

方坯结晶器内钢液凝固及电磁制动的数值模拟*

黄军涛 赫冀成

(东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110006)

摘 要 利用电磁流体力学 (MHD) 的基本理论及 Bennon 的连续介质模型, 给出了方坯结晶器内钢液凝固及电磁制动的三维数学模型。磁场、流场和温度场的数值模拟表明, 与钢液流动速度方向相反的电磁力是电磁制动的直接原因; 感生电流主要集中在钢液入口处及其附近区域, 电磁力能有效地改变方坯结晶器内的流场和温度场的分布, 造成制动区域的下部呈现活塞流状态, 降低了结晶器内高温钢液区域的温度梯度, 提高了弯月面附近特别是上部角区域钢液的温度, 减薄了上部凝固壳厚度。

关键词 连铸结晶器, 电磁制动, 钢液流动, 凝固及传热, 数值模拟

中图分类号 O242.1, TG21

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)03-0281-06

NUMERICAL SIMULATION OF STEEL SOLIDIFICATION AND ELECTROMAGNETIC BRAKE IN THE BILLET MOLD

HUANG Juntao, HE Jicheng

Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110006

Correspondent: HUANG Juntao, Tel: (024)23968221

Manuscript received 2000-06-16, in revised form 2000-08-28

ABSTRACT A three-dimension mathematical model of steel solidification and electromagnetic brake (EMBR) in the billet mold is presented according to the basic theory of magnetohydrodynamics and Bennon's continuous media model. By numerical simulation of electromagnetic field, fluid flow and heat transfer, it was shown that the electromagnetic force opposite to the fluid flow is the direct cause of EMBR. The induction current mainly concentrates in the region near entrance. The electromagnetic force can alter effectively the distribution of flow field and temperature field, which results in a plug-like flow in the EMBR region, decreases the temperature gradient in the high temperature region, raises the temperature near meniscus, especially in the up corner region and decreases the solidification thickness there.

KEY WORDS continous casting mold, electromagnetic brake, steel fluid flow, solidification and heat transfer, numerical simulation

钢液在方坯结晶器内浇注时, 从入口处进来的高温钢水以较大的速度向下流动, 易使非金属夹杂物随着钢液的流动输运至钢液内部而不易上浮, 形成钢坯内部缺陷, 另外, 非金属夹杂物被凝固壁捕获后, 易造成漏钢事故。同时, 由于存在大的温度梯度 (特别是在小方坯中), 易形成发达的柱状晶, 而不利于等轴晶的生成。

电磁制动技术在板坯连铸中逐渐发展了起来, 并取得

了良好的冶金效果^[1-5]。文献 [6] 肯定了电磁制动在方坯结晶器冶金过程中良好的冶金效果, 特别是可以降低高温钢液区域的温度梯度。然而, 数学模型中没有考虑钢液凝固的影响, 而方坯结晶器内电磁场、流场、温度场和钢液的凝固是相互耦合作用的, 特别是钢液凝固时必然伴随有相变放热, 同时, 钢液内部糊状区和固相区的存在对流场的分布有着很大的影响。因此, 应结合钢液的凝固行为深入研究方坯电磁制动结晶器内特有的固液相变以及电磁能、动量、热量等的传输行为, 搞清楚电磁制动条件下方坯结晶器内的流场、温度场及凝固层的分布特性, 以便建立方坯结晶器电磁制动的基础。

本文应用数值模拟的方法, 阐述了电磁制动条件下方坯结晶器内钢液的三维磁场、流场和凝固情况下温度场分

* 国家自然科学基金资助项目 59734080 和国家重点基础研究发展规划资助项目 G1998061510

收到初稿日期: 2000-06-16, 收到修改稿日期: 2000-08-28

作者简介: 黄军涛, 男, 1970 年生, 博士生

布特性, 并对电磁制动的机理进行了分析.

1 流场及温度场的数学模型

图 1 是 1/2 方坯结晶器示意图. 具有封闭磁路的条形磁铁的一对磁极安装在方坯结晶器的其中一对相互平行的侧面上, 磁场的主要方向见图中箭头所示. 定义钢液自由表面与结晶器一个棱边的交点为坐标原点 $O(0,0,0)$, 方坯尺寸为 $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$, 钢液入口有效断面为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 钢坯拉速为 1.524 m/min , 取计算长度为 500 mm .

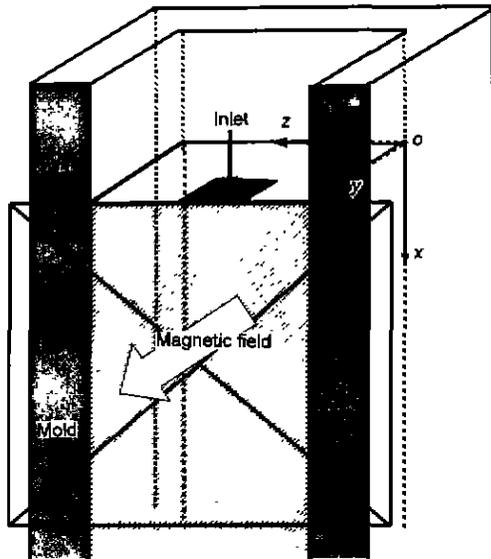


图 1 方坯电磁制动示意图
Fig.1 Schematic view of billet EMBR

1.1 基本假定

(1) 钢液被认为是定粘度不可压无化学反应稳定的湍流流动; (2) 忽略结晶器液面上渣层的存在, 且假定液面处绝热; (3) 凝固过程保持局部的热动态平衡; (4) 设为柱状晶凝固, 忽略铸坯形变和气隙生成; (5) 研究介质为低碳钢; (6) 凝固层及糊状区中钢的导热系数、密度、比热和电导率近似取钢液中对应的参数.

1.2 基本方程

根据 Bennon 的连续介质模型^[7,8], 可以得到凝固情况下的流体力学的基本方程.

(1) 连续方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

式中 ρ 为混合密度, 混合速度 $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ (u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度分量).

(2) 动量方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_e (\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T) + F_{em} + \rho g + S \quad (2)$$

其中, P 为压力, g 为重力加速度, μ_e 为有效粘度系数, $\mu_e = \mu_l + \mu_T$, μ_l 为钢液流体的分子粘度系数, μ_T 为湍流粘度系数. F_{em} 为电磁力, $S = (S_u, S_v, S_w)$ 为源项, 后面给出. 规定张量的并积 $(A \otimes B)_{ij} = A_i B_j$.

(3) 能量方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_H} \right) \nabla H \right) + \phi + \vec{F}_v \cdot \vec{V} + Q_j + Q_v + Q_R \quad (3)$$

式中凝固热 $Q_v = S_h = \nabla \cdot [\rho f_s \vec{V}_s \Delta H_f]$, 其中 f_s 为固态分率, 熔化潜热 ΔH_f 取常数 270 kJ/kg ; H 为单位质量焓, $H = h + \frac{1}{2} \vec{V}^2 + k$, h 为单位质量焓, $h = c_p T - c_p T_{ref}$, c_p 为钢液的平均定压热容, 可近似取常数 $c_p = 680 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, T_{ref} 为焓参考温度, 这里取 $T_{ref} = 0$; λ 为钢液导热系数, 这里取 $\lambda = 34 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; σ_H 为变量 H 的湍流 Prandtl 数, $\sigma_H = 1.0$; ϕ 为粘性耗散热, 相对其它量较小, 在此可以忽略; \vec{F}_v 为体积力; Q_j 为 Joule 热, $Q_j = J^2 / \sigma$, 其中 J 是感生电流, σ 是电导率; Q_R 为化学反应热, 在此为 0. 钢的其他物性参数均参照文献 [8].

(4) 湍流模型方程

采用低 Reynolds 数 $k-\varepsilon$ 模型.

湍动能 k 方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G - \rho \varepsilon - D + S_k \quad (4)$$

湍动能耗散率 ε 方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_l + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + c_1 f_1 G - C_2 f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + E' + S_\varepsilon \quad (5)$$

且湍流粘度系数为: $\mu_T = c_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$. 在上列各式中: $G = \mu_e \nabla \vec{V} \cdot (\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T)$, $D = 2\mu_l (\nabla k)^{\frac{1}{2}}$, $E' = 2 \frac{\mu_l \mu_T}{\rho} (\nabla \nabla V)$, $f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_T^2)$, $f_\mu = \exp\left(\frac{-3.4}{(1+R_T/50)^2}\right)$, $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$. 式中的常数 $f_1 = 1.0$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $c_\mu = 0.09$.

(5) 液态分率方程

当 $T < T_e$ 时, $f_l = 0$ (f_l 为液态分率); 当 $T_e \leq T \leq T_{liq}$ 时, $f_l = \frac{T - T_e}{T_{liq} - T_e}$; 当 $T > T_{liq}$ 时, $f_l = 1.0$. 这里规定固相线温度 $T_e = 1773 \text{ K}$, 液相线温度 $T_{liq} = 1793 \text{ K}$.

(6) 渗透率方程

因为是柱状晶凝固, 所以可将糊状区视为多孔介质. 根据 Darcy 定律, 前述流动各控制方程中的源项分别为:

$$u \text{ 方程: } S_u = -\frac{\mu_l}{K_p} (u - u_s) - \rho g [\beta_T (T - T_{ref})];$$

$$v \text{ 方程: } S_v = -\frac{\mu_l}{K_p} (v - v_s);$$

w 方程: $S_w = -\frac{\rho_l}{K_p}(w - w_s)$;

k 方程: $S_k = -\frac{\mu_1 k}{k_p}$;

ε 方程: $S_\varepsilon = -\frac{\mu_1 \varepsilon}{K_p}$.

上列各式中, K_p 为两相区渗透率, 采用 $K_p = K_0 \left[\frac{f_1^3}{(1-f_1)^2} \right]$; T_{ref} 为浮力参考温度; u_s, v_s 及 w_s 分别表示 x, y 及 z 方向上凝固壳运动速度, 这里 u_s 取钢坯拉速, $v_s=0, w_s=0$.

(7) 电磁力的计算

利用磁矢位积分方程, 通过自行开发的通用性强的三维电磁场程序计算, 可以求出磁场区域内各点的磁感应强度 [6].

动量方程中的电磁力是钢液内感生电流 J 与磁感应强度 \vec{B} 相互作用产生的, 其值为

$$F_{em} = \vec{J} \times \vec{B}$$

上式中的电流密度 \vec{J} 可由 MHD 方程进行计算:

由于 $\nabla \cdot \vec{J}=0$, 电场强度 $\vec{E} = -\nabla\varphi$ (φ 为电位), $\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$, 所以得出电位方程

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = \nabla \cdot (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (6)$$

(8) 边界条件

入口: 所有变量均取成第一类边界条件. $u = u_{in}=0.553 \text{ m/s}, v = w = 0, k = 0.01u_{in}^2, \varepsilon = k^{1.5}/R_{noz}$ (R_{noz} 为入口水力半径), $T = T_{in}=1823 \text{ K}$. 电位取零.

自由表面: 法向速度为零, 其它变量的法向导数也为零.

出口: 为质量流边界条件, 保证进出口钢液质量守恒, 电位及温度的法向一阶偏导数为零. 凝固壁面: $k = \varepsilon = 0$, 钢液速度取钢坯拉速. 温度取第三类边界条件. 水冷平均对流换热系数 $\alpha = 1.37 \times 10^3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (由文献 [9] 中的式 (11) 给出), 电位取零.

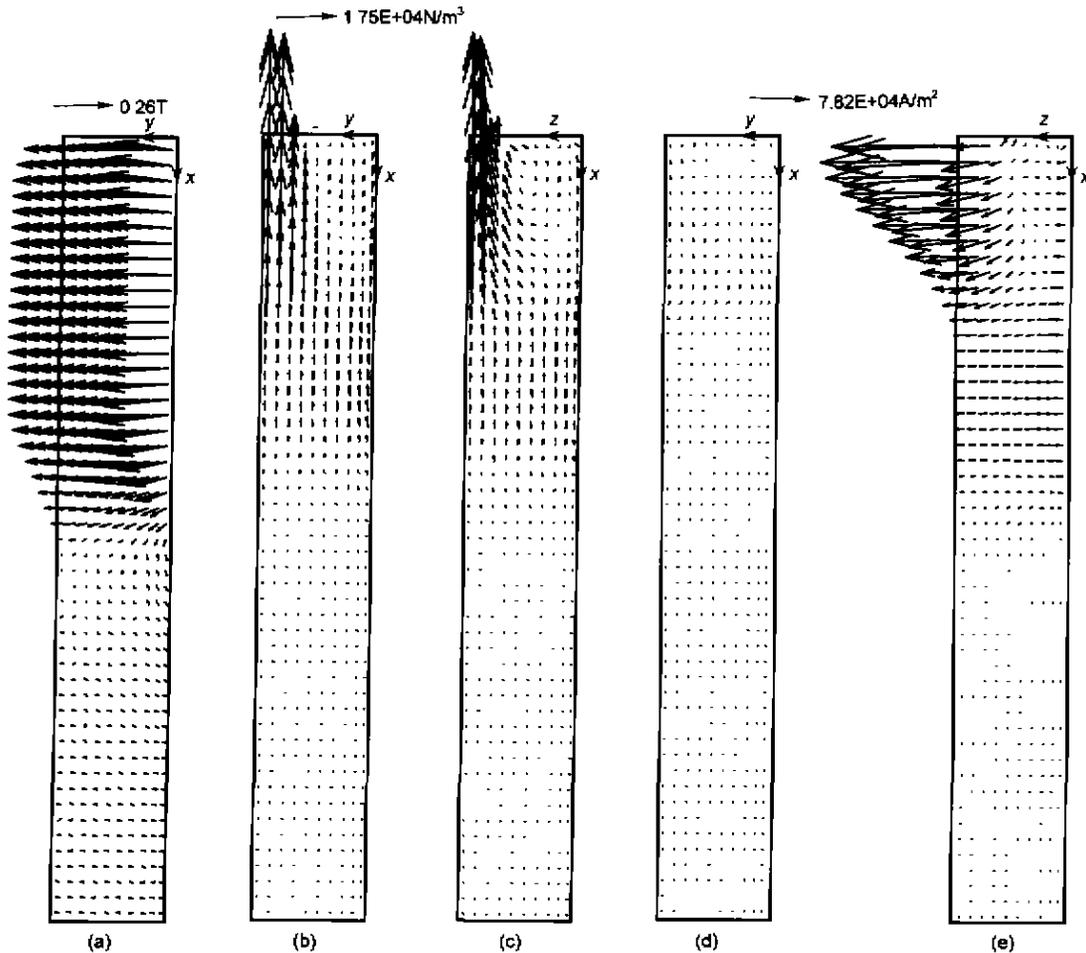


图 2 中心剖面电磁制动各场量的分布

Fig.2 Distribution of EMBR field variables in central vertical section of liquid steel in mold

(a) distribution of magnetic field in z section (plane perpendicular to z axis) (b) distribution of electromagnetic forces in z section (c) distribution of electromagnetic forces in y section (d) distribution of induced current in z section (e) distribution of induced current in y section

本文采用自行开发的数学模型和程序进行了三维磁场的计算,在CFX4软件的用户接口,插入凝固情况下流场各个方程和温度场方程的源项,并对之进行了自行离散编程.计算区域取1/4的全场区域,网格为 $50 \times 10 \times 10$ 的非均匀网格,以同位网格来储存所有变量,并用Rhie-Chow法进行网格界面处的动量插值.流场计算采用Simplec算法,当连续方程质量源相对残量小于 1.0×10^{-4} 时认为迭代收敛.

2 计算结果及分析

图2a给出了磁场的分布,在条形磁铁所覆盖的工作区,形成的大小比较均匀,方向基本一致的磁场,这有利于电磁制动(在图中定义 z 剖面为与 z 轴相垂直的剖面,依此类推).

图2b、2c表明,磁场作用在运动的钢液中后,产生了与流场速度方向相反的电磁力,流场的速度越大,此力越大,电磁力的分布随流场分布的变化而变化.很显然,

电磁力是造成电磁制动的直接原因.

图2d、2e为感生电流的分布图,可以看出,感生电流主要集中在钢液入口处及其附近区域,且主体表现为从一侧向另一侧大范围地流动,感生电流与磁场共同的作用产生了与流场速度方向相反的电磁力,从而形成电磁制动现象.

图3a-c为方坯在有或无磁场作用下钢液流场的分布图.在磁场作用下,钢液流场的分布发生了变化,入口处以下钢液的高速区域变小,入口回流区大大缩短,并在流场的下流较快地出现活塞流状态.随着磁感应强度的增大,上述趋势逐渐加强,而活塞流状态无疑对钢液中夹杂物的上浮是有利的.同时由于所加磁场的不对称性,使钢液在两个不同的截面上表现为不同的流动特性.

图3d-f给出中心剖面位置,有无电磁制动时垂直剖面钢液温度等值线图,图4则为 $x=0.055$ m位置,有无电磁制动时水平剖面钢液温度等值线图.从图中可以看出,不管是否存在电磁制动条件,钢液在液态区,温度变

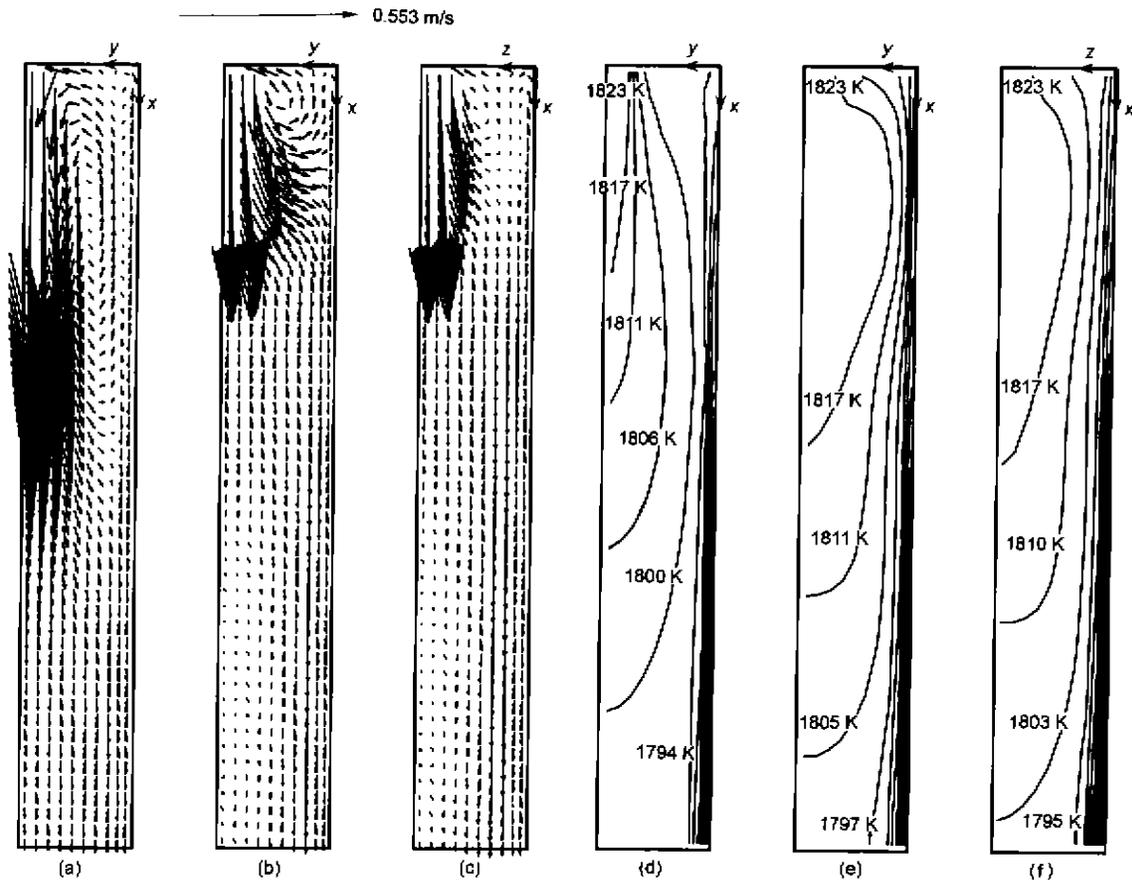


图3 中心剖面钢液流场及温度场分布

Fig.3 Velocity and temperature distributions of liquid steel in central vertical section of mold

(a) in y or z section (without EMBR) (b) in z section (with EMBR) (c) in y section (with EMBR) (d) in y or z section (without EMBR) (e) in z section (with EMBR) (f) in y section (with EMBR)

化较为平缓,而在固态区则变化较大,这是因为在液态区存在凝固放热.电磁制动改变了钢液流场的分布,进而改变了钢液的传热过程.特别是,入口处温度较高的部分高温钢液经过较短的距离向上返回,使得入口附近区域钢液的温度与没有电磁制动的情形相比较,从而使整个流场内的高温区域较大.电磁制动提高了弯月面附近特别是上角部区域钢液的温度,防止钢液在该处凝固层的过厚现象,从而有助于防止裂纹的产生.同时,电磁制动减低了高温

区域钢液的温度梯度,这有利于促进凝固坯中等轴晶的生长,增加等轴晶的数量.

图 5 给出了钢液凝固壳厚度沿结晶器垂直位置的变化曲线.无电磁制动且相同条件的情况下计算预测曲线与 Lait^[9] 的实验值基本一致,说明数值模拟可以预测凝固壳的厚度,同时也验证了数学模型和计算过程的正确性.电磁制动情况下凝固壳厚度的数值模拟表明,与无电磁制动的情况相比,在 z 中心剖面上,凝固壳总体上变薄,而在

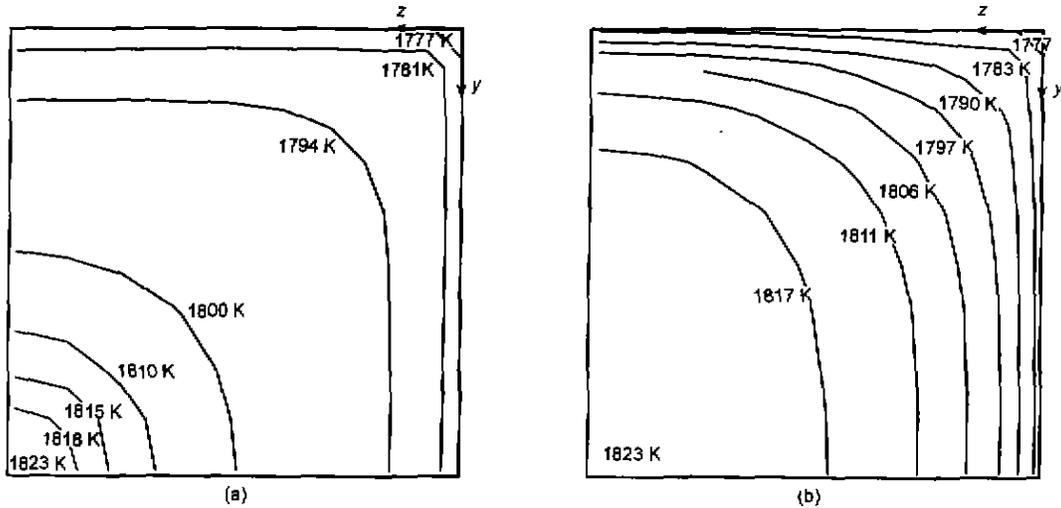


图 4 水平剖面钢液温度场分布

Fig.4 Temperature distribution of liquid steel in horizontal section

(a) in section of $x=0.055$ m (without EMBR) (b) in section of $x=0.055$ m (with EMBR)

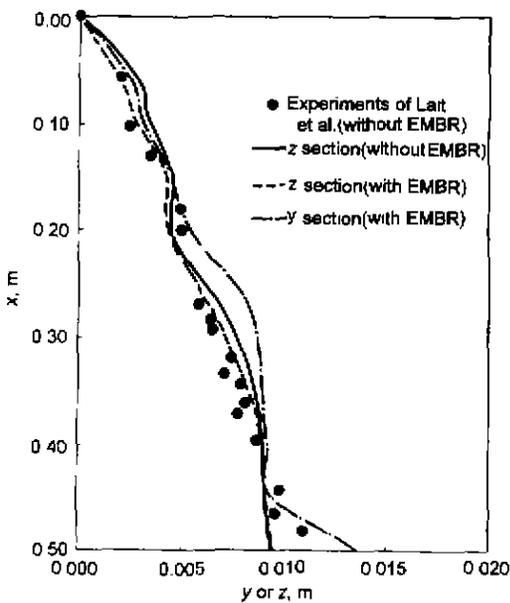


图 5 垂直中心剖面凝固壳厚度曲线

Fig.5 Distribution of solidified shell thickness in central vertical section

y 中心剖面上则表现为上部变薄、下部变厚.这是因为电磁制动使得从入口处进来的高温钢液在流场上部区域增加了横向水平流动,从而增加了上部钢液的整体温度;同时由于所加磁场的不对称性,使钢液在两个不同的截面上表现为不同的凝固特性.

3 结论

(1) 凝固壳厚度计算预测曲线与 Lait^[9] 的实验值基本一致,说明数值模拟可以预测凝固壳的厚度,同时也验证了数学模型和计算过程的正确性.

(2) 与钢液速度方向相反的电磁力是造成电磁制动现象的直接原因,感生电流主要集中在钢液入口处及其附近区域,且主体表现为从方坯一侧向另一侧大范围地流动.

(3) 全幅一段水平磁场能有效地改善方坯结晶器内部钢液流场的分布,缩小了高速区域,缩短回流区的长度,并在该区域下部呈现活塞流状态,磁感应强度越大,这种趋势越强.

(4) 电磁制动提高了弯月面附近特别是上角部区域钢液的温度,同时降低了结晶器内高温区域钢液的温度梯度.

(5) 电磁制动减薄了结晶器上部区域凝固层的厚度, 同时由于所加磁场的不对称性, 使钢液在两个不同的中心垂直截面上表现为不同的流动和凝固特性.

参考文献

- [1] Nagai J. *Iron & Steel Engin.*, 1984; 61: 41
- [2] Zeze M, Harada H, Takeuchi E. *Steelmaking Conference Proceedings*. Dallas: Iron and Steel Society, Inc, 1993: 267
- [3] Moon K H, Lee C H, Cha P R. *Steelmaking Conference Proceedings*. Chicago: Iron & Steel Society, Inc, 1997: 173
- [4] Hwang Y S, Cha P R, Nam H S. *ISIJ Int*, 1997; 37: 659
- [5] Li B K, He J C, Jia G L. *Acta Metall Sin.*, 1997; 33: 1207 (李宝宽, 赫冀成, 贾光霖. *金属学报*, 1997; 33: 1207)
- [6] Huang J T, He J C. *J Northeastern University (nature science)*, 1999; 20: 622 (黄军涛, 赫冀成. *东北大学学报(自然科学版)*, 1999; 20: 622)
- [7] Bennon W D, Incropera F P. *Int J Heat Transfer*, 1987; 30: 2161
- [8] Reza M, Hasan M, Guthrie R I L. *Metall Mater Trans*, 1995; 26B: 731
- [9] Lait J E, Brimacombe J K, Weinberg F. *Ironmaking Steelmaking*, 1974; (2): 90