

## 八流方坯连铸中间包结构优化研究

熊辉辉<sup>1</sup> 张庆晓<sup>2</sup> 申邦坡<sup>1</sup> 李振<sup>3</sup> 沈针<sup>1</sup> 唐丰洁<sup>1</sup>

(江西理工大学 1 冶金与化学工程学院; 2 经济管理学院; 3 信息工程学院, 赣州 341000)

**摘要** 采用 1:3 水模型实验对钢厂的八流 150 mm × 150 mm 坯连铸不同控流结构 80 t 中间包内钢液流动进行了研究, 并通过数值模拟进行验证。研究表明, 中间包仅加湍流抑制器后对改善钢液的流动效果不明显, 加上“V”型挡墙后能明显改善各流流动特性, 湍流抑制器、“V”型挡墙和单坝组合能进一步提高各流的流动特性一致性, 平均停留时间增大到 505.22 s, 在挡坝的两侧分别形成了明显的环流区。将单挡坝改为双挡坝后,  $V_p/V_d$  平均由原来 1.77 提高到 2.63, 死区比例平均也减少了 6.0%, 且各水口的稳定性最好, 各流 RTD 曲线吻合度也最好, 且存在 3 个大环流区和 1 个小环流区。水模型实验与数值模拟结果一致。

**关键词** 八流方坯连铸 中间包 流场 水模型实验 数值模拟

## A Study on Optimization of Structure of Eight-Strand Tundish for Billet Concasting

Xiong Huihui<sup>1</sup>, Zhang Qingxiao<sup>2</sup>, Shen Bangpo<sup>1</sup>, Li Zhen<sup>3</sup>, Shen Zhen<sup>1</sup> and Tang Fengjie<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgy and Chemical Engineering; 2 School of Economics and Management;

3 Faculty of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000)

**Abstract** With using 1:3 water model test the study on flow field of molten steel in an 80 t tundish with different flow control structure for eight strand 150 mm × 150 mm billet casting at steel works has been carried out and is verified by numerical simulation method. Study results show that the improvement of flow effect of molten steel in tundish is not obvious by only adding turbulence inhibitor, but adding “V” type baffle in tundish can obviously improve the flow characteristics of each strand, and the combination of turbulence inhibitor, “V” type baffle and single dam can further improve the uniformity of flow characteristic of each strand and the average residence time increases to 505.22 s, in the meanwhile the obvious circulation areas are formed at both sides of the dam. As the single dam is modified to double dam the average  $V_p/V_d$  increases to 2.38 from original 1.77, the average proportion of dead zone also reduces by 6.0% while the stability at each nozzle and the coincidence of residence time distribution curves of each strand is best, and there are 3 big circulation areas and a small circulation area. The results of water model test coincide with the results of numerical simulation.

**Material Index** Eight-Strand Billet Concasting, Tundish, Flow Field, Water Model Test, Numerical Simulation

许多研究运用水模型实验和数值方法对中间包钢液的流场进行模拟和研究<sup>[1-10]</sup>, 但很少发现有关八流中间包的模拟。本实验结合钢厂的实际情况, 采用水模型实验和 ANSYS 商用软件对八流方坯连铸中间包进行控流元件参数的研究。

### 1 研究方法

#### 1.1 物理模型的建立

根据相似理论, 以钢厂 100 t 中间包(中间包的钢液容量为 80 t, 连铸坯的断面尺寸为 150 mm × 150 mm) 为原型, 物理模型与原型比例为 1:3。研究中采用“刺激-响应”方法, 原型八机八流的两边结构相同, 但流场相互影响, 所以在 8 个下水口处都放置了流量计以控制流量, 在其一侧的 4 个水口位置安装了电导率仪以测定电导率(图 1)。

改进中间包模型的流体流动由活塞流区、全混流区和死区 3 部分组成, 其大小为:

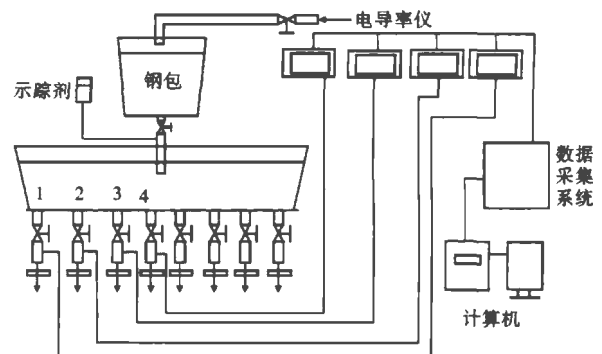


图 1 水模型实验装置示意图

Fig. 1 Schematics of water model test device

$$\text{活塞流区 } V_p = (\theta_{\min} + \theta_{\max})/2 \quad (1)$$

$$\text{死区 } V_d = 1 - \theta_{AV} \quad (2)$$

$$\text{混流区 } V_m = 1 - V_p - V_d \quad (3)$$

式中:  $V_p$ 、 $V_d$ 、 $V_m$  - 活塞流区、死区、混流区的体积分数/%;  $\theta_{\min} = t_{\min}/t_0$ 、 $\theta_{\max} = t_{\max}/t_0$ 、 $\theta_{AV} = t_a/t_0$  - 无因次

时间; $t_0$ 、 $t_n$ -理论停留时间和实际平均停留时间/s;  
 $t_{\min}$ -响应时间/s; $t_{\max}$ -示踪剂浓度达到最大峰值的时间/s。

1.2 数学模型的建立

用标准  $k-\varepsilon$  模型对湍流进行数值模拟,近壁区用壁函数的方式对速度、湍动能、湍动能耗散率进行修正。假设中间包内液体密度为常数,各方程为:

$$(1) \text{连续性方程 } \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

式中: $\rho$ -流体密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $u_i$ -张量表示的平均速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

(2) 动量方程(Navier-Stokes 方程)

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5)$$

式中: $u_i$ 、 $u_j$ - $i$ 和 $j$ 方向的速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $x_i$ 、 $x_j$ - $i$ 和 $j$ 方向的坐标值/m; $\rho$ -流体密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $P$ -压力/Pa; $\mu_{\text{eff}}$ -有效粘度系数/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ),可用湍流模型确定。采用 Launder 和 Spalding 提出的  $k-\varepsilon$  双方程模型来确定。

(3) 湍动能( $k$ )方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

式中: $k$ -湍流动能/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ); $\varepsilon$ -湍流动能耗散率/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ )。

(4) 湍动能耗散率( $\varepsilon$ )方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = (C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2) / k \quad (7)$$

其中: $G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_t$ ,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中: $\mu_t$ -湍流粘度系数/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $\mu_l$ -层流粘度系数/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_\mu$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$ -为经验常数,采用 Launder 和 Spalding 的推荐值<sup>[9]</sup>: $C_1 = 1.43$ ,  $C_2 = 1.93$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.3 实验方案

图2为控流装置中间包、中间包内的湍流抑制器和“V”型挡墙示意图。实验参数如表1所示,A1、A2、A3和 $\Phi$ 代表的意义见图2(c)挡渣墙说明图。

2 结果分析与讨论

2.1 物理模拟结果分析

实验结果见表2,典型 RTD 曲线见图3。

(1)无控流方案(方案1)的2\*、3\*、4\*水口滞止时间很短,最短的仅有3s,形成了短路流,使夹杂物来不及上浮就从水口流出,还会造成通过水口的钢液温度高。此外中部水口和边部水口的滞止时间相差很大,造成两流之间的温差大。四流水口的实际平均停留时间均偏小,死区比例大,最大达65.3%。

(2)中间包加湍流抑制器后(方案2)响应时间等参数均优于方案1。但死区比例却增大,死区体积分数( $V_d$ )的平均值由方案1的50.60%增加到现在的52.15%。此外,滞止时间最大差值达到了70s,

表1 各中间包结构的实验方案和参数/mm

Table 1 Test scheme and parameters for each tundish structure/mm

方案	组合方式	“V”型挡墙				单坝		双坝	
		A1	A2	A3	$\Phi$	坝高	坝距	坝高	坝距
1	无控流装置	-	-	-	-	-	-	-	-
2	A	-	-	-	-	-	-	-	-
3	A+B	150	420	220	42	-	-	-	-
4	A+B	170	450	260	51	-	-	-	-
5	A+B	210	450	220	60	-	-	-	-
6	A+B+C	210	450	220	60	280	1 150	-	-
7	A+B+C	210	450	220	60	660	1 150	-	-
8	A+B+C	210	450	220	60	380	1 150	-	-
9	A+B+D	210	450	220	60	380	1 150	380	1 550

注:A-湍流抑制器;B-挡墙;C-单坝;D-双坝

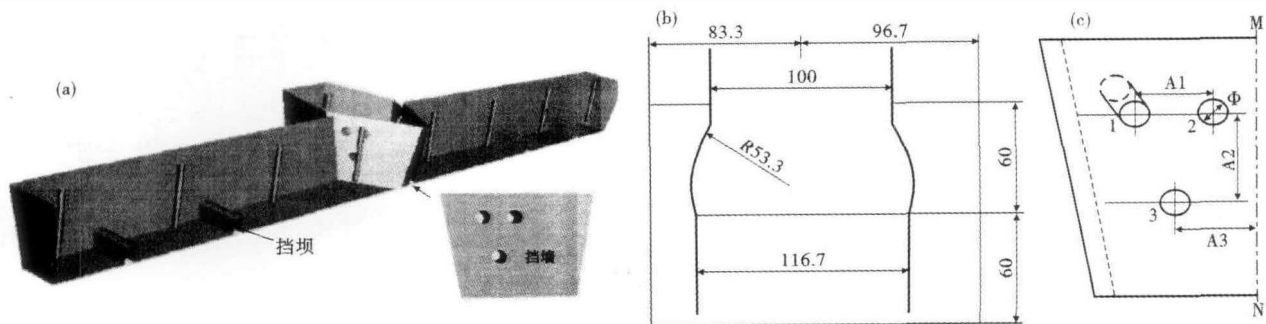


图2 中间包控流装置结构图(a);中间包内的湍流抑制器(b)和“V”型挡墙(左侧)(c)示意图

Fig.2 Schematics of tundish with flow controller (a); turbulence inhibitor (b) and “V” type baffle (at left side) (c) in tundish

响应时间标准差也将近增大一半,因此加入单独湍流抑制器对改善钢液的流动效果不明显。

(3)湍流抑制器和“V”型挡墙的组合的控流装置(方案3、4、5)各项参数都要优于无控流装置(方

案1)和只用湍流抑制器(方案2)。其中方案5优于方案3和方案4(表2,图3a、b)。

(4)“V”型挡墙、单坝和湍流抑制器组合的控流装置效果要优于1~5方案。方案8的平均响应时间、平均停留时间、活塞区体积和死区体积之比平均是无控流装置时(方案1)的2.13倍、1.81倍、13.6倍。相对于方案5(中间包+湍流抑制器+“V”型挡墙组合装置)的1.24倍、1.14倍、2.17倍。比较单挡坝方案6、7、8可以发现,方案8的平均响应时间、平均停留时间最长,分别为44.75s和505.22s,死区比例进一步减小,方案8的死区体积分数比方案6、7分别减小了32.43%和24.24%,且平均停留时间标准差和响应时间标准差均要小于方案6、7,表明了其流动特性的差异小。

(5)在方案8的基础上再加上一对挡坝后(方案9),中间包平均活塞流区体积分数与死区体积分数之比 $V_p/V_d$ 由原来1.77提高到2.63,方案9的死区比方案8平均减少了6.0%,且中间包各流平均停留时间标准差和响应时间标准差也最小,方案9各流RTD曲线吻合度最好(图3)。

从方案9示踪剂显示的流场可得,当墨水从钢包长水口流出后在冲击区内混合均匀,20s墨水才通过了挡墙导流孔,然后墨水向液面和中间包中不铺开,在2#、3#水口之间混匀,40s左右就通过了4#水口,50s左右2#、3#水口有墨水进入,80s左右墨水到达1#水口,200s以后墨水基本混匀,基本无死区。另外,双挡坝对流场是有一定的分流作用的,特别是对直接冲向2#、3#水口的示踪剂有一定的回流作用,有利于夹杂的上浮。

2.2 数值模拟结果分析

图4为不同方案的中间包包底截面的速度场。湍流抑制器和“V”型挡墙组合的中间包底部各流水

表2 各方案的实验结果  
Table 2 Test results of each scheme

方案	水口 标号	$t_{min}/s$	$t_d/s$	$V_d/\%$	$V_p/\%$	$V_p/V_d$	平均停留时 间标准差	响应时间 标准差
1	4#	3	195.8	65.3	0.7	0.01	96.4	21.4
	3#	9	211.71	62.5	2.2	0.01		
	2#	21	302	46.4	4.7	0.10		
	1#	51	405	28.2	10.5	0.37		
2	4#	8	197	65.2	2.6	0.04	39.8	30.6
	3#	24	251	55.6	5.1	0.09		
	2#	49	311	44.9	9.9	0.22		
	1#	78	322	42.9	14.6	0.34		
3	4#	21	385.67	32	10	0.31	44.7	33.9
	3#	21.33	382.6	32	7	0.22		
	2#	43.33	457.63	19	18	0.95		
	1#	93	536.89	5	25	5.00		
4	4#	27	419.25	25.7	17.4	0.68	46	29.3
	3#	11.5	382.42	32.3	3.6	0.11		
	2#	29.5	428.56	24.1	14.2	0.59		
	1#	79	493.09	12.7	26.5	2.09		
5	4#	34.5	434.6	23	17.3	0.75	30.3	13.9
	3#	25	423.85	24.9	13.5	0.54		
	2#	28.5	425.7	24.6	10.7	0.43		
	1#	56	488	13.6	21	1.54		
6	4#	40	450	20	20	1.00	44.92	22
	3#	25.3	415.6	26	13	0.50		
	2#	25.3	439.6	22	13	0.59		
	1#	72	530	6	24	4.00		
7	4#	37.3	461.8	18	19	1.06	45.44	18.44
	3#	26	440.9	22	14	0.64		
	2#	28.3	453	20	13	0.65		
	1#	67.7	532.7	6	20	3.33		
8	4#	42	496.5	12	19	1.58	41.24	16.26
	3#	35.3	473	16	13	0.81		
	2#	33.7	482.9	14	13	0.93		
	1#	68	568.5	8	30	3.75		
9	4#	33.5	447.3	17	17	1.00	25.1	12.2
	3#	29	430.7	15	14	0.93		
	2#	39	457.8	12	15	1.25		
	1#	57	545	3	22	7.33		

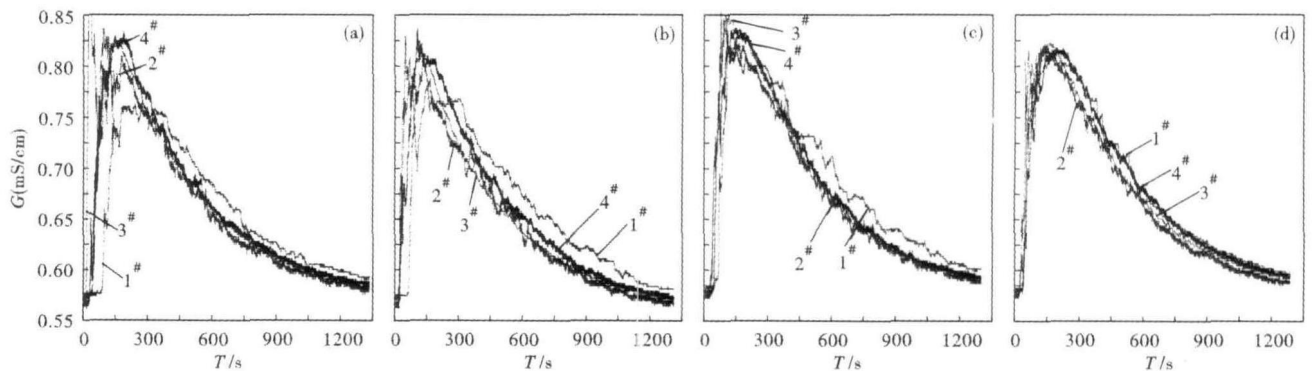


图3 方案3(a)、方案5(b)、方案8(c)和方案9(d)中间包的停留时间分布(RTD)曲线

Fig. 3 Residence time distribution curves for tundish scheme 3 (a), scheme 5 (b), scheme 8 (c), and scheme 9 (d)

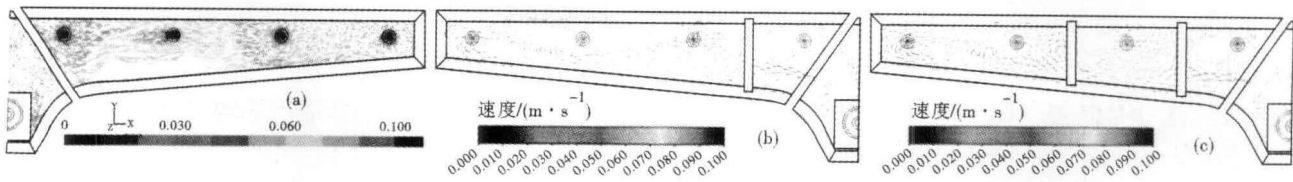
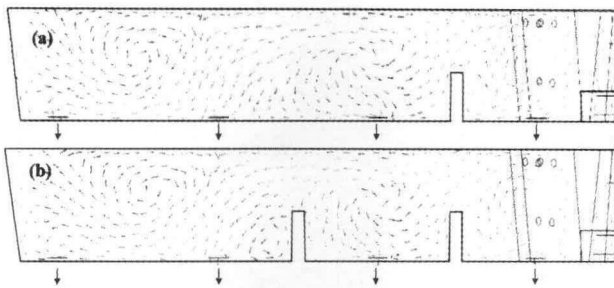


图4 中间包包底截面速度场:(a)方案5;(b)方案8;(c)方案9

Fig. 4 Velocity field at tundish bottom profile: (a) scheme 5; (b) scheme 8 and (c) scheme 9

图5 中间包左侧钢液中心截面的流场:(a)方案8;(b)方案9  
Fig. 5 Flow field of molten steel at centre section of tundish (left side): (a) scheme 8 and (b) scheme 9

口附近的钢液流速差异较大,特别是从挡墙下孔流出来的钢液以  $0.06 \text{ m/s}$  的速度直接流向第2个水口,形成了短路流,导致各流铸坯质量差距大,而且致使钢中的夹杂物来不及上浮就进入结晶器。

在方案5的基础上加单挡坝(方案8)后,挡墙下孔流出的少数钢液速度较大,达到  $0.1 \text{ m/s}$ ,但受第1个挡坝的作用速度迅速下降,且在挡坝的左侧形成两个环流区,同时在其右侧也产生了一个明显的顺时针的环流区,从而延长平均停留时间,有利于钢液成分和温度的均匀。从图4(c)可知,将单挡坝改成双挡坝后,从挡墙下孔流出来的钢液在受第2个挡坝的作用在其左侧又多形成了一个环流,进一步延长了最小停留时间,增加夹杂物上浮的几率。

### 参考文献

- [1] 齐新霞,包燕平. 六流方坯中间包流场的物理模拟和冶金效果[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(1): 11-16.
- [2] 钟良才,张立,黄耀文,等. 湍流控制装置的结构对中间包流体流动特性的影响[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(4): 6-9.
- [3] 郑淑国,朱苗勇,王颖. 连铸中间包内夹杂物去除行为的物理模拟[J]. 东北大学学报, 2010, 31(5): 677-680.
- [4] Sahai Y, Burval M. Validity of Reynolds and Froudesimilarity Criteria for Water Modeling of Melt Flow in Tundishes[C]. Proc of the Electric Furnace Conf. Warrendale, 1992: 469-474.
- [5] Sahai Y. Fluid Dynamics of Continuous Casting Tundish Physical Modeling[A]. Warrendale, eds. Steelmaking Conference Proceeding [C]. Washington D C: ISS-ATME, 1986: 677-687.
- [6] 程子建,成东全,程树森,等. 酒钢板坯中间包等温钢液流场的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(2): 60-66.
- [7] 张彩军,赵铁成,艾立群. FTSC 薄板坯连铸中间包内流场及夹杂物运动轨迹的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(11):

由图5可知,钢液冲击到湍流抑制器后以较小的速度流出,浇注区钢液受环流以及高温钢液上浮运动的作用,形成了几个明显的环流区,同样双坝组合比单坝组合也多了一个环流区,共存在3个大环流和1个小环流,从而延长了钢液在中间包的平均停留时间,增加了钢液的混合度。

### 3 结论

(1) 中间包加湍流抑制器后对改善钢液的流动效果不明显,在其基础上加上“V”型挡墙后能明显改善各流流动特性的一致性,最优的方案中平均停留时间和响应时间的标准差分别为 30.3 和 13.9。

(2) 湍流抑制器、“V”型挡墙和单坝的中间包能进一步提高各流的流动特性,平均停留时间进一步增大到 505.22 s,死区比例也进一步减小,挡坝两侧均形成明显环流区,有利于钢液成分和温度均匀。

(3) 将单挡坝改为双挡坝后效果更佳,在第2个挡板左侧又多形成了一个环流区,共存在3个大环流区和1个小环流区,增大了夹杂物上浮的几率,  $V_p/V_d$  平均由原来 1.77 提高到 2.63,死区比例平均也减少了 6.0%,且各水口的稳定性和各流 RTD 曲线吻合度也最好。

(4) 推荐方案9 湍流抑制器+挡墙+双坝结构为八流方坯 80 t 中间包控流的最佳方案。

1014-1021.

- [8] 王德永,冯丽萍,刘承军,等. 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): 22-27.
- [9] 丰文祥,陈伟庆,赵继增,等. 中间包吹氩去除钢水夹杂物[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(4): 425-432.
- [10] Vargas-Azmora A, Palafox-Ramos J, Morales R, et al. Inertial and Buoyancy Driven Water Flows under Gas Bubbling and Thermal Stratification Conditions in a Tundish Model[J]. Metall. Mater. Trans, 2004, 35(4): 247-253.

熊辉辉(1985-),男,硕士,助教,2009年昆明理工大学毕业,2012年北京科技大学硕士毕业,特殊钢冶炼和铸坯质量控制。E-mail: xionghui8888@126.com

收稿日期: 2012-11-14