

五流中间包流场数值模拟与结构优化

刘涛¹, 刘俊达², 陈永峰¹, 焦魁明¹, 左小坦¹, 伍东玲²

¹芜湖新兴铸管有限责任公司, 安徽 芜湖

²中南大学能源科学与工程学院, 湖南 长沙

Email: liujunda573@163.com

收稿日期: 2021年8月17日; 录用日期: 2021年9月17日; 发布日期: 2021年9月24日

摘要

为优化中间包内钢液流动特性、提高钢坯质量, 本文利用CFD开源软件OpenFOAMv8, 对5流中间包钢液流场进行了数值模拟。利用水模型实验对数学模型进行验证, 结果表明死区比例误差不到2%。对原型中间包流场进行分析, 发现2#、3#出口存在钢液短路现象, 死区比例为12.77%, 有必要对中间包结构进行优化。根据流场分析, 拟通过增加挡坝、调整2个导流孔孔径与仰角等措施改善流场特性。通过对比9种导流孔方案下钢液流动特性参数的数值模拟结果, 得到其优化方案为: 在3#、4#出口中间增设挡坝, 导流孔B、C内径扩大至200 mm, 导流孔B仰角增大至30°。结果表明: 结构优化后的中间包内流场的死区比例可降低至2%左右。

关键词

中间包, 数值模拟, OpenFOAM, 结构优化, 水模型实验

Numerical Simulation and Structure Optimization of Five-Strand Tundish Flow Field

Tao Liu¹, Junda Liu², Yongfeng Chen¹, Kuiming Jiao¹, Xiaotan Zuo¹, Dongling Wu²

¹Wuhu Xinxing Pipes Company Limited, Wuhu Anhui

²School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Email: liujunda573@163.com

Received: Aug. 17th, 2021; accepted: Sep. 17th, 2021; published: Sep. 24th, 2021

Abstract

To optimize the flow characteristics of the molten steel in the tundish and improve the quality of

文章引用: 刘涛, 刘俊达, 陈永峰, 焦魁明, 左小坦, 伍东玲. 五流中间包流场数值模拟与结构优化[J]. 冶金工程, 2021, 8(3): 148-158. DOI: 10.12677/meng.2021.83019

the billet, this paper used the CFD open source software OpenFOAM v8 to simulate the flow field in the five-strand tundish. Using water model experiments to verify the mathematical model, the results show that the error of the dead zone ratio is less than 2%. The flow field of prototype tundish shows that there is a short-circuit of molten steel at immersion nozzle 2# and 3#, and the dead zone ratio is 12.77%. It is necessary to optimize the structure of the tundish. According to the analysis of the flow field, it is proposed to add a dam and adjust the aperture and elevation angle of the two diversion holes. By comparing the simulated results of the molten steel flow characteristic parameters under 9 schemes of diversion hole, the best one is to add a dam between outlet 3# and 4#, expand the diameters of diversion hole B and C to 200 mm, and increase the elevation angle of diversion hole B. The results show that the dead zone ratio of the flow field in the optimized tundish can be reduced to about 2%.

Keywords

Tundish, Numerical Simulation, OpenFOAM, Structure Optimization, Water Model

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中间包作为钢液凝固前最后一个耐火材料容器,其钢液流场对去除非金属夹杂物有着重要影响,进而对保障钢产品的性能起着重要作用[1] [2] [3] [4]。

Harnsihacacha 等人[5]分析了挡坝、导流挡墙对中间包流场的影响,发现增设挡坝后死区大小由原型的 44%减小到 33%,而增设挡墙后,死区大小减小到 23%。说明挡坝和挡墙改进中间包的流场性能十分有效。Zhong 等人[6]通过研究改变挡坝高度对中间包死区的影响,发现将挡坝增高后,死区从 28%减少到 17%。胡铁军等人[7]通过改变湍流抑制器侧壁高度、挡墙高度、挡坝高度来探索其优化效果,发现改变湍流抑制器侧壁高度影响不大,而改变挡墙、挡坝高度后,死区大小有明显改善。王德永等人[8]通过对几种不同的中间包控流装置进行比较,发现湍流抑制器能有效防止开浇时钢水喷溅和二次氧化,增设导流孔挡板和设置透气砖吹氩均能有效降低死区大小。郑淑国等人[9]研究了不同类型的“V”型挡墙及其与挡坝、湍流抑制器组合对中间包流场的影响,发现带横墙的“V”型挡墙和不带横墙的“V”型挡墙均能改善流场的流动特性,且在此基础上增设挡坝,能进一步降低死区比例。张利君等人[10]通过将原型中间包的挡墙和挡坝间距增大,有效提升活塞流的比例,并将死区比例降低了 2.2%。李怡宏等人[11]通过对双挡坝中间包进行研究,发现低挡坝应设置在高挡坝之后,且当低挡坝与高挡坝导流孔同高时,钢液平均停留时间达到最大稳定值,高低坝距离在 40~160 mm 之间时,低坝后无涡产生。许建飞等人[12]结合唐钢中厚板材公司现场生产情况,通过水模实验,对中间包内部结构进行优化研究,发现“抑湍器 + 单挡墙 + 双挡板”的组合优化方案,可将死区减小为 0.14%。由此可见,随着中间包流场优化目标的提高,优化的方法也逐渐从有无控流装置,发展到单控流装置结构参数优化,最终发展为多控流装置组合优化。

针对某公司钢坯杂质含量偏高的现象,本文基于计算流体力学方法,对连铸中间包中的流场进行分析,对不同导流孔、挡坝等结构参数下的流场进行数值模拟,并寻找出优化方案,为改进中间包流场特性提供理论指导。

2. 中间包模型

2.1. 物理模型

以五流中间包为研究对象, 其结构如图 1 所示, 内部设置有长水口、湍流抑制器、导流挡墙、塞棒、侵入式水口等部件。其中, 导流挡墙将内部空间分隔为冲击区和浇铸区两部分, 钢液经导流孔从冲击区流向浇铸区。导流孔孔径 $d_1 = d_2 = d_3 = 150 \text{ mm}$, 仰角 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 10^\circ$ 。五流中间包的主要工艺参数列于表 1 中。

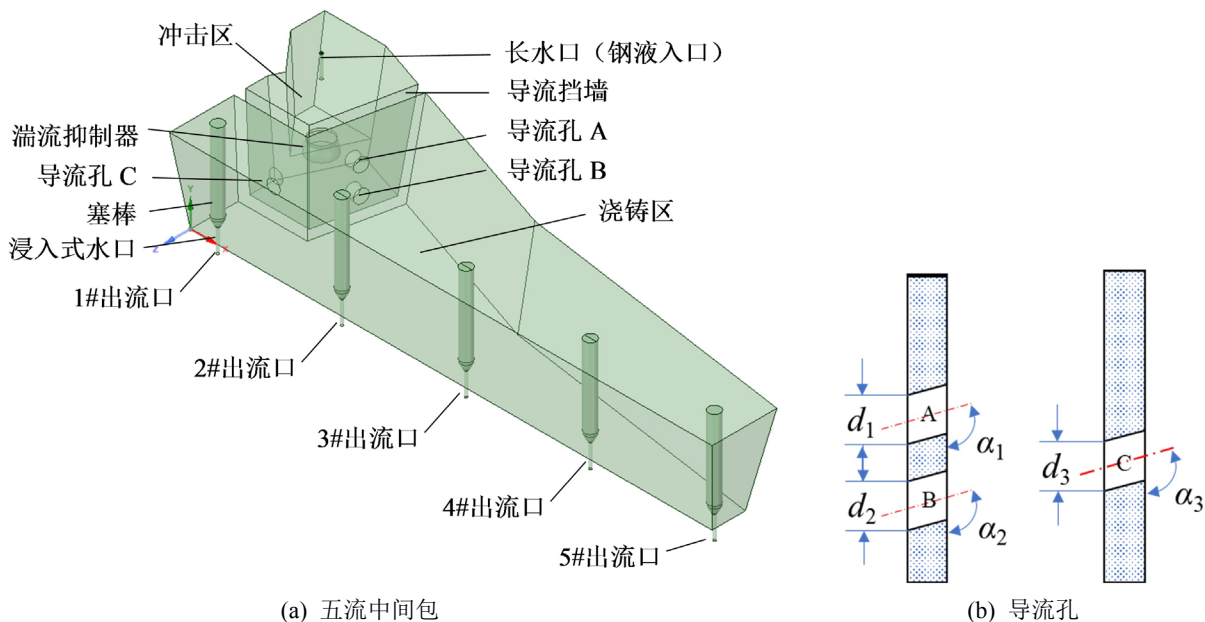


Figure 1. Schematic diagram of five-strand tundish structure

图 1. 五流中间包结构示意图

Table 1. Process parameter of tundish

表 1. 中间包工艺参数

中间包容量(m ³)	熔池深度(m)	铸坯断面(m ²)	拉坯速度(m/s)	长水口内径(m)	长水口插入深度(m)
5.423	0.85	0.18 × 0.18	1.3	0.03	0.25

2.2. 数学模型

中间包的运行过程可分为三个阶段: 充包阶段、稳态浇铸阶段、空包阶段。为简化计算, 本文仅考虑稳态浇铸阶段, 且忽略钢液的散热, 因此钢液的流场可用稳态不可压缩 N-S 方程进行描述, 湍流模型采用 SSTk- ω 模型, 即:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

式中, ρ 为密度, kg/m^3 ; u_j 为方向 j 的速度, m/s ; x_j 为 j 方向的坐标(j 分别取 1、2、3, 代表三个坐标方向), m 。

2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中, p 为压强, Pa; μ_e 为湍流粘度(即流体分子粘度 μ 和湍流粘度 μ_t 之和), Pa·s。

3) SST k - ω 湍流模型[13]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \bar{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\alpha}{v_t} \bar{P}_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中, k 为湍流动能, m^2/s^2 ; ω 为角频率, rad/s ; 且有:

$$\bar{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega) \quad (5)$$

混合函数

$$F_1 = \tan \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\} \quad (6)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} k \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 (1 - F_1) \quad (8)$$

$$\beta = \beta_1 F_1 + \beta_2 (1 - F_1) \quad (9)$$

$$\sigma_k = \sigma_{k1} F_1 + \sigma_{k2} (1 - F_1) \quad (10)$$

$$\sigma_\omega = \sigma_{\omega 1} F_1 + \sigma_{\omega 2} (1 - F_1) \quad (11)$$

参数取值见表 2。

Table 2. The parameter of the SST $k - \omega$ model

表. 2 SST $k - \omega$ 模型参数取值

β^*	α_1	α_2	β_1	β_2	σ_{k1}	σ_{k2}	$\sigma_{\omega 1}$	$\sigma_{\omega 2}$
0.09	5/9	0.44	3/40	0.0828	0.85	1	0.5	0.856

4) 组分运输方程

为了获得中间包死区、停留时间等流场特性参数, 常采用在其入口加入脉冲示踪剂、在出口监测示踪剂浓度的方法。这一过程可用非稳态的组分守恒方程进行描述, 即

$$\frac{\partial(\rho Y)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\rho D + \frac{\mu_t}{\sigma_Y} \right) \frac{\partial Y}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

式中, Y 为示踪剂的质量分数, D 为示踪剂扩散系数, m^2/s 。

2.3. 网格划分

由于采用 SST $k - \omega$ 湍流模型, 对壁面附近区域网格有较高的要求, 为此第一层网格高度在 1×10^{-4}

m 左右,可以保证高流速区壁面处的 y^+ 在 30~300 之间,低流速区壁面处的 y^+ 在 1 以下。网格数量约为 200 万,如图 2 所示。

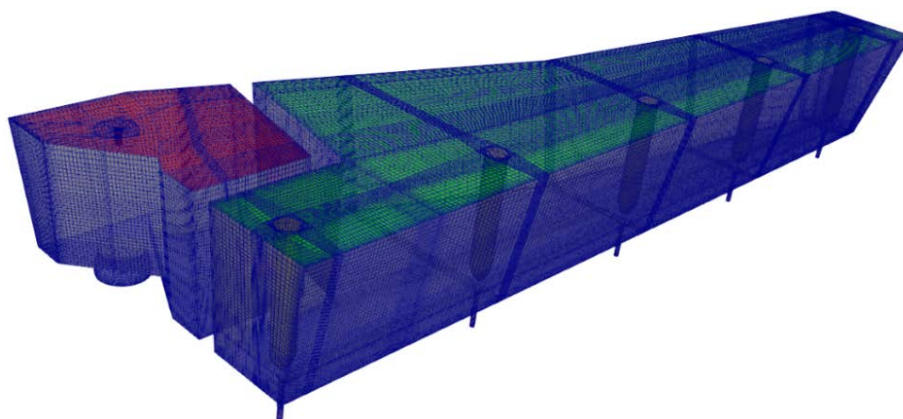


Figure 2. The mesh of five-strand tundish
图 2. 五流中间包网格示意图

2.4. 边界条件及求解方式

中间包入口采用速度入口,速度大小为 4.97 m/s,出口设置为压力出口,钢液液面采用对称边界,壁面设置为无滑移边界。钢液密度取 7014 kg/m^3 ,运动粘度取 $0.0064 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ [14]。

基于 CFD 开源软件 OpenFOAM v8 进行计算,使用 simple Foam 求解器对流动进行求解,使用 scalar Transport Foam 计算示踪剂的输运过程,采用 GAMG 求解器计算压力。

2.5. 模型验证

为了对中间包流场数值模拟结果的可靠性进行检验,对原型中间包流场进行水模型实验。

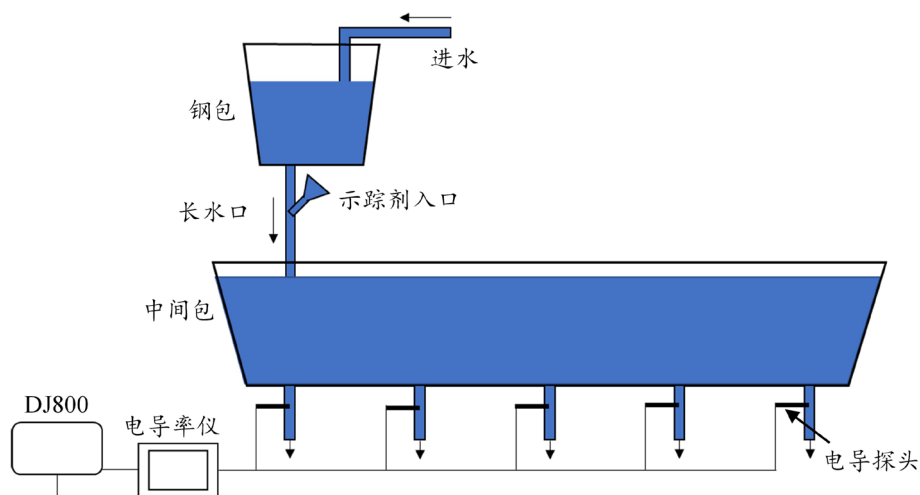


Figure 3. Schematic diagram of experimental device
图 3. 实验装置示意图

根据中间包的尺寸,按 1:3 的比例搭建了水模实验系统。考虑到雷诺数(Re)较大,对流速分布的影响较小,故基于弗里德数(Fr)相等的原则,控制模型中水的流量。

水模系统由上水装置、示踪剂加入装置、数据采集装置和排水装置四部分组成,具体包括钢包模型、中间包模型、示踪剂加入装置、电导探头、电导率仪和数据记录仪(DJ800)等,如图3所示。其中,钢包模型、中间包模型均由有机玻璃组成。

流场特性参数通过“刺激-响应”实验方法获取,主要实验步骤包括:

- 1) 将合适比例的水、酒精、KCl配制成密度与水接近的盐溶液,作为示踪剂;
- 2) 通过塞棒粗调和转子流量计微调使出口流量达到指定值,调节水流的入口阀门使液面达到指定高度并保持稳定;
- 3) 在入口处通过脉冲方式注入示踪剂;
- 4) 同时对电导率进行采样监测,采样频率为20 Hz,采样时间为3倍模型中间包的理论停留时间。

分别通过数值模拟方法和水模型实验得到原型中间包的死区比例,见表3所示。数值模拟结果相对水模型实验结果的偏差小于2%,表明所建立的数值模型可以准确预测中间包内钢液流动过程。

Table 3. Dead zone ratio of water model experiment and numerical simulation

表 3. 水模型实验与数值模拟的死区比例

	数值模拟值/%	水模型实验值/%	偏差/%
原型	12.77	11.46	1.31

3. 中间包原型流场分析

3.1. 速度分布

中间包原型流场数值模拟结果如图4~图6所示。由图4可知,钢液以较大的流速从长水口注入,形成射流,冲击底部的湍流抑制器。在湍流抑制器底部存在一个流速较小的区域,即为射流驻点。钢液遇到湍流抑制器内壁后向上流动,形成回流,并与射流引起的回流汇合。汇合后的钢液向上方流动,在靠近导流挡墙一侧形成一个较大的漩涡。

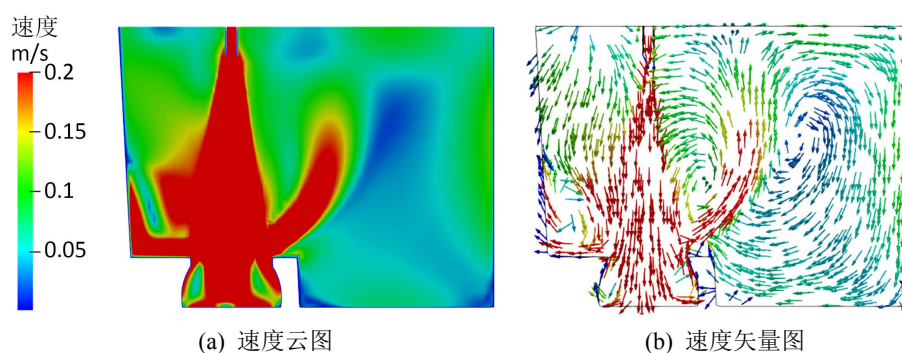


Figure 4. The melt velocity at longitudinal section through the inlet in impact zone

图 4. 冲击区入口纵截面速度分布

图5为通过各导流孔的水平截面速度矢量分布,导流孔位置从高到低依次为A、C、B。在导流孔A截面上,由于入口射流流速大,在导流孔A附近形成了顺时针的回流漩涡。导流孔B截面靠近湍流抑制器,钢液在离开湍流抑制器时向四周流动。钢液经过导流孔时流通面积减小,流速增大,进入浇铸区后形成射流并诱发回流。其中,经导流孔A、B进入浇铸区的钢液,由于射流区域上方靠近壁面,钢液向上的流动受阻,向下流动形成回流区域。经导流孔C进入浇铸区的钢液在较短的距离内遭遇壁面,冲击壁面后向浇铸区的末端流动,在1#、2#出口之间形成较强的回流。5#出口附近的钢液流速较低,没有出现回流。

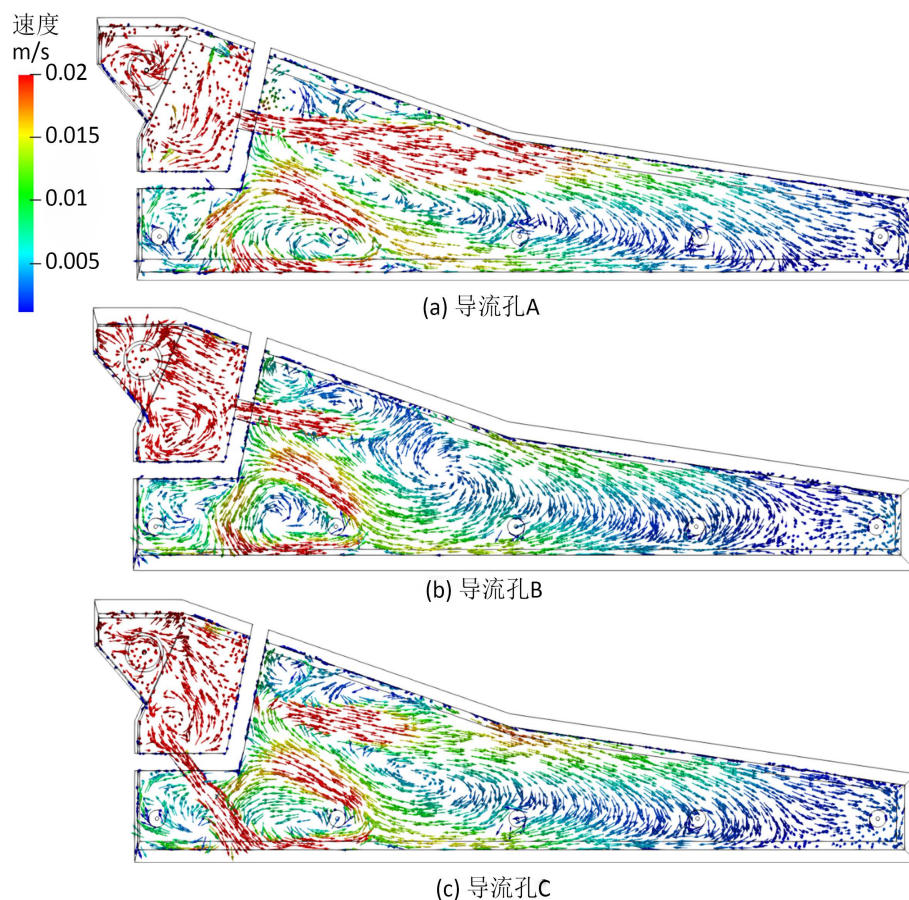


Figure 5. The melt velocity vector at the horizontal section through hole
图 5. 各导流孔水平截面速度矢量分布

图 6 为出口纵截面速度矢量分布。由于 1#、2#、3# 出口更靠近导流孔，因此整体钢液流速呈现左高右低的分布趋势。导流孔 C 钢液射流位于在 1#、2# 出口之间，具有较高的流速。导流孔 C 钢液射流方向向上倾斜，导致 2# 出口液面附近钢液具有较高的流速，同时部分钢液呈现出向下流动的趋势。

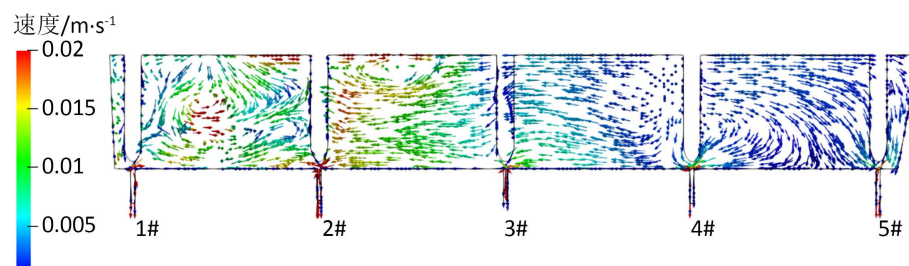


Figure 6. The melt velocity vector at longitudinal section through the outlets
图 6. 出口纵截面速度矢量

3.2. 流场特性参数

1) 各出口流量均匀性

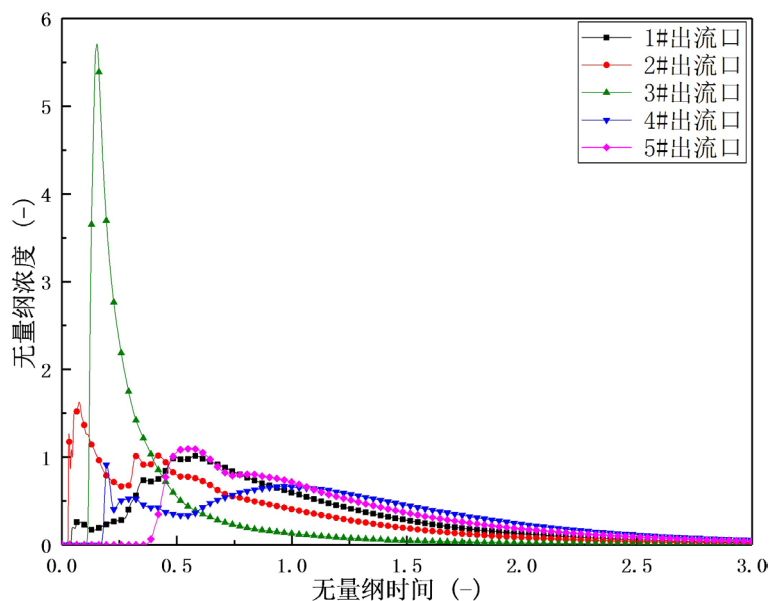
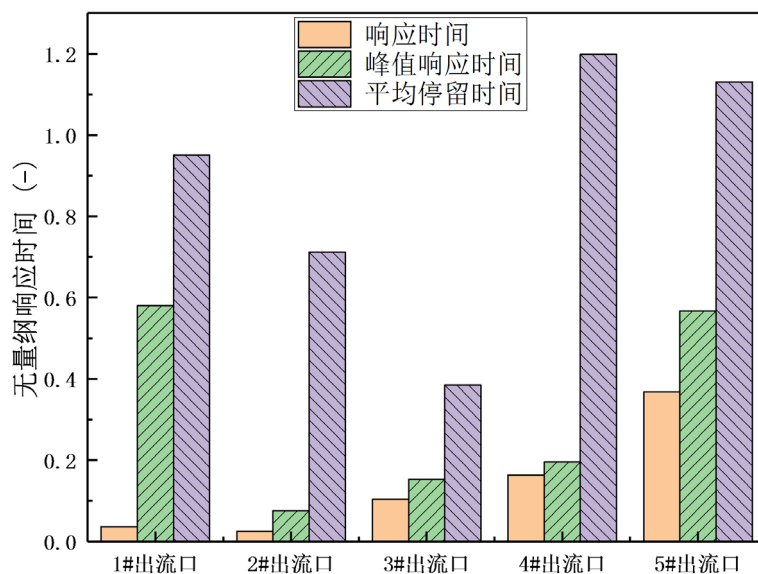
将 1#~5# 出口口的流量进行计算，并示于表 4 中。不难看出，各流口流量分配百分比的极差仅为 0.1%，说明当前中间包各出口流量分布均匀。

Table 4. Flow rate of each outlets**表 4.** 各出流口流量分布情况

位置	1#	2#	3#	4#	5#	极差
流量占比/%	19.94	19.96	20.04	20.03	20.03	0.1

2) 各流口的停留时间

通过对示踪剂组分运输过程的数值模拟，获得各出流口处的平均停留时间(RTD)曲线及其响应参数，如图 7、图 8 所示。1#、2#出流口距离导流孔 C 较近，钢液流动路程较短，具有较短的响应时间。经导

**Figure 7.** The average residence time distribution curve of each outlet**图 7.** 各出流口的平均停留时间分布曲线**Figure 8.** The time of tracer response at each outlet**图 8.** 各出流口的示踪剂响应时间

流孔 C 进入浇铸区的钢液大部分向 2# 出口流去, 致使 2# 出口峰值响应更早、平均停留时间更短。1#、4#、5# 出口的平均停留时间接近或高于理论停留时间, 具有相对理想的流动状态。3# 出口的示踪剂响应时间与峰值时间相近, 示踪剂响应快, 说明存在短路流, 不利于钢液中夹杂物的上浮分离, 具有较大的优化空间。

3) 死区比例

为了对中间包流场的整体性能进行评价, 计算了总平均停留时间分布曲线以及死区比例[15]。图 9 所示为总的示踪剂平均停留时间分布。表 5 为原型中间包内流动情况统计, 其流场以全混流为主(78.33%), 死区比例为 12.77%。

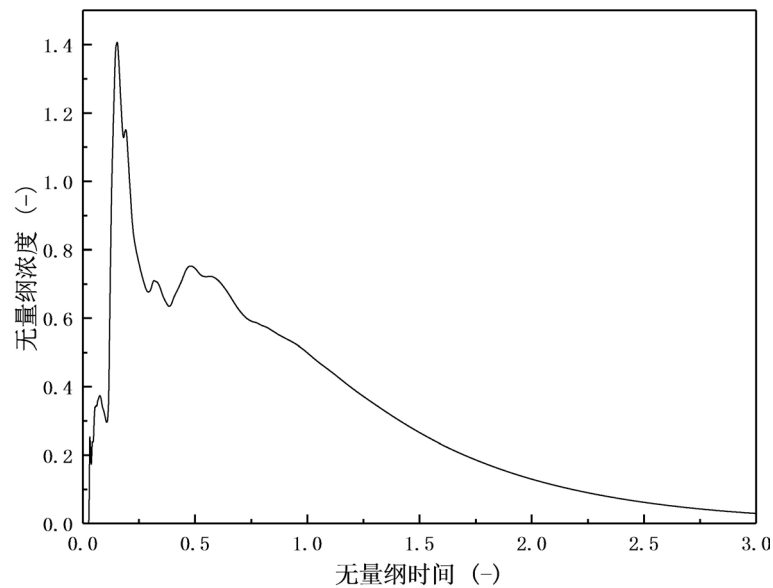


Figure 9. The total average residence time distribution curve
图 9. 总平均停留时间分布曲线

Table 5. Molten steel flow characteristic parameters in the prototype tundish
表 5. 原型中间包钢液流动特性参数

响应时间	峰值响应时间	平均停留时间	死区比例	活塞区比例	全混区比例
0.0258	0.1524	0.8723	12.77%	8.91%	78.33%

4. 结构参数优化的数值模拟

4.1. 模拟方案

为了降低中间包流场中的死区比例, 需对其结构参数进行优化。根据工程实践经验, 通过增设挡坝、调整导流孔的仰角与内径, 可以改变中间包的流场。为此, 本文在 3#、4# 出口之间增设挡坝, 保持原型中间包导流孔 A 的参数不变, 改变导流孔 B、C 的内径与仰角, 其模拟实验方案见表 6。

Table 6. The simulation cases with various hole structure
表 6. 不同导流孔结构参数下的模拟实验方案

编号	d_2/mm	d_3/mm	$\alpha_2/^\circ$	$\alpha_3/^\circ$
1	100	100	10	10

Continued

2	100	150	30	20
3	100	200	20	30
4	150	100	30	30
5	150	150	20	10
6	150	200	10	20
7	200	100	20	20
8	200	150	10	30
9	200	200	30	10

4.2. 结果分析

对表 6 中的 9 种实验方案下的中间包内钢液流动过程分别进行了数值模拟, 并提取相应的钢液流动特性参数, 如表 7 所示。不难看出, 第 9 号实验方案下的死区比例最小, 由原型的 12.77% 降至 2.6%, 同时具有最长的无量纲停留时间 0.9774。中间包优化后的结构参数为: 增设挡坝, 导流孔 B、C 的内径均由 100 mm 扩大至 200 mm, 将导流孔 B 的仰角调整为 30°。

Table 7. The molten steel flow characteristic parameters with various hole structure

表 7. 不同导流孔结构下钢液流动特性参数

编号	响应时间	峰值时间	平均停留时间	死区比例/%	活塞区比例/%	全混区比例/%
原型	0.0258	0.1524	0.8723	12.77	8.91	78.33
1	0.1028	0.1349	0.9451	5.49	11.88	82.63
2	0.1201	0.5251	0.9496	5.04	32.26	62.70
3	0.0707	0.3896	0.8131	18.69	23.01	58.30
4	0.0727	0.3925	0.9434	5.66	23.26	71.08
5	0.0442	0.3545	0.9059	9.41	19.94	70.65
6	0.1401	0.5409	0.8189	18.11	34.05	47.84
7	0.1329	0.3454	0.9037	9.63	23.91	66.46
8	0.0799	0.4140	0.9258	7.42	24.69	67.89
9	0.0573	0.4749	0.9774	2.26	26.61	71.14

5. 结论

本文基于计算流体力学方法, 对原型中间包钢液流场进行了分析与结构优化, 并通过水模型实验对其优化效果进行了验证, 得到主要结论如下:

- 1) 水模型实验结果表明, 建立的数学模型可以有效描述中间包内的钢液流动过程。
- 2) 原型中间包各出口流量分配均匀; 钢液在浇铸区中部形成较大的涡, 有利于促进钢液混匀, 中间包全混流占比达到 78.33%, 但 2#、3# 出口存在钢液短路现象, 死区比例较高, 约 12%。
- 3) 对 9 种不同导流孔结构的中间包流场进行了数值模拟, 获得了具体的优化方案, 即在 3#、4# 出口之间增设挡坝, 将导流孔 B、C 的内径扩大至 200 mm, 提高导流孔 B 的仰角至 30°。

参考文献

- [1] 黄宇, 成国光, 王启明, 窦文哲, 胡学文. 大尺寸夹杂物对 12MDV6 铸件冲击性能的影响[J]. 中国冶金, 2020, 30(6): 39-47.
- [2] 王皓, 包燕平, 王敏, 林路, 李钊, 魏晓东. 夹杂物对厚规格 X80 热轧钢带 DWTT 性能的影响[J]. 工程科学学报, 2018, 40(s1): 1-10.
- [3] 邓晗, 陈璐, 朱贵华. 晶界夹杂物对 QT400-18L 性能的影响[J]. 铸造技术, 2020, 41(9): 823-825+830.
- [4] 包燕平, 王敏. 中间包冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [5] Harnsihacacha, A., Piyapaneeekoon, A. and Kowitwarangkul, P. (2018) Physical Water Model and CFD Studies of Fluid Flow in a Single Strand Tundish. *Materials Today: Proceedings*, 5, 9220-9228. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.093>
- [6] Zhong, L., Hao, R., Li, J. and Zhu, Y.-X. (2014) Molten Steel Flow in a Slab Continuous-Casting Tundish. *International Journal of Iron and Steel Research*, 21, 10-16. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60113-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60113-8)
- [7] 胡铁军, 刘宏春, 房志琦, 刘辉, 孙力, 单红超. 异型中间包流场水模型优化[C]//河北省金属学会、河北科技大学、华北理工大学. 2019 全国高效连铸应用技术与铸坯质量控制研讨会论文集. 河北省金属学会、河北科技大学、华北理工大学: 河北省金属学会, 2019: 11.
- [8] 王德永, 冯丽萍, 刘承军, 姜茂发, 朱英雄. 几种中间包控流装置的作用及比较[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(8): 21-24.
- [9] 郑淑国, 朱苗勇, 王颖. 六流方坯连铸中间包结构优化水模实验[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(11): 10-14.
- [10] 张利君, 王凤琴, 朱志远, 韦耀环, 薄凤华. 中间包控流装置优化的数值模拟及生产应用[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(3): 13-15+51.
- [11] 李怡宏, 包燕平, 赵立华, 王敏. 双挡坝中间包内钢液的流动行为[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(12): 19-26.
- [12] 许建飞, 刘志远, 王重君, 程巨广, 田宝义, 张杰. 板坯连铸过程夹杂物控制研究[J]. 连铸, 2018, 43(6): 61-66.
- [13] Menter, F.R. (2009) Review of the Shear-Stress Transport Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 23, 305-316. <https://doi.org/10.1080/10618560902773387>
- [14] 詹树华. 几种化工及冶金反应器内多相流动传输现象的模拟研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [15] 雷洪, 赵岩, 鲍家琳, 刘承军, 陈海耿, 赫冀成. 多流连铸中间包停留时间分布曲线总体分析方法[J]. 金属学报, 2010, 46(9): 1109-1114.