

# 板坯连铸结晶器流场数值模拟

## Numerical Simulation of Flow Field of Slab in Continuous Casting Mold

供稿|刘佳明<sup>1</sup>, 姜敏<sup>1</sup>, 钟华军<sup>1</sup>, 刘金刚<sup>2</sup>, 王新华<sup>1</sup> / LIU Jiaming<sup>1</sup>, JIANG Min<sup>1</sup>, ZHONG Huajun<sup>1</sup>,  
LIU Jingang<sup>2</sup>, WANG Xinhua<sup>1</sup>

### 内容 导读

结晶器在钢铁的生产流程中承担着钢液凝固的重要任务,对连铸坯质量有重大影响,合理的结晶器流场对于减少连铸坯质量缺陷有积极的作用,其中连铸坯拉速、浸入式水口倾角、水口浸入深度及氩气流量是影响结晶器流场和钢渣界面稳定性的重要因素。通过数值模拟的方式,分析上述工艺参数对某厂生产 1650 mm×200 mm 板坯连铸结晶器流场和钢渣界面的影响,当拉速为 1.2 m/min、水口浸入深度 145 mm、水口倾角为 15°、吹氩量 4 L/min 时可获得较为理想的流场形态,为制定合理的生产工艺提供理论性的参考。

近年来,随着经济和科技的快速发展,我国的能源化工、油气运输、海洋工程等重要行业及领域对钢材的质量要求更加严格,这也对连铸技术提出了更高的要求,连铸作为钢铁生产过程中的核心环节,直接影响着连铸坯的质量以及后续轧制处理<sup>[1-3]</sup>。结晶器内钢液凝固是一个包括传质、传热等现象的综合冶金过程,同时它也是控制钢水洁净度的最后一个环节,结晶器流场对连铸坯表面质量和钢水洁净度有很大影响,不合理的结晶器流场容易造成卷渣、皮下气泡、裂纹等质量问题<sup>[4-7]</sup>。结晶器内钢液的流动和钢渣界面状态直接影响着铸坯质量,当钢渣界面流速过小且液面过于平静时,渣层的流动性也会变差;钢渣界面波动过于剧烈易造成钢液裸露,钢渣界面钢液流速过大会出现剪切卷渣的现象<sup>[8]</sup>。因此,优化结晶器工作参数,匹配出合适的拉速、水口倾角、水口浸入深度以及吹氩量,从而得

到合理结晶器流场和钢渣界面对于钢铁的生产有重要意义。

本文利用数值模拟的方法,通过 fluent 软件对国内某钢厂生产板坯断面为 1650 mm×200 mm 的结晶器内流场、钢渣液面波动进行研究,着重分析拉速、水口倾角、水口浸入深度以及吹氩量对结晶器窄面中心流场形态和钢渣界面的影响,为合理选择结晶器工作参数、解决因钢渣界面混乱和不合理的结晶器流场而导致的钢材质量问题提供理论依据。

### 结晶器内的数学模型建立

#### 流体基本假设

在实际连铸生产过程中,结晶器内钢液的传热、流动、相变、气液相互作用等现象非常复杂,各个现象之间相互联系相互影响,要准确模拟出结晶器内钢液的流动行为十分困难。针对本文所研究

的问题,对结晶器内的钢液流动和传输行为过程作出以下假设<sup>[9-12]</sup>:

- (1) 结晶器内的钢液为不可压缩流体,按照均质相处理;
- (2) 忽略凝固坯壳的体积收缩等其他因素对结晶器的影响;
- (3) 氩气泡分布和钢液流场以水口中心面对称;
- (4) 氩气泡视为一定直径的刚性气泡颗粒且尺寸不变,与钢液一起视为均质相,不考虑氩气泡碰撞、破裂、和长大;
- (5) 忽略钢液的传热、相变及化学反应。

## 模型以及控制方程

### 模型控制方程

结晶器内的钢液流动要同时遵循动量守恒定律及质量守恒定律,质量守恒方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m \quad (1)$$

动量守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中:  $\rho$ 为钢液流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t$ 为时间,  $\text{s}$ ;  $u_i$ 和  $u_j$ 分别为钢液沿  $i$ 、 $j$ 方向上的速度分量,  $\text{m/s}$ ;  $x_i$ 和  $x_j$ 分别为  $i$ 、 $j$ 方向的坐标;  $S_m$ 为源项;  $P$ 为压力,  $\text{Pa}$ ;  $\tau_{ij}$ 为应力张量,  $\text{N/m}$ ;  $g_i$ 为重力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $F_i$ 为包含了其他模型的相关源项,  $\text{N/m}^3$ 。 $\tau_{ij}$ 的计算公式如下:

$$\tau_{ij} = \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中:  $\mu_{\text{eff}}$ 为钢液湍流的有效黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

### VOF 模型方程

VOF 模型主要用来描述多相之间有明确的边界且互不相容的流体运动,结晶器内的钢-渣界面的流动行为通过 VOF 模型来描述,计算公式如下:

$$\frac{\partial F_1}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial F_1}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

式中:  $\mu_i$ 为结晶器内钢液的黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $F_1$ 为局部初始化时,钢液相体积所占的比例,当  $F_1 = 0$ 时,表示液态渣相;  $F_1 = 1$ 时,表示钢液相;  $F_1 = 0 \sim 1$ 时,表示钢液与液态渣层交界面。

### 湍流模型方程

结晶器内的钢液流动采用 Realizable 修正的  $k-\varepsilon$  湍流模型来描述,具体方程如下<sup>[13]</sup>:

湍动能  $k$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

湍动能耗散率  $\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (6)$$

式中:  $\mu_t$ 为湍流黏性系数,  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $G_k$ 为由平均速度梯度变化而产生的湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $G_b$ 为由氩气上浮而产生的液体湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $Y_M$ 为可压缩的湍动能对总耗散率的影响;  $\sigma_\varepsilon$ 、 $\sigma_k$ 为湍动能及其耗散率的湍流普朗特数,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ;  $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$ ,  $\eta = S k / \varepsilon$ ,  $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ,  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $S$ 为平均应变率; 常数  $C_2 = 1.9$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ;  $C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$ ,  $v$ 为平行于重力方向上的速度分量,  $u$ 为垂直于重力方向上的速度分量,  $C_\mu$ 在标准  $k-\varepsilon$  模型和 RNG 修正的  $k-\varepsilon$  模型中为常数,它的值一般为 0.09,在 Realizable 修正的  $k-\varepsilon$  模型中不再是一个常数,而是通过以下公式计算:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (7)$$

式中:  $A_0$ 和  $A_s$ 为模型常数,  $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$ ,  $\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k$ ,  $\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$ ,  $\tilde{\Omega}_{ij}$ 为在角速度  $\omega_k$  的情况下的平均旋转张量率。

### 离散相模型方程

将氩气泡看作一种直径不变且刚性的气泡,通过 DPM 模型计算氩气泡在钢液之中的运动轨迹,氩气泡满足平衡方程<sup>[14-15]</sup>:

$$\frac{du_g}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_g d_g^2} \frac{C_D Re}{24} (u - u_g) + \frac{g_x (\rho_g - \rho)}{\rho_g} + F_i \quad (8)$$

式中:  $u_g$ 为氩气泡速度,  $\text{m/s}$ ;  $u$ 为流体速度,  $\text{m/s}$ ;  $C_D$ 为氩气泡的曳力系数;  $F_i$ 为其他作用力,  $\text{N/kg}$ ;

$\rho$ 为钢液密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_g$ 为氩气泡密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu$ 为连续相黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $d_g$ 为氩气泡直径,  $\text{m}$ ;  $g_x$ 为 $x$ 方向的重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $Re$ 为氩气泡颗粒的雷诺数。

### 边界条件

(1) 入口: 浸入式水口速度大小由水口尺寸、拉速以及结晶器出口尺寸综合计算得出, 采用 velocity-inlet 条件。

(2) 出口: 出口设为模型计算区域的底部, 采用 outflow 边界条件, 出口静压设为 0。

(3) 壁面: 模型壁面设置为标准壁面函数和无滑移边界条件, 将钢水的上表面设为自由表面来设定滑移边界条件, 并打开 DPM 模块中的 escape 边界条件。

### 数学模型建立

(1) 前处理: 通过 Solidworks 制图软件构建水口与结晶器的三维结构图, 考虑到结晶器为对称结构, 为了提升计算效率取结晶器的 1/4 作为计算区域, 为了避免结晶器底部回流对计算产生的影响, 结晶器的长度设置为 2000 mm 以保证流场充分发展。为使计算精确, 利用 fluent meshing 的网

格划分模块将模型划分多面体结构化网格, 钢渣界面处的网格尺寸控制在 2 mm 之内以保证数据精度, 模型的网格总数约为 60 万, 模型及网格加密如图 1。

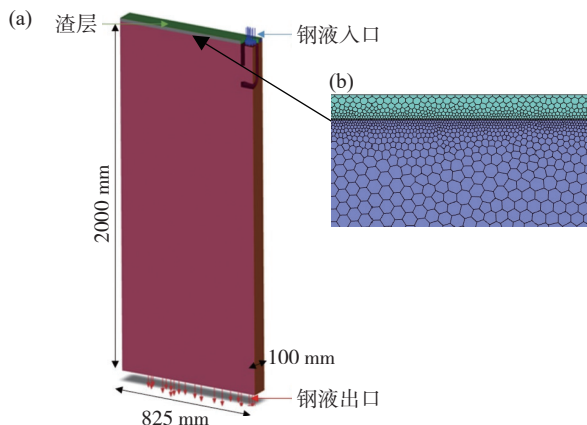


图 1 结晶器模型及钢渣界面网格加密: (a) 模型; (b) 网格加密

(2) 计算: 通过 fluent 软件对所有的模型方程进行求解, 计算过程中采用 SIMPLE 算法, 计算总步数设定为 5000 步, 每个时间步长为 0.001 s。

(3) 后处理: 将计算的结果通过 fluent 处理。

(4) 工艺及物性参数如下表:

表 1 工艺及物性参数

| 结晶器尺寸/(mm×mm)            | 计算长度/mm                           | 水口倾角/(°)                | 水口浸入深度/(mm)              | 拉速/(m/min)  | 钢液密度/( $\text{kg/m}^3$ ) | 钢液黏度/( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) |
|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1650×200                 | 2000                              | 5、15、25                 | 125、145、165              | 1.0、1.2、1.4 | 7020                     | 0.005                             |
| 熔渣密度/( $\text{kg/m}^3$ ) | 熔渣黏度/( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) | 钢渣界面张力/( $\text{N/m}$ ) | 氩气密度/( $\text{kg/m}^3$ ) | 氩气泡直径/mm    | 吹氩量/(L/min)              |                                   |
| 2200                     | 0.4                               | 1.15                    | 0.26                     | 1           | 0、4.0、8.0                |                                   |

## 结果与讨论

### 拉速的影响

图 2 为水口倾角 15°、浸入深度 145 mm、未吹氩时, 不同拉速下窄面中心结晶器流场分布。由图可见, 钢液主流股射出后, 冲击结晶器窄面, 最终形成典型的上下双环流的形态, 拉速为 1.0、1.2、1.4 m/min 时, 结晶器流场形态类似, 主流股对窄面的冲击区较接近。随着拉速从 1.0 增加到 1.4 m/min, 水口出口处的最大射流速度从 1.23 增加至 1.72 m/s, 同时钢液的上下环流区的延伸深度也逐渐增加, 上旋涡与结晶器角部的低流速区域减小。这是因为,

在更高的拉速时, 由于通钢量增加, 水口出口处钢液流速增加; 由于水口倾角不变, 流股冲击结晶器窄面的位置没有发生明显变化, 但流股的冲击速度和强度增加。此外, 计算结果显示, 高拉速下钢液上回流增强, 因而低流速区域减小, 钢液冲击窄面后形成的上环流区也会向水口处延伸, 这与文献<sup>[16]</sup>研究结果基本一致。低流速区域减小、钢液流动增强, 有利于该区域钢液温度补偿和整个结晶器钢液温度场的均匀, 减少角部裂纹。

不同拉速下的钢渣界面速度场如图 3 所示, 由图可见, 拉速变化直接影响钢渣界面钢液流速和液面的稳定性。随着拉速从 1.0 增加到 1.4 m/min, 钢

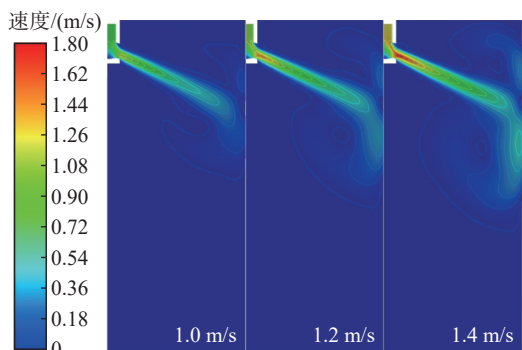


图2 不同拉速结晶器窄面中心流场分布图

渣界面的最大流速从 0.028 增加至 0.084 m/s, 该剪切速度的最大值所处的位置逐渐向窄面移动。计算出结晶器窄面处的液面波动高度也从 1.8 增加至 5.3 mm。提高拉速会导致结晶器上回流湍动能增强, 从而对钢渣界面处钢液流速的影响加剧: 钢液撞击结晶器窄面后, 上回流对钢渣界面的冲击强度增加, 导致钢渣界面波动剧烈, 剪切速度最大值的位置更加靠近结晶器窄面。由于结晶器窄面的波高对钢渣界面稳定性有直接影响, 波动过大易导致钢液裸露、造成卷渣等缺陷, 恶化连铸坯质量。研究表明, 液面波动指数随波高的增加而增加, 为获得较好的铸坯质量, 结晶器钢渣液面波动应控制在 5 mm 以内<sup>[17]</sup>。因此, 综合考虑钢渣界面稳定性和流场形态, 拉速控制在 1.2 m/min 时较好。

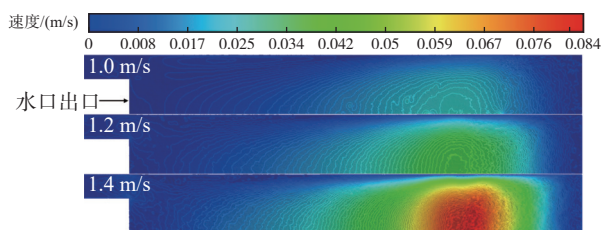


图3 不同拉速钢渣界面流速俯视图

### 水口倾角的影响

图4为拉速 1.2 m/min、浸入深度 145 mm、未吹氩时, 不同水口倾角下结晶器窄面中心的流场分布。由图4可以很明显的看出, 水口倾角的改变对于结晶器内流场形态影响显著: 随着水口倾角从 5°增加到 25°, 水口出口最大射流速度从 1.53 m/s 降低至 1.42 m/s, 主流股对窄面的冲击点下移, 上回流区的延伸深度减小, 同时上环流区与角部之间的低

流速度区域增大。这是由于水口倾角较小时, 主流股冲击深度较浅, 钢液到达窄面距离较短, 钢液流速衰减较慢, 流股冲击窄面会后形成更强的上回流区, 其延伸深度随之增加。水口倾角增加时, 主流股的射流方向逐渐向下偏转, 冲击深度增加, 冲击区距窄面较远, 受钢液阻力和重力影响, 上回流区湍动能减小, 导致低流速区域增大。所以, 实际生产中应避免使用倾角过大的浸入式水口, 以避免钢液流股冲击深度增加导致夹杂物和气泡被主流股带入到结晶器内较深的位置而难以上浮去除。

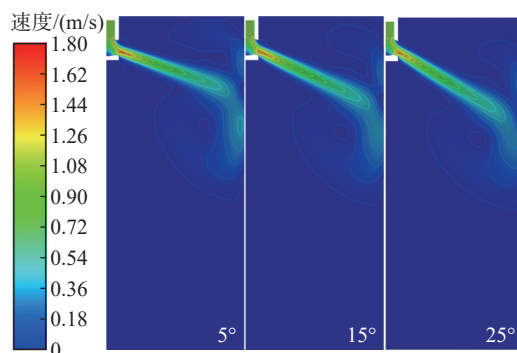


图4 不同水口倾角结晶器窄面中心流场分布图

不同水口倾角下的钢渣界面速度形态如图5所示, 当水口倾角从 5°增加到 25°时, 钢渣界面的最大流速从 0.077 降低至 0.019 m/s, 最大速度位置逐渐向靠近水口的方向移动。计算出波动高度也从 5.6 降低至 1.0 mm。这是由于, 水口倾角较小时, 上回流湍流强度较大, 上回流对渣层的剪切作用较强, 钢渣界面速度较大。同时, 水口倾角较小时, 钢液撞击结晶器窄面后产生较强的上回流, 加剧液面波动。在其它条件相同的情况下, 水口倾角为 15°时流场更好; 水口倾角为 5°时, 钢渣界面波动过于剧烈、稳定性较差; 水口倾角为 25°时, 流股冲击深度过大, 造成夹杂物和气泡难以上浮去除, 且低速区

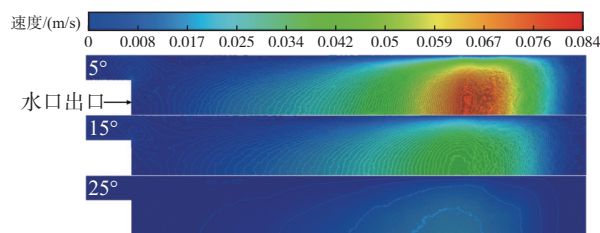


图5 不同水口倾角钢渣界面流速俯视图

域明显更大,更易产生缺陷。

### 水口浸入深度的影响

图6为拉速1.2 m/min、水口倾角15°、未吹氩时,不同水口浸入深度下结晶器窄面中心的流场分布。可以看到,3种浸入深度下流场形态未见明显差异。随着浸入深度从125增加至165 mm,钢液主流股对结晶器窄面的冲击位置、上下涡心高度下移,冲击深度增加,低流速区略微增加。这是因为,水口浸入深度增加使主流股出口点位置下移,钢液冲击窄面后产生的上环流与钢渣界面的距离增大,速度衰减变大,导致上环流对钢渣界面的影响更小。

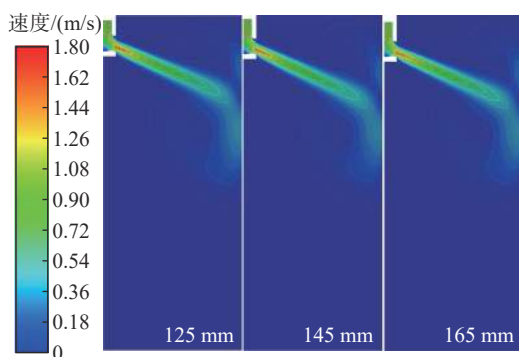


图6 不同水口浸入深度结晶器窄面中心流场分布图

不同水口浸入深度下,钢渣界面速度形态如图7所示。随着浸入深度从125增加至165 mm,钢渣界面的最大流速从0.055降低至0.040 m/s,最大速度位置略微向水口方向偏移。计算出窄面附近钢渣界面的波高从3.5降低至2.6 mm。这是由于,浸入深度增加使上回流窝心向下偏移,上回流湍流强度及对渣层的冲击均减弱,因此钢渣界面速度和波动高度变小;浸入深度达到145 mm时,钢渣界面钢液流速再无明显降低,且流场形态较为理想。适当增加水口浸入深度,会使窄面附近钢渣界面波高降低,有利于提高钢渣界面的稳定性,降低钢液裸露

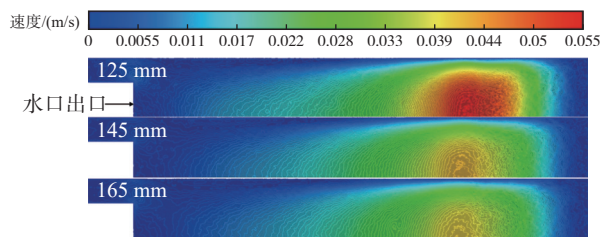


图7 不同水口浸入深度钢渣界面流速俯视图

的几率。但在实际生产中,浸入深度过大时,下回流会把夹杂物和氩气带入到更深的位置,导致上浮距离变长,易残留在钢中而导致缺陷。因此,应合理控制水口浸入深度。

### 氩气流量的影响

图8为拉速1.2 m/min、水口倾角15°、浸入深度145 mm时,不同吹氩量下结晶器窄面中心的流场分布。可以明显地看出,结晶器吹氩改变了流场形态,随着吹氩量从0增加至8 L/min,钢液的主流股变宽,但最大速度无明显变化,上环流区越来越小、冲击深度变浅。这是因为,氩气泡进入结晶器后会带动主流股钢液向钢渣界面移动,主流股的射流角度也随之向上偏移、冲击深度变浅,氩气泡的上浮会大量消耗上环流区的钢液湍动能,从而抑制钢液上环流区的发展,对窄面的冲击强度也会减弱。

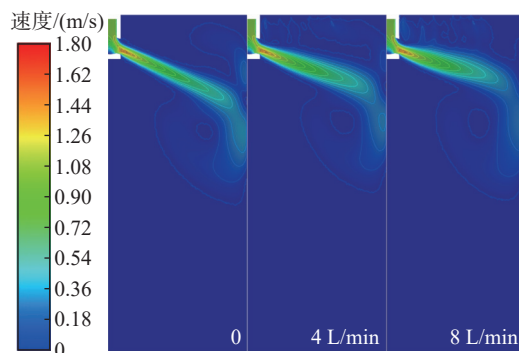


图8 不同吹氩量结晶器窄面中心流场分布图

不同吹氩量下的钢渣界面速度形态如图9所示,未吹氩时,钢渣界面流速最大值出现在距结晶器窄面1/4处,其值为0.043 m/s;吹氩量为4 L/min时,氩气泡主要从水口至结晶器窄面1/3处的区域上浮,该区域的钢液流速较大,最大值为0.105 m/s;吹氩量为8 L/min时,受氩气泡上浮的影响,水口附近的钢液流速最大,为0.138 m/s,吹氩量从0增加至8 L/min。计算出窄面附近界面波动从2.6降低至1 mm,但当吹氩量在8 L/min时,虽然窄面附近的波高降低,但水口附近的波动变得更剧烈,可能会导致卷渣的现象发生,降低铸坯表面质量,因此吹氩量控制在4 L/min,此时既降低窄面附近的界面波动,水口附近的界面也较为稳定。众所周知,水口吹氩有利于减少水口堵塞;该计算结果表明,吹氩

量应控制在合适范围：吹氩量过小不利于缓解水口堵塞、夹杂物上浮；吹氩量过大则容易造成水口附近钢渣界面的波动过于剧烈而导致卷渣。

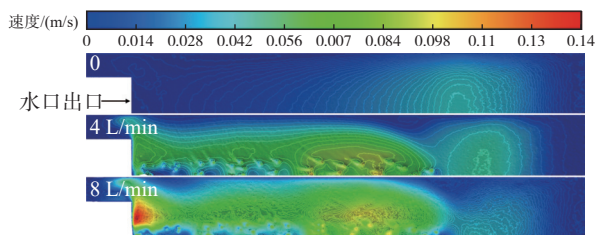


图9 不同吹氩量钢渣界面流速俯视图

## 结论

(1) 数值模拟结果表明，结晶器主流股冲击窄面后会形成上下双环流。拉速的增加会引起窄面附近波动加剧，随着拉坯速度从 1.0 增加到 1.4 m/min，钢渣界面的最大流速从 0.028 增加至 0.084 m/s，窄面附近波高由 1.8 增加至 5.3 mm。拉速控制在 1.2 m/min 时，钢渣界面较为稳定。

(2) 水口倾角直接影响着流场形态和钢渣界面波动，随着水口倾角从 5° 增加到 25°，钢液的上回流区减弱，下回流区增强，对窄面的冲击点下移；钢渣界面的最大流速从 0.077 降低至 0.019 m/s，波动高度也从 5.6 降低至 1 mm。综合考虑，水口倾角为 15° 时，流场较好。

(3) 改变水口浸入深度对仅对钢渣界面波动有影响，对流场形态基本无影响。随着浸入深度变大随着浸入深度从 125 增加至 165 mm，钢渣界面的最大流速从 0.055 降低至 0.04 m/s，窄面附近波高从 3.5 降低至 2.6 mm。

(4) 结晶器吹氩后会减小流场的上回流区，增加水口附近的界面波动。随着吹氩量从 0 增加至 8 L/min，钢渣界面最大流速从 0.043 增加至 0.138 m/s，窄面附近波高从 2.6 降低至 1 mm。

## 参考文献

[1] 朱苗勇, 姜文涛, 王卫领. 炼钢与连铸过程数值模拟研究进展.

金属学报, 2018, 54(2): 131

- [2] 周翔. 钢铁流程绿色化、智能化应用与分析. 金属世界, 2022(6): 1
- [3] 魏民, 张家泉. 连续铸钢与钢坯热塑性. 金属世界, 2022(2): 55
- [4] 汤磊, 张炯明, 董其鹏, 等. 板坯连铸结晶器内部流场的数值模拟. 工业加热, 2018, 47(4): 46
- [5] 李山宏. 板坯连铸结晶器流场及界面行为的数学物理模拟 [学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2013
- [6] Sánchez-Perez R, Morales R D, Díaz-Cruz M, et al. A physical model for the two-phase flow in a continuous casting mold. ISIJ Int, 2003, 43(5): 637
- [7] Real-Ramirez C A, Gonzalez-Trejo J I. Analysis of three-dimensional vortices below the free surface in a continuous casting mold. Int J Miner Metall Mater, 2011, 18(4): 397
- [8] 刘同威, 张燕超, 张彩军, 等. 吹氩条件下结晶器钢渣液面波动行为. 连铸, 2022(3): 18
- [9] 邓小旋, 王强强, 钱龙, 等. 适合漏斗型薄板坯连铸结晶器三孔水口的水模型优化. 钢铁, 2012, 47(7): 26
- [10] 时东生, 王朝阳, 巩文旭. 宽厚板连铸结晶器内钢液流动传热行为模拟. 连铸, 2013(5): 17
- [11] 张朝晖, 吴海龙, 冯璐, 等. 数值模拟技术在连铸结晶器中的应用. 钢铁研究学报, 2016, 28(5): 1
- [12] 谢集祥, 罗钢, 刘浏, 等. 1850 mm×230 mm 板坯连铸结晶器流场与温度场数值模拟. 中国冶金, 2020, 30(2): 54
- [13] 纪宏超, 李耀刚. 基于 Realizable 湍流模型的弯管流动模拟分析. 机械工程与自动化, 2013(4): 46
- [14] 尹延斌. IF 钢板坯表层缺陷形成机理的数值模拟研究 [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2020
- [15] 刘斌, 王明林, 张慧, 等. 吹氩板坯倒角结晶器气液两相流动 Euler-Lagrange 双向耦合模拟. 钢铁研究学报, 2023, 35(2): 155
- [16] 刘斌, 王明林, 张慧, 等. 拉速对板坯倒角结晶器钢液流动的影响. 连铸, 2021, 238(6): 29
- [17] 陆巧彤, 王新华, 于会香, 等. F 数计算及其与板坯连铸结晶器内钢水卷渣的关系. 北京科技大学学报, 2007(8): 811

作者简介: 刘佳明 (1996—), 男, 北京科技大学冶金与生态工程学院硕士研究生。E-mail: g20208289@xs.ustb.edu.cn。

通信作者: 姜敏 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事高品质特殊钢中夹杂物净化及控制技术的研究。通信地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学。E-mail: jiangmin@ustb.edu.cn。