

## 宽板坯连铸结晶器内钢液流动的数值模拟

沈巧珍<sup>1</sup> 朱必炼<sup>1</sup> 王俊杰<sup>1,2</sup> 杨运超<sup>2</sup>

(1 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;

2 武汉钢铁(集团)公司第三炼钢厂, 武汉 430083)

**摘要** 结合水模型实验,应用商业软件 Phoenics 模拟 230 mm × 2 000 mm 连铸坯结晶器内钢液流场。研究了浸入式水口底型、插入深度、出口倾角等工艺参数对钢液面波动及流股对结晶器窄面冲击力的影响,并用水模型实验进行验证。结果表明,合理的浸入式水口结构尺寸和工艺参数为:凹底结构、插入深度 120 mm、倾角 15°。

**关键词** 宽板坯连铸 结晶器 浸入式水口 数值模拟

## Numerical Simulation of Fluid Flowing in Concasting Mould for Wide Slab

Shen Qiaozhen<sup>1</sup>, Zhu Bilian<sup>1</sup>, Wang Junjie<sup>1,2</sup>, Yang Yunchao<sup>2</sup>

(1 Key laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education,  
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2 No3 Steelmaking Plant, Wuhan Iron and Steel Co, Wuhan 430083)

**Abstract** Flow field of molten steel in 230 mm × 2 000 mm concasting slab mould has been simulated by using commercial software Phoenics combined with water model test. The effect of process parameters such as effect of submerged nozzle bottom structure, immersion depth and outlet angle on wave amplitude of fluid surface and effect of flow strand on impetus at mould narrow side have been studied and verified by water model test. Results showed that available submerged nozzle structure and process parameters are concave bottom structure, immersion depth 120 mm and outlet angle 15°.

**Material Index** Wide Slab Concasting, Mould, Submerged Nozzle, Numerical Simulation

230 mm × (1 350 ~ 2 150) mm 宽板坯连铸机的结晶器形状与断面都有别于炼钢厂内原有铸机,但其水口结构是参照原铸机设计的,生产中铸坯表面纵裂时有发生,且存在结晶器内钢液偏流和窄边液面温度过低的现象,故对结晶器内钢液流动特性进行了研究。

### 1 数学模型的建立

#### 1.1 实验方法

在进行水模型实验时,  $Re_{\text{实物}} = \rho vl/\mu = 3.8 \times 10^4$ ,  $Re_{\text{模型}} = \rho'v'l'/\mu' = 3.0 \times 10^5$ ,模型和实物中的流体均处于第二模化区,因此,只考虑  $Fr$  数相等,就能做到流动相似<sup>[1]</sup>。水模型实验时模型按3:1缩小。

#### 1.2 控制方程

设结晶器内钢液为不可压缩稳态流动,忽略表面渣层影响,钢水面为自由表面,结晶器内流动为湍流流动,该过程钢液流动的基本微分方程有<sup>[2]</sup>:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

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

$k$  方程:

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \times \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$\varepsilon$  方程:

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{(c_1 G \varepsilon - c_2 \rho \varepsilon^2)}{k} \quad (4)$$

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

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t = \mu + \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式(1)~(4)中: $\rho$ -密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $u_i, u_j$ -分别为*i, j*方向的速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $x_i, x_j$ -分别为*i, j*方向的方向矢量/ $\text{m}$ ;  $p$ -压力/ $\text{Pa}$ ;  $g_i$ -重力加速度在*x, y, z*方向的分量( $i = x, y, z$ )/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $G$ -湍流脉动动能的产生/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ );  $\mu_{\text{eff}}$ -有效粘性系数;  $\mu$ -层流粘性系数;  $\mu_t$ -湍流粘性系数;  $k$ -湍流动能/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ );  $\varepsilon$ -湍流动能耗散率/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ )。

$c_1, c_2, c_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  均为经验常数,采用 Launder 和 Spalding 的推荐值<sup>[3]</sup>:  $c_1 = 1.43, c_2 = 1.93, c_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

#### 1.3 边界条件和计算方法

(1)结晶器内自由液面上:把垂直自由液面的速度设为0,其它物理量沿法线方向的梯度设为0;  
 (2)入口边界:对于浸入式水口,可由拉速根据流量平衡原理确定水口钢液流速;(3)出口边界:结晶器出口处为一维流动,各物理量沿该截面法线方向的导数为0;(4)结晶器壁面上:在结晶器内壁面附近的粘性边界层中,湍流计算一般采用低雷诺数的  $k-\epsilon$  模型或壁面函数法。

利用上述微分方程(1)~(4)式及边界条件建立数学模型,应用商业软件 Phoenics 对中间包内的钢液流动进行模拟计算。鉴于结晶器形状的对称性,取结晶器的 1/4 作为计算区域,计算网格数为 45(宽)×11(厚)×50(高)。

## 2 计算结果分析与讨论

### 2.1 结晶器断面宽度对流场的影响

图 1 为原水口,结晶器断面宽度对流场的影响。从图 1 可知,随着结晶器断面的增大,钢流在冲击窄边后形成的回流速度降低。宽断面(230 mm×2 000 mm)时的钢液流动并不理想,冲击深度大且对窄边的冲刷力小而分散,这容易造成夹杂物的穿透深度增加,不利于夹杂物的上浮;同时,较大的断面宽度使得钢流在冲击窄边后形成的回流速度降低,而钢液面的温度是靠钢液交换来稳定的,当交换速度变慢后,导致钢液面温度降低,钢液易结壳。

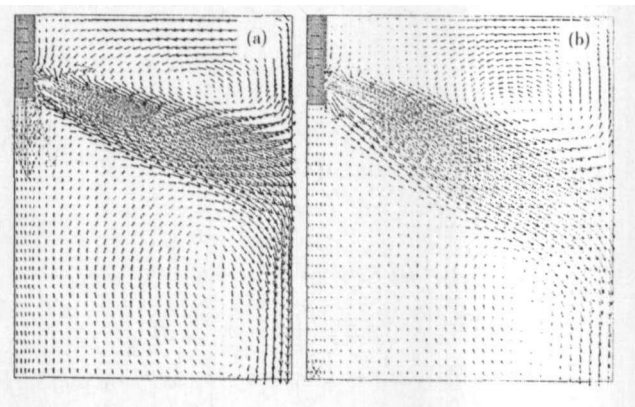


图 1 结晶器断面宽度对流场的影响:铸坯断面(mm)230×1 700(a), 230×2 000 (b)  
 Fig. 1 Effect of width of cross-section on fluid flow in mould; slab section 230×1 700 (a), 230×2 000 (b)

针对该铸机目前生产中存在的问题,设计开发了一种新型的浸入式水口:该水口为变截面收缩式,上部是与原水口形状一致的圆筒型,下部横截面设计为跑道型,中部为从圆筒型到跑道型的过渡段。

这种变截面水口收缩段能使通过滑动水口后的不均匀钢流在短距离范围内达到均匀流动,显著减弱了在浸入式水口出口处偏流的可能性。

利用计算结果重点讨论了结晶器液面湍动能和窄边冲击压力的分布特点<sup>[4]</sup>。

### 2.2 结晶器液面湍动能分析

插入深度、出口倾角和水口底型是影响液面湍动能分布状态的重要因素<sup>[5]</sup>。随着插入深度、下倾角的增加,钢液面湍动能减小,且最大值仍出现在液面靠近窄边区域。

图 2 可见,使用原水口浇铸时,钢液面湍动能过小,钢液回流速度低,导致钢液面温度降低,容易发生保护渣结壳。

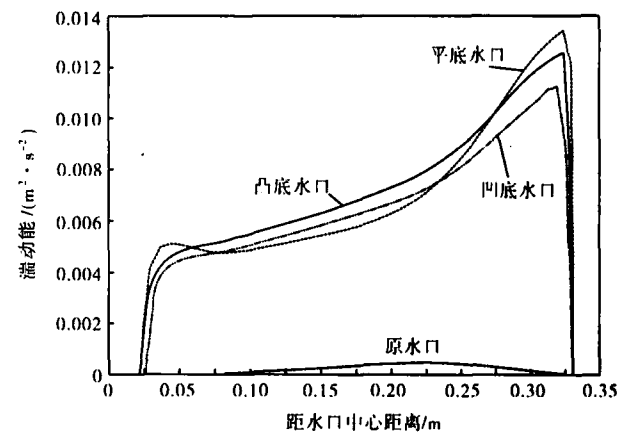


图 2 不同底型水口的液面湍动能分布曲线  
 Fig. 2 Distribution curves of turbulent flow energy at liquid face with different bottom structure of submerged nozzle

拟优化的水口液面湍动能均有较大的改善,但平底水口弯月面过于活跃,液面波动幅度大,容易造成钢液局部裸露,随之产生二次氧化、液面卷渣等问题;凸底水口由于流股从水口上部向下冲到水口底部后,被水口底部的尖叉直接劈成两部分,从而使流股在结晶器内向下的冲击速度大,流股冲击浓度深,总体速度小,对弯月面的扰动减小;对于凹底水口,流股在水口底部的槽内得到缓冲,流股的动能减小,其钢液面波动较平底、凸底水口平缓而较原水口得到了很大的改善,不仅有利于保护渣的熔化,也避免了液面卷渣等问题。

### 2.3 结晶器窄边冲击压力分析

图 3 可见,原水口时冲击点低且冲击点上部的流股冲刷力小,并且有一小区域压力接近于 0,此处的钢液不活跃,容易形成结冷钢现象;优化后的凹底水口,冲击深度上移,流股对窄边底部的冲刷力弱,

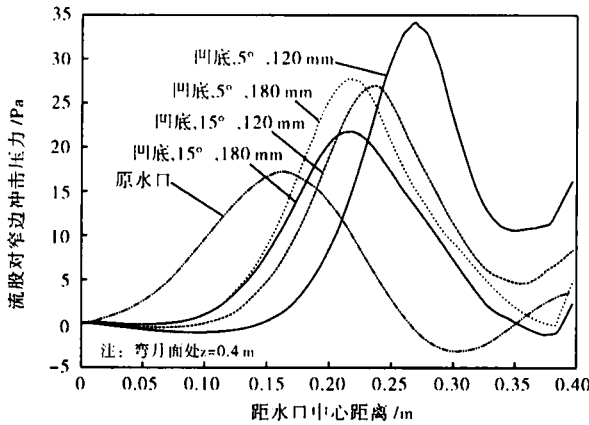


图3 不同水口参数对窄面冲击压力的影响

Fig. 3 Effect of different parameters of submerged nozzle on impact pressure at narrow side

而对上部的冲刷力强,这样既有利于凝固初生坯壳的生长,又能改善钢液流动,有效地防止冷钢的形成<sup>[6]</sup>。

随水口插入深度增加,流股的冲击深度下移,沿水口出口上部窄边的冲刷力急剧变小。当插入深度为180 mm时,弯月面附近冲击压力偏小,此处保护渣容易结壳;同时插入深度的增加对夹杂物的上浮也不利。插入深度120 mm,出口倾角15°时,流股对窄边的冲刷力较插入深度120 mm,倾角5°时的冲刷力平稳,对初生坯壳的均匀生长有利。

2.4 优化后的水口结构及流场图

通过对水口底型结构、插入深度和出口倾角的分析,选出最佳结晶器水口结构尺寸和工艺参数为:凹底结构、插入深度120 mm、倾角为向下15°,流场图如图4所示。

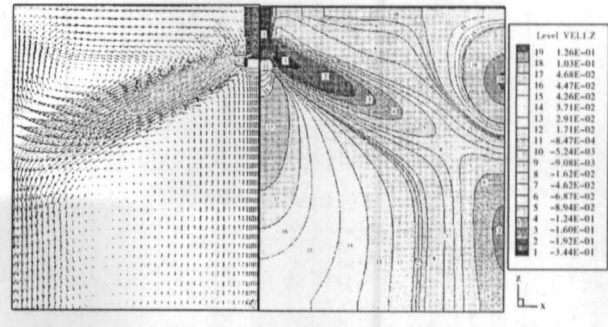


图4 优化水口流场图及 Vz 等值面

Fig. 4 Flow field and Vz contour figure with optimized nozzle

3 物理模拟结果

选取部分水模型实验测量数据与数值模拟计算结果列于表1。由表1可见,水模型和数值模拟的冲击深度及冲击点压力数值接近且变化规律一致;在水模型各种条件下的液面波动范围均控制在0~2 mm时,能够保证液面不卷渣;水口优化前后,流股对窄边的冲击压力及液面湍动能得到了很大改善。

表1 水模型实验数据与数值模拟结果的比较

Table 1 Comparison between water model test data and numerical simulation results

水口类型	角度/°	插入深度/mm	冲击点/mm		平均波高/mm		冲击点动压/Pa		平均湍动能/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> )(数值模拟)
			水模型	数值模拟	边点	中点	水模型	数值模拟	
原水口	15	50	213	243	0.90	0.77	16	16.11	3.06 × 10 <sup>-4</sup>
平底	15	50	208	191	1.03	1.00	23	22.99	8.20 × 10 <sup>-3</sup>
凸底	15	50	213	207	1.30	1.23	20	28.83	7.02 × 10 <sup>-3</sup>
凹底	5	40	173	157	1.50	1.63	38	32.89	8.53 × 10 <sup>-3</sup>
凹底	5	60	196	184	1.30	1.07	26	27.80	6.67 × 10 <sup>-3</sup>
凹底	15	40	183	178	1.00	1.50	31	26.96	6.23 × 10 <sup>-3</sup>
凹底	15	60	198	206	1.13	1.30	23	21.89	6.13 × 10 <sup>-3</sup>

注:表中数据均为模型实验数据;冲击点位置为液面到冲击点距离;平均波高为水模型数据。

4 结论

(1)采用 Phoenics 流体力学软件,模拟计算原水口条件下铸坯断面(mm)分别为 230 × 1700、230 × 2000时的流场情况,结果与现场情况吻合。

(2)宽规格结晶器浸入式水口合理的结构和工艺参数为:凹底结构、插入深度120 mm、倾角为向下15°。

参考文献

1 沈巧珍,杜建明.冶金传输原理.北京:冶金工业出版社,2006  
 2 干勇,仇圣桃,萧泽强.连续铸钢过程数学物理模拟.北京:冶金工业出版社,2001

3 Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flow. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974 (3):269  
 4 马范军,文光华,李刚.板坯连铸结晶器内钢液流动数值模拟.钢铁研究,2000,28(1):10  
 5 Raul Miranda, Miguel Angel Barron, Jose Barreto, et al. Experimental and Numerical Analysis of the Free Surface in a Water Model of a Slab Continuous Casting Mold. ISIJ International, 2005, 45(11):1626  
 6 岳峰,包燕平,刘国林,等.板坯连铸机浸入式水口的结构优化.炼钢,2004,20(2):51

沈巧珍(1954-),女,硕士,副教授,从事冶金传递过程的研究。

收稿日期:2006-11-16