

旋流水口对圆管坯连铸结晶器内钢水流场的影响

崔凤兰¹ 崔小朝¹ 刘凯² 田汉¹

(1 太原科技大学应用科学学院, 太原 030024; 2 武汉理工大学, 武汉 430070)

摘要 借助于流体力学分析软件 Fluent, 在圆管坯连铸浸入式水口上施加电磁力, 对结晶器内钢水产生电磁搅拌作用使模型水口出流成螺旋状态的钢水流场进行了数值模拟。结果表明: 旋流式水口有利于改善结晶器内的流场, 有效降低冲击深度, 增大液流向弯月面区域的回流和热流上传, 提高了液面的活跃程度, 增强钢水表面融渣的效果。

关键词 水口旋流 电磁搅拌 连铸 圆管坯

Effect of Swirling Flow Nozzle on Liquid Flow Field in Concasting Mold for Round Billet

Cui Fenglan¹, Cui Xiaochao¹, Liu Kai² and Tian Han¹

(1 School of Science Application, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;
2 Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract Numerical simulation of liquid flow field by using fluid dynamics analysis software Fluent has been carried out that the electromagnetic force exerts on submerged entry nozzle for round billet casting to make the liquid flow out of model nozzle in spiral condition and stir the liquid steel in mold. Results show that the flow swirling in nozzle is available to improve liquid flow field, effectively reduce liquid dashing depth, enlarge reversed flow in meniscus area and heat transfer up to meniscus and increase activity of liquid level and effectiveness of molten slag at liquid surface.

Material Index Nozzle flow Swirling, Electromagnetic Stirring, Concasting, Round Billet

为了控制结晶器内钢液的流动状态, 一般通过优化水口结构, 开发出了许多行之有效的技术。本文采用在水口段施加旋转磁场的方法, 使钢液在流经该电磁搅拌位置后形成旋流流动, 依此控制结晶器内液体的流态。

1 计算模型的建立

利用自行编写的程序及相关的物性参数进行计算, 取钢液的相对磁导率为 1, 相对电导率为 $7.14 \times 10^5 \Omega/m$, 钢液的密度为 7100 kg/m^3 , 动力粘度为 $0.0063 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。计算模型如图 1 所示 (z 向为模型垂直方向), 水口尺寸为: 水口入口直径 96 mm, 出口直径 30 mm, 壁厚 10 mm, 总长度 500 mm, 浸入深度 150 mm。结晶器模型的尺寸为: 结晶器内径 100 mm, 有效长度 800 mm。

计算中做出如下假设: (1) 钢液是不可压缩的导电流体, 钢液的特性参数, 如粘度、电导率和磁导率都是标量常数; (2) 钢液为稳定流动; (3) 钢液流动的驱动力为钢液重力及电磁力。

2 数值模拟结果与分析

鉴于电磁搅拌引起的钢液流动状态为紊流流动, 采用标准 $k \sim \epsilon$ 湍流模型 (k 为湍动能, ϵ 为湍动能耗散率) 对钢液的流动状态进行描述。本文根据电磁感应强度与电磁力的关系自行编写程序, 对电磁场和流场分别求解, 并将所计算出的电磁力作为源项加入到动量方程中, 计算分析搅拌作用下的流场。

2.1 有电磁搅拌力的控制方程

在电磁力作用下, 水口内钢液的流动控制方程需在源相中附加一项电磁力, 与无电磁搅拌力的控制方程不同^[1]。

$$\text{质量守恒方程: } \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

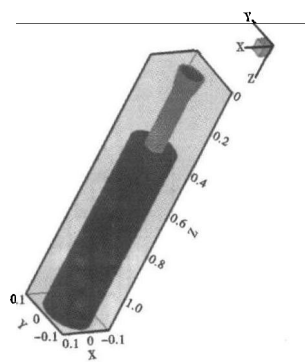


图 1 模拟模型简图
Fig. 1 Schematics of simulation model

动量方程:

$$X \text{ 方向: } \rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_e \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) + F_x$$

$$Y \text{ 方向: } \rho \left(u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_e \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) + F_y$$

$$Z \text{ 方向: } \rho \left(u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu_e \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \rho g$$

湍动能方程:

$$\rho \left(u_x \frac{\partial k}{\partial x} + u_y \frac{\partial k}{\partial y} + u_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + u_i \left[2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right] - \rho \varepsilon$$

湍动能耗散方程:

$$\rho \left(u_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + u_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + u_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{c_1 \varepsilon \mu_t}{k} \left[2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{c_2 \varepsilon^2}{k}$$

2.2 有无电磁搅拌力时结晶器内纵向中心对称面速度场特征比较

在自行编写的程序中旋转频率为 10 Hz, 电磁感应强度为 0.05 T, 搅拌位置位于 z 方向距水口入口 0.19 ~ 0.25 m。图 2(a, b, c) 和图 2(d) 相对照可以得出: 钢液由水口入口以 0.133 3 m/s 的速度浇注, 轴向中心线处速度逐渐增大, 当流经主搅拌区域时, 该速度增大到最大, 为 0.75 m/s。然后速度

逐渐减小, 到达水口出口时速度减小为 0.325 m/s, 当流至距离水口入口 0.7 m 的位置时速度达到了最小, 接近结晶器出口处速度 0.033 3 m/s。

从图 2(e, f, g, h) 可知, 未电磁搅拌力的水口冲出的液流呈“喇叭”状向下冲击, 沿结晶器中心线的流速最大, 从水口入口处速度为 0.133 3 m/s 逐渐增至 0.34 m/s, 且该垂直流速在距水口出口 0.1 m 到 0.6 m 的范围内基本不变, 当流至距水口入口 0.9 m 处时速度才减小到最小, 基本接近结晶器出口速度 0.033 3 m/s; 从结晶器中心线到壁面的流速呈逐渐衰减的趋势, 并且结晶器内水口出口上方区域内向上液流的流速很小, 只有 0.04 m/s, 因此液面流动较弱, 对连铸中的钢水热流上传和液面融渣不利。

由图 2(d) 与图 2(h) 比较可见: 图 2(d) 施加电磁搅拌力后, 主搅拌区速度增大, 达 0.75 m/s, 随着流体的流动, 速度逐渐减小, 且在水口出流口处速度减小到约 0.325 m/s, 图 2(h) 未施加电磁力的水口浇注过程中, 水口出流口处的速度达 0.34 m/s。

2.3 旋流水口横断面流场及电磁力的分布特点

根据 Z 方向距水口入口不同距离的横截面流场分布可得, 在钢液流经搅拌区域后, 在水平面上形成了沿周边方向的旋转流动。在离边缘较近的地

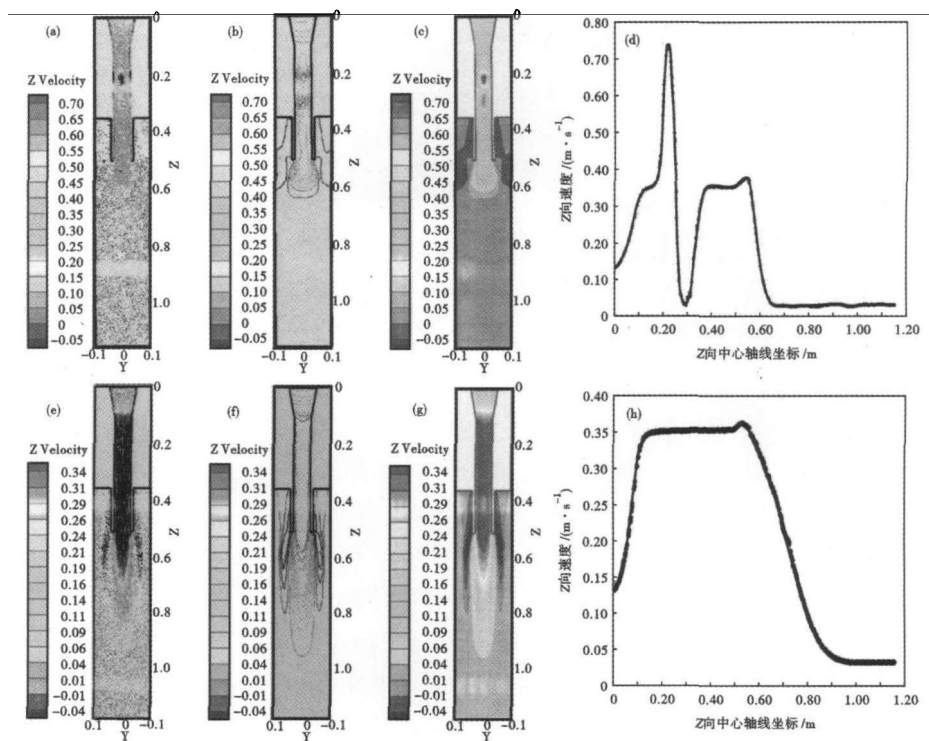


图 2 结晶器中心纵截面速度场特征图: (a, b, c, d) 有电磁搅拌; (e, f, g, h) 无电磁搅拌; 速度矢量图 (a, e)、等值线图 (b, f)、速度云图 (c, g); 垂直方向中心轴线速度图 (d, h)

Fig. 2 Features of velocity field at longitude section of mold: (a, b, c, d) with electromagnetic stirring; (e, f, g, h) without electromagnetic stirring; vector map (a, e), contour map (b, f) and cloud map of velocity (c, g); and velocity curves at center axis along vertical direction (d, h)

方,旋转速度最大,并逐渐向中心衰减。随着远离电磁搅拌区,并与结晶器顶端距离的接近,边缘和中心该速度的不均匀性减小,旋转速度逐渐变慢^[2,3]。

图 3 中取的是距离水口入口平面为 0.22、0.26、0.28、0.30 m (即当 $Z = 0.22$ 、0.26、0.28、0.30) 不同横截面半径方向上的切向速度曲线图。可以看出,在相异各横截面,越接近搅拌区(搅拌区域在距离水口入口处 0.19 ~ 0.25 m)横截面半径方向的切向速度越大,且切向速度在半径为 0.018 m 处到达最大值,距离搅拌区域越远切向速度越小,旋转效果越不明显;在同一横截面上,各切向速度达到最大值之后,由于液体的粘性较大越接近壁面,切向速度又开始减小,在半径 0.02 m 处切向速度减小为 0。

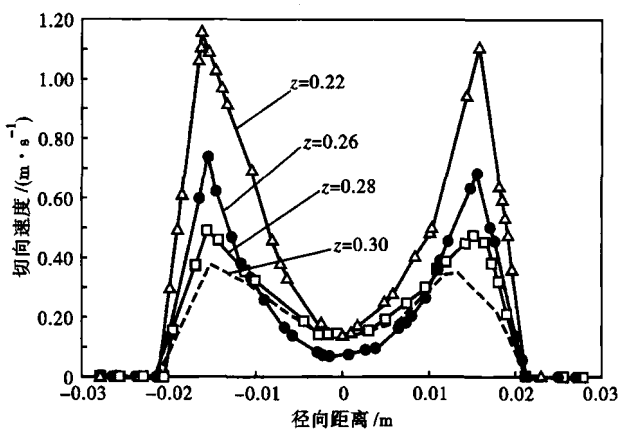


图 3 旋流水口横截面半径方向上的切向速度曲线图
Fig. 3 Curves of tangential velocity along radial direction at cross section of flow swirling nozzle

电磁力在离边缘较远的地方越大,越靠近中心位置,逐渐减小^[4]。靠近边缘的电磁力越大,钢液的旋转速度也越大;电磁力向中心位置逐渐减小,钢液的旋转速度也越小,电磁力与沿周向的旋转速度在一定的范围内成正比例关系。

2.4 有无电磁力及电磁力施加位置不同对结晶器内液流的影响

由图 4 可知,由于电磁力的作用,使得从浸入式水口流出的钢液向周围扩散,极大的减轻了钢液的冲击深度。并且从浸入式水口流出的旋流有利于杂质和气泡的聚集上浮,旋流使得结晶器内的速度场更加均匀^[5]。由图 4(b,c,d) 相比较可以看出,在相同的浇注流量下,电磁力施加的位置越接近水口出口,则液流在该处的旋转速度越大,从而加速了出流液体与周边流体的混合,是出流液体的动量被迅速吸收,使得冲击深度降低。由此可见,旋流水口的电

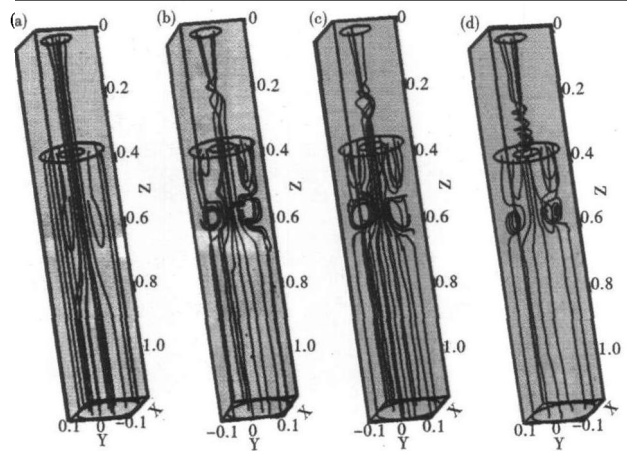


图 4 结晶器内钢液的流线分布:无电磁搅拌(a);有电磁搅拌:施加位置 $Z = 0.13 \sim 0.16$ m (b), $Z = 0.16 \sim 0.19$ m (c), $Z = 0.20 \sim 0.30$ m (d)

Fig. 4 Distribution of streamline of molten steel in mold: without electromagnetic stirring (a); with electromagnetic stirring-load position $Z = 0.13 \sim 0.16$ m (b), $Z = 0.16 \sim 0.19$ m (c) and $Z = 0.20 \sim 0.30$ m (d)

磁力施加位置越靠近水口出流处,其效果越好。

3 结论

(1)对圆管坯连铸而言,施加电磁力的水口的出流具有水平旋转流动的特点,从而使冲击深度明显降低。同时在结晶器内形成了速度较大的向上液流,这在生产中有利于钢液中气泡和夹杂物的上浮,以及热流的上传。

(2)电磁搅拌力越大,沿周向的旋转速度越大;在靠近边缘处搅拌力越大,越向中心位置,搅拌力越小。

(3)在电磁力搅拌范围,越靠近壁面位置,旋转速度最大,并逐渐向中心缩减。并且其出流的冲击深度随着搅拌位置的下移而降低。

山西省大学生创新创业专项(20081050584)

参考文献

- 1 周 亮. 重钢方坯连铸结晶器电磁搅拌数值模拟及应用研究[学位论文]. 重庆:重庆大学,2007
- 2 高宏彬,左 良. 旋转连铸结晶器内钢液流动行为的水模型实验. 东北大学学报,2002,23(3):267
- 3 崔小朝. 结晶器内钢水自旋转搅拌数值模拟与实验研究. 太原重型机械学院学报,2002(3):221
- 4 贾洪海. 旋流水口对小方坯连铸结晶器流场影响的水模拟. 金属学报,2008,44(3):375
- 5 朱志强,于学斌. 带旋流导向装置浸入式水口的水模型研究. 钢铁研究,2006,34(5):6

崔凤兰(1984-),女,硕士研究生,液态金属的流动与传热研究。

收稿日期:2009-01-23