

挡墙结构对 46 t 中间包钢液流动特性影响的数值和物理模拟

李 洋 金 焱 冯学武 常正昇 金业磊

(武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘 要 通过采用流体力学软件 FLUENT 进行的数值模拟和几何相似比 1:3 的水模型分别研究了导流孔倾角 30° 的 U 型挡墙和导流孔倾角分别为 20°, 25°, 30° 的 V 型挡墙 4 种结构的挡墙对 46 t 两流 T 型 $\Phi 800$ mm 圆铸坯中间包钢液流动特性的影响, 并采用稳态模拟计算中间包钢液的温度场分布。结果表明, 两种模拟结果有良好的一致性; 使用导流孔倾角 20° 的 V 型挡墙的中间包流动特性最佳, 中间包出口流温差仅为 4.0 K, 整体最大温差为 14.2 K, 停留时间最长为 803.1 s, 死区体积分数最小为 0.09, 更有利去除钢液夹杂物, 提高钢的洁净度。

关键词 46 t T 型中间包 挡墙结构 数值模拟 物理模拟

Numerical and Physical Simulation for Effect of Baffle Structure on Flow Characteristics of Liquid in a 46 t Tundish

Li Yang, Jin Yan, Feng Xuewu, Chang Zhengsheng and Jin Yeilei

(Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The effect of four kinds of baffle structure- U type baffle with guide flow hole angle 30°, and V type baffle respective with guide flow hole angle 20°, 25° and 30° on liquid flow characteristics of liquid in a 46 t T type tundish for casting double strands $\Phi 800$ mm round bloom are respectively studied by numerical simulation with fluid dynamic software FLUENT and with geometric similarity ratio 1:3 water model, and the distribution of temperature of liquid in tundish is calculated by stable simulation. Results show that both simulated results have better consistence; the flow characteristic of liquid in tundish using V type baffle with guide flow hole angle 20° is best, i. e. the temperature difference of flow at outlet of tundish is only 4.0 K, whole liquid max temperature difference is 14.2 K, longest residence time is 803.1 s and dead zone volume fraction is minimum- 0.09, it is available to move inclusions in liquid and enhance cleanliness of steel.

Material Index 46 t T type Tundish, Structure of Baffle, Numerical Simulation, Physical Simulation

连铸中间包流场对钢液中的非金属夹杂物的上浮去除及温度和成分的均匀有着非常重要的作用^[1], 设计合理的控流装置可以改善钢液在中间包的流动特性, 延长钢液在中间包的平均停留时间, 使夹杂物有足够的时间上浮去除^[2,4]。

1 物理模型的建立

1.1 实验条件

研究对象为两流圆坯中间包, 中间包工作容量为 46 t, 稳态浇注液面为 900 mm, 溢流液面 950 mm, 长水口浸入深度 200 mm, 铸坯尺寸 $\Phi 800$ mm 的圆坯。中间包三维结构尺寸和实验装置如图 1。由于该 T 型中间包对称, 所以取中间包的 1/2 示意不同的方案, 其 4 种实验方案如图 2, 不同实验方案使用不同结构的挡墙, 挡墙的结构尺寸如图 3。其中 1# 为“U”型挡墙, 侧墙设置两个斜向上的圆柱导流

孔, 倾角为 30°。2#、3#、4# 挡墙为“V”型挡墙, 斜向上的圆柱导流孔的倾角分别为 20°、25°、30°, 并且该 3 个挡墙安装在中间包的位置不同, 其与中间包水平方向的夹角依次增大。

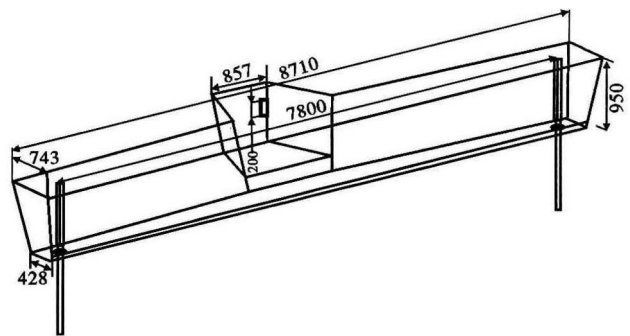


图 1 中间包原型结构尺寸
Fig. 1 Structure size of prototype tundish

通讯作者: 金 焱, 教授, 硕士生导师, 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081
E-mail: lisolitary@163.com

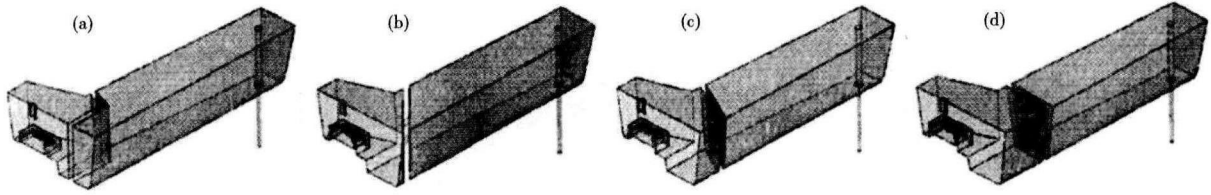


图 2 实验方案示意图: U 型, 导流孔倾角 30°, No1 (a); V 型, 导流孔倾角 20°, No2 (b); 25°, No3 (c); 30°, No4 (d)

Fig. 2 Schematics of experiment scheme: U type, hole angle 30°, No1 (a); V type- hole angle 20°, No2 (b); 25°, No3 (c) and 30°, No4 (d)

1.2 水模型的建立

中间包钢液的流动可视为粘性不可压缩稳态流动, 因此系统只要满足几何相似和动力学相似就可以满足模型和原型相似^[5-6]。中间包内钢水流动与模型中水的流动处于同一自模化区, 因此, 只需 Fr 数相同^[7], 中间包模型与原型的几何尺寸比值 $\lambda = 1/3$ 。即有:

$$gL_m/u_m^2 = gL_p/u_p^2 \quad (1)$$

式中: m 、 p - 中间包的模型和原型; λ - 比例因子; L - 中间包特征长度; u - 流体的特征流速。由式(1)可以得出模型与原型的流速比为 0.577, 流量比 0.064, 平均停留时间比 0.577。

1.3 停留时间分布 (RTD) 曲线计算方法

本实验测量中间包内钢液的平均停留时间分布, 通常应用“刺激-响应”实验技术。通过在中间包长水口流入处输入一个脉冲刺激信号, 信号由示踪剂来实现, 然后在各个出口处测定该输入信号的输出, 即所谓的响应。最后根据各出口测定的响应曲线得到各流钢液在中间包内的停留时间分布, 即 RTD 曲线。各区体积分数能够由下面公式计算得出^[8]。

$$V_p = (\theta_{min} + \theta_{peak})/2 \quad (2)$$

$$V_d = 1 - \theta_{av} \quad (3)$$

$$V_m = 1 - V_p - V_d \quad (4)$$

$$\theta_{min} = t_{min}/t_s \quad (5)$$

$$\theta_{peak} = t_{peak}/t_s \quad (6)$$

$$\theta_{av} = t_a/t_s \quad (7)$$

$$t_a = \frac{\sum tC(t)}{\sum C(t)} \quad (8)$$

$$t_s = V/Q \quad (9)$$

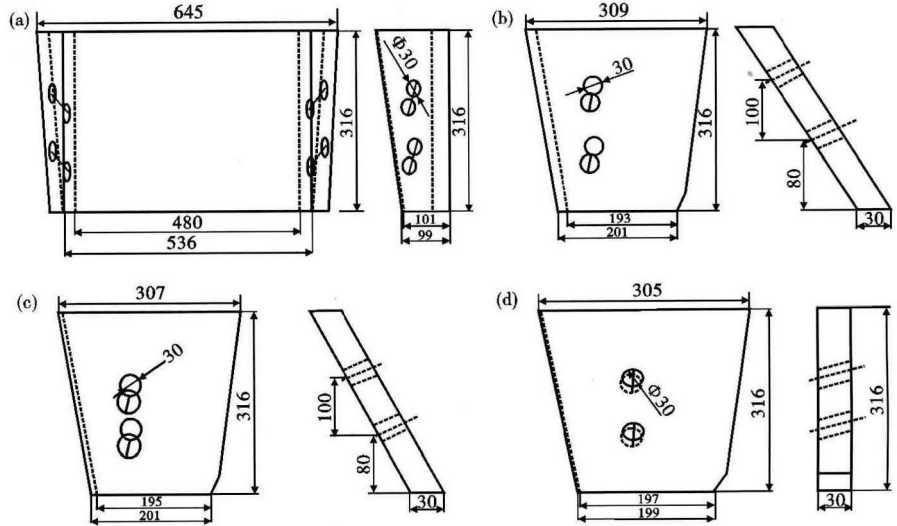


图 3 挡墙结构及主要尺寸示意图: U 型, 导流孔倾角 30°, No1 (a); V 型, 导流孔倾角 20°, No2 (b); 25°, No3 (c); 30°, No4 (d)

Fig. 3 Schematics of structure and main size of baffle: U type, hole angle 30°, No1 (a); V type, hole angle 20°, No2 (b), 25°, No3 (c) and 30°, No4 (d)

式中: θ_{min} - 无量纲响应时间; θ_{peak} - 无量纲峰值时间; θ_{av} - 无量纲活塞区与混流区体积分数之和; t_a - 平均停留时间; t_s - 理论平均停留时间; t_{min} - 响应时间; t_{peak} - 峰值时间; Q - 模型中间包体积流量; V - 中间包模型体积。

2 数值模拟

2.1 基本假设及边界条件

假设及边界条件: 钢液为不可压缩的粘性流体, 忽略温度对钢液密度的影响, 忽略渣层对钢液流动的影响, 中间包传热是稳态传热的过程, 中间包液面设定为自由表面, 剪切力为 0, 对称面法向速度为 0。中间包固体壁面为无滑移壁面, 近壁面采用标准的壁面函数进行处理, 所有法向梯度均为 0。钢水浇注温度设定为 1773 K 及各边界的热流强度见参考文献^[9]。

2.2 数学模型

为了减少数值模拟计算量, 取中间包的 1/2 作为计算区域, 使用大型商业软件 FLUENT 建立中间包

数学模型,并使用 ICEM CFD 画四面体网格,网格数量控制在 40 万个左右。钢液流场、温度场采用稳态计算,其求解连续性方程、动量与能量方程和湍流模型 $\kappa-\varepsilon$ 双方程。示踪剂在 1 s 内从长水口注入中间包,并采用非稳态求解湍流传质方程,方程具体形式参考文献[10]。

3 结果和讨论

3.1 数值模拟与物理模拟验证

通过向无控流装置的中间包中加入示踪剂的方法,验证数学模拟与物理模拟的一致性。无控流装置的中间包的数值模拟与物理模拟 RTD 曲线对比如图 4。由图 4 可以看出,数值模拟与物理模拟得到的 RTD 曲线保持较好的一致性,其响应时间、峰值浓度和峰值时间都能较好的吻合。从物理模拟和数值模拟在 50、100、300 s 的流动状态的试验结果,可以清晰看出 3 个时间点的示踪剂分布情况基本一致。通过数值模拟 RTD 曲线与示踪剂传质的对比,物理模拟结果验证了数值模拟的准确性和可靠性,两种方法也较好的反映了空中间包钢液的实际流动状态。

3.2 数值模拟结果分析

不同实验方案的有控流装置的中间包自由液面与 $Y=0$ 截面的温度等值分布如图 5 所示。可以看出,3#方案和 1#方案自由液面的低温区面积较大,该区域的钢液最低温度仅为 1761 K。经计算可知,1#方案的最大温差为 15.6 K,3#方案最大温差为 14.8 K。在 $Y=0$ 的截面,1#和 3#方案在 X 方向上温降明显,且在出口处附近出现较大面积的低温区域,出口温差(长水口与浸入式水口温度差)分别达到了 6 K 和 5 K。2#方案在 $Y=0$ 截面及自由表面温度梯度明显降低,存在较大面积的等温区,温度分布更加均匀,最大温度梯度仅为 0.2 K,无明显低温区,出口流温降也相应降低。而 4#方案的低温区域主要集中在出水口附近,而且面积较大,这样导致了出口钢液温度过低,不利于连铸生产顺行。

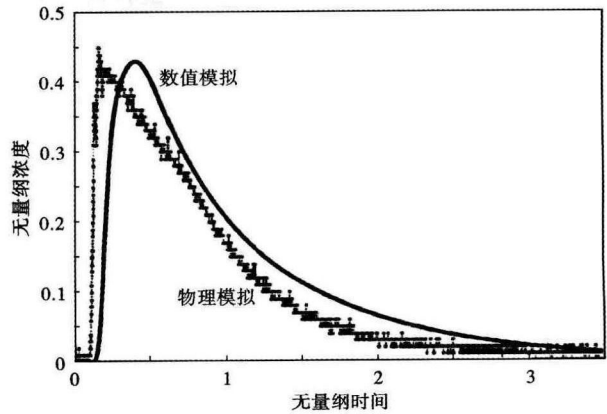


图 4 无控流装置的中间包数值模拟与物理模拟平均停留时间(RTD)曲线对比

Fig. 4 Comparison between physical simulated and numerical simulated average residence time distribution (RTD) curves for without control flow device tundish

综合分析可以得出,2#方案能量损失相比较小,温度分布更为均匀,说明挡墙结构与安装位置较为合理。

3.3 物理模拟结果分析

图 6 是实验测定的不同方案的 RTD 曲线图,表 1 是物理模拟实验 RTD 曲线分析结果。其中 3#方案的无因次响应时间(θ_{min})为 0.088,表明存在严重的短路流,不利于夹杂物上浮。1#和 2#方案无因次

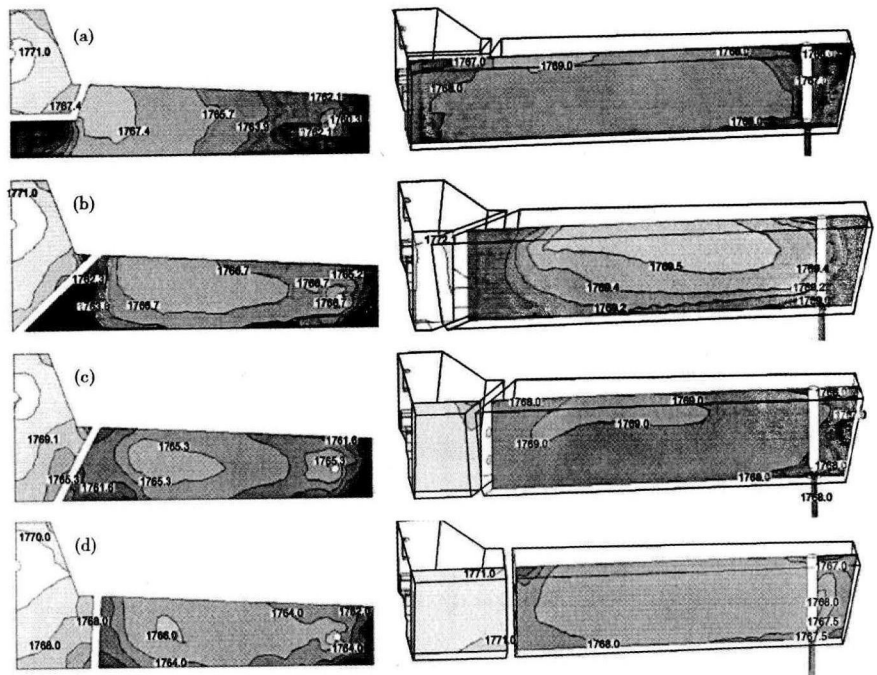


图 5 中间包自由表面与 $Y=0$ 截面的温度等值分布图,方案:U 型,导流孔倾角 30°,No1 (a);V 型,导流孔倾角 20°,No2 (b);25°,No3 (c);30°,No4 (d)

Fig. 5 Distribution of contour of temperature at free surface and section $Y=0$ in tundish: scheme baffle U type, hole angle 30°, No1 (a); V type, hole angle 20°, No2 (b); 25°, No3 (c); 30°, No4 (d)

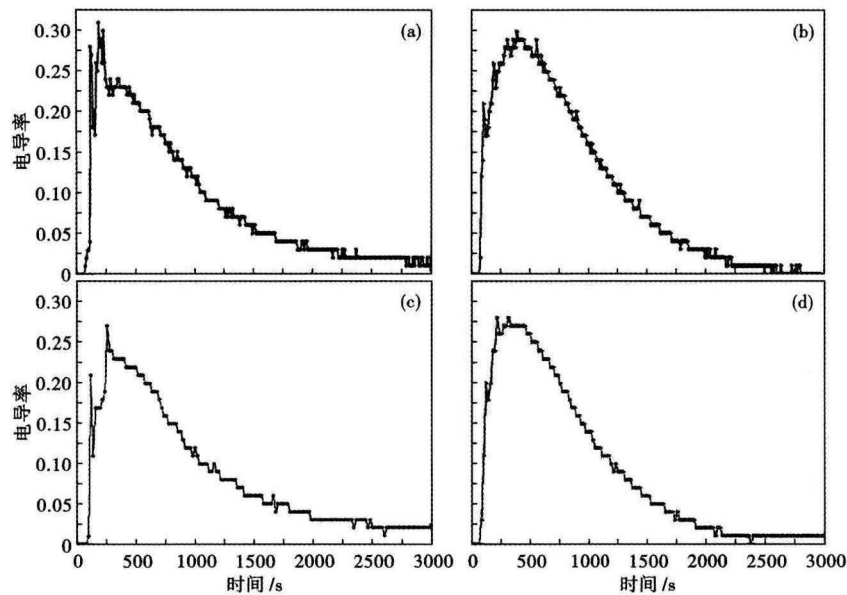


图 6 不同方案的 RTD 曲线对比图, 方案: U 型, 导流孔倾角 30°, No1 (a); V 型, 导流孔倾角 20°, No2 (b); 25°, No3 (c); 30°, No4 (d)

Fig. 6 Comparison between residence time distribution curves of different scheme baffle U type, hole angle 30°, No1 (a), V type, hole angle 20°, No2 (b), 25°, No3 (c) and 30°, No4 (d)

表 1 No1 ~ No4 方案平均停留时间 (RTD) 曲线分析结果
Table 1 Analysis results of average RTD curves for No1 ~ No4 scheme

方案 No	θ_{\min}	t_{\min}/s	t_{peak}/s	t_a/s	V_p/V	V_m/V	V_d/V
1	0.103	89.1	247.5	729.9	0.16	0.69	0.15
2	0.110	94.6	472.5	803.1	0.13	0.78	0.09
3	0.088	76.3	343.0	716.3	0.12	0.72	0.16
4	0.124	107.3	457.5	744.9	0.14	0.73	0.13

注: θ_{\min} - 无因次响应时间; t_{\min} - 滞止时间; t_{peak} - 峰值时间; t_a - 实际平均停留时间; V_p/V - 活塞区分数; V_m/V - 全混流体积分数; V_d/V - 死区体积分数。

响应时间相当, 分别为 0.103、0.110。其中 4# 方案的无因次响应时间与 1# 和 2# 方案相比稍长, 为

0.124。从平均停留时间角度分析, 2# 方案的平均停留时间 (t_a) 最长, 为 803.1 s, 比最短的 3# 方案平均停留时间 716.3 s 提高了 12.1%。平均停留时间最短的 3# 方案势必造成夹杂物没有足够的时间上浮而去除。各方案的死区 (V_d) 和活塞区体积 (V_p) 存在明显差别, 其中 3# 方案的活塞区体积最小。对比活塞区 (PV) 与死区 (DV) 的比例来观察中间包钢液的流动特性, 比例越大说明流场越活跃, 钢液的流动特性越好。其中 1# 方案 $PV/DV = 1.06$; 4# 方案 $PV/DV = 1.07$; 2# 方案的 $PV/DV = 1.44$ 。综合考虑, 2# 方案流动特性相对较好, 有效改善了中间流场。

4 结论

(1) 数值模拟和物理模拟结

果有良好的一致性。

(2) 数值模拟结果表明了使用 2# (导流孔倾角 20° 的 V 型挡墙) 的中间包出口流温差仅 4.0 K, 整体最大温差为 14.2 K, 温度分布更加均匀, 低温区和温度梯度与其他挡墙相比较小。

(3) 物理模拟结果表明, 安装挡墙的中间包比空中间包在响应时间、停留时间和死区体积上都有了很大改善。同样, 导流孔倾角 20° V 型挡墙的 2# 方案停留时间最长, 死区体积最小, 更有利于夹杂物去除和提高钢液的洁净度。

参考文献

- [1] 陈雷. 连续铸钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [2] 陈敏, 张广体, 马振, 等. 五流梯形中间包结构优化 [J]. 过程工程学报, 2009, 9 (增刊 1): 202-205.
- [3] 毕学工, 李宏玉, 刘光明, 等. 基于 RTD 曲线连铸中间包优化设计数值模拟 [J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33 (4): 343-347.
- [4] 郑淑国, 朱苗勇, 王颖. 六流方坯连铸中间包结构优化水模拟实验 [J]. 钢铁研究学报, 2008, 20 (11): 11-15.
- [5] Cho J S, Lee H G. Cold Model Study on Inclusion Removal from Liquid Steel Using Fine Gas Bubbles [J]. Iron and Steel Institute of Japan International, 2001, 41 (2): 151-156.
- [6] Koria S C, Singh S. Physical Modeling of the Effects of Flow Modifier on the Dynamics of Molten Steel Flowing in a Tundish [J]. Iron and Steel Institute of Japan International, 1994, 34 (10): 784-793.
- [7] Sahai Y, Emi T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes [J]. Iron and Steel Institute of Japan International, 1996, 36 (6): 667-672.
- [8] Liu J G, Yan H C, Liu L, et al. Water Modeling of Optimizing Tundish Flow Field [J]. Iron and Steel Research International, 2007, 14 (3): 13-18.
- [9] 钟良才, 王明安, 周小宾, 等. 5 流连铸中间包流场温度场数学模拟 [J]. 过程工程学报, 2011, 11 (1): 26-29.
- [10] Kumar A, Mazumdar D, Koria S. Modeling of Fluid Flow and Residence Time Distribution in a Four-strand Tundish for Enhancing Inclusion Removal [J]. Iron and Steel Institute of Japan International, 2008, 48 (1): 38-47.

李洋 (1988-), 男, 硕士研究生 (武汉大学), 2012 年攀枝花学院 (本科) 毕业, 连铸中间包冶金新技术研究。

E-mail: Lisolitary@163.com

收稿日期: 2014-04-26