

单流厚板坯中间包物理模拟研究和应用

姜学锋¹ 时朋召² 王玉平¹ 徐李军²

(1 本钢板材股份有限公司炼钢厂, 本溪 117000; 2 钢铁研究总院国家连铸中心, 北京 100081)

摘要 为得到更加合理的 50 t 中间包控流装置, 通过建立几何相似比 1:4 的单流中间包水模型, 采用物理模拟试验, 研究了不同流量 (1.09、1.24 m³/h)、长水口插入深度 (25、50、75 mm)、挡坝高度 (90、135 mm) 以及长水口和堰距离 (190、390 mm) 等参数对中间包流场的影响。模拟结果表明, 当响应时间更小时, 中间包死区体积反而更大; 当中间包的平均停留时间越大时, 中间包的死区体积越小; 模型最优的中间包工艺参数为: 控流方案 8[#]、流量 1.24 m³/h、长水口插入深度 25 mm, 其平均停留时间为 294.99 s, 死区体积百分数为 16.05%。SPHD 钢 50 t 中间包应用表明, 采用流量 40 m³/h, 长水口插入深度 100 mm, 挡坝高度 540 mm, 钢水夹杂物总量 2.51 mg/10 kg, 去除夹杂物明显。

关键词 中间包 物理模拟 流场 平均停留时间 死区体积

Study and Application on Physical Simulation of Single Thick Slab Flow Tundish

Jiang Xuefeng¹, Shi Pengzhao², Wang Yuping¹ and Xu Lijun²

(1 Steel-Making Plant, Bengang Steel Plates Co Ltd, Benxi 117000; 2 National Engineering Research Center for Continuous Casting Technology, Center Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract In order to obtain a more reasonable 50 t tundish flow control device, a single flow tundish water model with a geometrical similarity ratio of 1:4 is established, and physical simulation tests are carried out to study the effects of different flow rates (1.09 and 1.24 m³/h), long nozzle insertion depth (25, 50 and 75 mm), retaining dam height (90 and 135 mm) and the distance between long nozzle and weir (190 and 390 mm) on the flow field in tundish. The simulation results show that when the response time is smaller, the dead zone volume of the tundish is larger. The larger the average residence time, the smaller the dead zone volume in tundish. The optimal tundish process parameters of model are: flow control scheme 8[#], flow rate 1.24 m³/h, long nozzle insertion depth 25 mm, the average residence time is 294.99 s, the percentage of dead zone volume is 16.05%. SPHD steel 50 t tundish production application shows that by using flow 40 m³/h, long nozzle inserted depth 100 mm, dam height 540 mm, the inclusion amount in steel is 2.51 mg/10 kg, removing inclusion obviously.

Material Index Tundish, Physical Simulation, Flow Field, Average Residence Time, Dead Zone Volume

随着对钢材质量要求的不断提高, 因此对钢液纯净度的要求也越来越高。中间包是连铸过程的主体设备之一, 其具有分流、均匀钢水成分和温度、促进夹杂物上浮等作用^[1]。大量研究和试验证明^[2-4], 通过采用合理的中间包控流装置, 设计中间包流股控制装置方案 (包括坝、堰、多孔挡墙、底吹气元件或磁场控制) 来改善中间包内钢液的流动状态, 延长钢液在中间包内的实际停留时间, 并减小死区体积, 从而达到减少夹杂物数量的目的, 尽量消除以上所述的由旋涡、死区和沟流的存在而对铸坯质量带来的影响。

本研究以钢厂单流厚板坯连铸中间包为对象,

利用相似原理和物理模拟方法对不同流量和不同插入深度条件下的各种控流方案进行试验研究, 以死区体积分数和平均停留时间为评判指标, 研究不同流量和长水口插入深度、长水口和堰距离、挡坝高度等参数对中间包流场的影响, 最终得出最合理的中间包控流装置。

1 物理模拟的原理及模型的选择

1.1 物理模拟相似原理

采用水作为物理模拟的模化介质, 用来模拟中间包内的钢液。根据相似原理, 如果要使模型与原型相似, 只需要保证模型与原型的弗鲁德准数 Fr 相

通讯作者: 时朋召 (1990-), 博士研究生, 钢铁研究总院国家连铸中心, 北京 100081

E-mail: shipengzhao1990@163.com

等即可^[4],而此时的模型与原型几何比例的选取不再受动力相似的条件所约束,从而推出以下计算公式(下标 m 表示模型 p 表示原型):

$$\frac{u_p^2}{gl_p} = \frac{u_m^2}{gl_m} \quad (1)$$

式中: u_p —中间包原型中钢液的流动速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); u_m —中间包模型中水的流动速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); l_p —中间包原型的实际尺寸/m; l_m —中间包模型的尺寸/m; g —当地的重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

$$\text{式(1)可以写成: } \frac{l_m}{l_p} = \left(\frac{u_m}{u_p} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{令 } \frac{l_m}{l_p} = \lambda_1, \text{ 则 } l_m = l_p \cdot \lambda_1, u_m = u_p \cdot \lambda_1^{\frac{1}{2}};$$

$$\text{同理可推出模型流量: } Q_m = Q_p \lambda_1^{\frac{5}{2}} \quad (3)$$

物理模拟试验中,采用模型与原型1:4的几何相似比。从而得到: $\lambda_1 = 0.25$, $l_m = 0.25 l_p$, $u_m = 0.5 u_p$, $Q_m = 0.031 Q_p$ 。

1.2 试验装置与试验参数

试验装置如图1所示。整个试验装置不仅包括钢包模型、中间包模型,另外还包括示踪剂加入装置、电导率测量仪、计算机数据采集系统等。其中,钢包长水口模型、中间包模型、坝堰以及湍流抑制器均采用透明的有机玻璃制成,便于对中间包内流体的流动状态进行观察记录。表1为中间包物理模拟原型和模型试验参数。中间包模型结构尺寸如图2所示。

2 物理模拟试验方法与试验方案

2.1 试验方法

通过“刺激-响应”的方法^[4],在长水口瞬间注入 250 mL 饱和 NaCl 的墨水作为示踪剂,并采用电导率仪在出口采集液体电导率数据,然后转化成停

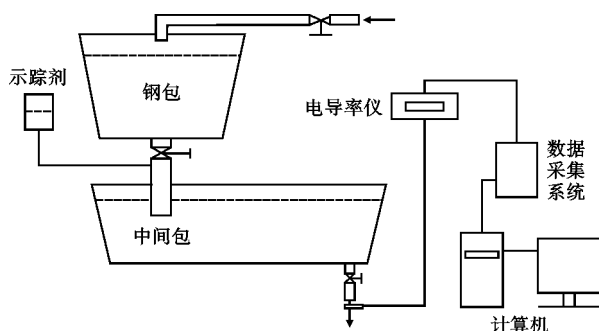


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test device

表1 中间包物理模拟原型和模型试验参数

Table1 Test parameters of prototype and physical simulation model of tundish

中间包	工作液位/ mm	长水口插入 深度/mm	长水口 内径/mm	出水口 内径/mm	长水口流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
原型	1330	200	90	80	35 40
模型	332.5	50	23	20	1.09 1.24

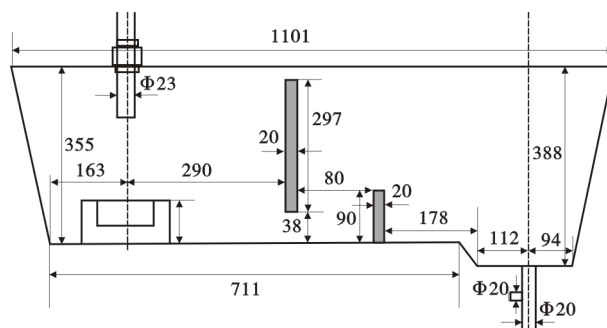


图2 中间包模型结构尺寸

Fig.2 Structure dimensions of tundish model

留时间分布曲线(RTD 曲线)。根据修正混合理论模型计算出中间包死区、活塞区体积分、理论和实际停留时间。

$$\text{活塞区体积分数: } \Phi_p = \frac{V_p}{V_R} = \frac{t_{\min} + t_{\text{peak}}}{2\tau} \quad (4)$$

$$\text{死区体积分数: } \Phi_d = \frac{V_d}{V_R} = 1 - \frac{\tau}{t} \quad (5)$$

$$\text{理论平均停留时间: } \tau = \frac{V_p}{Q} \quad (6)$$

$$\text{实际平均停留时间: } t = \frac{\sum tC(t)}{\sum C(t)} \quad (7)$$

式中: τ —理论停留时间; $t_{\min}$ —中间包出口开始出现示踪剂的时间; t_{peak} —示踪剂浓度达到最大值的时间; V_R —中间包模型的有效容积; V_p —活塞区体积; V_d —死区体积; Q —流体的体积流量。

采用电导率测量仪和数据采集系统采集中间包水的电导率变化,并用高清摄像机记录示踪剂在中间包的流场。

2.2 试验方案

设计不同的长水口到堰的距离、挡坝高度等参数,表2为中间包模型试验中的控流方案,表3为各个控流方案下的试验方案,对各个中间包控流方案不同流量(1.09, 1.24 m^3/h)、不同长水口插入深度(25, 50, 75 mm)等工况分别进行试验研究。

表 2 模型不同控流装置方案

Table 2 Schemes of different flow control devices of model

方案	长水口和堰距离/ mm	挡墙挡坝距离/ mm	挡坝高度/ mm
5 [#]	190	80	90
6 [#]	390	80	90
8 [#]	190	80	135

表 3 模型试验方案

Table 3 Test scheme of model

方案	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	长水口插入深度/mm
5 [#]	1.09、1.24	25、50、75
6 [#]	1.09、1.24	25、50、75
8 [#]	1.09、1.24	25、50、75

3 结果与讨论

3.1 流量与长水口插入深度对中间包流场的影响

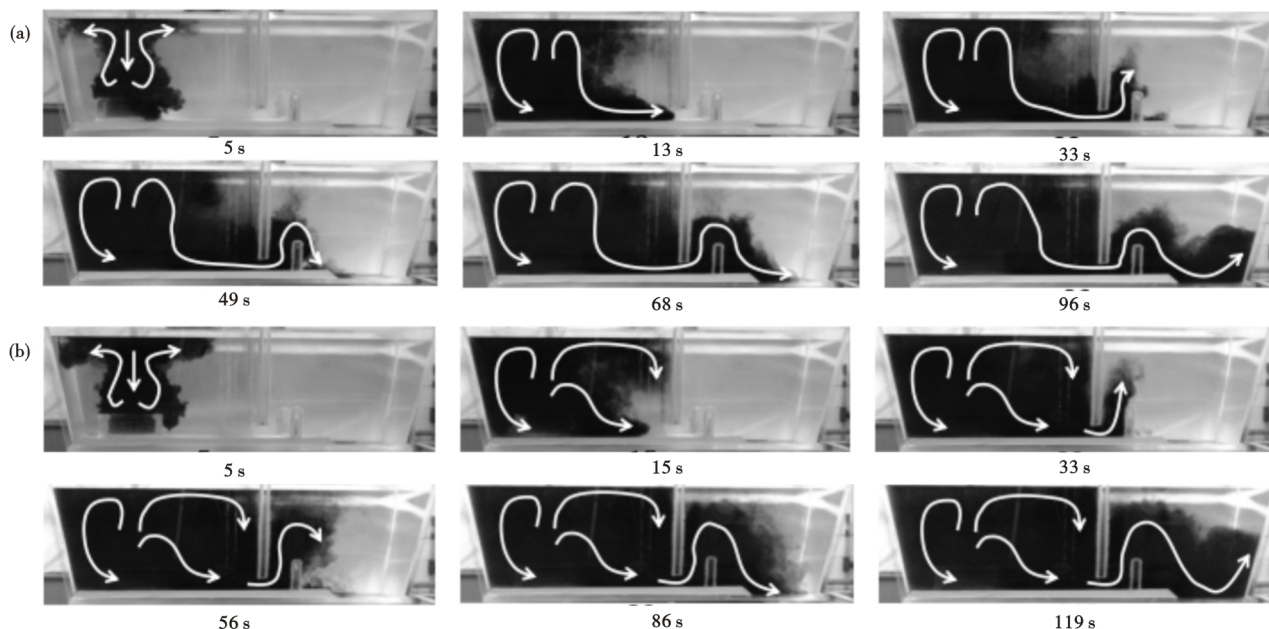
图 3 为控流方案 6[#] 下不同长水口插入深度的流场,表 4 为不同流量和长水口插入深度时的 RTD 曲线特征值。由图 3 可知,中间包中流股从长水口冲出后,冲击到湍流抑制器后开始扩散,在抑湍器侧壁的引导下上浮至中间包液面,一部分钢液向挡墙方向流动,经过堰的下部开口,部分流股从挡坝上的导流孔流向出口,另一部分钢液在挡坝引导下再次向上流动,冲击一定高度后再向出口流出。且能够

图 3 模型长水口插入深度 75 mm (a), 50 mm (b) 和 25 mm (c) 的流场(流量 $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$)Fig. 3 Flow field of model with long nozzle inserted depth 75 mm (a), 50 mm (b) and 25 mm (c) (flow rate $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$)

发现,随着插入深度由 75 mm 到 25 mm 时,流股冲击到出口的时间减小,从表 4 中的响应时间 $T_{\min}$ 也可得出相同结果,这是因为插入深度越小时,流股在冲击到湍流抑制器前就开始扩散,并更早到达出口。

图 4 为控流方案 6[#] 下不同流量的流场。由图 4 和表 4 可知,随着流量由 $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加到 1.24

m^3/h ,在冲击区流股扩散更加急速和范围更大,且流股经过坝时,向上的冲击高度更大,造成响应时间 $T_{\min}$ 反而增加;但从平均停留时间和死区体积分数来看,流量 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的平均停留时间 T_{AVG} 更长和死区体积分数更小,更加有利于中间包中夹杂物上浮去除,这是因为当流股流量增加时,流股在冲击区

图 4 模型流量 $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$ (a) 和 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流场(长水口插入深度 50 mm)Fig. 4 Flow field of model with flow rate $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$ (a) and $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$ (b) (long nozzle inserted depth 50 mm)表 4 模型不同流量和长水口插入深度时的 RTD 曲线特征值
Table 4 Model RTD curve characteristic values with different flow rates and long nozzle insertion depths

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	长水口插入 深度/mm	响应时间 ($T_{\min}$) /s	平均停留时间 (T_{AVG}) /s	死区体积分数 (V_d/V_R) /%
1.24	25	56.4	265.69	24.38
1.09	25	48.6	220.84	49.62
1.24	50	60.8	256.48	27.01
1.09	50	45	216.29	50.66
1.24	75	67.6	283.87	19.21
1.09	75	52.6	229.9	47.55

和经过坝的浇注区扩散范围更广,故死区体积减小。

3.2 长水口与堰距离对中间包流场的影响

不同长水口与堰距离时的中间包流股运动轨迹基本一致,只是当长水口与堰距离更小时,流股流经挡坝时的冲击高度更大,流股的扩散范围更大,则死区体积会更小,表 5 中的死区体积数据刚好验证。由表 5 可知,当长水口与堰距离由 190 mm 增加到 390 mm 时,平均停留时间由 271.28 s 减为 256.48 s,而死区体积分数由 22.79% 增加到 27.01%,即长水口与堰距离为 190 mm 时中间包流场更加合理。同

表 5 不同长水口与堰距离时的 RTD(停留时间分布)曲线特征值

Table 5 RTD curve characteristic values at different distances between weir and long nozzle

长水口与堰 距离/mm	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	插入深度/ mm	响应时间/ s	平均停留 时间 /s	死区体积 分数 /%
190	1.24	50	77.6	271.28	22.79
390	1.24	50	60.8	256.48	27.01

时发现,当响应时间更小时,中间包死区体积反而更大,这是因为流股更快到达出口时,其在中间包的扩散范围则更小,会造成死区体积更大。

3.3 挡坝高度对中间包流场的影响

不同坝高时的中间包流股运动轨迹基本一致,只是当坝高更大时,流股流经挡坝时的冲击高度更大,流股的扩散范围更大,则死区体积会更小。由表 6 可知,当坝高由 90 mm 增加到 135 mm 时,平均停留时间由 241.64 s 增至 251.61 s,而死区体积分数由 44.87% 降低为 42.6%,相比较而言,坝高 135 mm 比坝高 90 mm 时中间包流场更加合理。同时发现,当响应时间更小时,中间包死区体积反而更大,这是因为流股更快到达出口时,其在中间包的扩散范围则更小,会造成死区体积更大。

表 6 不同坝高时的 RTD 曲线特征值

Table 6 RTD curve characteristic values at different dam heights

坝高/ mm	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	插入深度/ mm	响应时间/ s	平均停留 时间 /s	死区体积 分数 /%
90	1.09	50	74.2	241.64	44.87
135	1.09	50	89.4	251.61	42.6

3.4 不同控流方案对中间包流场的影响

中间包流场的影响因素较多,包括长水口插入深度、流量、坝高以及长水口与堰距离等参数,平均停留时间越大和死区体积越小,则中间包流场更加

合理,更有利夹杂物的上浮去除。图 5、6 分别为不同控流方案的平均停留时间和死区体积分数。由图 5 可知,不同流量和插入深度时,中间包的平均停留时间不同,当流量在 $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$,长水口插入深度在 25、50、75 mm 时,平均停留时间由大到小的是控流方案 $8^\# > 5^\# > 6^\#$;而当流量在 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$,长水口插入深度在 25、50 mm 时,平均停留时间最大的控流方案是 $8^\#$ 。

由图 6 可知,不同流量和插入深度时,中间包的死区体积不同,当流量在 $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$,长水口插入深度在 25、50、75 mm 时,死区体积由小到大的的是控流

方案 $8^\# < 5^\# < 6^\#$;而当流量在 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$,长水口插入深度在 25、50 mm 时,死区体积最小的控流方案是 $8^\#$ 。这是因为 $8^\#$ 控流方案相对 $5^\#$ 和 $6^\#$ 的结构区别分别在于长水口与堰距离更小和挡坝高度更大,更加有利于流股在中间包浇注区的扩散。

由图 5 和图 6 可知对应关系,当中间包的平均停留时间越大时,中间包的死区体积越小,而流量越大时,平均停留时间越大,而中间包死区体积越小。通过对比各方案与工艺参数条件下的中间包停留时间和死区体积,选取最优的中间包工艺参数为:控流方案 $8^\#$ 、流量 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 、长水口插入深度 25 mm。

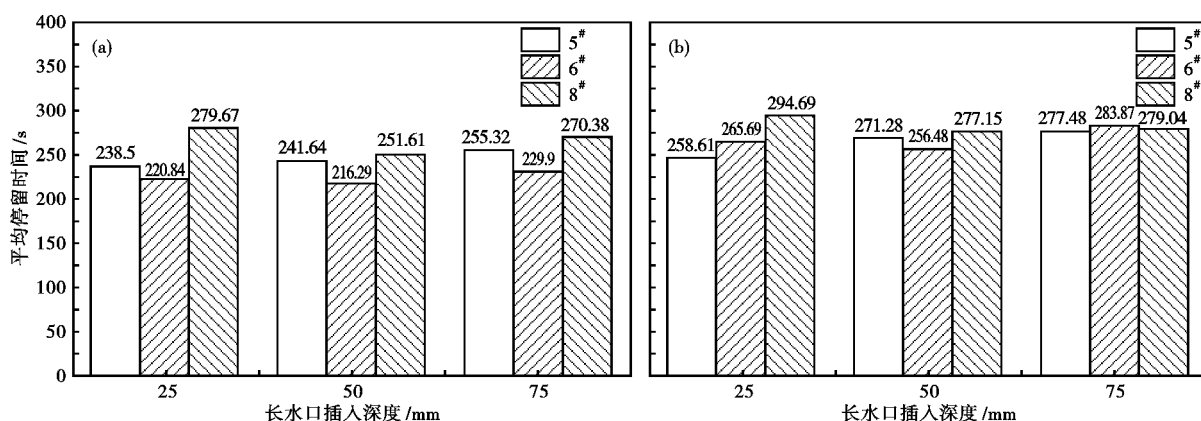


图 5 模型控流方案 (a) 流量 $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 (b) 流量 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 的平均停留时间

Fig. 5 Average residence time of model with flow control scheme (a) flow rate $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$ and (b) flow rate $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$

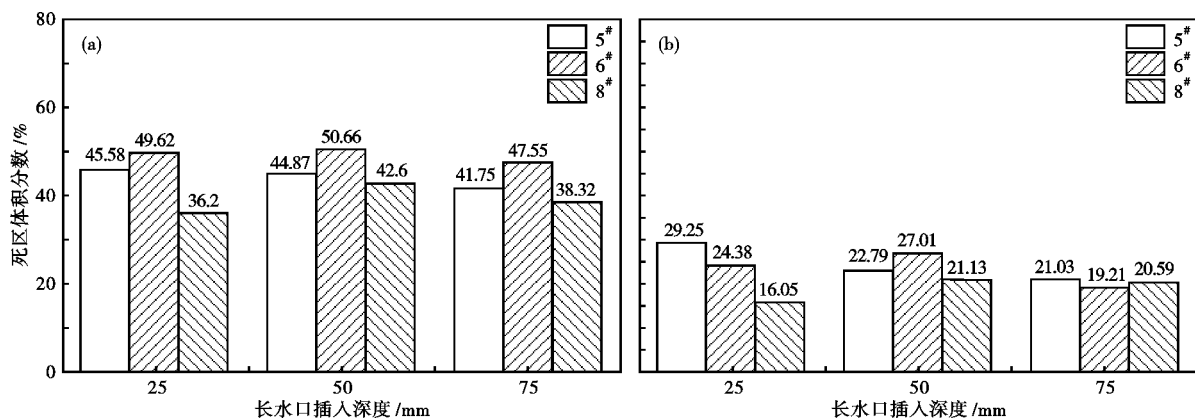


图 6 模型控流方案 (a) 流量 $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 (b) 流量 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 的死区体积分数

Fig. 6 Dead zone volume fraction of model with flow control scheme (a) flow rate $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$ and (b) flow rate $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$

4 应用效果

为了验证 $8^\#$ 中间包控流装置的合理性,在特钢厂进行了生产试验。分别应用 $5^\#$ 和 $8^\#$ 中间包控流装置,两种浇注试验方案见表 7,钢包和中间包容量分别为 200 t 和 50 t,浇注钢号为 SPHD,SPHD 成分见表 8。生产试验过程中,分别在 2 种控流装置的

浇注区取提桶样,并用钢样电解法检验分析夹杂物粒径大小和总量,表 9 为两种控流装置下钢样电解结果。由夹杂物的控制水平来看, $8^\#$ 控流方案下,钢水中不存在大于 $300 \mu\text{m}$ 的夹杂物,且夹杂物总量由 $3.75 \text{ mg}/10 \text{ kg}$ 降低到 $2.51 \text{ mg}/10 \text{ kg}$,中间包控流方案作用明显。

表 7 50 t 中间包两种浇注试验方案

Table 7 Two pouring test schemes for 50 t tundish

控流方案	长水口和堰距离/mm	挡墙挡坝距离/mm	挡坝高度/mm	长水口插入深度/mm	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
5 [#]	760	320	360	100	40
8 [#]	760	320	540	100	40

表 8 SPHD 钢化学成分 /%

Table 8 Chemical composition of steel SPHD /%

C	Mn	S	P	Si	Als	Alt	N	Ti	Nb
0.017	0.125	0.007	0.014	0.005	0.043	0.045	0.002 6	0.001 1	0.001

表 9 50 t 钢包两种控流方案下钢样电解结果

Table 9 Steel sample electrolysis results of 50 t tundish with two kinds of current control schemes

控流方案	原样重/kg	剩余样重/kg	电解样重/kg	夹杂物总量		不同夹杂物粒径分级 /mg			
				mg	mg/10 kg	<80 μm	80 ~ 140 μm	140 ~ 300 μm	>300 μm
5 [#]	2.78	0.38	2.4	0.9	3.75	0.1	0.4	0.3	0.1
8 [#]	3.42	0.63	2.79	0.7	2.51	0.1	0.3	0.3	—

5 结论

(1) 当长水口与堰距离由 190 mm 增加到 390 mm 时,平均停留时间由 271.28 s 减为 256.48 s,而死区体积分数由 22.79% 增加到 27.01%,即长水口与堰距离为 190 mm 时中间包流场更加合理;当响应时间更小时,中间包死区体积反而更大。

(2) 当坝高由 90 mm 增加到 135 mm 时,平均停留时间由 241.64 s 增至 251.61 s,而死区体积分数由 44.87% 降低为 42.6%,相比较而言,坝高 135 mm 比坝高 90 mm 时中间包流场更加合理。

(3) 当流量在 $1.09 \text{ m}^3/\text{h}$,长水口插入深度在 25、50、75 mm 时,平均停留时间由大到小的是控流方案 $8^{\#} > 5^{\#} > 6^{\#}$,而死区体积由小到大的的是控流方案 $8^{\#} < 5^{\#} < 6^{\#}$;而当流量在 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$,长水口插入深度在 25、50 mm 时,平均停留时间最大且死区体积最小的控流方案是 $8^{\#}$ 。

(4) 当中间包的平均停留时间越大时,中间包的死区体积越小,流量越大时,平均停留时间越大,而中间包死区体积越小。

(5) 通过对比各方案与工艺参数条件下的中间包停留时间和死区体积,选取最优的中间包工艺参

数为:控流方案 $8^{\#}$ 、流量 $1.24 \text{ m}^3/\text{h}$ 、长水口插入深度 25 mm。通过现场试验验证, $8^{\#}$ 控流方案可减小夹杂物 $1.24 \text{ mg}/10 \text{ kg}$,去除夹杂物作用显著。

参考文献

- [1] 王建烟,包燕平,曲英.中间包冶金学[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [2] 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.
- [3] 林路,李翔,包燕平.单流中间包结构优化及工业试验[J].炼钢,2017,33(6):36-42.
- [4] 张海鹰.单流板坯连铸中间包内流动行为的数学物理模拟研究[D].沈阳:东北大学,2013.
- [5] 邹涛,康旭,屈乐欣,等.单流中间包控流装置优化的水模型试验与应用[J].炼钢,2019,35(5):43-49.
- [6] 钟巍,赵丹婷,帅勇,等.两流板坯连铸 58 t 中间包过滤器水模型试验和应用[J].特殊钢,2018,39(2):13-16.
- [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.
- [8] 赵丹婷,刘爱强,仇圣桃,等.不同流量下单流中间包水力学模拟试验[J].铸造技术,2016(8):1693-1697.

姜学锋(1973-),男,高级工程师,1995 年包头钢铁学院(本科)毕业,板材炼钢工艺研究。E-mail: Jxfeng925@126.com

收稿日期:2021-05-25