

连铸结晶器液位波动的数值模拟*

谭利坚 沈厚发 柳百成 刘晓 徐荣军 李永全
(清华大学机械工程系, 北京 100084) (宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要 应用 SOLA-VOF 方法研究了板坯连铸结晶器自由表面的形状及钢水流动行为, 计算得出了具有实际物理意义的液位波动值. 通过数值模拟浸入水口流出角度及流出速度对液位波动的影响关系, 指出液位波动的波形与回流区大小及位置密切相关, 并分析了液位波动的形成原因.

关键词 连铸, 结晶器, 液位波动, 数值模拟, SOLA-VOF

中图分类号 TB115, TG249.7 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2003)04-0435-04

NUMERICAL SIMULATION OF SURFACE OSCILLATION IN CONTINUOUS CASTING MOLD

TAN Lijian, SHEN Houfa, LIU Baicheng

Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

LIU Xiao, XU Rongjun, LI Yongquan

Baoshan Iron and Steel Co., LTD., Shanghai 201900

Correspondent: SHEN Houfa, associate professor, Tel: (010)62789922, E-mail: shen@tsinghua.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China-BaoSteel Conjoint Foundation

(No.50174031)

Manuscript received 2002-06-10, in revised form 2002-09-16

ABSTRACT Using the SOLA-VOF methodology, the shape of free surface and the flow pattern of the molten steel in the mold of a continuous slab casting have been simulated and the free surface height is calculated. Based on the obtained relationship between the surface oscillation amplitude and the continuous casting parameters, such as the port inclination degree and the outlet velocity of the submerged entry nozzle, it is pointed that the surface oscillation morphology is inherently influenced by the size and the position of the circumfluence region in the mold. The mechanism of the formation of surface oscillation is also analyzed.

KEY WORDS continuous casting, mold, surface oscillation, numerical simulation, SOLA-VOF

连铸结晶器内钢水的液位波动不仅关系到熔渣覆盖层的冶金热力学行为, 还会对杂质物的分布产生重要影响. 自由表面波动过于剧烈, 则会产生卷渣等缺陷; 自由表面波动过于平静, 熔渣不易起到吸渣及润滑等作用, 生产中通常要求将液面波动控制在一定范围内. 实际研究连铸钢水液位波动的影响规律较困难, 目前的研究方法大多采用水模拟实验^[1-3]. 连铸结晶器内的流动现象已有很多实验及模拟研究^[1-5], 并逐步用于指导工业生产. 但是, 数值模拟结晶器流场分布时, 通常将钢液自由表面处理为平界面.

蔡开科等人^[1]通过水模拟实验, 研究了水口及结晶器结构参数对液位波动的影响. Thomas 等人^[5]采用紊流动能方法计算了连铸板坯结晶器的液面波动. 通用商品化软件如 CFX 可以描述钢水自由表面形状, 但在新型结晶器与水口及特殊工艺方面的功能不足. SOLA-VOF 方法^[6]已成功用于铸造充型及流体自由表面波动模拟等方面^[7,8]. 本文采用 SOLA-VOF 方法数值模拟板坯连铸结晶器的液位波动及流场分布, 并探讨钢水液位波动的形成机理.

1 模拟方法

计算所用的数学模型包括描述流体流动行为的连续方程和动量方程.

连续性方程:

$$\operatorname{div}(\rho U) = 0$$

* 国家自然科学基金和宝钢联合基金资助项目 50174031

收到初稿日期: 2002-06-10, 收到修改稿日期: 2002-09-16

作者简介: 谭利坚, 男, 1978 年生, 硕士

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \text{div}(\rho U u_i) = \text{div}(\mu_{\text{eff}} \cdot \text{grad} u_i) + S_i, \quad (u_i = u, v)$$

上述方程中, ρ 为密度, U 为速度矢量, μ_{eff} 为有效粘度, S_i 为源项. 有效粘度 μ_{eff} 可通过 $K - \epsilon$ 双方程模型及壁面函数计算求得 [5].

研究结晶器的液位波动时, 采用 SOLA-VOF 方法模拟自由表面. 自由表面边界的体积函数 $F(x, y, t)$ 定义如下 [6]:

$$F = \begin{cases} 1 & \text{网格充满流体} \\ 0-1 & \text{表面网格 (非完全充满)} \\ 0 & \text{网格为空} \end{cases}$$

$F(x, y, t)$ 满足体积函数方程:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(Fv)}{\partial y} = 0$$

采用 Donor-Acceptor 法计算通过界面的流量, 并确定自由表面边界的移动情况. 然后根据计算所得的体积函数 $F(x, y, t)$, 构造出自由表面. 在已得每个网格体积函数的基础上, 本研究采取了以下方法 (图 1) 构造表面:

首先假设表面上 S 点的体积函数 $F_S=0.5$, 然后利用四个网格 $(I, J), (I+1, J), (I, J+1), (I+1, J+1)$ 处的体积函数来求出表面上的点 S . 四个网格的公共点 P 点处体积函数对坐标的导数可取为:

$$F_P = (F_{i,j} + F_{i+1,j} + F_{i,j+1} + F_{i+1,j+1})/4$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{(F_{i+1,j} + F_{i+1,j+1} - F_{i,j} - F_{i,j+1})}{2 \cdot (x_{i+1} - x_i)}$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{(F_{i,j+1} + F_{i+1,j+1} - F_{i,j} - F_{i+1,j})}{2 \cdot (y_{j+1} - y_j)}$$

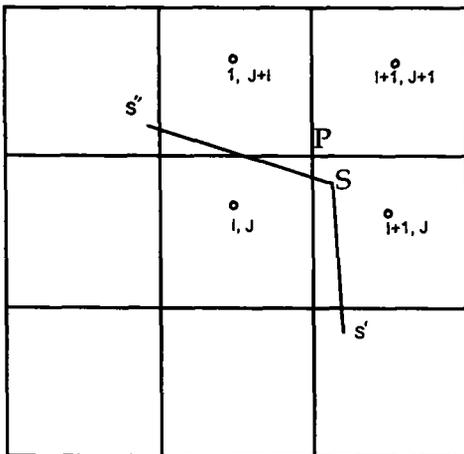


图 1 自由表面的处理方法
Fig.1 Treatment method of free surface

由于

$$\Delta F = \partial F/\partial x \cdot \Delta x + \partial F/\partial y \cdot \Delta y$$

可取

$$\Delta x = \Delta F \cdot \partial F/\partial x / [(\partial F/\partial x)^2 + (\partial F/\partial y)^2]$$

$$\Delta y = \Delta F \cdot \partial F/\partial y / [(\partial F/\partial x)^2 + (\partial F/\partial y)^2]$$

其中, ΔF 为表面上 S 点和 P 点的体积函数之差 ($0.5 - F_P$); $\Delta x, \Delta y$ 为 S 点与 P 点的坐标之差. 求出 $\Delta x, \Delta y$, 就可以确定表面上的一点, 即 S 点. 如果 $F_{i,j}$ 和 $F_{i+1,j}$ 一个大于 0.5、一个小于 0.5, 可以认为表面通过它们之间. 通过相同的办法, 可以求出 S' , 再连接 S 和 S' 就获得了一条界线 SS' . 同样可以求出界线 SS'' . 如果 $F_{i,j}$ 和 $F_{i+1,j}$ 均大于 0.5 或者均小于 0.5, 这就说明 $(I, J), (I+1, J)$ 两个节点都在钢液内部或者钢液外部. 从而也就不存在界线 SS' . 对于 SS'' 的分析类似于 SS' . 采用这一方法可确定自由表面的位置, 并保证所构造的相邻网格的自由表面保持连续.

2 水模拟验证

本研究先用水模拟实验与数值模拟结果进行了比较. 水模型实验基于 1830 mm × 230 mm 实际板坯铸机结晶器以 1 : 6 的比例为模型 [9]. 水模型中水口为水平开口, 其尺寸为 10 mm × 10 mm, 浸入深度为 90 mm. 当水流量为 $2.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水模拟及数值模拟的液面形状如图 2 所示. 通过改变水流量的大小, 可以得到不同的液面高度 h . 表 1 列出了水流量为 $1.13 \times 10^{-4}, 1.90 \times 10^{-4}$ 和 $2.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水模拟实验与数值

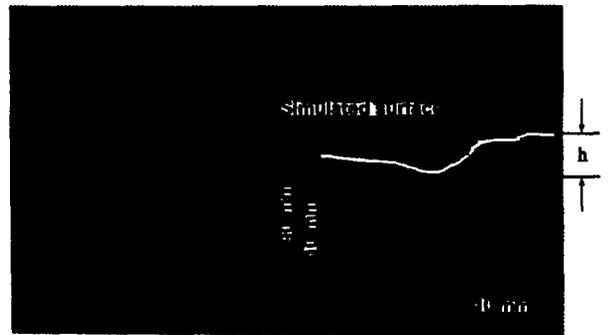


图 2 结晶器表面波水模拟及数值模拟结果比较

Fig.2 Comparison of experimental and simulated standing wave in the mold

表 1 液面高度与水口流量关系

Table 1 Wave height with different flow rates

Flow rate l/min	Wave height	
	Experimental	Numerical
6.8	0.6	0.8
11.4	2.03	2.03
15.9	3.3	3.18

模拟所得的液面高度. 以上结果表明数值模拟与水模型实验结果一致^[9], 数值模拟可以反映真实情况.

基于以上模型与结果, 本文研究浸入水口的出流角度、出流速度对钢水流动及液面形状的影响. 为研究流速范围 $4.5 \times 10^{-2} \sim 9.0 \times 10^{-2}$ m/s 的薄板坯连铸过程, 水口出流速度的范围取 2.0—4.0 m/s. 由于结晶器、水口模型结构对称, 实际计算时可模拟 1/2 结晶器流场分布及液位波动. 结晶器尺寸见图 3, 左边为对称边界, 计算区域为 660 mm×1500 mm. 为了获取较高的精度, 在水口及自由表面附近局部加密了网格.

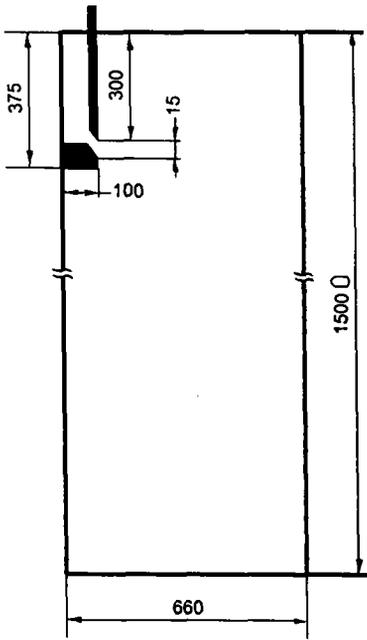


图 3 水口尺寸及计算区域

Fig.3 Nozzle dimension and calculation domain (mm)

3 计算结果及分析

图 4a, b 分别表示浸入水口出流速度 3.0 m/s、出口角向下 15° 和向上 15° 时, 计算所得的钢水流线. 钢液从水口出口处喷出, 其撞击到结晶器侧壁(窄面)的冲击点 A 位于出口角方向. 钢水在到达冲击点 A 之前, 沿水口出流方向分离, 形成上下流股, 并发展成两个回流区. 出流角度向下 15° 时, 回流中心 B 到自由表面的距离为 0.23 m(图 4a); 出流角度向上 15° 时, 回流中心 B 到自由表面的距离为 0.14 m(图 4b). 出口角上偏, 出流方向上侧的回流中心 B 随之向上偏移, 但回流中心 B 的水平位置几乎相同. 另外, 出口角上偏, 出流方向下侧的回流中心 C 亦朝结晶器侧壁偏移(角度增加 30°, 偏移量为 0.06 m); 而回流中心 C 的高度位置几乎相同. 并且出口向上时(图 4b), 出流方向下侧的回流区域大, 即结晶器中向水口返回流动的钢水体积大.

图 5 表示水口出流速度 3.0 m/s 时, 出口角对钢水液面形状的影响. 钢水沿结晶器侧壁上升达到最大高度形

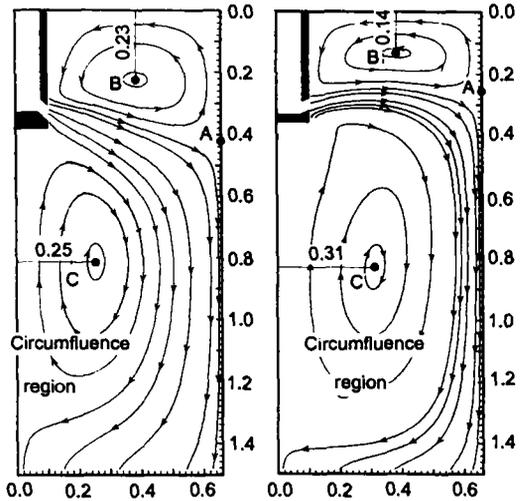


图 4 水口角度对流场分布的影响

Fig.4 Influence of the nozzle port inclination on the flow pattern in the mold

(a) 15° (b) -15°

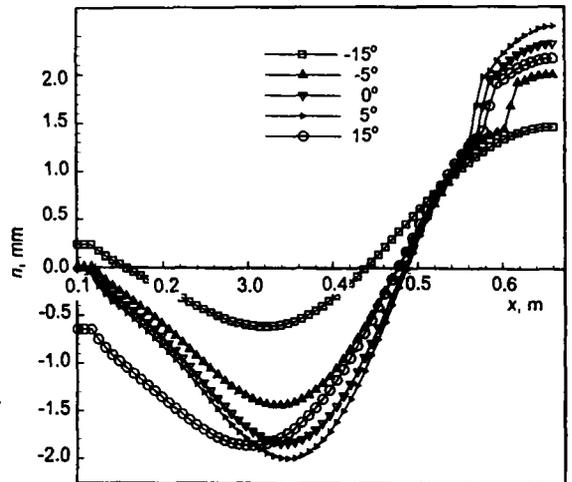


图 5 水口角度对自由表面形状的影响

Fig.5 Influence of the nozzle port inclination on the free surface morphology

成波峰, 而后跌落形成波谷, 水口附近的液面位置变化不大. 波峰、波谷上下起伏的体积(或纵断面面积)基本相等. 当出口向下时(-15°, -5°, 0°), 液面波动的波峰、波谷随出口角上偏而明显增大; 而当出口向上时, 水口出流角度(0°, 5°, 15°)对液面波动的波峰、波谷高度影响不大. 水口出口角为 15° 时, 结晶器水口附近的液位波动有所增加, 即液面波谷向水口附近偏移. 比较图 4 与图 5 中相同条件的结果可得: 水口出口角向上倾斜, 冲击点 A 上移, 出流方向上侧的回流区愈小; 自由表面离回流中心 B 愈近; 所受结晶器内部钢水流动的影响愈大; 出流方向下侧的回流区愈大; 结晶器中向水口返回流动的钢水体积愈大; 液位波动幅度愈大.

图 6 表示浸入水口出流角度向下 15° 时, 出流速度

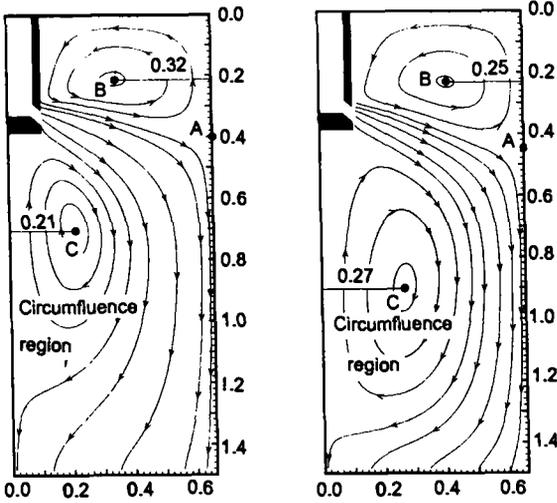


图 6 出流速度对流场分布的影响

Fig.6 Influence of the outlet velocity from nozzle port on the flow pattern in the mold (m)
(a) 2 m/s (b) 4 m/s

对钢水流线的影响。由图 6a 可见当出流速度为 2 m/s 时，回流中心 B 离结晶器侧壁的距离为 0.32 m；而由图 6b 可见当出流速度为 4 m/s 时，回流中心 B 离结晶器侧壁的距离为 0.25 m。出流速度愈大，回流速度愈大，出流方向上侧的回流中心 B 离结晶器侧壁的距离愈近。同时，出流方向下侧的回流的中心 C 的高度愈低（出流速度增加 1 倍，C 点高度约下降 0.2 m），水平方向也愈靠近结晶器侧壁（图 6a 与 6b，C 点向侧壁移动 0.06 m）。图 7 表示浸入水口出口角向下 15° 时，出流速度对钢水自由表面形状的影响。出流速度较小时（≤2 m/s），波峰、波谷高度变化不大；出流速度较大时（>2 m/s），则随水口出流速度增加而急剧增加。出流速度愈大，波谷及靠近结晶器侧壁的波峰愈高，波谷离结晶器侧壁的距离愈近。

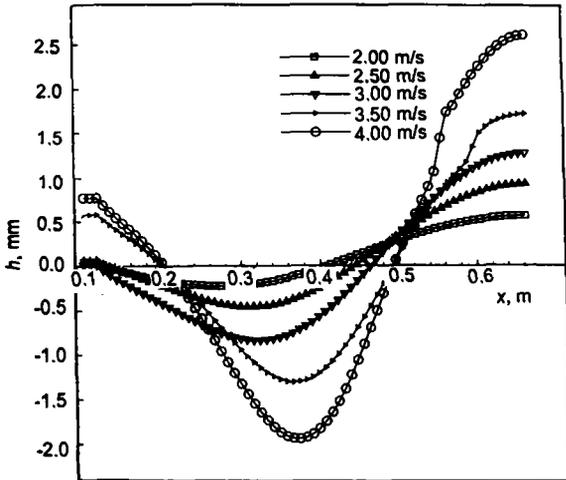


图 7 出流速度对自由表面形状的影响

Fig.7 Influence of the outlet velocity from nozzle port on the free surface morphology

根据图 4—7 的模拟结果，可归纳如下：具有较大动能的钢水沿结晶器侧壁上升达到最大高度后，由于重力作用落下；为了满足结晶器中流量守恒，回落的钢水使得自由表面在产生起伏。液位波动的幅度主要与回流区高度方向的速度有关，波谷的水平位置受回流水平速度的影响。水口附近的自由表面处于上回流区的下游，流速较小，其位置几乎保持稳定。这一现象与水模拟实验及采用紊流动能或商品化软件 CFX 所得的结果一致 [4,5]。

连铸结晶器液面波动是一种复杂的物理冶金现象。模拟过程中，假定水口出流速度相同。实际上由于水口出口的壁面效应，靠近出口内侧面的流速相对于出口中心较小，水口附近的自由表面较平。因此，靠近水口侧面的液位起伏模拟与实际有些偏差。另外，实际过程中由于结晶器振动、吹氩、水口出流速度及拉速不稳定，钢水表面可能产生若干个波 [1]。所以，基于本文液位波动模拟算法进行优化设计连铸结构工艺参数的研究工作仍有待深入。

4 结论

本文采用 SOLA-VOF 方法，研究了薄板坯连铸钢水自由表面形状及结晶器内部的流场分布，得出了具有真实物理意义的液位波动幅度值。结果表明：钢液从水口出口处喷出，其撞击到结晶器侧壁的冲击点位置与出流角度相对应。沿水口出流方向，钢水分离形成上下流股，并分别发展成两个回流。上回流的中心随出口角的向下偏移而下移，随出流速度的增加向结晶器侧壁偏移。回流中心离钢水自由表面或结晶器侧壁愈近，液位波动幅度愈大。水口出流角向下，结晶器中钢水向水口返回流动的体积减小，有利于抑制液面波动。液面波动幅度随水口出流速度（拉坯速度）增加而急剧增加。模拟结果对优化设计连铸结构工艺参数、控制结晶器液位波动有帮助意义。

参考文献

- [1] Wan X G, Han C J, Cai K K. *Iron Steel*, 2000; 35: 20 (万晓光, 韩传基, 蔡开科. 钢铁, 2000; 35: 20)
- [2] Zhang Y, He Y D, Bai X J. *Steel Making*, 2001; 17: 52 (张胤, 贺有多, 白学军. 炼钢, 2001; 17: 52)
- [3] Wen G H, He J F, Li G. *J Chongqing Univ*, 1994; 17: 89 (文光华, 何俊范, 李刚. 重庆大学学报, 1994; 17: 89)
- [4] Bao Y P, Zhu J Q, Tian N Y. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2000; 22: 409 (包燕平, 朱建强, 田乃媛. 北京科技大学学报, 2002; 22: 409)
- [5] Thomas B G, Huang X. *Can Metall Q*, 1998; 37: 197
- [6] Nichols B D, Hirt C W, Hotchkiss R S. *Los Alamos Sci Lab*, 1980: 5
- [7] Liu B C, Shen H F, Li W Z. *J Mater Sci Technol*, 1995; 11: 313
- [8] Han B, He F, Ye H K, Wang X F. *J Hydrody*, 1999; 14A: 142 (韩标, 何枫, 叶宏开, 王学芳. 水动力学研究与进展, 1999; 14A: 142)
- [9] Dehoff R, Sahai Y. *Senior Design Project—Research Report*. Ohio: The Ohio State University, 2001: 8