

# 不锈钢板坯连铸结晶器内钢/渣界面行为模拟及卷渣分析

金友林 包燕平 刘建华 安航航

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

**摘要** 基于湍流模型与多相流模型的耦合, 应用液面追踪技术(VOF), 实现了对不锈钢板坯连铸结晶器内流体流动及钢/渣界面行为的模拟计算, 并用水模拟结果进行了对比验证, 在此基础上计算出实际的钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为. 通过分析水口的侧孔形状、出口倾角、水口浸入深度、结晶器宽度以及拉速对钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为影响规律, 指出了钢/渣界面行为与卷渣是密切相关的, 进而探讨了钢/渣界面及卷渣形成的机理.

**关键词** 板坯结晶器; 钢/渣界面; 卷渣; 剪应变率; 数值模拟

**分类号** TF777.1

## Simulation on steel/slag interfacial behavior and analysis of slag entrapment in a stainless steel slab continuous casting mold

JIN You-lin, BAO Yan-ping, LIU Jian-hua, AN Hang-hang

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** Steel/slag interfacial behavior in a stainless steel slab continuous casting mold was numerically simulated on the base of a coupled model of turbulence and multiphase fluid flow and the VOF method. The results of numerical simulation were validated by a water model. The steel/slag interfacial profile and the behavior of steel and slag in the interface were obtained. By analyzing the influence of port form, port angle, SEN depth, mold width and casting speed on steel/slag interfacial behavior, it was pointed that slag entrapment was inherently influenced by steel/slag interfacial behavior and the forming mechanism of interfacial profiles and slag entrapment was discussed.

**KEY WORDS** slab mold; steel/slag interface; slag entrapment; shear strain rate; numerical simulation

随着不锈钢需求量和产品质量要求越来越高, 对不锈钢连铸坯质量提出了更高的要求. 由于不锈钢本身物理性能和凝固特点, 通常不锈钢连铸结晶器水口出口倾角方向都是向上的, 出口倾角向上就会导致结晶器内上回流增强, 对钢/渣界面扰动增大, 极易造成空气卷吸和保护渣卷入钢液中, 引起钢液的二次氧化和铸坯内大型夹杂物的增多, 严重影响了连铸坯的质量. 因此, 研究结晶器水口侧孔开口向上的不锈钢结晶器内钢/渣界面的行为, 从而有效控制卷渣行为的发生, 提高连铸坯的质量, 具有重要的意义<sup>[1-3]</sup>.

冶金过程中结晶器内钢/渣界面行为是高温下极其复杂的过程. 对钢/渣界面行为, 国内外很多冶金学者借助水力学模型研究水/油界面行为, 通过相似理论反映实际钢/渣界面的行为. 包燕平<sup>[6]</sup>通过1:1的水模型模拟了薄板坯连铸结晶器内钢液/保护渣界面行为, 通过液面波动测量和流场显示, 分析了薄板坯连铸结晶器内钢液的卷渣方式和形成机理. Iguchi<sup>[7]</sup>借助水力学模型实验, 使用PIV测量流场技术对盐水/硅油界面行为进行了模拟, 分析了水/油界面间剪切流动的非稳态性及卷渣行为. 对结晶器钢液自由表面的数值模拟研究, 国内外也有

收稿日期: 2008-04-28

作者简介: 金友林(1978—), 男, 博士; 包燕平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: baoyp@metall.ustb.edu.cn

文献报道. Panaras<sup>[8]</sup>等利用有限体积法模拟了结晶器内钢液自由表面的波动, 曹娜<sup>[9]</sup>采用VOF技术模拟了工艺参数对钢/渣界面的影响规律. 本文采用大型流体计算软件CFX10.0, 运用液面追踪法(VOF)对钢/渣界面行为进行数值模拟计算, 研究不同工艺参数下钢/渣界面行为, 通过钢/渣界面上钢液流速和液渣的剪应变率分析钢/渣界面形成及卷渣机理.

## 1 三维数学模型

### 1.1 基本假设

- (1) 结晶器内钢液流动是稳态黏性不可压缩流动;
- (2) 不考虑结晶器振动及锥度等因素的影响;
- (3) 忽略凝固传热对流动的影响;
- (4) 结晶器内钢液按均相介质处理, 钢液上面保护渣全为液态.

### 1.2 控制方程

计算所用的数学模型包括描述流动行为的连续方程和动量方程<sup>[10]</sup>.

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

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

式中,  $\rho$  为流体密度,  $u_i$ 、 $u_j$  分别为  $x_i$  和  $x_j$  方向上的速度分量,  $g_i$  为重力加速度分量,  $\mu_{\text{eff}}$  为有效黏度(可通过  $k$ - $\epsilon$  双方程模型及壁面函数计算求得).

湍动能( $k$ )方程:

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

湍动能耗散( $\epsilon$ )方程:

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

其中,

$$G = \mu_\tau \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5)$$

式中,  $k$  为湍动能,  $\epsilon$  为湍动能耗散率,  $\mu_\tau$  为湍流黏度系数,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $\sigma_k$  和  $\sigma_\epsilon$  为经验常数.

### 1.3 结晶器钢/渣界面模型

模拟结晶器钢/渣界面时, 采用VOF方法追踪

钢/渣界面, 在运动界面的空间网格内定义流体体积分数, 构造流体体积分数的守恒方程, 追踪界面的变化, 精细确定钢/渣界面的位置和形状, 从而构造出钢/渣界面<sup>[11]</sup>. 在VOF法模拟钢/渣界面过程中, 两种流体共用一组传输方程, 在计算的网格单元中计算流体体积分数  $a_{st}$ , 体积分数方程表示如下:

$$\frac{\partial a_{st}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla a_{st} = 0 \quad (6)$$

式中,  $t$  为时间,  $\mathbf{u}$  为钢液速度矢量; 当  $a_{st} = 1$  时代表钢液,  $a_{st} = 0$  时代表液渣,  $a_{st}$  值处于  $0 \sim 1$  之间为钢/渣界面.

初始条件设定时, 用CFX提供的CCL文件编辑一组表达式, 定义钢/渣界面的初始位置, 在界面上部区域  $a_{st} = 0$ , 在界面下部区域  $a_{st} = 1$ , 界面上  $a_{st} = 0.5$ . 通过结晶器内传输计算, 采用VOF法追踪钢/渣界面位置和形状, 构造稳态的钢/渣界面的模型<sup>[12-13]</sup>.

### 1.4 边界条件

(1) 入口设在水口的入口处, 其速度根据拉速计算得出,  $k$ 、 $\epsilon$  值由下式确定:  $k_{\text{inlet}} = 0.01 u_{\text{inlet}}^2$ ,  $\epsilon_{\text{inlet}} = k_{\text{inlet}}^{1.5} / (0.5 d_0)$ , 其中  $d_0$  为入口的直径. 钢液的体积分数在入口处设为1, 渣为0.

(2) 出口边界设成Opening边界, 可进可出的无压力出口, 出口钢液体积分数设为1, 液渣为0.

(3) 水口壁和结晶器壁采用无滑移边界条件, 计算域上表面为滑移边界.

(4) 钢液-液渣两相初始化, 定义结晶器距顶部20mm截面以内为液渣, 截面以下为钢液.

## 2 数值计算结果的水模拟验证

为了验证数值模拟结果的真实可靠性, 通过建立在相似原理基础上的水力学模型实验与之对比. 水模型实验针对1235mm×200mm板坯连铸结晶器以1:1比例模型进行结晶器流场研究, 其中水口侧孔形状为梯形(图3中水口1), 水口侧孔倾角为向上 $10^\circ$ , 拉速为 $1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , 水口浸入深度为150mm(水口侧孔上沿距离液面), 待验证的模型数值计算中水口结构参数、工艺参数以及流体物性参数均取与水模型实验中的一致. 图1是水模型实验和数值模拟流场显示图. 由图可见, 水模拟和数值模拟结晶器流场基本相似, 流股都是以向下一定角度冲向窄边. 这主要由于垂直向下的注流作用以及水口有限的壁厚导向作用不是很强的缘故, 但相对于向下倾角的水口, 流股向下程度减小. 表1是反映流场特征的水模拟和数值模拟的结晶器流场中的

流股冲击深度和上流涡窝心位置. 从表中对比结果可以看出, 数值模拟与水模拟数据基本吻合, 可以认

为数值模拟与水模拟结果基本一致. 这也证实本文中的数值模拟可以反应实际流体的真实流动特征.

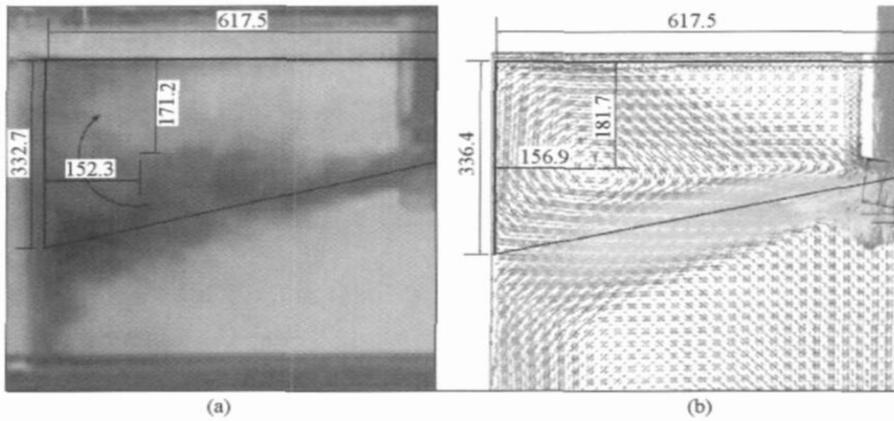


图 1 水模拟 (a) 和数值模拟 (b) 结晶器内流场 (单位: mm)  
Fig. 1 Comparison of experimental (a) and computation (b) flow fields (units: mm)

表 1 水模拟与数值模拟结果比较

Table 1 Comparison of experimental and computation results

方法	冲击深度/ mm	上流涡窝心位置/mm	
		距窄边	距液面
水模型实验	332.7	152.3	171.2
数值计算	336.4	156.9	181.7

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为

图 2 表示的是不锈钢板坯连铸结晶器内钢/渣界面特征和界面上钢/渣行为的数值模拟结果. 由图可见, 结晶器的钢/渣界面存在明显的波谷特征. 根据钢/渣界面特征可将界面分成三个区: 界面迎谷面区(窄边 a 处至波谷点 b 处)、界面背谷面区(b 处至 c 处)和界面水平区(c 处至 d 处), 其中界面波谷点处于结晶器宽面 1/4 处偏窄边附近. 钢/渣界面上钢液流速和液渣剪应变率(液渣受钢液剪切产生相对形变率)存在明显的波峰特征. 根据界面上钢液流速和液渣的剪应变率变化特征也可将界面分成三个区: 增强区(窄边至迎谷面区上流速最高点)、减弱区(流速最高点至界面波谷点附近)和平稳区(界面背谷面区和界面水平区). 在指向水口方向, 在增强区内, 界面上钢液流速和液渣剪应变率呈增加趋势; 在减弱区内, 界面上钢液流速和液渣剪应变率呈减小趋势; 在平稳区内, 界面上钢液流速和液渣剪应变率保持平稳.

#### 3.2 水口参数和工艺参数的影响

(1) 水口侧孔形状. 针对不同结晶器水口侧孔形状, 在结晶器断面 1235mm × 200mm、水口浸入

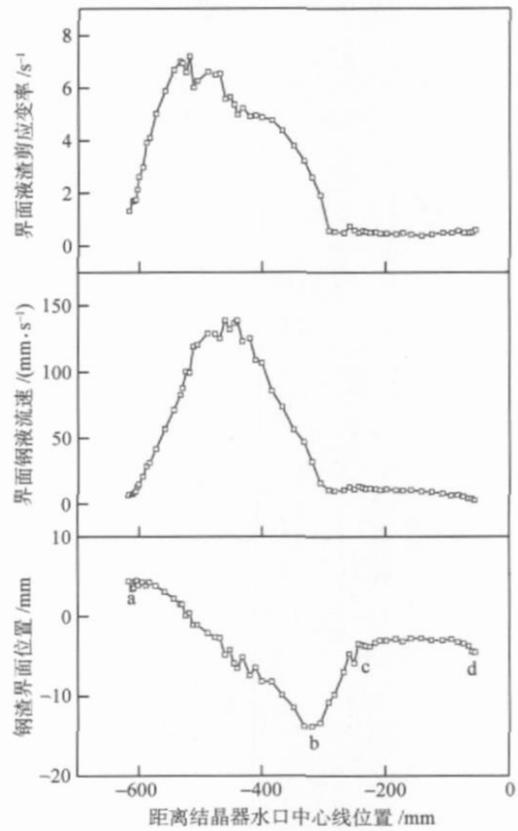


图 2 钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为

Fig. 2 Steel/slag interfacial profiles and behavior of steel and slag in the interface

深度 150 mm、侧孔倾角向上 10° 及拉速 1.2 m · min<sup>-1</sup> 的条件下, 研究了水口侧孔形状对结晶器内钢/渣界面特征及界面上的钢/渣行为的影响. 模拟中采用的两种水口侧孔形状及尺寸如图 3 所示.

图 4 表示两种不同结晶器水口侧孔形状下数值

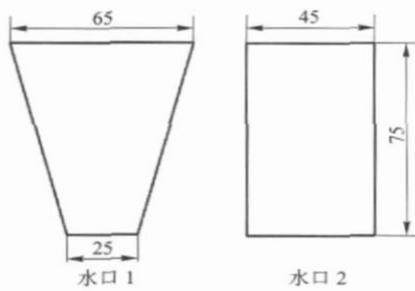


图 3 水口侧孔形状及尺寸(单位: mm)

Fig 3 Port form and size of SEN(units: mm)

模拟的钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为. 由图可见, 水口 2 的界面波谷深度(窄边界面位置与界面波谷点的垂直高度)较水口 1 深 1.2 mm 左右, 波谷位置深容易发生卷渣. 在界面迎谷面区, 钢液流速和液渣剪应变率都较大, 此区域两水口作用下的钢液流速和液渣剪应变率变化规律基本相似, 钢/渣界面形状也基本相似, 在迎谷面的中间钢/渣界面都存在 2 mm 以下波动. 由于此区域界面钢液流速处于峰值区, 钢液流速较大, 而且存在一定波动, 分析认为界面上的这种微小波动是钢液剪切引起. 而且由于钢液流速大, 界面的这种微小波动仍可以引起剪切卷渣. 在界面水平区, 水口 2 的界面存在 2 mm 左右

的波动, 水口 1 的界面较为平稳, 比较此区域界面上钢液流速和液渣剪应变率, 水口 2 的钢液流速较小且较为平稳, 而液渣的剪应变率较大且存在波动, 可以认为此区域的水口 2 的界面波动不是由界面上钢液剪切引起, 分析认为应由水口 2 下结晶器流场不稳定形成的驻波引起. 由于此区域的界面钢液流速较小, 一般这样的微小波动不会引起剪切卷渣, 但在其他因素的影响下(如水口未对中或水口偏流等), 很容易形成漩涡卷渣.

(2) 水口侧孔倾角. 针对不锈钢连铸结晶器水口侧孔倾角向上的特点, 分别研究向上 15° 和向上 5° 两种倾角对结晶器内钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为的影响. 图 5 是侧孔倾角对钢/渣界面及界面上钢/渣行为的影响规律, 其中铸坯断面为 1235 mm × 200 mm, 水口侧孔形状为水口 1, 水口浸入深度为 150 mm, 拉速为 1.2 m · min<sup>-1</sup>. 由图可见, 随着倾角从 5° 增加到 15°, 窄边的钢/渣界面位置平均增高 2.5 mm. 窄边界面位置高, 液渣层厚度薄, 容易造成钢液裸露发生二次氧化, 而且也不利于液渣均匀流入结晶器侧壁. 由图还可以看出: 在两种倾角下, 在界面迎谷面区由于钢液流速和液渣剪应变率变化规律相似, 钢/渣界面变化特征相似, 而且

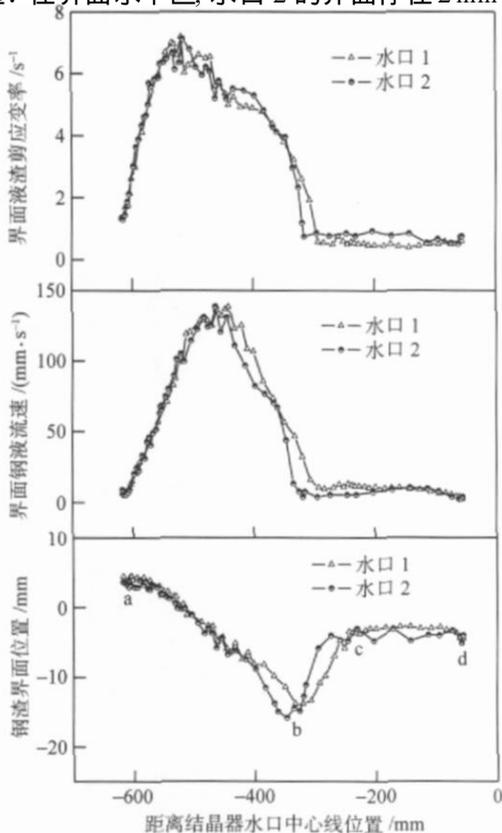


图 4 侧孔形状对钢/渣界面及界面上钢/渣行为影响

Fig. 4 Influence of port form on steel/slag interfacial behavior

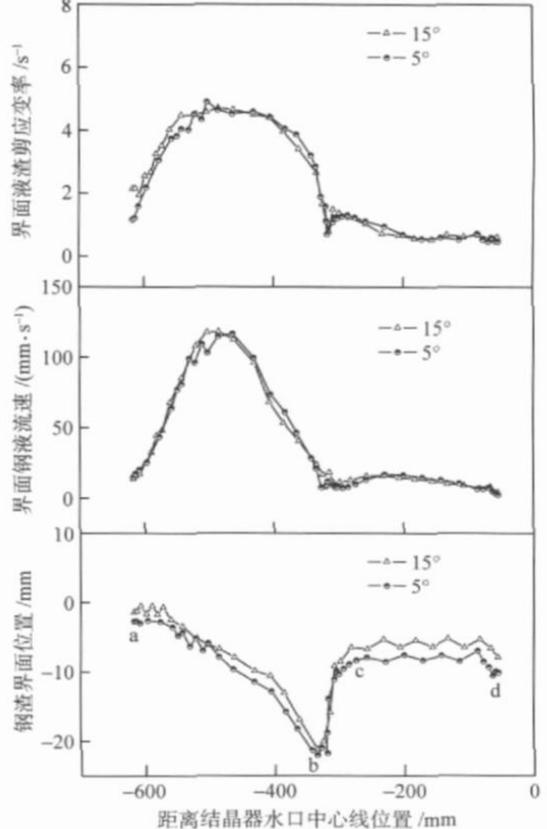


图 5 侧孔倾角对钢/渣界面及界面上钢/渣行为影响

Fig 5 Influence of port angle on steel/slag interfacial behavior

界面的波谷深度相差不大, 倾角  $15^\circ$  比倾角  $5^\circ$  时波谷深度只增加  $0.4\text{ mm}$ ; 在界面水平区, 两种倾角下钢/渣界面都存在一定波动, 倾角为  $15^\circ$  时界面波动更为严重, 比较此区域界面钢液流速, 两种倾角下此区域界面的流速都较小且较为平稳, 可以认为此区域的界面波动是由于结晶器流场的不稳定引起, 侧孔倾角  $15^\circ$  时结晶器内流场不稳定程度更大。

(3) 结晶器宽度. 图6是在结晶器水口流速为  $1.58\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (相当于  $1235\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  断面结晶器拉速  $1.2\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ )、水口侧孔形状为水口1、水口浸入深度为  $150\text{ mm}$  及侧孔倾角向上为  $10^\circ$  时, 结晶器宽度对钢/渣界面及界面上钢/渣行为的影响规律, 模拟中结晶器断面尺寸选取  $2050\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 、 $1550\text{ mm}\times 200\text{ mm}$  和  $1235\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ . 由图可见, 随着结晶器宽度增加, 钢/渣界面波谷深度减小, 钢/渣界面迎谷面区最大钢液流速减小, 相应界面上液渣的剪应变率减小. 结晶器宽度从  $1235\text{ mm}$  增加到  $2050\text{ mm}$ , 波谷深度从  $18\text{ mm}$  减小到  $13.2\text{ mm}$ , 界面上钢液最大流速从  $138.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  减小到  $116.9\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 界面上液渣剪应变率从  $7.2\text{ s}^{-1}$  减小到  $4.4\text{ s}^{-1}$ . 界面上钢液流速减小, 钢液剪切携带液渣作用减弱, 界面的波谷深度相应减小. 从图中还

可以看出, 随着宽度增加, 钢/渣界面趋于不稳定. 断面宽度为  $1235\text{ mm}$  界面相对较为稳定, 断面宽度为  $1550\text{ mm}$  时界面多处出现波动范围在  $3\text{ mm}$  左右的波动, 而  $2050\text{ mm}$  断面几乎整个界面都存在波动. 比较不同宽度下界面上钢液流速和液渣剪应变率, 分析认为: 随着结晶器宽度增大, 界面出现的波动严重不是由于界面钢液剪切所致, 而是由于结晶器内流场的不稳定性增强引起. 由此可见, 随着结晶器宽度增大, 结晶器内流场不稳定程度增大, 钢/渣界面不稳定性也增强.

(4) 拉速. 图7是结晶器断面为  $1235\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 、水口侧孔形状为水口1、水口浸入深度为  $150\text{ mm}$  及侧孔倾角为  $10^\circ$  时, 不同拉速下钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为, 模拟中选用的拉速为  $1.1, 1.2, 1.3\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . 由图可见, 随着拉速从  $1.1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  增加到  $1.3\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , 窄边钢/渣界面位置平均升高  $2.8\text{ mm}$ , 钢/渣界面的波谷深度平均增加  $8\text{ mm}$ . 这是由于随着拉速增大, 界面迎谷面区钢液流速增大, 界面的液渣剪应变率相应增大, 致使窄边界面位置升高, 界面的波谷深度增大. 在界面的背谷面区和水平区, 界面上钢液流速在设计拉速下相近, 而且较为稳定. 从图上还可以看出, 随着

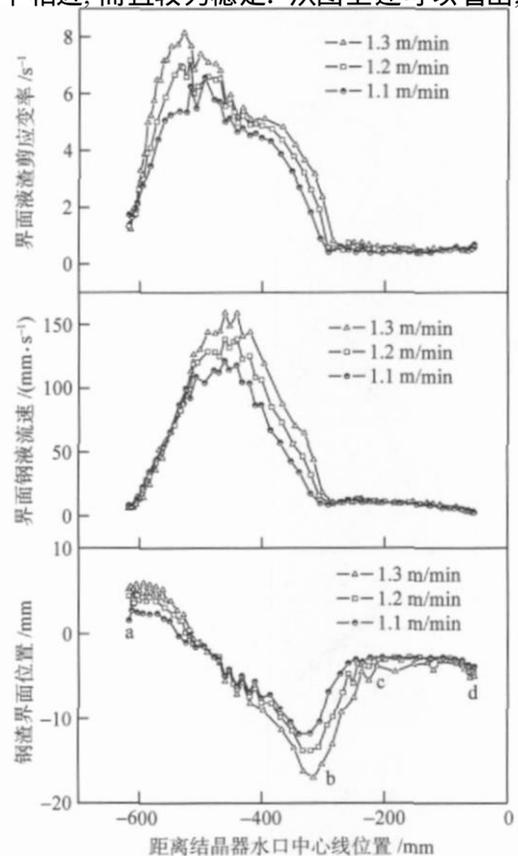
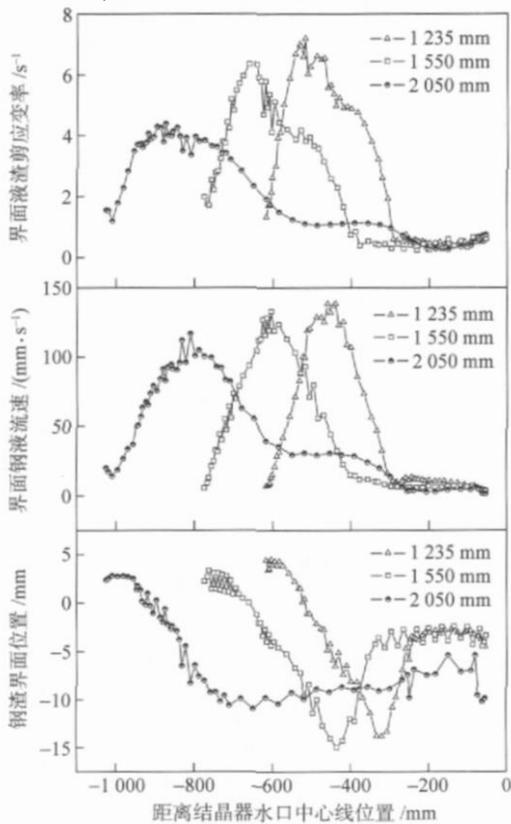


图6 结晶器宽度对钢/渣界面及界面上钢/渣行为影响

Fig. 6 Influence of mold width on steel/slag interfacial behavior

图7 拉速对钢/渣界面及界面上钢/渣行为影响

Fig. 7 Influence of casting speed on steel/slag interfacial behavior

拉速增加, 钢/渣界面变得不稳定, 拉速为  $1.3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  的界面不稳定程度最大, 在钢液流速较小的界面水平区钢/渣界面出现  $2 \text{ mm}$  左右的波动, 而在低拉速时界面较为平稳. 分析认为, 这种波动也是由于随着拉速增加, 结晶器流场不稳定程度增加引起. 由此可见, 随着拉速增加, 结晶器内流场不稳定程度增大, 界面不稳定程度增加.

(5) 水口浸入深度. 图 8 是结晶器断面为  $1235 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 、水口侧孔形状为水口 1、侧孔倾角为  $10^\circ$  和拉速为  $1.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 不同水口浸入深度下钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为, 模拟中选用的浸入深度为  $130 \text{ mm}$  和  $170 \text{ mm}$ . 由图可见, 随着浸入深度减少, 窄边的钢/渣界面位置升高, 波谷深度增加. 浸入深度  $130 \text{ mm}$  比  $170 \text{ mm}$  窄边钢/渣界面位置高  $2.5 \text{ mm}$ , 波谷深度增加  $2.8 \text{ mm}$ . 这主要是由于随着插入深度减少, 钢/渣界面迎谷面区钢液流速增加, 界面上钢液剪切携带液渣作用增强, 界面的液渣剪应变率相应增加, 致使窄边钢渣界面位置升高, 波谷深度增加. 从图上还可以看出, 水口浸入深度  $130 \text{ mm}$  时, 钢/渣界面的水平区界面存在  $2 \text{ mm}$  左右的波动, 而水口浸入深度为  $170 \text{ mm}$  时, 此区域的界面较为平稳. 分析认为, 这种波动也是由于水

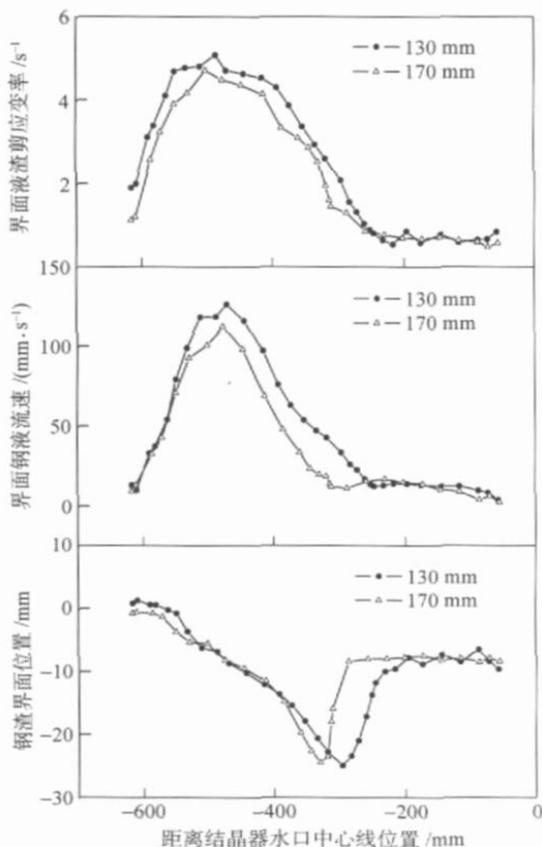


图 8 水口浸入深度对钢/渣界面及界面上钢/渣行为影响  
Fig 8 Influence of SEN depth on steel/slag interfacial behavior

口浸入深度变浅, 结晶器流场不稳定程度增加引起.

### 3.3 钢/渣界面形成和卷渣机理分析

由图 4~8 可见, 在所有工况下, 结晶器内钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为基本相似. 在钢/渣界面迎谷面区, 界面上钢液流速较大, 在钢液剪切作用下, 界面上液渣剪应变率相应较大. 界面上液渣将被钢液携带至行驶前方, 致使前方渣层厚度增加. 随着渣层的逐渐增厚和渣层剪切阻力, 界面上钢液流速增加到一定程度后开始降低, 界面上液渣剪应变率也相应发生变化, 但钢液流速减小到一定程度, 界面上钢液将不再剪切携带液渣至前端, 前端渣层不再增厚, 这样就形成了钢/渣界面的波谷特征. 钢/渣界面水平区由于界面上钢液流速降到最低且较稳定, 界面上液渣剪应变率相应较小且较稳定, 所以此区域钢/渣界面一般较为平稳. 但是, 随着结晶器宽度的增加、水口侧孔向上倾角增加、拉速增加以及水口浸入深度减小, 结晶器内流场不稳定程度增加, 致使此区域钢/渣界面出现非钢液剪切的微小波动.

结晶器卷渣与钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为密切相关. 在界面迎谷面区, 界面上钢液流速大而且存在脉动. 在这样情况下, 界面容易发生波动, 界面上即使发生微小波动, 也会诱发剪切卷渣, 如图 9 中 a 区域所示. 在界面的波谷点处, 由于液渣位能小, 也容易发生钢液剪切卷渣, 如图 9 中 b 区域所示. 图 9 是在水模型实验中, 结晶器宽度为  $1235 \text{ mm}$ 、水口侧孔形状为水口 1、水口侧孔倾角为向上  $10^\circ$ 、水口浸入深度  $150 \text{ mm}$  及拉速  $1.3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 发生的剪切卷渣. 在界面背谷面区, 通常界面上钢液流速较小, 而且此区域界面受流场不稳定因素影响很小, 所以此区域界面一般较为光滑, 不会发生卷渣. 在界面水平区, 界面上钢液流速降到最低水平且较稳定, 所以此区域界面一般不会发生剪切卷渣. 但是随着结晶器宽度的增加、水口侧孔向上倾角增加、拉速增加以及水口侵入深度减小, 此

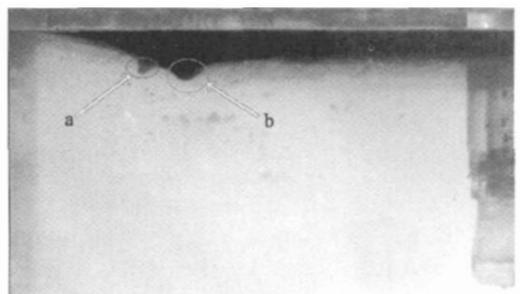


图 9 水模拟中迎谷面剪切卷渣  
Fig. 9 Slag entrapment of flow cut in experiment

区域界面可能发生 2 mm 左右的微小波动, 虽然这种微小波动本身不至于造成卷渣, 但在外界因素影响下(水口不对中、水口偏流等), 容易诱发漩涡卷渣, 如图 10 中 c 区所示. 图 10 是在水模型实验中, 结晶器宽度为 2050 mm、水口侧孔形状为水口 1、水口侧孔倾角向上  $10^\circ$ 、水口浸入深度 160 mm 及拉速  $1.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  时, 滑板不完全开启形成的水口偏流引起漩涡卷渣.

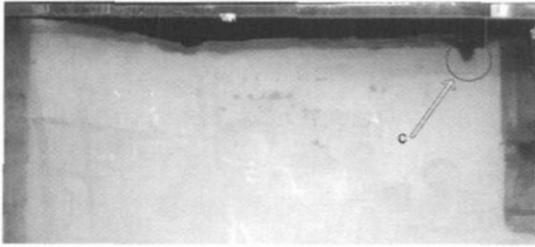


图 10 水模拟中偏流引起漩涡卷渣

Fig. 10 Slag entrapment of eddy in experiment

## 4 结论

(1) 板坯连铸结晶器内钢/渣界面存在明显波谷特征, 界面上钢液流速和液渣剪应变率变化存在波峰特征. 根据各自的变化特征, 可将钢/渣界面分成三个区.

(2) 水口侧孔形状、水口向上倾角大小对钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为影响较小, 结晶器宽度、拉速以及水口浸入深度对钢/渣界面及界面上钢/渣行为影响较大.

(3) 随着侧孔向上倾角增大、拉速增加、结晶器宽度增加及水口浸入深度减小, 结晶器流场不稳定性增强, 结晶器内钢/渣界面不稳定性也增强, 不仅在界面迎谷面易形成剪切卷渣, 而且在界面水平区(水口附近)易诱发漩涡卷渣.

(4) 结合板坯结晶器内钢/渣界面特征及界面上钢/渣行为, 对板坯连铸结晶器内卷渣机理分析如下: 在界面迎谷面区, 界面上钢液流速较大而且存在脉动, 容易引起剪切卷渣, 在界面波谷点附近, 也容易形成钢液剪切卷渣; 在界面背谷面区, 钢液流速小, 且界面较为光滑, 一般不会发生卷渣; 在界面水平区, 由于受结晶器流场不稳定性影响较大, 在此区域界面易形成微小波动, 这种波动易诱发漩涡卷渣.

## 参 考 文 献

[1] Yang J. Study of stainless steel slab casting for high surface quali-

ty. *Iron Steel*, 2007, 42(9): 24

(杨军. 高表面质量不锈钢板坯连铸工艺研究. *钢铁*, 2007, 42(9): 24)

[2] Quan Y, Thomas B G. Transport and entrapment of particles in continuous casting of steel // *Molding of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes-XI*. The Minerals, Metals and Material Society, 2006: 745

[3] Sun Y H, Wei Y H, Cai K K. Experimental research of mold powder entrapment in wide slab caster mold. *Iron Steel*, 2007, 42(11): 31

(孙彦辉, 韦耀环, 蔡开科. 宽板坯连铸结晶器内卷渣现象实验研究. *钢铁*, 2007, 42(11): 31)

[4] Wang X G, Han C J, Cai K K, et al. Experimental research of submerged entry nozzle of slab continuous casting. *Iron Steel*, 2000, 35(9): 20

(万晓光, 韩传基, 蔡开科, 等. 连铸板坯结晶器浸入式水口试验研究. *钢铁*, 2000, 35(9): 20)

[5] Iquchi M, Sumida Y, Okada R. Evaluation of critical gas flow rate for the entrapment of slag using a water model. *ISIJ Int*, 1994, 34(2): 164

[6] Bao Y P, Zhu J Q, Jiang W, et al. Water modeling research on slag entrapment in the mould of thin slab continuous caster. *J Univ Sci Technol Beijing*, 1999, 21(6): 530

(包燕平, 朱建强, 蒋伟, 等. 薄板坯结晶器内卷渣现象的研究. *北京科技大学学报*, 1999, 21(6): 530)

[7] Manabu I, Jin Y, Tomoyuki S, et al. Model study on the entrapment of mold powder into molten steel. *ISIJ Int*, 2000, 40(7): 685

[8] Panaras G A, Theodorakakos A, Bergeles G. Numerical investigation of the free surface in a continuous steel casting mold model. *Metall Mater Trans B*, 1998, 29(5): 1117

[9] Cao N, Zhu M Y. Numerical simulation for the interfacial behavior of steel and slag in a slab continuous casting mold with high casting speed. *Acta Metall Sin*, 2007, 43(8): 824

(曹娜, 朱苗勇. 高拉速板坯连铸结晶器内钢/渣界面行为的数值模拟. *金属学报*, 2007, 43(8): 824)

[10] Huang X, Thomas B G. Modeling of transient flow phenomena in continuous casting of steel. *Can Metall Q*, 1998, 37(3): 197

[11] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J Comput Phys*, 1981, 39(1): 21

[12] Liu H P, Wang Z Y. Mathematical and hydromechanical modeling of features of the surface disturbance in a slab casting mold. *Res Iron Steel*, 2002(4): 47

(刘和平, 王忠英. 板坯结晶器液面波动的数学物理模拟及其特点. *钢铁研究*, 2002(4): 47)

[13] Tan L J, Shen H F, Liu B C, et al. Numerical simulation of surface oscillation in continuous casting mold. *Acta Metall Sin*, 2003, 39(4): 435

(谭利坚, 沈厚发, 柳百成, 等. 连铸结晶器液面波动的数值模拟. *金属学报*, 2003, 39(4): 435)