

· 试验研究 ·

不锈钢连铸中间包外壳倾角对流场影响的水模拟试验和应用

王承顺¹ 李六一^{1,2} 成国光¹ 张建国² 李渔² 屈志东¹

(1 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083;2 四川西南不锈钢有限责任公司,四川 106083)

摘要 根据相似原理,通过建立24 t中间包1:2水力学模型对单流板坯24 t中间包的外壳倾角(15°和8°)对钢液流动状态的影响进行了研究,并用数值模拟对水模拟结果进行定性验证。结果表明,原型中间包外壳倾角(15°)太大,浇铸区死区体积达到33.9%,平均停留时间短并且温度分布不均匀;通过采用优化的中间包外壳倾角(8°),死区体积降低了56.3%,平均停留时间提高了33.5%,并且使得浇铸区温度分布更加均匀。经过10炉工业试验后结果表明,外壳倾角8°优化后中间包钢水温度的波动明显降低,夹杂物出现频率亦显著降低。

关键词 中间包外壳倾角 钢水温度 夹杂物数量 水模拟 数值模拟 应用

Water Model Test for Effect of Shell Angle of Tundish for Stainless Steel Concasting on Flow Field and Application

Wang Chengshun¹, Li Liuyi^{1,2}, Cheng Guoguang¹, Zhang Jianguo², Li Yu² and Qu Zhidong¹

(1 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Sichuan Southwest Stainless Steel Co Ltd, Sichuan 106083)

Abstract Based on geometry similar principle, the effect of shell angle (15° and 8°) of 24 t tundish for single strand slab casting on liquid flow condition has been studied by established 1:2 water model, and the water simulation results is verified by numerical simulation. Results show that the shell angle of prototype tundish (15°) is too big, of that the rate of dead zone volume in casting area is 33.9%, the average residence time is short and the distribution of liquid temperature is uneven; and with using optimized shell angle of tundish (8°) the rate of dead zone volume in casting area reduces by 56.3%, the average residence time increases by 33.5% and the distribution of liquid temperature is more even. 10 heats commercial pilot production results show that after optimization with shell angle 8° the liquid temperature vibration extent decreases obviously and the occurrence frequency of inclusions in steel markedly reduces.

Material Index Shell Angle of Tundish, Liquid Temperature, Amount of Inclusions, Water Simulation, Numerical Simulation, Application

为了避免因夹杂物引起的不锈钢表面质量问题,不锈钢往往对洁净度有较高的要求^[1]。中间包作为连接钢包和结晶器的中间容器,对于连铸操作的顺利进行以及保证钢液品质的作用是不可忽视的^[2-3]。目前,绝大多数研究者仅仅只是通过调整档墙、坝和导流隔墙等中间包内部控流装置的位置来对中间包内部流场进行优化^[4-5],而中间包外壳钢板倾角对内部流场影响的研究很少。合理的中间包外壳倾角不仅能够优化内部钢液流场,而且也可以在一定程度上调整中间包的钢水装入量。

本研究以四川西南不锈钢单流板坯中间包为物理原型,在实验室建立水力学模型对其外壳倾角进行优化调整,并用数学模拟对水力学模拟结果进行对比验证,并用优化的中间包进行工业试验。

1 实验方法

1.1 水模拟

研究的中间包容量为24 t,用水模拟钢液,以相似原理为基础,采用几何比为1:2,试验装置以及模型示意图见图1,原型中间包几何参数见表1,中间包水模型机械装置包括放置钢包模型和中间包模型的实验台、可移动钢包模型、供水箱、储水箱、上水泵以及自动控制和数据处理系统。

水模拟实验运用刺激-响应技术来测量中间包的停留时间分布,实验中采用的示踪剂为KCl溶液。中间包水口的流量为2.1 m³/h,理论停留时间为783 s。利用“刺激-响应”法分别测定原型中间包以及外壳倾角改为8°的中间包内流体的停留时间。为了避免单次实验出现较大偏差,在本次研究中每种方案至少重复3次,以确保实验结果的可信度。为了直观的观察中间包内液体的流动状况,在中间包入口处加入一定量墨汁,同时用摄像机对中间包内示踪剂流动状况进行拍摄。

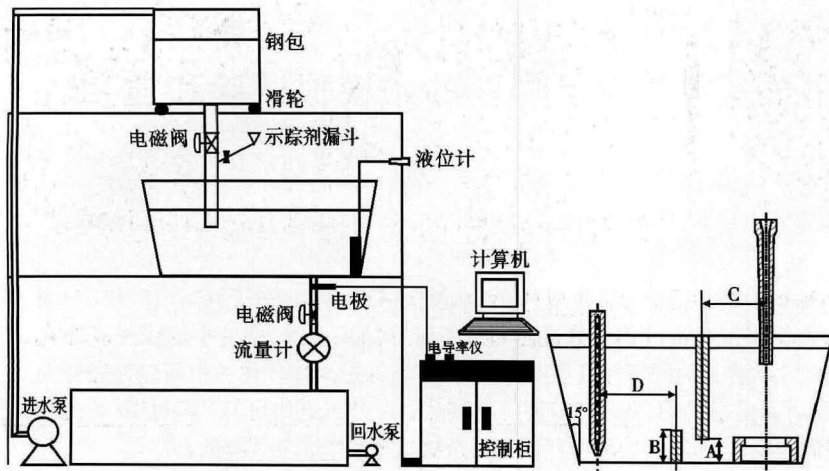


图1 水模拟实验装置以及中间包模型示意图

Fig.1 Schematics of water model experimental device and tundish model

表1 原型中间包水模型几何参数

Table 1 Geometric parameters of prototype tundish model				
A/ mm	B/ mm	C/ mm	D/ mm	外壳倾角/ $^{\circ}$
210	300	645	800	15

1.2 数学模拟

1.2.1 基本假设

(1) 中间包内钢水的流动为湍流流动;(2) 中间包内钢水的流动为稳态过程;(3) 忽略表面渣层和液面波动的影响;(4) 等温流动过程中, 钢液按均相介质处理, 其密度和粘度等参数视为常数。

1.2.2 数学模型

对于中间包内的钢液流动行为可以用连续性方程、N-S 方程以及标准 $k-\epsilon$ 双方程来描述。这些方程的具体形式如下所述:

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

(2) N-S 方程:

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

(3) 湍动能(k)方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

(4) 湍动能耗散率(ϵ)方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \epsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) = (C_1 \epsilon G_k - C_2 \rho \epsilon^2) / k \quad (4)$$

其中: $G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_t = \mu_l + \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

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/($\text{Pa} \cdot \text{s}$); μ_l - 层流粘度系数/($\text{Pa} \cdot \text{s}$); $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 为 $k-\epsilon$ 模型的 5 个半经验常数, 这些常数的标准取值采用 Launder 和 Spalding 的推荐值^[6], 其值分别取 1.44, 1.92, 0.09, 1, 1.3。

计算区域的物质设定为钢液, 边界条件:(1) 入口为长水口处, 入口流量可由拉坯速度和铸坯截面计算得到;(2) 自由液面, 忽略表面渣层的影响, 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, 设置其平均静压力为 0;(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。

1.3 工业试验

为了验证水模拟和数学模拟结果的可靠性, 在水模拟以及数值模拟对原型中间包外壳倾角进行优化之后, 将优化之后的中间包进行工业试验。对优化前后的中间包间隔相同的时间分别 10 次测温, 进

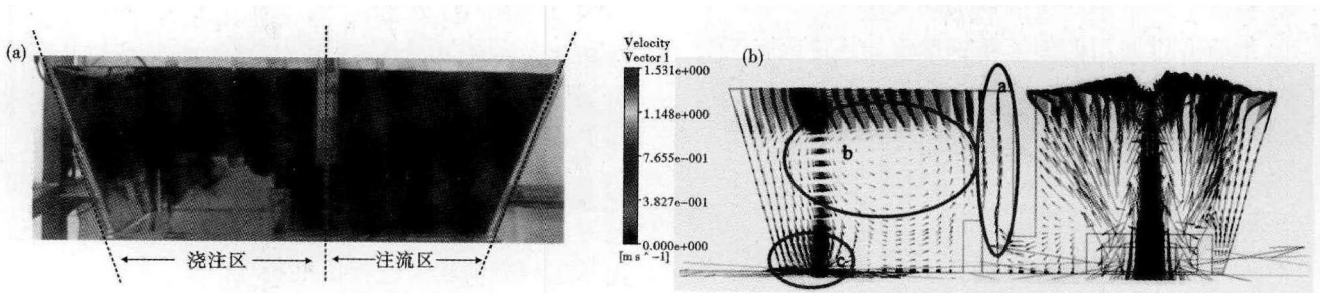


图2 外壳倾角为 15° 时中间包流场水模拟(a) 和数值模拟(b) 结果

Fig.2 Results of tundish flow field of water model simulation (a) and numerical simulation (b) for tundish with 15° shell angle

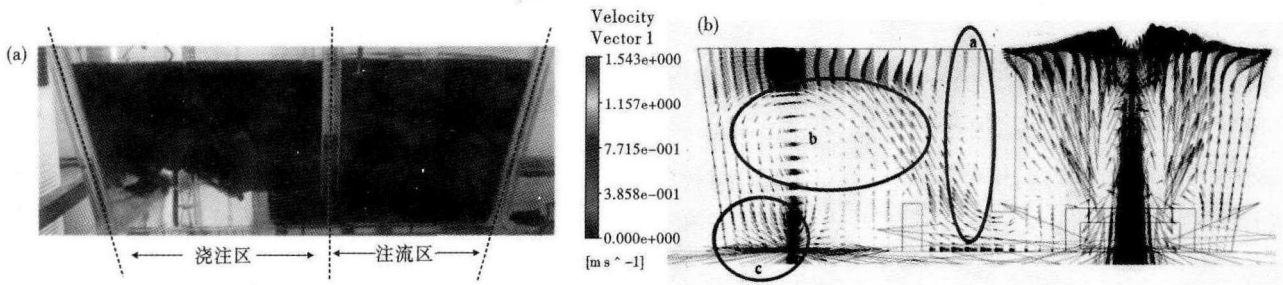


图3 外壳倾角为8°时中间包液流场水模拟(a)和数值模拟(b)结果

Fig. 3 Results of tundish flow field of water model simulation (a) and numerical simulation (b) for tundish with 8° shell angle

行温度稳定性的对比研究。

2 实验结果及分析

2.1 原型中间包液流特征

分析外壳倾角为15°时中间包的RTD参数(表2)以及墨水液流场显示结果(图2a)可以发现,(1)原型中间包内钢水死区体积分数较大,达到总体积的33.9%。墨水液流场显示处浇注区存在很大的回旋状死区,严重影响了中间包的有效容积;(2)原型中间包内钢水平均停留时间约

为546.3 s,仅仅达到理论平均停留时间的69.8%(理论平均时间为783 s),尚有较大的提升空间。

分析外壳倾角为15°中间包的数值模拟结果可以发现,(1)数值模拟结果清楚的显示出浇注区存在很大的回旋状死区[图2(b)中字母b表示的区域],严重影响了中间包的有效容积;(2)在图2(b)中字母a表示的区域钢液流动速度的垂直分量过大,原型中间包钢液流股对钢液表面造成很大扰动;(3)原型中间包浇注口和侧壁之间的距离太小[图2(b)中字母c表示的区域],对浇注口周围钢液挤压严重,使得钢液不能均匀稳定流出口。

2.2 优化中间包外壳倾角的实验结果

分析外壳倾角为8°时中间包的RTD参数(表2、图4)以及墨水液流场显示结果(图3)可以发现,(1)中间包内钢水死区体积分数明显减小,仅为总体积

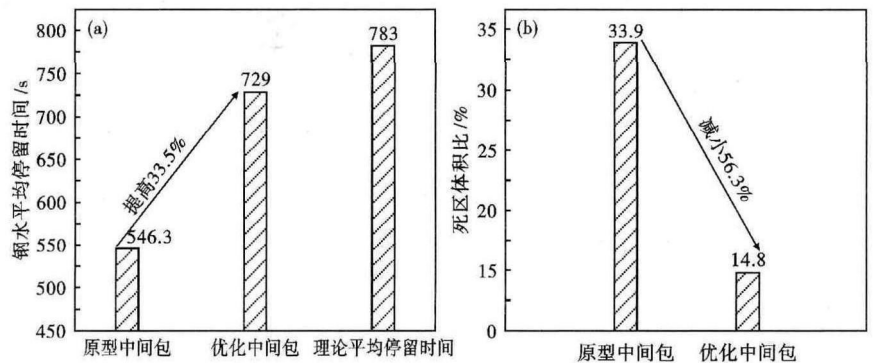


图4 中间包外壳倾角优化前后钢水平均停留时间(a)和死区体积(b)

Fig. 4 Average residence time (a) and dead area volume percentage (b) before and after optimization of tundish shell angle in liquid

的14.8%,相对原型中间包死区体积减小了56.3%;(2)中间包内钢水平均停留时间提高到729 s,相对原型中间包平均停留时间增加了33.5%。

分析外壳倾角为8°时中间包的数值模拟结果可以发现,(1)数值模拟结果(图3b)显示出浇注区回旋状死区几乎消失,显著增加了中间包的有效容积;(2)在图3(b)中字母a表示的区域钢液流动的速度减小,钢液流股对钢液表面的扰动减弱;(3)中

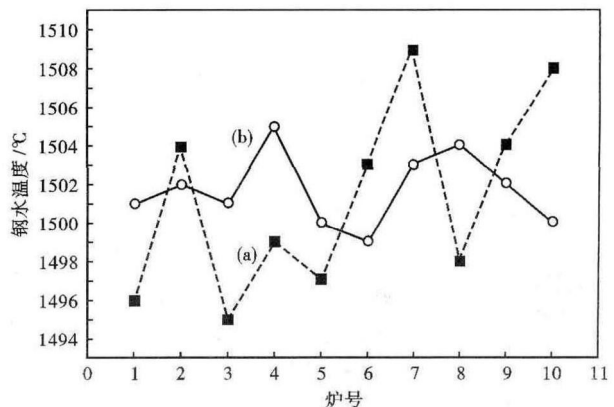


图5 中间包优化前(a)后(b)10炉钢水温度

Fig. 5 Temperature of liquid of 10 heats before (a) and after (b) tundish structure optimization

表2 水模拟实验结果
Table 2 Results of water model experiments

外壳倾角/°	$t_{平}/s$	$t_{滞}/s$	$t_{峰}/s$	$V_{死}/\%$	$V_{活}/\%$	$V_{全}/\%$
15	546	111.5	147.5	33.9	16.5	49.6
8	729	145.5	339	14.8	30.9	54.3

注: $t_{平}$ -平均停留时间; $t_{滞}$ -滞止时间; $t_{峰}$ -峰值时间; $V_{死}$ -死区体积分数; $V_{活}$ -活塞流体积分数; $V_{全}$ -全混流体积分数。

间包浇注口和侧壁之间的距离明显增加[图3(b)中字母c表示的区域],对浇注口周围钢液的流动影响减弱,使得钢液能较平稳的流出水口。

另外,中间包外壳倾角优化为 8° 之后,不仅内部流场有了较大的改善,中间包的实际容积也相应增大。当中间包两侧倾角由原型的 15° 减小到 8° 后,中间包的容积由 3.35 m^3 增加到 4.08 m^3 ,增加了 0.73 m^3 。

3 工业试验

304 不锈钢现场工业试验的钢包容量为 70 t ,中间包容量 28 t ,连铸坯尺寸为 $180\text{ mm} \times 1100\text{ mm}$ 。优化前后各记录10炉的温度进行对比研究,温度记录见图5。优化前后10炉测温的平均温度相差不大(图6),分别为 $1501.3\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1501.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。但是优化后中间包不同炉次温度的波动(用10次测温的均方差表示)明显减小,与优化前相比减小了62%(优化前10炉测温的均方差为4.734,优化后为1.792)。中间包外壳倾角 8° 钢中夹杂物出现频率较倾角 15° 的钢中夹杂物出现频率明显降低(图7)。

减小中间包的两侧倾角有利于提高中间包内钢液温度的均匀性,这为后续连铸操作的连续稳定运行以及产品质量的提高提供了重要的保障。

4 结论

(1)原型中间包两侧倾角(15°)太大,流场、温度场不均匀。平均停留时间短仅为 546 s (理论平均停留时间为 783 s),死区体积高达33.9%。

(2)中间包两侧倾角优化后(8°)平均停留时间比优化前(15°)提高了33.5%,死区体积减少了56.3%,容积增加了 0.73 m^3 。

(3)从现场10炉温度测量记录看,减小中间包两侧倾角有利于提高钢液温度的均匀性。

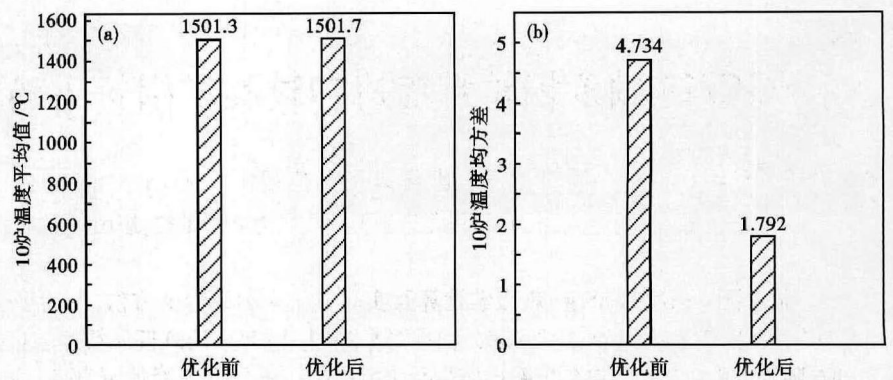


图6 中间包优化前后10炉测温的平均温度(a)和均方差(b)比较

Fig. 6 Average temperature (a) and mean square error (b) of 10 heats liquid before and after optimization in tundish

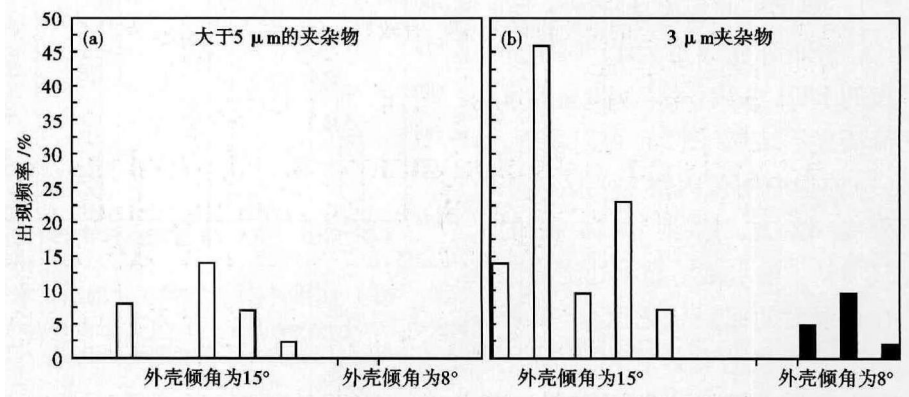


图7 中间包外壳倾角为 15° 和 8° $>5\text{ }\mu\text{m}$ (a)和 $3\text{ }\mu\text{m}$ (b)夹杂物出现频率比较

Fig. 7 Comparison of $>5\text{ }\mu\text{m}$ (a) and $3\text{ }\mu\text{m}$ (b) inclusions in steel casting using tundish with 15° and 8° shell angle

参考文献

- [1] 国际钢铁协会. 洁净钢: 洁净钢生产工艺技术[M]. 中国金属协会, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 10.
- [2] Lopez-Ramirez S, Palafox-Ramos J, Morales R D, et al. Modeling Study of the Influence of Turbulence Inhibitors on the Molten Steel Flow, Tracer Dispersion, and Inclusion Trajectories in Tundishes[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2001, 32(4): 615-627.
- [3] Craig K J, De Kock D J, Makgata K W, et al. Design Optimization of a Single-Strand Continuous Caster Tundish Using Residence Time Distribution Data[J]. ISIJ International, 2001, 41(10): 1194-1200.
- [4] 王红娜, 杨亮, 郑宝安, 等. 三流非对称连铸18 t中间包流场的物理和数学模拟[J]. 特殊钢, 2014, 35(1): 7-10.
- [5] 蔡开科, 孙彦辉, 秦哲. 中间包钢水流动控制的冶金效果[J]. 连铸, 2008(3): 1-4.
- [6] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.

王承顺(1989-),男,硕士研究生,北京科技大学(本科)毕业,特殊钢连铸工艺及理论研究。

E-mail: wangchengshun0705@163.com

收稿日期: 2015-07-27