

内外复合冷却高效结晶器内钢水三维流场数值模拟

崔小朝 刘梓才 宋 静 王宥宏

(太原科技大学工程力学系, 太原 030024)

摘 要 提出一种基于结晶器内钢水内外复合冷却高效连铸新技术, 即在“结晶器内设置内冷却器——U 型管”。采用流体力学分析软件 FLUENT, 分析了内置 U 型冷却器时结晶器内钢水的流动状态, 并与无内置 U 型管冷却器时结晶器内钢水流动状态作比较, 发现内置 U 型冷却器使结晶器内钢水的流动状况均匀, 钢水的冲击深度减轻, 有利于钢中夹杂物上浮。

关键词 内冷却器 结晶器 钢水流场 数值模拟

Numeric Simulation of Three Dimensional Flow Field of Molten Steel in a Mould with High Efficiency Inner and Outer Couple Cooling

Cui Xiaochao, Liu Zicai, Song Jing and Wang Youhong

(Department of Engineering Mechanics, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract A new technology of high efficiency concasting based on inner-outer couple cooling of molten steel in a mould has been advanced, that is to set an inner cooling apparatus- U shape pipes in a mould. The flow status of molten steel in mould with inner cooling apparatus is analyzed by using fluid dynamics analysis software FLUENT, and compared with that without inner cooling apparatus. It is found that the inner cooling apparatus- U shape cooling pipes can make molten steel flow with a lower impact depth which is favourable to inclusion in steel floating up.

Material Index Inner Cooling Apparatus, Mould, Molten Steel Flow Field, Numeric Simulation

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。减少结晶器内由于钢水凝固收缩所产生的气隙是提高传热效率最为关键的技术^[1]。如何解决“气隙占整个热阻的 80%, 但又不允许把气隙完全消除”这一矛盾^[2], 本文提出一种基于结晶器内钢水内外复合冷却高效连铸技术, 即在结晶器内设置内冷却器——U 型管(如图 1 所示), 为实现高效连铸提供一种新的途径。

内冷却器除具有提高传热效率之功效外, 还具有以下功能:

(1) 内冷结晶器有利于中心等轴晶率的提高, 细化中心组织;

(2) 内冷却器增加连铸坯的凝固速度, 可提高拉坯速度, 实现高效连铸; 在拉坯速度不变的条件下, 凝固层厚度的增加, 可降低拉漏率;

(3) 内冷却器阻碍液态金属的冲击深度, 起到电磁制动之功效, 有利于杂质、气泡的上浮, 改善铸坯的质量^[2-4]。

本文采用流体力学分析软件 FLUENT, 分析

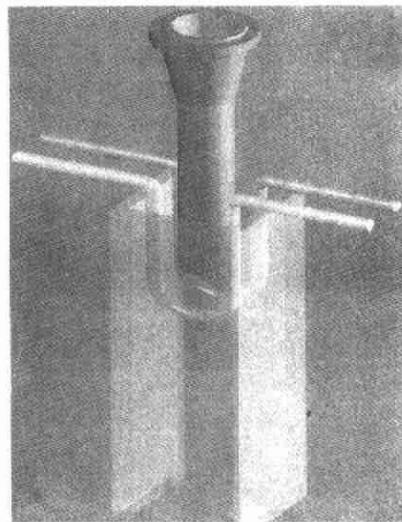


图 1 内置 U 型内冷却器的结晶器内钢水内外复合冷却原理

Fig.1 Principle of inner and outer couple cooling of molten steel in mould with inner U- shape cooling apparatus

了内置高 260 mm, 弯曲半径 60 mm 的内置 U 型冷却器时结晶器内钢水的流动状态, 并与无内置 U 型冷却器结晶器内钢水流动状态进行比较。通过在试验室使用中频炉熔化铝水, 把能够自动升降

的内冷却器(紫铜管制成的 U 型冷却器)置于熔化的铝水中考察其使用状况,证明了内外复合冷却的可行性。

1 结晶器内钢水流场数值模拟控制方程

控制体积的积分方程^[5-8]有质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_e \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) + \rho g_i$$

湍动能方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j E_k) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{C_{E_k}} \right) \frac{\partial E_k}{\partial x_j} \right] + \eta_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon$$

湍动能耗散率方程:

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}$$

湍流粘度系数:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

能量方程:

$$\frac{\partial (\rho c_p u_i \theta)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{eff} \frac{\partial \theta}{\partial x_i}) + S_0$$

式中: $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_\mu$ -经验常数,目前普遍采用斯泊汀的推荐值: $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$; 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; ρ -流体密度; p -压力; F_i -体积力; η, η_t -层流和湍流的粘度系数; E_k -湍动能; ϵ -湍动能耗散率; θ -温度; λ_{eff} -有效导热系数; S_0 -源项。

2 结晶器内钢水流场数值模拟

2.1 假设条件

对结晶器内钢水的流动所做假设为:(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,把液面设置为自由面;(3) 不考虑结晶器内凝固壳的存在(忽略结晶器内已凝固坯壳对流动的影响);(4) 忽略密度变化而引起的自然流动;(5) 忽略结晶器的振动等因素对流动的影响^[9-11]。

2.2 边界条件

由上述方程联立求解可得结晶器内钢水的速度分布,结晶器出口速度根据水口入口流量与结晶器出口流量相等得出^[10,11]。其边界条件为:(1) 入口为速度边界(根据拉速和流量平衡确定水口的入口速度);(2) 结晶器出口沿拉坯方向的速度梯度设为零;(3) 结晶器液面为自由表面:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = v = 0$$

(4) 结晶器壁面无滑移,对壁面附近粘性支层中的流体计算采用壁面函数法;(5) 水口壁绝热;(6) U 型管壁和结晶器的壁面边界条件设置相同。

2.3 模拟结果

钢水在惯性流的作用下流动速度逐渐增加,水口出口下方速度达到最大;在结晶器壁影响下形成大量的漩涡,在涡流的作用下,能量降低,速度减小;当经过 U 型管时有绕流,并再次产生漩涡,能量降低,速度减小。

有 U 型管可以降低冲击深度,在同一位置有 U 型管的流体速度比没有 U 型管的要小一些,流体在 U 型管处形成大量的漩涡,这些漩涡造成能量快速降低。内置 U 型管的结晶器内的整体速度比无内置 U 型管的速度要低,可见结晶器内有 U 型管可以减轻结晶器上部回流的强烈度,减小液面的波动,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和效率。

以拉坯速度 0.03 m/s 为例,分析和比较有 U 型管和无 U 型管的结晶器内钢水的流动状况。

由速度云图和矢量图可以看到有 U 型管的冲击深度比没有 U 型管的冲击深度要浅,有 U 型管的结晶器浇铸时整体速度较小,速度梯度较小。由图 2 和图 3 可以看出,在结晶器液面下有 U 型管的速度比无 U 型管的速度低,有 U 型管比无 U 型管的结晶器内部速度梯度较小而外部的速度梯度较大。由于 U 型管的存在,钢水在结晶器中流

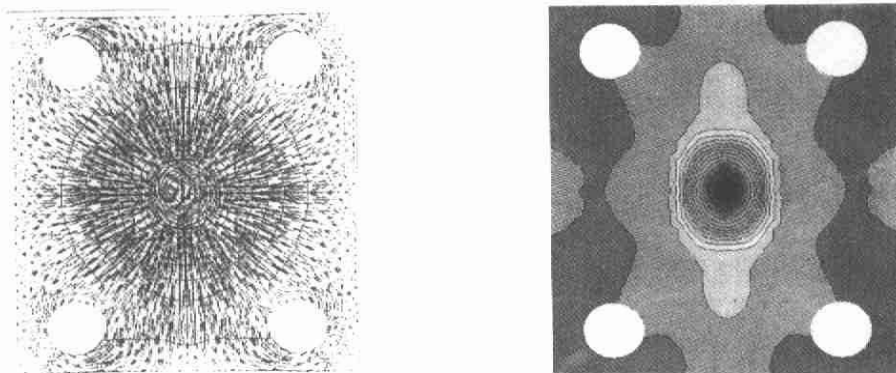


图2 有U型管时结晶器液面下0.21 m处速度矢量及对应的云图

Fig.2 Speed vector at section below liquid level 0.21 m in mould with U- shape pipe and corresponding vector diagram

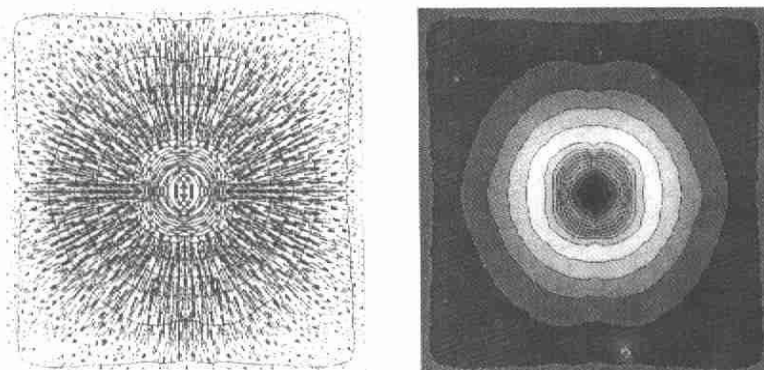


图3 无U型管时结晶器液面下0.21 m处速度矢量及对应的云图

Fig.3 Speed vector at section below liquid level 0.21 m in mould without U- shape pipe and corresponding vector diagram

动时产生大量的漩涡,尤其在U型管附近。结晶器中有U型管流场比较均匀,这有利于凝固壳的形成,并且可以提高坯壳的质量。

3 结论

U型管对钢水流动有很大影响,它使钢水的

流动更加平稳。结晶器内有U型管可以减轻结晶器上部回流的强烈度,减小液面的波动。有利于解决杂质上浮和气隙问题。

国家自然科学基金资助项目(编号:50474013)

参考文献

- 1 崔立新,陈素琼,干勇,等.连铸板坯在结晶器内凝固行为的研究.炼钢,2003,14(2):11
- 2 王宏明,李桂荣.热送热装工艺中板坯连铸过程传热的数学模型.炼钢,2003,14(2):26
- 3 贾光霖,齐雅丽,张国志.合金钢连铸坯动态凝固过程数值模拟.东北大学学报,2004,42(3):8
- 4 崔小朝,马崇山,刘才,史荣,于丙强.结晶器内钢水涡流流动对凝固传热和力学性能的研究.机械工程学报,2002,10(2):5
- 5 高吉祥,张卫文.连续铸造凝固过程数值模拟的研究进展.铸造技术,2003,4(2):20
- 6 陈海清,李华基,曹阳.铸件凝固过程的数值模拟.重庆:重庆大学出版社,1991.4
- 7 干勇,仇圣桃,萧泽强.连续铸钢过程数学物理模拟.北京:冶金工业出版社,2001.4
- 8 李玉柱,苑明顺.流体力学.北京:高等教育出版社,1998.6
- 9 景思睿,张鸣远.流体力学.西安:西安交通大学出版社,2001.7
- 10 郭宽良.计算传热学.合肥:中国科学技术大学出版社,1988.12
- 11 吴子牛.计算流体力学基本原理.北京:科学出版社,2001.2

崔小朝,男,42岁,博士,教授。从事钢铁冶金及工程力学研究。

收稿日期:2004-07-19