

控流装置对板坯中间包流场优化的影响

冯捷^{1,2} 唐德池¹ 包燕平¹ 武珣¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 河北科技大学材料科学与工程学院,石家庄 050018)

摘要 根据相似原理,用1:3水模型研究了230 mm×130 mm板坯连铸用60 t中间包内钢水的流动特征,通过测定模型中间包内停留时间分布曲线,计算其平均停留时间及死区、活塞区和混合区的体积。结果表明,采用下挡墙开孔能有效地改善中间包内流场,得出优化后合适的钢包控流装置组合为开孔下挡墙+湍流控制器,下挡墙高133 mm,距离冲击区765 mm。优化后的中间包比原中间包平均停留时间增加了24 s,死区体积由原来的14.8%下降至6.7%。

关键词 中间包 连铸 水模型 RTD曲线

Effect of Fluid Flow Control Devices on Optimization of Flow Field in Tundish for Slab Casting

Feng Jie^{1,2}, Tang Dechi¹, Bao Yanping¹ and Wu Xun¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018)

Abstract Based on similarity principle, the flow performance of liquid in 60 t tundish for 230 mm×130 mm slab casting has been studied by 1:3 water modeling test, and the average residence time, and the volume of dead area, plug area and mixed flow area are calculated by measured curves of residence time distribution (RTD) of liquid in modeling ladle. It is obtained that dam with holes is available to improve the flow field in tundish, the optimum combined device of inhibitors to improve the flow of liquid in tundish is turbulence inhibitor + dam with holes, of which the height of dam is 133 mm and the distance between dam and pouring region is 765 mm. As compared with original ladle, the average residence time of liquid in improved ladle increases by 24 s, and the dead area decreases to 6.7% from original 14.8%.

Material Index Tundish, Concasting, Water Modeling, Curve of Residence Time Distribution

中间包操作是连铸过程的关键环节之一,钢液在包内的流动状态影响其成分、温度的均匀性及夹杂物的上浮与去除效果。防止中间包内夹杂物进入结晶器内是生产高纯净度钢的重要手段之一^[1-3]。因此,在中间包安装合适的控流装置可以有效地改善中间包内钢液的流场、促进非金属夹杂物上浮;减少卷渣、卷气;改变中间包内钢液的流动状态;减少包衬的冲刷和防止开浇时的喷溅^[4,5]。

为确定适合中间包最佳的控流装置组合,选择不同的控流装置组合进行对比。本次实验是以钢厂二流板坯连铸中间包的内腔尺寸为依据,按照1:3的模型进行模拟实验研究,优化得出了合适的控流装置组合及其位置。

1 物理模型建立的理论依据

中间包内的钢液流动主要受黏滞力、重力和惯性力的作用,为保证模型与原型的相似,要求模型和实型中的流体雷诺准数 Re 和弗鲁德准数 Fr 分别相等^[6]。要保证两个准数相等需要采用1:1的模型比

例。但是通常采用缩小的模型,更容易进行实验,只要保证原型和模型的 Re 处于同一自模化区域,保证模型和原型的 Fr 相等,由 Fr 准数相等可以确定模型和实型中流体的速度、流量、平均停留时间的关系。即:

$$\begin{aligned} (Fr)_m &= (Fr)_p \quad gL_m/u_m^2 = gL_p/u_p^2 \\ Q_m &= \lambda^{5/2} \cdot Q_p \quad \lambda = 1/3 \quad Q_m = 0.064Q_p \end{aligned} \quad (1)$$

式中: m -模型; p -原型的参数; L -特征几何尺寸; u -流速; Q -流量; λ -模型和原型几何比例。

用刺激-响应试验法测定液体停留时间分布。在中间包的模型中,随着钢包注流注入一定剂量的电解质 KCl 溶液,用电导电极测定浓度 (C) 和时间 (t) 的 RTD 曲线,根据 sahai 和 Emi^[7] 平均停留时间计算中间包死区的公式为:

$$V_d/V = 1 - \tau^1/\tau^0 \quad (2)$$

式中: V_d -死区体积; V -中间包体积; τ^0 -中间包模型理论平均停留时间; τ^1 -中间包的钢液平均停留时间,则它的计算公式为:

$$\tau^1 = \frac{\Delta\tau \sum_{i=1}^n iC_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (3)$$

式中： C_i - 水出口示踪剂的浓度； i - 采样次数； $\Delta\tau$ - 采样时间间隔。

τ^0 的计算公式为：

$$\tau^0 = V/Q = (0.2795/3.45) \times 3600 = 291 \text{ s} \quad (4)$$

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

实验装置由中间包模型、钢包、流量计和 DJ800 采集系统等组成。如图 1 所示。

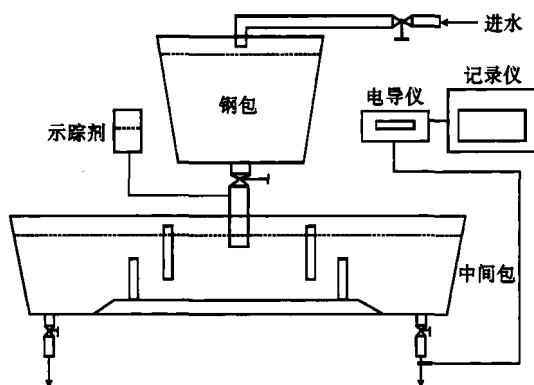


图 1 水模型实验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental device of water modeling

2.2 实验方法

根据刺激响应原理,在连续流动的钢包注流中,当中间包的液面稳定后以脉冲方式定量加入 200 ml 的示踪剂(饱和 KCl 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测定示踪剂浓度随时间变化的 RTD 曲线^[8],以求得平均停留时间并根据描述中间包内钢液流动的修正混合模型,计算出中间包内钢液的平均停留时间,最小停留时间(中间包出口出现示踪剂的时间)和死区的大小。原型中间包的尺寸如图 2 所示。

2.3 实验选用的工艺参数

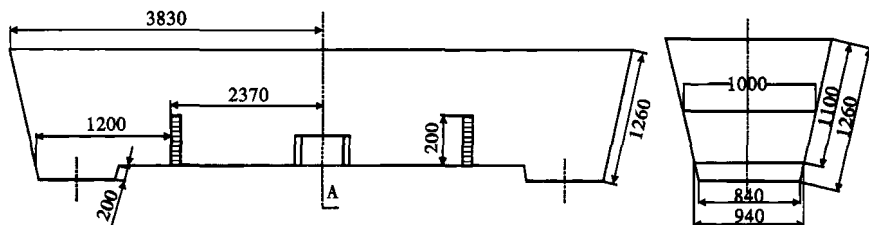


图 2 原型中间包结构图

Fig.2 Sketch of structure of prototype tundish

原型中间包公称容量 60 t,实际工作吨位为 55 t,浇铸液位 900 mm,长水口的浸入深度约 125 mm,铸坯拉速 1.4 ~ 1.5 m/min,板坯连铸机的浇铸断面为 230 mm × 1300 mm。本次试验的模型与原型的相似比为 1:3,模型尺寸为原型尺寸的 1/3,中间包拉速为 1.5 m/min,实验过程中,保持长水口浸入深度和拉速不变。原型和实验模型对应的工艺参数如表 1 所示。

表 1 中间包原型和模型工艺的参数

Table 1 Process parameters for tundish of prototype and model

中间包	各水口流量/(m ³ ·h ⁻¹)	两水口之间的距离/mm
原型	26.9	6450
模型	1.725	2150

以下实验过程中所用尺寸如无特殊说明,均表示为模型尺寸,实验过程的数据为两个水口数据的平均值。

3 结果分析及讨论

中间包内夹杂物上浮的去除效果取决于钢液在中间包内的平均停留时间,平均停留时间越长,死区比例越小,最小停留时间越长,活塞流的体积越大,越有利于钢液中的夹杂物上浮。在此将平均停留时间、死区比例、最小停留时间和活塞流大小来衡量中间包结构的优劣。

3.1 原中间包工况下试验结果

原中间包采用下挡墙 + 湍流控制器的组合,湍流控制器采用八边形有孔湍流抑制器,下挡墙的高为 66.7 mm,距冲击区的距离为 765 mm。该工况下,钢液在中间包内的平均停留时间 247 s,滞止时间 47 s,峰值时间 94 s,死区体积 14.8%。

3.2 不同控流装置组合实验

为确定适合该中间包最佳的控流装置组合,选择不同的控流装置组合进行对比。其中不同的控流装置组合位置都经过优化实验得出。本次实验主要比较了 7 种不同的控流装置组合,其组合见表 2。

不同控流装置组合实验结果见表 3。

中间包不同控流装置组合情况的 RTD 曲线如图 3 和图 4。

从表 3 可以看出,无控流装置的中间包最小停留时间只有 23 s。从图 3(a)无控流

表2 中间包不同控制流装置组合挡墙的位置

Table 2 Location of weir and dam of different combined baffle devices in tundish

中间包状态	上挡墙		下挡墙	
	浸入深度/ mm	距冲击区 距离/mm	高/ mm	距冲击区 距离/mm
无控流装置中间包	-	-	-	-
只加湍流控制器	-	-	-	-
只加下挡墙	-	-	100	798
湍流控制器+上挡墙	66.7	333.3	-	-
上挡墙+下挡墙	66.7	400	100	798
湍流控制器+下挡墙	-	-	100	798
湍流控制器+上下挡墙	66.7	466.7	66.7	765

表3 中间包不同控制流装置组合实验结果

Table 3 Experimental results for different combined baffle devices in tundish

中间包状态	$t_{min}/$ s	$t_{max}/$ s	$t_{av}/$ s	$V_{dv}/$ %	$V_{pv}/$ %	$V_{mv}/$ %
无控流装置中间包	23	82	237	18.6	19.9	61.5
只加湍流控制器	31	95	235	19.2	23.9	56.9
只加下挡墙	33	124	252	13.4	29.7	56.9
湍流控制器+上挡墙	32	64	214	26.5	18.2	55.3
上挡墙+下挡墙	31	123	251	13.7	29.2	57.1
湍流控制器+下挡墙	47	128	256	10.7	30.0	59.3
湍流控制器+上下挡墙	50	129	246	15.3	30.7	54.0

注: t_{min} -最小停留时间; t_{max} -峰值时间; t_{av} -平均停留时间; V_{dv} -死区体积; V_{pv} -活塞流体积; V_{mv} -全混流体积。

装置的中间包的 RTD 曲线可以看出,RTD 曲线存在明显的多峰,说明在中间包底部存在明显短路流。加入下挡墙后,最小停留时间明显增加,最小停留时间由 23 s 增加到 33 s,峰值时间由 82 s 增加到 124 s。从图 3(b)只加入下挡墙后的中间包曲线可以看出,RTD 曲线较光滑,无明显的多峰,下挡墙很好地阻止了沿包底部的短路流。只加入湍流控制器后平均停留时间无明显改善。图 3(c)只加湍流控制器方案,停留时间为 235 s,RTD 曲线亦存在多峰,说明

只加湍流控制器并不能改善底部的短路流,需配合其他的控制装置。从表 3 可以看出,湍流控制器+上挡墙的中间包峰值时间最短为 64 s,平均停留时间最短 214 s,死区比例最大 26.5%。图 4(a)说明湍流控制器+上挡墙的组合,增加了中间包的死区体积,可能的原因为注入到湍流控制器内的钢液,撞击湍流控制器后,形成向上的流股,到达液面后沿四周扩散,遇到下挡墙后,在下挡墙后面形成了死区。

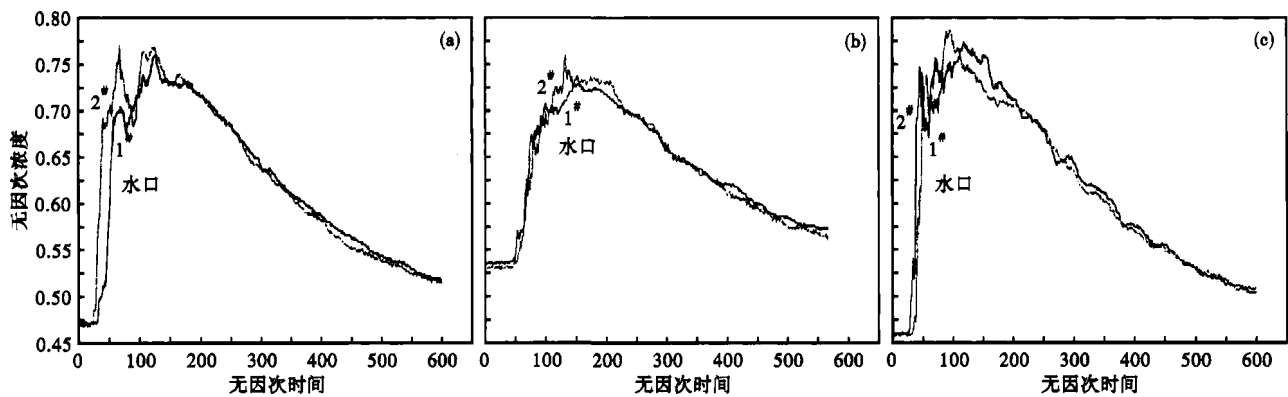


图3 中间包液体停留时间分布(RTD)曲线:(a)无控流装置;(b)只加下挡墙;(c)只加湍流控制器

Fig. 3 Curves of RTD of liquid in tundish: (a) free inhibitors; (b) only with weir; (c) only with turbulence inhibitor

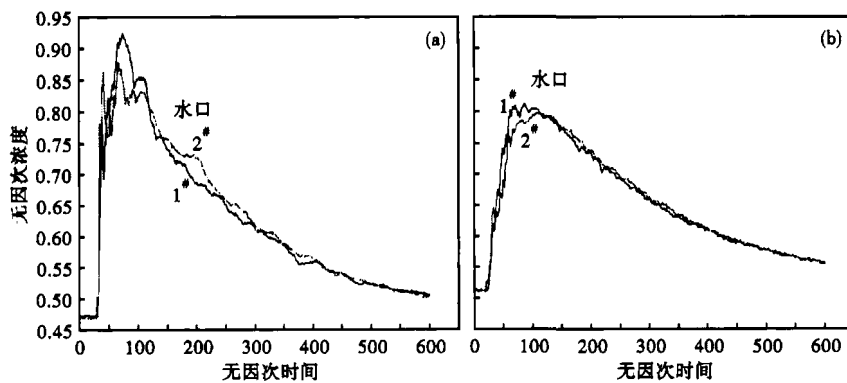


图4 中间包液体停留时间分布(RTD)曲线:(a)湍流控制器+上挡墙;(b)湍流控制器+下挡墙

Fig. 4 Curves of RTD of liquid in tundish: (a) with turbulence inhibitor + weir; (b) with turbulence inhibitor + dam

湍流控制器+下挡墙方案较好地改善中间包流场,从图 4(b)可以看出,其 RTD 曲线较光滑,无明显的死区。平均停留时间为 256 s,在各方案中最长,峰值时间为 128 s。

3.3 对优化后下挡墙进行开孔和开槽实验

优化后的下挡墙距离冲击区 765 mm,高 133 mm。考虑到较高的下挡墙将增加中间包停浇时残余钢量及下挡墙后可

能存在的死区体积,对下挡墙进行开槽和开孔实验,并进一步优化中间包的流动特性,孔和槽的位置见图 5,其中开孔的角度为向上 15° 。

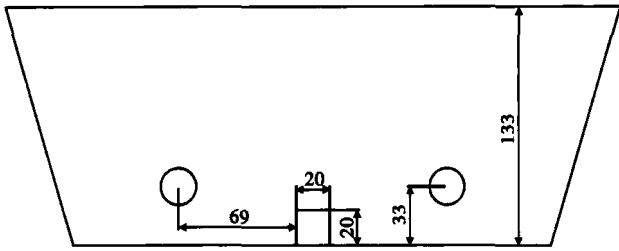


图 5 优化后下挡墙槽和孔的位置

Fig. 5 Location of rabbit and hole in dam after optimization

下挡墙高 133 mm 时不同情况下的实验结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出:(1)对比方案 1 和 2 的开孔和堵孔情况可以看出,开孔后,明显地延长了钢液在中间包内的滞止时间 t_{\min} 、峰值时间 t_{\max} 和平均停留时间 t_{av} ,分别由原来的 47、128、259 s 提高到 58、169、271 s。死区体积 V_{dv} 由原来的 10.7% 减少到 6.7%。说明导流孔有效地减小了挡墙后的死区体积,延长了钢液在包内的停留时间;

表 4 中间包下挡墙高 133 mm 时不同情况下实验结果
Table 4 Experimental results for height of dam being 130 mm in tundish with different conditions

方案号	导流槽	导流孔	t_{\min}/s	t_{\max}/s	t_{av}/s	$V_{\text{dv}}/\%$	$V_{\text{pv}}/\%$	$V_{\text{mv}}/\%$
1	堵	堵	47	128	259	10.7	33.1	56.2
2	堵	开	58	169	271	6.7	38.9	54.4
3	开	堵	50	163	264	9.1	36.6	54.3
4	开	开	62	150	270	7.2	36.4	56.4

(2)对比方案 1 和 3 的开槽和堵槽情况,开槽后的中间包,明显地增加了钢液在中间包内的峰值时间 t_{\max} ,由原来的 128 s 增加到 163 s,滞止时间 t_{\min} 和平均停留时间 t_{av} 分别由原来的 47 s、259 s 提高到 50 s、264 s;

(3)对比方案 2 和 3,可以看出,导流孔较之导流槽更能有效地改善钢液流动。

(4)对比方案 2 和 4,在开导流槽的情况下,开导流孔达不到改善流场的效果,峰值时间 t_{\max} 由 169 s 减少到 150 s,平均停留时间 t_{av} 由 271 s 减小到 270 s。综合考虑,采用方案 2 最佳。

优化后和优化前中间包的实验结果见表 5。由表 5 中的数据对比,发现与原结构的中间包相比,优

化后的中间包峰值时间 t_{\max} 延长了 75 s,由原来的 94 s 增加到 169 s,死区体积 V_{dv} 比例由 14.8% 下降至 6.7%,活塞流体积 V_{pv} 增加了 14.5%,由原来的 24.4% 增加到 38.9%。平均停留时间 t_{av} 增加了 24 s。

表 5 中间包优化前后的实验结果对比

Table 5 Comparison of experimental results between optimized tundish and original tundish

中间包	t_{\min}/s	t_{\max}/s	t_{av}/s	$V_{\text{dv}}/\%$	$V_{\text{pv}}/\%$	$V_{\text{mv}}/\%$
优化前	47	94	247	14.8	24.4	60.6
优化后	58	169	271	6.7	38.9	54.4

4 结论

(1)原中间包的控流装置的死区较大为 14.8%,平均停留时间和峰值时间较短,分别为 247 s 和 47 s。

(2)较理想的控流装置组合为开孔下挡墙 + 湍流抑制器。

(3)对下挡墙开孔能有效地改善中间包内流场,开槽的效果不如开孔明显。

(4)优化后的中间包同原中间包相比,平均停留时间增加了 24 s,死区体积下降 8.1%。

参考文献

- Schade J, Smith M P, Palmer S E. Doubling Tundish Volume at AK Steel's Middletown Works: Structural, Design Considerations and Operating Results. Iron and Steelmaker, 1996, 23(10): 93
- Chakraborty S, Sahai Y. Effect of Varying Ladle Stream Temperature on the Melt Flow and Heat Transfer in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International, 1991, 31(9): 960
- Craig K J, Kock D J de, Makgata K W, et al. Design Optimization of a Single-strand Continuous Caster Tundish using Residence Time Distribution Data. ISIJ International, 2001, 41(10): 1194
- 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. 钢铁研究学报, 2002, 14(4): 16
- 金杰, 李向奎, 钱宏智, 等. 控流装置对六流 T 型中间包钢水流动状态的影响. 冶金研究, 2008: 133
- 张先焯. 冶金传输原理. 北京: 北京钢铁学院出版社, 1988
- Sahai Y, Emi T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International, 1996, 36(6): 667
- 王建军, 包燕平, 曲英. 中间包冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 2001

冯捷(1963-),男,博士研究生,副教授,1988年北京科技大学毕业,炼钢和连铸的教学与科研。

收稿日期:2009-10-12