

三流非对称连铸 18 t 中间包流场的物理和数学模拟

王红娜¹ 杨亮¹ 郑宝安² 樊世亮² 陈列² 成国光¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 西宁特殊钢股份有限公司,西宁 810005)

摘要 以西宁特钢三流非对称 250 mm × 280 mm 方坯连铸 18 t 中间包为研究原型,应用 1:2.2 比例水模型试验和数学模拟相结合的方法研究 3 种控流装置对中间包流场的影响,得出一种优化的新型挡墙结构。结果表明,原型中间包 3 个水口间的平均停留时间和滞止时间相差较大,对各注流之间的均匀控制带来不利影响;使用新型的 U 形挡墙后,中间包内死区比例降低了 36.67%,3 个水口的平均停留时间标准差减小,有利于各流之间的均匀化控制。

关键词 三流连铸中间包 数学模拟 物理模拟 流场 结构优化

Physical and Numerical Simulation on Flow Field in 18 t Tundish for Three-Strand Unsymmetrical Casting

Wang Hongna¹, Yang Liang¹, Zheng Baoan², Fan Shiliang², Chen Lie² and Cheng Guoguang¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Xining Special Steel Co Ltd, Xining 810005)

Abstract Based on the research prototype of an 18 t tundish for three-strand unsymmetrical casting 250 mm × 280 mm bloom at Xining Special Steel, the effect of 3 kinds of flow control device on flow field of liquid in tundish is studied by using geometric similarity ratio 1:2.2 water model to get optimum new type baffle. Results show that the difference of average residence time and minimum residence time between tundish three strand nozzles in prototype tundish is bigger, it is unfavorable to uniformly control each strand casting; with using the optimum new U-type baffle, dead volume fraction of liquid in tundish decreases by 36.6% and the standard deviation of average residence time of three nozzle decreases, it is favorable to uniformly control each strand casting.

Material Index Three-Strand Casting Tundish, Numerical Simulation, Physical Simulation, Flow Field, Structure Optimum

三流中间包是一种应用较为广泛的连铸中间包,但基本上都是以钢包长水口为对称中心的结构对称型^[1-6]。目前,有关三流非对称型中间包的报道较少。本试验应用物理模拟和数学模拟相结合的方法,对西宁特钢三流非对称连铸中间包流场进行模拟,分析其原结构所存在的问题,并且对控流装置进行优化设计,提出了一种新型的 U 形挡墙,使得钢液的流动和分配一致性得到显著改善。该研究对相关类型的中间包控流装置的优化设计具有很好的参考和指导意义。

1 物理模拟

1.1 试验原理

中间包的物理模拟以相似原理为基础,保证原型与模型的几何相似和动力相似。根据实验室的条件和中间包的尺寸,本试验确定以 1:2.2 的比例因子建立缩小比例的有机玻璃中间包模型。对于缩小比

例的中间包模型,动力相似通常保证 Re 准数处于同一自模区条件下,Fr 准数相等,就可以对实际中间包进行模拟。

本次试验以西宁特钢三流非对称大方坯连铸中间包为原型,中间包容量为 18 t,铸坯断面尺寸为 250 mm × 280 mm,拉坯速度为 0.85 m/min。

1.2 试验装置

物理模拟试验的装置如图 1 所示,其装置由有机玻璃钢包、有机玻璃中间包、中间包控流装置、示踪剂加入系统、电导电极、电导率仪、玻璃转子流量计、DJ800 多功能监测系统以及计算机等组成。

1.3 试验方法

试验采用“刺激-响应”法测得中间包内的液体的停留时间分布曲线(RTD 曲线)。待中间包液面稳定后,在入口处脉冲式加入 100 mL 饱和 KCl 溶液^[7],同时在出口处测量采集 3 个水口的电导率值。应用 Sahai 和 Emi 等^[8]人提出的联合模型对停留时

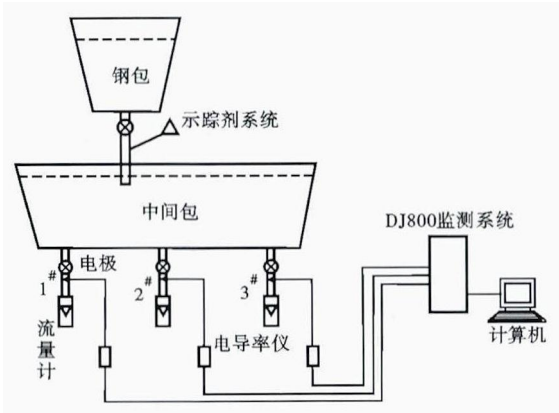


图 1 水模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematics of water model experimental device

间分布曲线进行分析,计算出中间包内死区体积分数 θ_d (式 1)、活塞流体积分数 θ_p (式 2)以及全混流体积分数 θ_m (式 3),以评价中间包内控流装置对钢液流动状态的影响。

$$\theta_d = \frac{V_d}{V} = 1 - \frac{Q_a}{Q} \frac{t_c}{\bar{t}} \quad (1)$$

$$\theta_p = \frac{V_p}{V} = \frac{t_{min} + t_{peak}}{2\bar{t}} \quad (2)$$

$$\theta_m = 1 - \frac{V_p}{V} - \frac{V_d}{V} \quad (3)$$

对于多流中间包,各个水口的流动状态不可能完全相同,本试验采用平均停留时间标准差 S_{uv} 来衡量各流之间的一致性(式 4)。

$$S_{uv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \left(t_{uvi} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 t_{uvi} \right)^2}{2}} \quad (4)$$

式中: \bar{t} -理论停留时间; t_c -测量到 $2\bar{t}$ 时的平均停留时间; Q_a/Q -无量纲 RTD 曲线中小于 2 倍理论停留时间的面积; t_{min} -滞止时间; t_{peak} -峰值时间; t_{uvi} -各流实际平均停留时间。

1.4 试验方案

研究的模拟对象为三流非对称中间包,钢包注流点在 1# 和 2# 水口之间,3 个水口到注流点的距离不等。若控流装置设计不合理,各个出口温度高低及所含夹杂物大小和数量会存在很大差异,不利于铸坯质量的控制。本次试验包括 3 个阶段,第 1 阶段研究了原型中间包内的流场,分析其存在的主要问题;第 2 阶段改变原型控流装置的参数,分析其是否有助于改善中间包内钢液的流动状态;第 3 阶段提出了一种新型的 U 形挡墙,改变挡墙上导流孔的

表 1 试验方案特点
Table 1 Feature of experimental schemes

项目	特点
原型中间包	内部仅设置一个高 240 mm 的导流杯
方案 1	导流杯以长水口为对称中心向双流区偏移 50 mm
方案 2	内部设置单孔 U 形挡墙

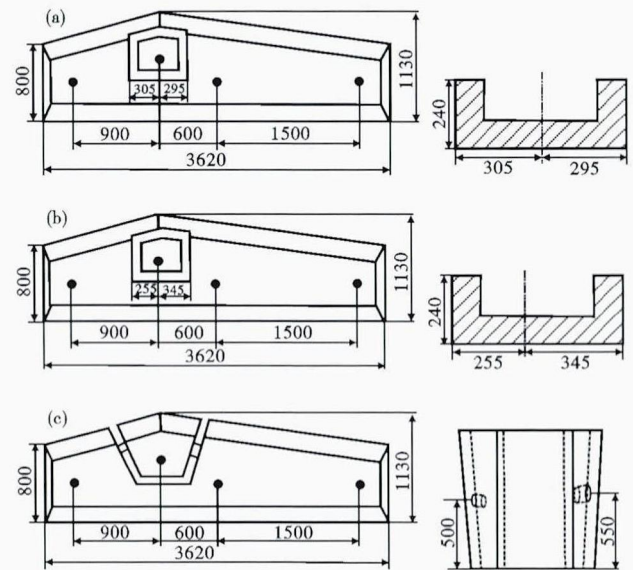


图 2 水模拟中间包结构及控流装置示意图:(a)原型中间包;(b)方案 1;(c)方案 2

Fig. 2 Schematics of water simulated tundish structure and flow control devices: (a) prototype tundish; (b) scheme 1; (c) scheme 2

孔径、位置和倾角等参数,确定最终的优化方案。试验选择了 3 种代表性方案,分析各方案中间包内钢液的流动状态,方案特点如表 1 和图 2 所示。

1.5 物理模拟结果分析

表 2 为各方案中间包内 3 个水口的流动参数。由表 2 中可以看出,原型中间包内 2# 水口的滞止时间仅有 15 s,而远流 3# 水口的滞止时间长达 54 s,是 2# 水口的 3 倍多,导致 2# 水口处夹杂物上浮几率小,3# 水口处钢液热量损耗大;中间包内钢液平均停留时间仅有 351.3 s,标准差高达 31.77 s,3 个水口的流动状态一致性差,这直接影响各个水口的钢液温度分布及所含夹杂物的尺寸和数量;整个中间包内的死区体积分数为 36.37%,大于 1/3 的体积处于不活跃状态。通过以上分析,原型中间包内各个水口的滞止时间和平均停留时间相差较大,流动状态一致性差,不利于钢液成分和温度的均匀分布,给铸坯质量控制带来困难。

方案 1 将导流杯向双流浇注区偏移,1# 和 3# 水口的滞止时间趋于一致,但 2# 水口的滞止时间缩短,形成近似短路流;整个中间包内钢液的平均停留

表 2 各典型方案的流动参数
Table 2 Flow parameters of each typical scheme

项目	i	t_{avi}/s	t_{mini}/s	t_{peaki}/s	$\theta_{di}/\%$	$\theta_{pi}/\%$	$\theta_{mi}/\%$	S_{iavi}/s
原型	1	355.89	25	52	35.39	6.97	57.64	31.77
	2	317.49	15	39	42.23	4.91	52.86	
中间包	3	380.53	54	77	31.48	11.82	56.70	38.62
	均值	351.30	31	56	36.37	7.90	55.73	
方案 1	1	365.23	40	45	33.37	6.91	59.72	38.62
	2	291.75	14	29	46.49	3.94	49.57	
方案 2	3	349.09	48	62	36.72	10.03	53.24	11.16
	均值	335.36	34	45	38.86	6.96	54.18	
方案 2	1	419.51	29	102	22.81	11.87	65.31	11.16
	2	421.80	40	135	20.52	15.85	63.63	
方案 2	3	401.42	39	85	25.83	11.23	62.94	11.16
	均值	414.24	36	107	23.06	12.98	63.96	

注: t_{avi} - 实际平均停留时间; t_{mini} - 滞止时间; t_{peaki} - 峰值时间; θ_{di} - 死区体积分数; θ_{pi} - 活塞流体积分数; θ_{mi} - 全混流体积分数; S_{iavi} - 平均停留时间标准差。

时间减小,标准差增加,死区体积增加。由此可以看出,方案 1 并没有改善中间包内钢液的流动状态。

方案 2 中,2[#]和 3[#]水口的滞止时间几乎相同,分别为 40 s 和 39 s,这是由于使用高出浇注液面的 U 形挡墙,钢液不能越过挡墙直接进入 2[#]水口,而在导流孔的导向作用下,指向 3[#]水口流动,延长了钢液流动到 2[#]水口的距离;3 个水口平均停留时间相对于原型中间包均有所延长,其中 2[#]水口延长了近 100 s,而平均停留时间标准差缩短了近 20 s;死区体积分数为由原型的 36.37% 下降到 23.06%,降幅约为 36.67%。方案 2 极大地改善了中间包内钢液的流动状态,增强了 3 个水口流动状态的一致性,有利于各流之间的均匀化控制。

2 数学模拟

2.1 数学模型

中间包内钢液流动行为可用连续性方案、N-S 方程及标准 $k-\varepsilon$ 双方程来描述。各方程的具体形式如下所述:

$$(1) \text{连续性方程: } \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

(2) 动量方程 (Navier-Stokes 方程)

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + F_i \quad (6)$$

(3) 湍动能(k)方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = G_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

(4) 湍动能耗散率(ε)方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = (C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2) / k \quad (8)$$

$$\text{其中: } G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad \mu_{eff} = \mu_t + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中: ρ - 钢液密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); x_i, x_j - i 和 j 方向的坐标/m; u_i, u_j - i 和 j 方向的速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); P - 压力/Pa; μ_{eff} - 有效粘度系数/[$\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$]; k - 湍流动能/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$); ε - 湍动能耗散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$); μ_t - 湍流粘度系数/(Pa·s); μ_l - 层流粘度系数/(Pa·s); $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ - 均为常数,采用 Launder 和 Spalding 的推荐值,其值分别取 1.44, 1.92, 0.09, 1, 1.3。

确定计算区域的物质为钢液,设置边界条件:

(1)长水口为入口,入口边界条件为入口流量,可由拉坯速度和铸坯截面计算;(2)自由液面,忽略表面渣层影响,自由液面与气相直接接触,表面切应力很小,可以忽略不计,变量梯度为 0;(3)浸入式水口为出口,根据出口边界条件处理,设置平均静压力为 0 Pa;(4)壁面,采用无滑移边界条件,壁面附近流场采用标准壁面函数计算。

2.3 数学模拟结果分析

应用 ANSYS CFX 计算了各方案中间包内钢液的流场分布。由原型中间包纵向截面流场图可以看出,钢液以一定的速度由长水口注入到导流杯内,沿导流杯内壁垂直向上冲击液面,到达表面后,在表面保护渣的抑制作用下,在两侧形成短距离的表面活塞流。在单流浇注区,由于空间较小,钢液冲击中间包的横向壁面后,沿壁面直接进入 1[#]水口。在双流浇注区,由于钢包注流的卷吸作用,2[#]水口上方形成一个小回流,但是 3[#]水口处,钢液流速较慢。由图 3A(b)中可以看出,在导流杯与 2[#]水口间,钢液流速快,部分钢液越过导流杯顶端直接进入 2[#]水口,钢液流动距离短,夹杂物上浮几率小。

由图 3B 可以看出,方案 1 将导流杯偏心设置,增加了双流浇注区表面活塞流的流动距离,并且 3[#]水口上方钢液流速明显增加,但在靠近注流区的 2[#]水口处钢液流速仍较快,形成近似短路流,影响 2[#]水口的铸坯质量。

图 3C 为方案 2 纵向截面流场图。由图 3C 中可以看出,钢液在 U 形挡墙内进行强烈搅拌,然后由导流孔进入浇注区,在导流孔的导流作用下,钢液指向中间包液面流动,在双流浇注区形成大回流,延长了钢液进入 2[#]水口距离,增加了钢液的停留时

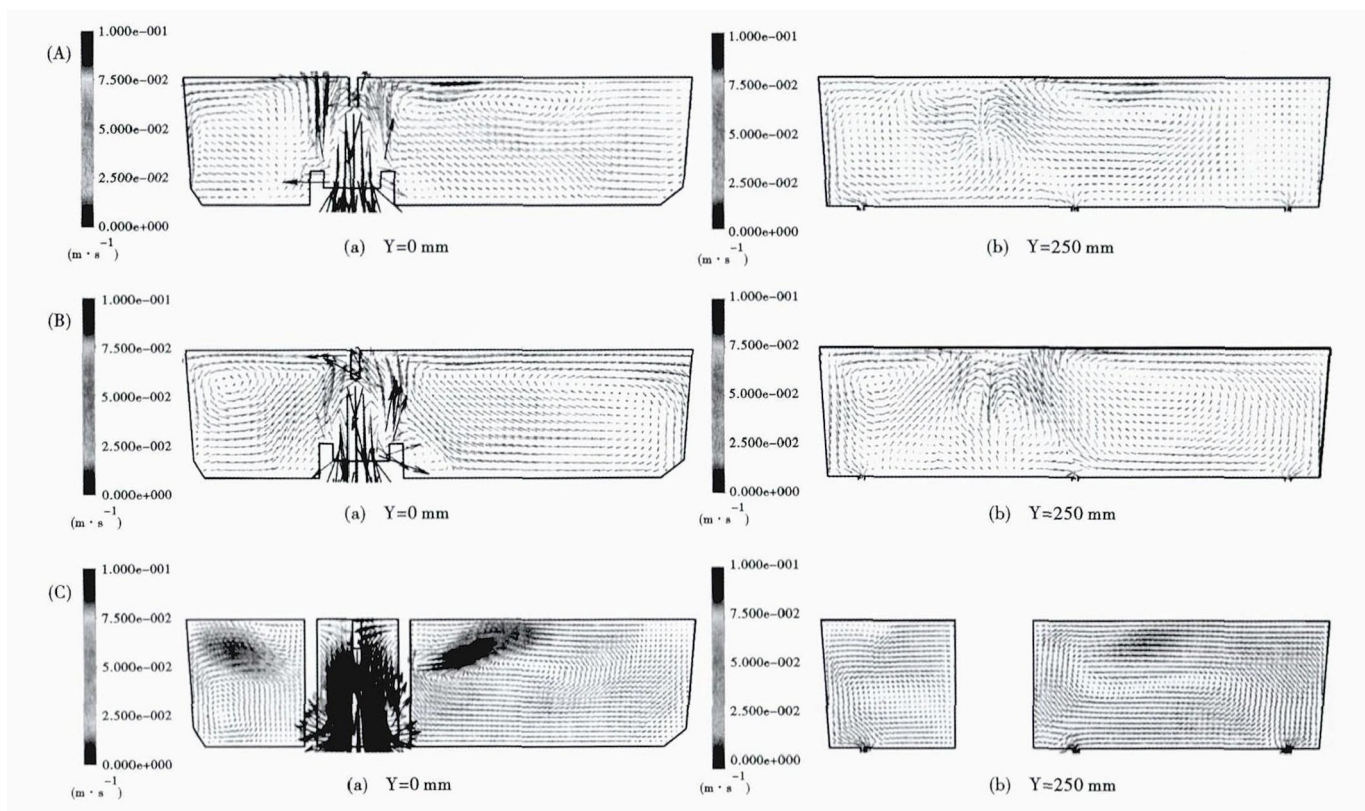


图 3 中间包纵向截面流场图:(A)原型中间包;(B)方案 1;(C)方案 2

Fig. 3 Diagram of tundish longitudinal section velocity field: (A) prototype tundish; (B) scheme 1; (C) scheme 2

间,有助于夹杂物的上浮以及顶渣对夹杂物的吸收,使钢液成分和温度的均匀分布得到改善。由以上分析可知,数学模拟与物理模拟结果相吻合,方案 2 极大的改善了中间包内钢液的流动状态。

3 结论

(1)原型中间包内死区体积分数高达 36.37%,热量损耗大;3 个水口的滞止时间和平均停留时间相差较大,流动状态一致性差,不利于铸坯质量的控制。

(2)方案 1 将导流杯偏心设置后,增加了 3#水口上方钢液的活跃程度,但 2#水口的滞止时间和平均停留时间均缩短,死区比例增加。

(3)方案 2 使用 U 形挡墙后,钢液在中间包内的平均停留时间增加,标准差减小,各个水口流动状态明显趋于一致,死区体积分数由 36.37% 下降到 23.06%,极大地改善了中间包内钢液的流动状态。

参考文献

[1] 景财良,王新华,李林平,等. 连铸参数对中间包内控流元件冶金性能的影响[J]. 特殊钢,2011,32(1):5-8.

[2] Robertson T, Perkins A. Physical and Mathematical Modelling of Liquid Steel Temperature in Continuous Casting[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1986, 13(6):301-310.

[3] 曹立军,王静松,孙伟,等. 三流连铸中间包钢水流场的数学物理模拟[J]. 连铸,2010(5):1-6.

[4] 李青云,李兆丰,郭上型,等. U 形控流装置优化三流中间包流场的水模实验[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版),2010,27(2):117-122.

[5] 富平原,靳自成. 三流小方坯连铸中间包结构的研究[J]. 炼钢,1998,14(1):33-36.

[6] 黄永建,刘才,张彩军. 石钢三流中间包结构优化的数值模拟与工业实验研究[J]. 过程工程学报,2009,9(增刊1):432-437.

[7] Chen C, Cheng G, Sun H, et al. Effects of Salt Tracer Amount, Concentration and Kind on the Fluid Flow Behavior in a Hydrodynamic Model of Continuous Casting Tundish[J]. Steel Research International, 2012, 83(12):1141-1151.

[8] Sahai Y, Emi T. Melt FLOW Characterization in Continuous Casting Tundishes[J]. ISIJ International, 1996, 36(6):667-672.

王红娜(1987-),女,硕士研究生(北京科技大学),2011年河北大学(本科)毕业,特殊钢连铸工艺及理论研究。
E-mail: wanghn1207@163.com

收稿日期:2013-07-17