

拉速对小方坯结晶器液面波动影响的数值模拟

韩毅彤 张炯明 罗衍昭 雷少武 李茂康

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 利用流体力学软件 Fluent 建立 180 mm × 180 mm 铸坯结晶器内“钢-渣”两相流模型,对结晶器液面波动行为进行数值模拟,研究浸入式水口自结晶器中心位置偏离量(0 ~ 30 mm)和拉速(2.0 ~ 3.0 m/min)对结晶器液面波动行为的影响。发现在相同浸入式水口偏离量下增加拉速,钢液面波动的整体趋势增加,且偏离量与拉速越大,液面波动增幅越大;低拉速时,波谷出现在水口边缘,水口周围剧烈波动;高拉速时,波谷出现在结晶器右壁面,使得钢液液面波动加剧,容易产生卷渣。

关键词 180 mm × 180 mm 小方坯 拉速 液面波动 数值模拟

Numerical Simulation of Effect of Casting Speed on Level Fluctuation of Liquid in Billet Mold

Han Yitong, Zhang Jiongming, Luo Yanzhao, Lei Shaowu and Li Maokang

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

Abstract With using established “liquid-slag” two phase flow model in mold for 180 mm × 180 mm billet by fluid mechanics software Fluent, the numerical simulation on behavior of liquid level fluctuation is carried out to study the effect of deviation distance of submerged nozzle from mold center (0 ~ 30 mm) and casting speed (2.0 ~ 3.0 m/min) on behavior of level fluctuation of liquid in mold. It is found that at same deviation distance of submerged nozzle, with increasing the casting speed, the trend of the whole for liquid level fluctuation increases, and the more of deviation distance and casting speed, the more of increment of liquid level fluctuation; at low casting speed, the wave troughs occur at edge of nozzle with violent fluctuations around nozzle outlet; at high casting speed, the wave troughs occur at right wall of mold to intensify the liquid level fluctuation and easily form slag entrapment.

Material Index 180 mm × 180 mm Billet, Casting Speed, Liquid Level Fluctuation, Numerical Simulation

在连铸过程中,液态钢水由中间包浸入式水口进入结晶器,并在其中注流分散,造成结晶器自由表面波动。随着拉速提高,结晶器液面波动加剧,容易产生表面卷渣,超低碳钢生产中由卷渣引起的缺陷超过 60%^[1],由液面波动引起卷渣而导致的铸坯缺陷已成为影响铸坯质量的重要因素。多年来,中外冶金学者对结晶器液面波动行为进行了大量数值模拟和现场实验研究,研究不同工艺条件下工艺参数结晶器内流场表面波动的影响,优化了结晶器流场的工艺参数^[2-10];绘制了结晶器液面即时位置、液面波动曲线和拉速波动的曲线,讨论了拉速波动对结晶器液面波动的影响^[11];利用数值模拟方法研究静磁场水口吹氩对结晶器液面波动的影响^[12],并对相同拉速下吹氩对液面波动的影响做了定量研究^[13],当拉速为 0.42 m/min,吹氩量为 2.5 ~ 4.5 L/min 时,平均液面波动与不吹氩时比较,增加了 2 ~ 3 倍;利用数值模拟方法对连铸结晶器液面波动进行的研究得出拉速对钢液液面波动有直接的影响,且拉速越大,导致水口出口流速增加,进而钢液冲击结晶器

壁面的速度增加,使得液面波动加剧^[14]。在实际生产过程中,通常采用动态调整塞棒来实现结晶器液面的稳定,但这种方法难以操作且作用不稳定。对 180 mm × 180 mm 小方坯结晶器进行了模拟,研究了不同拉速对液面波动的影响,研究结果对生产操作有一定的指导意义,有助于提高铸坯质量。

1 数学模型及计算条件

1.1 模型假设

(1) 结晶器为矩形,不考虑锥度的影响;(2) 忽略结晶器内凝固壳对流动的影响;(3) 钢液在运动过程中为不可压缩的粘性流动过程;(4) 液固界面为无滑移边界,此时壁面处速度、 k 、 ε 均为 0;(5) 钢液均相介质处理;忽略渣层、结晶器振动的影响。

1.2 控制方程

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

式中: u_i - 速度矢量; x_i - 方向矢量。

动量方程(N-S 方程):

$$\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \times \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \quad (2)$$

式中: u_i, u_j - 速度矢量; x_i, x_j - 方向矢量; ρ - 流体密度; p - 压力; g_i - 动力加速度; μ_{eff} - 有效粘度系数, $\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_t$, 其中, μ_l, μ_t - 分别为层流和湍流粘度, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ (C_μ 为常数, 通常取经验值 0.09); k, ε - 分别为湍动能和湍动能耗散率, 可由描述紊流运动的 $k-\varepsilon$ 双方程模型求出。

湍动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho u k) = \text{div}(\Gamma_k \text{grad} k) + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \varepsilon) = \text{div}(\Gamma_\varepsilon \text{grad} \varepsilon) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (4)$$

式中: $\Gamma_k, \Gamma_\varepsilon$ - k 和 ε 的扩散系数; G - 湍流能量折生成率; C_1, C_2 - 常数, 通常取经验值分别为 1.43 和 1.92。

1.3 边界条件

(1) 入口。入口处为钢液, 定义在水口入口处 (图 1), 入口处钢液的速度可根据水口内径、拉坯速度和结晶器断面尺寸共同确定, 入口处湍动能 $k_{\text{inlet}} = 0.03 u_{\text{inlet}}^2$, 耗散率 $\varepsilon_{\text{inlet}} = 40.63 k_{\text{inlet}}^{1.5}$ 。

(2) 出口。流场的出口定义在结晶器计算区域底部 (图 1), 设为压力出口, 出口边界的静压 (相对压力) 设为 0。按照质量守恒定律, 取钢液出口和入

口的质量守恒。

(3) 渣域。渣相区域的下表面是与钢液相接触的, 位于自由表面上, 渣域的上表面设为对称面, 当自由表面上下波动时, 不受空气上表面影响。

(4) 壁面。假定在结晶器壁面包括浸入式水口壁面, 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, ε 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, ε 由壁面函数确定^[15-16]。

在以上各项初始化时, 定义模型结晶器部分上面 200 mm 为空气相, 下面 1 m 为钢液。

1.4 计算条件

对流场进行分析, 不考虑温度的影响, 需要的材料参数中钢水的密度为 7 020 kg/m³, 动力粘度为 0.055 kg/(m·s), 渣的密度为 3 500 kg/m³, 动力粘度为 0.006 kg/(m·s), 结晶器模型尺寸设计如表 1 所示, 结晶器几何模型与网格划分如图 1 所示。定义钢液为第一相, 渣为第二相。输入水口钢液流速, 水口钢液流速可根据水口截面面积、拉坯速度、结晶器出口截面面积来计算, 不同拉坯速度下计算得到水口钢液流速如表 2 所示。

2 结果及讨论

2.1 拉速对钢液面波动的影响

图 2 所示为不同偏移量时拉速对钢液液面波动的影响, 随铸坯拉速的增大, 波动过程中波峰、波谷、波峰波谷的相对高度差均有不同幅度的升高; 低拉速时, 对波动的影响较小, 较高拉速时, 波动较为剧烈。

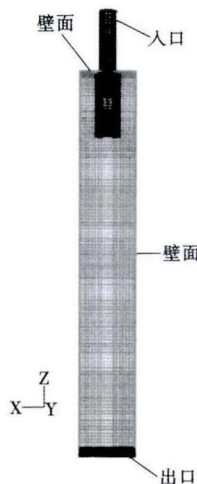


图 1 结晶器几何模型网格划分及边界条件设定

Fig. 1 Mold geometric model mesh division and boundary condition setting

表 1 结晶器模型参数

Table 1 Parameters of mold model

项目	参数
结晶器横截面/(mm × mm)	180 × 180
模型长度/m	1.2
水口尺寸/mm	内径 50 外径 85
水口浸入深度/mm	200
水口偏移量/mm	0 ~ 30

表 2 拉速和对应的水口钢液流速

Table 2 Casting speed and corresponding liquid flow rate at outlet of nozzle

拉速/(m · min ⁻¹)	水口流速/(m · s ⁻¹)
2.0	0.567
2.2	0.624
2.4	0.681
2.6	0.738
2.8	0.794
3.0	0.851

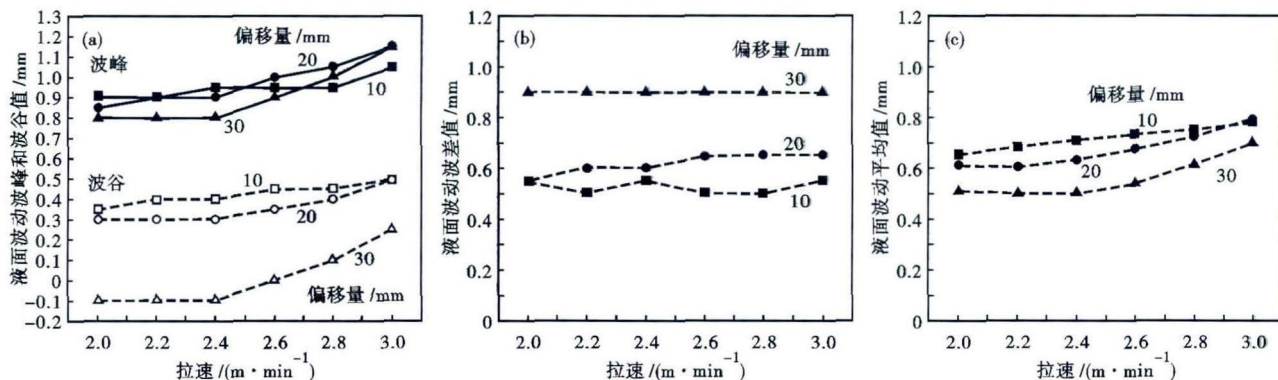


图 2 不同偏移量下拉速对液面波动影响:(a)波峰最大值和波谷最小值;(b)波差值;(c)平均波高

Fig. 2 Effect of casting speed on level of liquid in mold at different deviation distance of submerged nozzle from mold center: (a) Max wave crest and mini trough value; (b) wave difference; (c) average wave height

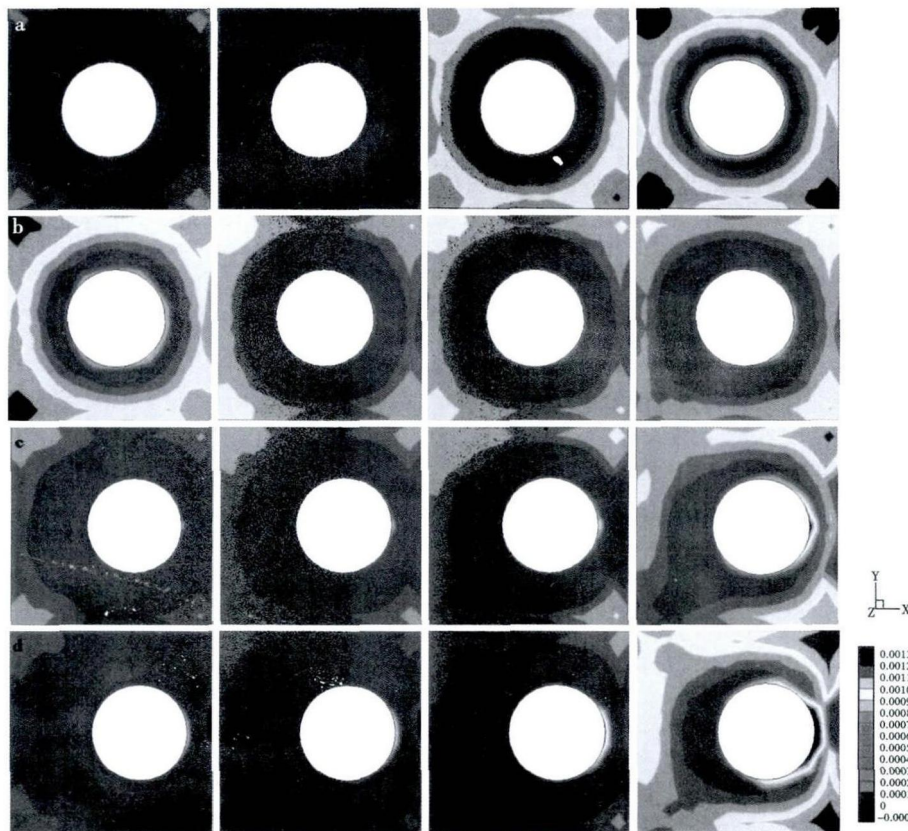


图 3 偏移量(mm)0(a),5(b),20(c),25(d)时拉速对波高分布的影响

Fig. 3 Effect of casting speed on distribution of wave height at deviation distance of submerged nozzle from mold center /mm- 0 (a), 5 (b), 20 (c) and 25 (d)

对比图 2(a, b) 可见, 偏移量 10 mm 时随拉速增加曲线呈现上下跳跃, 规律性不明显, 增大偏移量(20 mm, 30 mm)时, 增大拉速, 曲线呈明显上升趋势, 波峰最大值、波谷最小值及平均波高值都随拉速增加而加大, 且拉速越大, 相关数值增加的越快, 表明拉速越大, 对波动的影响明显, 方坯结晶器内钢液液面波动剧烈。拉速对钢液液面波动还体现在波差上, 在钢液深度相同(均为 1.2 m)时, 波差值越大, 意味着钢液波动的越厉害, 图 2(c) 中曲线呈现规律性变化, 即随着拉速的增加, 曲线斜率增加, 平均波高的总体趋势也在增加; 低拉速时, 曲线变化较缓, 拉速对平均波高影响较小; 拉速增大后, 曲线上升趋势明显, 对波动影响

较大。且拉速越大, 增加的越快, 影响越明显, 方坯结晶器内钢液液面波动剧烈。这是因为, 在相同结晶器宽度下, 拉速增大, 流股流出水口侧孔的流量和速度增加, 流股对结晶器窄面的冲击力加大, 流股沿窄面向上流动的速度也加大, 从而导致结晶器液面的表面流动加剧, 液面波动增加。拉速增加, 加剧了结晶器内流体的运动, 结晶器内流体的扰动趋势加大。

较大。

2.2 拉速对钢液面波动波形的影响

拉速的变化对波动中的波峰、波谷位置也有明显的影响, 图 3 为不同偏移量下相对波高分布图。水口偏移量为 0 即水口位于结晶器中心时(图 3a), 波峰分布于结晶器的 4 个角, 波谷位于水口边缘, 且波峰、波谷分布十分对称; 当水口位置偏离结晶器中

心时,由图3(b,c)可见,低拉速时波峰位于水口方向的另一侧,波谷位于水口周围;拉速较大时,波峰移动方向与水口偏移方向一致,而波谷向相反方向移动,偏移量越大,波峰、波谷的偏移也越加明显。图3(b)中可看出,波峰从左至右的转移在拉速为2.4 m/min时完成。相比较于图3(a,b,c)中出现明显的变化,即波谷在低拉速的情况下就出现偏离,位于水口偏移方向的反侧,同时波谷在右侧也有出现。图3(d)中低拉速时波峰位于水口周围右侧和结晶器左侧的两个角上,波谷位于结晶器右侧器壁处;当拉速较大时,左侧角上的两个波峰移动方向与水口偏移方向一致,水口右侧波峰范围变大,而波谷在结晶器内水口的左侧也出现且范围增大。

通过分析相同偏移量下拉速对波峰、波谷、波差、平均波高影响曲线图以及分布云图可以得知:随铸坯拉速的增大,波动过程中波峰、波谷、波峰波谷的相对高度差、波高平均值均有不同幅度的升高;低拉速时,对波动的影响较小,较高拉速时,波动较为剧烈;拉速不同,导致波峰和波谷的位置出现大幅变化,拉速加大时,波峰从结晶器左侧向右侧移动,而波谷的移动相反,波峰和波谷的位置在拉速为2.4 m/min处出现激变,完成位置自左至右或自右至左的变化。

3 结论

(1) 相同偏移量下增大拉速,钢液液面波动时

整体趋势增加,且拉速越大,这些数值的增幅也加大,使得钢液液面波动加剧。

(2) 低拉速对液面波动的影响较小,高拉速时液面波动的剧烈程度增幅较大。同时拉速2.4 m/min时,液面波动的参数数值往往出现大幅变化,且有些变化不符合以上所得规律,可以认为2.4 m/min是180 mm × 180 mm小方坯低拉速和高拉速的分界线。

(3) 低拉速时,波谷出现在水口边缘,此时,水口周围出现剧烈波动,较易卷渣;高拉速时,波谷出现在结晶器右壁面,导致此处容易产生卷渣。

(4) 铸坯拉速不同还对液面波动的波形产生作用。低拉速、小偏移量时,波峰位于结晶器4个角上,波谷位于水口四周;低拉速、大偏移量时,波峰位于结晶器中与水口偏移相对的2个角上,波谷位于结晶器右侧壁面;高拉速、小偏移量时,波峰位于结晶器内水口同一侧的2个角上,波谷则位于水口周围偏结晶器中心线处;高拉速、大偏移量时,波峰均在水口同一侧,此时容易卷渣。

(5) 拉速会对结晶器液面波动产生一定程度的影响,但不是唯一影响,诸如连铸操作、水口结瘤等也是引起结晶器液面波动的主要原因。

国家自然科学基金资助项目(51174024:铸坯表层气泡行为特征及判别方法的研究)

参考文献

- [1] Iguchi M, Yoshida J, Shimizu T, et al. Model Study on the Entrapment of Mold Powder into Molten Steel[J]. ISIJ International, 2000, 40(7): 685-691.
- [2] 陈阳, 张炯明, 王三忠. 宽板坯连铸结晶器内液面波动的水模型研究[J]. 炼钢, 2008, 24(4): 43-46.
- [3] Yoshida J, Ohmi T, Iguichi M. Cold Model Study of the Effects of Density Difference and Blockage Factor on Mold Powder Entrapment[J]. ISIJ International, 2005, 45(8): 1160-1164.
- [4] Sánchez-Pérez R, Morales R D, Díaz-Cruz M, et al. A Physical Model for the Two-phase Flow in a Continuous Casting Mold[J]. ISIJ International, 2003, 43(5): 637-646.
- [5] 张乔英, 王书恒, 李福民, 等. 板坯连铸结晶器浸入式水口工艺参数的模拟正交试验[J]. 特殊钢, 2004, 25(4): 9-12.
- [6] 张永亮, 朱苗勇, 张胜军, 等. 浸入式水口堵塞过程板坯结晶器内流动与液面波动的模拟[J]. 特殊钢, 2006, 27(5): 27-29.
- [7] 陆巧彤, 杨荣光, 王新华, 等. 板坯连铸结晶器内液面波动的水模型研究[J]. 包头钢铁学院学报, 2006, 25(1): 13-17.
- [8] 王永胜, 侯泽旺, 王新华, 等. 板坯连铸结晶器流场及液面波动的水模研究[J]. 钢铁钒钛, 2009, 30(1): 55-59.
- [9] 林小川, 李京社, 杨树峰, 等. 板坯连铸结晶器内液面波动的水模型研究[J]. 炼钢, 2011, 27(2): 56-60.
- [10] 胡皓, 赵和明, 张炯明, 等. 结晶器液面波动的水模型研究[J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(1): 10-15.
- [11] 佐祥均, 张立峰. 方坯连铸过程中拉速波动对结晶器液面波动影响的研究[J]. 特殊钢, 2011, 32(3): 37-39.
- [12] 陈芝会, 王恩刚, 赫翼成, 等. 静磁场控制板坯连铸结晶器液面波动[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(2): 21-24.
- [13] 陈芝会, 王恩刚, 赫翼成, 等. 静磁场对吹氩结晶器内弯月面行为的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(4): 422-426.
- [14] 谭利坚, 沈厚发, 柳百成, 等. 连铸结晶器液面波动的数值模拟[J]. 金属学报, 2003, 39(4): 435-438.
- [15] Huang X, Thomas B G, Najjar F M. Modeling Superheat Removal during Continuous Casting of Steel Slabs[J]. Metallurgical Transactions B, 1992, 23B: 339-356.
- [16] 乔国林, 童朝南, 孙一康. 基于FLUENT的结晶器出钢温度控制的研究[J]. 冶金设备, 2005, 151(3): 21-28.

韩毅彤(1988-), 女, 硕士生(北京科技大学), 2007年辽宁科技大学毕业, 连铸结晶器电磁搅拌仿真模拟、铸坯表面气泡行为特征及判别方法研究。E-mail: fchj802@163.com

收稿日期: 2013-06-24