

VTHS-EMBr宽板坯结晶器内电磁场特性及控流行为数值模拟研究

张禹*, 李思杭, 熊鋆辉, 李壮#

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月6日; 发布日期: 2026年5月12日

摘要

宽板坯连铸的核心难题之一, 便是结晶器内钢液流动的精准调控——这关系到铸坯的最终质量。针对1200 mm、1400 mm和1600 mm三种宽度的结晶器, 搭建了恒定通钢量下的数值模拟模型, 重点探究新型立式与水平磁极组合装置(VTHS-EMBr)的作用效果。模拟中固定水平磁极电流为350 A, 通过改变立式磁极的电流强度(100 A、300 A、500 A)和频率(1~9 Hz), 研究钢液流动变化。模拟结果显示: 随着结晶器宽度从1200 mm增至1600 mm, 加入相同立式磁极电流 $I_V = 100$ A时结晶器内部最大磁感应强度均为0.085 T, 内部磁场变化不随宽度的增加而变化。频率从1 Hz升至9 Hz时, 感应电流从2000 J(A/m²)提升至42,000 J(A/m²), 感应电流的强度与作用范围随着频率的增加而增大。无磁极工况下随着结晶器从1200 mm增加至1600 mm钢液表面流动速度从0.33 m/s降至0.25 m/s, 在施加VTHS-EMBr电磁制动后, 1200 mm宽度下结晶器内钢液表面流动速度降至0.27 m/s, 1600 mm宽度下结晶器内钢液表面流动速度升至0.30 m/s。本文研究为宽板坯连铸中多维度电磁制动技术提供了理论支撑。

关键词

宽板坯结晶器, 钢液流动, 立式磁极, 水平磁极, 数值模拟, 电流, 频率

Numerical Simulation Study on Electromagnetic Field Characteristics and Flow Control Behavior in VTHS-EMBr Wide Slab Mold

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 张禹, 李思杭, 熊鋆辉, 李壮. VTHS-EMBr 宽板坯结晶器内电磁场特性及控流行为数值模拟研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(5): 12-21. DOI: 10.12677/mos.2026.155066

Yu Zhang*, Sihang Li, Junhui Xiong, Zhuang Li#

College of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: April 13, 2026; accepted: May 6, 2026; published: May 12, 2026

Abstract

One of the core challenges in wide slab continuous casting is the precise control of molten steel flow in the mold, which is crucial for the final quality of the slab. A numerical simulation model under constant steel throughput was established for molds with three widths: 1200 mm, 1400 mm, and 1600 mm, focusing on investigating the effect of a new vertical and horizontal magnetic pole combination device (VTHS-EMBr). In the simulation, the horizontal magnetic pole current was fixed at 350 A, and the changes in molten steel flow were studied by varying the current intensity (100 A, 300 A, 500 A) and frequency (1~9 Hz) of the vertical magnetic poles. The simulation results show that as the mold width increases from 1200 mm to 1600 mm, the maximum magnetic induction intensity inside the mold is 0.085 T when the same vertical magnetic pole current $I_V = 100$ A is applied, and the internal magnetic field change does not vary with the increase in width. When the frequency increases from 1 Hz to 9 Hz, the induced current increases from 2000 J (A/m^2) to 42,000 J (A/m^2), and the intensity and action range of the induced current increase with the increase in frequency. Under the condition without magnetic poles, as the mold width increases from 1200 mm to 1600 mm, the molten steel surface flow velocity decreases from 0.33 m/s to 0.25 m/s. After applying VTHS-EMBr electromagnetic braking, the molten steel surface flow velocity in the mold decreases to 0.27 m/s for the 1200 mm width and increases to 0.30 m/s for the 1600 mm width.

Keywords

Wide Slab Mold, Molten Steel Flow, Vertical Magnetic Pole, Horizontal Magnetic Pole, Numerical Simulation, Electric Current, Frequency

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

结晶器作为连铸生产的核心[1][2],其内部钢液的流动状态对铸坯质量起到决定性作用。随着板坯宽度的增加,结晶器内钢液的流动行为变得愈发复杂。在恒定通钢量的条件下,宽板坯结晶器内的钢液射流横向扩散距离增加,导致射流动量衰减,容易出现上回流区流速过低、钢渣界面流动不足等问题。因此,如何针对不同宽度的板坯实现结晶器内钢液流动的精准、灵活调控,提高连铸的产量和连铸坯的质量有比较大的实际意义[3][4]。Haibiao L. [5]等研究人员对传统结晶器内流动行为通过建立不同的数值模型,研究电磁制动下结晶器内的瞬态流体流动、凝固和夹杂物传输等行为。Li 等提出了独立式可调电磁制动系统(FAC-EMBr)和立式电磁制动(V-EMBr) [6][7]对结晶器内钢液的射流与弯月面波动进行了显著优化。Pang [8]建立三维数值模拟和水模型实验研究了不同形状和角度的浸入式入口喷嘴(SEN)对不锈钢连铸过程中的流场分布、熔渣夹杂行为以及最终铸坯质量的影响。综上所述,过往的大多研究都主要集中在传统电磁制动和新型电磁制动技术的水口的形状,水口倾角拉坯速度等工艺参数方面进行。针对结

晶器宽度改变是否影响内部流动变化少有研究。针对以上问题, 本文在新型电磁制动技术 VTHS-EMBr [9]的基础上保持通钢量不变, 通过对不同宽度结晶器(1200 mm, 1400 mm, 1600 mm), 讨论立式磁极电流大小和方向以及不同频率大小对结晶器内钢液流动影响的研究。

2. 模型描述

2.1. 物理模型

如图 1 所示三种宽度结晶器均采用相同结构, (a)图为电磁场计算几何模型此电磁装置是将立式磁极与水平磁极相结合实现线圈电流独立调控。两个立式磁极在结晶器边缘处对称放置, 水平磁极安装在浸入式水口下方区域。立式磁极用于控制上方钢液的流动以及液面波动, 水平磁极用于抑制钢液下回流区域。(b)图为计算流体域时的网格模型。选用六面体非结构性网格对流体区域进行划分, 并对边界层进行网格加密。数值模拟及其结构参数如表 1 所示。

Table 1. Numerical simulation parameters and structural configuration specifications

表 1. 数值模拟和结构参数

名称	参数
水平磁极电流 $I/(A)$	350
立式磁极电流 $I/(A)$	100 300 500
频率/HZ	1 3 5 7 9
拉坯速度 $V_c/(m \cdot \min^{-1})$	1.4 1.6 1.8 2.0
磁极方向	上下

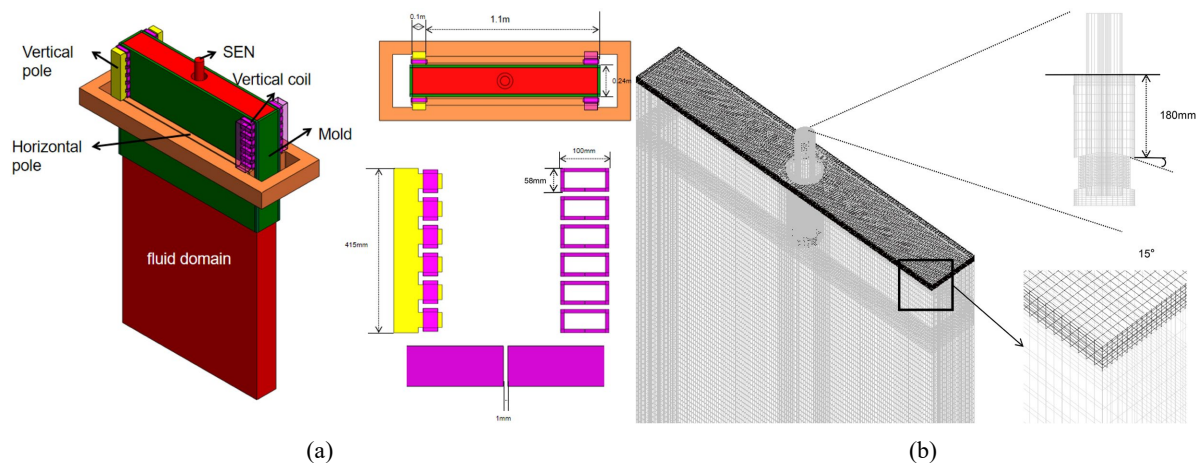


Figure 1. Models for electromagnetic field and flow field calculations. (a) Overall model for magnetic field calculation; (b) Mesh of flow field calculation model

图 1. 用于电磁场和流场计算的模型。(a) 磁场计算用整体模型; (b) 流场计算模型网格

图 2 为 VTHS-EMBr 结晶器磁场示意图, 立式磁极与水平磁极垂直布局, 实现了结晶器内的分区协同控制。立式磁极为行波磁场, 对称布置于结晶器宽面的两侧边缘处, 可在结晶器近窄面区域产生垂直方向的行波磁场。当行波方向向上时, 可驱动钢液沿宽面上行, 有效解决宽板坯因射流流量衰减过快导致的上回流区流速不足及弯月面活性差的问题; 当行波方向向下时, 则可对近窄面高速上升流股施加相

反的减速效果，抑制窄板坯下的液面剧烈波动及卷渣风险。水平磁极为稳恒磁场，水平横跨布置于浸入式水口出口下方区域，与立式磁极在空间上呈垂直交叉分布。水平磁极产生的强稳恒磁场主要作用于水口射流核心区及下回流区。其工作原理是基于电磁制动效应，利用钢液切割磁感线产生的感应电流与磁场相互作用生成洛伦兹力，该力方向始终与钢液流动方向相反，从而有效削弱高速射流的动能，降低射流对凝固坯壳的冲击深度，防止漏钢并促进夹杂物上浮。

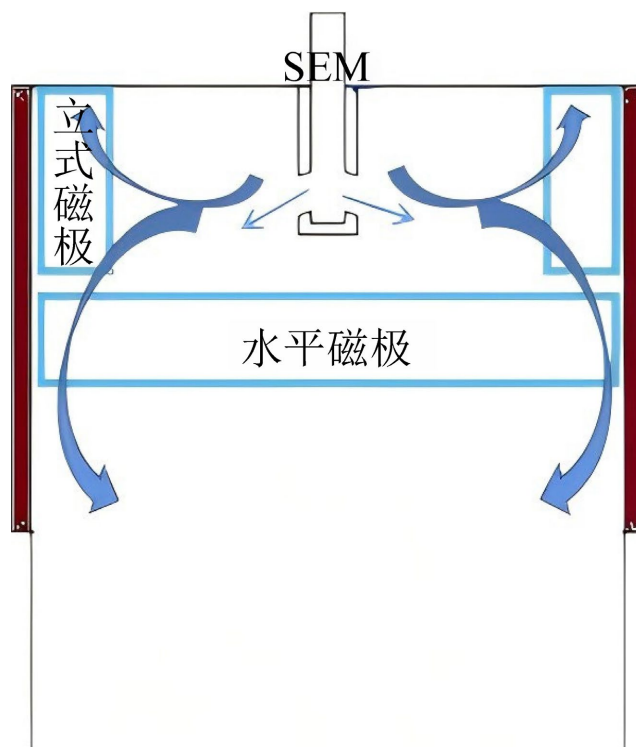


Figure 2. Schematic diagram of magnetic field in VTHS-EMBr mold
图 2. VTHS-EMBr 结晶器磁场示意图

2.2. 数值模型

为了合理简化电磁场和流场的数值模型，作出如下假设：

- (1) 结晶器内钢液为连续黏性不可压缩流体，按均相介质处理，密度、黏度等参数为常数。
- (2) 在行忽略结晶器振动、锥度、弧度对流场的影响，不考虑密度变化引起的自然对流。
- (3) 行波磁场、稳态磁场与钢液作用时，忽略钢液流动对电磁场的影响。

模拟中应用控制方程如下：

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

动量守恒方程：

$$\left[\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_{m,i} \quad (2)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

该公式，钢液在 j 方向的运动速度用 u_j 表示，单位是 m/s ， j 方向的位置坐标用 x_j 表示，单位为 m ； p 代表压强，单位是 Pa ； μ_{eff} 指的是钢液有效粘度系数，单位为 $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ； g_i 是 i 方向上重力加速度的分量，单位为 m/s^2 ； $F_{m,i}$ 表示电磁力，单位是 N/m^3 。

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i H)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

湍流模型方程：

k 方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (5)$$

ε 方程：

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \rho \quad (6)$$

在此公式中，湍动能以 k 表示，单位是 m^2/s^2 ，湍动能耗散率用 ε 表示，单位为 m^2/s^3 ； μ_t 代表湍流粘度系数， μ 代表层流粘度系数，二者单位均是 $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 。此外，方程涉及各类湍流常数取值如下： σ_k 取值为 1.0， σ_ε 取值为 1.3， C_1 取值为 1.44， C_2 取值为 1.92。

(5) MHD 方程：

洛伦兹力表达式为：

$$F = J \times B \quad (7)$$

忽略感应磁场：

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (8)$$

$$J = \sigma(E + v \times B) \quad (9)$$

$$E = -\nabla \Phi \quad (10)$$

联立上述三式得：

$$\nabla^2 \Phi = \nabla \cdot (u \times B) \quad (11)$$

在该式里，介质的电导率以 σ 表示，单位是 Ω/m ；电场强度用 E 代表，单位为 V/m ；感应电动势记作 Φ ，单位是 V 。

3. 磁场结果与分析

3.1. 不同宽度下磁场分布

图 3 所示为水平磁极电流 I_H 为 350 A，立式磁极电流为 100 A 时不同宽度下(a) 1200 mm；(b) 1400 mm；(c) 1600 mm 结晶内磁场分布情况。图 4 为三种宽度结晶器磁场分布高度方向的磁感应强度。从两图的磁场分布特征可看出，随着结晶器宽度从 1200 mm 增至 1600 mm，磁感应强度的数值大小与空间分布形态未出现明显变化，三种宽度条件下磁场在结晶器内的覆盖范围与强度峰值基本保持一致。这一结果表明，在本研究设定的电磁参数范围内，结晶器宽度对 VTHS-EMBr 装置产生的磁感应强度无明显调控作用。

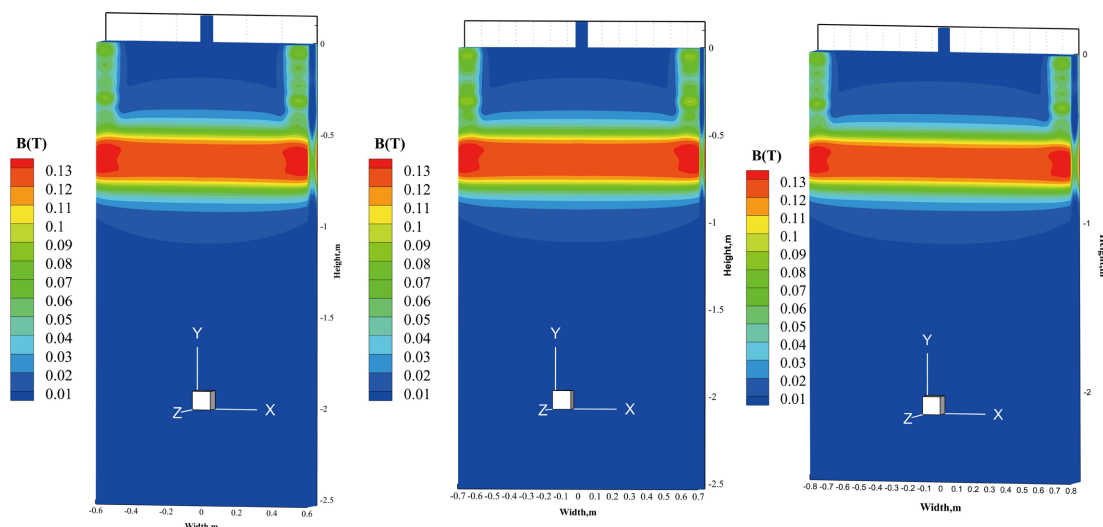


Figure 3. Magnetic field distribution under different widths. (a) $W = 1200$ mm; (b) $W = 1400$ mm; (c) $W = 1600$ mm
图 3. 不同宽度下磁场分布。(a) $W = 1200$ mm; (b) $W = 1400$ mm; (c) $W = 1600$ mm

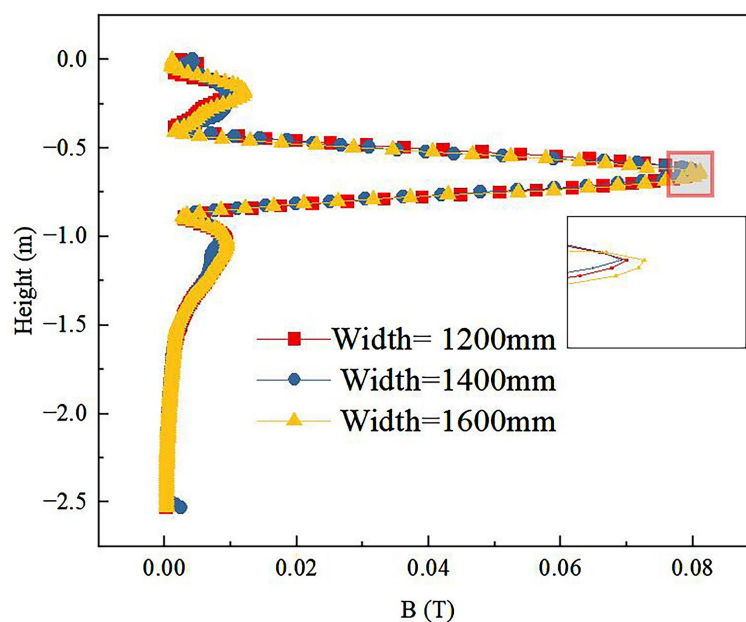


Figure 4. Distribution of magnetic induction intensity along the central section line of vertical magnetic pole under different widths when $I_H = 350$ A, $I_V = 100$ A, and $f_V = 1$ Hz

图 4. $I_H = 350$ A, $I_V = 100$ A, $f_V = 1$ Hz, 不同宽度下磁感应强度在立式磁极中心截线处的分布

3.2. 不同立式磁极电流下磁场分析

图 5 结晶器宽度 1400 mm、水平磁极电流 350 A、频率 1 Hz 时, 不同立式磁极电流下结晶器内磁场分布云图。由图可见, 磁场集中分布于立式磁极区域, 随着立式磁极电流由 100 A 增至 500 A, 磁感应强度明显增大, 磁场覆盖范围同步扩展, 且磁场强度随与水口距离的增大逐渐降低。图 6 结晶器宽度 1400 mm、水平磁极电流 350 A、频率 1 Hz 时, 不同立式磁极电流下磁场强度线性分布曲线和水平磁极电流 350 A、立式磁极电流为 300 A, 不同频率下感应电流的线性分布。结果表明, 各电流下磁场分布趋势一

致，磁感应强度随立式磁极电流增大呈单调上升，立式磁极电流从 100 A 升至 500 A，磁钢应强度由 0.005 T 升至 0.04 T。随着频率从 1 Hz 升至 9 Hz，感应电流立式磁极区域的感应电流从 2000 J (A/m²) 提升至 42,000 J (A/m²)，作用范围也随着频率的增加而扩大。

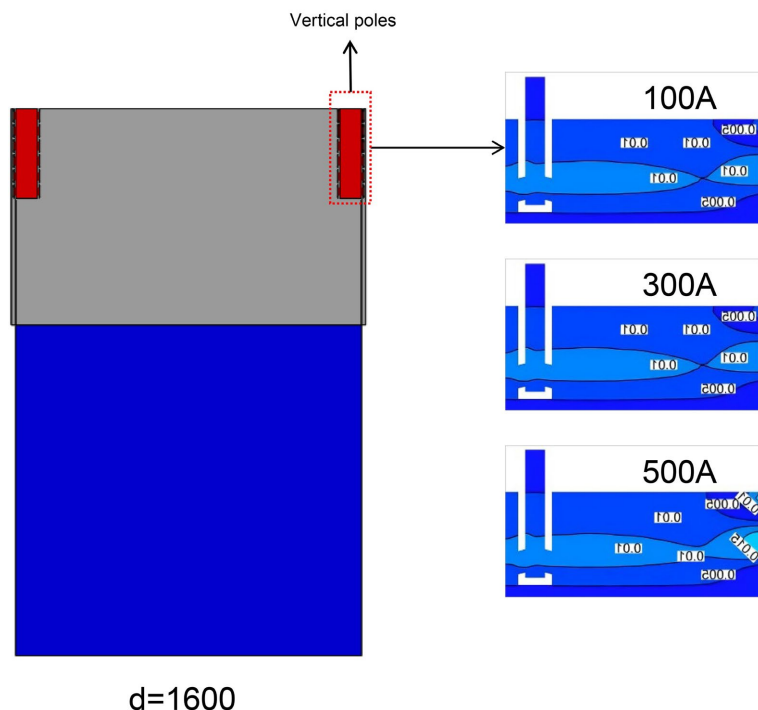


Figure 5. Magnetic field distribution under different vertical magnetic pole currents
图 5. 不同立式磁极电流下磁场分布

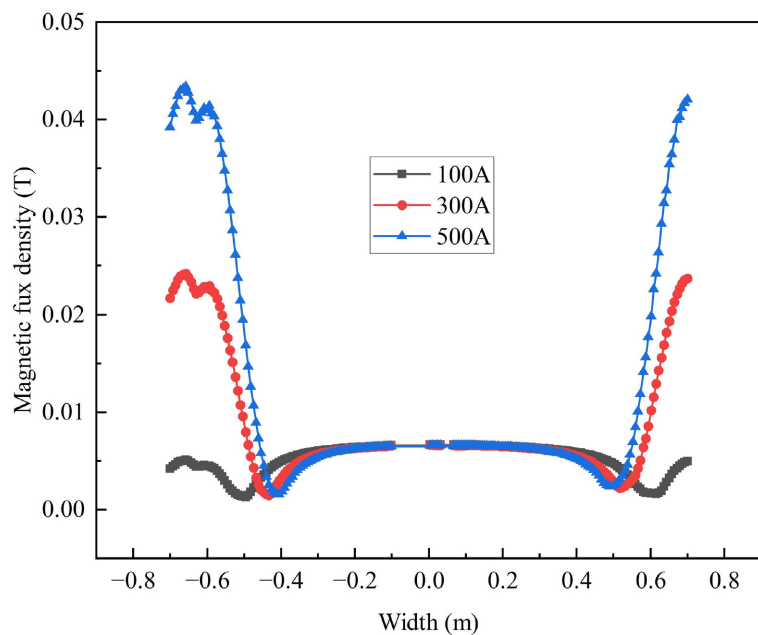


Figure 6. Linear distribution diagram of magnetic field under different vertical magnetic pole currents
图 6. 不同立式磁极电流下磁场线性分布图

4. 结晶器内部流场分析

如图 7 所示, 在无磁极工况下, 结晶器宽度从 1200 mm 提升至 1600 mm, 钢液从水口流出后随着宽度的增加, 速度逐渐减小对窄面处的冲击也随之减小, 在钢液上表面流速从 0.33 m/s 降至 0.25 m/s。在施加磁场作用后, VTHS-EMBr 通过改变磁极的上下制动方向。对 1200 mm 宽度结晶器内钢液进行减速, 上表面速度降至 0.27 m/s, 对 1600 mm 结晶器内钢液进行加速后, 钢液表面速度升至 0.30 m/s。

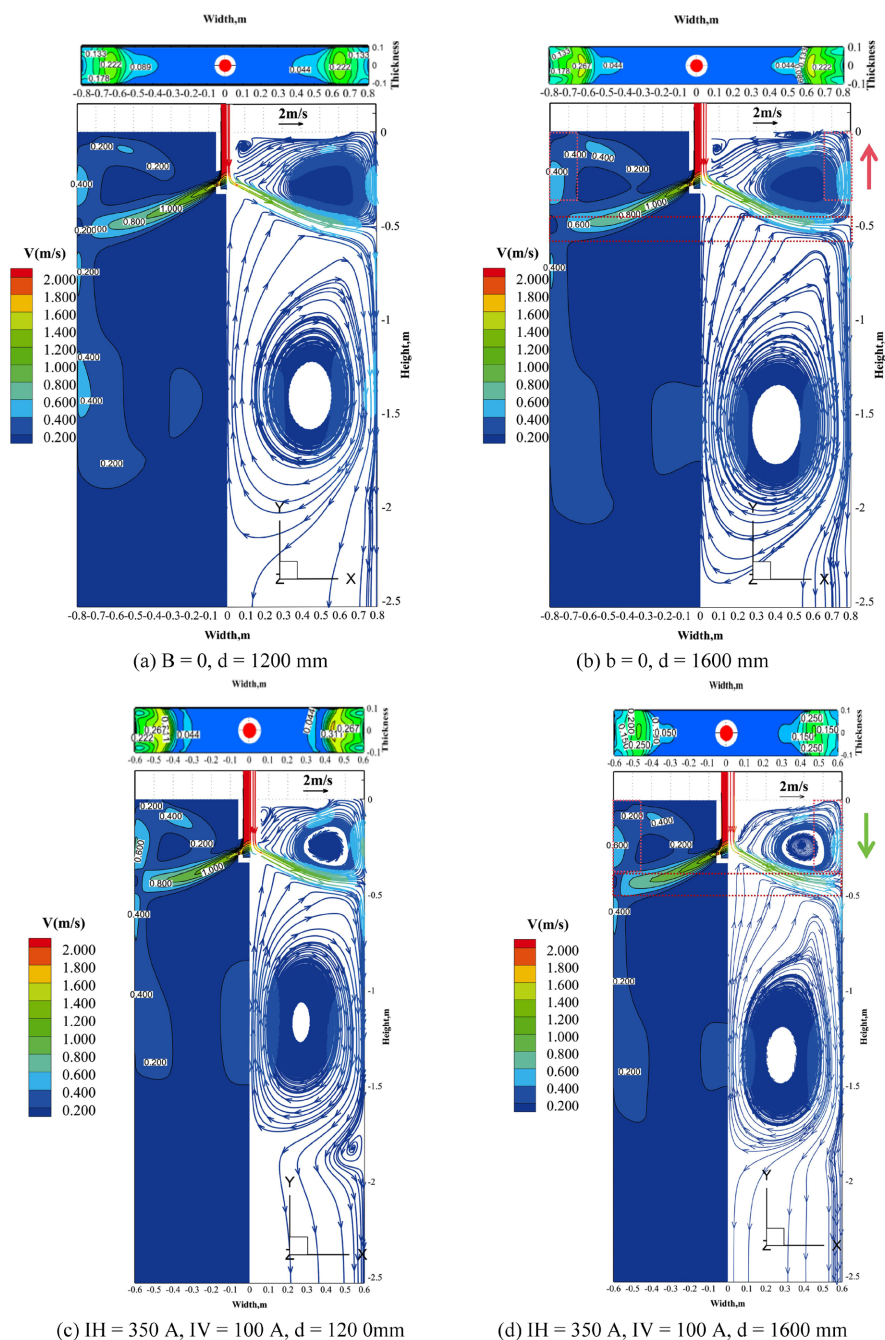


Figure 7. Velocity contour of molten steel in the mold without magnetic poles and after adding magnetic poles

图 7. 无磁极与加入磁极后结晶器内钢液速度云图

图 8 为不同条件下 1600 mm 内速度矢量图对比图，左侧为无磁极工况，右侧为施加 VTHS-EMBr 电磁制动后工况，VTHS-EMBr 电磁制动装置可以通过改变磁场方向来进行对内部钢液向上加速和向下减速制动效果。通过图中可知，在立式磁极处存在加速影响，上回流区域出现加速效果。

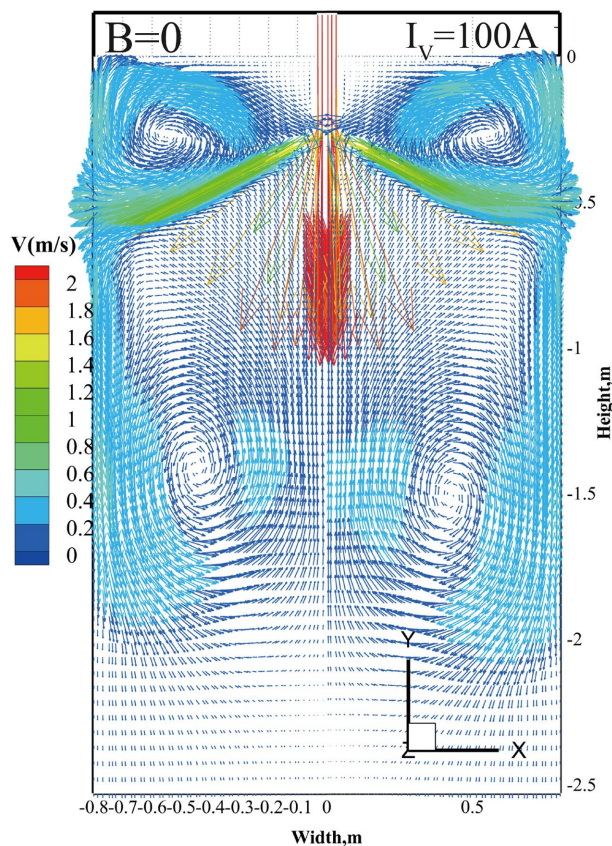


Figure 8. Velocity vector diagrams under different conditions

图 8. 不同条件下速度矢量图

5. 结论

(1) 结晶器宽度由 1200 mm 升至 1600 mm，结晶器内磁场强度不发生变化。钢液速度由 0.33 m/s 降至 0.25 m/s。

(2) 磁极参数对电磁场特性及钢液流动的调控规律明确：立式磁极电流从 100 A 增至 500 A 时，磁感应强度由 0.005 T 升至 0.04 T。作用范围也随之增大。

(3) 立式磁极频率由 1 Hz 升至 9 Hz，感应电流从 2000 J (A/m²) 提升至 42,000 J (A/m²)，作用范围也随着频率的增加而扩大。

(4) VTHS-EMBr 技术可以对结晶器内部钢液进行加速或减速调控。

基金项目

抚顺英才计划项目(No.FSYC202407004)。

参考文献

[1] 雷琳琳, 常运合, 罗衍昭, 等. 浸入式水口及其对板坯连铸结晶器流动行为的影响[J]. 连铸, 2023, 48(6): 1-16.

-
- [2] 朱诚意, 李光强, 张峰, 等. 连铸结晶器表面镀层技术研究进展[J]. 材料保护, 2005, 38(5): 43-47.
- [3] 殷瑞钰. 中国薄板坯连铸连轧的进展与展望[J]. 钢铁, 2006, 41(7): 1-6.
- [4] 许中波. 我国连铸技术的现状与展望[J]. 炼钢, 2000, 16(6): 1-5.
- [5] Lu, H.B., Zhong, Y.B., Ren, W.L., Ren, Z.M. and Lei, Z.S. (2022) Effect of Electromagnetic Brake on Transient Asymmetric Flow, Solidification, and Inclusion Transport in a Slab Continuous Casting. *Steel Research International*, **93**, Article 2200518. <https://doi.org/10.1002/srin.202200518>
- [6] Li, Z., Zhang, L., Bao, Y., Ma, D. and Wang, E. (2022) Influence of the Vertical Pole Parameters on Molten Steel Flow and Meniscus Behavior in a Fac-Embr Controlled Mold. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **53**, 938-953. <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02416-y>
- [7] Li, Z., Wang, E., Zhang, L., Xu, Y. and Deng, A. (2017) Influence of Vertical Electromagnetic Brake on the Steel/Slag Interface Behavior in a Slab Mold. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **48**, 2389-2402. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1030-9>
- [8] Pang, J., Qian, G., Pang, S., Ma, W. and Cheng, G. (2023) Design of a Submerged Entry Nozzle for Optimizing Continuous Casting of Stainless Steel Slab. *Journal of Iron and Steel Research International*, **30**, 2229-2241. <https://doi.org/10.1007/s42243-023-01042-z>
- [9] Li, Z., Liu, J. and Ma, D. (2025) Numerical Simulation on Molten Steel Flow in the Mold under the Effect of Vertical Traveling Wave Magnetic Field and Horizontal Steady Magnetic Field. *Metallurgical Research & Technology*, **122**, Article No. 420. <https://doi.org/10.1051/metal/2025047>