

## 基于温度场的17 t双流中间包控流装置优化模拟

韩东 艾新港 李胜利 曾红波 王月

(辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051)

**摘要** 中间包控流装置影响包内钢液的流动状态以及钢液温度的均匀程度,这决定了钢液是否能够高质量的稳定浇铸。以钢厂17 t双流中间包为原型,按与实际中间包1:2比例建立模型。通过正交水模拟实验以及对温度场的数值模拟,得出在考虑温度的条件下最优化的中间包控流装置组合为:堰距包底距离260 mm、坝高360 mm、堰与水口间距离580 mm、坝与水口间距离1 170 mm。

**关键词** 双流中间包 控流装置 水模 数模 正交实验

## Simulation Study on Optimizing Flow Control Device of a 17 t Double-flow Tundish Based on Temperature Field

Han Dong, Ai Xingang, Li Shengli, Zeng Hongbo and Wang Yue

(School of Material and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

**Abstract** The tundish flow control device affects the flow state of molten steel in the tundish and the uniformity of molten steel temperature, which determines whether the molten steel can be cast steadily with high quality. Based on the prototype of a 17 t double-flow tundish in a steel plant, the model is established with the ratio of 1:2 to the actual tundish. Through orthogonal water simulation experiment and mathematical simulation of temperature field, the optimal combination of tundish flow control devices under the consideration of temperature is obtained as follows: the distance between weir and bottom of the tundish is 260 mm, the height of the dam is 360 mm, the distance between weir and nozzle is 580 mm, and the distance between dam and nozzle is 1 170 mm.

**Material Index** Double-flow Tundish, Flow Control Device, Water Simulation, Mathematical Simulation, Orthogonal Experiment

近年来,连铸技术在钢铁行业中得到广泛应用,其水平的高低是检验一个国家钢铁行业发展水平的重要指标之一<sup>[1]</sup>。中间包是连铸机的关键设备,作为钢液凝固前经过的最后一个耐火材料容器<sup>[2-3]</sup>,除了起到一个容器的作用,还可以完成净化钢液、调节钢液的成分以及控制钢液温度等功能<sup>[4-5]</sup>。中间包内部结构直接影响钢液的流动状态和其温度均匀程度,而在连铸过程中,中间包内钢液温度分布不均会严重影响连铸坯的质量。因此,中间包内部结构及温度场分布情况对优化中间包冶金<sup>[6]</sup>起重要作用。

冶金工作者们采用物理模拟和数值模拟等方法在这方面做了大量的科学研究。陈萍<sup>[7]</sup>以相似原理为支撑,应用水模拟实验和“刺激-响应”技术<sup>[8]</sup>,通过调整挡坝位置控制注流区和控流区的比例来优化中间包结构,得到去除夹杂物效果最好的堰坝结构组合;唐德池等<sup>[9]</sup>运用 Fluent 软件对中间包温度

场进行数值模拟,研究了控流装置对中间包温度场的影响情况,得出控流装置越简单,其温度场分布越均匀。夹杂的迁移及挡板孔结构参数对夹杂去除率的影响<sup>[10]</sup>,通过物理模拟实验给出了两个最佳的中间包结构参数。孔章情等<sup>[11]</sup>通过水力模拟和正交实验相结合的方法,采用堰坝控流装置来优化二流中间包的流场,通过分析优化出最佳方案。李艳龙<sup>[12]</sup>对新钢第一炼钢厂2\*方坯连铸机的中间包的温度场进行数值模拟,提出中间包结构优化方案,并对各方案进行数值模拟,得到各方案的温度场及瞬态条件下的 RTD 曲线,通过分析得出最佳的中间包方案。综上所述,目前就钢液停留时间较长的控流装置再进行温度场的数值模拟比较找出最优化结构中间包这方面的研究较少,本文就这方面做了深入研究,即考虑温度的情况下优化中间包控流装置。

本文以钢厂现有中间包内部堰坝结构为基础,通过对坝与水口间距离、堰与水口间距离、坝高、堰

通讯作者:艾新港,副教授,辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051

E-mail: aixingang@126.com

距包底距离四因素进行水模拟正交实验。通过数学计算分析得到几组平均停留时间较长的控流装置组合。并对其数值模拟,得到各组合中间包的温度场分布情况、整体温差以及出入口温差,通过对比分析得到最佳的中间包结构。

### 1 物理模型建立

#### 1.1 水模型实验原理

本实验以相似原理为基础,通过水模型进行模拟实验,实验要求原型和模型几何和物理相似<sup>[13]</sup>。本实验模型按与实际中间包1:2比例,采用有机玻璃制成。由于流体的流动状态在原型和模型中都处于第二自模化区,所以在进行中间包水模实验时要确保  $Fr$  准数相同<sup>[14]</sup>。

$$\text{即: } (Fr)_m = (Fr)_r \tag{1}$$

$$\frac{gL_m}{\mu_m^2} = \frac{gL_r}{\mu_r^2} \tag{2}$$

$$\text{令: } \lambda = \frac{L_m}{L_r} \tag{3}$$

$$\text{则: } \frac{\mu_m}{\mu_r} = \lambda^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

$$\frac{Q_m}{Q_r} = \frac{\mu_m L_m}{\mu_r L_r^2} = \lambda^{\frac{5}{2}} \tag{5}$$

式中: $m$ - 模型; $r$ - 原型; $G$ - 重力加速度/ $(m \cdot s^{-2})$ ; $L$ - 中间包的特征长度/ $m$ ; $\mu$ - 中间包内钢液流动的特征速度/ $(m \cdot s^{-1})$ ; $\lambda$ - 比例因子; $Q$ - 体积流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$ 。

#### 1.2 水模实验方法

实验装置示意图如图 1 所示,当中间包的液面稳定后,在连续流动的钢包注流中定量加入 500 ml 的示踪剂(饱和 NaCl 溶液),同时在中间包出口处利用电导率仪、计算机及数据采集系统采集实验数

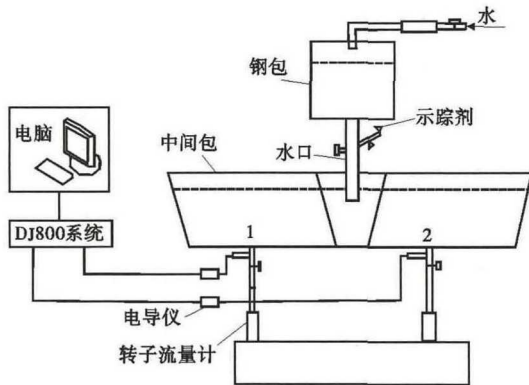


图 1 模拟实验装置示意图

Fig. 1 Schematics drawing of simulated test device

据并制成 RTD 曲线,利用 RTD 曲线计算出钢液的平均停留时间和死区体积分数。

### 2 数学模型建立

参考钢厂 17 t 两流中间包绘制模型,其中间包模型参数为:钢液深度为 1 000 mm,入水口直径为 90 mm,出口直径为 50 mm。通过 GAMBIT 进行建模并划分网格如图 2 所示。

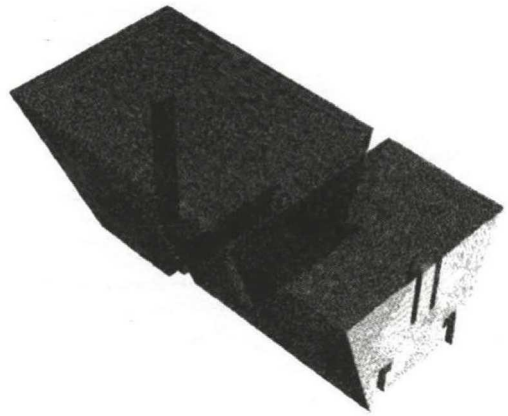


图 2 试验装置网格划分示意图

Fig. 2 Mesh dividing schematics of test device

#### 2.1 边界条件和控制方程

(1)上表面边界条件。上表面边界条件忽略了渣层对流动的影响,钢液面视为自由滑移边界(即  $\tau_x = \tau_y = \tau_z = 0$ )。

(2)入口边界条件。在中间包入口处,假定在整个入口面上速度分布均匀,并根据拉坯速度与铸坯尺寸,计算入口速度,入口边界上,给出液相法向速度的大小。按拉坯速度为 2.2 m/min,坯端面 150 mm × 150 mm,根据体积流量进行换算公式如下:

$$U_m = Q_v / A_m \tag{6}$$

式中: $A_m$ - 入口处的截面积; $Q_v$ - 入口液相的体积流量。

(3)出口边界条件。相对静压力为 0(参考压力为 101.3 kPa)。

考虑钢液在中间包内的流动为不可压缩流,因此描述其在中间包内流动的方程有连续方程、动量方程、 $k-\epsilon$  双方程模型和能量方程。

#### 2.2 物性参数

数值模拟物理性质参数见表 1。

### 3 正交实验及结果分析

通过对坝与水口间距离、堰与水口间距离、坝高、堰距底面距离等情况采用正交实验方法进行实

表1 数值模拟参数设置

Table 1 Establishment of mathematical-simulated parameters

项目	数值
湍流模型	标准湍动能模型
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 000
层流粘度/[ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ]	0.005 3
层流导热系数/[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	H13:28.8/P91:30
比热(液态)/[ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	H13:590/P91:880
热膨胀系数/K	$1.197 \times 10^{-4}$
入口内径/mm	$\Phi 90$
入口外径/mm	$\Phi 180$
入水口外径/mm	$\Phi 200$
出水口内径/mm	$\Phi 50$

验,确定实验为四水平,四因素实验,采用L16(4)正交表头中间包液位稳定在450 mm,流量采用640L/H。本实验的因素水平表如表2所示,实验因素示意图如图3所示,正交实验方案以及计算得到的平均停留时间和死区比例如表3所示。

对正交实验数据进行分析计算得到表3中的各种方案钢液在中间包内的平均停留时间和死区体积分数。从表3中可以看出,第8组和第14组实验方案比较好,钢液的平均停留时间比较长,分别为642.27 s和645.52 s;死区体积分数比较小,分别为6.92%和6.45%。对表3进一步分析,令 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 为同一因素水平实验的平均值, $R$ 为各因素下的极差,计算结果如表4所示。

根据表4所示, $R_{L_1} = 27.23$ ,  $R_{L_2} = 42.81$ ,  $R_{H_1} = 45.26$ ,  $R_{H_2} = 45.39$ ,所以得出四因素对指标影响主次关系为: $H_2 > H_1 > L_2 > L_1$ ,即堰距底面距离 > 坝高 > 堰与水口间距离 > 坝与水口间距离。另外,从

表2 正交实验因素水平表

Table 2 Level table of orthogonal experimental factors

水平	坝距水口距离 $L_1/\text{mm}$	堰距水口距离 $L_2/\text{mm}$	坝高 $H_1/\text{mm}$	堰距包底距离 $H_2/\text{mm}$
1	605	350	105	130
2	585	330	130	110
3	565	310	155	90
4	545	290	180	70

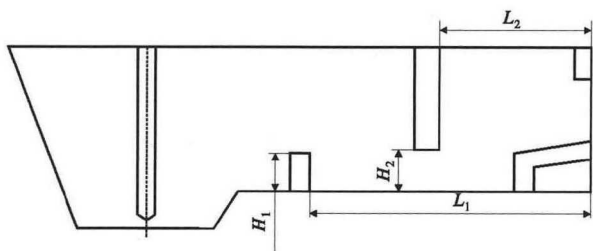


图3 实验中因素说明

Fig. 3 Explanation of factors in test

表3 平均停留时间和死区比例

Table 3 Average residence time and dead zone ratio

方案	$L_1/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	$H_1/\text{mm}$	平均停留时间/ s	死区比例/ %
1	605	350	105	601.21	12.87
2	605	330	130	578.00	16.23
3	605	310	155	543.01	21.02
4	605	290	180	607.17	12.04
5	585	350	130	596.51	13.55
6	585	330	105	569.24	17.50
7	585	310	180	630.28	8.65
8	585	290	155	642.27	6.92
9	565	350	155	593.77	13.95
10	565	330	180	637.42	7.62
11	565	310	105	553.57	19.77
12	565	290	130	632.68	8.31
13	545	350	180	604.12	12.45
14	545	330	155	645.52	6.45
15	545	310	130	557.94	19.14
16	545	290	105	573.92	16.82

最优化生产条件来看,哪个因素下的值越大,说明在该因素水平下的相对指标越好。从表4可以清晰的看到,在 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 因素下的 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $K_4$ 、 $K_1$ 分别为各自因素下的最大值,所以得出最优方案组合为: $L_1(2)$ ;  $L_2(4)$ ;  $H_1(4)$ ;  $H_2(1)$ 。也就是坝与水口间距585 mm,堰与水口间距290 mm,坝高180 mm,堰距底面距离130 mm是正交实验得到的最佳组合方案。随后工作将对正交实验优化结果进行扩展优化实验验证。

表4 极差分析表

Table 4 Range analysis table

因素	$L_1/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	$H_1/\text{mm}$	$H_2/\text{mm}$
$K_1$	582.35	598.90	574.49	627.42
$K_2$	609.58	607.55	591.28	594.49
$K_3$	604.36	571.20	606.14	587.715
$K_4$	595.38	614.01	619.75	582.03
$R$	27.23	42.81	45.26	45.39

正交实验得到的最优组合与第8组和第14组方案的RTD曲线对比如图4所示,平均停留时间和死区体积分数结果对比如表5所示。正交实验得到的最优组合比第8组和第14组实验方案中间包钢液的平均停留时间分别增加了4.45%和3.92%,死区体积分别减少了4.15%和3.68%。

但是以上结果都是通过水模拟实验得到的,并没有考虑温度场分布情况,所以接下来通过对这3组实验方案进行数值模拟,结合温度场的均匀程度找出最优组合结构的中间包。

#### 4 中间包温度场的数值模拟

通过数值模拟得到相同拉速下3种结构的温度

场如图 5 所示,钢液表面温度场如图 6 所示。对相同拉速下数值模拟结果深入研究,得到如图 7 所示的温差分析图。

对相同拉速下数值模拟结果深入研究,得到如图 7 所示的温差分析图。从图 7 中可以看出正交实

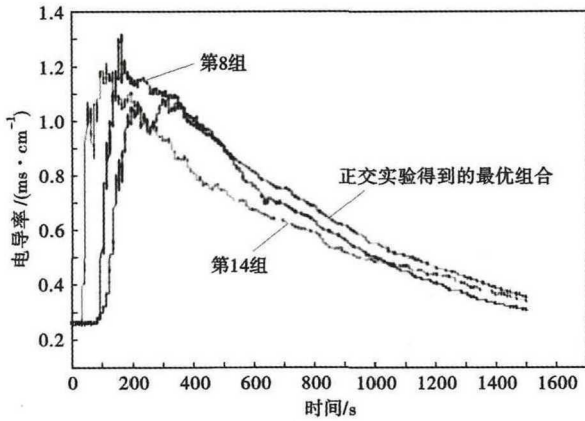


图 4 RTD 曲线对比  
Fig.4 RTD curve comparison

表 5 实验结果对比  
Table 5 Comparison of experimental results

实验对比	平均停留时间	死区体积
正交实验得到的最优组合与第 8 组实验结果对比	增加了 4.45%	减少了 4.15%
正交实验得到的最优组合与第 14 组实验结果对比	增加了 3.92%	减少了 3.68%

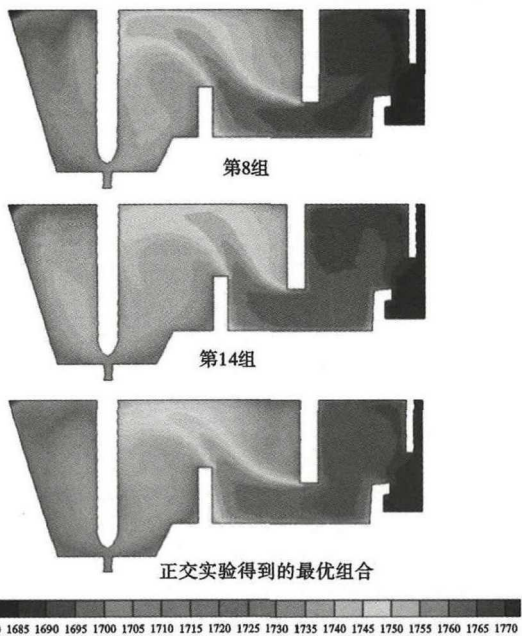


图 5 相同拉速下三种结构的温度场分析  
Fig.5 Temperature field analysis of three structures at same drawing speed

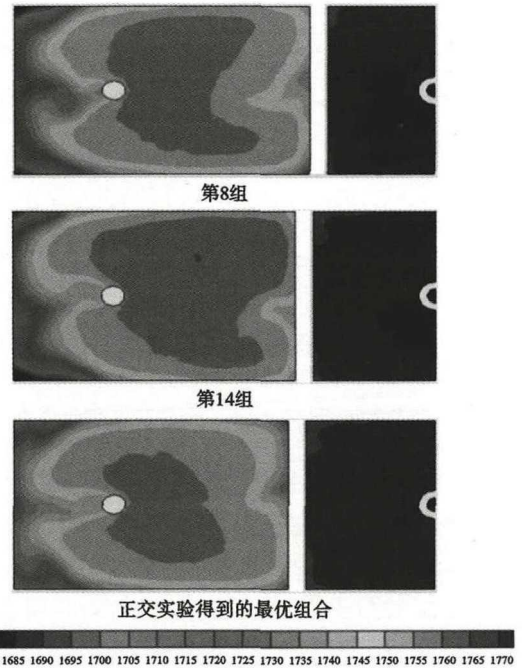


图 6 相同拉速下钢液表面温度场  
Fig.6 Temperature field of molten steel surface at same drawing speed

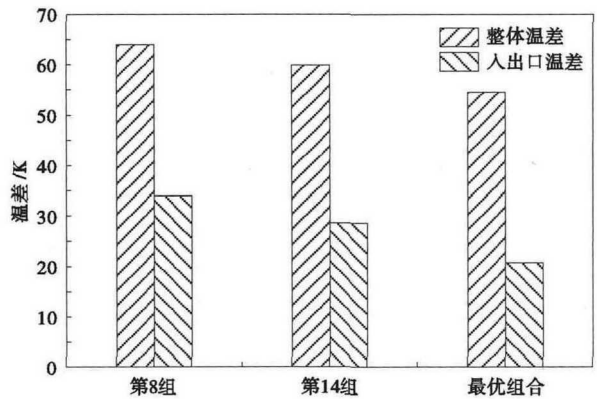


图 7 相同拉速温差分析  
Fig.7 Analysis of Temperature Difference at same speed of drawing speed

验得到的最优组合的整体温差最小,比第 8 组和第 14 组实验方案分别减小 14.06% 和 8.33%。入出口温差比第 8 组和第 14 组实验方案分别减小 14.71% 和 27.59%。说明其钢液温度分布更均匀,更有利于钢液高质量的稳定浇铸和连铸生产的连续性。基于温度场分布情况结合水模拟实验得到此最优组合即为最优化结构的中间包。应用最优化结构中间包,现场测试钢种为 42CrMo,测温点为水口上方、液面下约 120 mm。优化前温差平均 11.6 K,优化后温差平均 3.1 K,温差降低明显,钢液温度更均匀。

### 5 结论

(1) 正交实验得出,影响中间包内部流场因素的主次关系为:堰距包底距离 > 坝高 > 堰与水口间距离 > 坝与水口间距离。正交实验得到的中间包控流装置最优组合为:堰距包底距离 260 mm(实验 130 mm);坝高 360 mm(实验 180 mm);堰与水口间距离 580 mm(实验 290 mm);坝与水口间距离 1 170 mm(实验 585 mm)。比第 8 组和第 14 组中间包钢液的平均停留时间分别增加了 4.45% 和 3.92%,死区体积分别减少了 4.15% 和 3.68%。

(2) 数值模拟得到,正交实验得到的最优组合中间包内钢液的整体温差比第 8 组和第 14 组分别减小 14.06% 和 8.33%。出入口温差比第 8 组和第 14 组分别减小 14.71% 和 27.59%。

(3) 综合考虑包内钢液温度分布的均匀程度、平均停留时间和死区比例,正交实验得到的最优组合即为该 17 t 中间包最优化的控流装置组合。

十三五国家重点研发计划(2017YFB0304201),国家自然科学基金(51774179),辽宁省教育厅创新团队项目(LT2016003)资助

#### 参考文献

[1] 冯捷,史学红.连续铸钢生产[M].北京:冶金工业出版社,2005.

[2] 李永力,王文学,卢作涛,等.中间包耐火材料结构优化改进与实践[J].耐火材料,2017,51(2):149-151.

[3] Tian-Peng Q U, Liu C J and Jiang M F. Numerical Simulation for Effect of Inlet Cooling Rate on Fluid Flow and Temperature Distribution in Tundish[J]. Journal of Iron & Steel Research International, 2012,19(7):12-19.

[4] S. López-Ramirez, Palafox-Ramos J and Morales R D, et al. Modeling Study of the Influence of Turbulence Inhibitors on the Molten Steel Flow, Tracer Dispersion, and Inclusion Trajectories in Tundishes [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2001, 32(4): 615-627.

[5] Kumar A, Mazumdar D and Koria S C. Modeling of Fluid Flow and Residence Time Distribution in a Four-strand Tundish for Enhancing Inclusion Removal[J]. Transaction of the Iron & Steel Institute of Japan, 2008, 48(1): 38-47.

[6] 于朋.单流板坯连铸中间包结构优化[D].鞍山:辽宁科技大学,2015.

[7] 陈萍.连铸中间包流动状态表征和评价的研究[D].沈阳:东北大学,2015.

[8] 裴晓航.连铸中间包内流动、传热以及夹杂物聚集的模拟研究[D].合肥:安徽工业大学,2017.

[9] 唐德池,高圣勇,李永林.中间包温度场数值模拟研究[J].上海金属,2012,34(6):56-60.

[10] 艾新港,张书豪,李胜利,等.挡墙对 H 型中间包温度场影响的数学模拟研究[J].铸造技术,2015(10):2484-2489.

[11] 孔章情,孔辉,周俐,等.双流中间包内型优化的水模实验研究[J].安徽工业大学学报(自科版),2011,28(1):4-7.

[12] 李艳龙.中间包结构优化的数值模拟[D].赣州:江西理工大学,2010.

[13] 孙华,孙彦辉,黄博,等.三流非对称中间包流场水模拟研究[J].钢铁钒钛,2017,38(3):118-123.

[14] Koitzsch R, Odenthal and Hans-Jürgen. Concentration Measurements in a Water Model Tundish using the Combined DPIV/PLIF Technique[J]. Steel Research International, 2007, 78(6): 473-481.

韩东(1993-),男,硕士在读(辽宁科技大学),钢铁冶金研究。E-mail:hd18341262350@163.com

收稿日期:2019-04-11

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关  
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备  
和技术、产品研发宣传广告**