

## 板坯连铸结晶器钢液流场的数学模拟

孙于萍 李 杰 乐可襄  
(安徽工业大学, 马鞍山 243002)

周兰聚  
(济钢集团公司, 济南 250101)

**摘 要** 用 Fluent 流体力学的三维计算软件, 运用湍流脉动动能  $\kappa$  方程和湍流脉动动能散耗率  $\epsilon$  方程的  $\kappa$ - $\epsilon$  双方程模型在给定的数值计算条件下, 对板坯连铸结晶器内钢液的流场进行了模拟研究, 结晶器钢液流场的基本特征为: 在结晶器出口方向存在一个速度较快的水平流, 其冲击到结晶器壁时形成回流, 把结晶器内钢液分割成上下两个回流区。通过数值计算得出, 1 250 mm × 200 mm 板坯结晶器水口合适插入深度为 175 mm, 出口倾角  $16^\circ \sim 18^\circ$  和合适拉坯速度为 1.0 ~ 1.2 m/min。

**关键词** 板坯连铸 结晶器 流场 数学模拟

## Numerical Simulation on Fluid Field in Mould for Slab Concasting

Sun Yuping, Li Jie and Yue Kexiang  
(Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002)  
Zhou Lanju  
(Jinan Iron and Steel Group Co, Jinan 250101)

**Abstract** The fluid field in mould for slab concasting has been simulated using  $\kappa$ - $\epsilon$  double equation model i. e. the turbulent flow pulse kinetic energy  $\kappa$  equation and the turbulent flow pulse kinetic scattering loss rate  $\epsilon$  equation in given numerical calculation conditions by three dimensional mathematical software Fluent. The basic characteristic of fluid field in mould was that there was a horizontal flow at exit of mould, which formed return flow as it impacted the wall of mould to divide the fluid in mould into up return flow and down flow. It is obtained by calculation that the immersion depth of nozzle for mould of 1 250 mm × 200 mm slab 175 mm, the exit angle  $16^\circ \sim 18^\circ$  and the casting speed 1.0 ~ 1.2 m/min are available for slab casting.

**Material Index** Slab Concasting, Mould, Flow field, Numerical Simulation

在板坯连铸过程, 钢液在结晶器内的流场和传热状况对铸坯的质量具有较大的影响<sup>[1,2]</sup>。在采用浸入式水口的场合, 钢液从水口流出, 在结晶器内形成一定的流场, 在湍流严重的情况下有可能导致卷渣、凝固坯壳厚度不均匀, 这些都会对铸坯质量产生不良的影响。因此需了解结晶器内钢液流场的特点, 以便加以适当控制而达到高质量连铸坯的目的。

本文以济钢第一炼钢厂 4# 板坯连铸机结晶器为原型, 用数值计算的方法研究结晶器流场的基本特征, 同时研究不同操作条件对流场的影响。

### 1 模型的建立及计算方法

#### 1.1 三维流动数学模型

济南钢铁集团总公司第一炼钢厂 4# 板坯连铸机结晶器断面 (1 267 ~ 1 276) mm × (207.5 ~

206.6) mm; 浸入式水口倾角为向下  $18^\circ$ ; 水口插入深度 180 ~ 200 mm; 拉坯速度 0.7 ~ 1.0 m/min; 水口出口尺寸 64 mm × 50 mm; 铸坯断面 1 250 mm × 200 mm。本文建立的数学模型取结晶器断面尺寸为 1 250 mm × 200 mm, 将结晶器宽面方向定为 X 轴, 窄面方向定为 Y 轴, 长度方向定为 Z 轴, 对称面的中心点取为坐标原点。为了保证数模边界条件与实际情况相吻合, 将计算区域的长度向 Z 轴方向延长至 2 500 mm 处, 以模拟坯壳出结晶器后内部钢液的继续流动。近似将结晶器看成平行板, 且无倒锥度。网格划分采用多块粘贴, 即将整个复杂的计算区域分为若干个小区域, 每个区域都是规则的形状, 单独划分网格。

#### 1.2 计算条件的简化

为了计算方便,假设结晶器内钢液流动为恒温、稳态、粘性不可压缩流动,结晶器液面无波动,为一个稳定的水平面;忽略传热对流动的影响;忽略因密度变化而引起的自然对流;同时不考虑结晶器振动和化学反应。

### 1.3 控制方程

本文采用  $\kappa$ - $\epsilon$  双方程模型。描述钢水湍流特性的模型有单方程模型、双方程模型等,本文采用  $\kappa$ - $\epsilon$  双方程模型描述湍流流动状态。

描述湍动能的  $\kappa$  方程:

$$\rho U_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\kappa} \times \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + G - \rho \epsilon \quad (1)$$

描述湍动能耗散的  $\epsilon$  方程:

$$\rho U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \times \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{(C_1 G \epsilon - C_2 \rho \epsilon^2)}{\kappa} \quad (2)$$

(1)和(2)式中:

$$G = \mu_t \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

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/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $\mu_{eff}$ -有效粘度系数/ $\text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ;  $\mu_t$ -湍流粘度系数。

方程(2)、(3)中的系数,采用计算流体力学常用的数值:  $C_1 = 1.43, C_2 = 1.93, \sigma_\kappa = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.0$ 。

### 1.4 边界条件

入口位置定义在浸入式水口的出口处,其  $X$  轴和  $Y$  轴方向速度为零,  $Z$  方向速度通过拉坯速度和铸坯断面尺寸、浸入式水口的直径换算得到。

$$V_{入口} = \frac{(V_{拉坯}/60) \times (a \times b)}{\pi \times \left(\frac{1}{2}d\right)^2} \quad (4)$$

式中:  $V_{入口}$ -结晶器水口入口速度/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $V_{拉坯}$ -拉坯速度/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $a, b$ -连铸坯断面尺寸,  $1250\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ;  $d$ -浸入式水口直径,  $50\text{ mm}$ 。

入口处的湍流脉动动能的时均值  $\kappa_{in}$  和湍流脉动动能耗散率  $\epsilon_{in}$  是计算的条件之一,目前还没有很好的取值方法。计算实践表明,入口湍流脉动动能的时均值  $\kappa_{in}$  和入口湍流脉动动能耗散率  $\epsilon_{in}$  的取值对二维模型中的结晶器流场有影响,但对三维模型流场作用不大,尤其当湍流强度很高时,  $\kappa_{in}, \epsilon_{in}$  的取值对流场的影响更弱。水口入口处的

的  $\kappa_{in}, \epsilon_{in}$  值按下式取值:

$$\kappa_{in} = 1.5(i \cdot u_{in})^2 \quad (5)$$

$$\epsilon_{in} = \frac{k_{in}^{1.5}}{0.3D} \quad (6)$$

式中:  $u_{in}$ -水口出口处的平均流速;  $i$ -湍流强度,取值为  $0.037$ ;  $D$ -入口处的水力学直径 ( $D = (4A \text{ 面积})/P \text{ 周长}$ )。

出口边界条件采用质量边界条件,即出口处与入口处质量守恒。模型计算取实际模型的一半,取结晶器中心垂直于结晶器宽边的垂直面为对称面。在对称面处各变量法向分量为零。在结晶器壁处垂直于结晶器壁的速度分量为零,而平行于结晶器壁的速度分量采用无滑移边界条件,即粘度设为无穷大。在靠近结晶器壁的接点上,平行于结晶器壁的分量由壁面函数确定。

### 1.5 计算方案和步骤

根据钢厂的工艺情况制定相应的实验方案见表1,模拟计算所确定的工作参数范围适当加宽。

表1 数值计算条件  
Table 1 Numerical calculation conditions

编号	工况条件		
	拉坯速度/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	水口插入深度/ $\text{mm}$	水口倾角(向下)/ $^\circ$
A	6个水平	180	18
B	1.0	6个水平	18
C	1.0	180	6个水平

根据表1数据,进行A, B, C三级数值计算,分别为:(1) A组计算把拉坯速度作为影响结晶器内钢液流场的因素进行数值模拟,考虑6个水平:  $0.6\text{ m/min}, 0.8\text{ m/min}, 1.0\text{ m/min}, 1.2\text{ m/min}, 1.4\text{ m/min}, 1.6\text{ m/min}$ ; (2) B组计算把浸入式水口插入深度作为影响结晶器内钢液流场的因素进行模拟,亦考虑6水平:  $125\text{ mm}, 150\text{ mm}, 175\text{ mm}, 200\text{ mm}, 225\text{ mm}, 250\text{ mm}$ ; (3) C组计算把浸入式水口倾角作为影响结晶器内钢液流场因素进行数值模拟,同样为6水平:  $12^\circ, 14^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 22^\circ$ 。建立好模型控制方程和边界条件后,应用Fluent软件进行计算。计算主要分为3个步骤,即前处理(pre-过程)、求解(解决)、后处理(发送-过程)。

## 2 计算结果及分析

### 2.1 结晶器内流场的基本特征

如图1所示,板坯结晶器流场基本特征为:

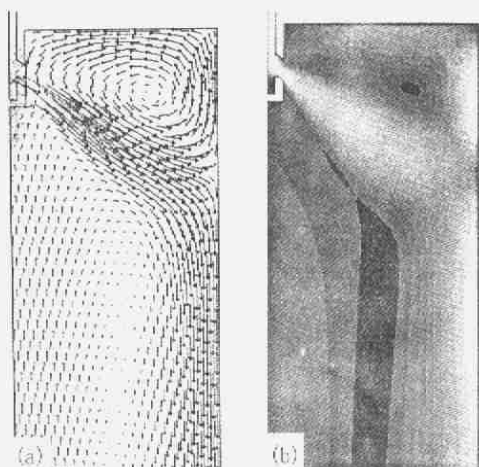


图 1 板坯连铸结晶器内流场图:(a) 流场迹线图;(b) 流场云图

Fig.1 Flow field of mould for slab casting (a) trace of flow field; (b) cloud of flow field

(1) 水平流区域。在水口方向有一个基本水平的冲击流;这一水平流从水口一直延伸到结晶器壁,把结晶器内钢液流场分为上下两个区域。(2) 上回流区。水平流碰到结晶器的窄面后改变方向,分成向上和向下两个流股。其中向上的流股在结晶器上部形成一个较小的回流区,这个回流区对夹杂物的去除有一定的影响,同时输送热量使结晶器保护渣熔化。在这一区域,如沿结晶器壁向上运动的钢液流速太大,则会产生湍流扰动,使保护渣卷入钢液。(3) 下回流区。向下的流股可达到一定冲击深度(可达 2~2.5 m)后,然后回流流向中心,其强度随着向下距离的延伸而减弱。

2.2 影响流场因素的分析

2.2.1 插入深度

图 2 给出了插入深度为 125 mm、175 mm、225 mm 的计算结果,比较合适的插入深度为 175 mm 左右。当插入深度较浅如 125 mm 时,上回流区小,高温钢液对上部供热多,熔化保护渣有利,但是向上回流速度快,计算显示:此时速度比插入深度为 200 mm 和 225 mm 时的速度高出 50% 左右(图 3)。这样使结晶器液面存在扰动,容易卷渣;当插入深度在 200 mm 以上时,熔池表面附近向上运动的回流区变的越来越大,使得液面的湍流减弱,对熔池表面的扰动减弱,可以避免结晶器保护渣卷入,但同时出口钢液冲击深度在下移,向下流动钢液的回流涡心在下降,如图 4 所示,减少夹杂物和气泡排除的机会<sup>[3]</sup>。

2.2.2 出口倾角

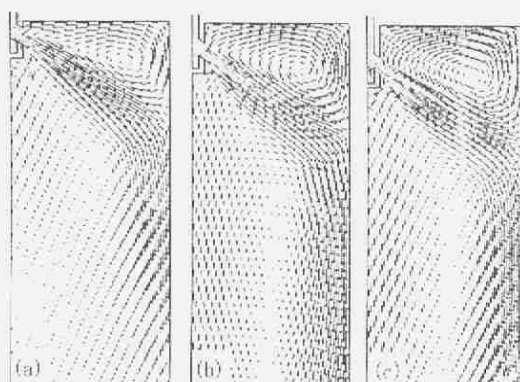


图 2 插入深度(a) 125 mm,(b) 175 mm,(c) 225 mm 对流场的影响

Fig.2 Effect of immersion depth (a) 125 mm, (b) 175 mm and (c) 225 mm on flow field

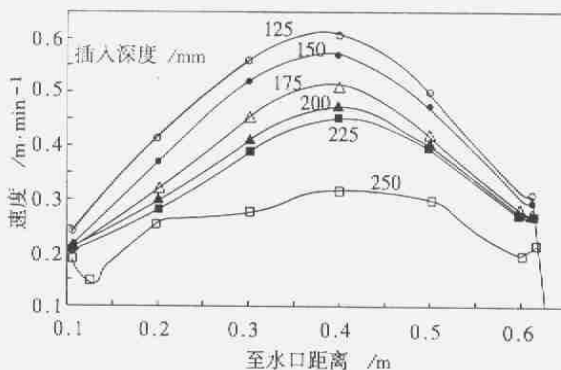


图 3 插入深度变化对结晶器中自由液面附近速度的影响

Fig.3 Effect of immersion depth on flow velocity at free fluid surface in mould

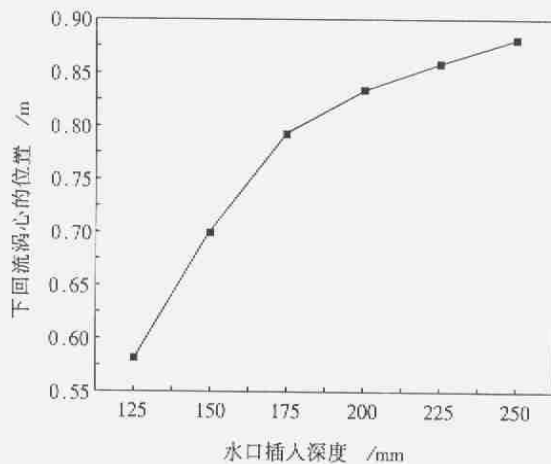


图 4 水口插入深度对下回流区涡心位置的影响

Fig.4 Effect of immersion depth of nozzle on position of down return flow core

水口插入深度为 180 mm、拉坯速度为 1.0 m/min 时,从水口的倾角改变时(出口倾角为 12°、

16°和20°)数值计算的结晶器内流场情况表明,在16°~18°范围流场较合理,倾角过大过小都不利于形成合适的流场。当水口倾角增大时,流股出口角度下倾,流股的冲击深度增加;上、下两个回流区的涡心位置下移。这样减少了结晶器内钢液面的波动,减少保护渣卷入钢液的机会。但随着流股的冲击深度的增加,钢液中夹杂物的排除比较困难<sup>[4]</sup>。另一方面,随着上回流区涡心下移,高温钢液向液面输送热量不足,会影响保护渣熔化和形成良好的渣膜。但是当出口倾角减小时,上下回流区的涡心上移,向上部输送热量较多,保证保护渣形成液态;同时也可以促使夹杂物上浮去除。不利一面是造成液面扰动,形成湍流,使卷渣的可能性增大。特别在弯月面处,由于速度方向改变扰动因素更大。另外向下倾角较小时,还会对窄面新形成的固相造成熔断,使凝固坯壳厚度不均匀。

### 2.2.3 拉坯速度

从浸入式水口插入深度为180 mm、水口出口倾角为18°拉坯速度改变时数值计算的结果可得,拉坯速度变化时,流场的特征表现为:出口附近的水平流股更加集中,速度更大,因而对夹杂物的行为和凝固传热产生一定的影响。随着拉坯速度的增大,结晶器内钢液的流速也随之增大,使夹杂物的上浮更加困难;同时射流对窄面的冲击增强,从而减缓了凝固坯壳的生长速度<sup>[5]</sup>;另外拉坯速度增加时,浸入式水口钢液出口速度增加,流量增加,对上部钢液抽引力较大,因而向上回流的速度增大,见图5。这样对液面的冲击增强,从而导致液面的波动,易于造成保护渣的卷入和钢液面的裸露。计算结果并结合实际情况以选择拉速1.0~1.2 m/min较好。

## 3 结论

(1) 板坯结晶器钢液流场基本特征为:沿出口方向形成水平流,其速度较快温度较高;此流股冲击到结晶器壁时形成上下两个回流区。

(2) 浸入式水口合适插入深度为175 mm,当插入过深时,回流区涡心下移影响保护渣的熔化

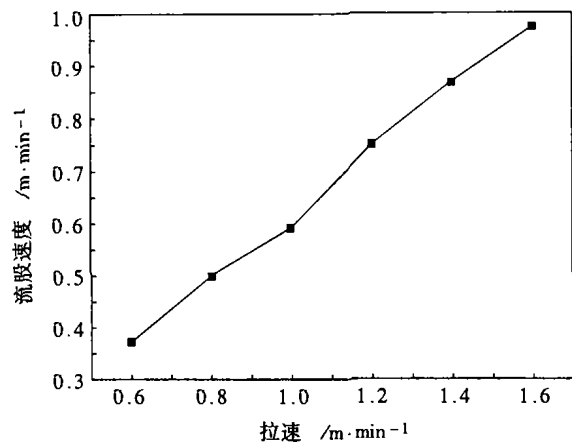


图5 拉速变化对上流股速度的影响  
Fig.5 Effect of casting speed change on up flow velocity

形成液膜。

(3) 水口倾角较小时,上回流区中心上移,这样保护渣化渣条件较好,但是由于回流区靠近上部,扰动液面造成卷渣;合适倾角为16°~18°。

(4) 拉坯速度较大时,上下两个回流区涡心均下移,对夹杂物上浮不利;同时拉速过大会造成上回流区钢液向上流动速度过大,对液面造成扰动。在本实验的条件下合适的拉速为1.0~1.2 m/min。

### 参考文献

- 1 马范军,文光华,李刚.板坯连铸结晶器内钢液流动数值模拟.金属学报,2000,36(4):399
- 2 包燕平,张涛,蒋伟,等.板坯连铸结晶器内钢液流场的三维数学模型.北京科技大学学报,2001,23(2):106
- 3 雷洪,朱苗勇,邱同榜,等.板坯连铸结晶器流场优化.炼钢,2000,16(3):29
- 4 陈永范,陈德杰,李权.大板坯连铸结晶器流场实验研究.炼钢,1998,14(2):25
- 5 包燕平,朱建强,蒋伟,等.薄板坯连铸结晶器内流场的三维数值模拟.北京科技大学学报,2000,22(5):409

孙于萍,女,25岁,在读硕士研究生,2003年毕业于安徽工业大学建筑环境与设备工程专业。从事冶金、热能、冶金过程仿真节能技术研究。

收稿日期:2004-10-18

热烈祝贺湖北省科学技术期刊编辑学会,进入全国首批  
先进社团500强行列。