

六流中间包挡墙优化的数值模拟和工业实践

李玉峰¹ 孙彦辉¹ 宋思程¹ 陈天明²

(1 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083;2 攀钢集团研究院有限公司,攀枝花 617000)

摘要 根据钢厂 40 t 六流重轨钢中间包的结构和工艺参数,通过 Ansys Fluent 软件数值模拟的方式,研究了其流场、温度场及 RTD(停留时间分布)曲线。研究发现,原中间包流场及温度场分布不合理,各流一致性较差。通过正交试验,确定了挡墙开孔底部仰角 10°、中部仰角 10°、开孔上移 0 mm 的优化方案。模拟结果表明,通过优化设计,提高了中间包的整体流场速度,大幅降低了钢水的平均停留时间标准差,最低温度提高了 14.2 K,各流水口温差缩小了 1.77 K,各流一致性显著增强。40 t 中间包 U75V 重轨钢的生产应用结果表明,优化后最远端水口(3 号水口)平均停留时间由原 687.1 s 降至 575.5 s,各流温差由 2.05 K 降至 0.28 K,改善显著。

关键词 中间包 数值模拟 停留时间分布 控流装置 应用

Numerical Simulation and Industrial Practice of Retaining Wall Optimization for Six-Strand Tundish

LI Yu-feng¹, SUN Yan-hui¹, SONG Si-cheng¹, CHEN Tian-ming²

(1 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;
2 Pangang Group Research Institute Co Ltd, Panzhihua 617000)

Abstract According to the structure and process parameters of a 40 t six-strand heavy rail steel tundish in a steel mill, the flow field, temperature field and RTD curve are studied through numerical simulation of Ansys Fluent software. It is found that the distribution of flow field and temperature field in the original tundish is unreasonable and the flow consistency is poor. Through the orthogonal experiments, the optimized scheme of an elevation angle of 10° at the bottom, an elevation angle of 10° in the middle, and a 0 mm upward movement of the opening of the retaining wall is determined. The simulation results show that through the optimized design, the overall flow field velocity of the tundish is increased, the standard deviation of the average residence time of molten steel is greatly reduced, the lowest temperature is increased by 14.2 K, the temperature difference of each nozzle is reduced by 1.77 K, and the consistency of each flow is significantly enhanced. The production application results for casting U75V heavy rail steel by 40 t tundish shows that after optimization the farthest nozzle (out 3) average residence time reduces from original 687.1 s to 575.5 s, the difference of temperature of each nozzle flow decreases from original 2.05 K to 0.28 K to improve obviously.

Material Index Tundish, Numerical Simulation, RTD, Flow Control Device, Application

中间包主要作为连铸中钢包更换时的钢液贮存器,其作用为确保钢液分配到各个铸坯中^[1-4],调节进入铸坯的钢液质量流量,降低钢液的静态压强,均匀钢液温度^[5-7]。中间包挡墙用于隔离冲击区钢液注流对浇注区钢液的扰动^[8],实验得出挡墙开孔控流效果更好且挡墙耐久度提高^[9],Y型和V型挡墙控流效果比U型挡墙更好^[10],物理模拟研究发现V型挡墙与其他控流装置组合,中间包内控流效果得到显著提升^[11]。

研究人员通常采用实验和数值相结合的方法进行控流装置的研究,探讨控制中间包内流体流动和热传递的相关问题^[12-14]。

本实验通过基于 CFD 的方法,使用 Fluent meshing 软件进行 135 万的 Poly-Hexcore 网格划分,采用 Fluent 软件进行稳态求解,计算了六流中间包的流场、温度场和 RTD 特性,优化了挡墙开孔参数。

1 实验原理及方法

1.1 基本假设

中间包内流体的实际流动是非常复杂的三维湍流,为兼顾数值模拟的准确度与效率,基本假设为:

(1)中间包内的钢液为牛顿流体,钢液流动为稳态不可压缩流动;(2)忽略温度对中间包内的钢液、示踪剂密度的影响,即钢液、示踪剂的密度为常数;(3)中间包内的钢液和示踪剂被看作均匀介质;

(4) 忽略中间包内因温度变化引起的自然对流的影响;(5) 中间包液面为自由表面,忽略中间包覆盖剂和钢液液面波动的影响,同时不考虑钢液的二次氧化;(6) 中间包内的传热过程为稳态传热过程;(7) 中间包内示踪剂的流动为非稳态传质过程。

1.2 数学模型

本次模拟采用标准的双方程模型计算中间包内钢液的湍流情况。

1.2.1 连续性方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

1.2.2 动量方程(Navier-Stokes 方程)

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

1.2.3 湍流的标准 $k-\varepsilon$ 方程

描述湍动能 k 及湍动能耗散率 ε 的方程如下:

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \times \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_1 \varepsilon G}{k} - \frac{C_2 \rho \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: $G = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$; $\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_t$; $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 。

G - 由于平均速度梯度而产生的湍流动能/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$); ρ - 流体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); u - 速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); i, j - 坐标分量; μ_{eff} - 有效粘度系数/($\text{Pa} \cdot \text{s}$); μ_l - 层流粘度系数/($\text{Pa} \cdot \text{s}$); μ_t - 湍流粘度系数/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。 $C_1 = 1.43, C_2 = 1.93, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 为 $k-\varepsilon$ 方程的经验系数。

1.2.4 能量方程

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

1.2.5 示踪剂扩散

一般使用示踪剂扩散的方法模拟研究六流连铸中间包内的流动规律。在每个时间步内进行流场计算时,通过求解过滤平流方程,模拟了 e 曲线无源标量的输运过程,从而计算出添加示踪剂的浓度。

$$\rho \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_{\text{eff}} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right] = 0 \quad (6)$$

式中:有效扩散系数 D_{eff} 是分子扩散系数和湍流扩散系数之和。通过稳态仿真求解出速度场,并计算

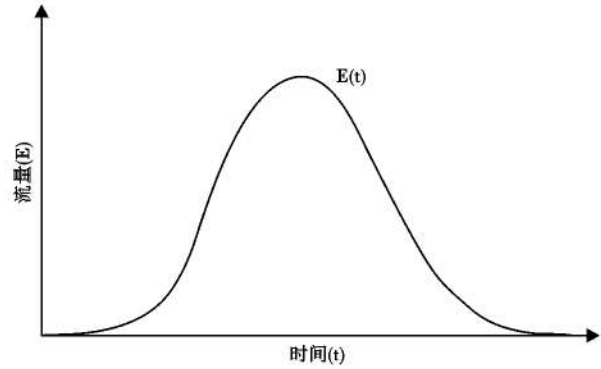


图 1 停留时间分布(RTD)函数
Fig. 1 Residence time distribution function

出 e 曲线。

1.2.6 RTD 曲线分析方法

RTD 是中间包内任意体积流体所用时间的统计表示。利用 RTD 曲线可以分析活塞流区体积、死区体积和全混流区体积等不同的有效流量。如图 1 所示, $E(t) dt$ 是流体元素在 $t=0$ 时进入中间包并在时间 t 和 $t + \Delta t$ 之间流出的概率。

当只计算钢液在中间包内的稳态流动时,其理论平均停留时间为中间包流体体积除以体积流量。 e 曲线绘制最简单直接的方法是使用无反应示踪剂,根据数值模拟测得的无量纲出口浓度绘制 e 曲线,实际平均停留时间由式(7)计算。

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t C(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) dt} \quad (7)$$

死区是指中间包内钢液的停留时间超过两倍理论平均停留时间的区域,死区的存在会显著降低中间包的活化体积,该区内钢液的更新速度极其缓慢,应尽量减小死区体积分数。活塞流区虽然不利于钢液成分和温度的均匀化,但却非常有利于钢液中非金属夹杂物的上浮去除,应尽量增大活塞流区体积分数。死区的体积分数为 1 减去实际平均停留时间与理论平均停留时间的比值,活塞流区的体积分数为滞止时间和峰值时间的平均值,全混流区的体积分数为活塞流区和死区之外的部分。

2 实验方案

2.1 中间包模型及网格

根据钢厂实际 40 t 中间包建立了 1:1 的流体域数学模型,为同时追求数值模拟的精度和效率,采用对称条件只计算一半的中间包模型(图 2 ~ 图 4)。中间包的 3 个出水口分别为“1 号水口,2 号水口,3 号水口”。

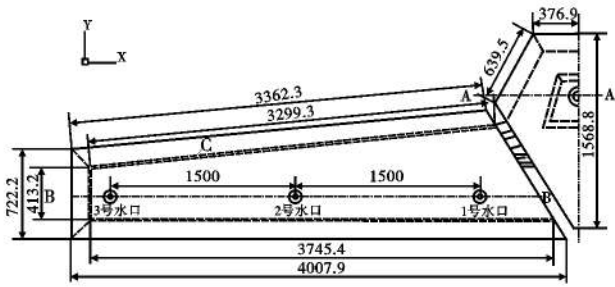


图2 中间包分析面示意图及尺寸(mm)

Fig. 2 Schematic diagram and size of analysis surface of tundish(mm)

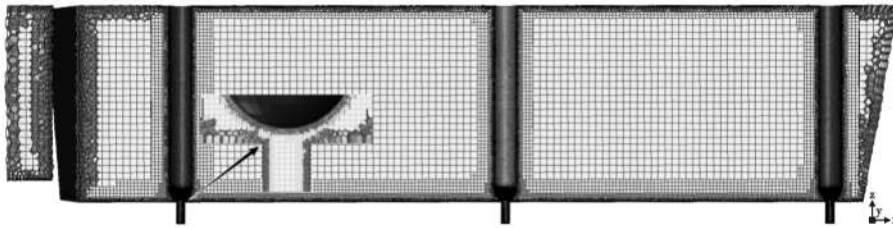


图3 中间包网格划分截面图

Fig. 3 Grid section drawing of tundish

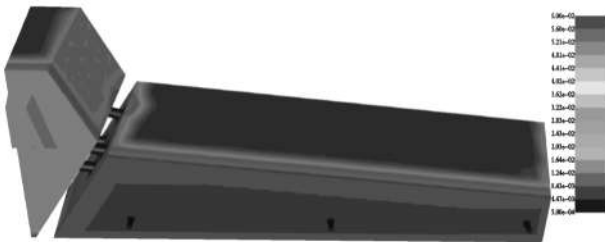


图4 中间包网格密度云图

Fig. 4 Grid density nephogram of tundish

表1 中间包模拟物性参数

Table 1 Simulated physical parameters of tundish

项目	参数
钢液密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 100
钢液附面层黏度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	0.006 2
入口湍动能/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)	0.003 86
入口湍动能耗散率/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)	0.006 26
重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	9.81
入口温度/K	1 833
钢液比热容/[($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\cdot \text{K}^{-1}$]	740
入口速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.40
钢液热导率/[($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$) $\cdot \text{K}^{-1}$]	41
自由表面热损/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	15
底墙热损/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	1.4
横墙热损/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	3.2
纵墙热损/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	3.8

2.2 边界条件

入口采用速度入口(velocity-inlet)边界条件,在入口平面上速度均匀分布,方向垂直于该平面。速度大小根据质量守恒定律,由铸坯断面、拉坯速度、

长水口直径计算得到,本实验采用湍动能和湍动能耗散率对入口处的湍流特征进行表征。

壁面全部采用 wall 边界条件,钢液上表面采用零剪切力自由滑移壁面,其余壁面采用无滑移壁面,壁面附近采用增强壁面函数,各壁面传热条件依据实际给定。

出口采用 outflow 边界条件且各出口质量流量权重比值为1:1:1,保证中间包钢液流动充分发展。

对称面采用 symmetry 边界条件,对称面上的法向速度为0,所有变量的法向梯度为0。

中间包模拟过程的物性参数如表1所示。

2.3 正交试验设计

本模拟实验中影响挡墙控流效果的因素有3个,分别为底孔上仰角度、中孔上仰角度、孔上移距离。根据相对应的取值范围每个因素下取3个不同的水平,构成

3×3的正交设计表,如表2所示。

表2 挡墙开孔结构正交设计表

Table 2 Orthogonal design table of opening structure of retaining wall

编号	底孔上仰角度/°	中孔上仰角度/°	孔上移距离/mm
1	5	0	0
2	5	5	50
3	5	10	100
4	10	0	50
5	10	5	100
6	10	10	0
7	15	0	100
8	15	5	0
9	15	10	50

2.4 RTD 曲线模拟过程

在 Fluent 中借鉴刺激-响应法的原理,通过无化学反应的组分运输模型进行示踪实验。其中,为最小化示踪剂对钢液流场的影响,其物性参数设置为与钢液的材料相同。

(1)对中间包稳定浇注过程采用 Fluent 模拟,计算收敛后,得到钢液流场的稳态数据;

(2)开启组分运输模型,转为瞬态模拟,在中间包入口处加入1 s 质量分数占比100%的示踪剂,直到计算结束;

(3)将入口处的示踪剂关闭,进入质量分数占比100%的钢液。在各出口处监测示踪剂的质量分数(浓度),在瞬态下进行计算,总时长取2倍理论

平均停留时间,得到各出口出示踪剂浓度随时间的变化曲线及相关数据。

3 实验结果及分析讨论

通过计算流体力学模拟研究了钢水容量为 40 t 的六流连铸中间包通道开孔不同倾角与位置条件下的流场和 RTD 曲线(图 5)。采用的收敛标准为:连续性和流动变量残差小于 10^{-4} 、能量残差小于 10^{-6} 、进出口流量差在 0.01% 以内且自由液面的平均速度不再发生变化。

中间包的理论平均停留时间为 640 s。根据图 6 可以直观地看到,原中间包内钢液的流动分配非常不均匀:流线大都集中在 1 号水口附近且平均停留时间很短。由于 1 号水口距离入水口距离最近,从长水口流入的钢液在冲击包底后大都直接沿着底部流向了 1 号水口,反观距离较远的 2、3 号水口钢液流出量较少。最远端水口处钢液流动太过缓慢,超过了理论上的中间包平均停留时间 640.0 s。各流 RTD 曲线计算得到 1、2、3 号水口的钢液平均停留时间为 477.4、574.2、681.7 s,钢液平均停留时间的综合标准差为 102.2,各流水口的流动一致性

较差。根据总体的 RTD 曲线计算得到平均停留时间为 577.7 s,死区、活塞区、全混区体积分数分别为 9.7%、26.9%、63.4%。

对正交表中列出的 9 种挡墙方案进行数值模拟,进行正交分析确定出最佳的挡墙导流孔结构方案。本次研究中将中间包各流的钢液平均停留时间、开始响应时间(即滞止时间)、中间包钢液总体平均停留时间、各流水口浇注一致性等作为正交分析指标。

表 3 中,编号 0 为原中间包数据, t_1, t_2 和 t_3 分别为 1 号水口,2 号水口和 3 号水口的平均停留时间, \bar{t} 为总平均停留时间, t_{\min} 为滞止时间, S_i 为总平均停留时间标准差, $S_{i_{\min}}$ 为滞止时间标准差。

从表 4 可以看出,中部仰角的射流角度在中间包内钢液流动的整体过程起主要作用,主要决定了钢液上浮去除夹杂物以及钢液向远端 3 号水口流动的特征。在钢液注流速度不变的条件下,中部仰角增大,钢液总平均停留时间延长,中间包内钢液流动得到优化。

从表 5 可以看出,通道上移距离对中间包钢液滞止时间影响比较明显,底部仰角次之。通道位置决定的钢液在竖直方向上经由钢液面上浮去除夹杂物再向出水口流出的运动路程;根据从开孔通道射流的抛物线轨迹,底部仰角控制着钢液最先到达 1 号水口与 2 号水口的时间。从导流孔流出的钢液直接由钢液面向 1 号和 2 号水口流去,可以说 1 号

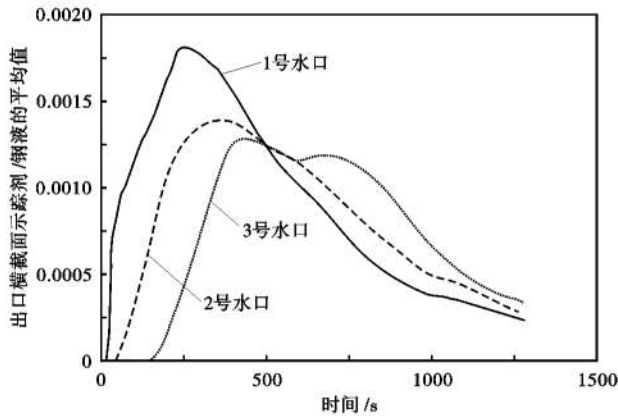


图 5 原中间包各流 RTD 曲线图

Fig. 5 RTD curve diagram of each stream of original tundish

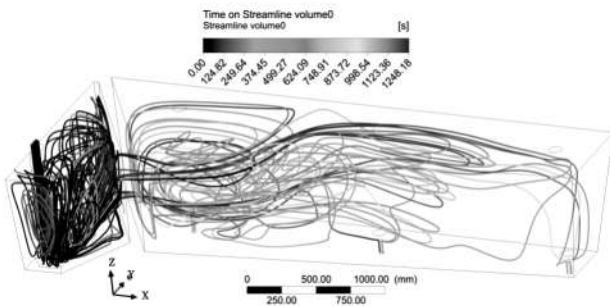


图 6 原中间包钢液时间流线

Fig. 6 Molten steel time streamline of original tundish

表 3 挡墙导流孔正交方案模拟结果

Table 3 Simulation result of orthogonal scheme of diversion hole in retaining wall

挡墙方案	t_1/s	t_2/s	t_3/s	\bar{t}/s	S_i	t_{\min}	$S_{i_{\min}}$
0	477	574	682	578	102.19	30	70.54
1	479	490	592	520	62.53	27	48.99
2	498	499	663	553	95.24	26	55.29
3	496	565	657	572	80.93	24	86.22
4	469	461	627	519	93.75	23	94.20
5	513	534	577	541	32.71	22	61.50
6	522	566	575	554	28.65	36	49.54
7	507	524	647	559	76.37	32	81.98
8	526	516	566	536	26.49	31	23.46
9	523	555	580	553	28.54	28	83.62

表 4 总平均停留时间(/s)正交分析

Table 4 Orthogonal analysis of total mean residence time (/s)

因素	底角	中角	位置
水平 1	548.7	532.9	537.0
水平 2	538.1	543.5	541.7
水平 3	549.4	559.8	557.6
极差 R	11.3	26.9	20.7

表5 滞止时间(/s)正交分析

Table 5 Orthogonal analysis of stagnation time(/s)

因素	底角	中角	位置
水平1	25.7	27.3	31.3
水平2	27.0	26.3	25.7
水平3	30.3	29.3	26.0
极差R	4.7	3.0	5.70

和2号水口的滞止时间即代表了整体中间包的滞止时间。在钢液注流速度不变的条件下,通道位置的升高,使得钢液运动的总路程缩短,滞止时间缩短;底部仰角的增大,使得钢液在水平方向上到达1号和2号水口的时间延后,滞止时间延长,中间包内钢液流动得到优化。

从表6可以看出,在钢液注流速度不变的条件下,底部仰角增大,平均停留时间综合标准差减小,在给定范围内底部仰角越大越好;中部仰角增大,平均停留时间综合标准差减小,在给定范围内中部仰角越大越好;通道位置升高,平均停留时间综合标准差先增大后减小,这说明通道位置的取值应该在一个合适的范围,且最好在0~50 mm。

表6 平均停留时间(/s)综合标准差正交分析

Table 6 Orthogonal analysis of synthetic standard deviation of mean residence time(/s)

因素	底角	中角	位置
水平1	79.5	77.6	39.2
水平2	51.7	51.5	72.5
水平3	43.8	46.0	63.3
极差R	35.7	31.6	33.3

综合以上的数据可以得出,在评价导流孔结构控流效果的指标中,在各因素各水平作用下,各流平均停留时间和平均停留时间综合标准差的变动幅度较大,而总平均停留时间和滞止时间有浮动,但幅度较小。综合分析决定采用底部通道上仰角度10°、中部通道上仰角度10°、通道上移距离0 mm的挡墙导流孔结构组合进行优化。

从图7和图8中可以看出,原中间包集中分布在1号水口的流线,向3号水口转移。根据RTD曲线计算得到1、2、3号水口的钢液平均停留时间为521.7、565.8、575.5 s,最远端3号水口处钢液流动情况得到显著改善,并未超过理论平均停留时间640.0 s,钢液平均停留时间的综合标准差为28.6,各流水口的流动一致性较好。根据总体的RTD曲线计算得到平均停留时间为554.3 s,死区、活塞区、全混区体积分数分别为13.4%、23.5%、63.1%。与原中间包相比,1号水口的滞止时间和平均停留

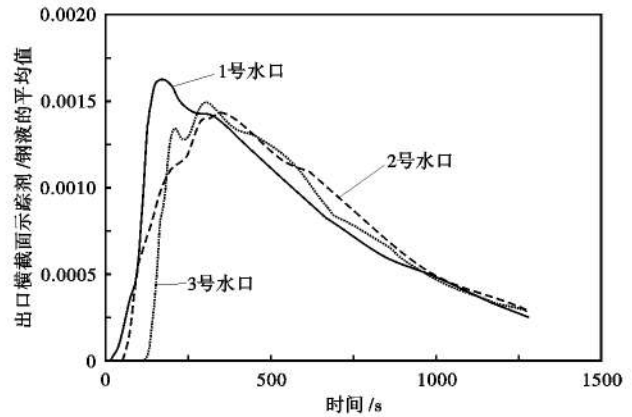


图7 优化中间包各流 RTD 曲线图

Fig. 7 RTD curve diagram of each stream of optimized tundish

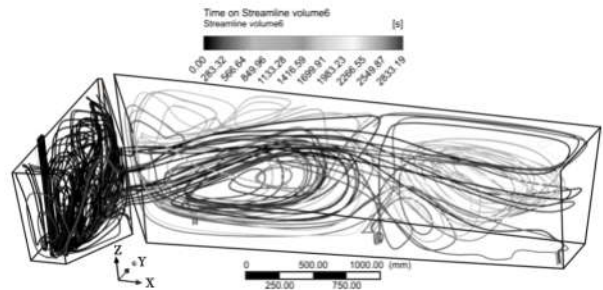


图8 优化中间包钢液时间流线

Fig. 8 Molten steel time streamline of optimized tundish

时间得到延长,死区比例均略微升高。尤其是对于1号水口,原中间包中1号水口离注流区最近,钢液由长水口流入后大都直接流向了1号水口,导致其平均停留时间太短,形成短路流,不利于夹杂物去除与流动的一致性。调整了挡墙导流孔结构后,注流区钢液被重新分配导向,极大延长1号水口钢液的平均停留时间,减少了短路流的产生。

中间包流场模拟结果如图9所示。据图9(a, c),原中间包流速较大的区域集中在通道与1号水口间以及1号水口与2号水口间接近包底的区域,钢液流到远端时速度几乎为0。原因在于原中间包通道角度水平,射流到达包底时在1号水口附近,流速变化剧烈。据图9(b, d),优化后流速较大的区域集中在1号水口与2号水口间,通道角度的抬升即射流角度重定向,导致涡心上移从而高速区域上升,湍流区域变的狭长从而削弱了湍流效应。同时,3号水口钢液面角部区域流速得到提升。从图9(e, f)中也能看出同样的变化趋势,在底部截面上,原本过于偏向1号水口的钢液以较大速度向远端延伸,使得之前钢液速度在远端位置过于缓慢的情况得到极大优化。

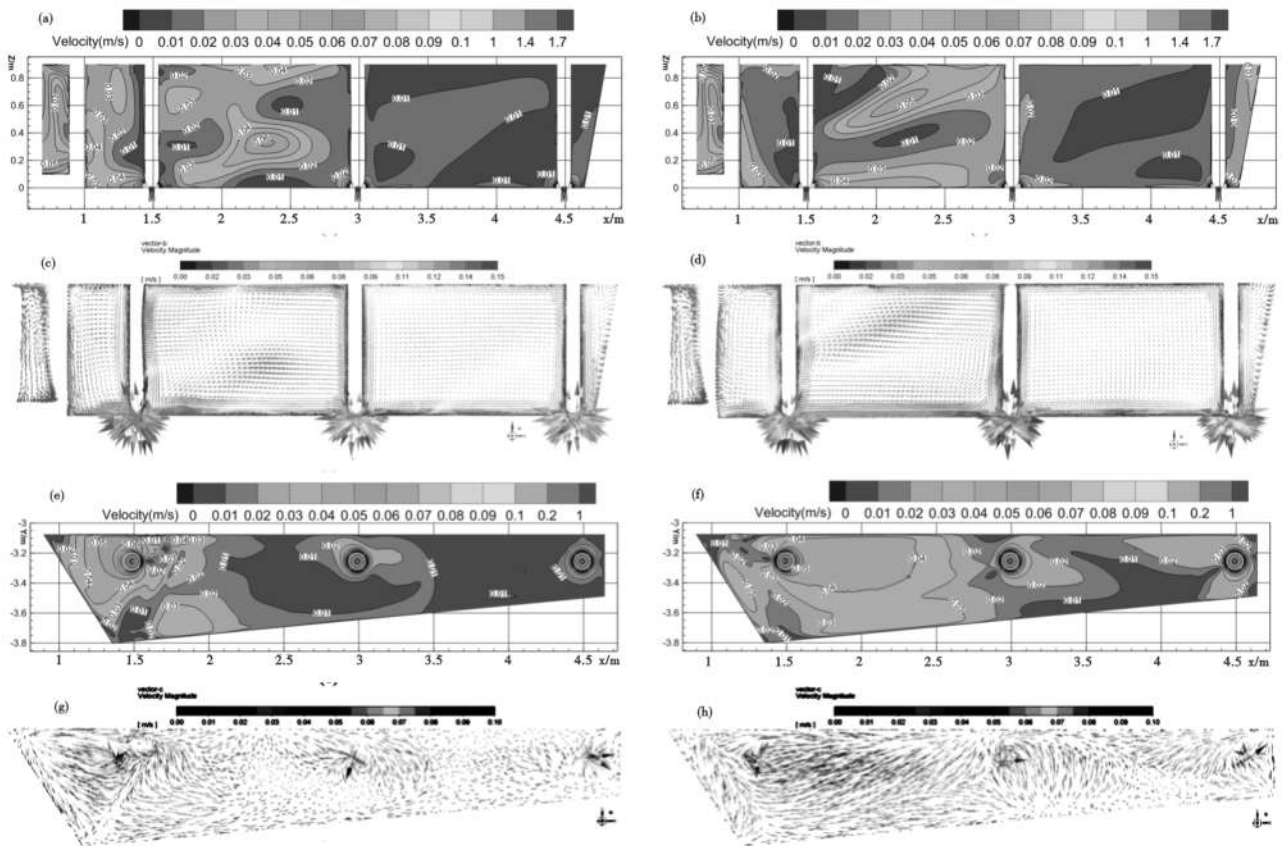


图 9 中间包流场:(a)原中间包 B 面速度云图;(b)优化中间包 B 面速度云图;(c)原中间包 B 面速度矢量图;(d)优化中间包 B 面速度矢量图;(e)原中间包 C 面速度云图;(f)优化中间包 C 面速度云图;(g)原中间包 C 面速度矢量图;(h)优化中间包 C 面速度矢量图
 Fig. 9 Flow field of (a) velocity contour of B plane in original tundish, (b) velocity contour of B plane in optimized tundish, (c) velocity vector of B plan in original tundish, (d) velocity vector of B plane in optimized tundish, (e) velocity contour of C plane in original tundish, (f) velocity contour of C plane in optimized tundish, (g) velocity vector of C plane in original tundish and (h) velocity vector of C plane in optimized tundish

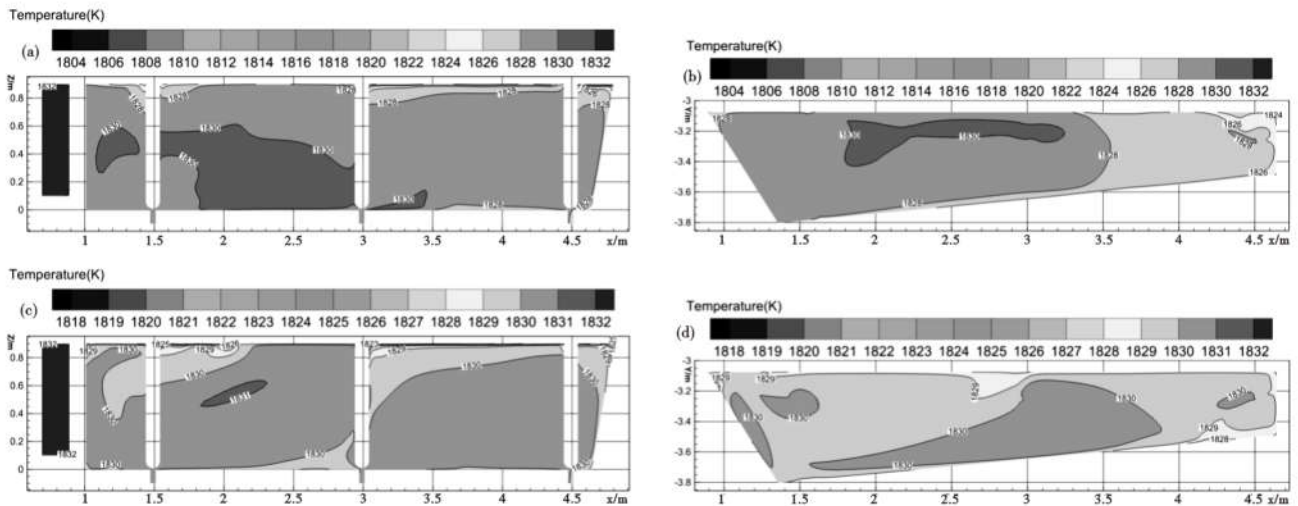


图 10 中间包温度场:(a)原中间包 B 面;(b)原中间包 C 面;(c)优化中间包 B 面;(d)优化中间包 C 面
 Fig. 10 Temperature field of (a) B plane in original tundish, (b) C plane in original tundish, (c) B plane in optimized tundish and (d) C plane in optimized tundish

整个原中间包内最高温度为入水口处的 1 833.0 K,最低温度出现在远端的边角区域,为 1 804.5 K。据图 10(a,b),随着距入水口距离不断增大,钢液温

度呈现出逐渐下降的趋势,且温降梯度越来越大。各流水口温度由 1 号水口至 3 号水口分别为 1 829.33、1 829.94、1 827.89 K,出水口温差为 2.05

K,3号水口的温度显然低于1号水口与2号水口。优化后中间包的最高温度仍为出水口的1 833.0 K,边角的最低温度为1 818.7 K。据图10(c,d),中间包内钢液整体温度升高,低温面积减小,温降梯度缩小,最低温度也高于原中间包的最低温度。各流水口温度由1号水口至3号水口分别为1 830.25、1 830.24、1 829.97 K,出水口温差为0.28 K,比原中间包的温差小。优化了导流孔结构后,与流场趋势保持一致,中间包温度场的均匀性得到很大提高,各流水口的温度一致性也得到了明显优化,有利于钢液浇注的一致性,对钢液质量提升有着重要意义。

4 工业实践效果

应用优化结构后的中间包进行现场生产试验,中间包钢水容量为40 t,转炉钢水容量为130 t,现场测试钢种为U75V重轨钢,工艺流程为铁水脱硫提钒-转炉冶炼-LF精炼-RH真空处理-连铸,浇注温度为1 560 ℃,拉速0.68 m/min,断面320 mm×410 mm,现场生产实验的中间包死区比例为15%,与数值模拟计算的死区比例13.4%非常接近;钢液在中间包内平均停留时间为550 s,数值模拟得出的平均停留时间为554.3 s(表7),相对误差为0.78%,小于5%,很好地说明了数学模型的准确性。

因此,本次数值模拟优化的挡墙结构应用于现场生产后,有效缩短了钢液的实际平均停留时间,解

表7 40 t中间包结构优化后应用效果对比

Table 7 Comparison of application effects after structure optimization of 40 t tundish

中间包	平均停留时间/s	3号水口平均停留时间/s	3号水口温度/K	各流温差/K
优化前	577.7	681.7	1827.89	2.05
优化后	554.3	575.5	1829.97	0.28

决了最远端水口流动过于滞后的问题。

5 结论

(1)通过数值模拟,计算出原中间包的死区比例为9.7%,1号水口存在短路流,3号水口响应较慢。总体平均停留时间为577.7 s,平均停留时间标准差为102.2,出水口温差2.05 K,各流一致性较差。

(2)通过正交试验,得出针对此中间包的最优导流孔方案,即底部和中部通道上仰角度均为10°、通道上移距离0 mm的挡墙导流孔结构组合。

(3)优化后中间包远端3号水口的速度与温度均升高。死区比例与总体平均停留时间相差不多,滞止时间延长6 s,平均停留时间标准差为28.6,出水口温差为0.28 K,各流一致性得到明显提高。

(4)40 t中间包工业实践表明,优化后最远端水口平均停留时间由681.7 s降至575.5 s,各流温差由2.05 K降至0.28 K,提高了各流一致性。

参考文献

- [1] Bul'ko B, Molnár M and Demeter P, et al. Study of the Influence of Intermix Conditions on Steel Cleanliness [J]. Metals, 2018, 8 (10): 852-860.
- [2] Merder T. Numerical Simulation of Liquid flow and Mixing Steel in Multi-Strands Tundish [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2012, 55(2): 561-566.
- [3] Warzecha M. Numerical Modeling of Steel flow in a Multi-Strand Continuous Casting Tundish [J]. Acta Metallurgica Slovaca, 2014, 20(2): 140-145.
- [4] Siddiqui M I H and Kim M H. Two-Phase Numerical Modeling of Grade Intermixing in a Steelmaking Tundish [J]. Metals, 2019, 9 (1): 40-53.
- [5] Sahai Y and Emi T. Melt flow Characterization in Continuous Casting Tundishes [J]. ISIJ International, 1996, 36(6): 667-672.
- [6] Alaei A R, Edris H and Shirani E. Upward Molten flow for Optimization of Fluid flow in Continuous Casting Tundish [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, 17(11): 29-33.
- [7] Sowa L. Numerical Modelling of Fluid flow and Thermal Phenomena in the Tundish of CSC Machine [J]. Archives of Foundry Engineering, 2014, 14(1): 103-106.
- [8] Chen Yang, Liu Weidong and Zhao Datong, et al. Mathematical Simulation of Structural Optimization and Application for Three-Strand Square Billet Tundish [J]. Special Steel, 2019, 40(1): 7-11.
- [9] Sahay S K, De T K and Basu D S, et al. Strand Performance Improvement Through Use of Asymmetric Baffles in Tundish of Six Strand Billet Caster at DSP [J]. Iron & Steel Maker, 2001, 28 (7): 71-74.
- [10] Yang Shufeng, Li Jingshe and Zhang Lifeng, et al. Study on Inclusion Removal in Liquid Steel in a Big Round Billet Continuous Casting Tundish [J]. Steelmaking, 2009, 25(3): 49-52.
- [11] Sun Yanhui, Xiong Huihui and Si Majin, et al. Optimization of 4-Strand Tundish Configuration in Continuous Casting of Billet [J]. Continuous Casting, 2011(S1): 177-182.
- [12] Sahai Y and Ahuja R. Fluid flow and Mixing of Melt in Steelmaking Tundishes [J]. Ironmaking & Steelmaking, 1986, 13(5): 241-247.
- [13] Kumar A, Koria S C and Mazumdar D. An Assessment of Fluid flow Modelling and Residence Time Distribution Phenomena in Steelmaking Tundish Systems [J]. ISIJ International, 2004, 44 (8): 1334-1341.
- [14] Wang G, Yun M and Zhang C, et al. Flow Mechanism of Molten Steel in a Single-Strand Slab Caster Tundish Based on the Residence Time Distribution Curve and Data [J]. ISIJ International, 2015, 55(5): 984-992.

李玉峰(1997-),男,硕士研究生(北京科技大学),2019年北京科技大学(本科)毕业,冶金工程研究。

E-mail:18810582113@163.com

收稿日期:2021-09-12