

## 12 流小方坯 6 流中间包结构优化的数值模拟和冶金效果

韩传基<sup>1</sup> 安航航<sup>1</sup> 季 维<sup>1</sup> 李富帅<sup>1</sup> 陶金明<sup>1</sup> 王剑峰<sup>2</sup> 贾建平<sup>2</sup>

(1 中冶连铸北京冶金技术研究院,北京 100028;2 河北钢铁集团宣钢公司炼钢厂,张家口 075100)

**摘 要** 利用数值模拟对宣钢 12 流 150 mm × 150 mm 连铸机的 35 t 6 流中间包的三维流场、浓度场和温度场进行研究,得出了最佳控流装置挡渣墙孔径 120 mm,水平偏角 5°,竖直仰角 5°。应用结果显示,优化结构中间包的流场明显改善,各流的流动特性趋于一致,钢液对第 6 流塞棒的冲击减轻,各流最大温差由原先的 10 K 降低至 4 K。且连浇时间由原先的 20 h 延长到 26 h。

**关键词** 12 流小方坯 6 流中间包 结构优化 数值模拟

## Numerical Simulation and Metallurgical Effect for Structure Optimization of 6-Strand Tundish for 12-Strand Casting Billets

Han Chuanji<sup>1</sup>, An Hanghang<sup>1</sup>, Ji Wei<sup>1</sup>, Li Fushuai<sup>1</sup>, Tao Jinming<sup>1</sup>, Wang Jianfeng<sup>2</sup> and Jia Jianping<sup>2</sup>

(1 Beijing Metallurgical Technology Research Institute, CCTEC, Beijing 100028;

2 Steelmaking Works, Xuanhua Steel Co, HBIS, Zhangjiakou 075100)

**Abstract** The three-dimensional flow field, concentration field and temperature field of a 35 t 6-strand tundish for 12-strand 150 mm × 150 mm continuous machine at Xuanhua Steel have been studied by using numerical simulation and the optimum flow control device slag dam with hole diameter 120 mm, horizontal deviation angle 5° and vertical angle of elevation 5° is obtained. Application Results show that the flow field in structure-optimized tundish improved obviously, the flow behavior of each strand of tundish becomes consistent, the impacting of liquid on 6-th strand stopper is alleviated, the temperature difference between each strand decreases to 4 K from original 10 K and the continuous casting time increases to 26 h from original 20 h.

**Material Index** 12-Strand Casting Billet, Tundish for 6-Strand, Structure Optimization, Numerical Simulation

中间包冶金最重要的两个功能是去除夹杂和调整温度,中间包内流体的流动特性对其内非金属夹杂物的上浮及均匀钢水温度起着至关重要的作用,合理的控流装置是得到理想流动特性的关键保证<sup>[1]</sup>。目前多流中间包存在两个主要问题:(1)流场不合理-各流的停留时间相差较大,造成夹杂物不能有效的去除;(2)各流的钢液温度相差较大,距离注流区越远,温降越厉害,造成浇铸过程出现问题,特别对狭长的 6 流及以上一体式中间包尤为突出<sup>[2,3]</sup>。宣钢原有 12 机 12 流方坯铸机的 6 流中间包在浇注过程中高温钢液对第 6 流塞棒底部冲刷比较厉害,耐火材料侵蚀严重,各流之间的温差较大,且连浇时间短,严重影响了生产。针对存在的问题,采用数值模拟对中间包内钢液的流动和传热特征进行了系统的研究,确定适合该中间包的最佳控流装置。

宣钢 12 机 12 流小方坯铸机的主要技术参数为:(1)铸机断面 150 mm × 150 mm 和 165 mm × 165 mm;(2)弧形半径 10 m;(3)流间距 1 200 mm;(4)两个中间包,单个容量 35 t;(5)主要生产普碳钢

(Q195、Q235 等)和合结钢(HRB335 等)。

### 1 数学模型

#### 1.1 基本假设

(1)中间包内钢液为单相湍流流动;(2)中间包内钢液流动稳定,且不可压缩;(3)忽略渣层对钢液流动的影响,钢液面视为自由滑移边界;(4)钢液的密度、粘度、比热容等热物理性质参量为常数;(5)中间包是一个三维稳态过程;(6)示踪剂的传输是一个瞬态过程。当粒子到出口处时视为已逃逸出中间包,到达固体壁面后碰撞壁面并反射回中间包。

#### 1.2 几何模型的建立

利用商业软件 ANSYS-ICEM 根据几何平面图生成三维立体几何模型,流体计算使用商业软件 ANSYS-FLUENT。由于 12 机 12 流铸机在浇注过程中有两个中间包,两个中间包分别为 6 机 6 流,对称分布。在计算模拟过程中只考虑一个中间包,计算时只取其一。图 1 为中间包几何平面图,图 2(a,b)分别为原中间包和最终优化的中间包的三维几何图。图 1 中从左向右依次为第 1、2、3、4、5、6 流。

描述钢水在中间包内流动的微分方程见文献[4],

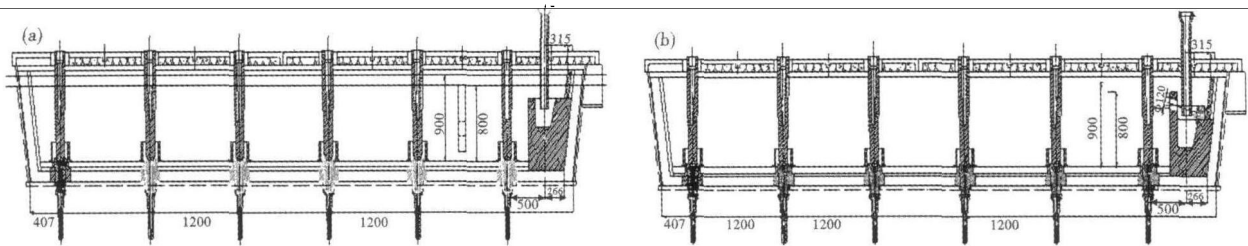


图1 中间包几何平面图:(a)原中间包;(b)优化后中间包

Fig. 1 Geometric plan of tundish: (a) original tundish; (b) optimized tundish

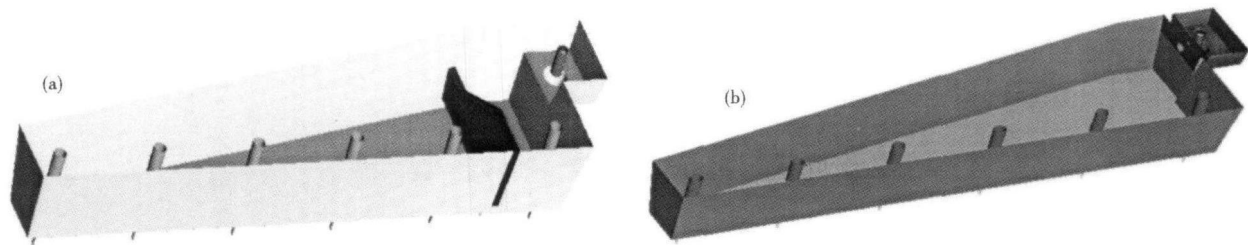


图2 中间包三维几何图:(a)原中间包;(b)优化后的中间包

Fig. 2 3-dimensional geometrical figure of tundish: (a) original tundish; (b) optimized tundish

钢水温度在中间包变化的微分方程和描述示踪剂在中间包内变化的非稳态传质微分方程见文献[5]。

计算钢液的物性参数为:钢液密度  $6900 \text{ kg/m}^3$ ,钢液分子粘度  $0.00625 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,比热容  $750 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,热传导系数  $41 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,热膨胀系数  $0.0001 \text{ K}^{-1}$ 。进口流速根据断面和拉速确定,进口内径  $70 \text{ mm}$ ,对于  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  方坯,在拉速  $2.8 \text{ m/min}$  的条件下进口流速为  $1.637 \text{ m/s}$ 。

### 1.3 边界条件

在模拟钢水流动时:经钢包长水口的流体。其入流速度垂直于中间包液面;在固体壁面上,采用不滑动的边界条件,在近壁区,采用壁函数对速度和湍流特性参数进行修正。壁面上示踪剂通量为0,示踪剂传输行为计算时通量设为0,示踪剂总量为1。

在模拟温度场时,假设钢包钢水以恒温( $1853 \text{ K}$ )注入到中间包内,在中间包壁的传热和表面顶渣的热辐射视为稳态,通过包壁和表面渣层的热通量采用 Chakraborty 和 Sahai 的推荐值,即中间包纵向包壁、横向包壁、底面及表面渣层的热损失分别为  $3.2, 3.8, 1.4, 15 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

### 1.4 模拟计算

利用上述数学模型,考虑到导流孔孔径、仰角、水平偏角及导流孔的位置等5个因素的变化,共设计9组实验方案,其中水平偏角指偏向塞棒的夹角。根据设计的控流装置实验方案,对其进行流场、传热及示踪剂的传输状态进行模拟计算研究,并根据模

拟计算结果确定最优方案。

当拉速为  $2.8 \text{ m/min}$ ,工作液面为  $800 \text{ mm}$  及长水口插入深度为  $200 \text{ mm}$  时,首先对原中间包进行数值模拟,其次,在入流区,原缓冲器靠近塞棒的一侧加上一块挡墙,并在其上开导流孔,挡墙高为  $900 \text{ mm}$ 。首先设计了两组优化方案(方案1与方案2),其中方案1与方案2导流孔距包底  $640 \text{ mm}$ ,方案1中两个导流孔对称分布,方案2有一个导流孔,孔径分别为  $120, 200 \text{ mm}$ ,水平偏角和竖直仰角分别为  $0^\circ$  和  $15^\circ$ ;考虑到工作液面达不到正常浇注液面,工作液面为  $700 \text{ mm}$  时,优化设计6组实验方案(方案4~9),其中孔中心距包底  $550 \text{ mm}$ ,水平方向孔的中心在挡墙的中心线上,水平偏角分别为  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$  和  $15^\circ$ ,仰角分别为  $5^\circ, 10^\circ$  和  $15^\circ$ ,共对9组实验方案进行数值模拟优化计算。

## 2 结果分析与讨论

本实验共计10组方案,由于方案较多,篇幅有限,仅对原中间包和以及最优方案(方案6)典型的两方案的截取典型的截面进行分析。

### 2.1 流场及流动特征

从图3和图4可见:(1)对于原中间包,当钢液从注流区流出进入分配区,由于挡板的提升作用,在挡板的右侧,一部分钢液越过挡板向上,沿着表面流动,直接流向第3流,经过挡板的阻挡,另一部分钢液与挡板碰撞后,在挡板与第6流之间的孔和通道分别流向5#塞棒底部和6#塞棒,形成短路流,且由

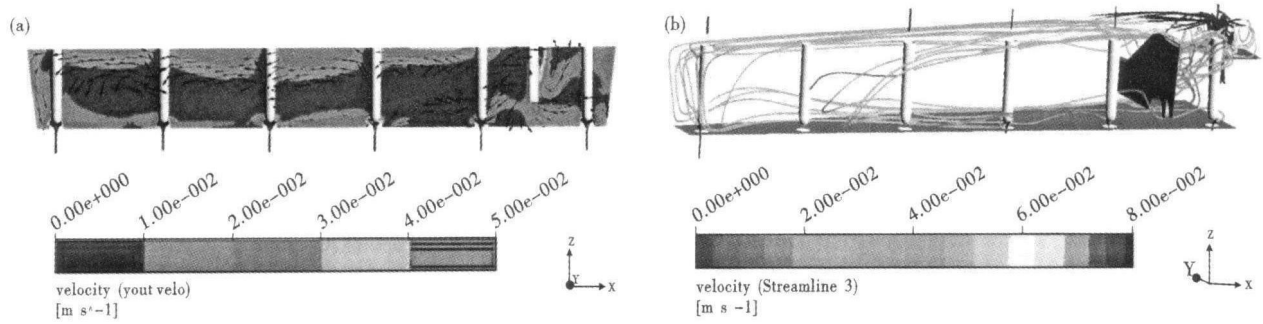


图 3 原中间包的流场:(a)速度云图;(b)流线图  
Fig. 3 Flow field of original tundish: (a) speed cloud; (b) streamline pattern

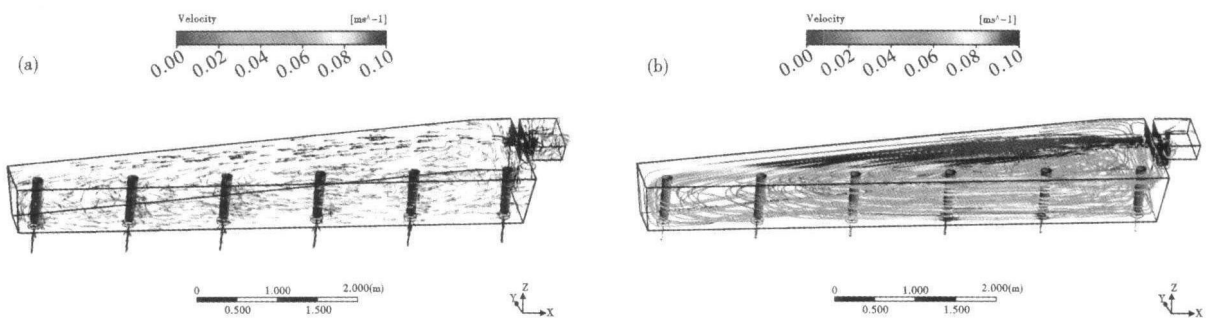


图 4 方案 6 优化中间包的流场:(a)流速矢量图;(b)流线图  
Fig. 4 Flow field of optimized tundish of scheme 6: (a) vector diagram of flow velocity; (b) streamline pattern

于钢液流速快,挡板和塞棒之间的距离短,在此区域钢液紊流程度高,对 6# 塞棒冲刷严重;而对于优化改造后的中间包,高速流动的钢液经湍流控制器后耗散了一定的湍动能,并以较大的速度返回到钢液表面,通过斜向上的导流孔使钢液向上流动,由于导流孔的孔径较小,钢液从以较大的流速流出后,沿着近似与宽面包壁平行的方向,流向远流,直接流向第 1 流,在流向远流的过程中分流,部分钢液分别流向第 4、5、6 流,在 5# 塞棒和 6# 塞棒之间形成回流,促使钢液流向表面,减轻了对 6# 塞棒底部的冲刷,返回后与宽面包壁碰撞后中间包内形成循环流动,大部分钢液流向第 1 流,与窄面包壁碰撞后,沿着靠近塞棒方向的宽面依次流向近流大部分钢液沿表面流动;(2) 对于原中间包,钢液进入浇注区后,距离长水口远的对应的流线条长,而部分钢液经挡板底部的孔和通道在中间包底部平铺开,造成了严重的短路流现象;对于优化改造后的中间包,由于采用挡板后,注流区扩大,注流区高度紊

乱,一方面,有利于钢液的混匀和夹杂物的碰撞,也耗散了高速的湍动能,另一方面,钢液经导流孔斜向上运动,钢液的流动路线增加,避免对 6# 塞棒的冲击,且在第 3 流和第 4 流之间分流,各个水口的钢液流动趋于一致。

从图 5 可知,原中间包 5 流和 6 流的钢水停留时间分布(RTD)曲线出现双峰,说明存在一定的短路流,而对于优化后的中间包 5 流和 6 流双峰现象消失。从表 1 的 RTD 曲线计算结果可知,各个水口平均停留时间( $t_{av}$ )最大相差为 245 s,滞止时间

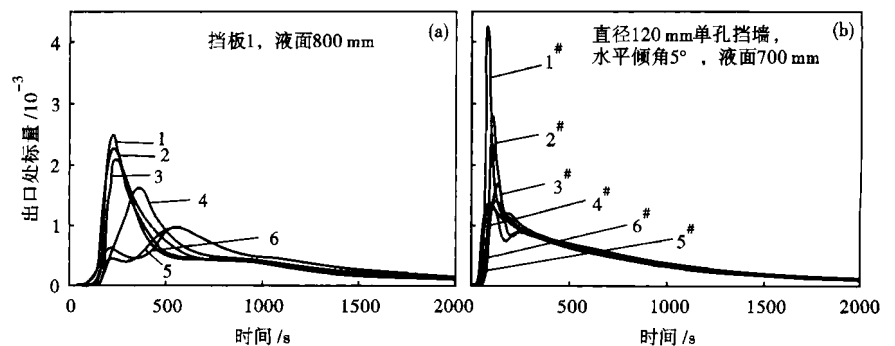


图 5 原中间包(a)和优化后中间包(b)的 6 流水口停留时间分布(RTD)曲线  
Fig. 5 Residence time distribution curves of 6-strands nozzle of tundish: (a) original tundish; (b) optimized tundish

表1 原中间包和方案6优化中间包6流水口停留时间分布曲线的计算结果

Table 1 Calculated result of residence time distribution curves of 6-strands nozzle of original tundish and optimized tundish of scheme 6

导流孔	原中间包			方案6		
	$t_{\min}/s$	$t_{\text{av}}/s$	$V_d/\%$	$t_{\min}/s$	$t_{\text{av}}/s$	$V_d/\%$
1#	139	753	18	48	670	15
2#	117	727	20	35	695	12
3#	104	707	23	24	699	12
4#	104	819	10	19	699	12
5#	85	952	4	20	710	10
6#	54	929	2	48	670	15

( $t_{\min}$ )最大相差为85 s,优化改造后的中间包各个水口平均停留时间最大相差为40 s,滞止时间最大相差为29 s,由于两个方案的钢液面分别为800 mm和700 mm,所以相应数据有较大的差别,但优化改造

后的中间包各个水口的钢液流动性趋于一致,明显改善了中间包的流动状况。

## 2.2 温度场

根据图6可知,对于原中间包,由于挡板的阻挡,在第6流与第5流之间存在高温区,因此造成第6流的塞棒由于受高温钢液的冲刷,侵蚀厉害,整个中间包内钢液的温度分布很不均匀,通过计算结果显示,各流(第1流与第3流)水口的最大温差为2.4 K,且第1流(边流)温度过低,在浇注过程中容易造成水口冻结,影响生产;对于优化改造后的中间包,各流(第1流与第4流)水口的最大温差为0.3 K,在第6流和第5流之间不存在高温区,第1流(边流)温度升高,整个中间包内钢液温度分布均匀。

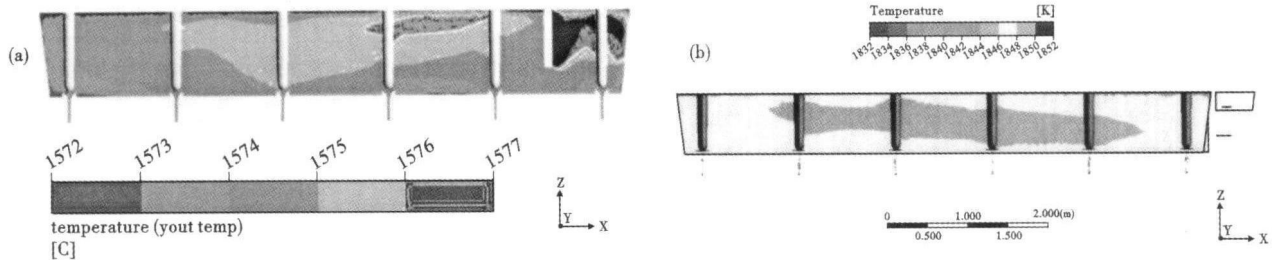


图6 中间包内钢液经过塞棒纵截面的温度场:(a)原中间包;(b)优化后中间包

Fig. 6 Temperature field of liquid in tundish passing stopper longitudinal section: (a) original tundish; (b) optimized tundish

## 3 冶金效果

优化改造后的中间包于2010年11月投入使用,浇铸钢种为Q235,在浇注过程中对中间包钢水温度进行实测,各流(第1流与第4流)水口最大温差为4 K,而未优化前经实测各流(第1流与第3流)水口之间最大温差为10 K。在生产中中间包的使用效果很好,在浇注过程中第6流的塞棒明显侵蚀减轻,连浇时间由优化前的20 h延长到26 h,达到了优化设计目的。

## 4 结论

(1)挡渣墙的最优方案的孔径为120 mm,水平偏角和竖直仰角均为 $5^\circ$ 。优化后的中间包各个水口的钢液流动性趋于一致,明显改善了中间包的流动状况,在第6流和第5流之间不存在高温区,各流(第1流与第4流)水口的最大温差为0.3 K。

(2)在生产中中间包的使用效果很好,在浇注过程中,第6流的塞棒侵蚀明显减轻,各流(第1流

与第4流)水口最大温差为4 K,而未优化前经实测各水口之间最大温差为10 K,连浇时间由优化前的20 h延长到26 h。

## 参考文献

- 1 刘大方,施哲,詹树华,等.五流非对称结构中间包流动及传热特征数值模拟.钢铁钒钛,2006,27(2):38
- 2 Xie Jian, Zheng Shuguo, Wu Yonglai, et al. Water Modeling Study on Optimization of Flow Control Devices in Five-strand "T" Type Tundish. Journal of Materials and Metallurgy, 2002, 4(1): 285
- 3 陈登福,胡锐,王青峡,等.连铸中间包多孔挡墙设置优化的数学物理模拟.过程工程学报,2008,8(S1):49
- 4 Sahay S, De T, Basu D, et al. Strand Performance Improvement through Use of a Symmetric Baffles in Tundish of Six Strand Billet Caster at DSP. Iron and Steel Maker, 2001(7): 71
- 5 Jha P K, Dash S K. Global Optimization of Fluid Flow and Mixing in a Six-strand Billet Caster Tundish. ISIJ International, 2002, 42(6): 670

韩传基(1966-),男,博士,研究员,2006年北京科技大学毕业,钢的质量控制和连铸新工艺研究。

收稿日期:2011-03-18