

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2026.20240132

复合磁场下板坯连铸结晶器夹杂物颗粒的捕捉

曹平¹, 王长军¹, 李宝宽¹, 范正洁²

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘 要: 针对连铸坯凝固均匀性及表面缺陷控制问题, 本文建立了电磁搅拌和电磁制动复合磁场调控下的结晶器流动与凝固预测数学模型, 利用WALE(wall-adapting local eddy-viscosity)大涡模拟方法以及一种简化的夹杂物捕捉准则, 分析复合磁场调控对铸坯表面缺陷的控制机理. 研究表明: 夹杂物颗粒的捕捉位置主要出现在铸坯的外表层, 复合磁场下宽面和窄面的凝固壳厚度之差比无电磁调控时降低了4.59%, 复合磁场下夹杂物捕捉总量比无磁场时减少了47.21%. 研究表明, 电磁制动主要抑制凝固壳内夹杂物的捕捉, 电磁搅拌的核心作用是促进流动和凝固均匀性.

关键词: 夹杂物; 电磁制动; 电磁搅拌; 凝固均匀性; 连铸结晶器

中图分类号: TF 777.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2026)01-0138-07

Inclusion Particles Capture in Slab Continuous Casting Mold Under Composite Magnetic Fields

CAO Ping¹, WANG Chang-jun¹, LI Bao-kuan¹, FAN Zheng-jie²

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China. Corresponding author: LI Bao-kuan, E-mail: libk@smm.neu.edu.cn)

Abstract: In this paper, a mathematical model for predicting the flow and solidification of the mold under the control of the composite electromagnetic field of electromagnetic stirring and electromagnetic braking was established to address issues related to solidification homogeneity and surface defect control in continuous casting slabs. The wall-adapting local eddy-viscosity (WALE) large eddy simulation model, in conjunction with a simplified inclusion capture criterion, was employed to analyze the mechanism by which the composite electromagnetic field controlled surface defects in the cast slabs. The findings reveal that the capture locations of inclusions are mainly concentrated in the outer surface layer of the slabs; the difference between the thickness of the solidified shell in the wide and narrow surface under the composite magnetic field is reduced by 4.59% compared with that without electromagnetic field, and the total amount of inclusion capture under the composite magnetic field is reduced by 47.21% compared with that without electromagnetic field. It is found that electromagnetic braking inhibits the inclusion capture in the solidified shell, and the core role of electromagnetic stirring is to promote the flow and solidification homogeneity.

Key words: inclusion; electromagnetic braking; electromagnetic stirring; solidification homogeneity; continuous casting mold

随着钢铁工业的快速发展,市场对钢材质量的要求也越来越高.钢液中的夹杂物被凝固壳捕捉后会破坏金属基体的连续性,是影响钢材质量的重要因素.电磁场能够通过力效应和热效应影

响和控制结晶器中钢液的能量传递和流体运动以提高钢材质量^[1],在冶金领域应用广泛.其中,电磁制动能够减缓钢液的旋转^[2-3],改善结晶器流场的不对称^[4],降低板坯表面的夹杂物数量^[5].电

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51934002,52304348).

作者简介: 曹平(1999—),女,山东德州人,东北大学硕士研究生.

通信作者: 李宝宽, E-mail: libk@smm.neu.edu.cn.

磁搅拌能够改善结晶器内部温度场的均匀性^[6],减少运动到计算域深处的夹杂物数量^[7].

结晶器内钢液流动呈现多尺度、有结构、不规则的非稳态湍流流动^[8],钢液的流动直接影响铸坯的质量^[9-12].高温熔体的湍流流动又耦合了传热、传质、相变、电磁力、多相流等诸多过程,形成了复杂的非线性、非平衡多物理场^[13-14].连铸过程中常伴有水口吹氩,以起到防止水口堵塞、吸附夹杂物等作用^[15],但氩气泡若被凝固壳捕捉会使铸坯产生“铅笔管状”缺陷,且易与铝夹杂物一起构成更加严重的质量缺陷^[16-17].钢中的非金属夹杂物主要来自钢液的二次氧化、炉渣和保护渣的混入等,夹杂物被凝固壳捕捉会影响钢的塑性、韧性和疲劳寿命,对铸坯表面和内部质量造成不利影响^[8].Jin等^[18]通过数值模拟对比了夹杂物在2种捕捉条件下的模拟准确性:1)粒子接触到凝固前沿则视为被捕捉;2)粒子直径小于一次枝晶间距则能够运动到枝晶间距中被捕捉,粒子直径大于一次枝晶间距则通过分析受力判断其是否会被捕捉,后者与钉板测量结果吻合较好.

本文针对电磁制动和电磁搅拌复合磁场调控的板坯连铸过程,采用大涡模拟方法建立了流动-传热-夹杂物耦合的数学模型,对复合磁场下结晶器内钢液流动、传热、凝固,以及夹杂物捕捉情况进行了数值研究,采用了一种简化的凝固前沿夹杂物捕捉准则,预测了不同的磁场条件下铸坯内部气泡和夹杂物的运动、分布和捕捉情况,

为夹杂物的控制以及铸坯质量优化提供了理论依据和指导建议.

1 模型建立

1.1 物理模型

本文参照实际的板坯连铸机结构,构建了结晶器复合磁场物理模型,并将计算域离散成全六面体结构化网格.物理模型、网格细节及边界条件如图1所示.结晶器宽面和窄面通过UDF(user-defined function)程序设置为冷却边界,冷却模型参考 CON1D (one-dimensional conduction) 模型^[19].利用 DPM (discrete phase model) 模型模拟夹杂物的运动行为,固体类夹杂物的密度为 $2\ 700\text{ kg/m}^3$,粒子以 $4.74 \times 10^{-7}\text{ kg/s}$ 的速度注入,参照 Li 等^[20]的研究,粒径范围设置为 $0.003\sim 370\text{ mm}$.氩气密度为 $1.622\ 8\text{ kg/m}^3$,吹氩量为 10 L/min ,采用 Rosin-Rammler 方法来描述氩气泡的粒径分布,氩气泡的粒径范围参考刘中秋^[8]对气泡粒径的研究.夹杂物粒子均由入口面均匀入射,每隔 0.2 s 注入一次粒子.模拟钢种为超低碳钢,钢液物性参数如表1所示^[21].电磁制动采用局部电磁制动 (electromagnetic braking, EMB),在结晶器水口两侧分别安置2个方向相反的磁场作用区域.电磁搅拌 (electromagnetic stirring, EMS) 位置在结晶器渣金界面下部,采用6相交流电.详细参数见表2.

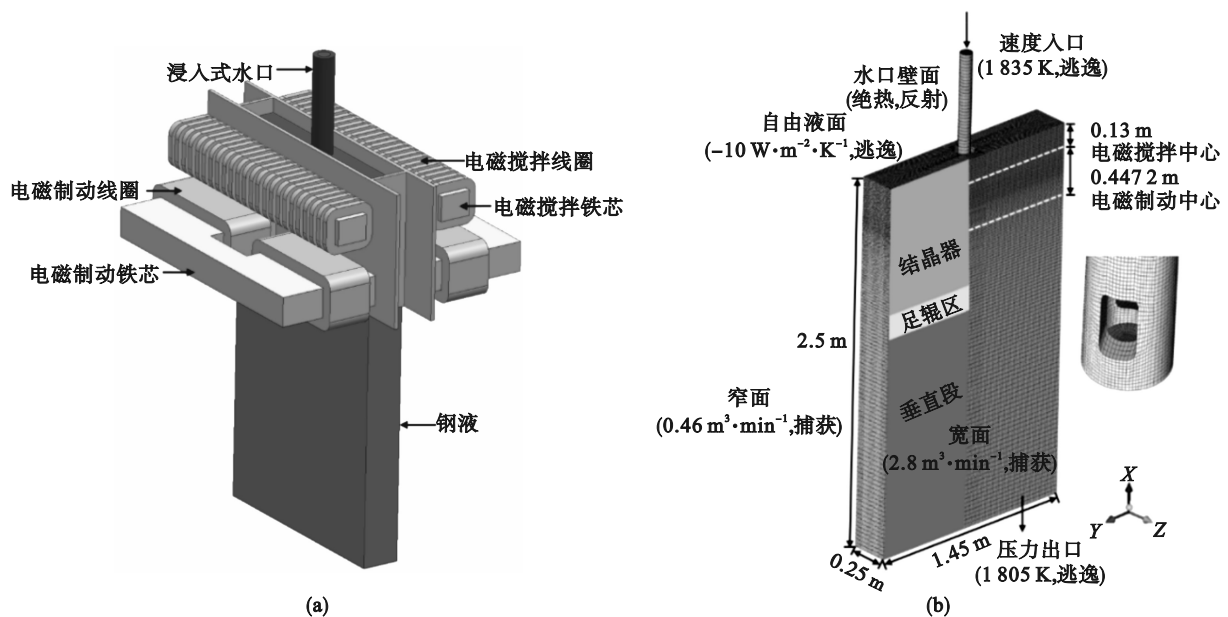


图1 物理模型、边界条件及网格细节

Fig. 1 Physical model, boundary conditions and mesh details

(a)—物理模型; (b)—边界条件及网格细节.

表 1 钢液的物性参数

Table 1 Physical property parameters of molten steel

物性参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	7 100
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	710
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	43
黏度/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.004 71
相变潜热/(J·kg ⁻¹)	270 000
电导率/(S·m ⁻¹)	714 000
固相线温度/K	1 760
液相线温度/K	1 787

表 2 主要尺寸及参数

Table 2 Main dimensions and parameters

参数	数值
结晶器尺寸/mm	1 450×250
结晶器工作高度/mm	800
结晶器延伸高度/mm	2 500
浸入式水口内径/mm	80
浸入式水口外径/mm	130
浸入式水口浸入深度/mm	211.5
浸入式水口出口尺寸/mm	80×65
浸入式水口倾角/(°)	-15
通钢量/(t·min ⁻¹)	4
吹氩量/(L·min ⁻¹)	10
结晶器宽面单面冷却水流量/(m ³ ·min ⁻¹)	2.8
结晶器窄面单面冷却水流量/(m ³ ·min ⁻¹)	0.46
电磁搅拌频率/Hz	4.5
电磁搅拌电流强度/A	600
电磁制动电流强度/A	500
电磁搅拌线圈匝数/匝	20
电磁制动线圈匝数/匝	100

1.2 数学模型

在保证关键物理过程准确的前提下,对数学模型作如下假设:1) 视钢液为不可压缩牛顿流体;2) 不考虑结晶器振动、锥度的影响;3) 忽略位移电流和趋肤效应以及磁场的冻结效应;4) 不考虑铸坯凝固收缩的影响;5) 忽略化学反应,认为气泡和夹杂物是惰性的球形颗粒;6) 颗粒之间的运动是独立的,不考虑其碰撞和聚合;7) 夹杂物在凝固前沿被捕捉后不再随液态钢液运动,即不考虑粒子被捕捉后再次被钢液带出。

采用大涡模拟的方法模拟结晶器内部的湍流运动,其连续性方程和动量方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\mathbf{U}) = -\nabla \frac{p}{\rho} +$$

$$\nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{U}) + \mathbf{S}_s + \mathbf{F}_{\text{EMS}} + \mathbf{F}_{\text{EMBr}}. \quad (2)$$

式中: ρ 为流体的密度,kg/m³; t 为时间,s; ∇ 为哈密顿算子; \mathbf{U} 为流体速度,m/s; p 为压力,Pa; ν 为运动黏度,m²/s; \mathbf{S}_s 为相间作用源项,m/s²; \mathbf{F}_{EMS} 为电磁搅拌产生的洛伦兹力,m/s²; \mathbf{F}_{EMBr} 为电磁制动产生的洛伦兹力,m/s²。

采用盒式滤波法,亚格子涡旋使用 Smagorinsky 模型,亚格子黏度表达式为

$$\nu_{\text{SGS}} = \rho (C_{\text{SGS}} \Delta)^2 \sqrt{\frac{1}{2} (\nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \bar{\mathbf{U}}^T) : (\nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \bar{\mathbf{U}}^T)}. \quad (3)$$

式中: $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ 为过滤尺寸; C_{SGS} 为 Smagorinsky 常数, $C_{\text{SGS}} = 0.1$; $\bar{\mathbf{U}}$ 为滤波速度,m/s。

采用电势法求解钢液流经静磁场产生的感应电流,电场强度可表示为

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (4)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度,V/m; φ 为标量电势,V; \mathbf{A} 为磁矢势,对于静电场 $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ 可以忽略,则有

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (5)$$

欧姆定律为

$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}). \quad (6)$$

式中: \mathbf{J} 为电流密度,A/m²; \mathbf{B} 为磁感应强度,T; σ 为电导率,S·m⁻¹。

对于静磁场,电流连续方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0; \quad (7)$$

电势方程为

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B}); \quad (8)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算子。

静磁场产生的洛伦兹力可以表示为

$$\mathbf{F}_{\text{EMBr}} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}; \quad (9)$$

交变磁场产生的洛伦兹力为

$$\mathbf{F}_{\text{EMS}} = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}^*); \quad (10)$$

焦耳热 Q 为

$$Q = \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}}{\sigma}. \quad (11)$$

钢液的凝固熔化采用焓-多孔介质法(enthalpy porosity, EP),材料的总焓是显焓和潜焓总和:

$$H = h + \beta L. \quad (12)$$

式中: H 为材料总焓,J/kg; h 为材料显焓,J/kg; β 为液相率; L 为相变潜热,J/kg. 显焓 h 为

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT. \quad (13)$$

式中: h_{ref} 为参考焓, J/kg; T_{ref} 为参考温度, K; c_p 为比定压热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

液相率 β 的大小遵循杠杆定律, 定义式为

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s, \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}, & T_s \leq T \leq T_L, \\ 1, & T > T_L. \end{cases} \quad (14)$$

式中: T_s 为固相线温度, K; T_L 为液相区温度, K.

最终的能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho UH) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}}{\sigma}. \quad (15)$$

式中: k 为热扩散系数, $W/(m \cdot K)$.

在大涡模拟控制方程中, 孔隙率降低导致的动量损失形式为

$$\mathbf{S}_s = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} (\bar{\mathbf{U}} - \mathbf{U}_p). \quad (16)$$

式中: ε 是一个数值很小的常数, 其作用是防止分母为 0; A_{mush} 是糊状区系数, 本模型中大小为 $6.75 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; \mathbf{U}_p 是铸坯拉速, m/s.

夹杂物运动控制方程如下:

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_{VM}. \quad (17)$$

式中: m_p 为粒子质量; \mathbf{u}_p 为粒子运动速度; $\mathbf{F}_G, \mathbf{F}_B, \mathbf{F}_p, \mathbf{F}_D, \mathbf{F}_L, \mathbf{F}_{VM}$ 分别为重力、浮力、压力梯度力、曳力、侧升力、虚拟质量力. 粒子在凝固前沿的受力如图 2 所示.

对于气泡和夹杂物在凝固前沿的捕捉, 通过 UDF 开发了一种气泡和夹杂物粒子捕捉准则, 将 $0.3 < \text{液相率} < 0.6$ 的区域视为凝固前沿, 当运动到凝固前沿处的粒子直径大于一次枝晶间距与枝晶等效直径之差时, 视为粒子被凝固前沿捕捉, 如式 (18) 所示:

$$d_p > (\lambda_1 - d_c). \quad (18)$$

式中: d_p 为粒子直径, m; λ_1 为一次枝晶间距, m; d_c 为枝晶等效直径, m. 枝晶间距与液相率有关, 液相率越小则枝晶间距越小, 一次枝晶间距一般为常数, 与现场实际的钢种以及连铸过程有关.

1.3 模型验证

电磁制动模型及凝固模型的计算准确性已在作者之前的研究中有所介绍^[22]. 为验证电磁搅拌模型的准确性和实用性, 将结晶器内特定区域的磁感应强度的模拟计算结果与现场实测值进行了对比. 磁感应强度的测量位置为电磁搅拌线圈中心平面上距离内弧侧宽面 15 mm 的直线, 结果如图 3 所示, 预测值和实测值分布趋势一致, 可以验证电磁搅拌模型的准确性.

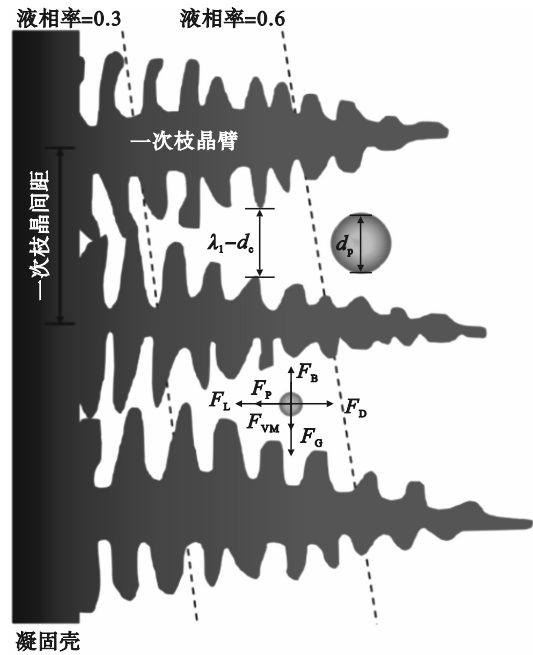


图 2 粒子在凝固前沿的受力

Fig. 2 Force on particles in solidification front

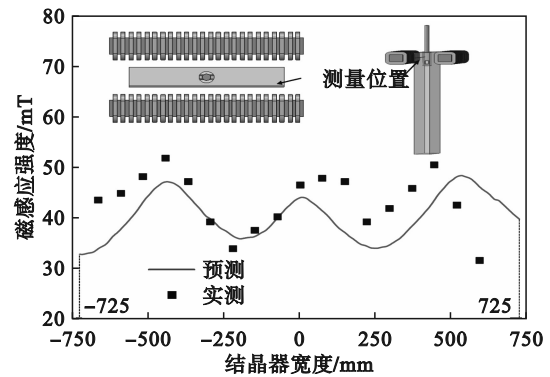


图 3 磁感应强度分布对比

Fig. 3 Comparison of magnetic flux density distributions

2 结果与讨论

2.1 速度分布

如图 4 所示, 无外加磁场时, 水口偏流现象较明显, 结晶器内流场呈现明显的不对称双辊流形态. 与无外加磁场时相比, 电磁制动明显改善了流场的不对称性, 下旋流的钢液速度得到有效减弱, 钢液射流对凝固前沿的冲击强度和冲击深度均降低; 电磁搅拌使流场的不对称性得到一定程度的改善, 速度分布更加均匀, 钢液射流对凝固前沿的冲击强度和冲击深度均降低.

2.2 凝固壳厚度

如图 5 所示, 凝固壳厚度均沿着拉坯方向逐

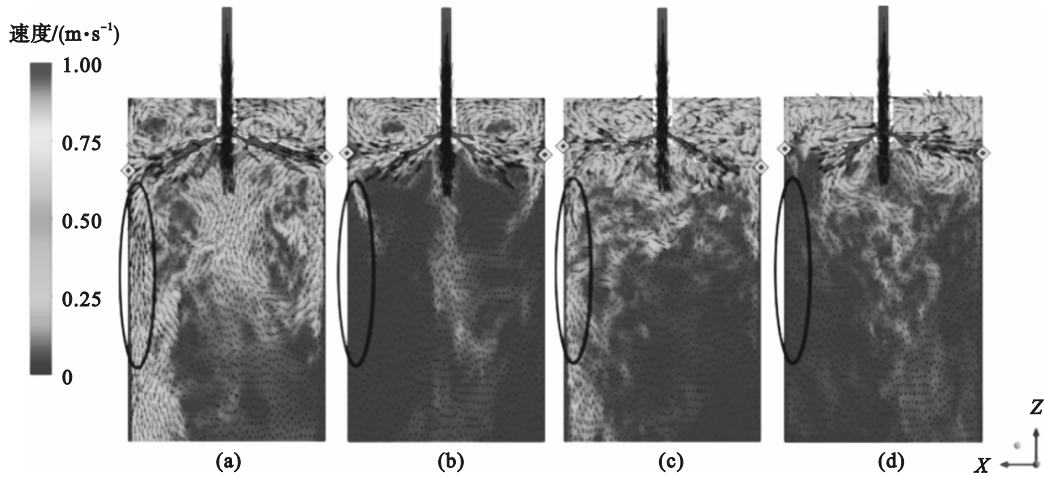


图4 宽面中心速度分布

Fig. 4 Velocity distribution at center of wide surface

(a)—无磁场; (b)—电磁制动; (c)—电磁搅拌; (d)—复合磁场.

渐增厚,由于二冷区冷却水分布的差别以及辊轮带走热量的差别,在结晶器出口处宽面比窄面厚.由于结晶器流场的不稳定性,沿着拉坯方向钢坯凝固壳的生长呈现波动变化.与无磁场时相比,电磁制动使结晶器内钢液对凝固壳的冲击作用减弱,因此凝固壳相对较厚.电磁搅拌使结晶

器内部的温度分布变得更加均匀,因此坯壳的整体厚度更为均匀,又由于电磁力的冲刷重熔,凝固壳厚度相对较薄.结晶器出口处的凝固壳厚度测量数据如表3所示,复合磁场下宽面和窄面的凝固壳厚度之差与不施加磁场时降低了4.59%.

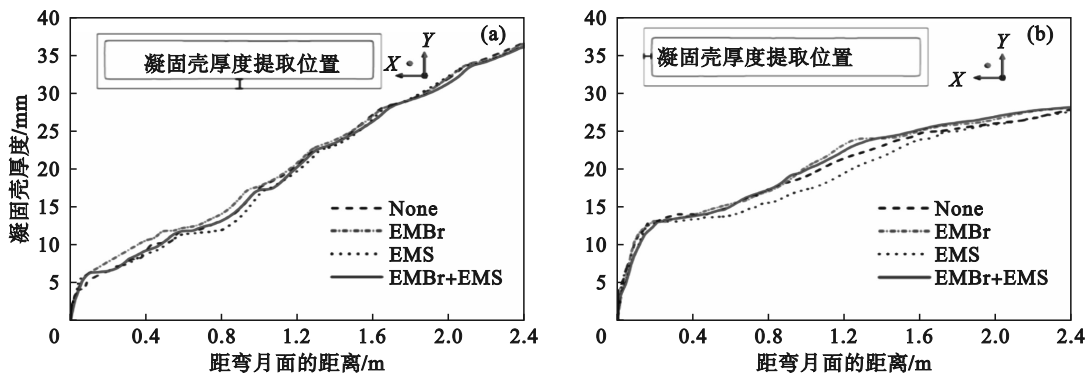


图5 凝固壳厚度对比

Fig. 5 Comparison of solidified shell thicknesses

(a)—宽面; (b)—窄面.

表3 结晶器出口凝固壳厚度

Table 3 Solidified shell thickness at outlet of mold mm

条件	宽面出口凝固壳厚度	窄面出口凝固壳厚度	宽与窄面厚度差值
无磁场	37.77	27.97	9.80
电磁制动	37.97	28.28	9.69
电磁搅拌	37.01	27.67	9.34
复合磁场	37.50	28.15	9.35

2.3 夹杂物捕捉位置分布

如图6和图7所示,夹杂物捕捉位置呈现点带状分布规律,外加制动磁场后,固体类夹杂物

的捕捉位置大多位于1/4宽面处,夹杂物捕捉数量明显减少,电磁搅拌并没有明显抑制夹杂物捕捉数量,复合磁场相对于无外加磁场来说,夹杂物捕捉数量显著降低,捕捉位置更靠近窄面.在厚度方向上间隔10 mm的长条形区域内捕捉的夹杂物数量占有所有工况总捕捉量的比值见图8.结晶器内固体夹杂物和气泡类夹杂物的捕捉数量在厚度方向上均呈现由外向内逐渐减小的趋势.由于氩气泡较易上浮,气泡类夹杂物的捕捉数量远小于固体类夹杂物.电磁制动能够显著降低凝固壳内部的夹杂物数量.经统计,复合磁场下固体夹杂物和氩气泡的捕捉量比不施加电磁

场时分别减少了 48.55% 和 38.93%, 夹杂物捕捉 总量减少了 47.21%.

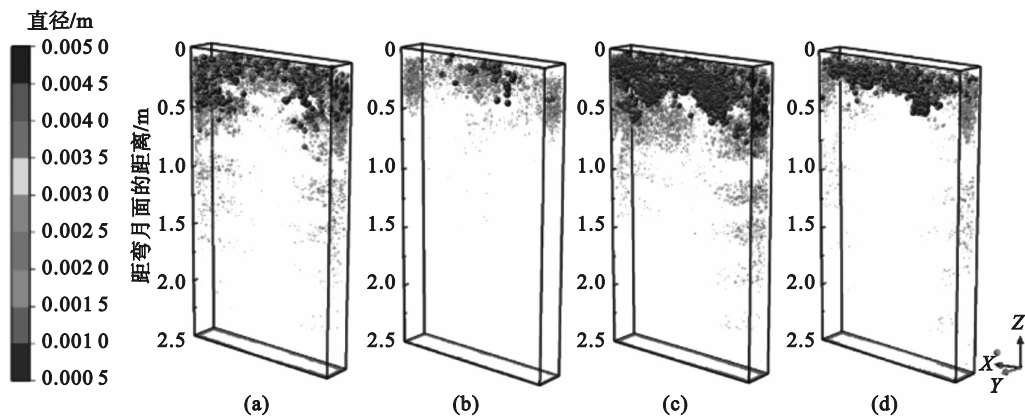


图 6 气泡类夹杂物捕捉位置空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of capture locations of bubble inclusions

(a)一无磁场; (b)一电磁制动; (c)一电磁搅拌; (d)一复合磁场.

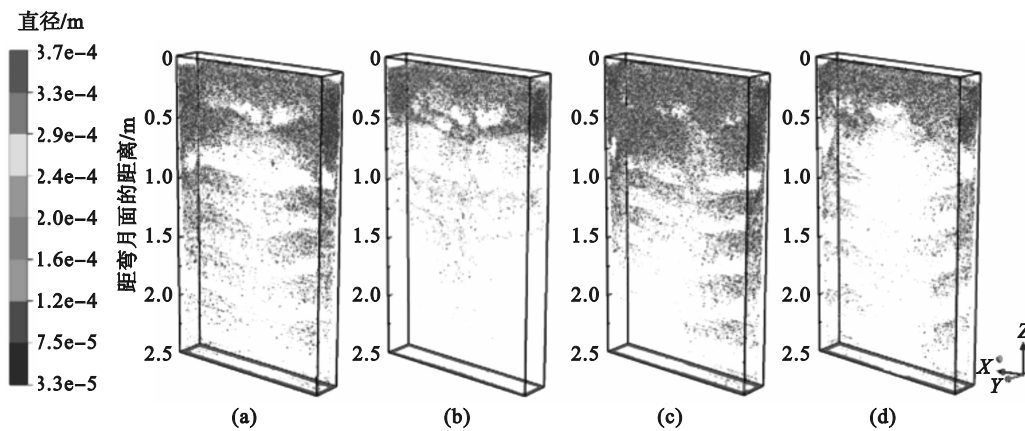


图 7 固体类夹杂物捕捉位置空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of capture locations of solid inclusions

(a)一无磁场; (b)一电磁制动; (c)一电磁搅拌; (d)一复合磁场.

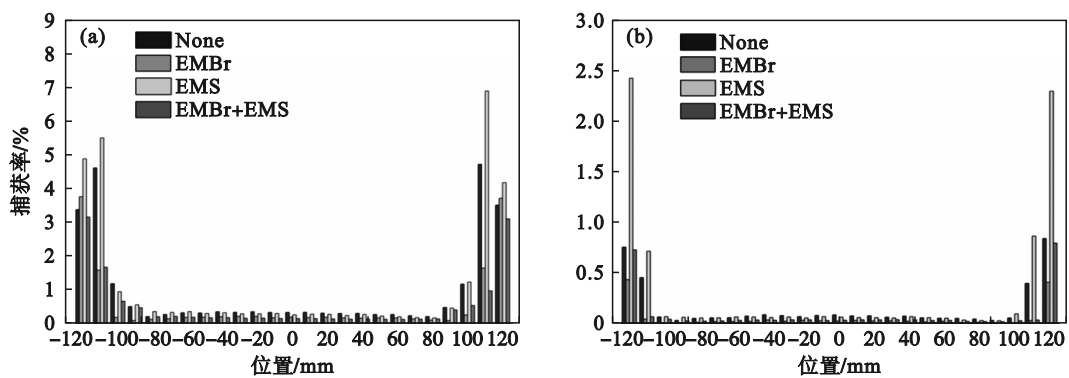


图 8 厚度方向夹杂物捕捉统计

Fig. 8 Statistics on inclusion capture along thickness direction

(a)一固体类夹杂物; (b)一气泡类夹杂物.

3 结 论

1) 电磁制动能够抑制钢液流动,有助于初生凝固壳的生长;电磁搅拌使结晶器内钢液流动和

温度分布更加均匀;复合磁场下宽面和窄面的凝固壳厚度之差与不施加磁场相比降低了 4.59%.

2) 电磁制动促进流场均匀性,降低水口射流对凝固前沿的冲击强度和冲击深度;电磁搅拌能够提高流场分布的均匀性.

3) 气泡类和固体类夹杂物的捕捉位置呈现点带状分布规律,在厚度方向上由外向内数量逐渐减少,气泡类夹杂物的捕捉数量明显小于固体类夹杂物,电磁制动能明显抑制夹杂物捕捉。

4) 复合磁场下凝固壳的固体类夹杂物和氩气泡的捕捉量比不施加电磁场时分别减少了 48.55% 和 38.93%,夹杂物捕捉总量减少了 47.21%。

参考文献:

- [1] 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.
(Ren Zhong-ming, Lei Zuo-sheng, Li Chuan-jun, et al. New study and development on electromagnetic field technology in metallurgical processes[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(4):583-600.)
- [2] Li B K, Tsukihashi F. Effects of electromagnetic brake on vortex flows in thin slab continuous casting mold[J]. *ISIJ International*, 2006, 46(12): 1833-1838.
- [3] Li B K, Tsukihashi F. Numerical estimation of the effect of the magnetic field application on the motion of inclusion in continuous casting of steel[J]. *ISIJ International*, 2003, 43(6): 923-931.
- [4] Lu H B, Zhong Y B, Ren W L, et al. Effect of electromagnetic brake on transient asymmetric flow, solidification, and inclusion transport in a slab continuous casting[J]. *Steel Research International*, 2022, 93(11): 2200518.
- [5] Yin Y B, Zhang J M, Ma H T, et al. Large eddy simulation of transient flow, particle transport, and entrapment in slab mold with double-ruler electromagnetic braking[J]. *Steel Research International*, 2021, 92(5): 2000582.
- [6] Lu H B, Zhong Y B, Ren Z M, et al. Numerical simulation of EMS position on flow, solidification and inclusion capture in slab continuous casting[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2022, 29(11): 1807-1822.
- [7] Kumar R, Jha P K. Effect of electromagnetic stirring on the transient flow, solidification and inclusion movements in the continuous casting slab mold[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2023, 33(11): 3716-3733.
- [8] 刘中秋.连铸结晶器内多相非均匀传递机制的多尺度模拟[D].沈阳:东北大学,2015.
(Liu Zhong-qiu. Multi-scale modeling of multiphase and inhomogeneous transmission mechanisms in continuous casting mold [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.)
- [9] Liu Z Q, Li B K, Jiang M F, et al. Modeling of transient two-phase flow in a continuous casting mold using Euler-Euler large eddy simulation scheme[J]. *ISIJ International*, 2013, 53(3): 484-492.
- [10] Zappulla M L S, Cho S M, Koric S, et al. Multiphysics modeling of continuous casting of stainless steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 278: 116469.
- [11] Yuan Q, Thomas B G, Vanka S P. Study of transient flow and particle transport in continuous steel caster molds: part I. fluid flow [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004, 35(4): 685-702.
- [12] Yuan Q, Thomas B G, Vanka S P. Study of transient flow and particle transport in continuous steel caster molds: part II. particle transport [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2004, 35(4): 703-714.
- [13] 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.
(Liu Zhong-qiu, Li Bao-kuan, Xiao Li-jun, et al. Modeling progress of high-temperature melt multiphase flow in continuous casting mold [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2022, 58(10): 1236-1252.)
- [14] 李宝宽,刘中秋.炼钢中的计算流体力学[M].北京:冶金工业出版社,2016.
(Li Bao-kuan, Liu Zhong-qiu. Computational fluid dynamics in steelmaking processes [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.)
- [15] 刘中秋,李林敏,李宝宽.连铸结晶器内气泡群粒径分布的实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(1):57-61.
(Liu Zhong-qiu, Li Lin-min, Li Bao-kuan. Experimental study of bubble size distribution in continuous casting mold [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(1): 57-61.)
- [16] Sánchez-Perez R, Morales R D, Díaz-Cruz M, et al. A physical model for the two-phase flow in a continuous casting mold [J]. *ISIJ International*, 2003, 43(5): 637-646.
- [17] 徐海伦.板坯连铸结晶器内气泡行为和液渣分布规律的研究[D].重庆:重庆大学,2007.
(Xu Hai-lun. Study on behavior of bubbles and liquid slag distribution in mold for slab caster [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.)
- [18] Jin K, Thomas B G, Ruan X M. Modeling and measurements of multiphase flow and bubble entrapment in steel continuous casting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 47(1): 548-565.
- [19] Petrus B, Zheng K, Zhou X, et al. Real-time, model-based spray-cooling control system for steel continuous casting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2011, 42(1): 87-103.
- [20] Li X L, Li B K, Liu Z Q, et al. Large eddy simulation of electromagnetic three-phase flow in a round bloom considering solidified shell [J]. *Steel Research International*, 2019, 90(4): 1800133.
- [21] Yamazaki M, Natsume Y, Harada H, et al. Numerical simulation of solidification structure formation during continuous casting in Fe-0.7mass% C alloy using cellular automaton method [J]. *ISIJ International*, 2006, 46(6): 903-908.
- [22] Wang C J, Liu Z Q, Li B K. Effect of the intensity of single-ruler electromagnetic braking on the flow pattern in a thin-slab funnel mold [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2023, 54(6): 3438-3450.