

内冷却器-U形管对板坯连铸结晶器内钢水流动的影响

晋艳娟 崔小朝

(太原科技大学应用科学学院,太原 030024)

摘要 针对 1 240 mm × 200 mm 板坯连铸提出了一种钢水内外复合冷却技术,即在“结晶器内设置内冷却器-U形管”,起到提高传热效率和改善钢液流动之目的。运用流体力学分析软件,就内外复合冷却结晶器内钢水的流动状态进行了数值模拟,发现内冷却器可以使结晶器内钢水的流动状态均匀,部分起到电磁制动之功效,有利于钢液中的夹杂物上浮。

关键词 内冷却器 板坯连铸 钢水 流动 模拟

Effect of Inner Cooling Apparatus -U Shape Pipe on Flow of Molten Steel in Slab Continuous Casting Mold

Jin Yanjuan and Cui Xiaochao

(School of Application Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract A technology of inner-outer couple cooling of molten steel in mold for 1 240 mm × 200 mm slab concasting i. e. to set an inner cooling apparatus- U shape pipes has been advanced to enhance efficiency of heat transfer and improve flow of molten steel. The flow status of molten steel in the inner-outer couple cooling mold was simulated by using fluid dynamics software. It is found that the flow status of molten steel in mold is uniform by using inner U- shape cooling apparatus, which has effect of electromagnetic trig to be favourable to inclusion in steel floating up.

Material Index Inner Cooling Apparatus, Slab Concasting, Molten Steel, Flow, Simulation

为提高拉速,加快结晶器内钢水的凝固和改善铸坯的质量,已开发多种减小气隙提高传热效率的结晶器,例如,德马克公司的抛物线锥度结晶器^[1],康卡斯特公司的 CCT 结晶器^[2],达涅利公司的自适应结晶器^[3,4],奥钢联的钻石结晶器^[5]等。

“有凝固就必然会有气隙的形成”,并且气隙的存在是铸坯能够顺利拉出结晶器的必要条件。为了解决“气隙占整个热阻的 80%,但又不允许把气隙完全消除”这一尖锐的矛盾,本课题组提出了一种钢水内外复合冷却技术,即在“结晶器内设置内冷却器-U形管”。内冷却器可以绕过气隙把钢水的热量导出,还可以阻碍液态金属的冲击深度,部分起到电磁制动之功效^[6]。在实验室将内冷却器(3 mm 厚的紫铜管)置于熔化的铁水中,经过 3 h 的使用,内冷却器安然无恙(见图 1)。

本实验运用流体力学分析软件,就内外复合冷却结晶器内钢水的流动状态进行了数值模拟,并与无内冷却器的结晶器内钢水流动状态进行比

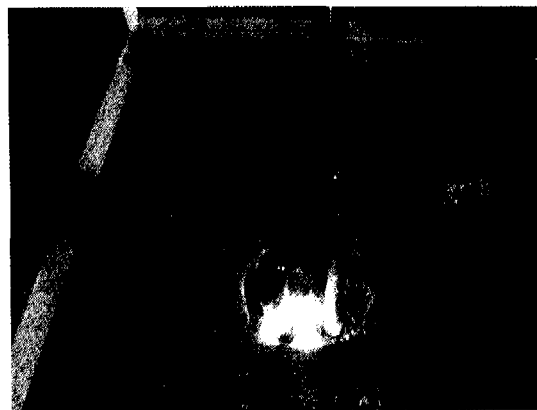


图 1 内冷却器-U形管的实验状况

Fig.1 Experimental status of inner cooling apparatus- U shape pipe

较,发现内冷却器可以使钢水的流动状态均匀,有利于钢液中的夹杂物上浮,从而改善铸坯的质量。

1 结晶器内钢水流场数值模拟控制方程

数值模拟的控制方程^[7,8]有:

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

动量守恒方程

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

式中： u_i, u_j - i, j 方向的速度； x_i, x_j - i, j 方向的结点坐标值； μ_{eff} - 有效粘度系数； ρ - 流体密度； p - 压力； g_i - i 方向加速度。

能量方程 $\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T$

式中 Γ_{eff} 为有效温度扩散系数，可由下式确定

$$\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}$$

式中： Pr, Pr_t - 分别为层流和湍流的普朗特数； S_T - 源项，无内热源时其值为 0。

湍动能方程

$$\frac{\partial(\rho u_i K)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x_i} \right) + G - \rho \epsilon$$

湍动能耗散率方程

$$\frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{K} G - C_2 \frac{\epsilon^2}{K}$$

式中 $G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$,

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\epsilon}$$

式中： μ_t - 湍流粘度系数； μ - 粘度系数； ϵ - 湍动能消耗； K - 湍动能； T - 温度； $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ - 经验常数，采用劳德和斯泊汀的推荐值，即 $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 。

2 结晶器内钢水流场数值模拟

2.1 数值模拟的假设和边界条件

为便于研究结晶器内钢液的流动，本文假设：

- (1) 钢水的流动为稳态、粘性、不可压缩流动；
- (2) 不考虑表面保护渣的影响，把液面设置为自由表面；
- (3) 不考虑结晶器内凝固壳的存在（忽略结晶器内凝固坯壳对流动的影响）；
- (4) 忽略密度变化引起的自然对流；
- (5) 忽略结晶器的振动等因素对流场的影响。

数值模拟的边界条件为：

- (1) 根据拉速和流量平衡确定水口的入口速度；
- (2) 结晶器拉坯方向的速度梯度设为零；
- (3) 将结晶器液面处理为自由表面，设为压力入口；表面切应力很小，可以忽略不计；垂直于钢液面的速度分量设为零；
- (4) 在结晶器壁面处，采用无滑移边界条件，对 K, ϵ 设为零；
- (5) 在内冷却器壁面处，采用无滑移边界条件，对 K, ϵ 设为零。

2.2 模型的建立

针对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢进行分析，结晶器的截面尺寸为 1 240 mm × 200 mm，高度为 800 mm，壁厚为 20 mm，水口直径为 40 mm，水口插入深度为 130 mm，内冷却器高 260 mm，弯曲半径 60 mm，结晶器内钢水深度为 700 mm，根据结构的对称性，取结晶器的 1/4 为数值模拟分析模型，具体模型及网格划分如图 2 所示。

计算使用的物性参数为：密度 7 500 kg/m³，运动粘度 0.059 Pa·s。

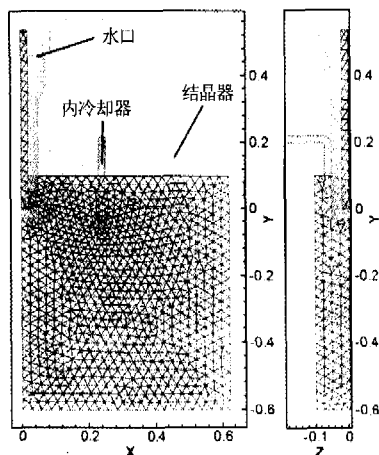


图 2 模型及网格图
Fig.2 Diagram of model and grid

2.3 结果分析

针对有无内冷却器两种情况，模拟计算了拉坯速度为 1.2, 1.5, 1.8, 2.1 m/min 时结晶器内钢液的流动状况，发现在不同拉坯速度下，相同结晶器内的钢液的流动方式很相似，也就是结晶器内一旦形成了湍流流动，铸速对结晶器内钢液流动方式的影响不大，而内冷却器对钢液的流动有很大

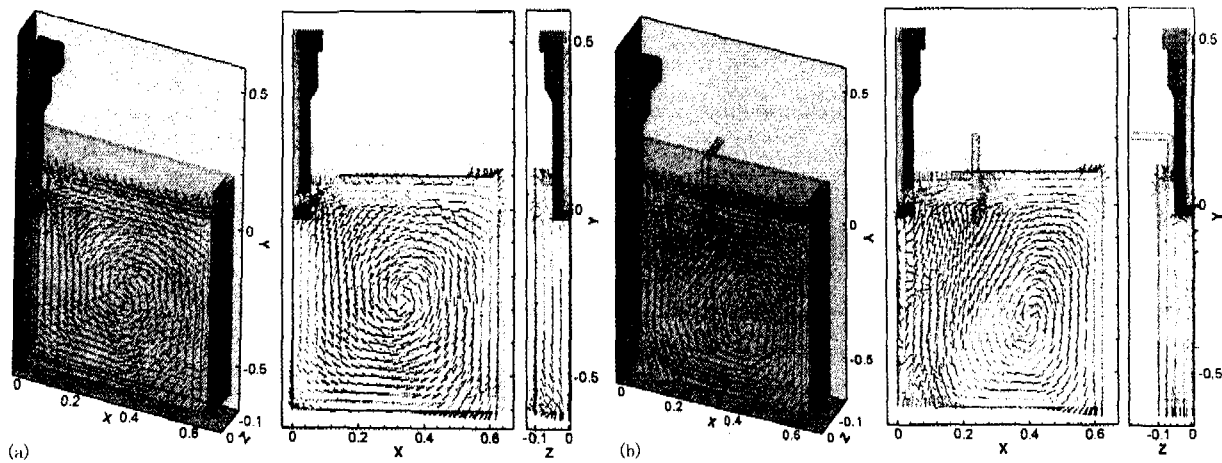


图3 无内冷却器-U形管(a)和有内冷却器-U形管(b)的速度矢量图

Fig.3 Velocity vector diagram of without inner cooling apparatus -U shape pipe (a) and with inner cooling apparatus - U shape pipe (b)

的影响。以拉坯速度 1.5 m/min 为例,分析和比较有无内冷却器时结晶器内钢水的流动状况。

由图 3(a) 可以看到,在无内冷却器时,结晶器内钢液从水口出口向外流向结晶器窄面,并在靠近结晶器壁处向下流动,当钢液到达结晶器底部后再向中心流动,然后到达结晶器对称面附近又向上流动,从而形成一个较大的循环流。

由图 3(b) 可以看到,在有内冷却器的结晶器内,钢液从水口出口向外流向结晶器窄面,由于内冷却器的存在改变了水平流的流动方向,其中小部分在内冷却器附近形成绕流,大部分流体继续向结晶器窄面流动(主流);主流在靠近结晶器窄面处向下流动,到达底部后再向中心流动,接着由于上升流的抽引,钢液向上流动;当到达一定高度时,由于内冷却器的存在改变了钢液的流动方向,使之转向向下流动。

经过内冷却器的流体分为两部分,一小部分流向内冷却器壁,在内冷却器附近形成小的循环流,另一部分继续向下流动,最终在结晶器内形成了一个大的循环流,即在内冷却器的右下方形成一个较大的循环流。

由比较可知,钢液在内冷却器处形成大量的漩涡,这些漩涡造成能量快速降低,从而减小钢水的速度。内置内冷却器的结晶器内的整体速度比无内冷却器的速度要低,流场也比较均匀,可见内冷却器可以减轻结晶器上部回流的强度,这有利于杂质的上浮和凝固壳的形成,有利于提高连铸坯的质量。

3 结论

(1) 内冷却器对结晶器内钢水流动产生很大影响,它可以降低结晶器内钢水的流动速度,使钢水的流动更加平稳。

(2) 内冷却器可以减轻结晶器上部的回流强度,减小液面的波动和不稳定,这有利于解决杂质上浮和气隙问题。

(3) 内冷却器可以阻碍液态金属的冲击深度,起到电磁制动之功效。

国家自然科学基金资助项目(编号:50474013)

参考文献

- 1 Ulrich Horbach. High Speed Billet Casting with a Parabolic Mould Taper. *MPT International*, 1998(1): 74
- 2 胡忠仁. 小方坯高速连铸结晶器技术探讨. *连铸*, 1998(5): 27
- 3 Pavlicevic M. Faster Casting by Improved Mould Design. *Steel Times International*, 1994(6): 10
- 4 Gianac Gensini. High Speed Casting with a New Mould. *MPT International*, 1995(6): 52
- 5 Josef Fuchshuber. Modern High Speed Casting Technology for Billet Casting. *Electric Furnace Conference Proceedings*, 1997: 349
- 6 崔小朝, 刘梓才, 宋静, 等. 内外复合冷却高效结晶器内钢水三维流场数值模拟. *特殊钢*, 2005, 26(1): 9
- 7 柳百成, 荆涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制. 北京: 机械工业出版社, 2001: 37
- 8 朱苗勇, 萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 70

晋艳娟(1979-), 女, 太原科技大学研究生, 从事液态金属流动多场耦合数值模拟研究。

收稿日期: 2006-01-09