

连铸中间包内部结构优化的数理模拟及冶金效果

唐海燕 于满 李京社 包燕平 蒋静 吉传波 李涛

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

摘要 通过中间包水模型实验和数值模拟对4流中间包两种控流装置下包内流场进行了模拟研究. 结果表明:原中间包内由于形成了短路流使得钢液在中部水口的停留时间短,与边部水口的停留时间相差大. 改进型中间包能均匀钢液在不同水口的停留时间,减小中间包的死区比例,提高夹杂物的去除率. 工业实验表明与原中间包相比,使用改进型中间包铸坯中的大型夹杂物含量和显微夹杂物数量分别降低44.9%和2.7%.

关键词 中间包; 水模拟; 数值模拟; 工业实验

Numerical and physical simulation on inner structure optimization of a continuous casting tundish and its metallurgical effect

TANG Hai-yan, YU Man, LI Jing-she, BAO Yan-ping, JIANG Jing, JI Chuan-bo, LI Tao

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT The fluid flow of four-strand tundishes under two different control devices was studied by water model experiments and numerical simulation. The results show that the formation of short-circuit flow in the original tundish makes liquid steel have short residence time in the middle outlet, and have large difference of residence time compared with the edge outlet. The improved tundish can homogenize the residence time of molten steel between different outlets, decrease the dead volume fraction, and increase the removal rate of inclusions. The plant trial shows that the macroinclusion content and the microinclusion number in billet decrease by 44.9% and 2.7%, respectively, compared with those of the original tundish.

KEY WORDS tundish; water model; numerical simulation; plant trial

随着中间包冶金技术的发展与完善,中间包不仅是把钢水均匀分配给各个结晶器和实现多炉连铸的中间容器,而且承担着去除夹杂物、合金微调、控制过热等冶金功能^[1]. 中间包内合理控流元件的设置以及合理的钢水流动状态对延长钢水在中间包内的停留时间,均匀钢水温度和成分,减少卷渣和促进夹杂物上浮有重要作用. 不合理的中间包控流装置会导致夹杂物上浮不充分或局部聚集,从而影响钢的质量和性能. 国内某钢厂生产的连铸坯质量不稳定,经检验主要与大型夹杂物超标有关,而中间包是去除大型夹杂物的重要容器. 因此,本文采用水模型和数值模拟相结合的方法研究了该厂中间包内钢水的流动特性,并在此基础上优化了中间包的内部结构,改变了导流孔的孔径和倾角,并增加了湍流控

制器. 通过工业实验研究了优化后的中间包对总氧含量和夹杂物的影响.

1 水模型实验

1.1 实验原理及方法

水模拟实验的理论依据是相似原理. 中间包内钢液的流动一般可视为黏性不可压缩稳态流动,因此系统只要满足几何相似和动力相似就可以满足模型和原型的相似^[2-3]. 中间包内钢液流动与模型中水的流动处于同一自模化区,所以只要保证模型和原型的 Fr 准数相等,就可以保证模型(下标用 m 表示)和原型(下标用 p 表示)的相似,即:

$$Fr = \frac{u_m^2}{gL_m} = \frac{u_p^2}{gL_p} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-08-05

作者简介: 唐海燕(1970-),女,讲师,博士, E-mail: tanghaiyan@metall.ustb.edu.cn

由此计算出模型所对应于原型的体积流量和水口流速, 即:

$$Q_m = \lambda^{2.5} Q_p \quad (2)$$

$$u_m = \lambda^{0.5} u_p \quad (3)$$

以上方程中 Fr 为 Froude 准数; u 为流体速度, $m \cdot s^{-1}$; g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; L 为特征长度, m ; Q 为体积流量, $m^3 \cdot h^{-1}$; λ 为几何相似比.

本实验选取实际连铸生产过程中 25t 四流中间包为原型, 选取模型与原型的几何相似比 $\lambda = 1/2.5$. 模型与原型对应的工艺参数如表 1 所示.

表 1 原型和模型的主要工艺参数

实验参数	工作液面高度/mm	流间距/mm	单个水口流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	水口插入液面深度/mm
原型	900	1500	3.000	150
模型	360	600	0.304	60

原中间包挡墙两侧各有一个上倾角为 15° , 孔径为 60mm 的导流孔, 前方有一上倾角为 15° , 孔径为 32mm 的导流孔, 如图 1(a)所示. 改进型中间包外形尺寸不变, 将挡墙的侧导流孔孔径均改为 40mm, 前方导流孔孔径不变, 倾角均改为 25° , 同时增加湍流控制器, 湍流控制器形状及尺寸如图 1(b)所示(图中给出的均是水模型尺寸).

实验采用“刺激-响应”方法^[4], 当中间包液面保持在适当高度、流场稳定后, 在长水口处脉冲加入

一定量的饱和 KCl 溶液作为示踪剂, 同时在中间包一侧 1[#](边部)和 2[#](中部)出水口处利用电导率仪、计算机及数据采集系统测定示踪剂浓度随时间的变化曲线即 RTD 曲线. 从 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口时的最小停留时间 t_{min} (又称响应时间)和示踪剂浓度达到最大时的峰值时间 t_{max} . 通过对停留时间分布曲线积分, 还可得到各流体微元在中间包的停留时间 t_{av} :

$$t_{av} = \frac{\int_0^\infty tc(t)dt}{\int_0^\infty c(t)dt} = \frac{\sum_i t_i c(t_i) \Delta t_i}{\sum_i c(t_i) \Delta t_i} \quad (4)$$

理论平均停留时间:

$$t_s = V_R / Q \quad (5)$$

式中, $c(t)$ 为 t 时刻示踪剂的浓度, V_R 为中间包内水的体积.

以理论平均停留时间 t_s 作为基准时间, 除停留时间 t_{av} , 可得出无因次平均停留时间 θ_{av} :

$$\theta_{av} = \frac{t_{av}}{t_s}$$

按照混合模型理论, 死区占中间包流体体积的比例为:

$$V_d = 1 - \theta_{av}$$

由于中间包是对称的, 所以只取两流的结果.

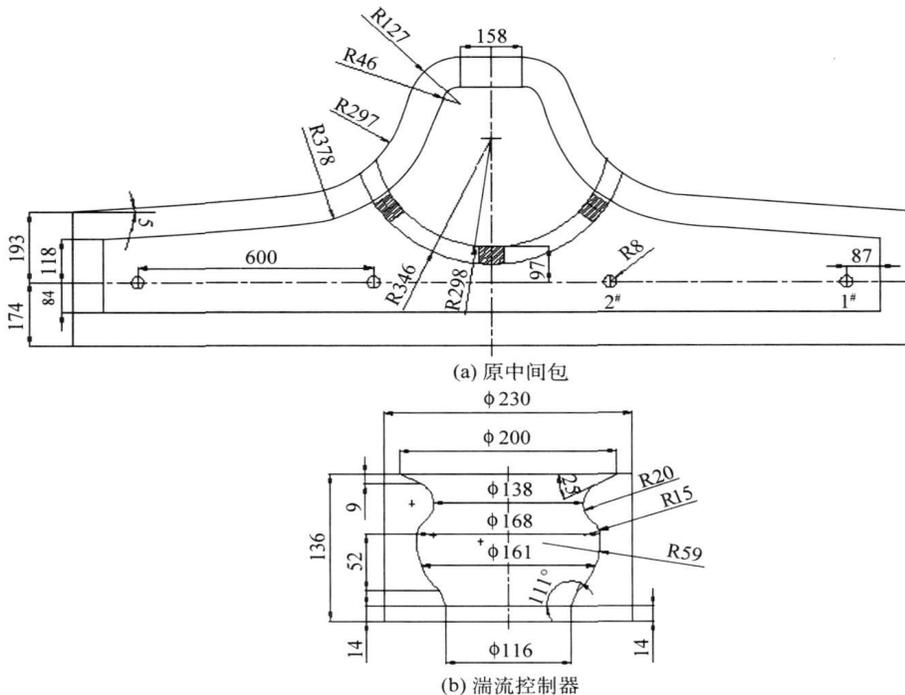


图 1 中间包及湍流控制器示意图(单位:mm)

1.2 实验结果及分析

中间包内液体流动水模型实验结果如表2所示. 从表2可以明显看出原挡墙形式下边部和中部水口的最小停留时间短且相差很大, 边部水口的最小停留时间为中部水口的1.9倍, 两流的实际平均停留时间和死区体积分数相差也较大, 这就造成了两流之间的温差大, 铸坯质量不均匀, 停留时间短造成夹杂物不能充分上浮. 通过墨汁显示的流场发现, 墨汁经长水口加入后, 流速很快, 大部分从导流孔流出, 由于导流孔距离中部水口近且上倾角度小, 墨汁很快流到中部水口.

表2 中间包内液体流动特性

挡墙类型	水口	t_{\min}/s	t_{peak}/s	t_w/s	$V_d/\%$
原挡墙	中部	21	305	624	16.4
	边部	39	268	581	22.2
改进型	中部	65	340	702	5.8
	边部	58	328	680	7.0

改进型中间包由于减小了侧导流孔孔径、增加了上倾角, 使得从孔中流出的钢液先到达液面, 然后再扩散进入中部和边部水口, 湍流控制器也有效地延长了钢液在中间包内的停留时间, 因而中间包内液体流动特性得到明显改善, 滞止时间、峰值时间和平均停留时间明显延长, 死区比例减小, 边部流和中部流的流动特性趋于一致.

2 数值模拟

2.1 基本假设

用FLUENT计算软件模拟原中间包和改进型中间包稳态下的流场, 特作如下假设^[5-6]:

- (1) 流体为稳态、不可压缩的黏性流体;
- (2) 不考虑钢液表面渣层的影响;
- (3) 忽略温度对密度的影响, 即 ρ 为常数.

2.2 基本方程

钢液流动的速度和压力分布由流体连续方程、动量方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型控制^[7-9].

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (7)$$

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = G_k - \rho \epsilon \quad (8)$$

湍流动能耗散率 ϵ 方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_i \epsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] = \frac{(C_1 \epsilon G_k - C_2 \rho \epsilon^2)}{k} \quad (9)$$

其中,

$$G_k = \mu_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (10)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_i + \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (11)$$

上述方程中, u_i 和 u_j 为 i 和 j 方向的流速分量, ρ 为钢液密度, p 为压力, μ_{eff} 为有效黏度系数, k 为湍动能, ϵ 为湍动能耗散率, G_k 为湍动能产生项, μ_i 为层流黏度系数. C_1 、 C_2 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ϵ 为经验常数, 采用Launder和Spalding的推荐值, $C_1=1.43$, $C_2=1.93$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$.

2.3 边界条件的处理

鉴于4流中间包结构的对称性, 计算时只选取其一半来建模分析.

(1) 中间包钢液面处理为光滑壁面.

(2) 在浸入式水口截面上, 各物理量沿该截面法线方向的导数为零.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = w = 0 \quad (12)$$

(3) 固体壁面上边界条件的处理.

对于近壁区的钢液, 采用壁面函数对其速度和湍流特性参数进行修正.

(4) 入口与出口的边界条件.

在大包长水口内的钢液流动速度垂直于中间包液面向下, 入口速度由拉坯速度及铸坯断面确定, 出口采用压力边界条件.

2.4 计算求解

本文采用FLUENT软件进行求解, 为了使计算结果更精确, 对长水口处的网格进行了加密处理.

2.5 数值模拟结果分析

图2(a)和2(b)分别示出了原型中间包长水口所在的 $Y-Z$ 截面和 $X-Z$ 截面的流场分布. 从图2可以看出, 来自钢包的强注流直冲包底, 到达包底迅速分开. 由于受到侧墙的约束钢液向上运动, 然后由于长水口的卷吸再向中心集中, 形成局部循环. 部分钢液从侧导流孔流出. 由于导流孔的上倾角小, 只有 15° , 流出的钢液大多没有足够的动能到达中间包顶部, 而是直接沿着中间包侧壁迅速回流到中部水口, 少量的流到边部水口, 这使得钢液在中部水口的停留时间短, 和边部水口的停留时间相差大. 而局部循环也不利于夹杂物的充分上浮.

图3(a)和3(b)分别示出了改进型中间包长水口所在的 $Y-Z$ 截面和 $X-Z$ 截面的流场分布图. 钢

液从长水口直接注入湍流控制器的中心后, 在中心区两侧流体向上流动, 到达中间包上部后, 沿着中间包的顶面及侧壁向下流动, 在两侧形成循环区. 与原型不加设湍流控制器相比, 钢液流动的方向发生了变化, 在中间包中的停留时间延长, 且形成的循环区增大, 充分活跃了流场, 为夹杂物的碰撞长大及上

浮创造了很好的动力学条件. 同时由于改进型中间包挡墙增大了导流孔的上倾角, 减小了孔径, 使得从侧导流孔流出的钢液有一个向上的速度, 没有直接沿包底进入边部或中部水口, 而是遇到侧壁后改变运动的方向, 然后流向中部和边部水口, 从而消除了短路流, 也减小了对壁的冲刷.

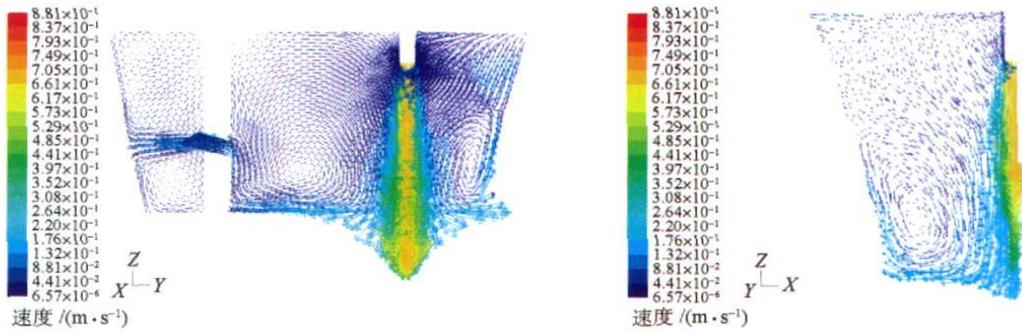


图2 原型中间包长水口所在面的流场分布图: (a) Y-Z 截面; (b) X-Z 截面

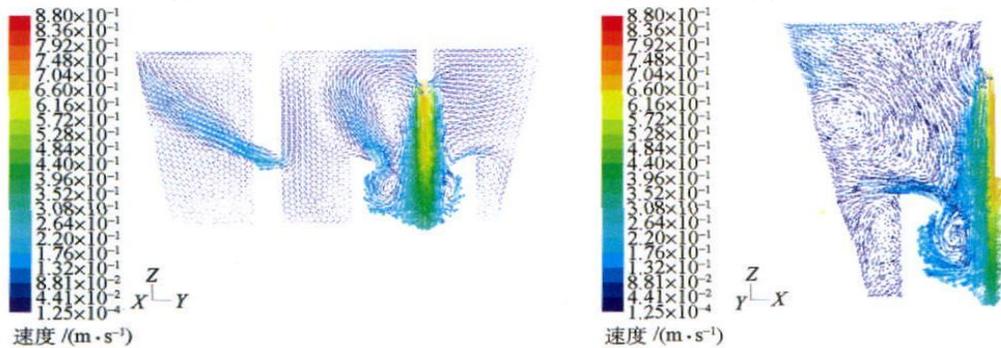


图3 改进型中间包长水口所在面的流场分布图: (a) Y-Z 截面; (b) X-Z 截面

3 工业实验

根据水模型和数值模拟的结果, 对于工业中实际使用的挡墙进行了改进, 并增加了湍流控制器, 其结构尺寸均是水模型尺寸的 2.5 倍.

本生产线的工艺流程为: 70 t 转炉 → LF 精炼炉 → RH → 四流中间包 → 连铸, 对使用原挡墙和改进型挡墙加湍流控制器的生产工艺分别在中间包和铸坯上进行取样分析, 取样钢种为 GCr15, 连铸坯断面 $325 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$. 在每个浇次的第二、三炉的钢包钢水浇铸到一半时, 从中间包中取圆饼样各 2 个进行总氧分析. 在中间包取样结束 30 min 后分别取边部流与中间流的铸坯各一块, 去皮后在内弧四分之一处分别切取气体样、大样和金相样, 按文献 [10-11] 所示方法进行分析、检验, 结果见表 3.

从表 3 看出, 当使用原挡墙控流时, 从中间包到铸坯钢水的总氧含量 TO 由 14×10^{-6} 降为 9.5×10^{-6} , 降低了 32.14%; 而当使用改进型挡墙控流时, TO 由中间包钢水的 16×10^{-6} 降为铸坯的 $9.5 \times$

10^{-6} , 降低了 40.63%, 表明改进型中间包从中包到铸坯 TO 下降较原型明显. 由表 3 也可看出, 针对该厂的中间包结构, 单纯依靠改进控流装置还不足以降低铸坯的总氧.

对于显微夹杂物, 由表 3 可以看出, 使用原型中间包, 铸坯中相当于当量直径 $7 \mu\text{m}$ 的夹杂物平均为 $5.16 \text{ 个} \cdot \text{mm}^{-2}$, 使用改进型中间包, 夹杂物降低到 $5.02 \text{ 个} \cdot \text{mm}^{-2}$, 改进后的中间包较原型中间包略有改善, 且改进后两流间的夹杂物数量差距减小.

对于大型夹杂物, 可以看出使用原挡墙中间包, 铸坯中部流的夹杂物比边部流多, 这和水模型实验是一致的. 因为中部流的滞止时间只有 29 秒, 夹杂物来不及充分上浮. 使用改进型挡墙并加湍流控制器的中间包能够延长滞止时间和实际平均停留时间、减小死区比例, 因而显著降低了铸坯中大型夹杂物的含量. 与使用原挡墙的中间包相比, 大型夹杂物平均含量由 $0.227 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降为 $0.125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降低了 44.9%. 对于改进型中间包, 由于钢液在中部流的滞止时间比在边部流长, 因而中部流铸坯的夹杂物比边部流少.

表3 改进前后 GCr15 试样中洁净度的变化

取样 工序	挡墙 类型	试样 编号	TO/ 10 ⁻⁶	平均 TO/ 10 ⁻⁶	显微夹杂物数量/ (个·mm ⁻²)	显微夹杂物平均 数量/(个·mm ⁻²)	大型夹杂物含量/ (mg·kg ⁻¹)	大型夹杂物平均 含量/(mg·kg ⁻¹)
中包	原型	33Y	12	14				
		34Y	16					
	改进型	22G	18	16				
		23G	14					
铸坯	原型	33 I	11	9.5	4.21	5.16	0.171	0.227
		33 II	11		5.87		0.284	
		34 I	8		4.33		0.170	
		34 II	8		6.21		0.284	
	改进型	22 I	9	9.5	4.77	5.02	0.253	0.125
		22 II	9		4.95		0	
		23 I	10		5.12		0.189	
		23 II	10		5.23		0.056	

注:试样编号中的数字代表炉号, I 代表边部流, II 代表中部流.

4 结论

(1) 水模拟实验表明:原挡墙控流下中间包内存在较大死区,且边部流与中间流之间流体流动特性差异很大,改进型挡墙控流使中间包内液体流动特性得到明显改善,滞止时间、峰值时间和平均停留时间明显延长,死区比例减小,边部流和中部流的流动特性趋于一致.

(2) 数值模拟结果表明:湍流控制器的设置可以改变钢液的流动方向,减小中间包中的短路流.增大导流孔的上倾角、减小侧孔的孔径可以减小钢液对中间包侧墙的冲刷并有助于均衡钢液在不同水口的停留时间.

(3) 工业实验表明:使用改进型中间包能够显著降低铸坯中大型夹杂物的含量,与使用原中间包相比大型夹杂物含量降低 44.9%,但不同类型控流装置的中间包对铸坯中显微夹杂物的数量影响不大.

参 考 文 献

- [1] Kumar A, Mazumdar D, Korla S C. Modeling of fluid flow and residence time distribution in a four-strand tundish for enhancing inclusion removal. *ISIJ Int.*, 2008, 48(1): 38
- [2] Sahai Y, Emi T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. *ISIJ Int.*, 1996, 36(6): 667
- [3] Ruan X J, Li J S, Wang J B, et al. Optimizing of tundish structure in Xingcheng Special Steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2007, 29(suppl.): 138
(阮小江, 李京社, 王剑斌, 等. 兴澄特钢中间包结构优化. 北京科技大学学报, 2007, 29 (增刊): 138)
- [4] Tang H Y, Li J S, Gao J G, et al. Effect of flow control devices of tundish on cleanliness of billets. *J Iron Steel Res Int.*, 2008, 15 (suppl.): 499
- [5] Mao X H. *The Physical and Numerical Simulation for the Optimization of Control Devices in the Tundish* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2008; 54
(茅晓慧. 中间包控流装置优化的物理模拟和数值模拟[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2008; 54)
- [6] Liu Y L. *Simulation Study on Flow Field and Temperature Field Based on Ansys* [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2005; 30
(刘耀林. 基于 Ansys 的中间包流场和温度场的模拟研究[学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2005; 30)
- [7] Zhu M Y. Numerical simulation of the coupled molten steel flow and heat transfer in continuous casting tundishes. *Acta Metall Sin.*, 1997, 33(9): 933
(朱苗勇. 连铸中间包内钢液流动与传热耦合过程的计算机模拟. 金属学报, 1997, 33(9): 933)
- [8] Zhu M Y, Xiao Z Q. Mathematical modeling of three-dimensional flow in continuous casting tundishes. *J Northeastern Univ.*, 1995, 16(4): 352
(朱苗勇, 萧泽强. 连铸中间包内三维流动的数学模拟. 东北大学学报, 1995, 16(4): 352)
- [9] Wang J J, Bao Y P, Qu Y. *Tundish Metallurgy*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001
(王建军, 包燕平, 曲英. 中间包冶金学. 北京: 冶金工业出版社, 2001)
- [10] Tang H Y, Li J S, Wang J B, et al. Study on removal of inclusions from molten steel by blowing during LF refining. *Iron Steel*, 2007, 42(4): 21
(唐海燕, 李京社, 王剑斌, 等. 钢包炉精炼不同吹氩工艺对夹杂物去除效果的研究. 钢铁, 2007, 42(4): 21)
- [11] Dong L R, Liu X H, Wei Y, et al. *Macroinclusions in Steel*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991
(董履仁, 刘新华, 韦远, 等. 钢中大型非金属夹杂物. 北京: 冶金工业出版社, 1991)