

## 板坯连铸中间包挡坝结构优化的数学与物理模拟

苑 品<sup>1,2</sup> 包燕平<sup>2</sup> 崔 衡<sup>1</sup> 冯美兰<sup>1</sup> 李 宁<sup>1</sup>

(1 北京科技大学冶金工程研究院,北京 100083; 2 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083)

**摘 要** 通过几何相似比 0.4 的中间包水模型和 Fluent 数学模型对钢厂 60 t 二流板坯中间包不同结构挡坝下的钢液流动形态进行了分析。结果表明,中间包使用原结构-200 mm 高无孔挡坝时钢液贴底流严重,且挡坝较低,对钢液提升作用不明显,不利于夹杂物上浮去除,浇注区形成较大死区。挡坝开向上 15° 两圆孔且高度增加至 270 mm 后,中间包内钢液滞止时间提高 12.5%,死区减少 36%,钢液在浇注区向钢液面流动,浇注区的死区和钢液温度分层现象基本消失。

**关键词** 中间包 水模型 数学模型 流场

## Physical and Mathematical Simulation of Structure Optimization of Dam in Tundish for Slab Continuous Casting

Yuan Pin<sup>1,2</sup>, Bao Yanping<sup>2</sup>, Cui Heng<sup>1</sup>, Feng Meilan<sup>1</sup> and Li Ning<sup>1</sup>

(1 Engineering Research Institute, 2 State Key Lab of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** An analysis on fluid flowing status in a 60 t tundish with different dam structure for two-strand slab casting at Steel Works has been carried out by using geometric similarity ratio 0.4 water model and Fluent math model. Results show that with using original structure-200 mm height non-hole dam in tundish, the condition of liquid flow close to bottom of tundish is serious, and because of low dam, the effect of liquid lifting upward is not obvious, it is not available to remove inclusions from liquid and form large dead zone in casting area. As the height of dam increases to 270 mm with two upward 15° round hole, the minimum residence time of liquid in tundish increases by 12.5%, the dead zone decreases by 36%, the liquid flows toward surface of liquid in casting area, the dead zone in casting area and different temperature layer appearance basically disappear.

**Material Index** Tundish, Water Model, Math Model, Flow Field

随着中间包冶金技术的发展与完善,作为连铸生产过程中的最后一个耐火材料容器<sup>[1]</sup>,中间包已经不再只是把钢水均匀分配给各个结晶器和实现多炉连浇,还承担着去除夹杂物、合金微调、控制过热等冶金功能<sup>[2]</sup>。中间包内控流元件的设置以及合理的钢水流动形态<sup>[2]</sup>对延长钢水在中间包内的停留时间,均匀钢水温度和成分,减少卷渣和促进夹杂物上浮有重要作用。尤其在板坯连铸生产中拉速较高的情况下,钢液在中间包内的停留时间较短,控流元件的合理设置显得尤为重要<sup>[3]</sup>。

本文采用水模型和数值模拟相结合的方法研究了钢厂中间包内钢水的流动特性,对挡坝开两个具有向上角度圆孔,提升挡坝高度,改变挡坝结构,优化中间包流场,增加夹杂物上浮去除机会。

### 1 水模型试验

#### 1.1 试验原理和方法

中间包内钢液的流动属于重力作用下的强制流动,一般情况下可视为粘性不可压缩流体,系统只要

满足几何相似和动力相似就能保证模型和原型相似。

研究表明,不同中间包在湍流流动条件下,流动过程的湍流雷诺数是非常相近的,都处于第二自模化区域<sup>[4]</sup>。因此,在模型与原型几何相似的情况下,只要模型和原型的  $Fr$  准数相等,就能保证原型与模型的相似。即:

$$Fr = \frac{v_{模型}^2}{gl_{模型}} = \frac{v_{原型}^2}{gl_{原型}} \quad (1)$$

由此计算出模型对应于原型的体积流量和流速为:

$$Q_m = Q_{原型} \lambda^{2.5} \quad (2)$$

$$v_{模型} = v_{原型} \lambda^{0.5} \quad (3)$$

上式中,  $Fr$ - Froude 准数;  $v$ - 流体速度/( $m \cdot s^{-1}$ );  $g$ - 重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ );  $l$ - 特征长度/ $m$ ;  $Q$ - 体积流量/( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $\lambda$ - 几何相似比。

本试验以钢厂 60 t 二流板坯连铸中间包为原型,建立相似比  $\lambda = 0.4$  的水模型,板坯截面尺寸为 1 400 mm × 130 mm,拉坯速度为 1.4 m/s,具体试验参数见表 1。

表 1 中间包原型和水模型的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters of tundish prototype and water model

项目	工作液面高度/mm	单流水口流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	流间距/ mm	长水口浸入深度/mm
原型	900	28.54	6 420	250
模型	360	2.85	2 568	100

试验通过刺激-响应原理,待中间包液面平稳后,在中间包入口处脉冲注入含定量墨汁 250 mL 的饱和 KCl 溶液,同时在出水口处采集数据,并用高速摄影机对示踪剂在中间包内的运动进行录像。对采集的试验数据进行分析<sup>[4]</sup>,可以直接得到从加入示踪剂到示踪剂流至中间包水口时的最小停留时间

$t_{\min}$  (又称响应时间) 和示踪剂浓度达到最大时的峰值时间  $t_p$ , 还可得到各流体微元在中间包的 actual 平均停留时间  $t_{av}$ ; 根据修正混合理论模型<sup>[5,6]</sup>, 得到中间包内死区体积比例  $V_d$ , 活塞区体积比例  $V_p$ , 全混区体积比例  $V_m$ 。

1.2 试验方案

原中间包 (结构如图 1a 所示) 挡坝高 200 mm (图 1b); 改进挡坝设置上倾角为  $15^\circ$ , 直径为 75 mm 的两导流孔, 高度为 220 mm (图 1c); 挡坝进一步加高为 270 mm (图 1d), 具体如图 1。

1.3 试验结果分析

由于中间包结构对称, 故选取单流试验数据进

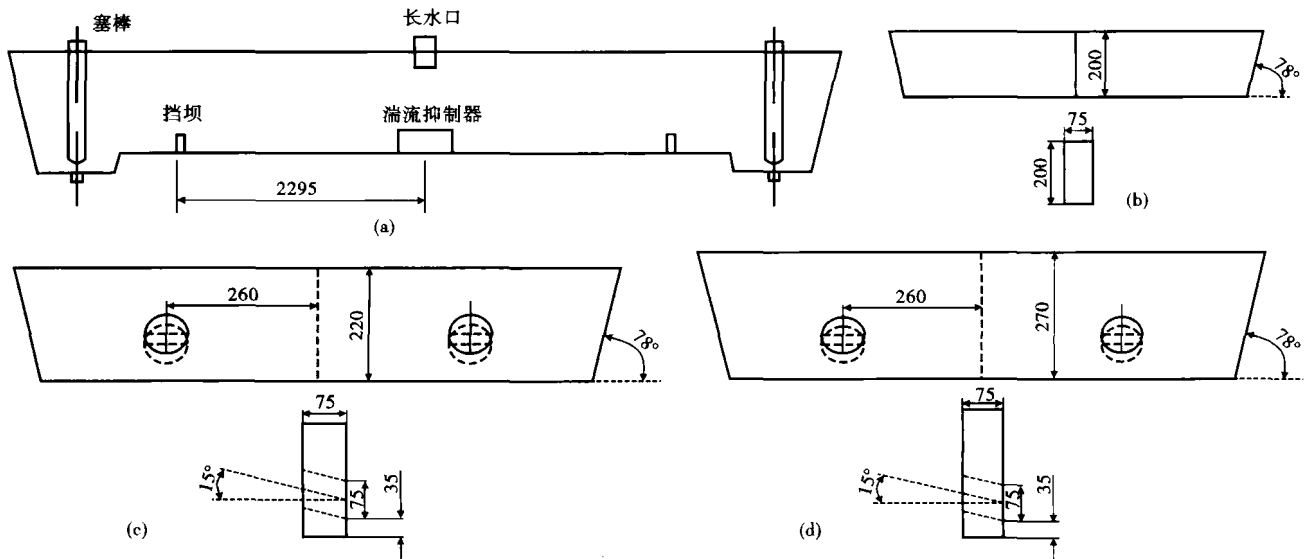


图 1 中间包及挡坝结构图: (a) 原中间包整体结构; (b) 原挡坝; (c) A 方案; (d) B 方案

Fig. 1 Schematics of tundish and dam: (a) whole structure of original tundish; (b) original dam; (c) scheme A; (d) scheme B

行分析, 不同结构挡坝中间包流场指标见表 2, 流场显示见图 2。

中间包采用原挡坝时, 钢液遇到挡坝向上, 夹杂物上浮路径缩短, 有利于去除; 但挡坝后存在明显死区, 且挡坝对钢液抬升作用不大, 新注入钢液难以流向浇注区左上角, 此区钢液混合不充分, 易形成温度

表 2 中间包使用不同结构挡坝的流场指标

Table 2 Index of flow field in tundish with different dam structure

工况	滞止时间/s	峰值时间/s	平均停留时间/s	死区比例/%	活塞区比例/%	全混区比例/%
原挡坝	57	190	264	11.5	43.3	45.2
A 方案	41.7	189.1	272.7	8.7	38.6	52.7
B 方案	64.15	185	275.6	7.7	42.1	20.2

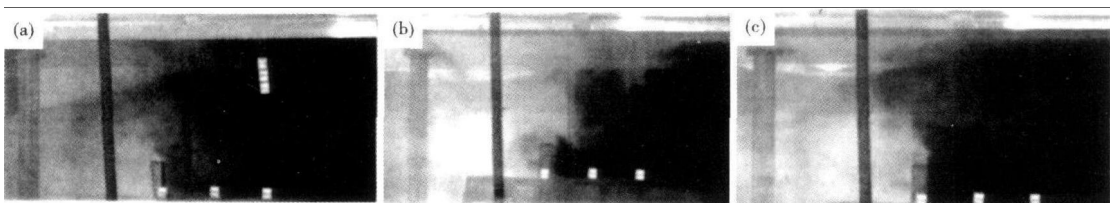


图 2 不同结构挡坝中间包流场: (a) 原结构挡坝; (b) A 方案; (c) B 方案

Fig. 2 Flow field in tundish with different dam structure: (a) original structure dam; (b) scheme A; (c) scheme B

分层区。

中间包采用 220 mm 高开孔挡坝时,部分钢液从孔中流出,挡坝后死区明显减少,挡坝高度增加使平均停留时间延长;但挡坝高度变化不大,对钢液的提升作用不明显,钢液仍难以贴近浇注区钢液面流动,且滞止时间缩短。

开孔挡坝增加到 270 mm 高时,中间包流场效果最理想,钢液流经挡坝时向上运动趋势已有所衰减,较高挡坝恰好可对钢液起到提升作用,使流经钢液沿钢液面运动,对夹杂物在浇注区的进一步上浮去除起到了促进作用;挡坝开两侧孔,避免挡坝高度增加造成其后死区过大,且有上扬角度,使通过钢液获得向上运动趋势,不会形成短路流直接流向出水口。

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立

由于二流板坯中间包的对称性,建模计算时采取中间包左半部分,建模尺寸均为实际中间包尺寸,具体结构如图 3。

### 2.2 基本假设

采用 Fluent 模拟计算时进行如下假设:

(1)中间包内钢水为稳态不可压缩的粘性流体,稳态传热;(2)忽略温度对流动的影响,即密度和粘度为常数;(3)不考虑中间包钢液面波动和表面渣层的影响。

### 2.3 基本方程

基本方程有描述钢液在中间包内流动的连续性方程、动量方程即纳维尔-斯托克斯(Navier-Stokes)方程,以及描述湍流摩擦的  $k-\epsilon$  双方程和描述热量状态的能量守恒方程<sup>[7]</sup>。

### 2.4 边界条件

(1)中间包钢液表面处理为光滑壁面;

(2)固体壁面上边界条件的处理:对于近壁区的钢液,采用壁面函数对其速度和湍流特性参数进行修正;

(3)入口与出口的边界条件:钢液入口速度垂直于中间包液面向下,速度大小由拉坯速度及铸坯断面确定,出口采用质量流量出口;

(4)通过中间包上表面及壁面的热流为常数<sup>[7,8]</sup>:表面渣层  $15.0 \text{ kW/m}^2$ ;底面  $1.4 \text{ kW/m}^2$ ;纵向包壁  $3.2 \text{ kW/m}^2$ ;横向包壁  $3.8 \text{ kW/m}^2$ 。

### 2.5 模拟结果分析

图 4 为中间包流场图(速度  $0 \sim 0.1 \text{ m/s}$ ;温度  $1830 \sim 1833 \text{ K}$ )。

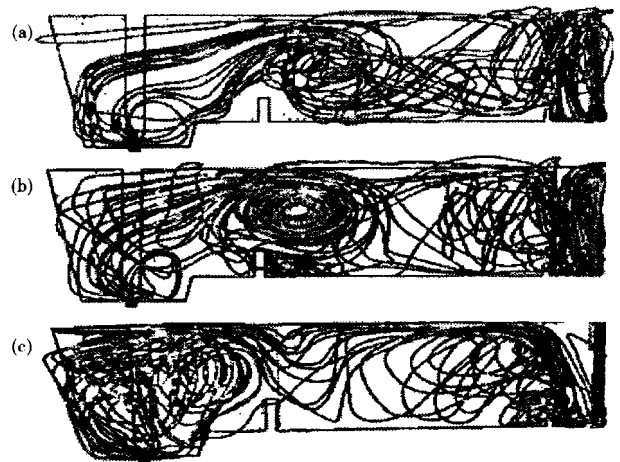


图 4 不同挡坝结构的中间包流场数学模拟:(a)原结构挡坝;(b)A 方案;(c)B 方案

Fig. 4 Flow field in tundish with different dam structure, math simulation; (a) original structure dam; (b) scheme A; (c) scheme B

从流场迹线图 4 可以看出,中间包使用原挡坝时,钢液从湍流抑制器流出后,大部分钢液沿中间包底部流动,且速度相对较大,最大可达  $0.06 \text{ m/s}$ ,钢液在湍流抑制器和挡坝之间运动时间短,夹杂物不能充分上浮。钢液遇到挡坝后向钢液面运动,钢液流速增大,形成了钢液循环区,活跃了此区钢液流场;但挡坝后钢液运动缓慢形成死区;同时挡坝高度较低,钢液向上运动趋势明显较弱,没有形成明显的贴近钢液表层的流动,钢液很难运动到中间包左上方,新旧钢液混合不充分,形成死区。

从图 5 中间包温度场可以看出,挡坝较低,对钢液上扬作用不明显,浇注区上部存在较大低温区,钢液出现明显分层现象,钢液温度分布不均匀,易造成铸坯长度方向上成分性能不均匀。

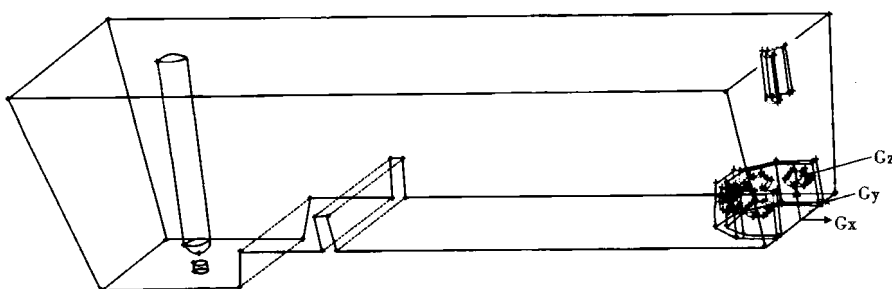


图 3 数学模型的中间包结构

Fig. 3 Tundish structure of math model

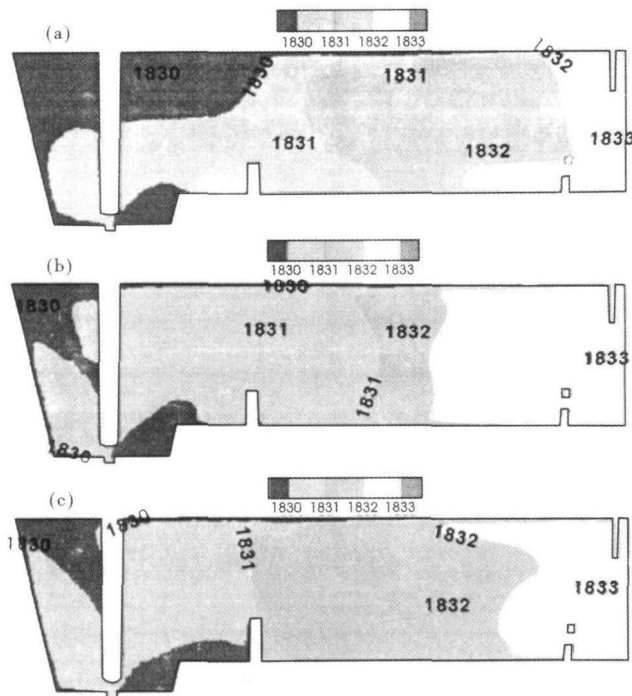


图5 不同结构挡坝的中间包温度场:(a)原结构挡坝;(b)A方案;(c)B方案

Fig. 5 Temperature field of liquid in tundish with different dam structure: (a) original structure dam; (b) scheme A; (c) scheme B

如方案 A,挡坝高度增加后,钢液在湍流抑制器周围形成较大范围的混合区,此区钢液运动激烈,有利于夹杂物的碰撞聚集;此后钢液向上运动趋势增大,在遇到挡坝后形成较大循环区,运动速度较大,钢液向浇注区角部运动趋势明显,更贴近钢液面,非常有利于夹杂物的上浮去除;同时由于开孔,挡坝后死区消失。从温度场可以看出,温度为1831 K 的区域明显增大,浇注区钢液温度上下分层的现象基本消失。

#### 参考文献

- 1 张彩军,赵铁成,艾立群. FTSC 薄板坯连铸中间包内流场及夹杂物运动轨迹的数值模拟. 北京科技大学学报,2006,28(11):1014
- 2 唐海燕,于 满,李京社,等. 连铸中间包内部结构优化的数理模拟及冶金效果. 北京科技大学学报,2009(S1):38
- 3 阮小江,李京社,王剑斌,等. 兴澄特钢中间包结构优化. 北京科技大学学报,2007(S1):138
- 4 王建军,包燕平,曲 英. 中间包冶金学. 北京:冶金工业出版社,2001
- 5 Sahai Y, Ahuja R. Fluid Flow and Mixing of Melt in Steelmaking Tundishes. Iron Making and Steelmaking,1986,13(5):241
- 6 Sahai Yongeshwar, Emi Toshihiko. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International,1996,36(6):667
- 7 张文明,李 强. 连铸中间包内流场与温度场的数值模拟. 安徽工业大学学报(自然科学版),2007(3):242

如方案 B,两孔挡坝高度增加到 270 mm 后,中间包内贴底流钢液基本消失,钢液形成贴近流体表层的弧形运动轨迹,流线变长,沿中间包底部钢液流速降到 0.1 m/s,钢液流速明显较慢,停留时间增加,非常有利于夹杂物的上浮及被钢渣吸附去除。

钢液到达挡坝位置时速度衰减,但较高挡坝使所经过钢液重新获得较大动能,并紧贴钢液面流动,随即向中间包侧壁方向流动,形成循环区,浇注区的死区消失,钢液相对活跃;从图 5 中间包温度场可以看出,温度1832 K 区域较前两种挡坝结构中间包明显扩大,整体中间包温度较高。

根据肖泽强等的研究表明<sup>[9,10]</sup>,渣钢体系发生卷渣的临界表面钢液流速为 0.63 m/s,喷吹气体时钢液顶面开始卷渣的临界钢液流速 0.18 ~ 0.59 m/s,本试验中 3 种不同挡坝结构的中间包钢液面流速都在 0.1 m/s 以下,都没达到卷渣临界值,钢液面不会产生卷渣。

#### 3 结论

(1) 中间包使用原 200 mm 高无孔挡坝时,钢液形成明显贴底流,且运动速度大,停留时间短,夹杂物不能充分上浮;挡坝后存在较大死区,浇注区钢液的成分、温度得不到充分均匀;整体中间包存在温度分层现象。

(2) 挡坝加高到 270 mm 并开向上 15° 直径 75 mm 两圆孔后,中间包钢液流场理想,钢液滞止时间提高 12.5%,死区减少 36%,有利于钢液中夹杂物的充分上浮去除,中间包内钢水整体温度上升,浇注区的死区和钢液温度上下分层现象基本消失,保证了铸坯长度方向上成分性能的一致。

- 8 吴雨晨,闫小林,李俊国,等. 1700 板坯中间包温度场的数值模拟及其优化. 河北理工大学学报(自然科学版),2009(3):34
- 9 张华书,肖泽强. 渣-钢混合状态对冶金速率的影响. 钢铁,1987(9):21
- 10 肖泽强,刘春利,胡立祥,等. 喷吹钢中偶见大颗粒夹杂物行为及其来源的研究. 钢铁,1988(1):23

苑 品(1987-),女,硕士研究生,2009 河北科技大学毕业,连铸中间包工艺研究。

收稿日期:2011-10-12