

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.04.010

# 连铸中间包内流场控制优化水模实验研究

周宇涛, 晏威, 邦嘉文, 周佳, 邓叶群, 贺道中

(湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 根据相似原理, 研究了原设计方案和优化改进方案对中间包流场的影响。采用刺激-响应实验方法测得中间包流体的平均停留时间分布 (RTD) 曲线, 并得到不同方案控流装置对中间包流体流动的影响, 从而优化对中间包流场的控制。研究表明: 方案4中活塞区体积分数增大了42.44%, 钢液平均停留时间延长了500 s左右, 并且提高了中间包各流之间的钢液均匀性, 从而促进夹杂物的上浮去除。

**关键词:** 中间包; 流场控制; V形挡墙; 水模拟

**中图分类号:** TF03

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2016)04-0048-05

## A Research on Water Modeling of the Flow Control Optimization in Continuous Casting Tundishes

ZHOU Yutao, YAN Wei, BANG Jiawen, ZHOU Jia, DENG Yequn, HE Daozhong

(School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Based on the principle of similarity, a study has been conducted on the effects of the original design and the optimized design upon the flow field in tundishes. With the stimulus-response approach adopted, the average residence time distribution (RTD) curves of the tundish fluid flow can be obtained and the effect of the two sets of flow control devices on the fluid flow behavior in tundishes can be worked out, thus optimizing the control on the flow field in tundishes. The results show that the plug flow volume has been increased by 42.44%, the average residence time of steel liquid flow in the tundish has been extended by approximately 500 s, and the homogeneity of the molten steel flow in each outlet has been improved, thus facilitating the removal of the floating inclusions.

**Keywords:** tundish; flow field control; V-shaped retaining wall; water modeling

## 0 引言

当前用户对钢材品质的要求越来越高, 钢材质量主要与精炼钢液的洁净度有关, 因此中间包的精炼功能受到冶金工作者的广泛关注。中间包是设置在钢包和结晶器之间用于钢液连续浇注的装置, 通过中间包冶金可以减少钢液的二次氧化, 改善钢水

的流动形态, 促进钢液中的夹杂物上浮与分离, 进行钢液成分微调和控制等<sup>[1]</sup>。目前, 研究者主要是通过优化中间包内的控流装置, 改善钢液的流动, 使钢液的温度均匀分布, 尽可能去除钢水中的夹杂物, 提高钢液洁净度。本文以某炼钢厂四机四流方坯连铸机中间包为研究对象, 该厂主要产品有冷墩

收稿日期: 2016-04-26

基金项目: 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湘教通[2015]269-323), 湖南省教育科学十二五规划课题基金资助项目(XJK012BGD020)

作者简介: 周宇涛(1992-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学学生, 主要研究方向为钢铁冶金工艺与夹杂物控制,  
E-mail: 1175295057@qq.com

通信作者: 贺道中(1967-), 男, 湖南津市人, 湖南工业大学教授, 主要从事洁净钢冶炼理论与新工艺方面的研究,  
E-mail: hdzhong1968@163.com

钢、帘线钢等高品质钢种,其对钢中夹杂物类型、数量、大小、分布有着极其严格的要求,并且钢水在浇注过程中,要求浇注温度稳定。因此,有必要对中间包的结构进行优化,以保证最大程度地去除夹杂物和均匀温度。Y. Miki 等<sup>[2]</sup>对单流板坯中间包的钢液流动、传热和夹杂物去除进行了数学模拟研究;钟良才等<sup>[3]</sup>对中间包流场温场进行了数学模拟,得出了采用改进的导流隔墙,可以使中间包钢液的停留时间增加,死区体积变小。方坯多流中间包采用新型V形多孔控流装置的有关研究较少,针对某厂T型中间包流场控制的水模研究未见报道。

本研究通过设计改进中间包控流装置,对连铸机中间包流场的控制优化。采用水模拟钢液实验研究中间包控流装置改进前后钢液的流场,实验中所使用装置为某厂20 t四流方坯中间包模型,实验使用的控流装置为V形挡墙和挡坝。实验用饱和食盐水做示踪剂,采用“刺激-响应”技术测得中间包流体的平均停留时间分布(residence time distribution, RTD)曲线;采用蓝色墨水做流场示踪剂显示流场。通过水模实验以优化中间包流场的控制,提高中间包各流之间的钢液均匀性,促进夹杂物上浮去除,提高钢液洁净度,改善铸坯质量。

## 1 水模实验原理和实验方法

### 1.1 实验原理

水模拟实验的理论依据是动量传输中的相似原理。本次实验模型与原型比例为1:4,原型中间包液面为1 200 mm,拉速为3 m/min,铸坯断面尺寸为240 mm × 240 mm。流体流动时的湍流雷诺数十分接近,它只需要保证在湍流流动范围的模型中间包与原型中间包的流动相似,即保证中间包模型和原型的弗劳德数  $Fr$  相等(即  $Fr_m = Fr_p$ ),就可以保证模型和原型近似相似。从而有

$$Fr = \frac{u_m^2}{gL_m} = \frac{u_p^2}{gL_p}, \quad (1)$$

式中:  $u_m, u_p$  分别为模型和原型中流体的速度, m/s;

$L_m, L_p$  分别为模型和原型的特征长度, m;

$g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

由式(1)可以计算出模型所对应于原型的体积流量和水口流速:

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_p, \quad (2)$$

$$u_m = \lambda^{0.5} u_p, \quad (3)$$

式(2)~(3)中,  $\lambda$  为几何相似比,本文中取值为  $\frac{1}{4}$ 。

因此,流速比

$$\frac{u_m}{u_p} = \lambda^{0.5} = 0.5; \quad (4)$$

流量比

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{u_m L_m^2}{u_p L_p^2} = \lambda^{2.5} = 0.03125; \quad (5)$$

理论平均停留时间比

$$\frac{t_{mo}}{t_{po}} = \frac{\frac{L_m}{u_m}}{\frac{L_p}{u_p}} = \frac{L_m u_p}{L_p u_m} = \lambda \times \lambda^{-0.5} = \lambda^{0.5} = 0.5. \quad (6)$$

### 1.2 实验装置

实验模型装置示意图如图1所示。主要实验仪器DDL Y-2005型电导率仪, DJ800型多功能监测系统均由中国水利水电科学研究院研制生产。实验耗材有食盐和墨水。按1:4的比例制作的中间包模型,其挡墙、挡坝可以自行安装与拆卸,以便于不同情况的组合实验。V形挡墙的设计制作方案是:V形直孔挡墙直径为30 mm,其结构如图2a所示;V形斜孔挡墙直径有40 mm和50 mm两种,孔中心线与水平线夹角为15°,其结构如图2b所示。

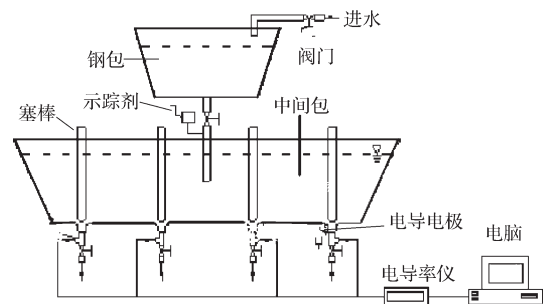


图1 水模拟实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water modeling devices

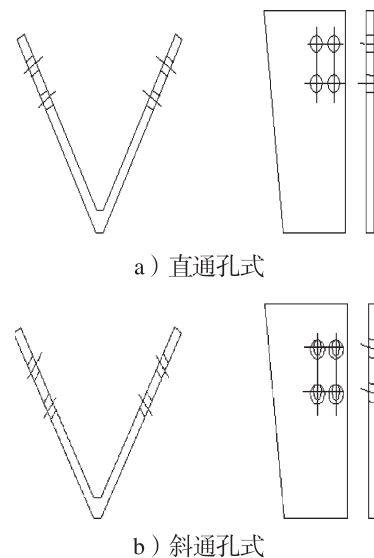


图2 V形挡墙类型

Fig. 2 Types of the V-shaped retaining wall

### 1.3 实验方法

模型中间包用有机玻璃制成,用水作为模拟钢水的介质,本研究用刺激-响应实验方法测定流体在中间包内的 RTD 曲线。实验中,从钢包长水口处向注流处加入饱和食盐水作示踪剂,打开 DJ800 型多功能监测系统开始监测。通过插入 1, 2 流水口处的传感器监测各流的电导率变化,由 DJ800 型多功能监测系统将信号放大、转换、输入计算机处理得出 RTD 曲线。同时,还能够获得从注入示踪剂到各流水口产生响应的最短时间  $t_{\min}$  和示踪剂浓度达到最大时的峰值时间  $t_{\max}$ ,也可得到流体在中间包内各水口的实际停留时间<sup>[4]</sup>。实际平均停留时间的计算公式是

$$t_{\text{av}} = \frac{\Delta t \sum_{i=1}^n i C_i}{\sum_{i=1}^n C_i}, \quad (7)$$

式中:  $C_i$  为水出口处示踪剂的浓度;  $i$  为采样次数;  $\Delta t$  为采样时间间隔。

由于可以将 NaCl 的浓度看成与电导率呈线性关系,所以用电导率代替式 (7) 中 NaCl 的浓度并进行计算。

通过从漏斗中加入墨水做示踪剂来显示流场,墨水随后会迅速扩散,从而勾勒出流场的大概轮廓,用摄像机记录下不同时刻中间包的流场图。中间包各区域的体积分数可根据测得的 RTD 曲线计算求得,计算公式如下。

活塞区体积分数

$$V_p = \frac{\theta_{\min} + \theta_{\max}}{2}, \quad (8)$$

死区体积分数

$$V_d = 1 - \theta_{\text{av}}, \quad (9)$$

混流区体积分数

$$V_m = 1 - V_p - V_d, \quad (10)$$

式 (8) ~ (10) 中  $\theta_{\min} = \frac{t_{\min}}{t_0}$ ,  $\theta_{\max} = \frac{t_{\max}}{t_0}$ ,  $\theta_{\text{av}} = \frac{t_{\text{av}}}{t_0}$ , 均为无量纲时间,其中  $t_0$  为理论平均停留时间。

### 1.4 实验方案

原中间包控流装置设计方案是由开有 4 个导流孔(孔径均为 30 mm)的 V 型直孔挡墙和长度为 70 mm 的直挡坝组成,挡墙、挡坝厚度均为 30 mm。中间包结构及控流装置如图 3 所示。

为改善该中间包内流体的流动状态,最大可能地去除钢液中的夹杂物,并使中间包内的温度分布更加均匀,需对其进行优化改进。优化改进的主要思路应是:增大活塞区体积分数  $V_p$ ,增大实际平均停留时间  $t_{\text{av}}$ ,减小死区体积分数  $V_d$ 。因此,在原设

计中间包结构的基础上,并参考文献 [5-7] 中关于中间包结构优化的观点,设计出了如下 4 种水模实验优化方案,见表 1。通过对不同挡墙与挡坝的组合进行水模实验,分析比较得出最优方案,从而为某炼钢厂生产优质钢种提供理论指导。

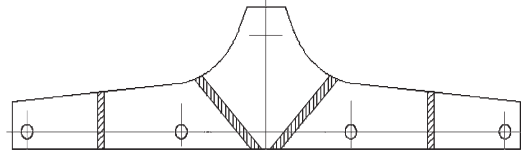


图 3 中间包结构及控流装置示意图

Fig. 3 A sketch for the tundish structure and schematic diagram of flow control devices

表 1 优化实验方案

Table 1 Optimized experimental schemes

方案编号	方案描述
1	40 mm 斜孔挡墙 + 70 mm 直挡坝
2	40 mm 斜孔挡墙 + 70 mm 斜挡坝
3	30 mm 直孔挡墙 + 70 mm 斜挡坝
4	50 mm 斜孔挡墙 + 70 mm 斜挡坝

注:斜挡坝与直挡坝安装于同一位置,且分别与同边的 V 型挡墙平行;挡墙均为 4 孔结构。

## 2 水模实验结果与分析

### 2.1 原中间包控流装置设计方案分析

在原中间包控流装置下进行水模实验,实验结果如表 2 所示。根据实验结果绘制出原设计方案的中间包停留时间分布 (RTD) 曲线,如图 4 所示。

表 2 中间包结构优化前的实验结果

Table 2 Experimental results of the original tundishes

水口编号	$t_{\min}/s$	$t_{\max}/s$	$t_{\text{av}}/s$	$V_p/\%$	$V_d/\%$	$V_m/\%$
1	26	37	360	5.45	37.61	56.94
2	44	51	470	8.23	18.54	73.23

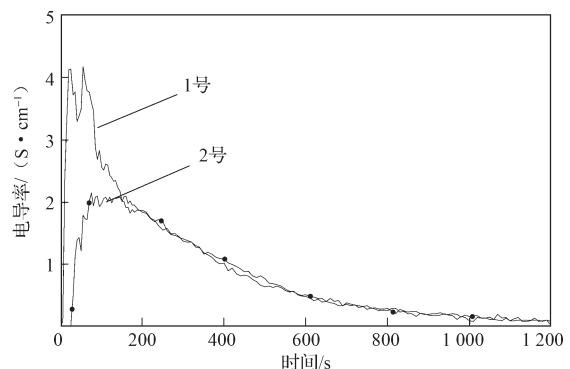


图 4 原方案中各流的 RTD 曲线

Fig. 4 Residence time distribution curves of the outlets in the original scheme

由表 2 中的实验数据可知: 在原设计方案的挡墙形式下, 流体在离钢包注流点近的 1 号水口与离钢包注流点远的 2 号水口的实际平均停留时间相差较大; 流体在 2 号水口的响应时间为 1 号水口的 1.6~1.7 倍。原设计方案中间包中, 死区体积分数较大, 混流区体积分数高达 50% 以上, 活塞区体积分数较小。因此, 在生产中采用这样的直孔挡墙与直挡坝搭配的控制装置, 会造成中间包内的钢液流动状态较差, 各流的温度分布不均和实际平均停留时间相差大, 铸坯质量不均匀, 从而不利于钢液中夹杂物上浮去除。

### 2.2 优化改进型方案分析

在中间包内采用 4 种方案加设不同的挡墙与挡坝进行控流实验, 实验所测数据如表 3 所示。表 3 中的数据表明, 中间包内流体的流动状态得到了不同程度的改善。流经 1 号水口与 2 号水口的流体相对原方案均匀; 流体在中间包各水口中的开始响应时间和实际平均停留时间都有较大增加; 各水口之间的  $t_{min}$  和  $t_{av}$  差异也大为减少。活塞区体积分数  $V_p$  增大, 死区体积分数  $V_d$  减小。通过对 4 种方案的 RTD 曲线的分析发现, 方案 4 为最佳方案。方案 4 对钢液流场和流动状态改善效果最为明显, 活塞区体积分数增加了 42.44%, 这表明 1 号与 2 号水口流动状态趋于一致。方案 4 中各流的 RTD 曲线如图 5 所示。

表 3 中间包结构优化后的实验结果

Table 3 Experimental results of optimized tundishes

方案编号	水口编号	$t_{min}/s$	$t_{max}/s$	$t_d/s$	$V_p/\%$	$V_d/\%$	$V_m/\%$
1	1	27	38	450	5.63	22.01	72.36
	2	48	61	490	9.44	15.08	75.48
2	1	25	47	470	6.24	18.54	75.22
	2	59	110	520	14.64	9.88	75.48
3	1	23	31	460	4.68	20.28	75.04
	2	61	98	500	13.78	13.34	72.88
4	1	27	43	510	14.73	11.61	73.66
	2	45	85	550	14.30	4.68	81.02

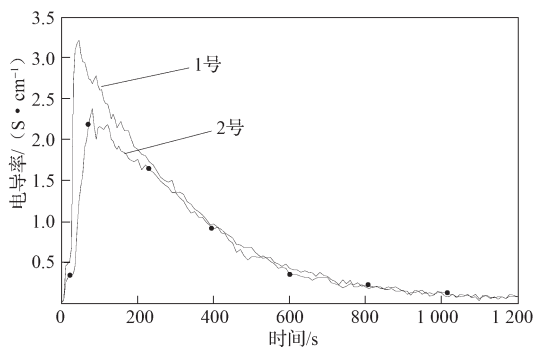


图 5 方案 4 中各流的 RTD 曲线

Fig. 5 Residence time distribution curves of the outlets in scheme 4

通过在注流口加入墨水, 对中间包内流体进行摄像显示: 墨水经长水口进入后, 通过 50 mm 斜孔挡墙上的导流孔迅速向两端扩散, 部分会扩散到表面, 同时也向下扩散; 又在 70 mm 斜挡坝阻挡作用下, 一部分流体返回 2 流水口, 另一部分从上部流向 1 流水口处, 示踪剂的扩散时间被延长, 最终达到扩散均匀。最佳方案中流体流动轨迹如图 6 所示。

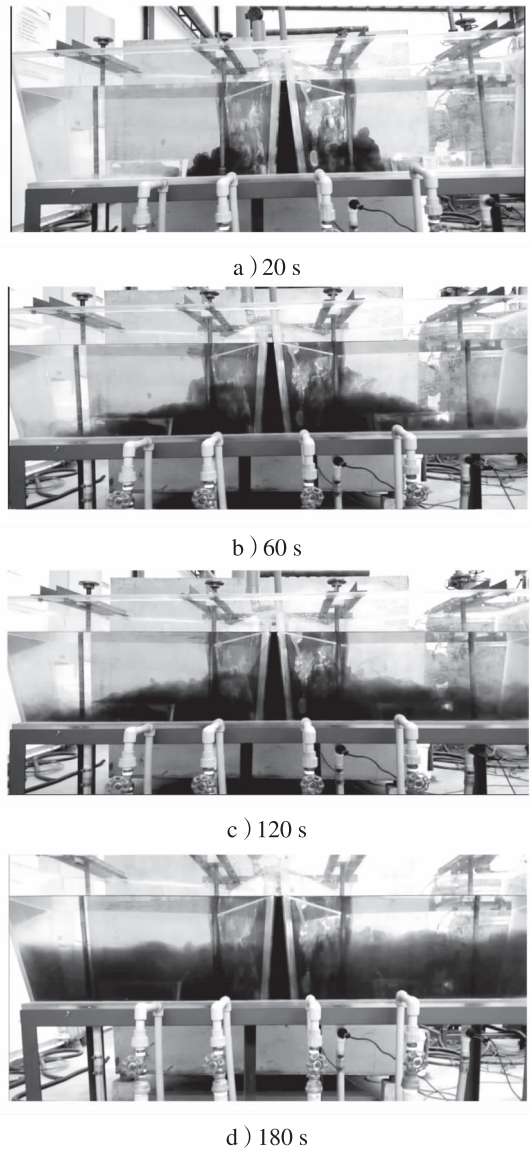


图 6 方案 4 中的中间包流场

Fig. 6 Fluid flow in tundishes in scheme 4

## 3 结语

通过对某厂 20 t 连铸中间包流场优化的水模实验研究, 可得以下结论。

1) 原中间包控流装置中, 死区体积分数较大, 混流区体积分数达 50% 以上, 活塞区体积分数较小。两流中的流体实际平均停留时间相差较大, 因此采用

原方案不利于实际生产中钢液中夹杂物的上浮去除,不能满足生产优质钢种的需要。

2) 采用不同的斜孔挡墙与斜挡坝的组合后,中间包内流体的流动状态得到了不同程度的改善,流经1号与2号水口的流体相对原方案更加均匀。方案4(50 mm斜孔挡墙与70 mm斜挡坝组合)效果最为明显。

3) 方案4为最佳方案,其活塞区体积分数增大了42.44%,流体的平均停留时间延长500 s左右。采用方案4可以使实际生产中钢液的流动状态较为理想,能较好地满足生产高品质钢种的需要。

#### 参考文献:

- [1] 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[J]. 过程工程学报, 2008, 8(增刊1): 49-53.  
CHEN Dengfu, HU Rui, WANG Qingxia, et al. Physical and Mathematical Study on Weir Setting in Continuous Casting Tundish[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(S1): 49-53.
- [2] MIKI Y, THOMAS B G. Modeling of Inclusion Removal in a Tundish[J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 1999, 30(4): 639-654.
- [3] 钟良才,王明安,周小宾,等. 5流连铸中间包流场温场数学模拟[J]. 过程工程学报, 2011, 11(1): 26-30.  
ZHONG Liangcai, WANG Ming'an, ZHOU Xiaobin, et al. Mathematical Simulation for Velocity and Temperature Fields of Molten Steel in a 5-Strand Tundish[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(1): 26-30.
- [4] 冯捷,包燕平,唐德池. 中间包数值物理模拟优化及冶金效果[J]. 钢铁, 2011, 46(7): 45-49.  
FENG Jie, BAO Yanping, TANG Dechi. Numerical and Physical Simulation on Optimization of Tundish and Metallurgical Effects Analysis[J]. Iron and Steel, 2011, 46(7): 45-49.
- [5] 张华,罗荣华,倪红卫,等. 五流大方坯中间包流场优化[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(5): 486-491.  
ZHANG Hua, LUO Ronghua, NI Hongwei, et al. Flow Field Optimization of Five Strand Bloom Tundish[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2010, 33(5): 486-491.
- [6] 李京社,陈培敦,唐海燕,等. 四流圆坯中间包的结构优化研究[J]. 炼钢, 2009, 25(2): 41-44.  
LI Jingshe, CHEN Peidun, TANG Haiyan, et al. Research on Structural Optimization of Four-Strand Round Billet Tundish[J]. Steelmaking, 2009, 25(2): 41-44.
- [7] 钟良才,张果,鲁碧为,等. 两流T型连铸中间包结构优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(7): 983-986.  
ZHONG Liangcai, ZHANG Guo, LU Biwei, et al. Two-Strand T-Type Tundish Configuration Optimization in Continuous Casting[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(7): 983-986.

(责任编辑:邓光辉)