

doi :10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 08. 012

全幅一段电磁制动与立式电磁制动技术模拟研究

李 菲,王恩刚,冯明杰
(东北大学 冶金学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要:以 ANSYS14. 5 和 FLUNET6. 3 为计算平台,针对全幅一段电磁制动技术和立式电磁制动技术,模拟计算了电磁制动过程结晶器内磁感应强度和流场分布. 计算结果表明:全幅一段电磁制动和立式电磁制动技术在钢液中可以产生恒定有效磁场,磁感应强度主要集中于磁极覆盖区域,能够对钢液主射流起到控制作用,促进非金属夹杂物和气泡的上浮分离从而提高铸坯的纯净度;立式电磁制动能够更好地控制钢液主射流冲击铸坯窄面后的上升流,更加有效地稳定自由液面波动,克服了全幅一段电磁制动对上升流控制不力的缺点,全幅一段电磁制动对下降流控制稍好,但从整体制动效果上看,立式电磁制动技术更好,具有较全面并且良好的冶金效果.

关 键 词:连铸;结晶器;电磁制动;磁场;流场

中图分类号:TF 777. 1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005 - 3026(2016)08 - 1118 - 05

Simulation Study of EMBr-Ruler Technology and V-EMBr Technology

LI Fei ,WANG En-gang ,FENG Ming-jie
(School of Metallurgy , Northeastern University , Shenyang 110819 , China. Corresponding author : WANG En-gang , E-mail : egwang@mail. neu. edu. cn)

Abstract : In ANSYS14. 5 and FLUNET6. 3 computing platforms , distribution of magnetic flux density and flow field in the mold were simulated during the electromagnetic braking process of EMBr (electromagnetic brake)-Ruler and V-EMBr (vertical electromagnetic brake) , respectively. The calculation results show that EMBr-Ruler and V-EMBr can generate a constant and effective magnetic field in molten steel , and the magnetic flux density is mainly focused on the poles covered region. EMBr-Ruler and V-EMBr can control the mainstream of molten steel and promote flotation and removal of non-metallic inclusions and bubbles to improve the purity of the slab. V-EMBr can better control the upward flow which is formed after the narrow face of mold impacted by the mainstream , stabilize more effectively fluctuations of free surface and overcome the disadvantage of inadequate control upward flow with EMBr-Ruler. EMBr-Ruler can better control the downward flow , but the overall braking effect of V-EMBr and its metallurgical effect are more comprehensive and favorable.

Key words : continuous casting ; mold ; electromagnetic brake ; magnetic field ; flow field

电磁制动技术作为控制结晶器内钢液流动的一种重要手段得到广泛应用,对提高连铸机的生产率和铸坯的品质具有重要意义^[1-2]. 电磁制动技术自 80 年代初产生以来收到了良好的冶金效果^[3-6]. 利用静磁场来控制结晶器内钢液流动,具有减少铸坯缺陷、促进坯壳均匀生长、稳定弯月面波动和防止卷渣漏钢等作用. 全幅一段电磁制动 (EMBr-Ruler) 技术产生于 90 年代初^[7],其磁场特点是覆盖整个结晶器宽度,磁极经磁轭连接构成闭合回路,其制动效果受磁极位置的影响较大,对弯月面区域控制不佳,如果磁场位置与水口的距离稍远,就会影响制动效果^[8]. 立式电磁制动

(V-EMBr)^[9]装置的结构较全幅一段电磁制动装置有一定改进,立式电磁制动技术在接近结晶器窄面竖直放置一对磁极,其磁场可同时覆盖结晶器窄面附近弯月面表面和钢液射流冲击点两个关键区域,以抑制结晶器表面波动与卷渣,以及皮下气泡和夹杂物的冲击深度,提高连铸坯质量,结晶器高度方向较广的制动范围不受水口浸入深度和水口角度改变的影响,令该装置方便操作.本文主要通过数值模拟手段研究两种电磁制动技术结晶器内的磁场和流场特点,并比较分析二者的冶金效果.

1 数学模型的建立

为方便建立数学模型,对结晶器内钢液流动作如下假设:连铸过程中的流动状态为稳态,钢液流动对磁场分布的影响忽略不计,钢液具有均匀和各向同性的电磁特性,忽略自由电荷的体密度,钢液与结晶器交界面为无滑移边界,钢液在壁面流动速度为零,结晶器内是单相流动,钢液物性参数为常量,忽略结晶器锥度、凝固坯壳和振动对钢液流动的影响,钢液液面为平面,不考虑保护渣的影响.

1.1 电磁场控制方程

通过求解电势方程得到电流密度^[10].感应电流密度方程:

$$J = \sigma (-\nabla \varphi + v \times B).$$
 (1)

电场强度以电势 φ 的形式表示为

$$E = -\nabla \varphi.$$
 (2)

感应电流密度连续方程:

$$\nabla \cdot J = 0.$$
 (3)

由式(1)~式(3)得出电势 φ 方程:

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot (v \times B).$$
 (4)

电磁力方程:

$$F_m = J \times B.$$
 (5)

式中: J 为感应电流密度; σ 为钢液的电导率; φ 为电势; v 为钢液流动速度; B 为磁感应强度; E 为电场强度; F_m 为电磁力.

1.2 流场控制方程

连续方程:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0.$$
 (6)

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho v_{xi} v_{xj})}{\partial x_j} = -\frac{\partial P_s}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu_{\text{eff}} (\frac{\partial v_{xi}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{xj}}{\partial x_i})] + F_{mi} + \rho g_i.$$
 (7)

$k-\varepsilon$ 方程^[8,11]如下.

k 方程:

$$\frac{\partial (\rho k v_{xj})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k - \rho \varepsilon - \left| 2\mu \frac{\partial k^{1/2}}{\partial n} \right|,$$
 (8)

ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon v_{xj})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k |f_1| - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} |f_2| + \left| 2 \frac{\mu \mu_t}{\rho} (\frac{\partial^2 v}{\partial n^2})^2 \right|,$$
 (9)

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_1 + \mu_t,$$
 (10)

$$\mu_t = C_\mu |f_\mu| \rho \frac{k^2}{\varepsilon}.$$
 (11)

式中: v_{xi}, v_{xj} 是 x_i, x_j 方向上的流体流动速度分量; ρ 是钢液密度; P_s 是钢液压力; μ_{eff} 是有效黏性系数; μ_1 是分子黏性系数; μ_t 是湍流黏性系数; g_i 是 i 方向上体积力; μ 是钢液动力黏度; k 是湍流脉动动能; G_k 是湍动能 k 增长率; ε 是湍流动能耗散率; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu, \sigma_\varepsilon, \sigma_k$ 数值是1.44,1.92,0.09,1.3,1.0;系数 f_1, f_2 和 f_μ 是对 $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ 和 C_μ 的修正.

1.3 边界条件

①壁面边界条件:垂直于壁面的速度、电流密度分量为零,平行于壁面的分量采用无滑移边界条件;②自由表面边界条件:钢液自由表面上各变量沿法线方向的梯度为零;③对称面边界条件:各变量沿对称面法线方向的梯度为零;④入口边界条件:水口入口定义为入口,入口速度记为 v_{inlet} ,入口直径记为 d_0 ,入口的湍流参量 $K_{\text{inlet}} = 0.01 v_{\text{inlet}}^2, \varepsilon_{\text{inlet}} = K_{\text{inlet}}^{3/2} (d_0/2)$;⑤出口边界条件:计算区域底部定义为出口,变量沿出口的法向导数为零.图1为电磁制动位置及边界条件示意图,数值模拟参数为生产现场提供,见表1.

表 1 数值模拟参数 Table 1 Parameters of numerical simulation	
物理量	参数值
结晶器宽度/mm	1 450
结晶器厚度/mm	230
水口浸入深度/mm	170
水口出口角度/(°)	-15
拉坯速度/(m·min ⁻¹)	1.6
钢液密度/(kg·m ⁻³)	7 020
钢液黏度/(Pa·s)	6.2×10 ⁻³
钢液电导率/(S·m ⁻¹)	7.14×10 ⁵
电流/A	850

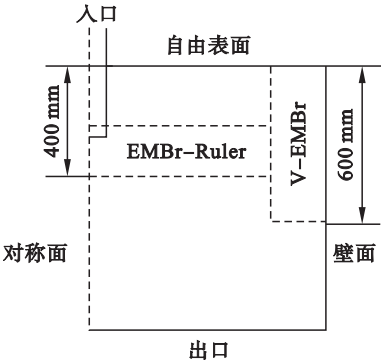


图 1 电磁制动位置和边界条件

Fig. 1 Electromagnetic brake position and boundary conditions

1.4 求解方法

计算分为两个步骤:首先利用 ANSYS 软件建立电磁制动过程三维磁场模型并求解得到磁感应强度分布,然后利用 FLUENT 软件建立电磁制动过程三维流场模型,调用 MHD 模块并通过编写用户自定义函数将磁感应强度计算结果作为流

场、磁场耦合计算的载荷,采用 SIMPLE 方法,设定连续方程的质量源项和各速度分量的相对残差,当迭代达到收敛标准 0.000 1 后程序自动退出,得到电磁制动结晶器内三维流场分布。

2 结晶器内磁场计算结果与分析

图 2 为结晶器内磁感应强度分布图。由图 2 可知:应用电磁制动技术,在磁极覆盖区域,结晶器内磁感应强度较大,在磁极覆盖区域外,结晶器内磁感应强度较小,离磁极越远,磁感应强度越小,全幅一段电磁制动技术产生的有效磁场能完全覆盖整个铸坯宽度范围;立式电磁制动技术产生的有效磁场在结晶器高度方向能同时覆盖自由表面和钢液射流冲击点范围。两种电磁制动技术应用于板坯连铸过程,它们对钢液流动的影响将通过流场的数值模拟进行研究,进而得出对冶金效果的影响。

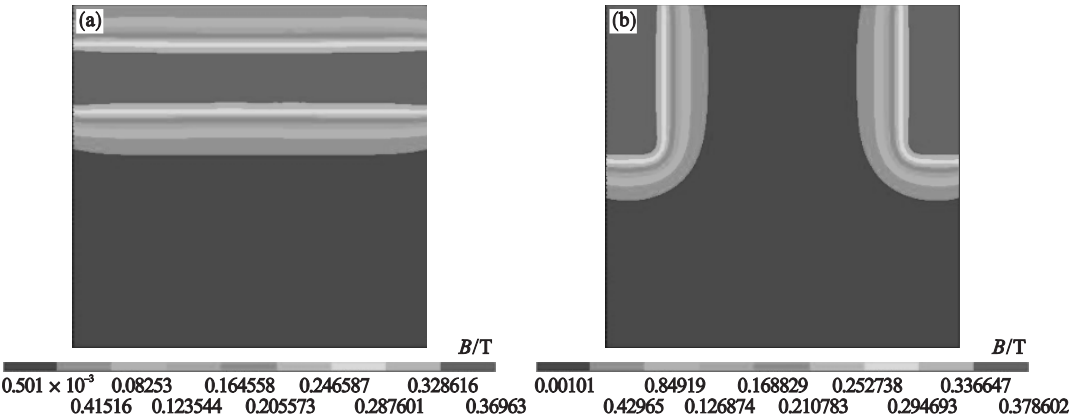


图 2 结晶器内磁感应强度分布

Fig. 2 Distribution of magnetic flux density in mold

(a)—全幅一段电磁制动 ; (b)—立式电磁制动。

3 流场计算结果与分析

图 3 为结晶器内钢液流速分布,图 4 为结晶器自由表面流速分布,窄面流速和湍动能分布如图 5 所示。由图 3 可知:浸入式水口射出的钢液流股先冲击结晶器窄面,撞击窄面后分别形成上、下回流区;应用全幅一段电磁制动后,结晶器上回流区钢液流动速度无明显变化,钢液射流对窄面的冲击减弱,下回流区涡心提升明显,冲击深度大约减小了 0.508 m;应用立式电磁制动后,结晶器上回流区钢液流动速度减小,水口流出的钢液射流冲击窄面的强度减弱,下回流区涡心大约上升了

0.452 m。应用立式电磁制动后结晶器内自由表面流速显著减小,与未应用电磁制动时相比最大流速减小了 0.153 m/s,而应用全幅一段电磁制动时自由表面流速稍有增加,最大流速增加了 0.003 m/s(图 4),与图 3 中钢液流速矢量图所示一致。未应用电磁制动时,钢液射流冲击点及其周围区域的流场呈现不规则的发散状态,射流冲击区域的湍动能较大;应用两种电磁制动技术后,射流冲击点及其周围区域不规则流动的发散情况明显减弱,形成较规整的上、下流动,窄面射流冲击点处湍动能减小,但应用全幅一段电磁制动的窄面上升流速度较大(图 5)。以上数值模拟结果说明:全幅一段电磁制动技术对下回流区涡心的控

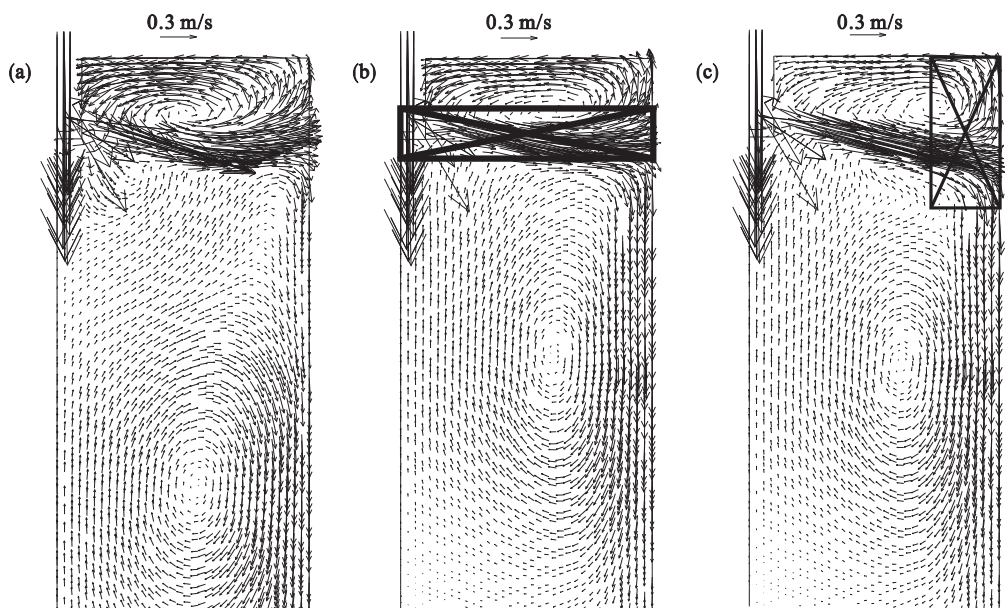


图 3 结晶器内流场分布

Fig. 3 Distribution of flow field in the mold

(a)—未用电磁制动 ; (b)—全幅一段电磁制动 ; (c)—立式电磁制动.

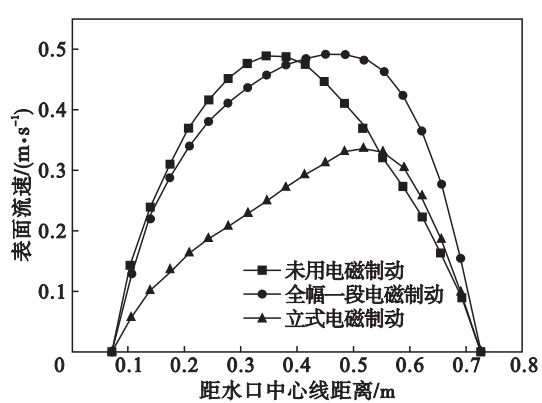


图 4 自由表面流速分布

Fig. 4 Distribution of free surface velocity

制稍好 ,两种电磁制动技术能够起到防止漏钢、促进气泡和夹杂物的上浮分离及提高铸坯纯净度的效果 ,全幅一段电磁制动对上回流区特别是自由表面流速不能有效抑制 ,而立式电磁制动能更好地抑制上回流区特别是自由表面流动 ,从而减少液面波动 ,防止卷渣现象的发生 .可见 ,立式电磁制动能够弥补全幅一段电磁制动对上回流区控制不利的缺点 ,同时也能够在下回流区抑制非金属夹杂物和气泡卷入结晶器深处 ,满足立式电磁制动技术的设计初衷.

4 结 论

- 1) 全幅一段电磁制动和立式电磁制动过程可以在钢液中产生稳恒磁场 ,磁极覆盖区域的磁场强度较大 ,磁极覆盖区域外磁场逐渐衰减.
- 2) 全幅一段电磁制动和立式电磁制动技术能够控制下回流区钢液流动 ,促进下回流区涡心上升 ,有助于提高铸坯纯净度 ;立式电磁制动能控制上回流区钢液流动 ,稳定液面波动 ,防止卷渣 ,而全幅一段电磁制动对自由液面控制效果较差.
- 3) 采用立式电磁制动新技术 ,能够同时实现对结晶器内自由表面波动和钢液射流冲击强度的控制 ,克服全幅一段电磁制动技术的缺点 ,具有较全面并且良好的冶金效果.

(下转第 1137 页)

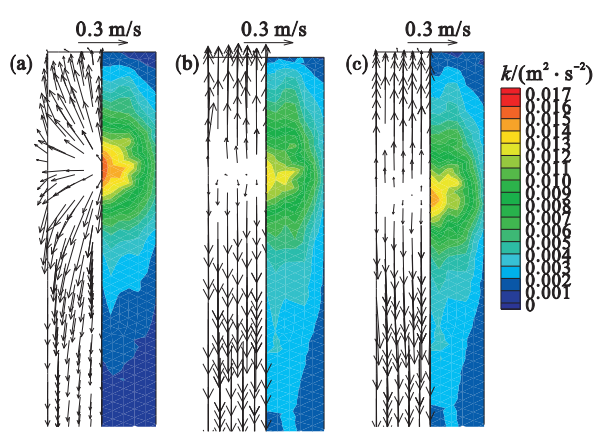


图 5 铸坯窄面流速和湍动能分布

Fig. 5 Distribution of velocity and turbulent kinetic energy of slab narrow face

(a)—未用电磁制动 ; (b)—全幅一段电磁制动 ;
(c)—立式电磁制动.