

立式行波磁场作用下板坯连铸过程金属液流动与渣金界面动力学行为模拟分析

许琳¹, 裴群武², 高兢^{3*}

(1. 沈阳工程学院, 能源动力与核技术工程学院, 辽宁 沈阳 110316; 2. 沈阳汇力智能科技有限公司, 辽宁 沈阳 110043; 3. 沈阳工程学院, 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110316)

摘要:在绿色低碳发展趋势下,当代冶金工业追求高速高效连铸以促进可持续发展。鉴于此,提出一种立式行波磁场控流技术,旨在优化和控制金属液流动行为,克服现存技术局限,为连铸过程的绿色低碳转型提供理论依据和技术支持。研究过程以1450 mm×230 mm断面连铸板坯结晶器为对象,首先建立结晶器电磁连铸过程三维多物理场耦合数学模型,其次模拟研究无磁场、立式行波磁场及全幅一段水平直流磁场作用下板坯连铸结晶器内金属液流动与渣金界面行为,最后对比评价两种磁场形式对结晶器内钢液流动控制效果的影响。结果表明,无磁场作用时,渣金界面最大高度为22.3 mm;当全幅一段电磁制动器施加的电流为1350 A时,渣金界面最大高度降至18.6 mm;而当立式行波磁场减速器施加的电流仅为600 A时,渣金界面最大高度显著降至13.9 mm。可见,相较于全幅一段电磁制动器,立式行波磁场控流器能以更低能耗实现对结晶器内上回流区钢液流动的有效控制,从而稳定渣金界面波动,防止表面卷渣。

关键词:结晶器;行波磁场;电磁制动;渣金界面

中图分类号:TF777.1,TP391.9 文献标志码:A

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.05.006

文章编号:1004-7638(2025)05-0054-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Numerical simulation of the influence of vertical traveling wave magnetic field on the behavior of molten steel flow and steel slag interface fluctuation in a continuous casting slab mold

XU Lin¹, PEI Qunwu², GAO Jing^{3*}

(1. Shenyang Institute of Engineering, School of Energy, Power, and Nuclear Engineering, Shenyang 110136, Liaoning, China; 2. Shenyang Hui Li Intelligent Technology Co., Ltd., Shenyang 110136, Liaoning, China; 3. Shenyang Institute of Engineering, School of Electrical Engineering, Shenyang 110136, Liaoning, China)

Abstract: With the trend of green and low carbon development, the contemporary metallurgical industry pursues high-speed and high-efficiency continuous casting to promote sustainable development. In view of this, a vertical traveling wave magnetic field flow control technology is proposed to optimize and control the flow behavior of liquid metal during continuous casting and overcome the existing technical limitations. The proposed flow control technology can provide theoretical basis and technical support for the green and low-carbon transformation of continuous casting process. In the current research, a 1450 mm × 230 mm continuous casting slab mold is taken as a research object. Firstly, a three-dimen-

收稿日期:2025-08-18;修回日期:2025-08-29;接受日期:2025-08-29

基金项目:沈阳市科技人才专项资助项目(RC230046);辽宁省科技厅面上项目(2025-MS-288)。

作者简介:许琳,女,1989年出生,黑龙江人,博士,副教授,主要从事电磁流体力学工作。E-mail: lin_xu1989@163.com;

*通讯作者:高兢,性别:女,1983年出生,辽宁人,硕士,副教授,主要从事磁流体仿真工作。E-mail: xulin1@sie.edu.cn。

sional multi-physical field coupling mathematical model is established for describing the electromagnetic continuous casting process. Secondly, the behaviors of molten steel flow and the steel-slag interface within the slab continuous casting mold under conditions of free magnetic field, vertical traveling wave magnetic field, and single ruler horizontal direct current magnetic field are simulated and investigated. Finally, the effects of these two magnetic field forms on the flow control of molten steel in the mold are compared and evaluated. The results indicate that, in the absence of the magnetic field, the maximum height of the steel-slag interface is 22.3 mm. When applied the current via the single ruler horizontal electromagnetic brake is 1 350 A, the maximum height decreases to 18.6 mm. In comparison, when the vertical traveling wave magnetic field reducer applies a current of only 600 A, the maximum height of the steel-slag interface is significantly decreased to 13.9 mm. Based on the results, it can be concluded that the vertical traveling wave magnetic field reducer has more significant flow control advantages than the single ruler horizontal electromagnetic brake with lower energy consumption. The directional electromagnetic force generated by the vertical traveling wave magnetic field can effectively suppress the flow of molten steel in the upper recirculation zone of the mold and stabilize the fluctuation of the steel-slag interface.

Key words: mold, traveling wave magnetic field, electromagnetic braking, steel-slag interface

0 引言

在全球绿色化与低碳化发展的大背景下,现代冶金工业正不断寻求高速、高效、可持续的连铸工艺,以适应行业的发展需求^[1-3]。结晶器电磁控流技术(Electromagnetic Flow Control,简称EMC)作为一种关键使能技术,在促进高效绿色制造方面发挥着重要作用^[4-8]。EMC技术通过在结晶器周缘部署的电磁线圈产生可控磁场,可以有效调节和优化熔融金属在结晶器内部的流动特性与动力学行为。这一技术的应用不仅能够促进凝固坯壳的均匀生长,还能显著减少中心偏析和表面裂纹等缺陷,从而提升铸坯的内部质量和表面光洁度^[9]。近年来,随着高品质钢材需求的增长,针对多元规格板坯生产的结晶器多模式电磁控流技术(Mult-mode EMS,简称MM-EMS)已成为连铸技术发展中的热点问题^[10]。MM-EMS技术能够根据不同规格的板坯调整最佳电磁搅拌模式,以进一步改善连铸坯的质量,提高生产效率^[11-12]。

何建国等^[13]针对宽厚板结晶器,通过数值模拟研究不同EMS位置对钢液流动和液面波动行为的影响,研究发现EMS通过增强上回流区流动可提升钢液成分与温度均匀性,同时提高EMS位置能够抑制卷渣并改善流场对称性。解晓晓等^[14]构建板坯结晶器三维多物理场耦合模型,探究EMS对结晶器内钢液流动、凝固及液面波动的影响,结果表明EMS可使结晶器表面钢液循环流动转变为水平循环流动,从而增强钢液表面横向流动,降低冲击

深度。雷作胜团队^[15-17]通过多物理场耦合模型与流体体积法(VOF),同样指出采用EMS可诱导熔池内钢液产生水平环流,有效抑制射流对窄面的冲击,改善初始凝固均匀性,但EMS电流强度过大会加剧液面波动。

基于上述EMS技术特点,笔者提出了一种立式行波磁场控流新方法,旨在优化结晶器内部金属液流动行为和控制渣金界面行为,实现对金属液流和渣金界面波动的精确控制,同时减少不必要的能耗,为连铸过程的绿色低碳转型提供坚实的理论依据和技术支持。研究通过立式行波磁场控流新方法,以期进一步提高连铸过程的效率和产品的质量,进而推动冶金工业向更加可持续的方向发展。基于此,以电磁流体力学理论为基础,以连铸板坯结晶器为研究对象,建立了结晶器电磁连铸过程的三维多物理场耦合数学模型,并模拟研究了无磁场、立式行波磁场及全幅一段水平直流磁场作用下板坯连铸结晶器内金属液流动与渣金界面动力学行为。研究过程通过对比评估不同磁场形式对结晶器内金属液流动控制效果的影响,揭示立式行波磁场在改善金属液流动方面的优势,进而为连铸过程的效率提升和产品质量改进提供有力的技术支撑。

1 数学模型

1.1 基本假设

为建立电磁连铸结晶器内三维多场耦合的数学模型,引入以下简化假设:在行波磁场条件下,鉴于

磁雷诺数较低,忽略钢液流动对外部磁场效应的影响;针对低频电磁环境,采用磁准静态场假设,同时忽略位移电流的效应;设定结晶器铜板、铁芯及钢液均为各向同性材料,其电磁物性参数取恒定值,并使用时均电磁力表征瞬态电磁力效应;结晶器内保护渣层简化为液态单相模型,忽略其他物理状态渣层的影响;同时,假定钢液与液态渣均为均质、不可压缩的牛顿流体;模型中暂不考虑传热过程、凝固行为及相关热力学效应;此外,结晶器振动及负锥度对钢液流场的扰动亦被忽略。

1.2 渣金界面两相流动控制方程

为模拟连铸结晶器内钢液-熔渣两相流动与动态界面行为,研究采用流体体积法 VOF (Volume of fraction)^[18]。基于 VOF 方法,建立包含湍流效应的瞬态两相流模型,通过多相流数值模拟中界面追踪方法,求解体积分数输运方程,实现钢液与渣相间移动界面的动态捕捉。其中,钢液体积分数可通过式(1)获得。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \Phi v_i = 0 \quad (1)$$

式中, Φ 表示钢液体积分数; $\Phi=1$ 时表示求解单元完全由钢液占据; $\Phi=0$ 时表示求解单元非钢液相,为保护渣; $0<\Phi<1$ 表示求解单元相界面过渡区域; v_i 表示钢液流动速度, m/s。

由于结晶器内钢液与保护渣两相界面处存在由微观作用力差异引发的本征张力效应,为在模型中纳入该界面张力,研究采用连续表面力模型(CSF),将其作为体积力源项引入动量方程,表达式如(2)~(4)所示。

$$F_{Vol,i} = \sigma \frac{\rho \kappa \nabla \Phi}{0.5(\rho_{st} + \rho_{sl})} \quad (2)$$

$$\rho = \rho_{st} \Phi + \rho_{sl} (1 - \Phi) \quad (3)$$

$$\kappa = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \Phi}{|\Phi|} \right) \quad (4)$$

式中, $F_{Vol,i}$ 表示相间动量传递源项, N/m³; ρ 表示混合相的平均质量浓度, kg/m³; ρ_{st} 表示钢液相质量浓度, kg/m³; ρ_{sl} 表示液渣相质量浓度, kg/m³; σ 表示钢液电导率, S/m; κ 表示界面几何曲率因子。

1.3 湍流流动控制方程

湍流流动控制方程如式(5)~(8)所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_{M,i} + F_{Vol,i} \quad (6)$$

湍动能方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + v_j \frac{\partial (\rho k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (7)$$

湍动能比耗散率方程:

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + v_j \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (8)$$

其中,湍流普朗特数 σ_k 、 σ_ω ,湍流动能产生项 G_k 如式(9)~(11)所示。

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}} \quad (9)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} \quad (10)$$

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

式中, p 表示表面法向应力, Pa; $F_{M,i}$ 表示时均电磁体积分力, N/m³; k 表示速度脉动强度, m²/s²; ω 表示湍流涡团破碎速率, 1/s; μ_{eff} 表示有效黏度, kg/(m·s); μ 表示流体平均动力黏度, kg/(m·s); μ_t 表示湍流动力黏度,由剪切压力传输 SST (Shear-Stress Transport) k - ω 双方程湍流模型确定, kg/(m·s); σ_k 、 σ_ω 表示湍流普朗特数; F_1 表示模型切换算子; G_ω 表示比耗散率产生项; Y_k 表示湍流动能耗散项; Y_ω 表示比耗散率耗散项; D_ω 表示交叉扩散项; G_k 表示湍流动能产生项。

1.4 电磁场控制方程

电磁场控制方程通过麦克斯韦方程组和欧姆定律求解得出,求解方程如式(12)~(16)所示。

$$\nabla \cdot B_i = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \times H_i = J_i \quad (13)$$

$$\nabla \times E_i = -\frac{\partial B_i}{\partial t} \quad (14)$$

$$J_i = \sigma (E_i + v_i \times B_i) \quad (15)$$

$$F_{M,i} = \frac{1}{2} Re (J_i \times B_i^*) \quad (16)$$

式中, B_i 表示磁感应强度, T; H_i 表示磁场强度, A/m; J_i 表示电流密度, A/m²; E_i 表示电场强度, V/m; Re 表

示复数的实部; B_i^* 表示 B_i 的共轭复数。

1.5 边界条件

浸入式水口顶端界面定义为质量动量输入边界, 采用速度入口边界条件, 入口速度根据质量守恒与拉坯速度求解; 计算域底端对应结晶器出口, 采用质量流量出口边界, 该边界条件通过动态调整出口通量来维持计算域内质量守恒; 结晶器内上液面为钢液自由表面, 定义为对称边界, 满足切向应力平衡与法向零通量条件; 水口及结晶器壁面采用无滑移边界, 并施加电绝缘约束; 近壁区流动通过 SST $k-\omega$ 双方程湍流模型的自动壁面函数法处理^[19]。

1.6 模型验证

基于作者前期构建的板坯电磁冶金多物理场耦合三维稳态数学模型开展数值模拟研究, 该模型的控制方程、边界条件及基本假设通过 CFD 求解器已完成数值离散与迭代求解。由于数学模型、网格无关性验证及试验对比已经在前期研究中进行了系统阐述并经试验验证有效, 因此仅针对具体工况进行了参数化应用与模拟, 不再重复模型有效性验证步骤^[20-21]。

2 几何模型

2.1 板坯连铸结晶器几何模型

板坯连铸结晶器的模型如图 1 所示。为确保结

晶器多场耦合数值模拟的收敛稳定性与网格质量的可靠性, 模型采用拓扑结构化的六面体网格对结晶器区域进行离散化处理。同时, 为提高计算精度, 在靠近结晶器壁面和渣金界面的关键区域, 进行了网格加密处理, 如图 1(a) 所示。此外, 为了更好地观察结晶器内部钢液的流动状态, 研究将整个结晶器区域作为计算域进行分析, 以确保模拟结果的准确性。其中, 渣金界面位置、浸入式水口的尺寸和位置等关键参数, 如图 1(b) 所示。计算过程所涉及的主要参数见表 1。

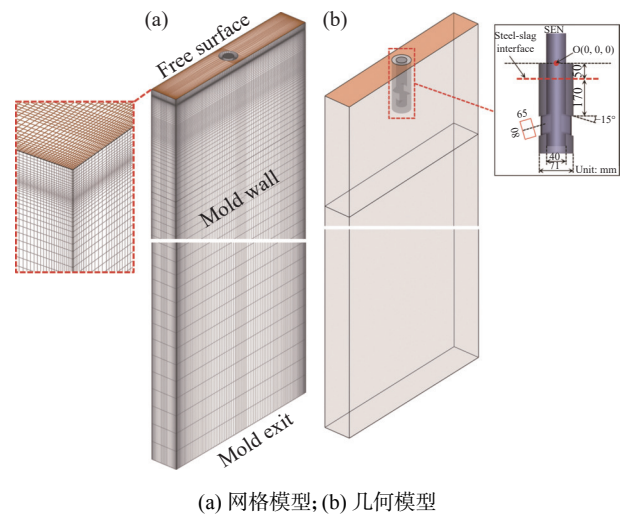


图 1 板坯连铸结晶器模型示意

Fig. 1 Schematic model of slab continuous casting mold

表 1 板坯结晶器计算参数

Slab cross section/mm × mm	Mold effective height/mm	Computational domain/mm	SEN exit cross section/mm
1 450×230	800	4 000	65×80
SEN depth/mm	Nozzle cavity/mm	Casting speed/(m·min ⁻¹)	Steel density/(kg·m ⁻³)
170	80	1.8	7 020
Steel viscosity/(Pa·s)	Steel conductivity/(S·m ⁻¹)	Steel permeability/(H·m ⁻¹)	Liquid steel density/(kg·m ⁻³)
0.006 2	7.14×10^5	1.26×10^6	3 500
Surface tension/(N·m ⁻¹)	Traveling wave magnetic field current/A	Traveling wave magnetic field frequency/Hz	Direct current magnetic field/A
1.2	600	3	1 350

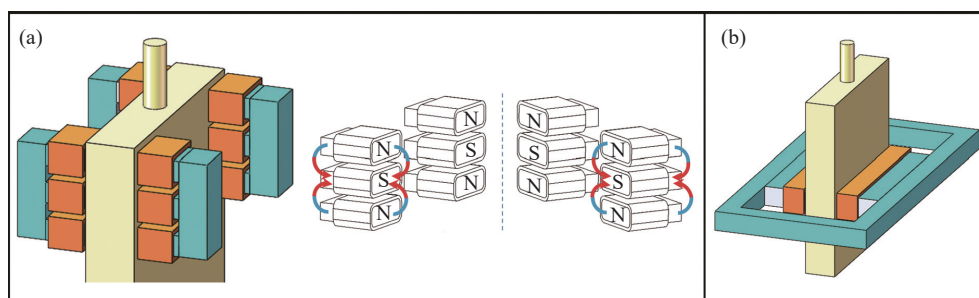
2.2 电磁控流装置几何模型

立式行波磁场控流装置和全幅一段电磁制动控流装置如图 2 所示。其中, 立式行波磁场装置配置有四组竖直安装于结晶器窄侧附近的直线搅拌器, 且每个直线搅拌器采用三相低频独立电源馈电, 可激发产生沿结晶器高度方向行进的行波磁场, 以覆盖结晶器上回流区、射流冲击区与弯月面区三个关

键区域。如图 2(a) 所示, 立式行波磁场控流装置对磁场方向及相应洛伦兹力方向可实现灵活调控, 通过改变行波磁场的行进方向, 可以产生一个方向可控的洛伦兹力作用于钢液。特别地, 当行波磁场向下行进时, 会产生一个向下的洛伦兹力, 可有效抑制液面波动、稳定流场。不同于立式行波磁场装置, 全幅一段电磁制动装置主要包括一对水平磁极、励

磁绕组及磁轭结构,其中水平磁极沿结晶器宽面方向布置,并位于浸入式水口出口下方区域,与宽面保

持平行。全幅一段电磁制动装置可激发产生垂直于结晶器宽面的稳恒磁场,如图 2(b) 所示。



(a) 立式行波磁场控流装置; (b) 全幅一段电磁制动控流装置

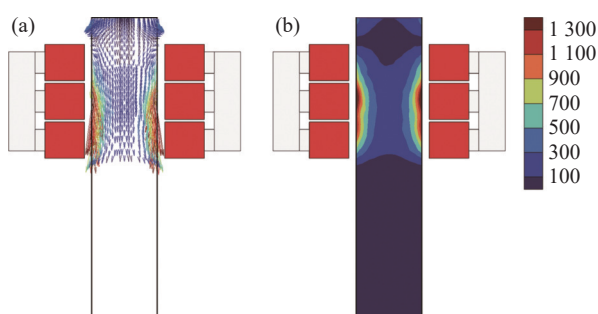
图 2 立式行波磁场控流装置和全幅一段电磁制动控流装置几何模型示意

Fig. 2 Schematic diagram of the geometric model for a vertical traveling wave magnetic field flow control device and a Ruler-EMBr flow control device

3 结果与讨论

3.1 立式行波磁场作用下洛伦兹力分布特性分析

图 3 为立式行波磁场控流装置中直线搅拌器轴向中心截面的洛伦兹力分布。由图 3 可见,洛伦兹力在磁场区域内呈现显著的矢量方向性与梯度分布特征。在磁场作用区,洛伦兹力矢量密集且方向趋于一致,整体呈垂直向下的矢量场,其作用方向与上回流钢液的流动方向相反,表明在该区域内洛伦兹力作用显著且具有较强的集中效应,上回流钢液的流动能够得到有效抑制。此外,在直线搅拌器中心区域,洛伦兹力达到最大值,而向边缘区域逐渐减弱,这种空间梯度分布对上回流钢液起到集中控制效果。



(a) 洛伦兹力矢量分布; (b) 洛伦兹力云图分布

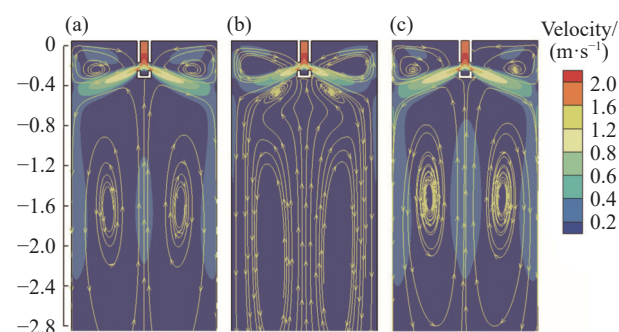
图 3 结晶器内洛伦兹力分布

Fig. 3 Distribution of Lorentz force in the mold

3.2 板坯连铸结晶器内钢液流动行为分析

图 4 为无磁场、全幅一段直流磁场及立式行波磁场作用下结晶器宽面中心截面钢液速度场云图和流线分布。由图 4 可知,无磁场作用时,钢液从浸入式水口出口流出后,以较高速度向结晶器窄面冲击,

随后在水口侧孔两侧形成流动强度较高的上、下双环流,加剧了金属液面不稳定性及卷渣风险。施加全幅一段直流磁场后,水口出流两侧钢液进入水口下方磁场区域时,受洛伦兹力的作用而减速,同时钢液主流股下方出现局部回流区。然而,在水平磁极的作用下,磁场对钢液主流股的抑制力,通过流体连续性条件转化为上回流区的动能增加,导致水口出流钢液主流股的末端逐渐向上偏斜,促使上回流更易向自由液面扩展,而结晶器上部流场难以有效调控。相比之下,施加立式行波磁场后,其产生的定向电磁力可显著抑制上回流钢液对结晶器自由液面的冲击,使得结晶器内上回流区域与弯月面附近区域的钢液流动强度减弱。



(a) 无磁场; (b) 全幅一段水平直流磁场; (c) 立式行波磁场

图 4 结晶器中心截面钢液速度分布

Fig. 4 Distribution of molten steel velocity in the central section of wide face in the mold

图 5 为无磁场、全幅一段直流磁场及立式行波磁场作用下结晶器内钢液流速高于 0.2 m/s 的等值面分布示意。由图 5 可知,相较于无磁场和水平直流磁场情况,施加立式行波磁场后,结晶器内上回流区钢液的流动强度显著衰减,同时上回流区钢液对

结晶器宽面的冲击减弱。这一现象表明,立式行波磁场产生的定向电磁力能够有效抑制上回流钢液在结晶器宽面区域的湍流扰动与速度梯度,从而降低坯壳因高速钢液冲击而导致宽面坯壳局部变薄的风险。可见,施加立式行波磁场能够实现对结晶器内上回流区钢液扰动的主动调控,从而优化结晶器内钢液流动稳定性。

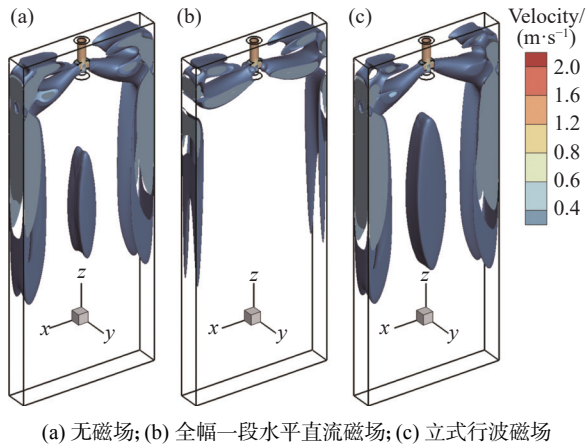


图5 结晶器内钢液速度等值面分布

Fig. 5 Iso-surface distribution of molten steel velocity in the mold

图6为无磁场、全幅一段直流磁场及立式行波磁场作用下,结晶器钢液表面速度分布云图。由图6可知,与无磁场作用时相比,采用全幅一段直流磁场后,其水平磁极产生的电磁力不能显著改善上回流区内钢液的流体动力学特性,结晶器钢液表面仍保持较高的流速分布,流动强度无明显减弱。相比之下,采用立式行波磁场时,结晶器钢液表面的流动强度显著减弱,尤其在弯月面附近区域,钢液流速呈现明显下降趋势。

3.3 板坯连铸结晶器内渣金界面两相行为分析

图7为钢液体积分数 ϕ 为0.5,渣金界面波动时间为120 s时,无磁场、全幅一段直流磁场及立式行波磁场作用下结晶器内渣金界面中心线上钢液速度和钢液运动湍动能强度结果。由图7可知,与无磁场作用时相比,采用全幅一段直流磁场后,当水平磁极的电流强度为1350 A时,结晶器内渣金界面钢液流速最大值由0.21 m/s降低至0.20 m/s,降幅仅为4.8%。同时,钢液湍动能最大值由 $0.026 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 降低至 $0.019 \text{ m}^2/\text{s}^2$,降幅为26.9%。相比之下,采用立式行波磁场后,当直线搅拌器施加的电流强度仅为600 A,其电流值低于全幅一段直流磁场所需电流值的45%时,渣金界面钢液湍动能最大值降低至 $0.016 \text{ m}^2/\text{s}^2$,降幅达到38.5%。与之相对应的,结晶

器内渣金界面钢液流速最大值显著降低至0.16 m/s,降幅达到23.8%。这一结果表明,施加立式行波磁场的流速降低效果约为全幅一段直流磁场的5倍。可见,立式行波磁场控流装置不仅能够弥补全幅一段直流磁场对结晶器内上回流区钢液控流不足的局限性,而更为重要的是,能以更低能耗实现更高效的钢液流动控制,其产生的定向电磁力能够更有效地抑制上回流区钢液流动,降低钢液表面流速,防止表面卷渣。

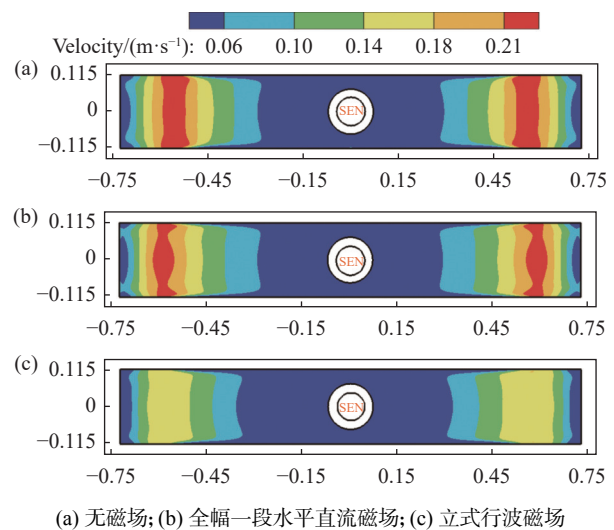


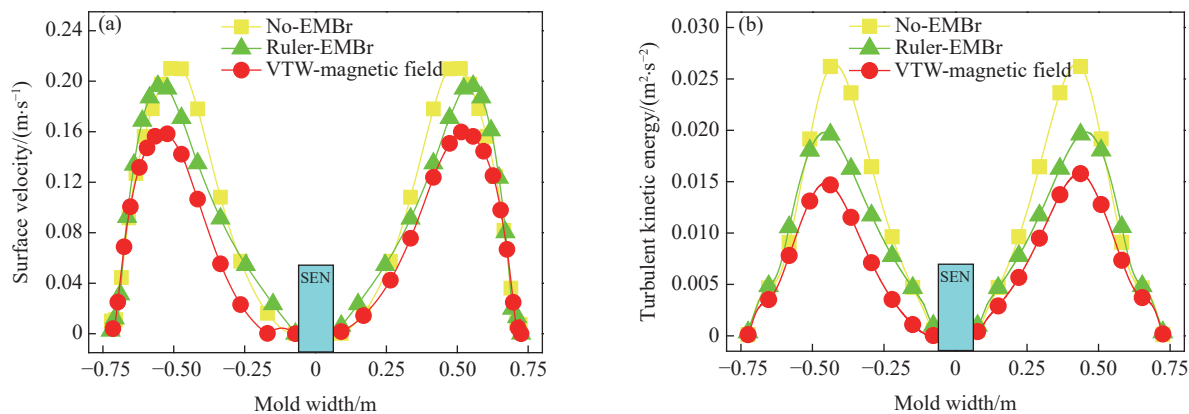
图6 结晶器渣金界面处钢液速度分布

Fig. 6 Steel-slag interface velocity distribution of molten steel in the mold

图8、9分别为钢液体积分数 ϕ 为0.5,渣金界面波动时间为120 s时,无磁场、全幅一段直流磁场及立式行波磁场作用下结晶器内渣金界面波动特性分布和界面中心线上波高变化趋势图。由图8、9可知,结晶器内渣金界面呈现显著波谷特征,依据其几何特征可划分为迎谷区、背谷区与近水平区。其中,迎谷区自结晶器窄面边部延伸至界面波峰位置,背谷区覆盖波峰至波谷区域,而近水平区则从波谷延伸至结晶器宽度中心。无磁场作用时,由于结晶器内上回流钢液的流动强度较大,界面迎谷区的渣金界面波动剧烈,界面波峰与波谷间的最大高度值达到22.3 mm。与无磁场时相比,采用全幅一段直流磁场后,当水平磁极电流强度为1350 A时,位于界面水平区的渣金界面波动平稳,界面波峰与波谷间的最大高度值,即界面波动最高处与界面波动最低处的高度值降低至18.6 mm,降幅达到16.6%。相比之下,采用立式行波磁场后,其直线搅拌器施加的电流强度仅为全幅一段直流磁

场所需电流值的 45% 时, 界面波峰与波谷间的最大高度值, 即界面波动最高处与界面波动最低处的高度值显著降低至 13.9 mm, 降幅为 37.7%。可见, 相较于全幅一段直流磁场装置, 采用立式行波磁场

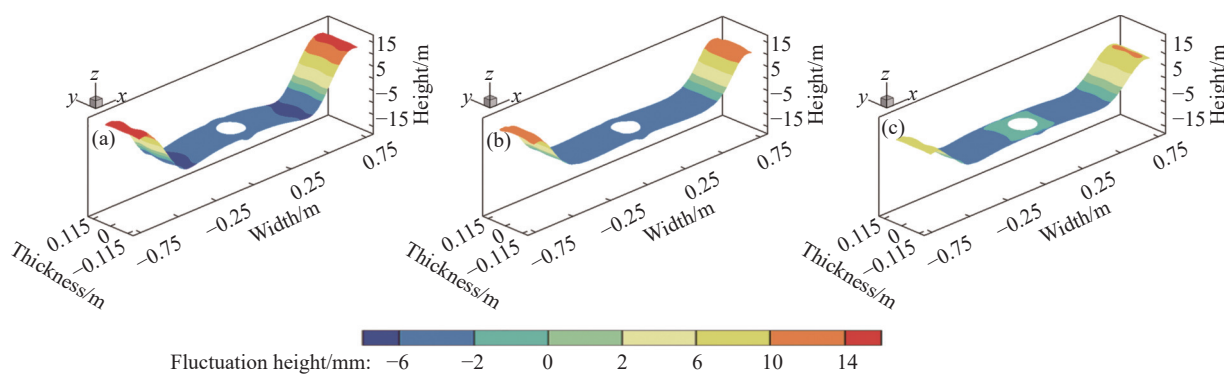
装置能以更低能耗实现对结晶器内上回流区钢液流动更为有效的控制, 其产生的定向电磁力使得渣金界面波动平稳, 钢液表面夹杂物卷入的风险显著减小。



(a) 钢液表面速度; (b) 钢液运动湍动能

图 7 结晶器钢液表面流速分布和湍动能强度分布

Fig. 7 Distribution of surface velocity and turbulent kinetic energy of molten steel in the mold



(a) 无磁场; (b) 全幅一段水平直流磁场; (c) 立式行波磁场

图 8 结晶器内渣金界面三维波动特性分布

Fig. 8 Distribution of 3-D fluctuation characteristics of steel-slag interface fluctuation in the mold

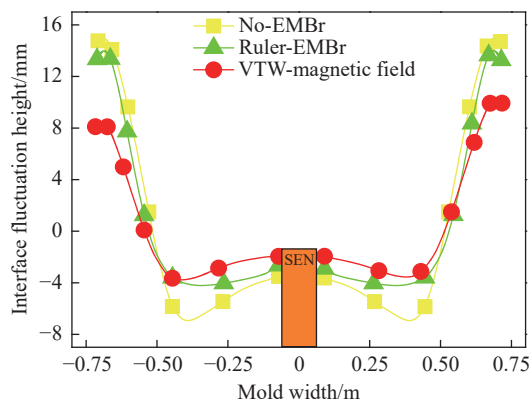


图 9 结晶器中心截面处渣金界面波动高度

Fig. 9 Steel-slag interface fluctuation height in the central section of wide surface in the mold

3.4 定量评价结晶器内渣金界面动力学行为

3.4.1 渣金界面整体平均波动高度

在连铸过程中, 渣金界面动力学行为的表征是优化工艺参数、提高铸坯质量的关键环节。以往研究中多采用定性观测方法, 主要通过渣金界面特征点的局部波动或者结晶器宽、窄面的最大波动幅值来描述界面动态特性^[22]。然而, 此种方法在表征局部波动数据时, 易受测量误差和瞬时扰动的影响, 难以反映界面整体行为的规律性。不仅如此, 最大波动幅值仅能表征极端工况下的界面稳定性, 无法全面揭示电磁搅拌等外部干预对界面行为的系统性影响。针对上述问题, 笔者引入渣金界面整体平均波

动高度的量化表征方法。该方法通过构建三维流场-界面耦合模型,结合VOF界面捕捉技术,对渣金界面动力学行为进行全域追踪与统计分析。基于此,定义渣金界面整体平均波动高度 h 的数学表达式如式(17)所示^[14]。

$$h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z - z_0)^2}{n}} \quad (17)$$

式中, z 为每个网格单元至弯月面的距离,mm; z_0 为渣金界面初始状态的液面高度,mm。

3.4.2 速度均匀性指数

此外,为全面表征结晶器内渣金界面的速度分布特性,笔者在渣金界面整体平均波动高度表征方法的基础上,进一步引入速度均匀性指数作为补充评价指标。该指数通过对界面速度分布进行统计分析,能够量化其相对于平均速度的归一化离散程度,从而有效反映速度分布的空间均匀性。速度均匀性指数 γ 的数学表达式如式(18)~(19)所示^[14]。

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (|v_i - \bar{v}| \cdot A_i)}{2|\bar{v}| \cdot \sum_{i=1}^n A_i} \quad (18)$$

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i \cdot A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (19)$$

式中, v_i 为第 i 个网格面的速度分量,m/s; $\bar{v}$ 为速度分量的面积加权平均值,m/s; A_i 为第 i 个网格面的面积,m²; n 为截面网格面总数;速度均匀性指数 γ 越接近1,表明分布越均匀。

3.4.3 界面稳定性判据

在渣金界面动力学行为表征中,单一指标分析存在固有局限。整体平均波动高度虽能反映界面宏观形变,却难以解析流动结构演变。速度均匀性指数虽可量化流场分布特性,但对极端波动的敏感性不足。为此,在系统分析上述两个指标的基础上,提出组合指标关联式作为界面稳定性判据,通过耦合界面波动高度与速度均匀性指数,实现多物理场作用下的界面动力学行为全域评估。界面稳定性判据 S 的数学表达式如式(20)所示。

$$S = \frac{\gamma h_c}{h} \quad (20)$$

式中, S 为稳定性判据值,其判据值能够表征界面动态稳定性的无量纲指标,当 $S > 1$ 时表明界面稳定, $S < 1$ 时表明界面进入临界失稳区域; γ 为速度均匀性指数,能够表征量化界面流场速度分布的空间一致性; h_c 为界面维持稳定的最大允许波动幅值,结合连铸工艺实际设定 $h_c = 20$ mm,该阈值基于行业动态预警标准; h 为渣金界面整体平均波动高度,能够反映渣金界面瞬时波动幅值的统计均值,是评估界面形变的核心参数。

3.4.4 对比评价立式行波磁场对结晶器内渣金界面动力学行为的影响

图10为无磁场、全幅一段直流磁场及立式行波磁场作用下,结晶器内渣金界面动力学行为差异情况。图中 A 、 B 和 C 分别代表结晶器内渣金界面处最大波高、钢液最大流速以及钢液最大湍动能,三者共同反映了界面流动的动态特性。由图10可见,三角图的区域面积定量表征了不同磁场条件下结晶器内渣金界面处钢液流动特性受到的影响程度。在无磁场条件下,渣金界面处钢液的流动剧烈且不稳定。相比之下,在全幅一段直流磁场条件下,渣金界面处钢液流动特性的影响程度有所降低。然而,与上述两种条件相比,立式行波磁场对渣金界面处钢液流动的影响最为显著。具体而言,立式行波磁场作用下, A 、 B 和 C 对应数据点所围成的区域面积最小,这一结果表明施加立式行波磁场可显著提高结晶器内渣金界面动力学行为的稳定性。

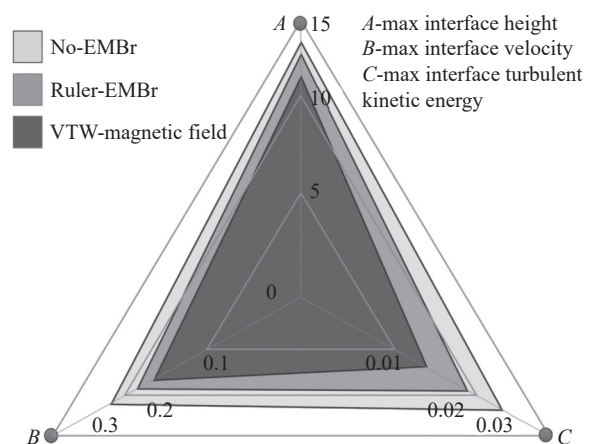


图10 不同磁场作用下结晶器内渣金界面动力学行为比较
Fig. 10 Comparison of the dynamic behavior of steel-slag interface in the mold under different magnetic field conditions

图 11 为无磁场、全幅一段直流磁场及立式行波磁场作用下,结晶器内渣金界面整体平均波动高度对比及其分布比例。由图 11 可见,渣金界面的平均波动高度呈现出显著的下降趋势。在无磁场条件下的渣金界面的平均波动高度最大。同时,统计得出,在不同磁场条件下,渣金界面平均波动高度的分布比例存在明显差异,其中,无磁场条件下波动高度占比为 40.56%,而全幅一段水平直流磁场和立式行波磁场条件下波动高度占比分别为 34.68% 和 24.76%。

结合图 8、9 中对结晶器内渣金界面波动特性分布的分析,已表明立式行波磁场能够更有效地抑制界面扰动。而通过图 11 中渣金界面整体平均波动高度及其分布比例的定量结果,进一步从全局统计的角度验证并强化了这一结论。

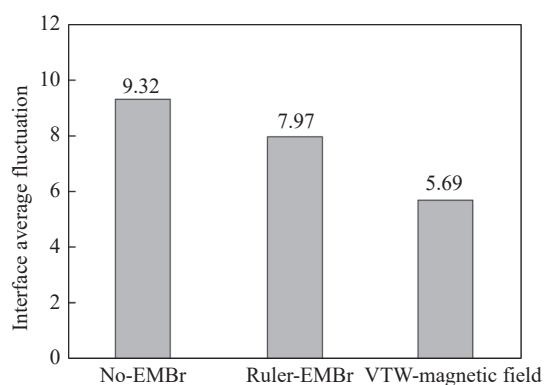


图 11 结晶器内渣金界面整体平均波动高度

Fig. 11 Average vertical displacement fluctuation of the steel-slag interface in the mold

图 12 为不同磁场条件下结晶器内渣金界面速度均匀性指数分布情况。由图 12 可见,在全幅一段水平直流磁场条件下,该指数较高,立式行波磁场条件的效果则与无磁场条件相近,说明全幅一段水平直流磁场在提高结晶器内渣金界面速度均匀性方面具有优势。

综合图 11、12 的结果,全幅一段水平直流磁场和立式行波磁场在结晶器内渣金界面的控制中表现出不同的优势。全幅一段水平直流磁场通过产生均匀的电磁力,可减少结晶器内部钢液的流动畸变,进而提高渣金界面钢液流动的均匀性,但其对渣金界面的钢液流动控制效果并不显著。相较而言,立式行波磁场产生的定向电磁力可能诱发结晶器局部区域的钢液流动梯度加剧,导致界面钢液

流动的均匀性略有降低,但其在局部区域产生较强的扰动抑制效果,可显著降低渣金界面波动和界面钢液流速。

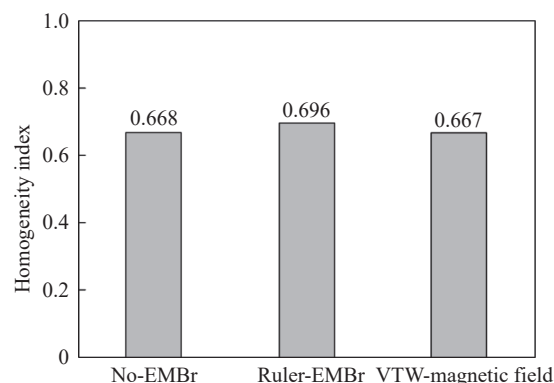


图 12 结晶器内渣金界面速度均匀性指数

Fig. 12 Velocity distribution uniformity index across the steel-slag interface in the mold

图 13 为不同磁场条件下结晶器内渣金界面稳定性评价结果。由图 13 可见,无磁场、全幅一段水平直流磁场和立式行波磁场条件下的稳定性判据值呈现显著上升趋势,这表明立式行波磁场在提高渣金界面稳定性方面具有明显优势。结合前面分析,尽管全幅一段水平直流磁场在提高渣金界面速度均匀性方面具备优势,但速度均匀性的提高并不直接等同于界面波动的减少和整体稳定性的提升。速度均匀性仅是界面稳定性中的一个方面,而渣金界面整体平均波动高度全局统计指标更加能全面反映界面的稳定性。立式行波磁场在速度均匀性方面与无磁场条件相近,但其在局部区域产生的定向电磁力能够显著抑制界面扰动,从而有效降低渣金界面的整体波动高度,最终在稳定性判据值上表现出最优结果。

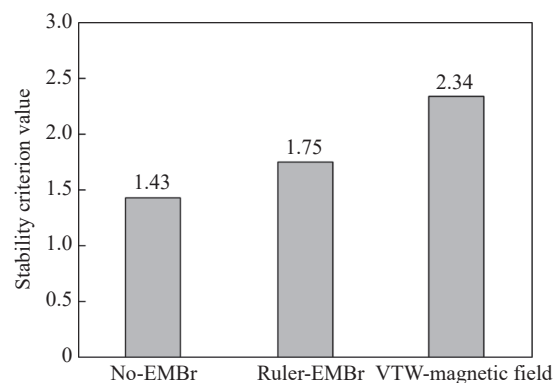


图 13 不同磁场作用下结晶器内渣金界面稳定性评价

Fig. 13 Stability evaluation of the steel-slag interface in the mold under different magnetic field conditions

因此,研究通过引入稳定性判据值作为量化指标,可以更准确地评估不同磁场条件下渣金界面的稳定性。这进一步验证了立式行波磁场在控制结晶器内渣金界面波动和提高界面稳定性方面的优势,而不仅仅依赖于速度均匀性的单一指标。综合来看,立式行波磁场是实现结晶器内渣金界面稳定控制的一种有效手段。

4 结论

1) 采用全幅一段直流磁场后,其水平磁极产生的电磁力对改善结晶器内上回流区钢液的流动特性不显著,结晶器钢液表面的流动强度仍然较高。与无磁场条件相比,当全幅一段电磁制动器施加的电流为 1 350 A 时,结晶器内渣金界面钢液流速的降低幅度仅为 4.8%。

2) 立式行波磁场具有显著控流优势,其产生的

定向电磁力能够有效抑制结晶器内上回流区钢液流动,从而有效降低钢液表面流速。相较于全幅一段电磁制动器,在施加 600 A 电流的条件下,立式行波磁场控流器的降速效果可达前者所产生直流磁场的 5 倍。

3) 立式行波磁场控流器能以更低能耗增强渣金界面的稳定性,并减少界面波动幅度。当施加的电流强度仅为全幅一段直流磁场所需电流值的 45% 时,界面波峰与波谷间的最大高度值显著降低至 13.9 mm,降低幅度达到 37.7%。

4) 引入稳定性判据值作为量化指标,可全面反映渣金界面的稳定性。相较于无磁场和水平直流磁场情况,立式行波磁场在控制结晶器内渣金界面波动和提高界面稳定性方面优势显著,其稳定性判据值达到 2.34。

参考文献

- [1] ZHU M Y. A study of transport phenomena and key technologies for high-speed continuous casting of steel[J]. Iron and Steel, 2021, 56(7): 1-12.
(朱苗勇. 高拉速连铸过程传输行为特征及关键技术探析[J]. 钢铁, 2021, 56(7): 1-12.)
- [2] ZHU M Y. Some considerations for new generation of high-efficiency continuous casting technology development[J]. Iron and Steel, 2019, 54(8): 21-36.
(朱苗勇. 新一代高效连铸技术发展思考[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 21-36.)
- [3] ZHU M Y, LOU W T. Numerical simulation of multiphase flow and reaction kinetics during steelmaking process[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2022, 22(1): 1-19.
(朱苗勇, 娄文涛. 炼钢过程多相流及其反应动力学数值模拟研究[J]. 材料与冶金学报, 2022, 22(1): 1-19.)
- [4] REN Z M, LEI Z S, LI C J, *et al.* New study and development on electromagnetic field technology in metallurgical processes[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 583-600.
(任忠鸣, 雷作胜, 李传军, 等. 电磁冶金技术研究新进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 583-600.)
- [5] XU L, PEI Q W, LI Y, *et al.* Investigation of multiphase transport behaviors in a FTSR mold during electromagnetic continuous casting process[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(4): 125-134.
(许琳, 裴群武, 李阳, 等. 电磁连铸过程 FTSR 结晶器多相传输行为的研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(4): 125-134.)
- [6] VAKHRUSHEV A, KARIMI-SIBAKI E, BOHACEK J, *et al.* Impact of submerged entry nozzle (SEN) immersion depth on meniscus flow in continuous casting mold under electromagnetic brake (EMBr)[J]. Metals, 2023, 13(3): 444-464.
- [7] CUI H N, SUN J K, ZHANG J S, *et al.* Large eddy simulation of novel EMBr effect on flow pattern in thin slab casting mold with multi-port SEN and ultra-high casting speed[J]. J. Manuf. Process., 2025, 133(3): 448-465.
- [8] WEI Z J, WANG T, FENG C, *et al.* Modeling and simulation of multi-phase and multi-physical fields for slab continuous casting mold under ruler electromagnetic braking[J]. Metall. Mater. Trans. B, 2024, 55(4): 2194-2208.
- [9] LIU Z Q, LI B K, XIAO L J, *et al.* Modeling progress of high-temperature melt multiphase flow in continuous casting mold[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(10): 1236-1252.
(刘中秋, 李宝宽, 肖丽俊, 等. 连铸结晶器内高温熔体多相流模型化研究进展[J]. 金属学报, 2022, 58(10): 1236-1252.)
- [10] LUO S, YANG Y W, WANG W L, *et al.* Development of electromagnetic flow control technology for high speed casting mold[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2023, 22(1): 1-22.
(罗森, 杨宇威, 王卫领, 等. 高拉速连铸结晶器电磁控流技术发展[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(1): 1-22.)
- [11] VILA A, LINDLBAUER F, ZHANG Z, *et al.* Simulation and optimization of electromagnetic stirring and braking in slab continuous casting mold[J]. Berg Huettenmaenn Monatsh, 2025, 170(1): 37-44.
- [12] XIAO H, WANG P, ZHU J L, *et al.* Effect of deceleration mode of traveling wave magnetic field on the liquid steel transportation behavior in the mold of slab casting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(18): 219-227.
(肖红, 王璞, 朱晶亮, 等. 行波磁场减速模式对板坯连铸结晶器内传输行为的影响[J]. 机械工程学报, 2023, 59(18): 219-227.)

- [13] HE J G, DENG A Y, XU X J, *et al.* Effect of electromagnetic stirring position on liquid steel flow and liquid level fluctuation in continuous casting mold for wide thick slab[J]. *Continuous Casting*, 2022, 4: 50-58.
(何建国, 邓安元, 许秀杰, 等. 电磁搅拌宽厚板结晶器内钢液流动和液面波动[J]. 连铸, 2022, 4: 50-58.)
- [14] XIE X X, LUO S, CHEN Y, *et al.* Effect of electromagnetic stirring on flow, solidification and liquid level fluctuations in slab mold[J]. *Continuous Casting*, 2025, 44(2): 7-14.
(解晓晓, 罗森, 陈耀, 等. 电磁搅拌对板坯结晶器内钢液流动、凝固和液面波动的影响[J]. 连铸, 2025, 44(2): 7-14.)
- [15] SUN X H, LI B, LU H B, *et al.* Steel slag interface behavior under multifunction electromagnetic driving in a continuous casting slab mold[J]. *Metals*, 2019, 9(9): 983-999.
- [16] LI B, LU H B, ZHONG Y B, *et al.* Numerical simulation for the influence of EMS position on fluid flow and inclusion removal in a slab continuous casting mold[J]. *ISIJ Int.*, 2020, 60(6): 1204-1212.
- [17] LIU G L, LU H B, LI B, *et al.* Influence of M-EMS on fluid flow and initial solidification in slab continuous casting[J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3681-3697.
- [18] XU L, PEI Q W, LI N, *et al.* Study on the effect of multi area controllable electromagnetic braking on behavior of non-uniform molten steel flow and steel-slag interface in the mold[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2025, 46(1): 112-123.
(许琳, 裴群武, 李楠, 等. 多区域独立可控电磁制动对结晶器内钢液非均匀流动与渣金界面行为影响的研究[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(1): 112-123.)
- [19] XU L, WANG E G, KARCHER C, *et al.* Numerical simulation of the effects of horizontal and vertical EMB on jet flow and mold level fluctuation in continuous casting[J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2018, 49(5): 2779-2793.
- [20] XU L, KARCHER C, WANG E G. Numerical simulation of melt flow, heat transfer and solidification in CSP continuous casting mold with vertical-combined electromagnetic braking[J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2023, 54(4): 1646-1664.
- [21] XU L, HAN Z F, KARCHER C, *et al.* Melt flow, heat transfer and solidification in a flexible thin slab continuous casting mold with vertical-combined electromagnetic braking[J]. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2024, 31(2): 401-415.
- [22] ZHANG A H, MA D Z, JIAN W W, *et al.* Numerical simulation of argon blowing behavior inside an independent adjustable combination electromagnetic brake mold[J]. *Continuous Casting*, 2024, 4: 38-46.
(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.)

编辑 邓淑惠

(上接第 53 页)

- [6] WANG N, LI X F, NIE L D, *et al.* High-precision vehicle energy consumption prediction using mutual information feature selection[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2024, 52(S1): 39-45.
(王宁, 李秀峰, 聂辽栋, 等. 基于 MI 特征选择的车辆能耗高精度预测方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(S1): 39-45.)
- [7] YAN X M, CHEN C, WANG N, *et al.* Prediction of desulfurization rate during LF refining process based on random search and AdaBoost model[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2023, 22(5): 430-436, 443.
(严旭梅, 陈超, 王楠, 等. 基于随机搜索算法和 AdaBoost 模型预测 LF 精炼过程脱硫率[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(5): 430-436, 443.)
- [8] FANG Y F, DAN B B, WU J W, *et al.* Method for predicting desulfurizer dosage based on ensemble learning[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2024, 47(5): 361-367.
(方一飞, 但斌斌, 吴经纬, 等. 基于集成学习的脱硫剂加入量预测方法[J]. 武汉科技大学学报, 2024, 47(5): 361-367.)
- [9] XU M, LEI H, HE J Y, *et al.* Predicting the endpoint steel temperature of RH refining using improved XGBoost[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2023, 22(5): 437-443.
(徐猛, 雷洪, 何江一, 等. 利用改进 XGBoost 预测 RH 精炼终点钢水温度[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(5): 437-443.)
- [10] GU T Y, GUO J S, LI Z X, *et al.* Detecting associations based on the multi-variable maximum information coefficient[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 54912-54922.
- [11] JU Y, SUN G Y, CHEN Q H, *et al.* A model combining convolutional neural network and LightGBM algorithm for ultra-short-term wind power forecasting[J]. *IEEE Access*, 2019: 28309-28318.
- [12] LI Y Z, DAI W, ZHANG W F. Bearing fault feature selection method based on weighted multidimensional feature fusion[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 19008-19025.
- [13] ZHANG S G, ZHOU T, SUN L, *et al.* ν -Support vector regression model based on Gauss-Laplace mixture noise characteristic for wind speed prediction[J]. *Entropy*, 2019, 21(11): 1056.

编辑 邓淑惠