

## 水口浸入深度对结晶器内钢液流场与温度场的影响

于会香 王万军 王新华 张炯明

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

**摘要** 采用软件 CFX4.3 和新的结晶器入口速度赋值方法,数值模拟了水口浸入深度 150 ~ 450 mm 时板坯结晶器内钢液的速度和温度分布。结果表明,随着水口浸入深度的增加,结晶器内钢液流场和温度场的基本特征保持不变,但上部回流区范围增大,下回流区的涡心下移;窄面所受的向上和向下的最大剪切力的值变大,峰值出现位置下移;窄面热流密度峰值的位置下移,浸入深度为 300 mm 时,热流密度的峰值最小;射流对窄面撞击点的位置也随之下移;弯液面处钢液的水平速度呈逐渐减小的趋势,反映自由表面波动的  $F$  数逐渐变小。对于侧孔倾角为向下  $15^\circ$ 、结晶器截面为  $1\ 200\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$ 、拉坯速度为  $1.0\ \text{m}/\text{min}$  的工况,最佳的浸入深度为 300 mm。

**关键词** 板坯结晶器 流场 温度场 数值模拟 水口浸入深度

## Effects of Nozzle Submerged Depth on Flow and Temperature Field of Molten Steel in Mold

Yu Huixiang, Wang Wanjun, Wang Xinhua and Zhang Jiongming

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

**Abstract** Velocity and temperature distribution of molten steel in mold for slab with nozzle submerged depth 150 ~ 450 mm have been simulated by using software CFX4.3 and a new method to give the velocity at inlet of mold. Results showed that with increasing nozzle submerged depth, the basic pattern of flow and temperature field of steel didn't change, but the upper backflow region enlarged and the center of lower backflow region moved down; the value of down- and upward maximum shearing stress at narrow face increased and the position of occurred peak value moved down; the position of peak heat flux on narrow face moved down, and with submerged depth 300 mm, the peak value was minimum; the position of impingement point also moved down; and the horizontal velocity of molten steel in meniscus zone and the  $F$  number which expresses free surface fluctuation decreased. For  $1\ 200\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$  slab with casting speed  $1.0\ \text{m}/\text{min}$  and nozzle port angle  $15^\circ$ , the optimum nozzle submerged depth is 300 mm.

**Material Index** Mold for Slab, Flow Field, Temperature Field, Numerical Simulation, Nozzle Submerged Depth

赫冀成、朱苗勇、Thomas 等<sup>[1-5]</sup>都曾经对结晶器内钢液的流场作过仿真模拟。本文将水口的模拟结果与结晶器计算联合求解,研究了不同水口浸入深度对结晶器内钢液流场与温度场的影响,并研究了评判自由面波动的  $F$  数<sup>[6,7]</sup>。

### 1 数值模拟

计算所用工艺参数为:浸入式水口为双侧孔,内径为  $\Phi 65\ \text{mm}$ ,出口尺寸为  $83\ \text{mm} \times 65\ \text{mm}$ ,其倾角向下  $15^\circ$ ,浸入深度(水口侧孔中心线到结晶器液面的距离)分别为 150, 220, 300, 375, 450 mm,结晶器截面为  $1\ 200\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$ ,拉坯速度为  $1.0\ \text{m}/\text{min}$ 。

本数值模拟假设:(1)结晶器内钢液的流动为稳态粘性不可压缩流动;(2)不计结晶器液面的波动及传热,把液面设置为自由面;(3)不考虑结晶器内凝固壳的存在,计算区域的边界为达到但不包括糊状区的位置;(4)忽略结晶器振动及锥度等因素的影响。

边界条件为:(1)先对浸入式水口内的钢液流动进行数值模拟,然后通过 Fortran 程序,将水口出口的速度、 $\kappa$ 、 $\varepsilon$  直接赋给结晶器作为入口条件,温度设为  $1\ 530\ ^\circ\text{C}$ ;(2)模型出口定义在结晶器计算区域的底部,将出口处理为质量边界条件,即出口处与入口处质量守恒;(3)结晶器的壁面设为达到但不包括糊状区的位置,即壁面处的温度设为恒定的温度  $1\ 775\ \text{K}$ ;壁面采用无滑移边界条件;(4)结晶器液面设为自由表面,不计波动和传热。

计算采用连续性方程、Navier-Stokes 方程、能量守恒方程、 $\kappa$ - $\varepsilon$  方程联立求解的方法。

### 2 计算结果与讨论

#### 2.1 结晶器内钢液流场和温度场的基本特征

由图 1(a)可见,从水口流出的钢液沿直线向前运动并在行进中不断扩散,撞击到结晶器窄面后分成向上和向下两股流动。向上流股在自由表面附近形成两个较强回流;向下流股也形成与上部回流方

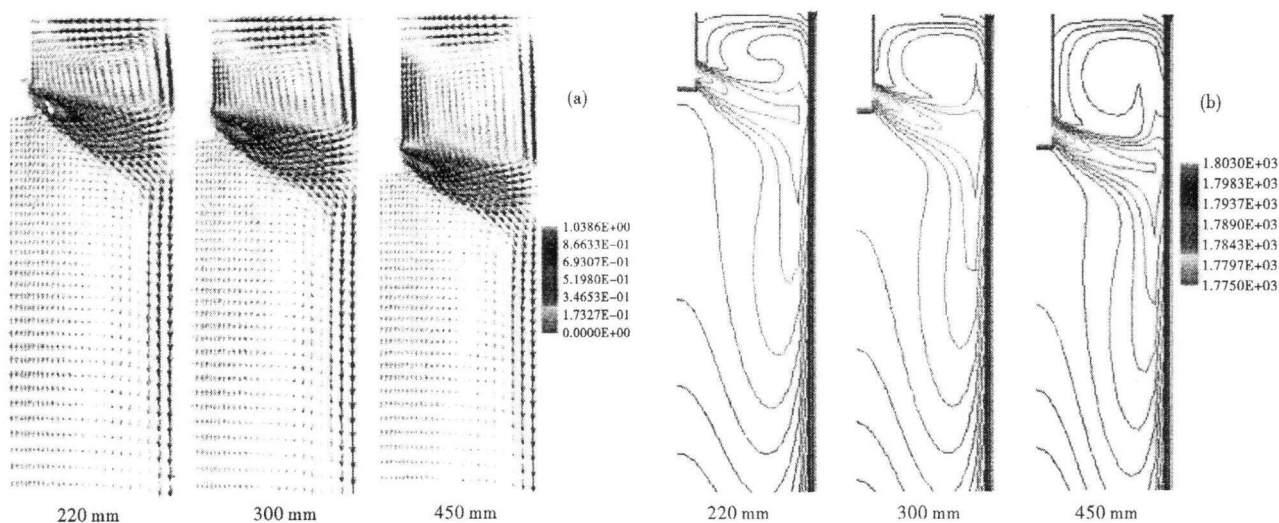


图 1 不同浸入深度时结晶器内钢液的流场(a)和温度场(b)

Fig. 1 Flow field (a) and temperature field (b) of molten steel in mold with different nozzle submerged depth

向相反、范围更大的两个回流,向下发展的强度逐渐减弱。

由图 1(b)可见,从水口流出的钢液含有大量的热量。随着注流的移动,热量逐渐传递,到达结晶器窄面后,分成向上和向下两股注流。向下的流股在行进中温度逐渐下降,向上的流股随着距撞击点距离的增加,温度也逐渐降低。

### 2.2 水口浸入深度的影响

(1)水口浸入深度变化时,结晶器内流场与温度场的形式基本不变。但随着水口浸入深度的增加,上部回流区范围明显增大,下回流区的涡心明显下移(图 1)。

(2)由图 2 可以看出,随着水口浸入深度的增

加,水口射流与窄面撞击点的位置逐渐下移。在弯月面到撞击点之间,随着距自由表面距离的增加,结晶器窄面所受到的剪切力先增大后减小,到达撞击点处剪切力的数值减小为 0。热流密度则逐渐增大,到达撞击点时热流密度达到最大。随着水口浸入深度的增加,向上最大剪切力和最大热流密度出现的位置逐渐下移,最大剪切力的数值呈逐渐增大的趋势,但浸入深度为 300 mm 时的最大剪切力比 220 mm 时略小,其数值分别为 -4.6 Pa 和 -4.7 Pa。最大热流密度的数值呈先减小后增大的趋势,浸入深度为 300 mm 时热流密度的峰值最小,数值为 0.359 MW/m<sup>2</sup>;在水口射流与窄面撞击点以下,随着距自由表面距离的增加,结晶器窄面所受到的剪

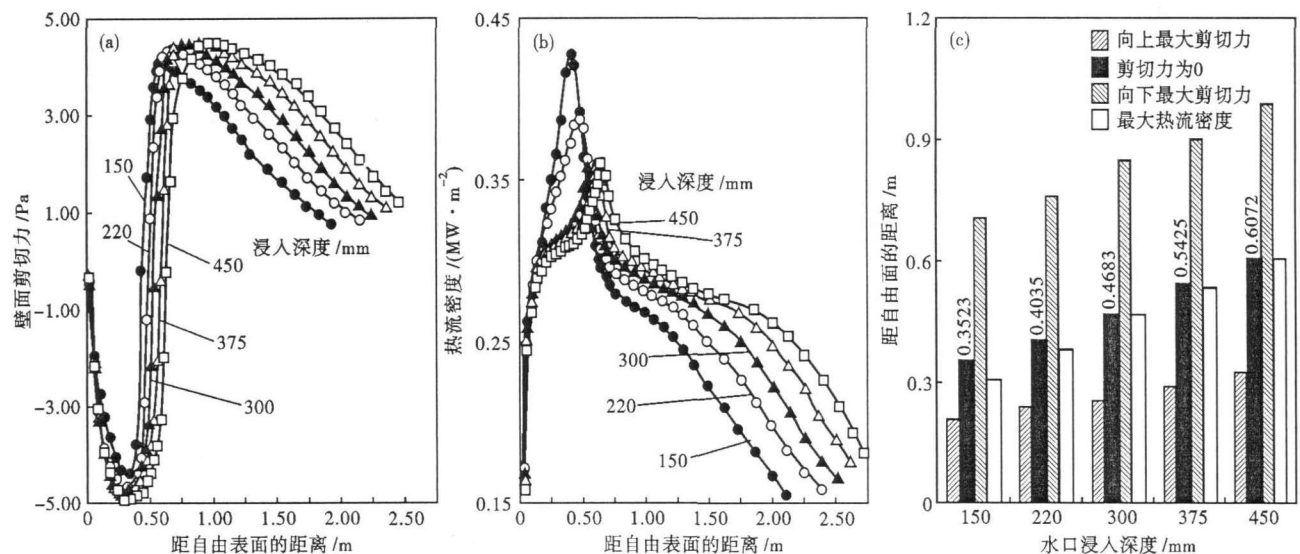


图 2 不同浸入深度下结晶器窄面处的剪切力(a)、热流密度(b)和特征值位置(c)

Fig. 2 Shearing stress (a), heat flux (b) and position of particular value (c) on narrow face of mold with different nozzle submerged depth

切力先增大后减小。热流密度则逐渐减小。随着水口浸入深度的增加,向下最大剪切力出现的位置逐渐下移,最大剪切力的数值逐渐增大。对于同一水口浸入深度,向上最大剪切力的数值总是比向下最大剪切力大。

当浸入深度为 150, 220, 300, 375, 450 mm 时,射流与窄面撞击点的位置距自由表面的距离分别为 352, 404, 468, 543, 607 mm。

(3)对弯月面处水平速度和  $F$  数的影响。表 1 为不同浸入深度下弯月面处钢液的水平速度(速度为正表示钢液流向浸入式水口的方向)。可见,随着水口浸入深度的增加,弯液面处钢液的水平速度呈逐渐减小的趋势。表明钢液对保护渣的卷入作用逐渐减弱。浸入深度为 150 mm 的水平速度比 220 mm 时略小,其数值分别为 0.245 m/s 和 0.249 m/s,这是由于浸入深度为 150 mm 时钢液的上回流发展不完全的缘故,在做水模型的时候也发现了这种现象,即沿着结晶器窄面向上的流股在未达到结晶器液面前已经改变为流向水口的流股,所以测得的弯月面附近的流速和波动均较小。

表 1 不同水口浸入深度弯月面处钢液的水平速度  
Table 1 Horizontal velocity of molten steel at meniscus with different nozzle submerged depth

浸入深度/mm	钢液水平速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
150	0.245
220	0.249
300	0.245
375	0.237
450	0.228

为了评价结晶器流场的好坏,手鸣俊雄和 Teshima 等人<sup>[6,7]</sup>在水模型研究的基础上,提出了用  $F$  数来反映自由表面的波动:

$$F = \frac{\rho Q V (1 - \sin\theta)}{4D}$$

式中: $\rho$ -水的密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $Q$ -水的流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); $V$ -水撞击结晶器窄边的速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\theta$ -水撞击结晶器窄边的角度; $D$ -撞击点与自由面之间的距离/m。

本文用模拟中得到的钢水的参数代替上述公式中水的参数,对不同浸入深度下的  $F$  数进行了研究(表 2)。由表 2 可见,随着水口浸入深度的增加, $F$  数逐渐变小。浸入深度为 150 mm 时, $F$  数最大,为 6.2。表明此时上升流股传递到弯月面的动量较大,易引起保护渣的卷入;浸入深度为 450 mm 时, $F$  数最

表 2 水口浸入深度对  $F$  数的影响  
Table 2 Effect of nozzle submerged depth on  $F$  number

浸入深度/mm	$F$ 数
150	6.2
220	6.1
300	3.2
375	2.6
450	2.2

小,为 2.2。表明此时上升流股传递到弯月面的动量较小,弯月面处钢液不活跃,不利于保护渣的熔化。

### 3 结论

(1)随着距自由表面距离的增加,结晶器窄面所受到的剪切力呈“正弦波”的形状,即在撞击点之上,先增大后减小;在撞击点之下,先增大后减小,撞击点处的壁面剪切力为 0。热流密度则先增大后减小,撞击点处的热流密度达到最大。

(2)水口浸入深度增加,结晶器内钢液流场和温度场基本特征保持不变,但上部回流区范围增大,下回流区的涡心下移;窄面所受的向上和向下的最大剪切力的值变大,峰值出现位置下移;窄面热流密度峰值的位置下移,浸入深度为 300 mm 时,热流密度的峰值最小;射流与窄面撞击点的位置也随之下移;弯液面处钢液的水平速度呈逐渐减小的趋势, $F$  数逐渐变小,表明钢液对保护渣卷入作用逐渐减弱。

(3)对于侧孔倾角为向下  $15^\circ$ 、结晶器截面为  $1\ 200\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$ 、拉坯速度为  $1.0\ \text{m}/\text{min}$  的工况,最佳的浸入深度为 300 mm。

### 参考文献

- 雷方,赫冀成,李宝宽.板坯连铸结晶器内钢液流动的数值分析.东北大学学报,1994,15(4):408
- 雷洪,朱苗勇,邱同榜.板坯连铸结晶器流场优化.炼钢,2000,16(3):29
- Thomas B G, Mika L J, Najjar F M. Simulation of Fluid Flow Inside a Continuous Slab-Casting Machine. Metallurgical and Materials Transactions B, 1990(21B):387
- Najjar Fady M, Thomas B G, Hershey Donald E. Numerical Study of Steady Turbulent Flow Through Bifurcated Nozzles in Continuous Casting. Metallurgical and Materials Transactions B, 1995(26B):749
- 于会香,张炯明,王万军.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.北京科技大学学报,2002,24(5):492
- 手鸣俊雄,久保田淳,铃木干雄.スラブ高速铸造時の连铸铸型内溶钢流动におよぼす铸造条件の影響.铁と钢,1992,79(5):40
- Teshima T, Osame M, Okimoto K. Improvement of Surface Property of Steel at High Casting Speed. 1988 Steelmaking Conference Proceedings, 1988:111

于会香(1977-),女,硕士,讲师,2002年北京科技大学毕业,炼钢和连铸。

收稿日期:2008-03-03