

· 试验研究 ·

特殊非对称型 12 流 35 t 中间包的水模拟试验和控流装置的优化

茅晓慧 李京社 张江山 李杏林 黄远胜
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 通过几何相似比1:3的水模型试验分析了钢厂特殊非对称型 12 流 200 mm × 285 mm 铸坯的 35 t 中间包的结构特点,得出原中间包不对称度较大,结构不合理,整体混匀效果和各流的一致性较差,需要设计有效的控流装置以改善其内部流动。水模拟结果表明,通过所设计的相对较大的冲击区和两个导流孔的优化方案,使得中间包的整体混匀效果和各流一致性都得到明显改善,其总体死区比例相对原型的 27.96% 降至 8.94%;其各流平均停留时间的标准差降低 74%。

关键词 特殊非对称型 12 流 35 t 中间包 优化控流装置 各流一致性 水模拟

Water Modelling Test of a Special Asymmetrical 12 strand 35 t Tundish and Optimization of Flow Control Device

Mao Xiaohui, Li Jingshe, Zhang Jiangshan, Li Xinglin and Huang Yuansheng
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The structure characteristics of a special asymmetrical 12 strand 200 mm × 285 mm bloom 35 t tundish at steel works have been analyzed by geometric similarity 1:3 water model test, it is obtained that the nonsymmetrical degree and structure of original tundish are larger and unreasonable led to poor consistent in each strand and relatively poor whole body mixing effect, so the effect control flow device should be designed to improve its internal liquid flow. Water modelling test results show that by using the designed optimum scheme with relative larger impact region and two guide flow hole, the whole body mixing effect of tundish and consistence of each strand improve obviously, as compared with original tundish its total dead region ratio decreases from original 27.96% to 8.94% and the standard deviation of mean residence time of each strand decreases by 74%.

Material Index Special Asymmetrical Type, 12 Strand 35 t Tundish, Optimizing Flow Control Device, Consistence of Each Strand, Water Modelling

在对多流中间包结构进行设计和优化过程中,要考虑改善其内部钢液的混匀状况,减小死区比例;也要考虑使得钢液成分及温度在各流出口处尽可能保持一致,这些是保证连铸生产顺利进行和提高铸坯质量的重要方面^[1]。根据中间包各流出口和入水口之间的几何分布距离,中间包可分为完全对称、一般非对称、特殊非对称型中间包^[2]。钢厂使用一种特殊非对称型的 12 流(国内流数最多)35 t 中间包生产断面为 200 mm × 285 mm 的矩形坯,在生产过程中,出现中间包钢液混匀不佳,中间流和边部流温差较大的现象,影响了连铸生产。通过水模拟的实验设计了新的控流装置以此来优化其内部流动方式和提高其冶金效果。

1 实验原理和方法

水模拟^[3,4]实验的几何相似比为1:3,12流中间包由两个独立、对称放置的6流中间包组成,故而只研究其一半的6流中间包就可以达到研究目的,其结构示意图如图1(a)所示。有关的原型和模型中

间包参数如表1所示。

水模拟实验设备如图2所示。实验过程中,当钢包和中间包内的液面都稳定并达到目标流量后,将 75 mL 的饱和 KCl 溶液以脉冲的方式从长水口加入。同时,通过 DJ800 和电极测定各出口处的电

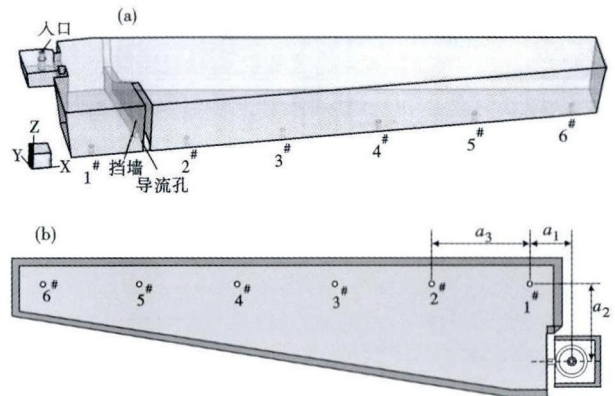


图1 (a)原型中间包结构;(b)水口位置[式(9)]
Fig. 1 Schematics of structure (a) and location of nozzle [formula (9)] (b) of prototype tundish

表 1 中间包原型和模型的实验参数
Table 1 Experimental parameters of prototype and model tundish

项目	原型	模型
流体类型	钢液	水
容量/t	35	-
液面高度/mm	700.00	233.33
长水口浸入深度/mm	210.00	70.00
长水口内外径/mm	65.00/131.00	21.70/43.70
出水口内径/mm	60.00	20.00
各流体积流量/(m ³ ·h ⁻¹)	2.89	0.19
两流流间距/mm	1 200.00	400.00

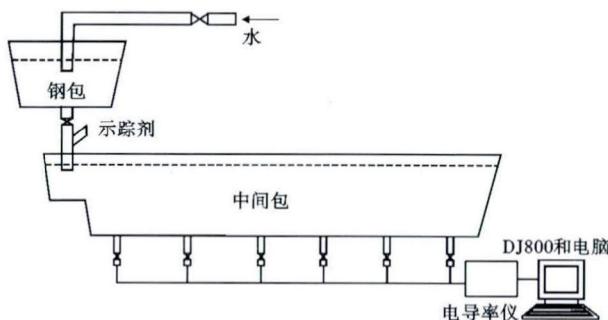


图 2 水模拟实验设备示意图
Fig. 2 Schematics of water modelling test device

导率值随时间的变化(每组实验重复做两次,取平均值进行分析)。然后,将测得的电导率值转换为 KCl 的浓度,从而得到无量纲浓度与无量纲时间的停留时间分布(RTD)曲线。其中,低浓度下 KCl 溶液浓度 C_{KCl} 与电导率呈正比,但因具体水质的不同而有所区别,本次实验拟合的两者之间的关系图和关系式如图 3 和公式(1)所示。

$$\gamma_{电导率} = 1.601 \times C_{KCl} + 0.554 \quad (1)$$

获得 RTD 曲线后,实验采用总体 RTD 曲线^[5]的分析方法来计算死区比例,活塞区比例和全混区比例。首先计算各流的无量纲平均浓度 \bar{C} :

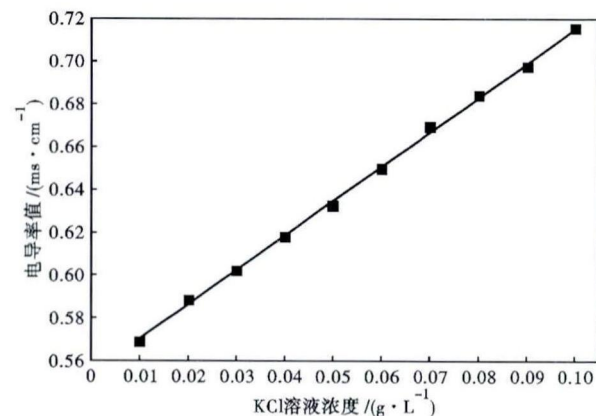


图 3 KCl 溶液浓度对电导率值的影响
Fig. 3 Effect of KCl solution concentration on conductivity value

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (2)$$

式中: $n=6, i=1 \sim 6$ 。

$$\text{平均停留时间计算式为: } \bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} \bar{C} t dt}{\int_0^{\infty} \bar{C} dt} \quad (3)$$

$$\text{总体死区比例: } V_d = 1 - \frac{\bar{t}}{t_0} \quad (4)$$

$$t_0 = \frac{V_{\text{model-tundish}}}{V_{\text{outflow-rate}}} \quad (5)$$

式中: t_0 - 理论平均停留时间; $V_{\text{model-tundish}}$ - 模型中水的体积; $V_{\text{outflow-rate}}$ - 总的流量。

$$\text{总体活塞区比例: } V_p = \frac{t_{\min} + t_{\max}}{2 t_0} \quad (6)$$

$$\text{全混区比例 } V_m: V_m = 1 - V_d - V_p \quad (7)$$

用各流的平均停留时间的标准差 S 来衡量各流的一致性: $S = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (t_i - \bar{t}_i)^2}$ (8)

2 原型中间包结构分析

非对称度的概念可以用来评估各流出口到入口的不同距离,从而反映中间包各流在结构上的对称程度^[2]。该中间包的结构属于特殊非对称型的,其非对称度 Y 计算如公式(9)所示。

$$Y = 1 - \frac{\sqrt{a_2^2 + a_1^2}}{\sqrt{a_2^2 + (5a_3 + a_1)^2}} \quad (9)$$

式中:各符号的含义如图 1(b) 所示, Y 的取值范围为 $0 \sim 1$, Y 值越小则对称度越好。经计算,该式的 $Y=0.83$,说明中间包的对称度较差。因为,中间包结构较为细长,长宽比达到了 $4:1$ 左右,近水流和边部流与入口的距离差别明显。

由图 4 可见,与入水口较近的 1[#] 和 2[#] 水口的 RTD 曲线很陡峭,峰值的无量纲浓度较大,甚至达到十几;这两个水口感应到示踪剂后,浓度几乎呈直线上升,然后又以较快的速度下降。同时,距离入水口较远的 5[#] 和 6[#] 水口的 RTD 曲线则表明,新流入的示踪剂只有很小一部分能流到边部流,中间包的整体混匀效果不佳。在实际生产中,这样会导致新流入的钢液不能和中间包内(尤其是边部流的钢液)充分混匀,造成各流成分和温度差别较大。中间流温度较高,而边部流温度较低甚至出现冷钢的现象。

由表 2 可以看出,原型中间包各流的平均停留时间差别较大,6[#] 出口的平均停留时间是 1[#] 水口的

将近3倍,各流平均停留时间的标准差为193.4,各流的一致性较差。另外,原型中间包的总体死区比例(V_d)为27.96%,中间包整体混匀不充分。

原型中间包凸台式的冲击区开口较大,钢液从冲击区流出后,向前的流动冲击速度较小,挡墙也没有起到相应的控流作用。这样,新流入的钢液主要集中在距离入口较近的区域,不能与中间包内其他的流体充分地混匀。同时,原型中间包的长水口冲击区(简称冲击区)体积较小,只占中间包总体积的约1%,钢液湍流较为剧烈,很容易造成液面波动以及耐火材料的冲刷和破损。

3 优化方案描述和实验结果分析

设计了两套优化方案:

方案1的形状结构如图5(a)所示。该方案设计了凹形的湍流抑制器,同时扩大了冲击区的体积以抑制冲击区的湍流运动;另外,在冲击区挡板上开设了一个圆形导流孔,从而增加钢液从冲击区流出后向边部流的冲击力,来更好地混匀其内部流体。根据淹没出流理论^[6],流体经导流墙上的孔的流量与孔的截面积和导流墙两边液位差的平方根成正比,而与孔的位置无关。因此,从流量、钢液面深度、开浇时浇注区与冲击区的液位差和浇完时的残钢量等多方面考虑,导流孔的直径设为120 mm,距离中间包底面450 mm。

方案2的结构示意图如图5(b)所示,冲击区向中间包内部延伸,同时在两侧开两个导流孔;A孔和B孔。考虑到导流孔型控流装置的流动特点,B孔直径设定为120 mm,距离底面400 mm,以增加其对整个中间包的冲击强度;A孔直径设定为90 mm,距离底面100 mm,上扬30°,上扬的角度是为了减轻钢液对包壁的过度冲刷,同时促进夹杂物的上浮去除。

由图6可以看出,相对原型中间包,方案1的各流RTD曲线和总体RTD曲线变的相对平滑,无量纲峰值浓度由原型的14降到了3.7左右,降幅明显。同时,各流RTD曲线的形状相对原型中间包变得相对一致,边部流水口能较多地接收到加入的

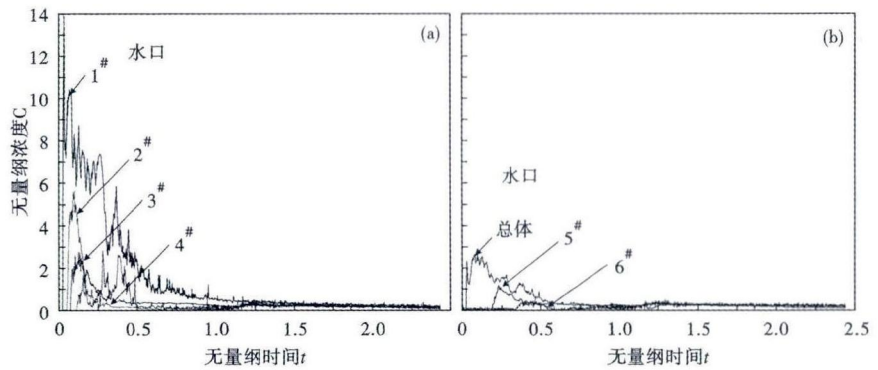


图4 原型中间包停留时间分布(RTD)曲线:(a)1~4水口;(b)5,6水口和总体
Fig.4 Residence time distribution curves of prototype tundish: (a) 1~4 nozzle, (b) 5 and 6 nozzle and total

表2 原型中间包RTD分析结果
Table 2 RTD analysis results of prototype tundish

t_i/s						总体 RTD/%			S	t_0/s
1#	2#	3#	4#	5#	6#	V_d	V_p	V_m		
317.0	378.0	564.0	630.0	683.0	898.0	27.96	5.10	66.94	193.4	655.5

表3 优化方案1和2的RTD分析结果

Table 3 RTD analysis results of optimum scheme 1 and 2

优化方案	t_i/s						总体 RTD/%			S	t_0/s
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	V_d	V_p	V_m		
1	630	569	557	709	700	735	11.07	7.86	81.07	69.2	655.5
2	639	643	709	701	734	786	8.94	14.80	76.26	51.0	655.5

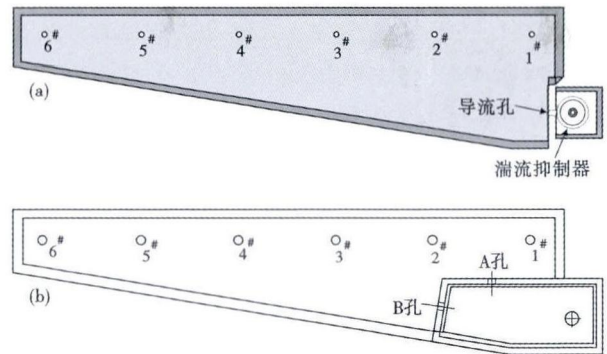


图5 优化方案1(a)和方案2(b)中间包结构示意图
Fig.5 Schematics of tundish structure of optimum scheme 1 (a) and scheme 2 (b)

KCl溶液,各流的一致性得到了改善。

从表3可以看出,相对原型中间包,方案1的总体死区比例由27.96%降到了11.07%,各流平均停留时间的标准差由193.4降到了69.2。因此,采用方案1后,圆形导流孔起到了提高中间包的混匀程度和改善各流一致性作用。但由于中间包的结构较为细长,冲击区的空间和导流孔的冲击作用不足,方

案 1 的优化效果比较有限。

由图 7 可以看出,相对原型方案和方案 1,方案 2 的各流 RTD 曲线和总体 RTD 曲线变得更为平滑,无量纲峰值浓度不到 1.6;同时,各边部流的 RTD 曲线变化明显,6 个流的 RTD 曲线趋向于更加一致。RTD 曲线计算的各区比例结果如表 3 所示,总体死区比例为 8.94%,相对原型 27.96% 降幅为 68%;平均停留时间的标准差 S 为 51.0,相对原型 193.4 降幅 74%。因此,优化方案 2 在中间包整体混匀效果和各流一致性方面都达到了较好的效果。

综合比较两个优化方案,方案 2 明显扩大了冲击区的有效体积,一方面使得新流入的钢液在冲击区内充分混匀,然后通过两个导流孔分流有效地混匀了中间包内部的钢液,尤其使得细长的中间包的边部流钢液得到有效更新,这样可以提高各流钢液成分和温度的一致性,有利于连铸生产的操作;另一方面,方案 2 的有效冲击区体积占总体积 15% 左右,可以有效减小冲击区的液面波动和钢液对耐火材料的过度冲刷,相比于方案 1 的结构更有优势。

4 结论

(1) 原型中间包较为细长,属于特殊非对称性中间包;中间包各流出口到入口的距离差别较大,不对称度为 0.83,其结构存在较明显的不合理性,整体混匀效果和各流的一致性都较差,需要设计有效的控流装置来改善其内部流动。

(2) 方案 1 通过设计湍流抑制器和导流孔,一定程度上优化了中间包的流动方式。但由于中间包的结构较为细长,冲击区的体积仍较小,导流孔的冲击作用不足,方案 1 的优化效果比较有限。

(3) 方案 2 设计了体积相对较大的冲击区和两个导流孔,使得中间包的整体混匀效果和各流一致性都得到明显改善;方案 2 总体死区比例相对原型的 27.96% 降至 8.94%,降幅为 68%;其各流平均停留时间的标准差 S 相对原型的 193.4 降至 51.0,降

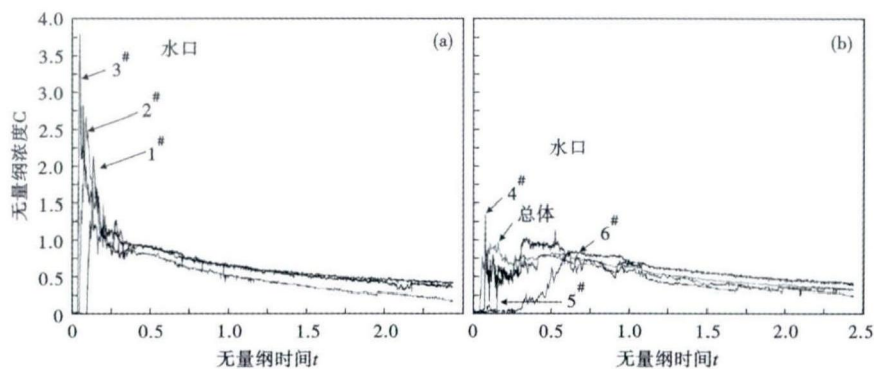


图 6 优化方案 1 停留时间分布 (RTD) 曲线:(a) 1~3 水口;(b) 4~6 水口和总体
Fig. 6 Residence time distribution curves of optimum scheme 1: (a) 1~3 nozzle, (b) 4~6 nozzle and total

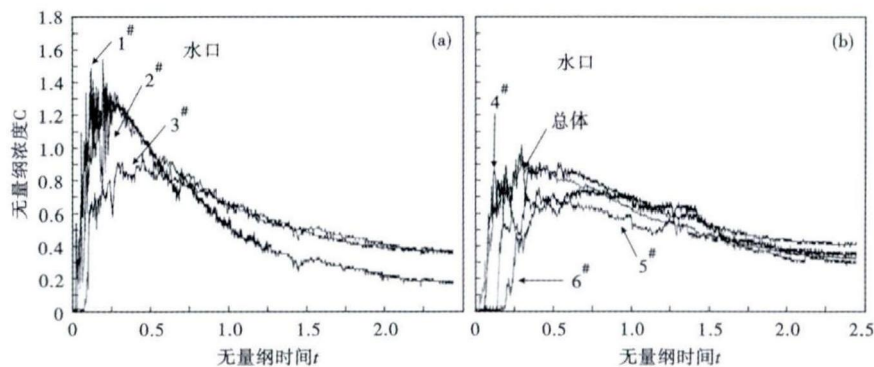


图 7 优化方案 2 停留时间分布 (RTD) 曲线:(a) 1~3 水口;(b) 4~6 水口和总体
Fig. 7 Residence time distribution curves of optimum scheme 2: (a) 1~3 nozzle, (b) 4~6 nozzle and total

幅为 74%,方案 2 为所研究的最优方案。

国家自然科学基金资助项目 No(51074021)

参考文献

- [1] Morales R D, Palafox-Ramos J, Barreto J J, et al. Melt Flow Control in a Multistrand Tundish Using a Turbulence Inhibitor[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31(6): 1505-1515.
- [2] 于学斌, 颜克权, 周继刚, 等. 非对称型多流中间包的解析[J]. 炼钢, 1999, 15(6): 44-48.
- [3] Sahai Y, Burval M D. Validity of Reynolds and Froude Similarity Criteria for Water Modeling of Melt Flow in Tundishes[C]. Iron and Steel Society Inc eds. Proceedings of the Electric Furnace Conference Atlant; Catanzarite K A, 1992: 469-474.
- [4] 王宏斌, 唐海燕, 李京社, 等. 八流连铸中间包控流装置优化的水力学模拟[J]. 特殊钢, 2012, 33(3): 18-21.
- [5] 雷洪, 赵岩, 鲍家林, 等. 总体多流连铸中间包停留时间分布曲线总体分析方法[J]. 金属学报, 2010, 46(9): 1109-1114.
- [6] 郭亨达. 工程流体力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.

茅晓慧(1979-), 女, 硕士, 博士研究生(北京科技大学), 2000 年营口市职业技术学院(本科)毕业, 洁净钢生产的理论与工艺. E-mail: zjsustb@163.com

收稿日期: 2013-09-05