

H型坯连铸结晶器内钢液传递特性的数值模拟

阮飞¹ 冯孔方² 马捷² 白亮² 王波^{1,2} 张捷宇²

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 上海大学上海市现代冶金与材料制备重点实验室, 上海 200072)

摘要 以950 kg/m H型连铸坯结晶器为研究对象, 采用FLUENT软件建立三维几何模型, 模拟研究了水口浸入深度125 mm和175 mm时拉速(0.6~1.2 m/s)对结晶器内钢液传递特性的影响。结果表明, 不同拉速条件下H型坯结晶器内钢液流态相似, 但随着拉速的增大, 结晶器内钢液流股冲击深度增大和结晶器自由表面流速增大, 保护渣熔化状况有改善趋势, 同时结晶器液面波动和钢水对凝固坯壳的冲刷有增大趋势。而各粒径夹杂物上浮去除率随拉速的增大而降低, 其中大颗粒夹杂物去除率降低显著, 当拉速由0.6 m/min增至1.2 m/min时, 100 μm夹杂物的去除率由16%降至10%。该模拟条件下, 20~100 μm夹杂物去除率在4%~16%。

关键词 H型坯连铸 结晶器 钢液传递特性 数值模拟

Numerical Simulation of Transferring Characteristics of Liquid Steel in Mould for Continuous Casting H-Beam Bloom

Ruan Fei¹, Feng Kongfang², Ma Jie², Bai Liang², Wang Bo^{1,2} and Zhang Jieyu²

(1 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010; 2 Shanghai Key Laboratory for Modern Metallurgy and Material Processing, Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract According to an object of study on mould for continuous casting 950 kg/mm H-beam bloom, with using established three dimensional geometry models by FLUENT software the casting speed (0.6~1.2 m/s) with nozzle submerged depth 125 mm and 175 mm on transferring characteristics of liquid steel in mould has been simulated and studied. Results show that with different casting speed the patterns of liquid steel flow in mould for H-beam bloom are similar, but with increasing casting speed the jet impacting depth of liquid steel and the flow velocity of liquid at free surface in mould increase, the melting status of mould powder is tending to improvement, and the fluctuation of liquid free surface in mould and the impact effect of liquid flow on solidified shell are tending to increase. While with increasing casting speed, removal ratio of inclusions with different sizes from liquid all decreases, among them the removal ratio of large-sized inclusions decreases markedly, as the casting speed increases from 0.6 m/min to 1.2 m/min the removal ratio of 100 μm inclusions decreases from 16% to 10%, and in simulating condition the removal ratios of 20~100 μm inclusions are 4% to 16%.

Material Index H-Beam Bloom Casting, Mould, Transferring Characteristics of Liquid Steel, Numerical Simulation

目前, 国内外对于传统连铸结晶器钢液传递特性的研究已经较为系统和成熟^[1-7], 而对于H型坯连铸结晶器研究相对较少, 本文针对钢厂近年投产的三机三流H型坯铸机结晶器开展模拟研究。

1 研究方法及方案

1.1 计算模型

图1(a,b)为结晶器模型示意图, 所模拟铸机为三流H型坯铸机, 36 t中间包, 长555 mm, 宽444 mm, 截面积123 756 mm²的铸坯线比约为950 kg/m, 采用2支直筒型浸入式水口浇铸, 水口内径24 mm。计算模型沿对称面取原结晶器模型的1/4, 为改善迭代过程的收敛性, 将结晶器模型高度延长为原高度的2倍。

1.2 基本假设和控制方程

假设(1)忽略保护渣对钢液流动的影响; (2)钢液视为不可压缩牛顿流体; (3)钢液流动均视为等温流动; (4)结晶器壁面视为无穿透无滑移边界。

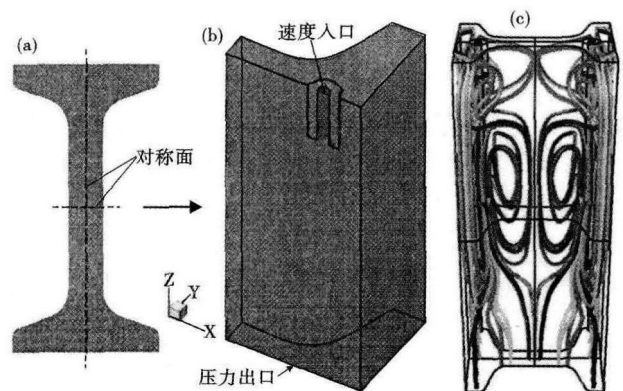


图1 H型坯结晶器断面形状(a)及几何模型(b)示意图; (c)结晶器内典型流线图

Fig.1 Schematics of cross section shape (a) and geometry model (b) of mould for H-beam bloom; (c) Diagram of typical streamline in mould

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

动量控制方程:

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

湍流控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = (C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2) / k \quad (4)$$

式中: ρ - 钢液密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); u_i, u_j - i 和 j 方向的速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); x_i, x_j - i 和 j 方向的坐标值/ m ; P - 压力/ Pa ; μ_{eff} - 有效粘度; μ_t - 湍流粘度; μ_l - 层流粘度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$); $C_1, C_2, C_\mu, C_k, C_\varepsilon$ - 经验常数, 计算中采用 Laund-spalding 推荐值^[8]。

此外, 在计算示踪剂及夹杂物运动时还需求解质量传输及离散相传输控制方程^[9-11]。

1.3 研究方案和模拟流程及主要参数

主要研究直筒型浸入式水口浸入深度 (h) 为 125 mm 和 175 mm 条件下, 拉速 (ν) 对结晶器内钢液传递特性的影响, 研究方案如表 1 所示。

首先对水口及结晶器模型进行合理的简化, 利用 Gambit 软件建立相应的三维几何模型、划分网格、并指定边界类型, 然后将网格导入 Fluent 软件中激活相应的物理模型设置必要的边界条件, 其中水口设为速度入口, 流速及湍流参数依据相应拉速确定, 结晶器底部出口为压力出口, 压力 $P = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, 所模拟钢种为 Q235B ($\% : 0.12 \sim 0.20\text{C}, \leq 0.3\text{Si}, 0.3 \sim 0.7\text{Mn}, \leq 0.045\text{P}, \leq 0.045\text{S}$)。

取钢液密度 $\rho = 7080 \text{ kg/m}^3$, 粘度 $\mu = 5.5 \times 10^{-3} (\text{Pa} \cdot \text{s})$, 扩散系数 $D = 1.1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。流场迭代采用 SIMPLE 算法, 收敛标准为各控制方程残差小于 1.0×10^{-4} , 先计算得到稳态流场, 在此基础上模拟示踪剂扩散及夹杂物去除。

2 结果分析及讨论

2.1 拉速对结晶器内流态的影响

从图 1(c) 可见, 由水口注入结晶器内的高速钢液流股形成一定的冲击深度, 并伴随着流股速度的衰减, 在靠近结晶器下部区域由于受到结晶器内钢液及壁面的作用, 部分钢液沿原轨迹继续流向结晶器底部出口, 而另外一部分钢液沿着结晶器壁面向上运动, 并在结晶器中上部区域靠近结晶器翼板和腹板处分别形成强

度不等的漩涡, 之后部分流股继续向上运动, 并在接近自由液面处形成较小的漩涡, 之后通过不同的轨迹流向结晶器底部。

由图 2 可以发现, 不同拉速下 XZ 截面上钢液基本流态相似, 差别仅在于不同工况下结晶器内主要涡流位置和强度等主要特征参数的改变以及由此引起的结晶器下部区域部分小涡的改变, 这一点也可进一步由不同拉速条件下水口中心线上钢液流速衰减规律直观看出 (图 3a)。

2.2 拉速对钢液流股冲击深度的影响

为使不同工况流股冲击深度具有可比性, 以 XZ

表 1 研究方案
Table 1 Research programmes

水口浸入深度 (h)/mm	拉速 (ν)/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)				
125	0.6	0.8	1.0	1.2	
175	0.6	0.8	1.0	1.2	

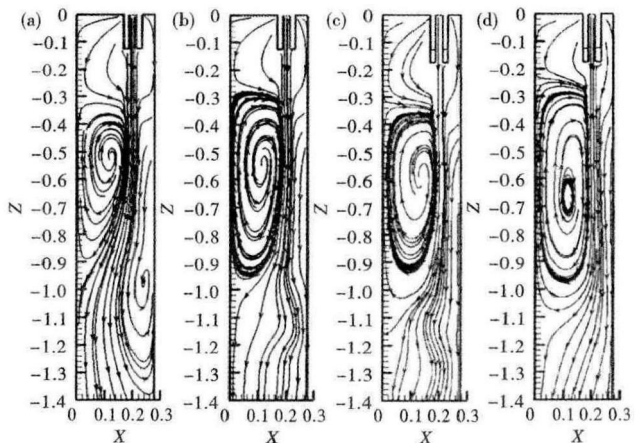


图 2 不同方案结晶器 XZ 截面速度矢量图, $h/\text{mm}, \nu/(\text{m} \cdot \text{min})^{-1}$: (a) 125, 0.6; (b) 125, 1.0; (c) 175, 0.8; (d) 175, 1.2
Fig. 2 Vectors of velocity at XZ section of mould with different scheme, $h/\text{mm}, \nu/(\text{m} \cdot \text{min})^{-1}$: (a) 125, 0.6; (b) 125, 1.0; (c) 175, 0.8; (d) 175, 1.2

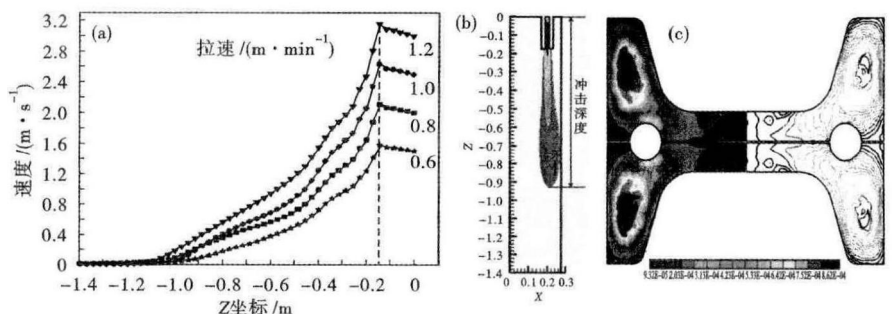


图 3 (a) 水口中心线钢液流速衰减规律; (b) 流股冲击深度示意图; (c) 结晶器自由液面湍动能分布
Fig. 3 (a) Role of velocity distribution of liquid steel at centerline of submerged nozzle; (b) Schematics of jet impact depth of liquid; (c) Distribution of turbulent kinetic energy at free surface of liquid in mould

截面上自由表面到水口射流速度衰减为最低拉速工况下水口入口速度的 20% 时所对应的速度等值线最低点之间的距离衡量液股冲击深度(图 3b)。

由图 4(a) 可见, 钢液射流冲击深度随着拉速的增大而增大, 水口浸入深度 125 mm 时的冲击深度增长的基本趋势与浸入深度为 125 mm 时一致。

2.3 拉速对自由液面波动的影响

由图 3(c) 可知, 自由液面上不同位置湍动能分布差异较大, H 型坯翼板中心附近湍动能明显高于其它位置, 可见该区域液面波动趋势较大; 而 H 型坯翼缘、窄边中心、特别是腹板中心处湍动能明显较低, 液面波动趋势较小, 连铸过程中如果这些区域液面不够活跃, 热量不足, 极容易导致结晶器保护渣结壳及渣圈的产生, 严重时铸坯可产生表面裂纹。

由图 4(b) 可以看出, 该模拟条件下, 各工况的自由液面最大湍动能数量级在 10^{-4} 左右, 且结晶器自由液面最大湍动能随拉速的增大而增大, 即随着拉速的增大, 结晶器自由液面波动有增大的趋势, 而

实际生产过程中应合理控制拉速, 避免出现液面剧烈波动而引起钢液吸气、卷渣及二次氧化等问题。

2.4 拉速对结晶器表面流速的影响

由图 4(c) 可见, 结晶器沿 H 型坯翼板中心线方向上, 自由表面流速数量级在 10^{-1} 左右, 且自由表面流速随着拉速的增大而增大。不同拉速下, 自由表面流速分布特征相似, $Y = 0.1$ 附近流速最大, 向其两端方向流速逐渐降低, 到达水口壁面和翼缘处流速几乎为 0, 而水口浸入深度为 175 mm 时基本趋势与 125 mm 时一致。

表面流速太大, 容易引起钢水卷渣, 降低钢水纯净度; 而如果自由表面流速太小, 钢液更新速率低, 自由液面不够活跃, 则易导致保护渣熔化和结晶器润滑状况变差, 引起铸坯表面裂纹的产生。

2.5 拉速对结晶器上下部响应时间的影响

用 Species Transport 模型模拟示踪剂运动, 得到典型示踪剂浓度分布(RTD)曲线如图 5(a) 所示。

然后分别利用相应的 RTD 曲线计算得到结晶

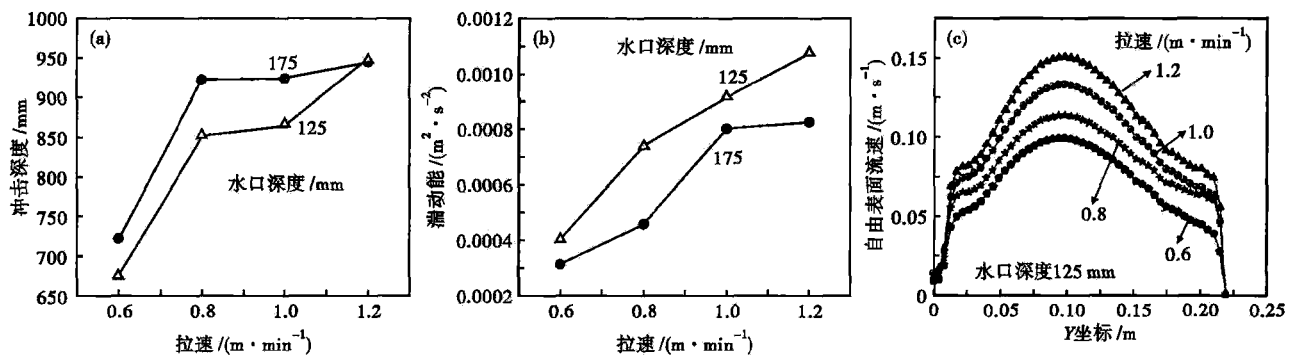


图 4 拉速对钢液液股冲击深度(a), 自由液面最大湍动能值(b)和沿 H-型坯翼板中心线的自由表面流速(c)的影响
Fig. 4 Influence of casting speed on jet impact depth of liquid (a), max turbulence kinetic energy at free surface of liquid (b) and velocity of liquid at free surface along center line of wing plate of H-beam bloom (c)

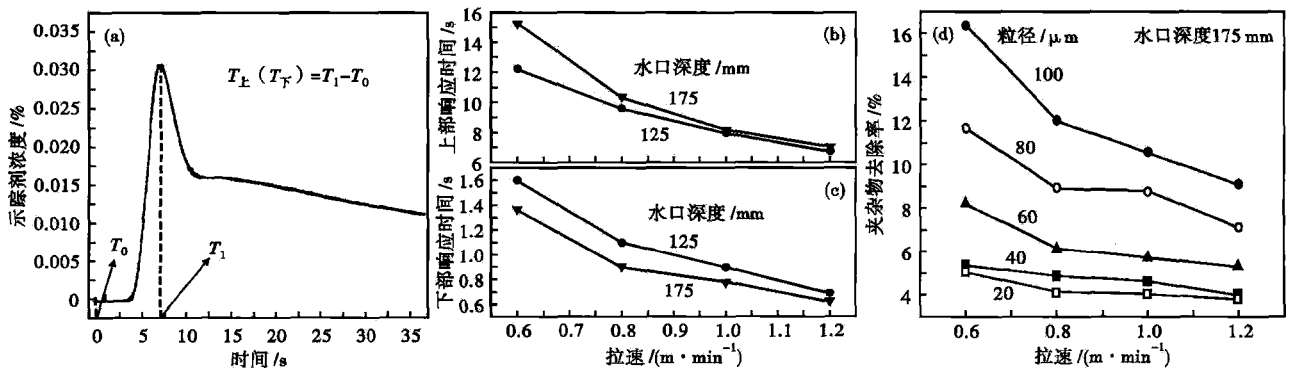


图 5 (a) 结晶器出口处示踪剂浓度分布曲线; 拉速对结晶器上部响应时间(b)和下部响应时间(c)的影响; (d) 拉速对夹杂物去除率的影响

Fig. 5 (a) Distribution curve of tracer concentration at outlet of mould; Influence of casting speed on top respond time (b) and bottom respond time (c) in mould; (d) Influence of casting speed on removal ratios of inclusions in liquid

器上部响应时间($T_{\text{上}}$)和下部响应时间($T_{\text{下}}$),上部(下部)响应时间是指从示踪剂加入水口到结晶器自由液面(结晶器出口)处示踪剂平均浓度达到峰值所经历的时间,算法如图 5(a)所示。

利用 RTD 曲线可以分析结晶器内钢液流动混合状况^[12],可近似认为结晶器上部响应时间越短,自由表面热量越充沛,保护渣熔化状况越好;而下部响应时间越短钢水对结晶器下部凝固坯壳冲刷越严重。由图 5(b)可以看出,不同浸入深度条件下,拉速对上部响应时间的影响规律基本相似,响应时间均随着拉速的增大而减小。一定程度上,增大拉速有利于改善保护渣的熔化状况,但拉速太大会造成液面不稳定等问题,反而不利于铸坯质量的改善。

由图 5(c)可以看出,不同水口浸入深度条件下,拉速对下部响应时间的影响趋势基本相同,响应时间均随着拉速的增大而减小。

随着拉速的增加,钢水对凝固坯壳的冲刷趋势增大,实际生产中如果钢液对凝固坯壳冲刷太严重,结晶器内凝固坯壳变薄,容易引起铸坯表面缺陷的产生,严重时甚至发生拉漏事故。

2.6 拉速对结晶器内夹杂物去除率的影响

夹杂物模拟采用 Discrete Random Walk Model,该模型能够同时考虑钢液的时均速度和脉动速度对夹杂物运动轨迹的影响。

模拟过程中夹杂物由水口和钢液以相同流速注入结晶器,夹杂物流量取 1.8×10^{-4} kg/s(根据文献[13]中铸坯大样电解分析结果估算得出),每种粒径夹杂物重复模拟 10^5 次,单条轨迹线最大迭代步数为 10^4 步,计算得到的各方案下夹杂物上浮去除率如图 5(d)所示。

由图 5(d)可知,粒径为 $60 \sim 100 \mu\text{m}$ 的大颗粒夹杂物,随着拉速的增加去除率显著降低;而对于粒径为 $20, 40 \mu\text{m}$ 的小粒径夹杂物去除率变化幅度明显较小。

总体而言,大颗粒夹杂物所受浮力较大容易上浮去除,不同拉速下, $100 \mu\text{m}$ 夹杂物上浮去除率 $9\% \sim 16\%$, $80 \mu\text{m}$ 夹杂物上浮去除率 $7\% \sim 12\%$, $60 \mu\text{m}$ 夹杂物上浮去除率 $5\% \sim 8\%$,而较小颗粒夹杂物上浮去除率较低, $20 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$ 夹杂物上浮去除率 $4\% \sim 5\%$,综合可得,不同拉速条件下, $20 \sim 100 \mu\text{m}$ 夹杂物上浮去除率为 $4\% \sim 16\%$ 。

3 结论

(1)不同拉速条件下 H 型坯结晶器内钢液流态相似,但流场主要特征参数及结晶器下部区域部分小涡有所差别。

(2)结晶器内钢液流股冲击深度随拉速的增大而明显增大。

(3)随拉速的增大,结晶器自由表面最大湍动能值增大,结晶器自由液面波动有增大的趋势;结晶器自由表面流速增大,结晶器上部响应时间减小,有利于改善结晶器保护渣熔化状况;结晶器下部响应时间减小,结晶器内凝固坯壳受冲刷程度有增大趋势。

(4)随着拉速的增加,大粒径夹杂物上浮去除率显著降低,小粒径夹杂物有相同趋势,但变化幅度较小,该模拟条件下, $20 \sim 100 \mu\text{m}$ 夹杂物去除率在 $4\% \sim 16\%$ 。

内蒙古科技大学材料与冶金学院青年人才孵化器平台资助项目(2014CY012)

参考文献

- [1] 舒宏富,刘 浏,刘学华.宽规格板坯连铸器浸入式水口的数值模拟[J].特殊钢,2013,34(1):1-4.
- [2] 刘智龙,张立华.特厚板坯结晶器截面尺寸对其流场和温度场的影响[J].特种铸造及有色合金,2014,34(8):848-852.
- [3] 韩毅彤,张炯明,罗衍昭,等.拉速对小方坯结晶器液面波动影响的数值模拟[J].特殊钢,2013,34(6):14-17.
- [4] 张彩军,刘 涛,王 昂,等.矩形坯结晶器自由液面模拟及水口结构优化[J].钢铁钒钛,2014,35(2):97-102.
- [5] 王 超,张 慧,马忠伟,等.圆坯结晶器水口优化的模拟研究[J].钢铁研究学报,2014,26(3):15-20.
- [6] Thomas B G, Mika L J, Najjar F M. Simulation of Fluid Flow Inside a Continuous Slab-Casting Machine[J]. Metallurgical Transactions B, 1990,21(2):387-400.
- [7] 孙海波,张家泉,王敬慧.水口类型对大方坯结晶器内钢水流动与凝固行为的影响[J].钢铁研究学报,2011,32(2):25-29.
- [8] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974(3):269-289.
- [9] 沈颐身,李保卫,吴懋林.冶金传输原理基础[M].北京:冶金工业出版社,2003:345-466.
- [10] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004:200-216.
- [11] 贺友多.传输理论和计算[M].北京:冶金工业出版社,1999:104-210.
- [12] 施晓芳,周 俐.H型坯连铸结晶器水口优化的水模研究[J].连铸,2005(6):4-9.
- [13] 陈 伟.H型坯表面裂纹和洁净度控制研究[D].秦皇岛:燕山大学,2009:24-78.

阮 飞(1985-),男,硕士(上海大学),讲师,2009年内蒙古科技大学(本科)毕业,冶金过程模型及仿真研究。

E-mail: ruan@imust.edu.cn

收稿日期:2015-04-15