

· 试验研究 ·

基于水力学模拟试验的3流连铸20 t中间包结构优化研究

杨凌志¹ 朱荣¹ 李超¹ 林腾昌¹ 吴兵² 梁建国²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083;2 莱芜钢铁股份有限公司特殊钢厂,莱芜 271104)

摘要 采用几何相似比1:2.5的水模型试验研究了带有一字型挡墙,矩形导流孔,水平无倾角的原型中间包以及V形挡墙,倾角0°~40° Φ80~Φ120 mm圆形导流孔,并加抑制器的改进结构的流场,得出V字型挡墙+30°倾角和直径Φ80 mm导流孔+深盘带唇缘型湍流抑制器的改进中间包结构最优,可延长钢液在中间包内的停留时间,死区体积从原中间包的48.16%~63.06%降至10.3%~10.9%,有利于夹杂物的快速上浮。

关键词 20 t中间包 流场模拟 停留时间分布曲线 湍流抑制器 结构优化

A Study on Optimization of a 20 t Tundish Structure for 3-Strands Casting Based on Hydraulic Simulated Test

Yang Lingzhi¹, Zhu Rong¹, Li Chao¹, Lin Tengchang¹, Wu Bing² and Liang Jianguo²

(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Special Steel Works, Laiwu Iron and Steel Co Ltd, Laiwu 271104)

Abstract The flow field in original tundish with single-line type retaining wall, rectangular guide-flow-hole and level-no dip angle and in improved tundish with V-type retaining wall, Φ80~Φ120 mm round guide-flow-hole and dip angle 0°~40°, and adding turbulence inhibitor has been tested and studied by using geometric similarity 1:2.5 water model. It is obtained that the structure of improved tundish with V-type retaining wall +30° angle and diameter Φ80 mm guide-flow-hole + deep disc-lip type edge turbulence inhibitor is optimal, it may prolong the residence time of liquid in tundish and the percentage of dead zone volume of liquid decreases to 10.3%~10.9% from 48.16%~63.06% in original tundish, and is in favor of inclusions in liquid to quick floating off.

Material Index 20 t Tundish, Simulation of Flow Field, Residence Time Distribution Curves, Turbulence Inhibitor, Optimization of Structure

在实际生产过程中,由于中间包流场效果不佳,钢水由钢包到中间包水口的行程较短,使得大型夹杂物上浮效果差^[1-3]。水力学模型实验属于物理模拟(Physical Modeling)实验。物理模拟是通过物理模型和借助于必要的测试手段对真实的物理过程进行模拟并观测的研究方法^[4-5]。其具体方法是先利用相似原理建立物理模型,而后利用易于达到的实验条件对复杂生产过程中的关键特征进行模拟。国内外许多厂家和科研机构都对钢铁生产过程进行了物理模拟试验^[6-8]。本文针对这一问题通过水力学模型实验对中间包流场进行优化,提高中间包内钢液的混匀效果与提高大型夹杂物在中间包内的去除效率。

1 莱钢中间包流场研究实验原理与方法

本文以莱钢特钢厂连铸中间包为研究对象,建立中间包钢液流动的水力学模型,通过水力学模拟实验,得到优化的中间包结构优化参数,从而优化中间包钢液的流场。

水模型是根据相似原理,以弗鲁德准数 Fr 相等^[9]为基础进行模拟研究。水模型与实际中间包

相关参数的关系如下:

$$\lambda = L_m/L_p \quad (1)$$

$$\nu_m/\nu_p = \lambda^{0.5} \quad (2)$$

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_p \quad (3)$$

式中: L_m -模型尺寸; L_p -实际实物尺寸; ν_m -模型内流体速度; ν_p -实际实物内流体速度; Q_m -模型内流体体积流量; Q_p -实际实物内流体体积流量; λ -模型与实际实物的相似比。

莱钢特钢厂连铸中间包正常液面750 mm,钢水量19.4 t;溢出液面850 mm,钢水量22 t;连铸流为三流;原型中间包设置了一字型挡墙(导流板),导流孔为矩形,水平无倾角,向左右各倾斜17°。

对常使用的180 mm×220 mm与260 mm×300 mm两个断面进行中间包流场分析研究。本实验采用几何相似比 λ 为1:2.5,根据公式(3),原型与模型流量参数确定详见表1。

实验在长水口处脉冲加入一定量的饱和KCl溶液作为示踪剂,从得出的停留时间分布(RTD)曲线可以直接得到从加入示踪剂到示踪剂流至中间包水

表 1 180 mm × 220 mm 和 260 mm × 300 mm 铸坯原型与模型中间包流量参数

Table 1 Flow rate parameters of prototype and simulation tundish for casting 180 mm × 220 mm and 260 mm × 300 mm blooms

拉速/ (m · min ⁻¹)	180 mm × 220 mm		260 mm × 300 mm	
	原型/ (m ³ · min ⁻¹)	模型/ (L · min ⁻¹)	原型/ (m ³ · min ⁻¹)	模型/ (L · min ⁻¹)
0.50	0.019 80	2.0	0.039 0	3.9
0.60	0.023 76	2.4	0.046 8	4.7
0.65	0.025 74	2.6	0.050 7	5.1
0.70	0.027 72	2.8	0.054 6	5.5
0.80	0.031 68	3.2	0.062 4	6.3

口(边部水口为 1[#]、中部水口为 2[#])时的最短停留时间示踪剂浓度达到最大时的峰值,从而得出分散活塞流体积、死区体积和完全混合流体积^[10]。

为了使中间包能够最大限度地去掉钢液中的夹杂物,且使中间包内的温度更加均匀、合理的中间包内流体的流动形式为:(1)最小的死区比例,即 V_d 最小;(2)最大的活塞区比例,即 V_p 最大;(3)具有一定指向表面的流动;(4)包含有一定的混合区。

2 实验设计与结果分析

本研究的设计主要为:

(1)第一阶段中间包原型的研究,在这一阶段对原型中间包进行了研究,得出了 RTD 曲线进而计算出流场中活塞区、全混区和死区比例;

(2)第二阶段的探索研究,这个阶段的实验是在三流中间包原型的基础上,通过改变挡墙形式、挡墙孔洞倾角等手段来考察中间包结构的好坏;

(3)第三阶段优化阶段,在第二阶段中挑出好的方案,再加上湍流抑制器来优化中间包结构。

具体实验方案如表 2 所示。

2.1 原中间包实验结果与分析

从 RTD 曲线(图 1)可以看出,两个水口的 RTD 曲线都不理想,主要存在的问题是滞止时间和峰值时间短、曲线陡而峰尖,其中 1[#]水口还出现了类似于双峰的趋势。RTD 曲线出现双峰意味着中间包存在旁路击穿流;滞止时间和峰值时间短意味着中间包内存在短路流(或称为贯穿流);曲线陡而峰尖说明从钢包新流入的钢液没有和中间包内钢液进行有效的充分混合即流出中间包。汇总的原型中间包混合模型计算

表 2 实验方案

Table 2 Test scheme for water simulation

方案号	挡墙	倾角/°	导流孔直径/mm
1(原型中间包)	一字型导板	无倾角	矩形
2	V 字型	0	80
3	V 字型	0	100
4	V 字型	0	120
5	V 字型	5	80
6	V 字型	5	100
7	V 字型	5	120
8	V 字型	10	80
9	V 字型	10	100
10	V 字型	10	120
11	V 字型	20	80
12	V 字型	20	100
13	V 字型	20	120
14	V 字型	30	80
15	V 字型	30	100
16	V 字型	30	120
17	V 字型	40	80
18	V 字型	40	100
19	V 字型	40	120
20	2~19 最优 + 浅盘抑制器		
21	2~19 最优 + 深盘抑制器		
22	2~19 最优 + 深盘带唇缘抑制器		

结果如表 3 所示。

从表 3 中的具体实验数据分析,原型中间包存在如下缺陷:

(1)各水口滞止时间普遍较短,2[#]水口的滞止时间最短,260 mm × 300 mm 断面时最短仅有 17 s,即从示踪剂加入到从水口检测到信号的间隔很短只有 17 s,形成了近似的短路流,这就会使一部分钢包中新流入的钢液在中间包内停留时间很短就从水口流出,导致钢水中的夹杂物来不及上浮,伴随的钢水混合不均匀,通过水口的钢液温度高,严重侵蚀塞棒和水口;

(2)两水口之间滞止时间相差较大,1[#]水口(边部水口)和 2[#]水口(中部水口)的滞止时间有的相差

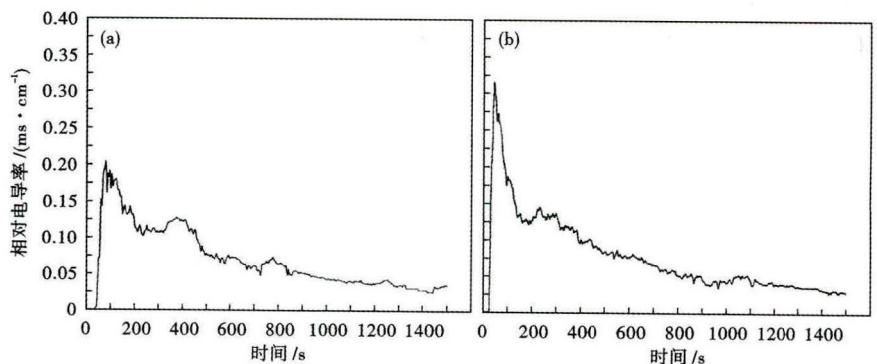


图 1 中间包原型边部水口(a)和中部水口(b)停留时间分布曲线

Fig. 1 Residence time distribution curves of original tundish at edge nozzle (a) and middle nozzle (b)

10 ~ 20 s,这就造成了两流之间的钢水流动状态差别很大,导致铸坯质量存在较大差距;

(3)两流水口的实际平均停留时间均较小,死区比例大,在不同拉速时达到 35% ~ 65%,这说明钢液未经与周围钢液的大范围混合就直接奔向水口,不利于钢液温度和成分的均匀以及夹杂物的上浮去除。

2.2 中间包优化挡渣墙及其孔洞倾角分析研究

V 字挡墙上同样设有孔洞,每个边上设有相互对称的两个孔洞,角度为水平向上 0°、5°、10°、20°、30°、40°。如表 4 所示(只列出 30°最优结果)。

结合 RTD 曲线和混合模型计算结果综合分析,导流孔向上角度 30°时,RTD 曲线趋于平缓,尖峰基本消除,而且滞止时间均匀性提高,峰值时间也大幅度增加,说明钢液从钢包水口出来后经过很长时间才到达中间包水口,间接说明了钢液在中间包内停留时间长;分析混合模型计算结果,活塞区稳定且较大,基本达到了 5%,由于平均停留时间的增加(都超过 1 000 s)死区体积控制到了 20% 左右,基本达到了目标,全混区波动在 70% ~ 80%,全混区达到了足够的水平,得出这个方案是最佳的方案。

表 4 分析发现对不同导流孔半径而言,活塞区体积之间没有明显差异,基本维持在 4% ~ 5%;重点分析死区体积,发现导流孔半径为 $\Phi 120$ mm 时,死区体积不仅高于上两种方案,而且两水口之间也有较明显的差异,因此得出此方案不是最优结构。对于 $\Phi 80$ mm 和 $\Phi 100$ mm 两种方案,由表 4 可以发现 $\Phi 80$ mm 方案的平均死区体积相对小些,而 $\Phi 100$ mm 方案的平均死区体积在两个水口之间差异最小,所以可以根据现场实际生产条件(拉速,

表 3 原型中间包混合模型计算结果
Table 3 Calculated results of mixture model for original tundish

断面/ (mm × mm)	拉速/ (m · min ⁻¹)	水口	滞止时 间/s	峰值时 间/s	平均停留 时间/s	理论停留 时间/s	中间包流动模式组成/%		
							活塞区	死区	全混区
180 × 220	0.50	1	75	135	762	1 800	4.17	57.67	38.17
		2	52	89	665	1 800	2.89	63.06	34.06
	0.60	1	62	126	725	1 500	4.13	51.67	44.20
		2	51	110	668	1 500	3.40	55.47	41.13
	0.65	1	55	116	598	1 385	3.97	56.82	39.21
		2	34	77	557	1 385	2.45	59.78	37.76
0.70	1	50	96	600	1 286	3.89	53.34	42.77	
	2	46	79	586	1 286	3.58	54.43	41.99	
260 × 300	0.80	1	43	74	567	1 125	3.82	49.60	46.58
		2	24	43	521	1 125	2.13	53.69	44.18
	0.50	1	35	90	400	923	3.79	56.66	39.54
		2	24	86	365	923	2.60	60.46	36.94
	0.60	1	30	85	368	766	3.92	51.96	44.13
		2	26	76	356	766	3.39	53.52	43.08
0.65	1	29	82	351	706	4.11	50.28	45.61	
	2	25	71	323	706	3.54	54.25	42.21	
0.70	1	21	72	296	655	3.21	54.81	41.98	
	2	20	64	285	655	3.05	56.49	40.46	
0.80	1	19	61	275	571	3.33	48.16	48.51	
	2	17	58	247	571	2.98	50.09	46.94	

表 4 改进的倾角 30°导流孔混合模型计算结果
Table 4 Calculated results of improved mixture model with 30° angle guide-flow-hole

导流孔		拉速/ (m · min ⁻¹)	水口	滞止时 间/s	峰值时 间/s	平均停留 时间/s	理论停留 时间/s	中间包流动模式组成/%		
直径/mm	倾角/°							活塞区	死区	全混区
80	30	0.65	1	67	147	1 120	1 385	4.8	19.1	76.0
			2	68	205	1 176	1 385	4.9	15.1	80.0
100	30	0.65	1	64	206	1 095	1 385	4.6	20.9	74.4
			2	67	104	1 112	1 385	4.8	19.7	75.5
120	30	0.65	1	63	157	1 048	1 385	4.6	24.3	71.1
			2	65	248	1 087	1 385	4.7	21.5	73.8

表 5 改进的倾角 30°和直径 80 mm 导流孔 + 抑制器试验混合模型计算结果
Table 5 Calculated results of improved mixture model with 30° angle and diameter $\Phi 80$ mm guide-flow-hole + turbulence inhibitor

方案	拉速/ (m · min ⁻¹)	水口	滞止时 间/s	峰值时 间/s	平均停留 时间/s	理论停留 时间/s	中间包流动模式组成/%		
							活塞区	死区	全混区
浅盘抑制器	0.65	1	80	165	1 142	1 385	5.8	17.6	76.7
		2	81	168	1 126	1 385	5.9	18.7	75.5
深盘抑制器	0.65	1	93	200	1 183	1 385	6.7	14.6	78.7
		2	95	199	1 166	1 385	6.9	15.8	77.3
深盘带唇缘抑制器	0.65	1	99	203	1 234	1 385	7.2	10.9	82.0
		2	96	205	1 242	1 385	6.9	10.3	82.7

冶炼钢种,钢水温度等)选择导流孔半径,导流孔半径为 $\Phi 80$ mm 为最优方案。

2.3 结合湍流抑制器的中间包结构优化研究

根据以上的优化结果,选定 V 字型导流板,导流孔角度向上 30°,导流孔半径为 $\Phi 80$ mm 并配合不同的湍流抑制器。

方案 20 到方案 22 依次为二阶段最优方案配合

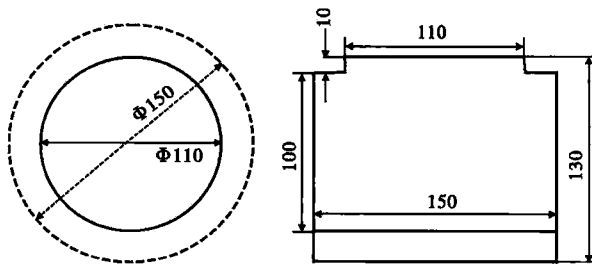


图 2 深盘带唇缘型抑制器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deep disc-lip type edge turbulence inhibitor

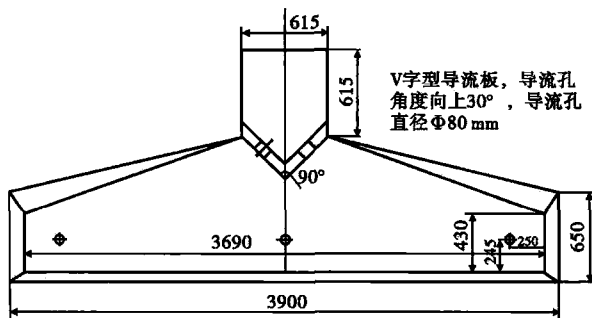


图 3 最优方案的中间包结构简图

Fig. 3 Schematics of tundish structure of optimal scheme

浅盘抑制器、深盘抑制器、深盘带唇缘抑制器(如图 2)。实验是在 0.65 m/s 的拉速, 180 mm × 220 mm 断面下进行的, 混合模型计算结果见表 5。

分析此阶段的 RTD 曲线, 可以发现在配合上湍流抑制器以后, 曲线的滞止时间和峰值时间都有所增加, 说明钢液在中间包内得到了良好的混合, 从钢包中新流入的钢液得到充分的分配, 夹杂物得到了更好的上浮, 使水口和塞棒不至受到过热钢液的冲刷; 而且分别观察每组方案的边部水口和中部水口两条曲线的趋势更加趋于一致, 这就使得两流铸坯的质量相似或相同, 不会有较大的铸坯质量差异; 分

析表 5 发现死区体积都控制在了 20% 以内, 通过比较 3 个湍流抑制器的冶金效果发现深盘带唇缘型抑制器对湍流有更好的抑制, 死区体积控制的更小, 故选择深盘带唇缘型抑制器为最佳。

通过以上分析研究, 第二阶段最优方案 14 (选定 V 字型导流板, 导流孔角度向上 30°, 导流孔半径为 $\Phi 80$ mm) 配合深盘型湍流抑制器(方案 22)为最优的中间包结构(如图 3)。

3 结论

(1) 原型中间包存在以下缺点: 中间包水口滞止时间较短, 中间包内存在较严重的击穿流, 从钢包中新流入的钢液还未混合均匀就流出; 两流水口的滞止时间和峰值时间相差较大, 造成两流钢液的成分、温度不均匀, 钢坯质量存在较大差异; 死区比例大, 实际平均停留时间短, 钢液在中间包中不能充分的混合便流出水口, 不利于钢液的混匀和夹杂物上浮。

(2) 在三流中间包原型的基础上, 通过改变挡墙形式、导流孔角度、导流孔尺寸等手段对中间包结构进行优化, 试验后发现采用 V 字型挡墙 + 30° 导流孔 + 导流孔直径 $\Phi 80$ mm 的方案(方案 14)为不加设湍流抑制器的最佳方案, 此方案下, 冲击区体积变大, 钢液混合均匀, 两流水口的滞止时间和峰值时间也趋于一致, 滞止时间得到了延长。

(3) 通过第二阶段最优方案和湍流抑制器的配合, 得到了实验的最终最佳方案即 V 字型挡墙 + 30° 导流孔 + 导流孔直径 $\Phi 80$ mm + 深盘带唇缘型湍流抑制器, 该方案增加了钢液在冲击区内的混匀时间, 同时延长了钢液在中间包内的停留时间, 滞止时间和峰值时间提高同时差异性进一步降低, 死区体积减小, 钢水的温度和成分更加均匀, 为夹杂物的上浮排除提供了更加有利的条件。

参考文献

- [1] 陈俊俊, 武文斐, 任雁秋, 等. T 型五流非对称连铸中间包内控流装置优化的水模拟实验[J]. 铸造技术, 2006, 27(7): 719-722.
- [2] 夏文勇, 刘建华, 赖朝彬, 等. 新钢板坯连铸中间包采用控流槽的水模拟实验[J]. 钢铁研究, 2007, 35(2): 4-7.
- [3] 唐海燕, 李京社, 于 满, 等. 四流中间包气幕挡墙水模拟研究[J]. 特殊钢, 2010, 31(4): 1-3.
- [4] Knoepke J, Mastervich J. Water Modeling Inland Steel's No. 3 Combination Caster Tundish [A]. Steelmaking Conference Proceedings [C]. ISS-AIME, 1986: 777-788.
- [5] 王舒黎. 钢铁冶金模拟实验研究方法[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 2000: 133-152.
- [6] 雷泽龙. 韶钢 120 t 复吹转炉吹炼工艺优化水模试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(1): 1-8.
- [7] 梁福斌, 果晶晶, 陈 健. 50 t 顶底复吹转炉的水力学模型试验研究[J]. 铸造技术, 2008, 29(7): 877-878.
- [8] 李连福, 姜茂发. 底吹电弧炉熔池混合特性的模拟研究[J]. 钢铁研究, 1996, 24(3): 3-6.
- [9] 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.
- [10] Tang Haiyan, Li Jingshe, Gao Jinguo, et al. Effect of Flow Control Devices of Tundish on Cleanliness of Billets[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2008, 15(Suppl): 499-504.

杨凌志(1987-), 男, 博士研究生(北京科技大学), 2009 年北京科技大学(本科)毕业, 炼钢工艺研究。

E-mail: Yanglingzhi@163.com

收稿日期: 2014-06-25