

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.02.013

五流 L 型连铸中间包流场优化的水模分析

马国军^{1,2}, 程普红¹, 王晨辉¹, 程常桂¹

(1. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2. 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027)

摘要:采用水模型模拟的方法,对某钢厂十机十流连铸机中间包中的一个完全不对称结构的五流 L 型中间包进行流场优化。试验结果表明:控流最优方案为湍流抑制器 T+副导流墙 D_2 + 上 2 孔倾角为 25° 下靠近后墙单孔倾角 30° 的 3 孔主导流墙 D_{1a} 。采用该方案可使染色剂到达各出口的时间增加,各流响应时间差减小,RTD 峰值浓度减小以及高浓度存在的时间延长,各流之间的死区比例减小。

关键词:中间包;物理模拟;水模型;染色剂;RTD

中图分类号:TF777

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)02-0087-06

Water model study on flow optimization of five streams L-type tundish

MA Guojun^{1,2}, CHENG Puhong¹, WANG Chenghui¹, CHENG Changgui¹

(1. The Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, P.R.China;

2. Technical Center, Xingtai Iron and Steel Corp., LTD, Xingtai 054027, P.R.China)

Abstract: In this paper, the water model method is used to optimize the flow behavior of asymmetrical five streams L-type tundish in a steelmaking plant. The results show that the optimization plan is set up with turbulence suppressor T+ vice guide wall D_2 + main guide wall with three holes (D_{1a}) which consists of top two holes with 25° inclination and one hole with 30° inclination below. With this plan, the time which the colorants reach to the outlets increases, the difference of response time in all outlets decreases, the peak concentration of the RTD reduces, the existence time of high concentration liquid steel extends, and the ratio of dead zone in each streams reduces.

Key words: tundish; physical simulation; water model; colorant; RTD

随着用户对钢质量的要求与日俱增,要得到高纯净的钢水,连铸工艺控制显得尤为重要。在连铸过程中,中间包常用于稳定钢水静压、分配钢水、保证连续浇注、防止钢渣进入结晶器以及去除钢水中非金属夹杂物^[1-4]。针对不同结构中间包,采用合适的控流装置,优化钢水流动,使钢水中成分和温度更均匀,夹杂物上浮去除率更大,才能生产出洁净度更高、性能更优的钢种^[5]。

针对某钢厂十机十流连铸机中间包的控流装置进行优化设计。该连铸机包含两个完全不对称的五流 L 型中间包。该类型的中间包,包内钢液流场、温度场极不均匀,各出口钢液温度相差较大,流入中间包内的新鲜钢液到达各出口的时间也不相同,很难生产出高质量的铸坯。本研究中按原型与模型比例为 3:1 的尺寸

收稿日期:2014-12-11

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2014T70746);武汉市青年科技晨光计划资助项目(201507040410206)。

Supported by China Postdoctoral Science Foundation funded project(2014T70746); Partially supported by Chenguang Foundation for Young Scientists of Wuhan(201507040410206).

作者简介:马国军(1975-),男,博士,教授,主要从事冶金资源综合利用及保护等研究,(E-mail)gma@wust.edu.cn。

进行水模型试验,在中间包内添加不同控流装置(湍流抑制器、导流墙、挡坝),还考察了导流墙上导流孔角度的影响,找出合理的控流装置组合,为其实际应用提供依据。

1 实验

1.1 几何相似

水模型实验主要是依据相似原理,满足模型与原型的几何条件相似和动力参数相似关系^[1,6-9]。本研究选取某钢厂十机十流连铸机中间包中的一个 40 t 中间包为研究对象,其容积为 5.81 m³,工作液面高度 800 mm,各流间距 1 400 mm。对于几何相似,可采用任何比例,根据本研究的实际条件,相似比选择模型与原型比例为 1:3。

1.2 动力相似

在中间包内,影响钢液流动的力主要有粘性力、惯性力和重力,为了保证模型与原型的动力相似,需要保证液体的雷诺数 Re 和弗鲁德数 Fr 同时相等。由于本次研究的原型与模型内的流动均处于第二自模化区,只考虑模型和原型的弗鲁德数 Fr 相等,就可满足相似条件,即可得出

$$\frac{\mu_m}{\mu_p} = \lambda^{\frac{1}{2}} = 0.577, \quad (1)$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{\frac{5}{2}} = 0.064, \quad (2)$$

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{L_m/V_m}{L_p/V_p} = 0.577, \quad (3)$$

式中:下标 m 和 p 分别代表中间包的模型和原型; λ 为比例因子; μ 为流体速度; Q 为流量; t 为平均停留时间。

1.3 实验方法

本实验采用有机玻璃建立比例尺为 1:3 的五流中间包水模型,该装置有 5 个出水口,每个水口下端连接电极,用于采集各自水口电导率。实验中用 KCl 作为电导质测量电导率,然后得出 RTD 曲线,用亚甲基蓝染色剂直观观察中间包流场。五流 L 型中间包装置示意图如图 1 所示。

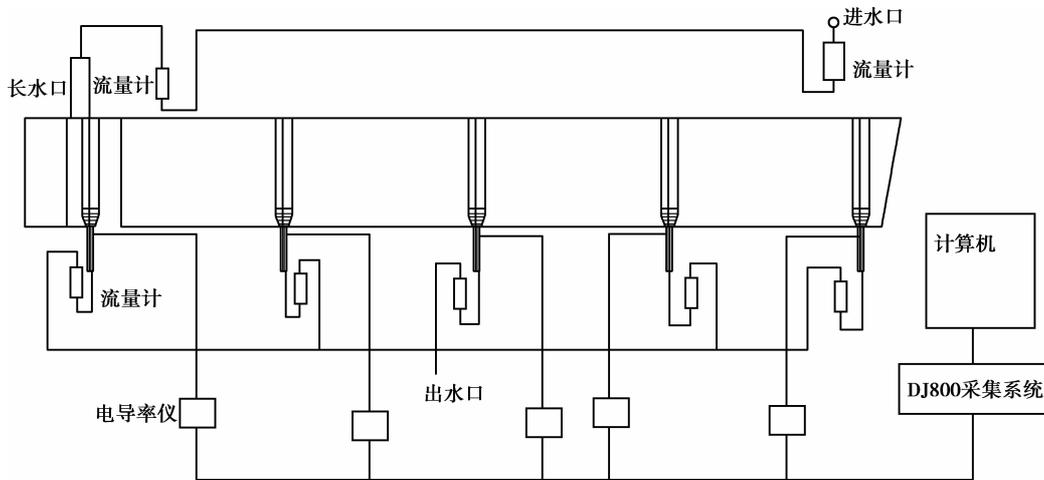


图 1 五流 L 型中间包实验装置示意图

Fig.1 Experimental apparatus of five flow L-type tundish

理论平均停留时间 τ_a , 依据下式计算

$$\tau_a = \frac{V}{Q}, \quad (4)$$

式中: V 为钢液体积, Q 为流量。

1.3.1 中间包 RTD 曲线测定实验

采用“刺激-响应”技术测量中间包内钢液的停留时间分布,即向中间包长水口加入示踪剂作为脉冲刺激信号,然后在各自出水口测定该输入信号,输出结果,最后根据所测得的各出水口信号数据,绘制出中间包内各流钢液的平均停留时间(RTD)曲线。具体步骤如下:

- 1) 连接实验装置,设置 DJ800 数据采集系统的参数,调节电导率仪的初始值;
- 2) 向中间包注入液体,待中间包内液体到达工作液面后,调整进水口和出水口流量,保证液体恒定在工作液位;

3)取出 250 ml 已经配制好的 3 mol/L 的 KCL 溶液,从长水口注入,采集数据;

4)数据采集完成后,导出数据结果进行分析。

1.3.2 染色实验

实验前期准备工作与测定 RTD 曲线实验相同,待液面稳定后,向长水口注入 150 ml 高浓度的亚甲基蓝液溶液,同时打开摄像机进行摄像。待染色剂在中间包内混匀后,停止摄像。

1.3.3 控流装置优化实验

实验主要研究添加控流装置组合中间包内钢液的流动状况,并采用空包作对比方案。使用的控流装置分别有湍流抑制器(T)、1#主导流墙(D_{1a})、2#主导流墙(D_{1b})、3#主导流墙(D_{1c})、副导流墙(D_2)、挡坝(B)。控流装置安装位置如图 2。

主导流墙上导流孔的中心线的延长线正对着 5# 出水口,保证了钢液被引导着以抛物线的形式向最远端的出水口流动,从而延长了钢液在中间包的流动行程,有利于钢液的混合和非金属夹杂物的上浮去除。1#、2#、3#主导流墙上开的导流孔的上扬角度各不相同, D_{1a} 导流孔上一排上扬角度为 25° ,下一排上扬角度为 30° ; D_{1b} 导流孔的上扬角度均为 15° ; D_{1c} 导流孔上扬角度均为 30° 。

副导流墙(D_2)开一个孔径较小的导流孔。由于大部分钢液受到副导流墙的阻挡,主要从主导流墙流出,导致 1# 出水口钢液的响应时间和停留时间过长,因此,需要在副导流墙上添加一个合适孔径和倾角的小孔,来改善流动的差异性。安装挡坝的目的是让在 4# 出水口底部的钢液有向上流动的趋势,同时使 4#、5# 出水口钢液的平均停留时间更加接近。

本研究中的各实验方案,即空包原方案和 15 种优化方案搭配见表 1 所示。各方案中出水口平均停留时间、整体平均停留时间、死区体积比例等计算方法详细说明见文献^[9]。

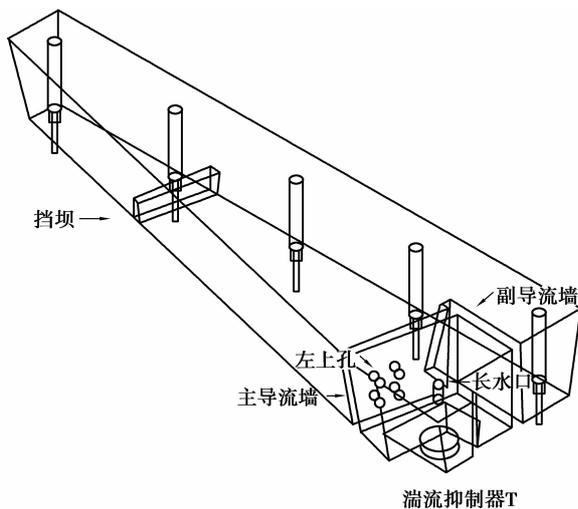


图 2 控流装置安装位置示意图
Fig.2 Schematic diagram of position of flow controlling devices

表 1 实验方案

Table 1 Experimental plan

方案号	控流装置设置
A	空包
B	湍流抑制器 T
C	T+主导流墙 D_{1a} +副导流墙 D_2
D	T+堵左上孔(见图 2.5)的 D_{1a} + D_2
E	T+堵右上孔的 D_{1a} + D_2
F	T+堵左下孔的 D_{1a} + D_2
G	T+堵右下孔的 D_{1a} + D_2
H	T+ D_{1a} + D_2 +B
I	T+堵左上孔的 D_{1a} + D_2 +B
J	T+堵右上孔的 D_{1a} + D_2 +B
K	T+堵左下孔的 D_{1a} + D_2 +B
L	T+堵右下孔的 D_{1a} + D_2 +B
M	T+ D_{1b} + D_2
N	T+ D_{1b} + D_2 +B
O	T+ D_{1c} + D_2 +B
P	T+ D_{1c} + D_2

2 结果与分析

2.1 流场实验结果

从图 3 可以看出,染色剂注入空包后,3 s 左右到达包底,此时的染色剂仍处于冲击区内,第 4 s 开始铺展开,然后扩散到 1# 出水口流出,部分往 2# 出水口流动,第 7 s 时到达 2# 出水口流出,仅有较少部分向上流动到达顶面渐渐铺开。在这个过程中,中间包内染色剂的环流作用很弱,染色剂大部分直接流向 1#、2# 出水口,极少会回落到顶液面,也即存在短路流,钢液在中间包内流动混合较少,钢液质量较差。第 40、94、240 s 时刻,染色剂先后分别到达 3#、4#、5# 出水口,到达这几个出水口先后时间差分别为 36、54、146 s,最大时间差是 1# 和 5#,其差值为 236 s,表明不加任何控流装置的中间包,钢液到达各个出水口的时间差很大,流动一致性差,成分和温度也存在很大差异。

从添加控流装置的方案 G 流场(图 4)可见,注入染色剂后,染色剂在 2 个导流墙围成的冲击区内充分混合,第 9 s 开始从主导流墙的导流孔流出。由于导流孔的作用,染色剂向上流到顶面,然后沿着顶面流动到中间包远端。加大了示踪剂在中间包内的流动行程,流到远端的染色示踪剂增多,减小各流流动差异。第 45 s

时刻,大部分在液顶面铺开,小部分流向包底。2#出水口开始有染色剂流出,在副导流墙的导流孔有钢液流向 1#出水口。在 65、72、120、127 s 时刻,染色示踪剂分别到达 2#、3#、4# 和 5# 出水口。到达 1# 出水口和到达 5# 出水口时间差最大(82 s),钢液在中间包内的流动一致性好。

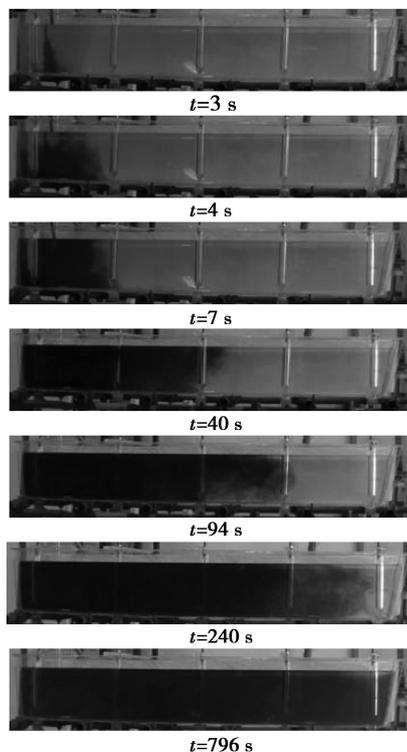


图 3 方案 A 各时刻流场图

Fig.3 Flow field patterns of A scheme at different moment

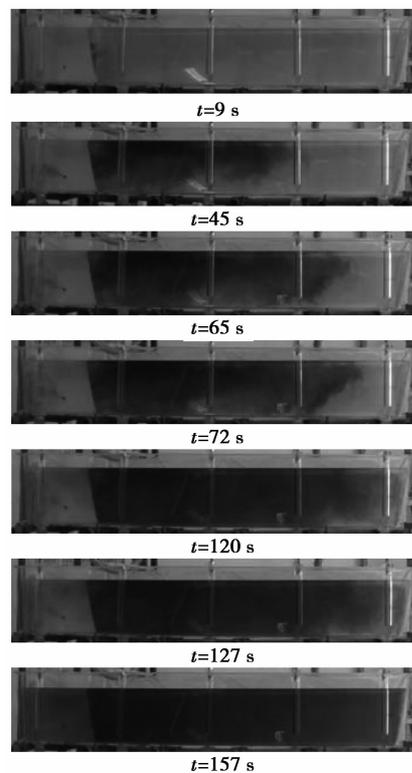


图 4 方案 G 各时刻流场图

Fig.4 Flow field patterns of G scheme at different moment

与空包相比,示踪剂到达 1# 出水口的时间,从 4 s 延长到 45 s,最大时间差从 236 s 减小到 82 s,方案 G 可以明显减小各流差异,各流一致性较好,保证了钢液在中间包内充分混合。

2.2 RTD 曲线实验结果

本研究进行了 16 组实验,限于篇幅,仅列出空包、方案 E、方案 K 和最优方案进行对比,其 RTD 曲线如图 5 所示。一般而言,RTD 曲线可以看作由脉冲曲线和稀释曲线组合而成。在脉冲曲线段,可认为钢液在中间包内完全不混合,进入中间包内迅速到达出水口,监测到很高的峰值浓度,然后全部流出到出水口;在稀释曲线段,钢液浓度缓缓下降,有较宽的高浓度区间,浓度下降的趋势很缓慢,钢液混合效果越好,越有利于去除钢液中的非金属夹杂物,然后曲线持平,直到收敛。为得到更纯净的钢液,希望尽量减少 RTD 曲线中的脉冲曲线,更多稀释曲线,从而各流 RTD 曲线响应时间差距小,峰值浓度小,峰值浓度宽的控流方案为较优方案。

从图 5(a)方案 A 中可见,空包中示踪剂在中间包内的流动效果较差,示踪剂进入中间包后,很快到达出水口,出水口所监测到的示踪剂浓度值很高,然后迅速下降,曲线上存在尖锐的峰值,表明空包内存在明显的短路流,这与染色实验观察到的现象一致。添加湍流抑制器和导流墙后(方案 C~P),从 RTD 曲线来看,均在一定程度上改善了钢液流动状态。

方案 E($T+$ 堵右上孔的 $D_{1a}+D_2$),堵住右上孔。对比方案 G,本方案中出口示踪剂浓度值更高(0.830),而方案 G 中出口示踪剂浓度为 0.625,表明 E 方案钢液没有经过充分混合,直接从出水口流出,不利于夹杂物的上浮去除。

方案 K 是在方案 G 的基础上,增加了挡坝。与方案 G 比较,可清楚看到 5 流不一致,尤其在 10~20 min 有较清楚的浓度差,且出口示踪剂浓度也较高。这表明采用方案 K 中间包内各流钢液的温度以及成分可能不一致。

方案 G 中的 RTD 曲线峰值浓度最小。方案 C~P 中 RTD 曲线峰值区域均有一定宽度,而这个宽度则对应的是中间包内溶液混流区体积比例大小。方案 G 的 RTD 曲线峰值区域较其他方案也更加宽,表明流入中间包内的示踪剂溶液的混合时间长,流动效果好。

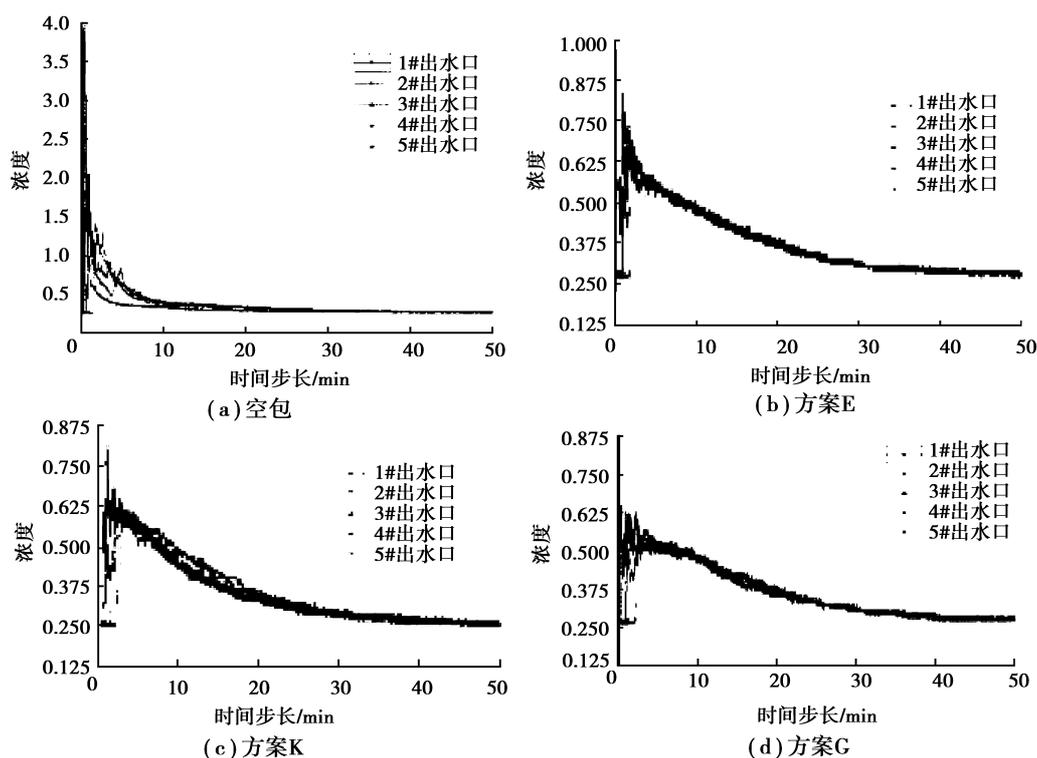


图 5 空包和方案 E,K,G 中的 RTD 曲线

Fig.5 RTD curves of tundish without flow control devices and schemes of E, K, G

2.3 影响中间包流场状况的因素分析

表 2 为各方案平均停留时间、各流最大时间差和死区体积比例对比。从表 2 可以看出,方案 A 即空包各出水口平均停留时间较短,各出水口时间差较大,整个包内平均停留时间短,不利于非金属夹杂物的上浮去除。方案 B 虽然添加了湍流抑制器,但并未增加钢液在中间包内的停留时间,表明仅在空包入水口下方安置湍流抑制器装置,不能达到改善钢液流动状态的目的。

对于安装了导流墙的控流方案,在原空包方案的基础上,都有不同程度的优化效果,各流出水口处钢液的平均停留时间加长,随之整个中间包内钢液的平均停留时间增加,有利于钢液在中间包内的充分混合,促进非金属夹杂物上浮去除,改善钢液质量。在各控流方案中,方案 G 各流出水口处钢液的平均停留时间最长,整体平均停留时间也最长(809 s),且接近于理论平均停留时间(814.9 s)。方案 G 相比空包有最大程度的改善,钢液在中间包内流动混合的时间最长,更有利于非金属夹杂物上浮去除。

在方案 G 中,上 2 孔向上倾角为 25° ,略小于下 2 孔(30° 倾角),以保证冲击区下部的钢液能尽量往顶面流动,同时中上部的钢液沿着顶面流动而对顶面不造成太大波动。堵住右下导流孔,为了增加钢液在中间包内的流动行程,使中间包内的整体平均停留时间增加。

方案 I、J、K、L 分别是在方案 D、E、F、G 的基础上在 4# 出水口前端添加了挡坝,方案 N 和 O 也在方案 M 和 P 基础上增加一个挡坝。添加挡坝后,对应的整体平均停留时间减小,表明挡坝的安置并不利于增加钢液在整个中间包内的平均停留时间。

表 2 各方案平均停留时间、各流最大时间差和死区体积比例对比

Table 2 The average residence time, maximum difference time and dead volume ratios of different strands

方案	平均停留时间/s	各流最大时间差/s	死区体积比例/%
A	575.5	290.1	26
B	429.4	136.8	27
C	736.3	113.1	23.2
D	794.0	148.1	24.4
E	787.6	76.2	21.3
F	746.6	180.4	20.3
G	809.0	97.8	19.1
H	710.5	155.6	21.9
I	754.2	183	21.2
J	779.5	169.2	23.7
K	791.5	144.3	22.4
L	789.1	162.1	20.5
M	733.1	144.9	21.9
N	659.3	180.4	19.5
O	654.6	232.3	17.5
P	677.1	238.8	19.5

此外,方案 A 中各流平均停留时间最大时间差高达 290.1 s,表明钢液在空包内流动一致性差。增加控流装置的各方案中,平均停留时间最大差值较空包均有一定幅度减小。

由表 2 还可以看出,方案 E 比方案 G 各流最大时间差小,然而平均停留时间小、死区体积比例较大。主要因为 2 个方案堵住导流孔的位置不同,方案 E 是堵住上排右边孔,在下排是钢液流入中间包主要区域,距离包底近,因而停留时间稍小,不利于钢液的净化。

方案 K 比方案 G 平均停留时间大,但是各流时间差大、死区体积比例较大。主要因为 2 个方案是否使用挡坝,挡坝位置为出水口第 4 与第 5 之间,K 方案增加了挡坝,使流入中间包的新鲜钢液流场向上流动,虽然增加了平均停留时间,但是各流时间差增大,不利于各出水口钢液的一致性。

在本研究中,方案 A 死区体积比例较大(26%),方案 B 较之有所增加,表明仅添加湍流抑制器并不能减小中间包内死区体积。方案 C~P 的死区体积比例均相比空包有所减小,其中方案 N、O、P 的死区体积比例都在 20% 以下,方案 O 的死区体积比例最小(17.5%),这是因为方案 O 主导流墙上的导流孔角度均较大,钢液在离开冲击区后大部分冲向顶面,形成较大的环流区域,同时,在挡坝后也形成环流区域,钢液在中间包内的环流流动比其他的方案更多,所以死区体积比例最小。但是主导流墙的上 2 个导流孔倾角较大,导致中间包内的钢液冲击液面,造成卷渣,形成二次污染的危害。但在方案 O 中,其各流平均停留时间差值达 232.3 s,因此,方案 O 并不能看作最优方案。

综合比较可以看出,方案 G 整体平均停留时间最长,各流平均停留时间最大差值 Δt 也较小,死区体积较空包减小了 6.9%,因而可认为方案 G 是各优化方案中的最佳方案。

3 结 论

1) 在原型空包中,钢液到达各个出水口的时间差异很大,RTD 曲线峰值浓度很高,曲线上存在尖锐的脉冲段,表明中间包内存在短路流,各流钢液一致性较差。

2) 空包整体平均停留时间较短,各流平均停留时间的最大差值较大,死区体积比例大,中间包内的流动效果差。

3) 增加湍流抑制器、副导流墙和 3 孔主导流墙可以明显增加钢液的平均停留时间,各流出水口钢液成分差异小,有利于钢液在中间包内的充分混合,促进非金属夹杂物上浮去除,改善钢液质量。

4) 研究中五流 L 型连铸中间包的最优控流方案为方案 G,即为湍流抑制器 T+副导流墙 D_2 +上 2 孔倾角 25° 下靠近后墙单孔倾角 30° 的 3 孔主导流墙 D_{1a} 的中间包。该方案中,中间包内钢液的整体平均停留时间最长,各流平均停留时间最大差值较小。

参考文献:

- [1] Wang J J, Bao Y P. Tundish metallurgy[M]. Bei Jing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [2] Sahai Y, Emi T. Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes[J]. ISIJ Int., 1996, 36(9): 1166-1173.
- [3] 潘秀兰,梁慧智,王艳红,等. 国内外连铸中间包冶金技术[J]. 世界钢铁,2009, 9(6): 9-16.
PAN Xiulan, LIANG Huizhi, WANG Yanhong, et al. Introduction of Tundish Metallurgical Technology. At Home and Abroad[J]. World Iron & Steel, 2009, 9(6): 9-16.
- [4] Mazumdar D, Guthrie R I L. The physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems[J]. ISIJ Int., 1999, 39(6): 524-547.
- [5] 韩建军,范新有,李士琦,等. 5 流中间包内钢液流动特性的优化[J]. 过程工程学报, 2011, 02: 193-198.
HAN Jianjun, FAN Xinyou, LI Shiqi et al. Optimization of flow characteristics of molten steel in a five-strand tundish[J]. The Chinese Journal of Process Engineering. 2011, 02: 193-198.
- [6] 钟良才. 单流厚板坯连铸中间包结构优化[J]. 炼钢,2006,22(3): 10.
ZHONG Liangcai. Optm i zation of tund ish configurat ion of single strand slab CC machine[J]. Steel making, 2006, 22(3): 10.
- [7] 宋建新,韩建军,王玉刚,等. 30 t 板坯连铸中间包结构优化研究[J]. 山东冶金,2009, 31(3): 29-31.
SONG Jianxin, HAN Jianjun, WANG Yugang, et al. Optimization study on configuration of 30 tons slab continuous casting tundish[J]. Shandong Metallurgy, 2009, 31(3): 29-31.
- [8] 梁福斌,陈健,果晶晶. 板坯连铸中间包水模型研究[J]. 特殊钢,2008, 29(3): 1-3.
Liang Fubin, Chen jian, Guo Jingjing. A study on water modeling test of tundish for slab concasting[J]. Special Steel, 2008, 29(3): 1-3.
- [9] 王晨辉,马国军,程普红,等. 五流 L 型连铸中间包结构优化的数值模拟[J]. 铸造技术,2014, 35(5): 1022-1025.
WANG Chenhui, MA Guojun, CHENG Puhong, et al. Numerical simulation on flow control device optimization of five streams L-type tundish[J]. Foundry Technology, 2014, 35(5): 1022-1025.