

## 板坯连铸结晶器电磁搅拌对流场的影响

郑甫<sup>1</sup> 陈威<sup>1</sup> 张立峰<sup>2\*</sup> 朱克然<sup>3</sup> 黄福祥<sup>3</sup> 龚坚<sup>3</sup> 刘珍童<sup>1</sup>

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144; 3. 北京首钢股份有限公司, 北京 100040)

**摘要:** 本研究针对某厂板坯连铸过程, 建立了电磁搅拌作用下结晶器内流场计算的三维数学模型, 应用 Fluent 有限元仿真软件, 对结晶器内钢液的流场和磁场进行耦合求解, 进而分析电磁搅拌对结晶器内钢液流场的影响规律。结果表明, 电磁搅拌的应用影响了结晶器内钢液的流场。在水平搅拌旋流的影响下, 下环流涡心上移, 但下环流流股在结晶器内的整体流态无明显变化; 由于电磁搅拌产生的搅拌作用, 结晶器上部区域已无明显的上环流流态, 整体流态由无电磁搅拌情况下垂直方向的环流逐渐向加载电磁搅拌后水平方向的环流转变。

**关键词:** 板坯连铸 结晶器电磁搅拌 流场 数值模拟

### Effect of Mold Electromagnetic Stirring on fluid flow in Slab Continuous Casting

Zheng Fu<sup>1</sup> Chen Wei<sup>1</sup> Zhang Lifeng<sup>2\*</sup> Zhu Keran<sup>3</sup> Huang Fuxiang<sup>3</sup> Gong Jian<sup>3</sup> Liu Zhentong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004; 2. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144; 3. Beijing Shougang Co., Ltd. Beijing 100040)

**Abstract:** In this study, a three-dimensional mathematical model for calculating the flow field of molten in the mold with electromagnetic stirring was established for the slab continuous casting process. The distribution of the flow field in the mold under mold electromagnetic stirring was solved by using Fluent finite element simulation software. The results showed that the application of electromagnetic stirring affects the flow field of molten steel in the mold. Under the influence of the horizontal stirred vortex, the vortex center of the lower circulation moves upward. But the overall flow pattern of the lower circulation flow strand in the mold has no obvious change. Due to the stirring effect caused by electromagnetic stirring, there is no obvious upper circulation flow pattern in the upper region of the mold, and the overall flow pattern gradually changes from the vertical circulation without electromagnetic stirring to the horizontal circulation after electromagnetic stirring is loaded.

**Key words:** slab continuous casting, mold electromagnetic stirring, flow field, numerical simulation

## 1 前言

连铸结晶器内包含流动、传热、凝固等复杂的传输现象, 结晶器作为控制钢液洁净度的最后一个环节, 是整个连铸过程的“心脏”。结晶器内的流场对于凝固坯壳的生长、液面波动、卷渣以及夹杂物的捕获上浮去除等都存在重要的影响<sup>[1-4]</sup>, 因此流场的控制对于提升铸坯质量有着至关重要的作用。为提升连铸板坯的表面质量和内部质量, 结晶器电磁搅拌(Mold Electromagnetic Stirring, M-EMS)技术开始广泛应用于连铸结晶器内流场的控制, 大量文献表明, M-EMS 有利于均匀速度、温度, 促进坯壳均匀生长, 同时适当的搅拌强度也会减弱液面波动, 降低卷渣的发生概率, 搅拌产生的离心力也会促进夹杂物的上浮去除。其中, Li 等<sup>[5]</sup>研究了不同电流强度下电磁搅拌对结晶器表面流速以及卷渣的影响。Chen 等<sup>[6]</sup>研究表明应用 M-EMS 后弯月面速度和液位波动都显著提升。Ji 等<sup>[7]</sup>研究表明电磁搅拌通过改变流场分布进而影响了夹杂物在铸坯断面上的数密度、尺寸以及分布。Wang 等<sup>[8]</sup>在考虑间隙的情况下研究了 M-EMS 对结晶器内流场、卷渣以及夹杂物去除的影响。但是不适当的搅拌强度也会对铸坯质量造成负面影响, 所以, 有必要全面的研究结晶器电磁搅拌对结晶器内流场的影响, 进而分析流场对液面波动、卷渣以及夹杂物的捕获去除的影响, 通过电磁搅拌优化结晶器内的流场, 提升钢材的生产质量。

## 2 有限元网格及控制方程

建立三维流场与磁场耦合计算数学模型，对模型划分网格并基于 Fluent 有限元软件进行求解，计算模型及网格分布如图 1 所示。

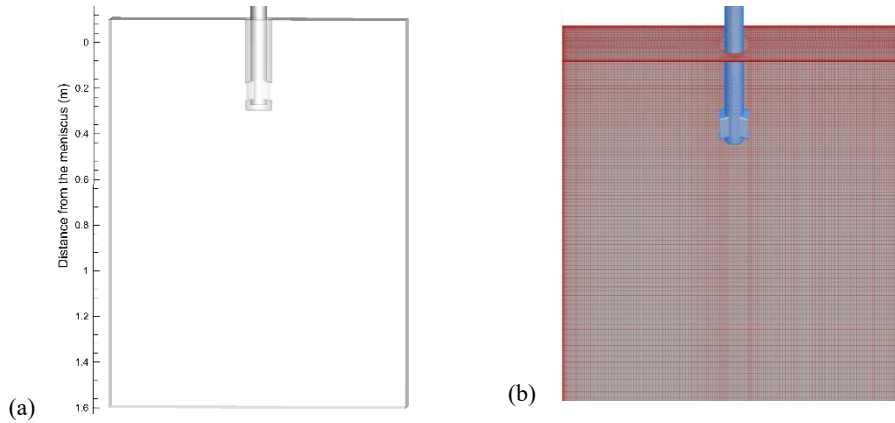


图 1 结晶器电磁搅拌计算模型及网格: (a)模型, (b)网格  
Fig. 1 The mold electromagnetic stirring calculation model and mesh: (a)model, (b)mesh

由于本研究中电磁场频率较低，在讨论电磁作用的影响时，忽略了位移电流的影响，交流电产生的电磁场可通过简化的麦克斯韦方程组（式 1-4）求解：

$$\nabla \cdot E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot H = J \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$B = \mu H \quad (4)$$

式中， $E$  为电场强度， $V \cdot m^{-1}$ ； $B$  为磁通密度， $T$ ； $t$  为时间， $s$ ； $H$  为磁场强度， $A \cdot m^{-1}$ ； $J$  为电流密度， $A \cdot m^{-2}$ ； $\mu$  为磁导率， $H \cdot m^{-1}$ 。

采用大涡模拟对湍流进行数值求解，LES 模型的动量传输方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5)$$

VOF 模型可以模拟多个不混合相的流动，通过求解一组动量方程和连续性方程来跟踪不同相交界面。对于第  $q_{th}$  相，其连续性方程如下：

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) \right] = 0 \quad (6)$$

式中  $\alpha_q$  为第  $q_{th}$  相的体积分数； $\rho_q$  为第  $q_{th}$  相的密度， $kg/m^3$ 。

### 3 结果与分析

有无电磁搅拌情况下结晶器内流场分布云图如图 2 所示。当没有加载电磁搅拌，结晶器内流场呈双环流状，上环流明显。加载电磁搅拌后，结晶器内的流场发生改变，由于搅拌作用，结晶器上部已无明显的上环流流态，同时搅拌提升了下环流的流速，但对下环流流态无显著影响。

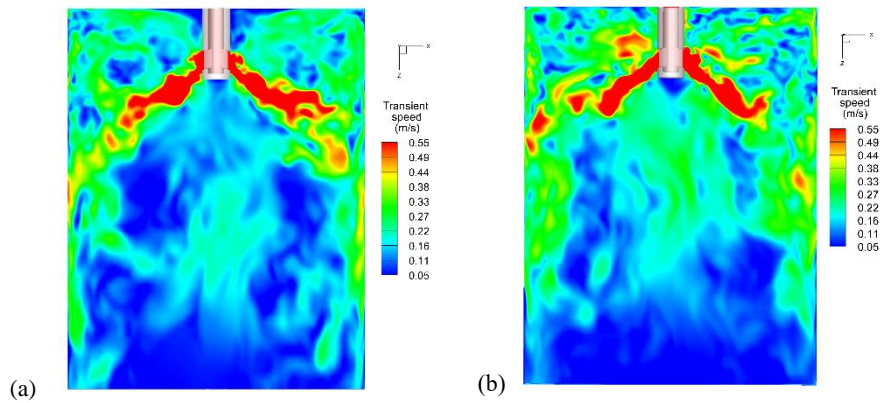


图 2 结晶器内流场分布云图: (a)无电磁搅拌; (b)有电磁搅拌  
Fig. 2 Distribution of the flow field in mold: (a)without EMS, (b)with EMS

通过结晶器内流场的二维流线图可以更加明确地表明 M-EMS 对结晶器内流场的影响。如图 3 所示，电磁搅拌使下环流涡心向上移动，但对于下环流的整体流态无显著影响。而对于上环流，无电磁搅拌情况下钢液流股在冲击窄面侧后向上移动，又在水口附近下落，呈典型的环流装；加载电磁搅拌后，钢液流股冲击窄面侧后在向上移动的过程中受到因电磁力产生的水平旋流的作用，上环流钢液也开始水平旋转。

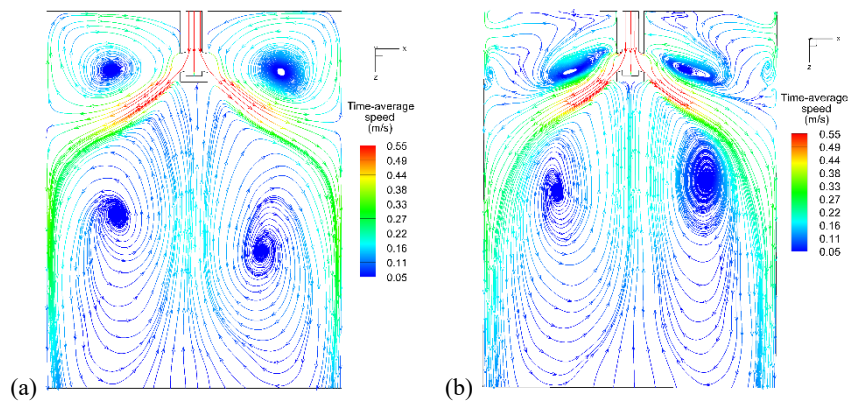


图 3 结晶器内流场的流线分布: (a)无电磁搅拌; (b)有电磁搅拌  
Fig. 3 Streamline distribution of the flow field in mold: (a)without EMS, (b)with EMS

## 4 结论

(1) 结晶器电磁搅拌的应用影响了结晶器的流场分布，对结晶器的流速有一定的提升，同时改变了结晶器钢液的流态，尤其对上环流的影响最为显著。

(2) 在电磁力的作用下搅拌区域产生了水平旋流，水平旋流对下环流整体流态无显著影响，但促使下环流涡心上移。水平旋流改变了上环流的整体流态，由无电磁搅拌下垂直方向的环流逐渐向加载电磁搅拌后的水平方向环流转变。

## 致谢

感谢河北省自然科学基金（E2021203222），国家自然科学基金（U22A20171，52104343），北方工业大学、燕山大学和北京科技大学高钢中心(HSC)对本文作者的支持。

## 参考文献

- [1] L. Zhang, S. Yang, K. Cai, J. Li, X. Wan, B G. Thomas. Investigation of fluid flow and steel cleanliness in the continuous casting strand[J]. Metallurgical and materials transactions b, 2007, 38: 63-83.
- [2] L. Zhang, Y. Wang. Modeling the entrapment of nonmetallic inclusions in steel continuous-casting billets[J]. Jom, 2012, 64: 1063-1074.
- [3] W. Chen, L. Zhang, Y. Wang, Y. Ren, Q. Ren, W. Yang. Prediction on the three-dimensional spatial distribution of the number density of inclusions on the entire cross section of a steel continuous casting slab[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 190: 122789.
- [4] W. Chen, L. Zhang, Q. Ren, Y. Ren, W. Yang. Large eddy simulation on four-phase flow and slag entrainment in the slab continuous casting mold[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(3): 1446-1461.
- [5] Q. Li, L. Zhang, W. Chen, Y. Wang, Z. Zhao, J. Zhang. Large eddy simulation on the multiphase fluid flow and slag entrainment in a continuous casting mold with electromagnetic stirring[J]. 工程科学学报, 2022, 44: 1-13.
- [6] W. Chen, L. Zhang, Y. Wang, S. Ji, Y. Ren, W. Yang. Mathematical simulation of two-phase flow and slag entrainment during steel bloom continuous casting[J]. Powder Technology, 2021, 390: 539-554.
- [7] S. Ji, L. Zhang, Y. Wang, W. Chen, X. Wang, J. Zhang. Effect of electromagnetic stirring on inclusions in continuous casting blooms of a gear steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52(4): 2341-2354.
- [8] Y. Wang, W. Chen, D. Jiang, L. Zhang. Effect of the gap between copper mold and solidified shell on the fluid flow in the continuous casting strand with mold electromagnetic stirring[J]. steel research international, 2020, 91(2): 1900470.