VTHS-EMBr作用下结晶器内的 磁场数值模拟研究

刘 俊*,周 龙,李 壮*

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年5月13日; 录用日期: 2025年6月6日; 发布日期: 2025年6月13日

摘要

为提高结晶器电磁制动的灵活性,本文提出一种垂直行波磁场与水平稳恒磁场电磁制动(VTHS-EMBr)技术,其装置由置于窄面附近宽面上的立式行波磁场极和水口(SEN)下方水平稳恒磁场极构成。通过数值模拟分析垂直行波磁场强度(Iv)、频率(fv)与水平磁场(IH)的协同作用,揭示其对结晶器内磁场及对钢液的制动力分布。研究表明:当垂直磁极电流参数为Iv = 500 A、5 Hz,水平磁极电流参数为I_H = 350 A时,产生的垂直行波磁场磁感应强度可达0.042 T,水平稳恒磁场磁感应强度可达0.07 T,行波磁场与稳恒磁场共同作用下对钢液射流的制动力可达1541.8 N/m³。该研究为高拉速连铸中多维度电磁制动技术提供了理论支撑。

关键词

连铸,结晶器,VTHS-EMBr,行波磁场,电磁制动

Numerical Simulation Study on the Magnetic Field in the Mold under the Combined Action of Vertical Traveling Magnetic Field and Horizontal Steady Magnetic Field EMBr

Jun Liu*, Long Zhou, Zhuang Li#

College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: May 13th, 2025; accepted: Jun. 6th, 2025; published: Jun. 13th, 2025

*第一作者。 #通讯作者。

Abstract

To enhance the flexibility of electromagnetic braking in continuous casting molds, this paper proposes a Vertical Traveling Wave Magnetic Field combined with Horizontal Steady Magnetic Field electromagnetic braking (VTHS-EMBr) technology. The device comprises vertical traveling wave magnetic poles positioned on the wide faces adjacent to the narrow sides and horizontal steady magnetic poles located beneath the Submerged Entry Nozzle (SEN). Through numerical simulation analysis of the synergistic effects between vertical magnetic field intensity (I_V), frequency (f_V), and horizontal magnetic field intensity (I_H), this research reveals their combined influence on magnetic field distribution and braking force distribution in molten steel. The results demonstrate that when the vertical magnetic poles operate at $I_V = 500$ A, $f_V = 5$ Hz and horizontal magnetic poles at $I_H = 350$ A, the vertical traveling magnetic flux density reaches 0.042 T while the horizontal steady magnetic flux density achieves 0.07 T. Under their combined action, the braking force density on the molten steel jet reaches 1541.8 N/m³. This study provides theoretical support for multidimensional electromagnetic braking technology in high-speed continuous casting processes.

Keywords

Continuous Casting, Mold, VTHS-EMBr, Traveling-Wave Magnetic Field, Electromagnetic Braking

Copyright © 2025 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/

CC O Open Access

1. 研究背景

连铸电磁制动技术作为提升连铸效率与铸坯质量的核心技术。Lu 等[1]揭示电磁搅拌(EMS)位置对连 铸结晶器流动与凝固的影响,上部 EMS 可提升温度场均匀性并减少夹杂物捕获。Sun 等[2]将 EMS 与电 磁制动(EMBr)结合,通过协同作用优化钢/渣界面稳定性,实现流场精细调控。Li 等[3]提出立式电磁制动 (V-EMBr),较传统水平 EMBr 显著降低射流动能和弯月面波动,且工艺参数适应性更强。Li 等[4]开发独 立可调组合电磁制动(FAC-EMBr),复合磁场同步抑制射流冲击并稳定钢液表面,高拉速下仍保持高效制 动。张安昊等[5]对比发现 FAC-EMBr 较全幅一段式 EMBr 在吹氩控制中优势显著,可促进气泡均匀溢出 并降低卷渣风险。当前研究揭示了两大技术瓶颈:1. 传统稳恒磁场难以平衡不同区域流速需求[6],上回 流区流速不足影响保护渣熔化和表面质量;2. 现有复合磁场[7]对窄面区域流场调控能力有限。

针对这些问题,本文提出新型 VTHS-EMBr 技术,创新性地将 SEN 下方水平稳恒磁场与窄面宽面区 域立式行波磁场相结合。前者可抑制高速射流冲击,后者通过可调行波磁场精准调控上回流区流动及窄 面区域流速分布,实现结晶器流场多维协同控制。通过数值模拟探究该技术下电磁场特性,为突破现有 电磁制动技术瓶颈提供理论依据。

2. 模型描述

2.1. 物理模型

图 1(a)~(c)为用于电磁场计算的几何模型,模型包含水平磁极(HMP)、立式磁极(VMP)、结晶器和钢 液区域。图 1(d)、图 1(e)为用于流动计算的钢液流动区域几何模型及网格,几何尺寸为 1.2 m × 0.2 m × 2.53 m (长 × 宽 × 高)。液渣层的高度设置为 0.03 m。采用六面体非结构网格对流体区域进行网格划分

和边界层网格加密,考虑到网格数量对计算结果的影响,最终计算区域网格数确定为 526,716 [4]。数值 模拟和结构参数如表1所示。

Table 1	. Numerical simulation	parameters ar	nd structural	configuration	specifications
表1.数	【 值模拟和结构参数				-

数值	
350, 550	
100, 300, 500	
1, 3, 5, 7, 9	
0.18	
-15	
2	



Figure 1. Models for electromagnetic field and flow field calculations: (a) Integrated model for magnetic field calculation; (b) Top view; (c) Side view; (d) Model for flow field calculation; (e) Mesh of the 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) 俯视图; (c) 侧视图; (d) 流场计算用模型; (e) 流场计算模型网格

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) 在行波磁场频率低于 10 Hz 的低频工况下,将电磁场视为准静态磁场,不考虑位移电流;
- (2) 在行波磁场和稳恒磁场对钢液的作用过程中,忽略了钢液流动对电磁场的影响;
- (3) 忽略钢液和保护渣的传热和凝固行为。

电磁场通过求解麦克斯韦方程组和欧姆定律确定:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho_{e0} \tag{1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{3}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{j}_0 + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{j}_0 = \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{E} \tag{5}$$

其中 ρ_{e0} 为自由电荷的体密度, **B**为磁通量密度, σ 为电导率, **E**为电场强度; **j**₀为传导电流密度, **H** 为磁场强度。 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ 为位移电流密度,由于本研究中不考虑位移电流,公式(4)变为:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{j}_0 \tag{6}$$

流体的控制方程 Navier-Stokes 方程和连续性方程:

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla\cdot\mathbf{v}\right) = \rho f - \nabla p + \nabla(\lambda\nabla\cdot\mathbf{v}) + \nabla\cdot(2\mu S) + F$$
(7)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \left(\rho \mathbf{v} \right) = 0 \tag{8}$$

其中 ρ 为钢液的密度,kg/m³; f为作用在流体单元上的体积力,其与流体的形状无关,m/s²; ∇p 为作用 在流体单元上的压力,Pa: $\nabla(\lambda \nabla \cdot v)$ 为作用在流体微元的黏性体积膨胀力,N/m³; $\nabla \cdot (2\mu S)$ 为作用在流 体微元上的黏性偏应力张量的合力,N/m³; F 为洛伦兹力,N/m³。

洛伦兹力是连通电磁场方程和流体流动方程的桥梁:

$$F = \boldsymbol{j} \times \boldsymbol{B} \tag{9}$$

3. 模型验证

为了准确仿真新型 VTHS 磁场作用下结晶器内钢液流动行为,对磁场模型的准确性进行验证是必不可少的。图 2 给出了线圈电流为 600 A,频率为 4.5 Hz 的条件下,文献[8]中水平行波磁场磁感应强度





图 2. 文献中实测磁感应强度数据[8]与数值仿真获得的磁感应强度数据对比

测量值和本文数值仿真得到的磁感应强度分布。磁感应强度测量点位于搅拌器高度中心(y=-0.075 m 面), 距离结晶器宽面内壁 15 mm 的特征线上。由图可知,在电流参数一致的条件下,数值仿真获得的磁感应 强度大小与实测值具有很好的一致性,证明了数学模型和求解方法的准确性。之后采用相同的求解方法 对 VTHS 电磁场进行求解,获得的 VTHS 磁感应强度分布按指定格式导入到 MHD 模型中,进行 VTHS 磁场作用下钢液流动行为的数值仿真。

4. 结果与分析

磁场结果分析

图 3 给出了水平磁极电流 *I*_H = 350 A,垂直磁极电流频率 *f*_V = 5 Hz 时,不同垂直磁极电流(*I*_V)下结晶 器内特征线 Line V₁(坐标为:(-0.55,0,0)~(-0.55,-2.53,0))上的磁感应强度。特征线 Line V₁贯穿垂直磁 极的 x 方向中心,且经过水平磁极覆盖区域,其上的电磁场数值能够很好地反映结晶器内的电磁场分布 情况。当 *I*_V 由 100 A 增加到 500 A 时,对应垂直磁极覆盖区域的磁感应强度明显增大。由于 *I*_H恒定为 350 A,因此水平磁极覆盖区域磁感应强度大小并无明显变化。垂直线圈电流越大,对应区域的磁感应强 度数值越大,对应垂直磁极覆盖区域的磁感应强度明显增大垂直区域的磁感应强度最大值分别为0.011 T、0.023 T 和 0.042 T。然而在垂直磁极和水平磁极交界位置处出现了反常现象,*I*_V为 100 A 时,该位置的磁感应强度数值最大,*I*_V为 500 A 时,该位置的磁感应强度数值最小,随着垂直磁极电流的增大 Line V₁ 上 水平磁极区域的磁感应强度最大值分别为 0.077 T、0.073 T 和 0.070 T。导致这一现象产生的原因在于,垂直磁极产生的行波磁场与水平磁极产生的稳恒磁场发生了相互抵消,*I*_H恒定时,*I*_V为 500 A 时产生的 行波磁场强度最强,与水平稳恒磁场的抵消效果最强。因此呈现出了 *I*_V越大,垂直磁极与水平磁极交界 处磁感应强度数值越小的现象。



Figure 3. Magnetic flux density distribution along Line V₁ in the z = 0 m cross-section under different I_V values with $I_H = 350$ A and $f_V = 5$ Hz 图 3. $I_H = 350$ A, $f_V = 5$ Hz 时, 不同 $I_V \upharpoonright z = 0$ m 截面内 Line V₁ 上的磁感应强度分布

本文对 VTHS 结晶器在拉坯速度为 2 m/min 工况下进行了垂直行波磁场与水平稳恒磁场作用下的钢 液流动模拟。图 4 所示,钢液射流经 SEN 流出到达射流冲击区,在钢液冲击结晶器窄面后分为上下两股 射流,向上的部分进入向上回流区,与向下波动的行波磁场发生相对运动,产生与钢液流动方向相反的 电磁力,达到减速效果;向下部分的钢液射流进入向下回流区,在流经水平磁极产生的稳恒磁场区域时, 钢液与水平磁场发生相对运动,同样起到了制动效果。基于上述原因,感应电流以及电磁力呈现出集中 分布于射流冲击区和向上回流区的特征。并且 *I*、越大,上述区域的感应电流和电磁力越大。*I*_H恒定时, *I*、的增大对钢液射流冲击区的影响最为明显,随着垂直磁极电流的增大,Line V₁上的电磁力最大值分别 为 253.9 N/m³、842.0 N/m³ 和 1541.8 N/m³。



Figure 4. Distribution of electromagnetic force and induced current along Line V₁ in the z = 0 m cross-section under varying I_V conditions with $I_H = 350$ A and $f_V = 5$ Hz 图 4. $I_H = 350$ A, $f_V = 5$ Hz 时, 不同 $I_V \ge 2 = 0$ m 截面内 Line V₁上的电磁力和感应电流分布

图 5 为 z = 0 截面内特征线 Line V₁上的磁感应强度分布。当 *I*_v和 *f*_v恒定, *I*_H分别为 350 A 和 550 A 时, 垂直磁极覆盖的区域磁感应强度并无太大差别,磁感应强度曲线基本重合。水平磁极覆盖的区域, 550 A 对应的磁感应强度为 0.118 T, 明显大于 350 A 时对应的 0.073 T。

图 6显示了 *I*_H分别为 350 A 和 550 A 时,钢液射流冲击区和向上回流区的电磁力和感应电流分布云 图。水平磁极电流为 350 A 和 550 A 时曲线 Line V₁上的电磁力最大值分别为 842.0 N/m³ 和 1064.1 N/m³。 并且在图中可以观察到,*I*_H=550 A 时的感应电流覆盖范围比 *I*_H=350 A 时的感应电流覆盖范围更广,但 在射流冲击区的局部区域内(图中框选区域)感应电流的分布与总体趋势相反。出现这一现象并非反常,射 流冲击区感应电流的生成需要综合考虑磁感应强度、钢液运动方向和流速等因素。钢液运动方向和流速 对感应电流及电磁力的影响。

垂直磁极电流频率的变化对结晶器内磁感应强度的分布并无明显影响,但随着垂直磁极电流频率的 增大,垂直行波磁场的波动频率更高,其与钢液的相对运动速度更快即磁场主动驱动钢液的效果更强。 图 7 中对垂直磁极作用区域进行了局部放大,仍然能观察到特征线 Line V₁上的电磁力随着 f_v 的增加而 增大的趋势,曲线上的电磁力最大值分别为 160.4 N/m³、386.4 N/m³、842.0 N/m³、1229.4 N/m³和 1671.2 N/m³。然而,相较于射流冲击区,该区域电磁力增大的趋势相对较弱。其原因在于,在射流冲击区,钢 液流速相对较快,而向上回流区的钢液在经历射流冲击区的磁场制动作用之后,其速度已出现显著的降 低。从而使得 f_v 不同时产生的电磁制动力区别并不明显。



Figure 5. Magnetic flux density distribution along Line V₁ in the z = 0 m cross-section with varying $I_{\rm H}$ under $I_{\rm V} = 300$ A and $f_{\rm V} = 5$ Hz

图 5. $I_V = 300 \text{ A}$, $f_V = 5 \text{ Hz}$ 时,不同 $I_H \nabla z = 0 \text{ m}$ 截面内 Line V₁上的磁感应强度分布





DOI: 10.12677/mos.2025.146483



Figure 7. Electromagnetic force distribution along Line V₁ under different f_V conditions with $I_H = 350$ A and $I_V = 300$ A 图 7. $I_H = 350$ A, $I_V = 300$ A 时,不同 f_V 下 Line V₁上的电磁力分布

5. 结论

(1) VTHS 结晶器水平磁极和垂直磁极的电流强度对所产生的磁感应强度大小具有决定性作用。具体 表现为:施加电流强度越大,所产生的磁感应强度越大,钢液初始速度相同时,产生的电磁制动力越大。

(2) *I*v 大小恒定时, *f*v 越大即行波磁场的波动频率越高,磁场与钢液的相对运动速度越高产生的电磁制动力越大。

(3) VTHS 结晶器内垂直磁极行波磁场与水平磁极稳恒磁场存在相互影响,由于垂直行波磁场的波动与水平稳恒磁场相抵消,出现了垂直磁极电流越强,水平磁极与垂直磁极交界处的磁感应强度越小的效果。

基金项目

抚顺英才计划项目(No. FSYC202407004);国家自然科学基金资助项目(No. 51804154)。

参考文献

- Lu, H., Zhong, Y., Ren, Z., Ren, W., Cheng, C. and Lei, Z. (2022) Numerical Simulation of EMS Position on Flow, Solidification and Inclusion Capture in Slab Continuous Casting. *Journal of Iron and Steel Research International*, 29, 1807-1822. <u>https://doi.org/10.1007/s42243-022-00817-0</u>
- [2] Sun, X., Li, B., Lu, H., Zhong, Y., Ren, Z. and Lei, Z. (2019) Steel/Slag Interface Behavior under Multifunction Electromagnetic Driving in a Continuous Casting Slab Mold. *Metals*, 9, Article 983. <u>https://doi.org/10.3390/met9090983</u>
- [3] Li, Z., Wang, E. and Xu, Y. (2018) Behavior of Molten Steel Flow in Continuous Casting Mold with Different Static Magnetic Field Configurations. *Journal of Iron and Steel Research International*, 25, 366-377. https://doi.org/10.1007/s42243-018-0051-1
- [4] Li, Z., Zhang, L., Ma, D. and Wang, E. (2020) Numerical Simulation on Flow Characteristic of Molten Steel in the Mold with Freestanding Adjustable Combination Electromagnetic Brake. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **51**, 2609-2627. <u>https://doi.org/10.1007/s11663-020-01950-5</u>

- [5] 张安昊,马丹竹,建伟伟,等.独立可调式组合电磁制动结晶器内吹氩行为数值模拟[J]. 连铸, 2024(4): 38-46.
- [6] Xu, L., Pei, Q., Han, Z., Cui, J., Pan, H. and Yao, Y. (2022) Influences of the Braking Effect of Ruler Embr on Molten Steel Flow and Steel-Slag Interface Fluctuation in a Continuous Casting Mold. *Processes*, 11, Article 33. <u>https://doi.org/10.3390/pr11010033</u>
- [7] Yin, Y., Zhang, J., Ma, H. and Zhou, Q. (2021) Large Eddy Simulation of Transient Flow, Particle Transport, and Entrapment in Slab Mold with Double-Ruler Electromagnetic Braking. *Steel Research International*, **92**, Article ID: 2000582. <u>https://doi.org/10.1002/srin.202000582</u>
- [8] Lu, H., Zhong, Y., Cheng, C., Ren, W., Ren, Z., Lei, Z., et al. (2024) Evaluation of Mold Electromagnetic Stirring in Slab Continuous Casting Based on the Steel/Slag Interface Behavior. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 55, 2440-2458. <u>https://doi.org/10.1007/s11663-024-03106-1</u>