

## 板坯连铸中间包钢液流场的数值模拟和操作优化

贾凌锋 孙于萍 乐可襄

(安徽工业大学冶金与资源学院, 马鞍山 243002)

**摘要** 以济钢第一炼钢厂 4# 板坯连铸中间包为原型, 应用湍流流动数学模型对不同堰坝设计方案进行计算机数值模拟, 优化中间包的堰坝设计。结果表明, 对上口面积 3 500 mm × 800 mm、底部面积 3 200 mm × 650 mm 的中间包, 包内钢水深度为 800 mm 时, 当挡堰高 550 mm, 挡坝高 350 mm, 挡堰与水口入口处距离 800 mm, 挡堰与挡坝相对距离 400 mm 时, 钢液具有较好的流动方式, 有利于夹杂物上浮。

**关键词** 板坯连铸 中间包 钢水流场 数值模拟

## Numerical Simulation of Flow Field of Molten Steel in Tundish for Slab Concasting and Operation Optimization

Jia Lingfeng, Sun Yuping and Yue Kexiang

(Metallurgy and Resources School, Anhui University of Technology, Maanshan 243002)

**Abstract** Taking tundish for No4 Slab concaster at No1 steel plant, Jinan Steel, computer numerical simulation for different weir and dam design scheme was carried out to optimize design of weir and dam in tundish by using turbulent flowage math model. Results showed that for tundish with top dimensions 3 500 mm × 800 mm, bottom dimensions 3 200 mm × 650 mm and molten steel depth in tundish 800 mm, molten steel had better flowage condition as weir height 550 mm, dam height 350 mm, distance between weir and nozzle entrance 800 mm and relative distance between weir and dam 400 mm, it was available inclusions floating off.

**Material Index** Slab Concasting, Tundish, Steel Flow Field, Numerical Simulation

### 1 模型的建立及计算方法

本实验计算模型针对济南钢铁集团总公司第一炼钢厂的 4# 板坯连铸中间包, 中间包钢水入口、出口位置在中间包中间对称面上, 相距 2 680 mm, 中间包内钢水的深度 800 mm, 中间包上口面积为 3 500 mm × 800 mm, 底部面积为 3 200 mm × 650 mm。将平行于中间包底部长度的方向定为  $x$  轴, 垂直于中间包自由液面的方向定为  $y$  轴, 底部宽度方向定为  $z$  轴, 中间包底面中心定为坐标原点。取  $x-y$  截面作为模拟对象。

设中间包内的钢水流动为稳定态, 忽略表面渣层的影响, 钢水面为自由表面, 包内钢水的流动为湍流流动, 描述钢水流动的的基本微分方程有<sup>[1]</sup>:

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

Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

湍流模型采用 Launder 和 Spalding 的  $k-\epsilon$  双方程来计算:

湍流动能方程:

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

湍流动能耗散方程:

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

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

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu, \quad \mu_t = C_D \rho k^2 / \epsilon$$

式中:  $\rho$ -密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $u_i, u_j$ -相互垂直  $i, j$  方向湍流时均速度/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $\mu_{\text{eff}}$ -有效粘度系数/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\mu_t$ -湍流动量扩散系数或湍流粘度系数。5 个常数为计算流体力学常用的数值:  $C_1 = 1.43, C_2 = 1.93, C_D = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 。

在自由表面和对称表面上,所有的变量梯度为零,自由表面上  $z$  方向速度  $w = 0$ 。在入口流股处,假设钢水的流动为一维流动,流股的速度方向垂直于自由表面,速度的大小由拉坯速度计算求得,并且假定入口断面上的速度是均匀分布的。在中间包出口处,未做假设。在靠近固体墙的区域,钢水流动的参数变化比内部大得多。所以,在这部分区域里,采用边界层理论来处理速度  $u$ 、 $v$ 、 $w$  和  $k$ 、 $\epsilon$ ,同时在与固体墙相接触的格点上,采用无滑移边界条件。

设计了 12 种堰坝情况(表 1),并对这 12 种堰坝工况进行计算机数值模拟研究。

## 2 计算机模拟结果及讨论

### 2.1 挡堰与水口入口处距离变化对流场的影响

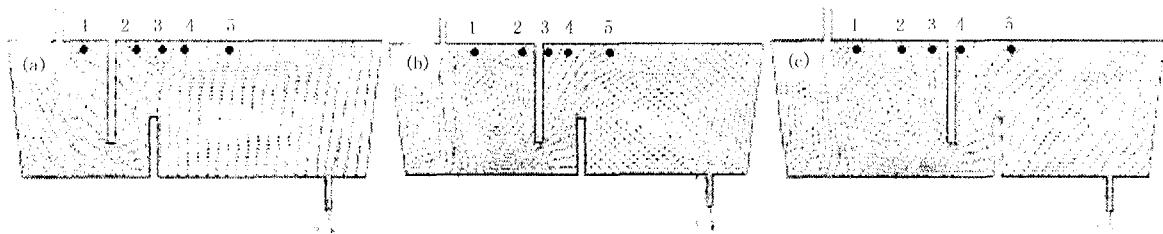


图 1 挡堰与水口入口处距离对钢液的流动状态的影响:(a) 500 mm; (b) 800 mm; (c) 1 100 mm

Fig.1 Molten steel flowage conditions with distance between weir and nozzle entrance 500 mm (a); 800 mm (b) and 1 100 mm (c)

动,一般认为:挡堰右侧区域钢液应在液面下形成一个稳定的层流,此层流应有一定长度,这样夹杂物有更多的上浮机会<sup>[1]</sup>;另一方面该距离变化对挡堰左侧钢液回旋区有一定程度的影响。

在其他参数不变的条件下(表 1),挡堰与水口入口距离为 800 mm 时,钢液的流动状态比较合理(表 2)。距离较小时(500 mm),挡堰左侧形成的循环区较小,钢液流股没有得到很好的铺展(代表点 1 附近区域点),不利于夹杂物的上浮和去除,同时越过挡坝的钢液以较大速度冲击自由液面(代表点 4 附近区域点),对自由液面的扰动较大且不易形成稳定层流,容易造成中间包覆盖剂的卷入和自由液面的裸露。距离增大为 1 100 mm 时(图 2),钢液越过挡坝流向自由液面的速度较小,无法形成均匀、平稳的层流,钢液流经距离短,不利于夹杂物的上浮和去除。

### 2.2 挡堰与挡坝相对距离变化对流场的影响

堰坝相对距离变化主要影响挡堰与挡坝之间的钢液流股向上流动的速度和方向,该速度决定

表 1 堰坝数值计算参数/mm

Table 1 Parameters for numerical calculation of weir and dam /mm

工况编号	挡堰高	挡坝高	挡堰距水口入口距离	堰坝相对距离
A1			500	
A2	600	350	800	400
A3			1 100	
B1				200
B2	600	350	800	400
B3				600
C1	450			
C2	550	350	800	400
C3	650			
D1		150		
D2	550	350	800	400
D3		450		

由图 1 的流场图可以看出,挡堰与水口入口距离改变,一方面影响挡堰右侧区域的钢液流

表 2 挡堰与水口入口距离不同时自由液面下 50 mm 钢液的 5 个代表点(图 1)水平方向速度值/ $m \cdot s^{-1}$

Table 2 Horizontal velocity at 5 characteristic points (Fig. 1) below molten steel free surface 50 mm with different distance between weir and nozzle entrance / $m \cdot s^{-1}$

代表点	位置( $x, y$ )/m	挡堰与水口入口处的距离/mm		
		500	800	1 100
1	(-0.9, 0.75)	0.182 249	0.395 135	0.358 642
2	(-0.6, 0.75)	0.078 925	0.155 606	0.369 745
3	(-0.4, 0.75)	0.120 967	0.066 472	0.247 543
4	(-0.15, 0.75)	0.309 706	0.105 751	0.058 811
5	(0.4, 0.75)	0.383 679	0.362 098	0.331 204

挡堰右侧区域内钢液在液面下能否形成一个稳定的层流<sup>[2]</sup>。由图 3 的流场图可以看出,在其他参数不变的条件下(表 1),比较合适的挡堰与挡坝距离是 400 mm。当堰坝距离较小时(200 mm),中间包内钢液的流动状态不理想<sup>[3]</sup>,图 3(a)中 2, 3 点附近区域的钢液流速较大(表 3),液面波动剧烈,中间包覆盖剂被卷入钢液的可能性增加,同时也加剧了钢液的二次氧化。但当距离增大为 600 mm 时,挡堰右侧沿液面水平流动的钢液流经路径

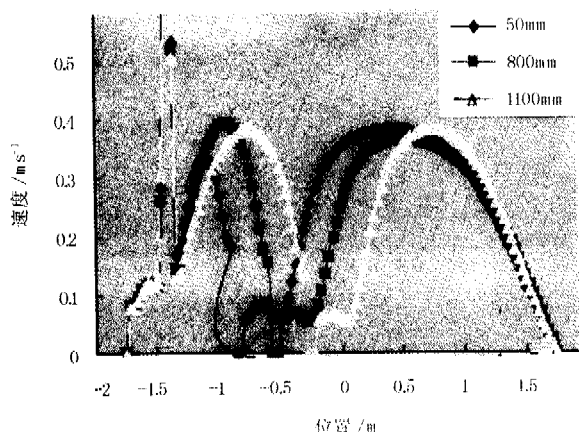


图 2 挡堰与水口入口处距离为 500, 800, 1 100 mm 时自由液面下 50 mm 水平方向的钢液速度分布  
Fig. 2 Horizontal velocity distribution below molten steel free surface 50 mm with distance between weir and nozzle entrance 500 mm, 800 mm and 1 100 mm

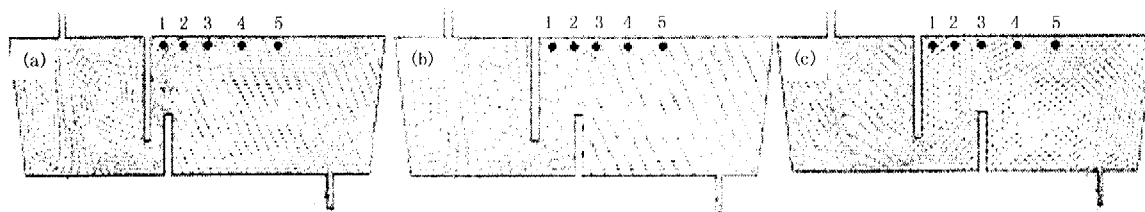


图 3 挡堰与挡坝距离为 200 mm (a)、400 mm (b) 和 600 mm (c) 时钢液的流动状态  
Fig. 3 Molten steel flowage conditions with distance between weir and dam 200 mm (a), 400 mm (b) and 600 mm (c)

表 3 挡堰与挡坝距离不同时自由液面下 50 mm 钢液的 5 个代表点 (图 3) 水平方向速度值/ $m \cdot s^{-1}$   
Table 3 Horizontal velocity at 5 characteristic points (Fig. 3) below molten steel free surface 50 mm with different distance between weir and dam / $m \cdot s^{-1}$

代表点	位置(x, y)/m	挡堰与挡坝的距离/mm		
		200	400	600
1	(-0.4, 0.75)	0.102 193	0.069 673	0.083 96
2	(-0.2, 0.75)	0.307 88	0.071 26	0.099 728
3	(0, 0.75)	0.405 237	0.257 052	0.073 695
4	(0.3, 0.75)	0.426 435	0.368 126	0.308 078
5	(0.6, 0.75)	0.406 011	0.386 249	0.370 05

区域钢液的流动路径和停留时间<sup>[2]</sup>。挡坝高度较小时(150 mm),在右侧斜墙顶部和挡堰右侧顶部存在较大的钢液流速较小区域,易形成死区,同时挡坝右侧流向出口的钢液停留时间短,无法形成相对平稳的层流,不利于夹杂物上浮。高度为 450 mm 时,流向水口方向的钢液绕过挡坝后以 0.411 m/min 较大速度冲击自由液面,不利于保护渣性能的发 挥,还会增加钢液二次氧化的可能。而高度为 350 mm 时,越过挡坝流向水口方向的钢

液以 0.384 m/min 的适中速度流向自由液面,钢液在中间包内流经路径增长,且形成平稳的层流。

### 2.3 挡堰高度变化对流场的影响

当挡堰与水口入口处距离 800 mm、挡堰与挡坝相对距离 400 mm、挡坝高 350 mm,从不同挡堰高度(450, 550, 650 mm)数值计算的结果表明,挡堰高度为 550 mm 时,钢液流动方式较合理。在挡堰高度较小时(450 mm),挡堰不能很好地把钢液注流所引起的湍流流动控制在挡堰左侧水口入口附近,在挡堰左侧形成不规则的流动区域,易形成死区。挡堰高度较大时(650 mm),流向水口方向的钢液由于受到挡堰的作用以较大速度绕过挡坝冲向自由液面,易造成卷渣和钢液二次氧化。

### 2.4 挡坝高度变化对流场的影响

挡坝高度变化主要影响挡堰和挡坝之间钢液流股向上流动的速度和方向,即改变了挡坝右侧

液以 0.384 m/min 的适中速度流向自由液面,钢液在中间包内流经路径增长,且形成平稳的层流。

## 3 结论

通过数学模拟得出,挡堰高 550 mm、挡坝高 350 mm、挡堰与水口入口处距离 800 mm、挡堰与挡坝相对距离 400 mm 时,钢液具有较好的流动方式,有利于夹杂物上浮。中间包经结构与操作优化后,连铸坯中的夹杂物大幅度减少,具有较大的经济效益。

### 参考文献

- 1 贺友多. 传输过程的数值计算. 北京: 冶金工业出版社, 1991
- 2 贺友多, Sahai Y. 不同因素对连铸机中间包流场的影响. 金属学报, 1989, 25(4): 272
- 3 张捷宇, 贺友多, 刘建辉. 首钢中间包优化设计(II). 包头钢铁学院学报, 2001, 20(2): 111

贾凌锋(1981-),男,在读硕士研究生,从事冶金、热能、冶金过程仿真节能技术研究。

收稿日期: 2005-11-16