

## 不同宽度板坯结晶器内流场的水模型和数值模拟研究

张大江 陈登福 王翠娜 靳 星 谢 鑫

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘 要** 采用1:0.8比例水模型和基于 Fluent 软件的数值模拟, 实验研究了 190 mm × (1 500 ~ 1 900) mm 宽板坯连铸结晶器的流场。结果表明, 在钢水流量不变的情况下, 随着结晶器断面宽度的增加, 流股的冲击深度增加, 流股涡心高度降低, 结晶器表面流速、液面波动、流股对结晶器窄面的壁面剪切力均减小, 卷渣和液面裸露几率逐渐降低。在钢水流量不变的情况下, 随着结晶器断面宽度的增加, 若采用同一水口, 可以适当减小水口插入深度。

**关键词** 板坯连铸结晶器 水模型 数值模拟 流场 壁面剪切力

## A Study on Water Model and Numerical Simulation of Flow Field in Slab Casting Mold with Different Width

Zhang Dajiang, Chen Dengfu, Wang Cuina, Jin Xing and Xie Xin

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract** The flow field in 190 mm × (1 500 ~ 1 900) mm wide slab casting mold has been studied by using a scale 1:0.8 water model and numerical-simulated by Fluent soft ware. Results show that in constant of liquid flow rate, with increasing the width of mold, the impact depth of flow increases, the level of vortex center drops, the flow rate at liquid surface in mold, the liquid level fluctuation and the shear stress of liquid flow to narrow side of mold decrease, and the probability of slag entrapment and bare liquid surface reduces gradually. In constant of liquid flow rate and using same nozzle, with increasing the width of mold section it is available to properly decrease the submerged depth of submerged nozzle.

**Material Index** Slab Casting Mold, Water Model, Numerical Simulation, Flow Field, Wall Shear Stress

结晶器内钢水的流动状况包括液面的波动<sup>[1,2]</sup>、注流对窄面的冲击、渣层覆盖状况、表面流速<sup>[3]</sup>等, 极大地影响着铸坯质量和浇铸安全进行。优化浸入式水口结构参数和结晶器操作工艺参数是改善结晶器内钢液流动方式、促进结晶器流场合理分布的有效手段, 对提高连铸坯质量具有重要作用<sup>[4,5]</sup>。

本实验以钢厂 190 mm × (1 500 ~ 1 900) mm 断面结晶器为研究对象, 在流量一定的条件下, 以物理模拟和数值模拟相结合, 研究不同宽度结晶器断面对结晶器流场的影响。实验的特点为: 在物理模拟中加入防止塞棒摆动装置和减小中间包液面扰动装置; 在数值仿真中应用局部网格加密技术, 除了分析结晶器中心面流场与自由面速度场外, 还引入了壁面剪切力, 以分析流股对结晶器窄面的冲击力大小。

### 1 实验方法

#### 1.1 物理模拟实验方法

根据相似理论, 在保证弗鲁德准数  $Fr$  相等的条件下, 采用1:0.8的水模型进行实验(图1)。

实验采用水模拟钢液, 混合油模拟液渣, 发泡粒

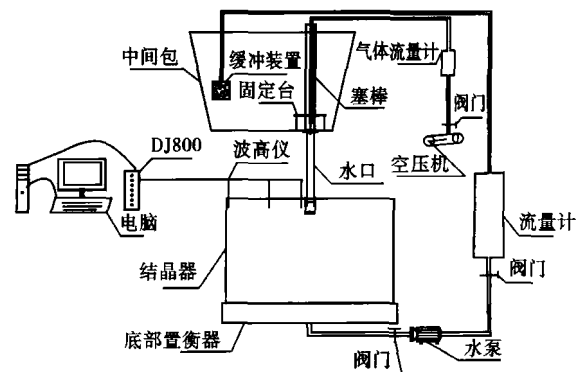


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematics of experimental device

子模拟粉渣。使用循环水控制系统进行实验; 采用在塞棒底部开孔, 加入蓝墨水的方式, 测量钢液在结晶器内的冲击深度; 用 DJ800 型多功能水工监测系统对液面波动进行测定。波高仪 1#测点在浸入式水口附近, 离水口侧壁距离 10 mm, 2#测点放在结晶器 1/4 处, 3#测点置于离结晶器窄边 10 mm 处。根据实际工艺条件和相似比, 固定水模型实验流量

14.42 m<sup>3</sup>/h。在结晶器液面稳定 5 min 后采集数据,以1/10大波平均值作为衡量结晶器液面波动的标准。每组实验测量 3 次,取平均值作为该组实验的波动值。结晶器模型尺寸及水口结构参数见表 1。

表 1 结晶器水模型结构尺寸  
Table 1 Structure size of water model for mold

结晶器参数			水口侧孔参数		
宽度/mm	厚度/mm	高度/mm	高度/mm	宽度/mm	倾角/°
1 200 ~ 1 520	152 ~ 184	1 080	56	53	15

结晶器流出的水量由水泵前的阀门控制,流入的水量由安装在中间包底部的塞棒控制,两个阀门综合作用,以保证结晶器水位稳定。实验在中间包底部安装固定塞棒的装置,减小了塞棒的抖动,可以较好地维持结晶器液面的平稳,提高了实验的准确性。由于实验模型比例较大,水流量较大,循环水进入中间包,对中间包液面的扰动较大。因此,实验在循环水入中间包的管道末端加入缓冲装置,以减小中间包液面波动对结晶器流场的影响。

物理实验通过液面波高测量、冲击深度、渣模拟实验,分别探讨不同宽度结晶器断面条件下,结晶器流场的变化趋势。由于实际生产受炉机匹配的限制,要求在一定时间内浇铸完一炉钢,即对不同断面的结晶器,水口的通钢量一定。于是实验在对比同一厚度,不同宽度结晶器断面尺寸对流场影响时,保持通钢量不变。水模型实验工况如下:在 14.42 m<sup>3</sup>/h 流量下,插入深度 128 mm,吹气量 6.5 L/min 时,对同一厚度,不同宽度结晶器断面进行实验分析。

## 1.2 数值仿真模型

### 1.2.1 基本假设和控制方程

根据流体力学的基本原理,基于 Fluent 商业软件平台建立了板坯连铸结晶器内钢液流动的数学模型。对结晶器内的钢液流动状态做如下假设:

(1) 结晶器内的钢液流动为粘性不可压缩的稳态流动;(2) 忽略结晶器弯月面的表面波动及保护渣对流动的影响;(3) 忽略结晶器内凝固壳的存在;(4) 结晶器内的钢液按均相介质处理;(5) 不考虑结晶器振动的影响。

描述结晶器内钢液流动的控制方程包括连续性方程、动量方程以及工程上广泛应用的湍流  $k-\varepsilon$  双方程<sup>[6,7]</sup>。对于本研究所涉及的结晶器内三维稳态不可压缩流体,具体方程如下:

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程(N-S 方程):

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

N-S 方程中  $\mu_{\text{eff}}$  为有效粘度,即:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_0 + \mu_t = \mu_0 + \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (3)$$

式中: $u_i, u_j$ - 速度矢量; $x_i, x_j$ - 方向矢量;下标  $i, j$  代表 3 个不同的坐标方向; $\rho$ - 流体密度; $p$ - 压力; $g$ - 重力加速度; $\mu_0, \mu_t$ - 分别为层流和湍流粘度; $k$ - 湍动能; $\varepsilon$ - 湍动能耗散率。

公式(3)中  $k$  和  $\varepsilon$  值由湍动能方程和湍动能耗散方程联立求解获得。

### 1.2.2 边界条件和模型的建立

(1) 入口边界:定义为速度入口,其速度由拉坯速度、结晶器的断面和水口的直径共同决定;(2) 出口边界:设为压力出口,出口边界的静压(相对压力)设为 0,结晶器计算高度取 1 500 mm;(3) 结晶器液面 and 对称面:各物理量的对称面上的速度梯度都等于 0,结晶器液面设为自由面;(4) 结晶器壁面:垂直于壁面的速度分量设为 0,平行于壁面的速度、压力及  $k, \varepsilon$  采用无滑移边界,与壁面相邻的节点上,平行于壁面的速度分量  $k, \varepsilon$  由壁面函数确定。

利用微分方程和边界条件,建立三维数学模型,应用 Fluent 软件模拟计算结晶器流场。本次研究利用了 Fluent 模拟软件中比较成熟的局部网格加密技术,对 SEM 和流股冲击到结晶器窄面流经的区域进行网格局部加密,大大减少了计算机的存储量和计算时间,提高了计算精度。

数值模拟通过分析流股冲击深度、涡心高度、流股对窄面的剪应力、结晶器表面流速,分别讨论不同宽度结晶器断面条件下,结晶器内流场的变化趋势<sup>[8,9]</sup>。实验工况如下:在通钢量为 25.20 m<sup>3</sup>/h、插入深度 160 mm、吹气量 10 L/min 时,对同一厚度,不同宽度结晶器断面进行实验分析。

## 2 实验与仿真结果的分析

(1) 断面宽度对液面波动的影响。从图 2(a) 中看出,对 190 mm 厚度结晶器,在保持水口通钢量不变的情况下,结晶器宽度从 1 500 mm 增加到 1 900 mm 过程中,结晶器液面波动逐渐减小<sup>[10,11]</sup>。因随着结晶器宽度的增加,流股运动到结晶器窄边的路程增加,流股与结晶器窄边的碰撞点下移,沿窄边向上

的流股从碰撞点到钢液面的路程增加,流股上升过程中的动能损失较大,流股对结晶器液面的扰动减小。

(2) 断面宽度对冲击深度的影响。由图 2(b)可知,水口通钢量一定时,随着结晶器宽度的增加,冲击深度逐渐增大。当冲击深度过大时,不利于夹杂物的上浮及保护渣的熔化。因此在保持结晶器液面波动合理的情况下,应适当减小水口插入深度,以促进保护渣的熔化,防止结晶器液面结冷钢。

(3) 断面宽度对结晶器中心面流场的影响。由图 3(a,b,c)可见,当通钢量一定时,随着结晶器宽度的增大,水口出口流股与结晶器窄面的冲击点不断下降,射流将发展的更远,上回流的范围增大,下回流区的涡心高度下降,这对夹杂物的上浮不利,但对于稳定结晶器液面波动有好处。

(4) 断面宽度对结晶器壁面剪切力的影响。在结晶器内,从水口流出的钢液冲击到窄面时,将钢液对窄面的作用力分解为垂直于结晶器窄面的力即为应力,平行于结晶器窄面的力即为剪切力,由此可以得出,壁面剪切力是流股对壁面冲击力大小的表征量。本次研究过程中,将流股对结晶器窄面冲击的剪应力可视化,分析不同工况下钢液流股对结晶器窄面冲击的剪应力。

从图 3(d,e,f)可见,从钢液冲击到窄面的位置到弯月面之间,结晶器窄面所受到的剪切力先增大后减小,弯月面附近的剪应力较小;在流股与结晶器窄面冲击点附近的剪应力比较小,因为流股刚冲到

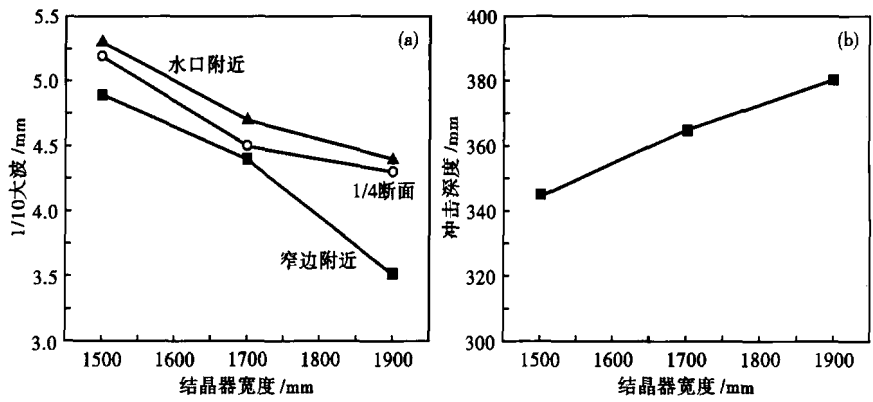


图 2 结晶器宽度对结晶器液面波动(a)和流股冲击深度(b)的影响  
Fig. 2 Effect of width of mold on fluctuation of liquid level in mold (a) and flow impact depth (b)

窄面时,平行于窄面方向的力比较小,所以剪应力较小;在冲击点以下,随着距自由表面距离的增加,结晶器窄面所受到的剪切力先增大后减小。随着结晶器宽度的增加,结晶器窄边最大剪应力值逐渐减小,且最大剪应力点的位置逐渐下移,这是因为在通钢量不变时,流股出水口侧孔的动能不变,对 1 500 mm 宽度结晶器,流股冲击到窄边的路程较小,流股冲击到窄边的动能较大,上下回流流股引起的剪应力较大。上部剪应力较大时,容易加剧液面波动,导致卷渣的产生,这与水模型波高测量结果一致;下部剪应力较大时,钢液对初生坯壳的冲刷剧烈,影响凝固坯壳的生长,剪应力过大时,有可能因凝固坯壳太薄而产生拉漏现象。因此,在满足其他工艺参数的情况下,应减少钢液对结晶器窄面的剪应力。

(5) 断面宽度对卷渣的影响。在保持通钢量不变,1 500 mm 宽度时的卷渣次数最大为 7 次,结晶器宽度为 1 700 mm 时次之,卷渣次数为 2 次,1 900 mm 宽度时,未出现卷渣现象。实验结果表明,在一定工况条件下,随着结晶器宽度的增大,水

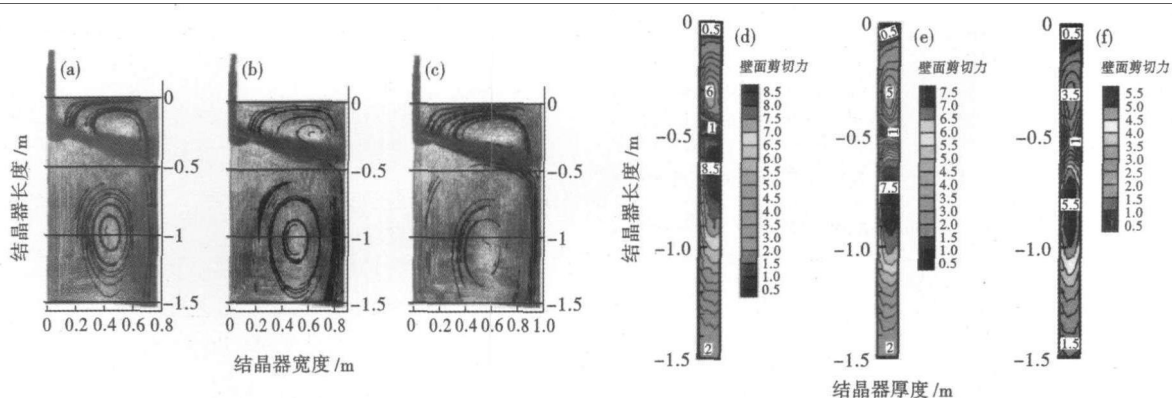


图 3 结晶器宽度对流场(a,b,c)和窄边剪切力(d,e,f)的影响:结晶器宽度/mm- (a)(d)1 500; (b)(e)- 1 700; (c)(f)- 1 900  
Fig. 3 Effect of width of mold on flow field (a, b, c) and narrow wall shear stress (d, e, f): width of mold/mm- (a) (d) 1 500; (b) (e) 1 700; (c) (f) 1 900

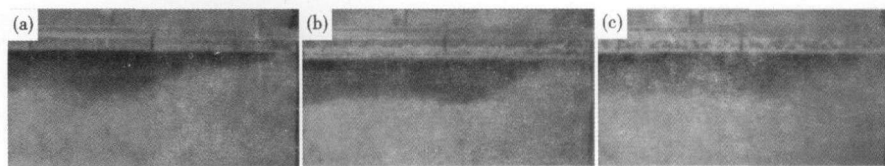


图4 结晶器宽度(a-1 500 mm;b-1 700 mm;c-1 900 mm)对渣层覆盖的影响  
Fig.4 Effect of width of mold (a-1 500 mm, b-1 700 mm and c-1 900 mm) on slag layer shielding

口侧孔流股的流动空间增大,上回流区范围变大,上升流股到达结晶器液面的动能减小,对油层的剪切作用减小,卷渣情况得到缓解<sup>[12]</sup>。

(6) 断面宽度对渣层分布的影响。从图4可见,在通钢量不变的情况下,随着结晶器宽度的增加,流股冲击到窄边的距离增大,上升流股到达结晶器液面的速度减小,对油层的推动力减弱,结晶器窄边附近裸露几率减小。结晶器断面宽度为1 500 mm时,结晶器窄面弯月面处,油层几乎不存在,液面上只有很少的渣层。结晶器断面宽度增大为1 700 mm时,窄边附近油层厚度变薄,但无裸露现象产生。当断面宽度为1 900 mm时,结晶器液面平稳,渣层分布均匀,结晶器液面不同位置的渣层厚度相差较小,无裸露现象产生。

(7) 断面宽度对结晶器表面速度场的影响。从图5可见,随着结晶器宽度的增大,自由面的速度和速度梯度均逐渐减小,结晶器液面趋于平稳,保护渣覆盖状况得到改善,这与物理模拟结果一致。

断面宽度从1 500 mm增加到1 900 mm时,结晶器表面最大流速从0.4 m/s降低到0.2 m/s,这是因为通钢量一定时,钢液流出口处的速度一定,随着宽度的增加,流股动能损失较大,造成上回流区较

弱,钢液到达结晶器表面的速度减小,弯月面处钢液回流速度减小,如图5中1 900 mm宽度时弯月面处的速度仅为0.08 m/s,弯月面处钢液回流速度较小时,不利于保护渣的熔化。

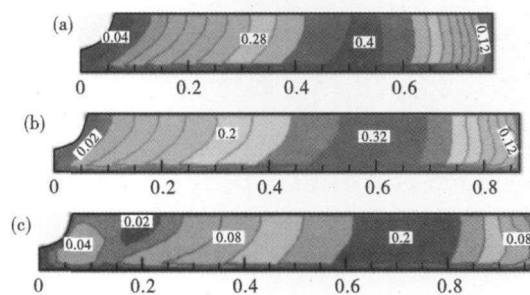


图5 结晶器宽度(a-1 500 mm;b-1 700 mm;c-1 900 mm)对自由面速度场的影响/( $m \cdot s^{-1}$ )  
Fig.5 Effect of width of mold (a-1 500 mm, b-1 700 mm and c-1 900 mm) on free surface velocity /( $m \cdot s^{-1}$ )

### 3 结论

(1) 在保持通钢量不变的情况下,随着结晶器断面宽度的增加,流股冲击到窄边的时间延长,冲击深度增加,涡心高度降低;流股对窄边的剪应力减小,有利于液面的平稳,但对夹杂物的上浮不利。

(2) 在保持通钢量不变的情况下,随着结晶器断面宽度的增加,结晶器液面的表面流速减小,卷渣次数逐渐减少,液面覆盖趋向均匀。

(3) 实际生产中,在保持通钢量不变的情况下,随着结晶器断面宽度的增加,若采用同一水口,可以适当减小水口插入深度。

### 参考文献

- 1 Kubota Jun, Okimoto Kazutaka, Shirayama Akira, et al. Meniscus Flow Control in the Mold by Traveling Magnetic Field for High Speed Slab Caster. *Steelmaking Conference Proceedings*, 1991, 74(2): 197
- 2 Gupta D, Lahiri A K. Cold Model Study of the Surface Profile in a Continuous Slab Casting Model: Effect of Second Phase. *Metallurgical and Material Transactions*, 1996, 27B(8): 695
- 3 陆巧彤, 杨荣光, 王新华, 等. 板坯连铸结晶器内钢液表面流速水模研究. *炼钢*, 2007, 23(1): 30
- 4 Toru Kato, Masashi Hara, Akifumi Muto, et al. Fluid Flow Behavior in Submerged Entry Nozzle of Continuous Casting. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 2007, 47(6): 840
- 5 Satish Kumar D, Rajendra T, Sarkar A, et al. Slab Quality Improvement by Controlling Mould Fluid Flow. *Ironmaking and Steelmaking*, 2007, 34(2): 185
- 6 Nguyen A V, Evans G M. Computational Fluid Dynamics Modeling of Gas Jets Impinging onto Liquid Pools. *Applied Mathematical Modeling*, 2006, 30: 1472
- 7 Thomas B G, Yuan Q. Comparison of Four Methods to Evaluate Fluid Velocities in a Continuous Slab Casting Mold. *ISIJ International*, 2001, 41(10): 1262
- 8 Zhang Xing-guo, Zhang Wen-xiao, Jin Jun-ze, et al. Flow of Steel in Mold Region during Continuous Casting. *Journal of Iron and Steel Research*, 2007, 14(2): 30
- 9 Zhang Li-feng, Yang Su-bo, Cai Kai-ke. Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting Strand. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2007, 38B: 63
- 10 陈永范, 陈德杰, 李权, 等. 大板坯连铸结晶器内流场实验研究. *炼钢*, 1998, 14(2): 25
- 11 何矿年, 肖寄光, 韦耀环, 等. 宽板坯连铸结晶器 SEM 结构和操作参数优化试验研究. *钢铁*, 2008, 43(1): 26
- 12 Quan Yuan, Thomas B G. Transport and Entrapment of Particles in Continuous Casting of Steel. *The Minerals Metals & Materials Society*, 2006: 745

张大江(1983-),男,硕士研究生,连铸过程数理模拟研究。

收稿日期:2009-09-04