

板坯连铸双流 73 t 中间包控流装置优化的水模型研究

申小维^{1,2} 包燕平^{1,2} 李怡宏^{1,2} 王敏^{1,2} 赵立华^{1,2}

(北京科技大学 1 冶金与生态工程学院; 2 钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 根据相似原理采用 1:3 水模型研究了 238 mm × 1 500 mm 板坯双流连铸 73 t 中间包不同控流装置对流场的影响, 以便得出最佳控流组合及优化的挡墙位置和高度。结果表明, 采用双层湍流抑制器和下挡墙配合使用是双流中间包控流的较优组合, 当下挡墙位置在模型中距长水口 685 mm, 高度为 152 mm 时, 平均停留时间相对于原型中间包延长了 53.5 s, 死区比例由 27.9% 减小到 13.1%, 较好地改善了中间包内流体的流动形态, 有利于均匀钢液温度和夹杂物上浮去除。

关键词 73 t 中间包 238 mm × 1 500 mm 板坯连铸 水模型 控流装置 结构优化

A study of Water Model on Optimizing Flow Control Devices in 73 t Tundish for Two-Strand Slab Casting

Shen Xiaowei^{1,2}, Bao Yanping^{1,2}, Li Yihong^{1,2}, Wang Min^{1,2}, Zhao Lihua^{1,2}

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, 2 State key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Based on similarity principle, the effect of different flow control device in 73 t tundish for two-strand 238 mm × 1 500 mm slab casting on flow field has been studied by using 1:3 water model in order to get optimum flow control device combination and optimizing dam position and height. Water modelling results show that the better flow control device combination in tundish for two-strand casting is to use double-decker turbulence inhibitor and dam, and for dam with 152 mm height and distance from long nozzle 685 mm, as compared with original tundish structure the average resident time increases by 53.5 s and the dead area decreases from 27.9% to 13.1%, it is better to improve the flow status of liquid in tundish and favourable to uniform the temperature of liquid and remove the inclusions in liquid floating off.

Material Index 73 t Tundish, 238 mm × 1 500 mm Slab Casting, Water Model, Flow Control Device, Structure Optimization

连铸生产中, 中间包是钢包与结晶器之间重要的连接设备, 也是钢水进入结晶器之前最后的精炼手段^[1]。随着对钢水洁净度要求的不断提高, 中间包的作用也越来越重要, 许多学者对作为精炼设备的中间包进行了大量研究^[2-6]。通过中间包内型结构及控流装置的优化和应用, 可以改善中间包内钢液流动形态, 均匀温度, 从而改善夹杂物的运动条件, 促进夹杂物上浮去除。

试验以钢厂 238 mm × 1 500 mm 板坯连铸双流中间包为原型, 通过水模拟实验方法, 对板坯中间包内不同的控流装置组合, 湍流抑制器结构, 上挡墙和下挡墙的位置和高度进行了研究, 考察了对钢液流动形态和卷渣的影响。

1 研究方法

1.1 实验原理

实验以钢厂板坯连铸双流中间包为原型, 在保证中间包内型结构相同的条件下, 按照 1:3 ($\lambda = 1/3$) 制作有机玻璃模型, 保证几何相似。选取弗鲁

德准数作为定性准数, 保证模型与原型的弗鲁德准数相等, 就能基本上保证动力学相似。

由 $Fr_m = Fr_p$ 得:

$$\frac{v_m^2}{g l_m} = \frac{v_p^2}{g l_p} \quad (1)$$

$$Q_m = \lambda^{2.5} \cdot Q_p = 0.064 Q_p \quad (2)$$

式中: v - 流速/($m \cdot \min^{-1}$); Q - 液体体积流量/($m^3 \cdot \min^{-1}$); m, p - 表示模型(model)和原型(prototype)。

1.2 实验仪器和评价方法

实验所采用的水模型装置示意图如图 1 所示, 通过“刺激-响应”方法, 以水代替钢液, 以 KCl 作为示踪剂, 并加入 $KMnO_4$ 溶液以观察中间包内流体的流动形态, 采用中国水利水电科学研究院的 DJ800 水工测试仪和 DDLY-2005 型电导率仪, 测定一定时间内中间包水口中电导率的变化, 生成 RTD 曲线。为了消除外界因素的影响和系统误差, 采用多次试验取平均值的方法对数据进行处理。主要对不同控

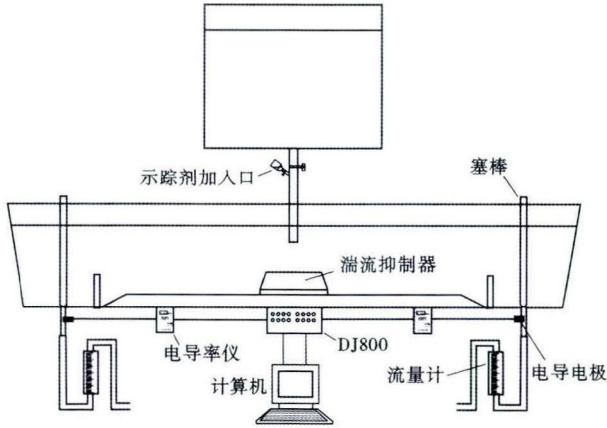


图 1 中间包水模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematics of tundish water model test device

流装置中间包流体的滞止时间、平均停留时间和中间包容积利用率即死区比例^[7]进行了评价。

$$t_s = \frac{V}{Q} \quad t_a = \frac{\int_0^\infty tC(t) dt}{\int_0^\infty C(t) dt} \quad (3)$$

$$V_d = 1 - \frac{t_a}{t_s} \quad (4)$$

$$V_p = \frac{t_{\min} + t_{\max}}{2t_s} \quad (5)$$

$$V_m = 1 - V_d - V_p \quad (6)$$

式中: V - 中间包钢液体积; Q - 流量; t_s - 理论平均停留时间; t_a - 实际平均停留时间; V_d - 死区比例; V_p - 活塞区比例; V_m - 全混区比例。

1.3 实验参数

实验用原型中间包的具体尺寸参数如图 2 所示,其常用工作容量为 73 t,现用控流装置组合为:单层湍流抑制器+下挡墙,下挡墙位于中间包底部斜坡下沿,距离长水口 2 742 mm,高 500 mm,并在底部沿中线对称开有 150 mm × 150 mm 双孔,其示意图如图 3(b)所示。实验研究的中间包连铸坯的断面尺寸为 238 mm × 1 500 mm,拉速 1.3 m/min,通钢量 55.69 m³/h。在以下实验过程中所用尺寸如无说明,均为模型尺寸。

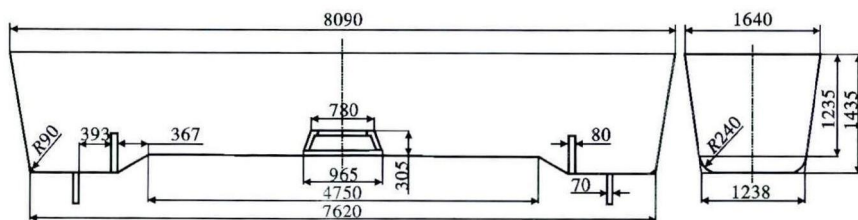


图 2 原型中间包结构图

Fig. 2 Sketch of structure of prototype tundish

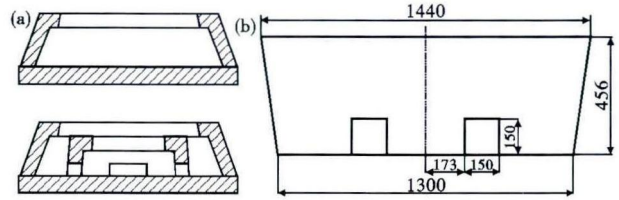


图 3 湍流抑制器剖面(a)和挡墙结构(b)示意图

Fig. 3 Schematics of turbulence inhibitor profile (a) and dam structure (b)

表 1 控流装置的组合优化实验结果

Table 1 Test results of various combined flow control devices

实验方案	时间/s			比例/%		
	滞止	峰值	平均停留	死区	活塞区	全混区
无控流装置	21.5	30.0	212.8	41.1	7.1	51.8
单层湍流抑制器	33.5	57.0	250.5	30.7	12.5	56.8
双层湍流抑制器	37.5	86.5	258.4	28.5	17.2	54.3
单层湍流抑制器+下挡墙(原型)	36.5	74.0	260.7	27.9	15.3	56.8
双层湍流抑制器+下挡墙	39.2	86.0	266.7	26.2	17.3	56.5
单层湍流抑制器+上下挡墙	31.0	51.5	238.0	34.1	11.4	54.4
双层湍流抑制器+上下挡墙	31.2	56.0	246.2	31.9	12.1	56.1

2 实验结果与分析

2.1 不同控流装置组合对钢液流动参数的影响

实验所采用下挡墙的位置和高度为中间包原型设计方案,在模型中距长水口 914 mm,高 152 mm;所采用上挡墙距长水口 667 mm,高 200 mm。实验测定了 7 种控流装置组合的 RTD 曲线,得到了滞止时间、峰值时间、平均停留时间等参数,实验结果见表 1。

从表 1 中可以看出,无控流装置的空包滞止时间和峰值时间都很小,液流从水口冲击到包底,因为没有湍流抑制器的缓冲稳流,直接以平铺的方式流向塞棒区,产生短路流,滞止时间仅为 21.5 s,中间包上层及角部存在大量死区,达 41.1%。

加湍流抑制器后,液流冲击中间包底部向两边流动速度明显减小,滞止时间和峰值时间有所延长,同时也形成了向上的流股,使部分流体能够到达中

间包上层,加单层和双层湍流抑制器的死区比例分别减小了 10.4% 和 12.6%。

在仅加湍流抑制器实验的基础上,再加下挡墙,滞止时间没有明显变化,因为所用的下挡墙底部开有双孔,并且原型下挡墙离塞棒很近,少部分液

流经通钢孔直接流入塞棒区,大部分会被下挡墙抬升流向中间包上层再进入塞棒区。峰值时间和平均停留时间相对未加下挡墙时增加,死区比例减小。

在湍流抑制器加下挡墙的实验中,再引入上挡墙,发现滞止时间基本没有变化,而峰值时间和平均停留时间减小,死区比例有所增加。从流场显示实验得出,液流冲击湍流抑制器后,形成的向上流股被上挡墙挡住,速度减缓,碰到下挡墙时不能获得抬升,因而中间包上层区域存在明显死区。并且加上挡墙会增加耐火材料的浸蚀,引入外来夹杂物。因此,上挡墙对改善中间包流场不利。

从表 1 单层湍流抑制器和双层湍流抑制器与不同控流装置组合的流动参数比较中可以看出,采用双层湍流抑制器的组合效果要优于采用单层湍流抑制器的组合,滞止时间、峰值时间和平均停留时间均有所延长,死区比例减小,说明双层湍流抑制器的控流效果要优于单层湍流抑制器,能降低液流速度,并抬升液体流股向中间包上层流动。

综上所述,双层湍流抑制器加下挡墙是最佳的控流装置组合,其滞止时间、峰值时间和平均停留时间分别为 39.2、86.0、266.7 s,死区比例为 26.2%,还是有些偏大。其流场显示实验得出,液体流股在经过湍流抑制器后,沿包底平铺向塞棒区的挡墙流去,一小部分液流直接从下挡墙底部的通钢孔流向浇铸区,大部分液流被下挡墙抬升,由于下挡墙离水口距离太远且设置了通钢孔,液流到达下挡墙处时流股速度已经很小,抬升过下挡墙后不能继续向上运动,在浸入式水口的抽吸下,直接流向浇铸区,形成短路流,导致中间包上层和角部出现大量死区,说明原型中间包挡墙的位置和高度是不合理的,不能起到抬升液流向中间包表层流动的作用,需要进一

步优化。

2.2 挡墙位置和高度对钢液特性参数的影响

根据仅加双层湍流抑制器的中间包流场实验,测得了模型中液流经湍流抑制器后的 4 个落点,分别取其靠前 50 mm,得到距离长水口 378、424、542、685 mm 四个位置,设置下挡墙,并在 86、119、152、185 mm 四个高度上变化,进行正交试验,所测流动参数结果如表 2 所示。

图 4(a)是挡墙在不同位置下滞止时间与挡墙高度的关系,明显地看出,滞止时间是随挡墙高度的增加和离长水口距离的减小而减小的。实验所采用的挡墙在底端开有两个方形的通钢孔,当液流冲击到中间包后,由于挡墙的设置,液流不能及时跃过挡墙流向浇铸区,而是堆积在挡墙和水口之间慢慢抬升至挡墙高度。根据伯努利方程可知,从通钢孔流

表 2 挡墙高度和位置的优化实验结果
Table 2 Test results of optimized height and position of dam

挡墙高/ mm	位置/ mm	时间/s			比例/%		
		滞止	峰值	平均停留	死区	活塞区	全混区
86	378	36.0	70.8	249.0	31.1	14.8	54.1
86	424	36.9	67.2	242.5	32.9	14.4	52.7
86	542	39.4	66.9	257.0	28.9	14.5	56.4
86	685	39.5	64.9	275.4	23.8	14.4	61.8
119	378	34.9	78.3	250.2	30.8	15.7	53.6
119	424	36.9	72.8	255.4	29.3	15.2	55.5
119	542	38.0	69.3	274.1	24.2	15.0	60.0
119	685	38.5	66.6	280.7	22.3	14.5	63.1
152	378	34.2	84.4	268.1	25.8	16.4	57.8
152	424	35.5	87.2	278.5	23.0	17.0	60.1
152	542	37.3	79.3	298.8	17.3	16.1	66.6
152	685	37.8	83.0	314.2	13.1	16.7	70.2
185	378	31.4	95.9	267.4	26.0	17.6	56.4
185	424	34.6	88.6	283.6	21.5	17.0	61.4
185	542	35.4	86.5	300.9	16.7	16.9	66.4
185	685	36.0	86.7	309.8	14.3	17.0	68.8

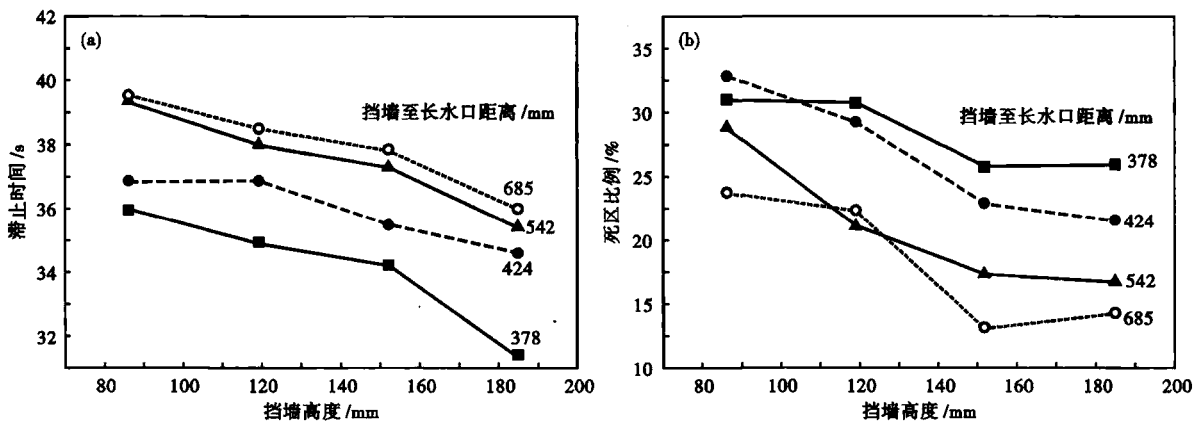


图 4 挡墙高度对滞止时间(a)和死区比例(b)的影响
Fig. 4 Effect of dam height on minimum time (a) dead area ratio (b)

出的液流速度将增加,并且随挡墙高度的增加和向长水口距离的靠近,拥堵越来越强,流过通钢孔的液流速度也越来越快,因而滞止时间逐渐减小。

图4(b)是挡墙在不同位置下死区比例与挡墙高度的关系,可以看出,死区比例随挡墙高度变化的趋势基本一致,挡墙高度增加,死区比例不断减小,挡墙高度从119 mm增加到152 mm时,死区比例急剧下降,当挡墙高度在152 mm和186 mm时,死区比例基本保持一致,没有太大变化。随着挡墙距离长水口位置的增加,死区比例的整体趋势也是逐渐减小的。

综上考虑,挡墙位置在距离长水口685 mm,高度152 mm和185 mm这两种情况下流动参数较好,滞止时间较长,分别为37.8 s和36.0 s;平均停留时间分别为314.2 s和309.8 s,相对原型中间包延长了53.5 s和49.1 s;死区比例也有显著减小,分别为13.1%和14.3%,比原型减小了14.8%和13.6%。

2.3 液面波动分析

挡墙越高,向上抬升的液流流股越高,造成液面波动越大,不利于夹杂物的上浮去除且容易卷渣。实验用波高仪对距离长水口685 mm位置时不同挡墙高度下的液面波动进行了测定,测定位置为挡墙上方和挡墙后方100 mm处,实验结果见表3。

由表3可知,在距离长水口685 mm,挡墙高度增大至185 mm时,挡墙上方液面波动由0.2 mm增大到0.3 mm,挡墙后100 mm处产生的液面波动由0.3 mm增大到0.4 mm,说明下挡墙越高,液面波动越严重。当下挡墙高度达185 mm后,液体流股跃过挡墙后冲击中间包表面,液面波动较大,上浮至渣钢界面的夹杂物可能会被重新卷入钢液,甚至引起卷渣,不利于夹杂物的上浮去除且容易引入外来夹杂物。另外下挡墙太高不仅增加了耐火材料的侵蚀,也不利于换包时中间包钢液的非稳态情况,所以下挡墙高度要低于185 mm,因此选取下挡墙高152 mm,距离长水口685 mm,为优化最终方案。

2.4 优化后中间包流动形态分析

从优化后中间包的流场显示实验得出,液体流

股碰到下挡墙后,少量液体从通钢孔直接流向浇铸区,大部分液体受下挡墙抬升流向中间包表层。液体跃过上挡墙后,并没有因水口的抽吸直接流走,而是保持一定的动能向中间包角部下方流去,冲击包壁后扩散到中间包底部和角部上方。在采用双层湍流抑制器的原型中间包中,60 s时液体流股即开始大量进入水口,而优化后在100 s时才有液体流股进入水口。在140 s时,原型中间包角部仍有部分死区,而优化后的中间包已经基本完全混匀。优化的中间包明显改善了液体流动轨迹,避免产生短路流,延长了液体平均停留时间,减小了死区比例,有利于钢液的温度均匀和夹杂物上浮去除。

3 结论

(1)中间包引入湍流抑制器能明显减小死区比例,加双层湍流抑制器和单层湍流抑制器在空包的基础上将死区比例减小12.6%和10.4%,加下挡墙能进一步减小死区比例,但加上挡墙反而使死区比例增加,最佳组合是双层湍流抑制器加下挡墙。

(2)挡墙高度在152 mm时,死区比例较小,继续增加挡墙高度,死区比例减小不明显。下挡墙高度达185 mm后,液体流股跃过挡墙后冲击中间包表面,造成液面波动较大,不利于夹杂物的上浮去除且容易引起卷渣。

(3)中间包优化后较合理的下挡墙位置为距离长水口685 mm,高152 mm,拥有良好的流动参数和较小的液面波动。优化后的平均停留时间为314.2 s,相对原型中间包延长了53.5 s,死区比例由27.9%减小到13.1%,并明显改善了中间包的流场形态,对钢液的温度均匀和夹杂物上浮去除有利。

参考文献

- [1] 王建军,包燕平,曲英.中间包冶金学[M].北京:冶金工业出版社,2001:4-6.
- [2] 金友林,包燕平,李志斌,等.板坯连铸单流中间包控流装置优化模拟研究[J].炼钢,2009,25(2):48-51.
- [3] 张炯明,邓凤琴,王文科,等.连铸中间包钢水夹杂物浓度的数值模拟[J].北京科技大学学报,2004,26(3):247-250.
- [4] 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.
- [5] 冯捷,唐德池,包燕平,等.控流装置对板坯中间包流场优化的影响[J].特殊钢,2010,31(2):17-20.
- [6] 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[J]. ISIJ International, 2001, 41(10):1194-1200.
- [7] Sahai Y, Emi T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes[J]. ISIJ International, 1996, 36(6):667-672.

申小维(1989-),男,硕士生,纯净钢与夹杂物研究。

E-mail:shen_xiaowei@live.com

收稿日期:2013-07-22

表3 挡墙高度对液面平均波高的影响/mm

Table 3 Average liquid level fluctuation for dam with different height /mm

挡墙高	挡墙上方	挡墙后100 mm处
86	0.2	0.3
119	0.2	0.3
152	0.2	0.3
185	0.3	0.4