湍流控制器分别使用 A、B 型对应中间包冲击区湍动能和液面速度分布见图 5。

对比图 5(a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)可以看出,使用圆形加檐湍流控制器(B 型)的中间包冲击区湍流搅拌明显弱于使用矩形无檐湍流控制器(A 型)原型方案的,尤其在冲击区液面的湍动能显著减小,最大湍动能从原来的  $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  降低到  $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。由图 5(a<sub>2</sub>,b<sub>2</sub>)可以看出,采用 A 型湍流控制器冲击区液面的速度分布不均匀,长水口附近有明显的高流速区,最高流速达到 0.16 m/s,容易引起覆盖剂卷混,

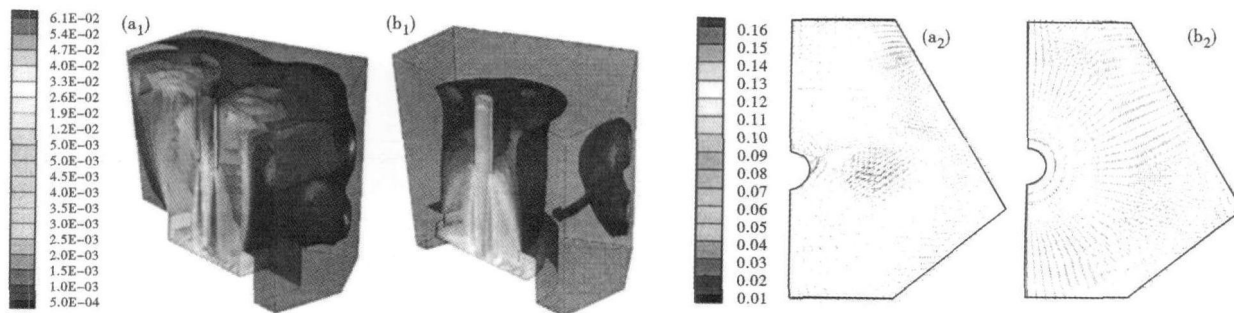


图 5 不同湍流控制器中间包冲击区湍动能分布图 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>) 和冲击区液面的流场 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>); (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) 优化方案 A, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) 优化方案 B

Fig. 5 Impact zone turbulent kinetic energy distribution ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>) and impact zone free surface flow field ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>) in tundish with different turbulence controller: (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) optimum A scheme; (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>) optimum B scheme

中间包壁附近有明显的低流速区;而采用 B 型湍流控制器,冲击区钢液面流动均匀,液面最高流速降到了 0.088 m/s,仅为原来的 1/2。由此可见,采用圆形加檐的湍流控制器(B 型),能对钢包高速注流产生较大缓冲作用,抑制其对中间包流体流动的扰动,显著降低中间包冲击区的湍流程度和液面流速,减小冲击区液面卷渣和二次氧化的可能,有利于避免钢液的二次污染。

综合考虑不同控流装置组合

对中间包流场的影响,可以确定采用 2<sup>#</sup>挡墙和 B 型湍流控制器组合的 B2 方案为最佳控流方案,其 RTD 曲线和流场如图 6 所示。对比图 6 和图 4 可知,优化后的中间包活塞流明显、死区得到有效控制,同时各流一致性显著提高,有利于降低第 3 流铸坯由夹杂引起的探伤不合格率。

### 3 结论

(1)原型中间包控流装置设计不合理,导致各流钢液一致性较差,第 3 流附近短路流现象明显,第 5 流上方有较大死区存在。

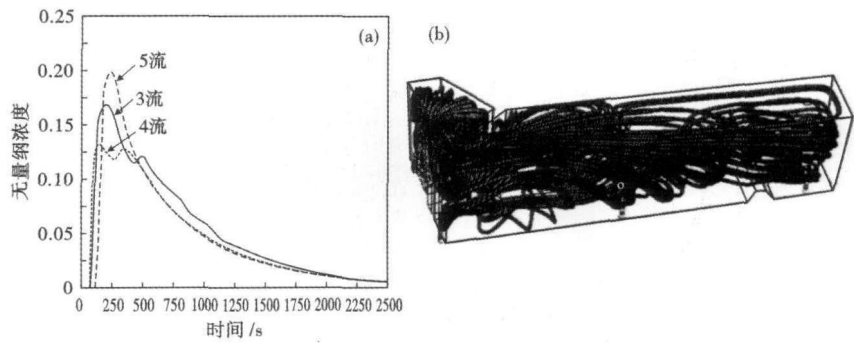


图 6 优化方案 B2 中间包的停留时间分布 (RTD) 曲线(a) 和流场图 (b)  
Fig.6 Residence time distribution curves (a) and flow field diagram (b) of tundish, optimum scheme B2

(2)采用优化的 2<sup>#</sup>挡墙,中间包流场明显改善,第 3 流响应时间和平均停留时间显著延长,短路流消除,钢液分配比较合理,各流流动特性一致性明显提高。

(3)采用圆形加檐的 B 型湍流控制器能显著降低中间包冲击区的湍流程度和液面流速,有效防止冲击区液面卷渣和钢液的二次氧化。

(4)采用 2<sup>#</sup>挡墙和 B 型湍流控制器的 B2 方案为最佳方案,第 3 流平均停留时间延长了 242.1 s,各流一致性较好,同时活塞区体积增加了 5.7%,死区体积减小了 1.1%,冲击区钢液流动平稳。

### 参考文献

- 1 陈雷.连续铸钢.北京:冶金工业出版社,1994
- 2 祝明妹,文光华,唐萍,等.多流中间包内流体流动模式的分析方法.过程工程学报,2008,8(增刊1):41
- 3 郑淑国,朱苗勇.多流中间包内钢液流动特性的分析模型.金属学报,2005,41(10):1073
- 4 潘宏伟,程树森.多流中间包流动特征的数学模型.北京科技大学学报,2009,31(7):815
- 5 雷洪,赵岩,鲍家琳,等.多流中间包停留时间分布曲线总体分析方法.金属学报,2010,46(9):1109
- 6 郑淑国,朱苗勇.多流中间包各流流动特性一致性的判别.过程工程学报,2006,6(4):522
- 7 Kumar A, Mazumdar D, Koria S. Modeling of Fluid Flow and Residence Time Distribution in a Four-strand Tundish for Enhancing Inclusion Removal. ISIJ International,2008,48(1):38
- 8 Tripathi A, Ajmani S. Numerical Investigation of Fluid Flow Phenome-

- non in a Curved Shape Tundish of Billet Caster. ISIJ International, 2005,45(11):1616
- 9 张华,罗荣华,倪红卫,等.五流大方坯中间包流场优化.武汉科技大学学报,2010,33(5):486
- 10 Jiang J, Li J S, Wu H J, et al. Water Modeling of Molten Steel Flow in a Multi-strand Tundish with Gas Blowing. Minerals, Metallurgy and Materials (International), 2010,17(2):143
- 11 钟良才,史迪,陈伯瑜,等.7流方坯连铸中间包结构优化.东北大学学报,2010,31(7):973

罗荣华(1986-),男,硕士研究生,连铸新技术研究。

收稿日期:2012-01-18

邮发代号:38-183

欢迎订阅 2013 年《特殊钢》杂志

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社