

# 中厚板连铸结晶器流场的数值模拟

王峭兵<sup>1</sup>, 李建超<sup>1</sup>

(1 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:** 本文以中厚板连铸电磁搅拌结晶器为模拟对象, 利用  $k-\varepsilon$  双方程模型、多相流模型、VOF 模型等, 推导出中厚板坯电磁搅拌下其不同的工艺参数对其流场的影响规律。研究表明: 随着拉速的增加, 射流撞击点的位置下降, 回流区中心的深度下降, 波高增加; 随着水口浸入深度的增大, 射流撞击点的位置下降, 回流区中心的深度下降, 波高减小; 随着水口倾斜角度由  $5^\circ$  到  $15^\circ$  时, 射流撞击点的位置下降, 回流区中心的深度下降, 波高减小。

**关键词:** 中厚板; 流场; 数值模拟

中图分类号: TF777.1

## The numerical simulation of the flow field with slab continuous casting mold

Shaobing Wang<sup>1</sup>, Jianchao LI<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Inner Mongolia Hohhot 010051, China)

**Abstract:** Taking in slab continuous casting mold electromagnetic stirring as simulation object, Make full of the  $k-\varepsilon$  process model, the multiphase flow model and the VOF model etc, For this can deduced the thick slab under the different electromagnetic stirring the influence law of process parameters on the flow field. The result show that: With increasing casting speed, the jet jumping position and the circumfluence center decrease, while the wave height increases; With increasing SEN, the jet jumping position and the circumfluence center decrease, at the same time the wave height decreases; With increasing SEN angle  $5^\circ$  to  $15^\circ$ , the jet jumping position and the circumfluence center decrease, at the same time the wave height decreases.

**Key words:** The Medium plate; The flow field; The numerical simulation

### 1 引言

连铸过程是一个复杂的流动、传热、凝固等复杂现象的综合过程。结晶器内的钢液流动状态应保证具有良好的传热能力, 使凝固的坯壳均匀生长和保护渣充分熔融, 并且促使钢液的流股冲击深度有利于夹杂物的上浮, 同时降低高拉速下钢液与保护渣发生卷渣现象的可能。因此, 合理的保证结晶器内钢液的流场分布情况, 对于提高和改善连铸坯的最终质量是至关重要的。

随着连铸技术的发展, 对于结晶器的流动过程的设计优化已经越来越受到重视, 目前的研究方法主要是水模型实验和数值模拟<sup>[1-11]</sup>。考察了诸如拉速、浸入式水口的深度、水口倾角和过热度等工艺参数对流场的影响。

### 2 数值计算方法

#### 2.1 基本假设

在研究中厚板连铸结晶器内的钢液流动行为, 我们主要采用数值模拟的方法, 建立中厚板的数学模型。在进行数值模拟时, 由于钢液的流动是十分复杂的物理化学变化, 针对其特征对结晶器流体作出如下的假设条件:

<sup>1</sup>基金名称: 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2014MS0545)

作者简介: 王峭兵 (1989-8), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向: 电磁冶金新技术, E-mail: 543922163@qq.com。

- (1)在结晶器内流动的钢液按均相介质处理；
- (2)通常情况下，钢液在结晶器内的流动认为是不可压缩的粘性流动；
- (3)不考虑已凝固坯壳和振动对钢液流动的影响，忽略结晶器壁的倾斜效果；
- (4)不考虑结晶器渣层和锥度对流场和温度场的影响；
- (5)忽略结晶器内初生坯壳对流体流动的影响。

## 2.2 边界条件

本次试验所建立的模型如图 1 所示，采用板坯的 1/4 模型作为研究对象。在进行数据处理时，采用非均匀的网格，即一些流体的敏感区域采用细化网格，而一些变化缓慢的区域采用粗网格。

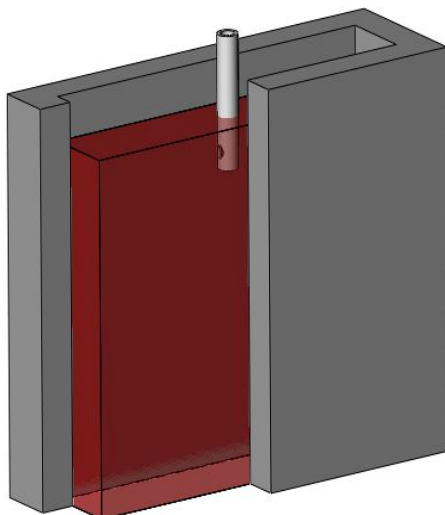


图 1 结晶器模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the model for the mold

(1)入口边界条件：入口位置在中厚板坯的上表面中心处，钢液通过浸入式水口浇注到结晶器内，入口处的温度设置为钢水的浇注温度，此时应该将入口的边界条件设定为 velocity-inlet，速度大小可以利用质量守恒原理来求解，方向与重力方向同向。

(2)出口边界条件：结晶器底部设为出口，此时结晶器内部的物质为钢液，出口的边界条件设定为 outflow，方向与重力同向，大小为拉速；

(3)空气边界条件：空气的上表面看做为对称面，边界条件设定为 symmetry，当钢液液面进行波动时，不受空气上表面对流与传热的影响；空气的下表面为空气相和钢液相的交界面，边界条件设定为 interior。

(4)结晶器壁面：结晶器和水口壁面的边界条件设定为无滑移边界，近壁处处理依据标准壁面函数，水口壁面边界条件为绝热条件，结晶器壁面处的温度以钢液液相温度为标准。

(5)各相的初始化：在进行求解计算时，应该将模型初始化，在进行数值模拟。

## 2.3 控制方程

我们知道钢水在结晶器内的流动是以湍流流动的方式进行的，由于其具有耗散性、三维性、不规则性等特点，因此，在进行细致的分析钢液在结晶器内的流动行为有质量守恒方程、动量方程（N-S 方程）和  $k-\varepsilon$  湍流方程，

(1)质量守恒方程：

$$\partial(\rho\mu_i)/\partial x_j = 0 \quad (1)$$

(2)动量方程：

$$\rho\partial(\mu_i\mu_j)/\partial x_i = -\partial p/\partial x_i + \partial/\partial x_i(\mu_e\partial\mu_j/\partial x) + \partial/\partial x_j(\mu_e\partial\mu_i/\partial x) + \rho g_i \quad (2)$$

(3)湍动能( $k$ )方程:

$$\rho \partial(\mu_i k) / \partial x_i = \partial / \partial x_i [(\mu_e + \mu / \sigma_k) \partial k / \partial x_i] + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

(4)湍动能耗散率( $\varepsilon$ )方程:

$$\rho \partial(\mu_i \varepsilon / \partial x_i) = \partial / \partial x_i [(\mu_e + \mu / \sigma_e) \partial \varepsilon / \partial x_i] + C_1 G \varepsilon / k - C_2 \rho \varepsilon^2 / k \quad (4)$$

式中  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_u$ 、 $\sigma_k$  和  $\sigma_e$  分别为经验常数，其值见表 1。

表 1  $k - \varepsilon$  方程模型中的常数

Table 1 Constant in the equation model for the  $k - \varepsilon$

$C_1$	$C_2$	$C_u$	$\sigma_k$	$\sigma_e$
1.44	1.92	0.09	1.3	1.0

在研究液面波动时，采用 VOF 的方法模拟结晶器自由液面（保护渣—液界面），其可用自由表面体积函数  $F$  表示：

$$F = \begin{cases} 1 & \text{流体充满了计算网格} \\ 0 & \text{为空网格} \\ 0 \sim 1 & \text{自由表面网格} \end{cases}$$

根据界面通过的流量，确定自由液面的移动情况，然后根据计算所得到的体积函数，构造出保护渣—钢液界面。

### 3 结果与讨论

本次数值模拟所采用的中厚板尺寸为：长度 1400×宽度 200×高度 2000mm，浇注口的内/外径为 40/60mm。模拟出在不同的水口浸入深度、拉速、水口倾角下，其流场的分布和自由液面的速度情况，选择合适的工艺参数。

#### 3.1 水口浸入深度的影响

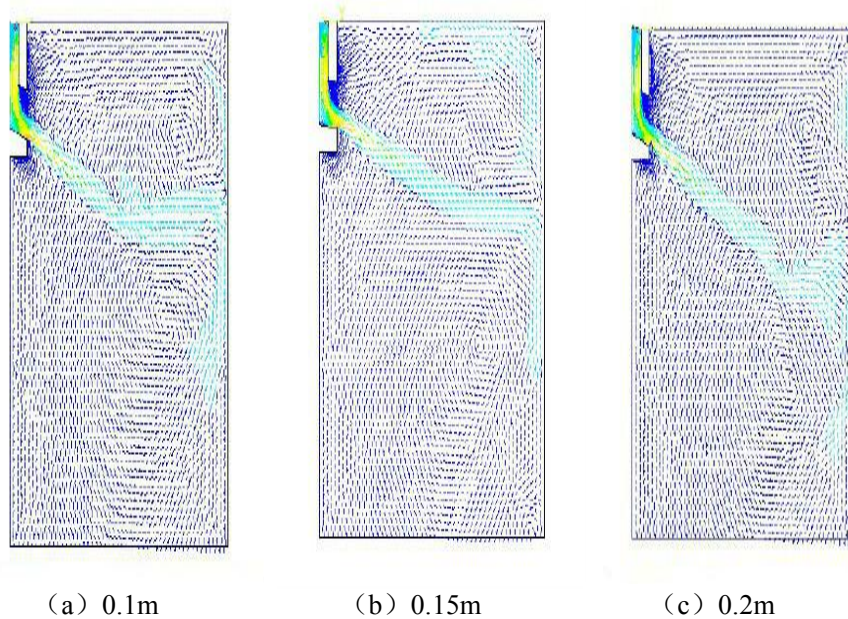


图 2 不同浸入深度的情况下的流场分布

Fig.2 The flow field distribution of the different immersion depth

图 2 表示在拉速为 1.5 m/min、倾角为 10°时，水口的浸入深度分别为为 0.10 m、0.15 m 和 0.20 m 的情况下流场的分布情况。由图 2 可知：伴随着水口浸入深度的不断增大，在结晶器内的钢液其流场特征没有发生明显的变化，但是通过观察，我们可以得到从水口侧孔流出的钢液对铸坯窄面的冲击点位置向下移动，但是冲击的强度没有得到改善，下回流的涡流中心向下移动，因此夹杂物上浮比较困难，影响了坯壳的均匀化生长，迫使坯壳在拉出结晶器时容易发生拉漏现象。但是与此同时，水口浸入深度的增大，液面波动减小，液面保护渣发生卷渣的可能性降低。

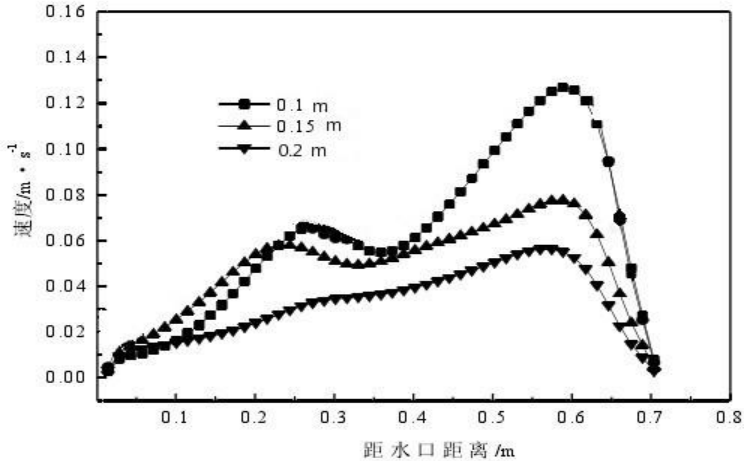


图 3 不同浸入深度的情况下自由液面的速度分布

Fig.3 The free liquid surface velocity distribution of the different immersion depth

由图 3 可见，水口浸入深度在 0.10m 时，结晶器自由液面处的最高速度可达 0.15m/s，这样钢液上部剧烈波动而极易造成保护渣卷渣现象和钢水的裸露使钢液发生二次氧化；当水口的插入深度达到 0.2m 时，此时钢液向上回流的距离增大，发生这种状况时，可能会导致钢液对上端保护渣由于供热不足而造成化渣不能熔融，起不到润滑的作用。综合流场和自由液面的速度考虑，设计水口浸入深度应该取 0.15m 较为合理。

### 3.2 拉速的影响

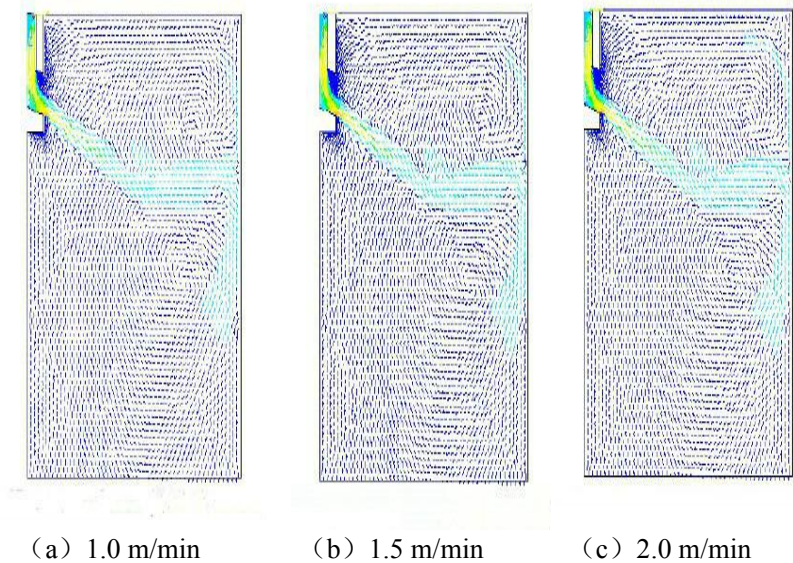


图 4 不同拉速的情况下的流场分布

Fig.4 The flow field distribution of the different drawing speed



图 4 表示在水口浸入深度为 0.15m、倾角为 10°时，拉速分别为 1.0 m/min、1.5m/min 和 2.0m/min 下钢液的流场分布。由图 4 可知：随着拉速的不断增大，结晶器内的钢液流动速度明显增大，从流股冲出水口的轨迹和形状来看，拉速增加以后，主流股对结晶器铸坯窄面的冲击强度将会增大，钢液主流股对铸坯窄面的冲击点位置将会逐渐下移，此时液面波动较小。

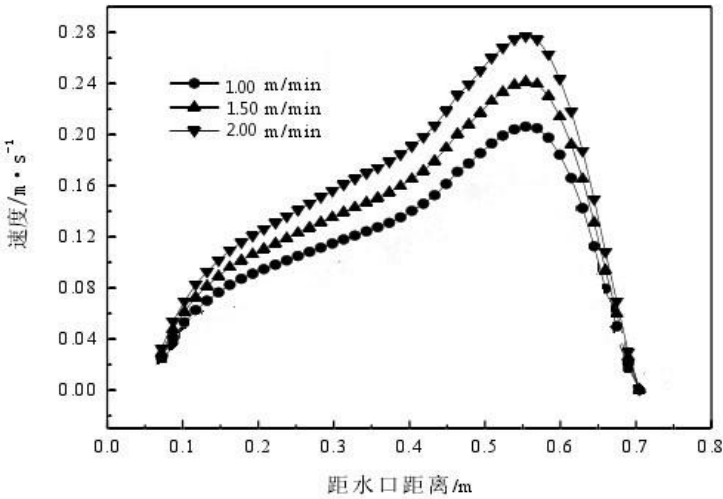


图 5 不同拉速情况下自由液面的速度分布

Fig.5 The free liquid surface velocity distribution of the different drawing speed

图 5 显示了不同拉速下钢液自由液面的表面速度分布。由图可得随着拉速增大，自由液面的速度增大，撞击结晶器窄面越强烈，将会导致自由液面附近的湍动能和速度随之增大。拉速在 2.0 m/min 时，钢液自由液面的速度高达 0.28m/s，此时自由液面将会剧烈波动，极易造成保护渣发生卷渣现象，与此同时，由于拉速的过大会造成钢液裸露进而发生二次氧化反应。因此设计拉速时取 1.5 m/min 较为合理。

### 3.3 水口倾角的影响

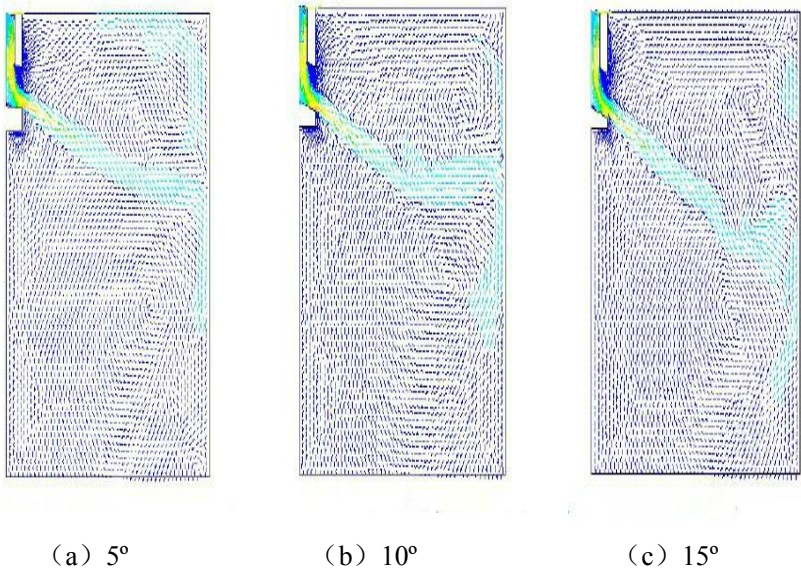


图 6 不同倾角的情况下的流场分布

Fig.4 The flow field distribution of the different angle

图6表示在水口浸入深度为0.15m、拉速为1.5 m/min时，其倾角为5°、10°和15°情况下钢液的流场分布。由图5可知：水口出口倾角的变化直接影响对铸坯窄面的冲击，影响初生坯壳的生长，水口倾角过大，对初生坯壳的生长不利，太小会影响到结晶器上部的钢液流动，造成保护渣熔化不良。

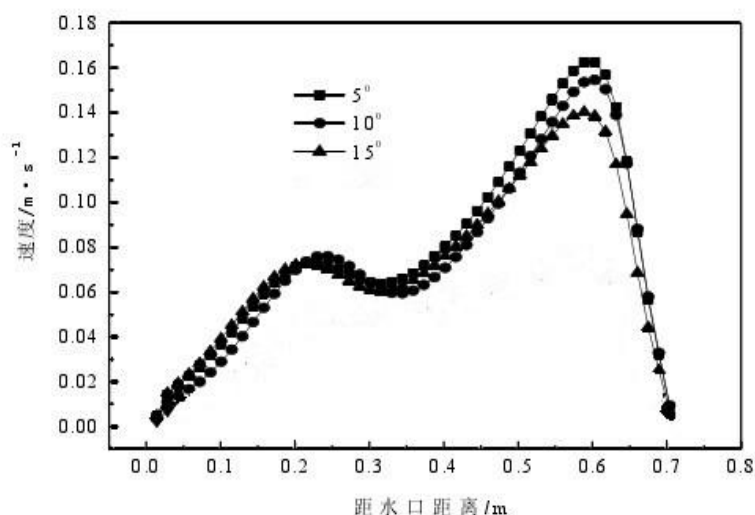


图7 不同倾角的情况下自由液面的速度分布

Fig.7 The free liquid surface velocity distribution of the different angle

由图7可以看出钢液自由表面的速度随水口出口倾角的增大而减小。当钢液自由液面速度峰值低于  $0.14 \text{ m/s}$  时，极易使结晶器上部波动缓慢造成供热不足使保护渣化渣效果不良，而且由于射流冲击点的位置下移，冲击深度加深，下回流区的涡心位置下移会使气泡和夹杂物在结晶器内的冲击深度过大，易造成气泡被凝固前沿捕捉而形成皮下缺陷，并且流股与窄面的冲击点下移，易造成拉漏事故。但是当水口倾角为5°时，钢液自由液面的速度峰值高达  $0.17 \text{ m/s}$ ，钢液自由液面波动剧烈，容易造成卷渣现象和钢水的裸露形成二次氧化。所以从流场和温度场的角度看，浸入式水口的出口倾角在10°之间是比较合理的。

#### 4 结论

- (1) 中厚板坯结晶器内流场的基本特征为：从水口侧出孔流出的钢液以较大的速度冲击铸坯窄面后分成上下两个流股，形成两个方向相反的回流区，且下部回流强，上部回流弱。
- (2) 不同水口浸入深度的影响：随着水口浸入深度的加大，结晶器内的钢液流场特征没有发生明显的变化。
- (3) 不同水口倾角的影响：随着水口倾角的变化，我们可以看出结晶器内的钢液流场特征有明显的变化。随着倾角由5°转换到15°，钢液的流股对铸坯窄面的冲击点位置将会向下移动，液面波动有明显的减少。
- (4) 不同拉速的影响：随着拉速的增大，结晶器钢液流场状态基本相同。随着拉速的增大，钢液流股对铸坯窄面的冲击点位置将会逐渐下移，液面波动的总体趋势将会增加。

## 参考文献

- [1]于会香,张炯明,王万军等.板坯连铸浸入式水口出口速度对结晶器流场影响的数值模拟[J].北京科技大学学报,2002,24(5):492-496.
- [2]张桂芳,沈厚发等.薄板坯连铸结晶器流场模拟和验证[J].钢铁钒钛,2005,26(2):31-34
- [3]张乔英,王书桓,王立涛等.SEN壁厚对结晶器内钢液流场和温度常的影响[J].炼钢,2005,21(3):51-53
- [4]雷方,赫冀成,李宝宽.板坯连铸机结晶器内钢液流动的数值分析.东北大学学报:自然科学版,1995,16(4):409-411
- [5]朱苗勇,刘家奇,肖泽强.板坯连铸结晶器内钢液流动过程的模拟仿真.钢铁,1996,31(8):23-27
- [6]朱苗勇,肖泽强.连铸中间包内三维流动的数学模拟.东北大学学报:自然科学版,1995,16(4):352-355
- [7]张炯明,赫冀成,李宝宽.吹入气体对连铸结晶器流体流动的影响[J],金属学报,1995,31(6):269-274.
- [8]马范军,文光华,李刚.板坯连铸结晶器内钢液流动数值模拟[J],金属学报,2000,36(4):399-402.
- [9]马范军,文光华,李刚.板坯连铸结晶器内吹入气体对钢液行为的影响[J],炼钢,2000,16(3):42-45.
- [10]沈巧珍,严友梅.小方坯连铸结晶器内钢液三维流场的计算[J],钢铁,1990,25(9):22-25.
- [11]沈巧珍,朱必炼,王俊杰等.宽板坯连铸结晶器内钢液流动的数值模拟[J],特殊钢,2007,28(3):7-9.