

电磁连铸复合式结晶器内钢液流场的数值模拟*

钱忠东 李本文 李东辉 王恩刚 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 110004)

摘要 采用数值模拟方法分析了电磁连铸复合式结晶器内的流场, 对静磁场磁感应强度不同时组合磁场下的流场进行了比较. 在此基础上, 分析了电磁连铸复合式结晶器的工作原理. 分析结果表明: 电磁连铸复合式结晶器不仅具有电磁制动和软接触两种功能, 而且能够控制弯月面区域的速度, 使其保持在合适的范围内, 从而有效地防止了电磁制动结晶器在需要较大制动强度时对弯月面制动过死及软接触结晶器弯月面波动剧烈易引起卷渣的弊端.

关键词 连铸, 复合式结晶器, 钢液流场, 数值模拟

中图分类号 O242, TG249.7 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)011-1123-05

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW FIELD IN A NEW MOLD WITH HYBRID MAGNETIC FIELDS FOR CONTINUOUS CASTING

QIAN Zhongdong, LI Benwen, LI Donghui, WANG Engang, HE Jicheng

Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: QIAN Zhongdong, Tel: (024)23968221, E-mail: mhdqian@hotmail.com

Manuscript received 2001-03-21, in revised form 2001-07-23

ABSTRACT The flow field in a new mold with hybrid magnetic fields with combination of alternative and static electromagnetic fields for continuous casting was simulated. The comparison of the results with different static magnetic flux density was conducted. The principle of the new mold was analyzed. The results show that the new technique not only has the advantages of both soft contact EMC (electromagnetic continuous casting) and EMBR (electromagnetic braking) but also overcomes some shortcomings of the two techniques in controlling the meniscus.

KEY WORDS continuous casting, mold with hybrid magnetic field, flow field of molten steel, numerical simulation

符号表

\vec{A} 磁矢位, A/m
 \vec{E} 电场强度, V/m
 \vec{H} 磁场强度, A/m
 \vec{J} 电流密度, A/m²
 ν 磁阻率, m/H
 ε 介电常数, F/m
 μ 磁导率, H/m

σ 电导率, S/m
 \vec{B} 磁感应强度, T
 H_{τ} 弯月面的切向应变磁场强度, A/m
 R_1, R_2 弯月面的主要曲率, m
 Γ 表面张力系数
 \vec{u} 钢液流动速度, m/s
 N 磁作用参数
 k 湍动能, m²/s²
 ε 湍流耗散率, m²/s³
 ρ 密度, kg/m³
 φ 电位, V
 D_m 磁场衰减放大倍数
 B_{\perp} 与速度方向垂直的静磁场磁感应强度, T

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

收到初稿日期: 2001-03-21, 收到修改稿日期: 2001-07-23

作者简介: 钱忠东, 男, 1976 年生, 博士生

软接触连铸和电磁制动是近年来国内外深入研究的钢坯电磁连铸技术。软接触连铸技术的基本原理是,在具有透磁和聚能结构的软接触结晶器外围安装感应圈,使高频磁场在铸坯表面形成感应涡流和指向液芯的电磁力,从而降低铸坯与结晶器的接触压力和振动摩擦力,使保护渣渗流通畅,铸坯表面振痕减轻^[1-3]。近年来,该技术在日、韩等国已开始工业性实验^[3]。电磁制动技术的基本原理是在结晶器两个宽面上沿其宽度方向配置电磁铁,构成横穿结晶器厚度的磁路,从而使水口两侧流出的流股切割磁场产生的感应电流在钢水内部形成一个回路,该感应电流与磁场相互作用产生电磁力,其方向与流股方向相反,从而制动流股使其减速^[4]。

电磁连铸复合式结晶器是在上述技术的基础上提出的一项新技术。电磁连铸复合式结晶器技术的基本原理是:使用具有透磁和聚能结构的结晶器在弯月面区域施加高频磁场,在水口区域施加静磁场,以同时达到软接触和电磁制动的目的^[5]。文献^[5]对电磁连铸复合式结晶器内的磁场分布进行了研究,从磁场分布的角度分析了该技术的可行性。然而,迄今为止,还未见到关于电磁连铸复合式结晶器内流场的研究报告。本文采用数值模拟的方法对电磁连铸复合式结晶器内的流场进行研究,并在此基础上分析了该技术的工作原理,为该项技术的应用提供了理论依据。

1 数值模拟

图1为电磁连铸复合式结晶器的结构见文献^[5],模拟过程分为三部分:电磁场的数值模拟;弯月面形状的数值模拟;流场的数值模拟。

1.1 电磁场的数值模拟

1) 模型的建立。在组合磁场的计算过程中,需要考虑两种磁场之间的相互影响。因此,本文使用了如下假设条件:一、铁芯的存在影响交变磁场的分布;二、交变磁场在铁芯中感应出的电流与静磁场的源电流相比,可以忽略;三、交变磁场对静磁场的影响只表现在两种磁场共同存在区磁场的矢量迭加。

静磁场的计算结果作为交变磁场计算的初始条件之一,铁芯包括在计算区域内。参数的选择为:高频电源频率 $f=20\text{ kHz}$,电流 $I_a=200\text{ A}$,恒稳磁场的电流 $I_b=100\text{ A}$,高频感应线圈与静磁场发生源相距 $D_L=75\text{ mm}$ ^[5]。

2) 交变磁场的模拟。采用时域差分方法计算交变磁场。Maxwell方程的两个旋度方程表示如下^[6-9]

$$\nabla \times \vec{E}_a = \mu \frac{\partial \vec{H}_a}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H}_a = \epsilon \frac{\partial \vec{E}_a}{\partial t} + \sigma \vec{E}_a \quad (2)$$

以 x 分量为例,展开方程式(1),(2)后可得

$$\frac{\partial H_{ax}}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_{ay}}{\partial z} - \frac{\partial E_{az}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_{ax}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial E_{az}}{\partial y} - \frac{\partial E_{ay}}{\partial z} - \sigma E_{ax} \right) \quad (4)$$

3) 静磁场的模拟。对于静磁场,式(2)可简化为

$$\nabla \times \vec{H}_b = \vec{J}_b \quad (5)$$

引入矢量磁位 \vec{A} , \vec{A} 满足

$$\vec{B}_b = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

由于

$$\vec{B}_b = \mu \vec{H}_b \quad (7)$$

将式(6)代入式(5),并利用矢量恒等式,得

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J}_b \quad (8)$$

在直角坐标系下,式(8)离散形式为

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(v_z \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_y \frac{\partial A_x}{\partial z} \right) = -J_{bx} \quad (9)$$

本文作者采用简化条件下的理论解析及实验测试结果验证了计算方法的正确性^[5]。

1.2 弯月面形状的计算

本文采用文献^[2]的简化条件,认为弯月面形状由磁压力 P_m 、钢液静压力 P_g 及表面张力 P_s 决定(忽略动压力及保护渣的影响),其中,

$$P_m = \frac{\mu H_r^2}{2} \quad (10)$$

$$P_g = \rho g z \quad (11)$$

$$P_s = \Gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (12)$$

在每个节点上,以上三者满足

$$P_m + P_g + P_s = \text{Constant} \quad (13)$$

1.3 流场的数值模拟

1) 简化条件。在电磁连铸复合式结晶器内,交变磁场与静磁场同时存在,电磁力的分布非常复杂,本文采用如下简化条件:交变电磁力的作用只考虑其时均作用效果;流动引起的感应电流不影响磁场的分布;交变磁场与静磁场感应电流作用以及静磁场与交变感应电流作用产生的电磁力时均效果为零。

2) 基本方程。连续性方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (14)$$

动量方程

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_e \nabla \vec{u}) + \vec{F} + \rho \vec{g} \quad (15)$$

3) 湍流模型. 考虑到静磁场覆盖区域的 Hartmann 效应, 采用修正的湍流模型 [10].

湍动能方程在标准方程源项中添加如下修正式

$$-A \cdot D_m \sigma B_{\perp}^2 k e^{-BN}$$

湍动能耗散率方程则在标准方程源项中添加如下修正式

$$-A \cdot D_m \sigma B_{\perp}^2 k \left(\frac{\varepsilon}{k}\right)$$

式中 A, B 为实验常数. 本文取 $A=0.05, B=0.9$.

4) 电磁力的计算. 制动电磁力的计算由磁流体力学理论可知

$$\nabla \cdot \vec{J}_b = 0 \tag{16}$$

$$\vec{E}_b = -\nabla\varphi \tag{17}$$

$$\vec{J}_b = \sigma(\vec{E}_b + \vec{u} \times \vec{B}_b) \tag{18}$$

由以上三式可推得电位方程如下

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla\varphi) = \nabla \cdot \sigma(\vec{u} \times \vec{B}_b) \tag{19}$$

电位方程与流场耦合求解, 边界条件参照文献 [4]. 制动电磁力可表示为

$$\vec{F}_b = \vec{J}_b \times \vec{B}_b \tag{20}$$

5) 交变电磁力的计算. 忽略交变电磁场的制动效应, 式 (18) 可简化为

$$\vec{J}_a = \sigma \vec{E} \tag{21}$$

交变电磁力可表示为

$$\vec{F}_a = \vec{J}_a \times \vec{B}_a \tag{22}$$

交变电磁力的时均值与制动电磁力之和作为源项代入动量方程 (15)

$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_b \tag{23}$$

2 数值模拟结果及分析

本文针对 1550 mm×260 mm 板坯进行计算, 交变磁场源电流取 200 A, 电源频率为 20 kHz, 静磁场源电流取 0—200 A. 图 1 为交变磁场单独作用下的流场, 图 2 为静磁场单独作用下的流场, 图 3 与图 4 为静磁场磁感应强度不同时组合磁场作用下的流场.

由图 2c 与图 3c 的比较可以看出, 在组合磁场的作用下, 上下两个回返流受到了抑制, 减轻了水口出流对窄面的冲刷, 这一流动状态与静磁场单独作用下的流场非常相似, 可见电磁连铸复合式结晶器具有电磁制动的功能; 图 1b 与图 3b 的比较表明, 在组合磁场的作用下, 在结晶器窄面弯月面区域存在搅拌引起的涡旋流, 这一现象与交变磁场单独作用下的流场相似; 由图 3c 和图 4c 可以看出, 在组合磁场作用下, 在结晶器宽面弯月面区域存在

涡旋流, 这一现象与静态结晶器内交变电磁力单独作用下的流场非常相似 [2]. 可见, 软接触电磁连铸结晶器的搅拌作用在电磁连铸结晶器内仍然存在. 图 3 与图 4 的比较表明, 静磁场磁感应强度组合磁场作用下的流场形态影响较大. 为考察组合磁场作用下软接触效果, 本文对静磁场磁感应强度变化时, 组合磁场作用下的弯月面与结晶器壁接触点处的流体压力进行了计算, 结果如图 5 所示, 可以看出, 在静磁场磁感应强度小于 0.13 T 时, 随着静磁场磁感应强度的增大, 组合磁场作用下的接触点处的流体压

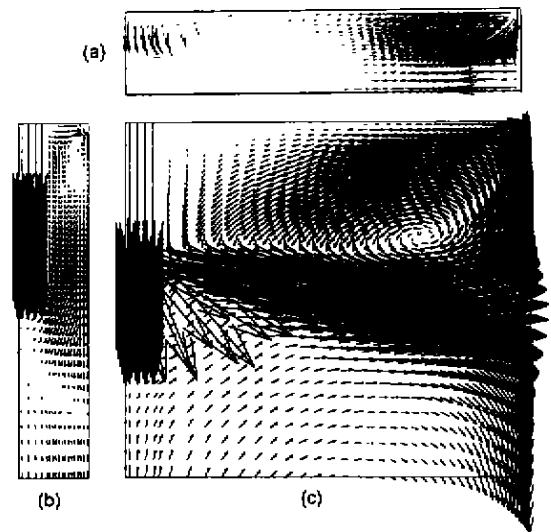


图 1 软接触单独作用下的流场
Fig.1 Fluid flow under soft contact EMC
(a) on the surface (b) at 1/2 thickness (c) at 1/2 width

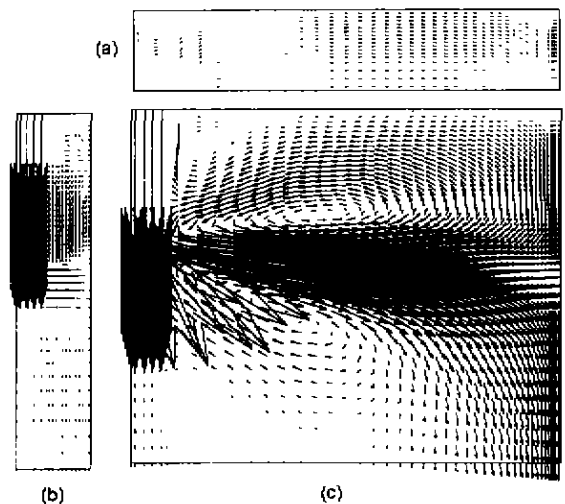


图 2 电磁制动单独作用下的流场
Fig.2 Fluid flow under EMBR ($B_b=0.13$ T)
(a) on the surface
(b) at 1/2 thickness
(c) at 1/2 width

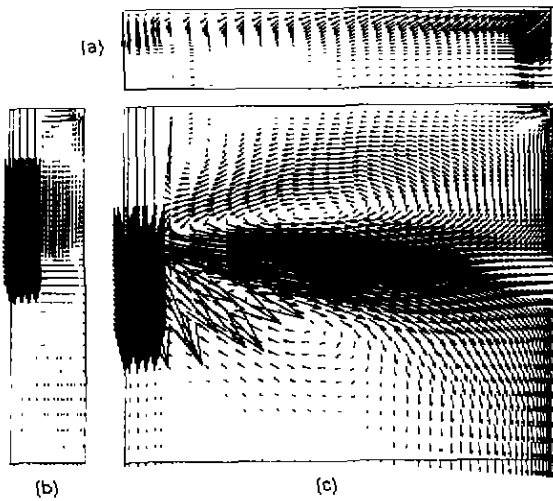


图3 组合磁场作用下的流场

Fig.3 Fluid flow under hybrid magnetic field ($B_b=0.13 T$) (a) on the surface (b) at 1/2 thickness (c) at 1/2 width

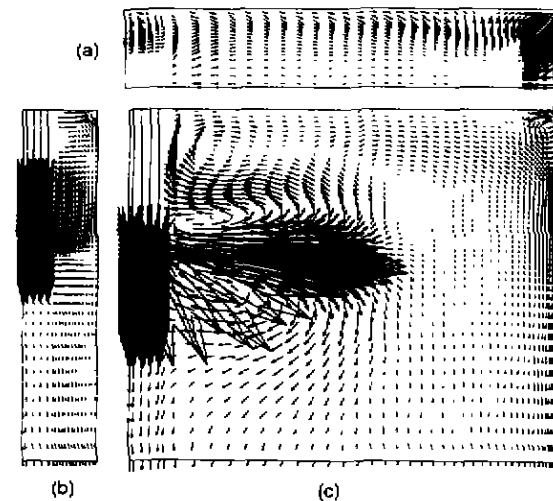


图4 组合磁场作用下的流场

Fig.4 Fluid flow under hybrid magnetic field ($B_b=0.26 T$) (a) on the surface (b) at 1/2 thickness (c) at 1/2 width

力逐渐减小。这一结果表明，与软接触单独作用相比，组合磁场作用下接触点处的流体压力可通过调节静磁场的磁感应强度进一步减小，使保护渣的通道进一步加宽，使软接触的作用效果变得明显。由图 1a、图 2a、图 3a 的比较可以看出，组合磁场作用下，液面处的流场形态与软接触单独作用下相似，与电磁制动单独作用相比，流速显著增大，可见，在组合磁场作用下，液面处能够保持一定的流速，促进传热过程，在制动强度较大时不会因制动过死发生凝固。另一方面，在传统的软接触电磁连铸结晶器中，液面流速较大，易造成卷渣。为研究这一问题，本文对静磁场磁感应强度不同时组合磁场作用下液面处的最

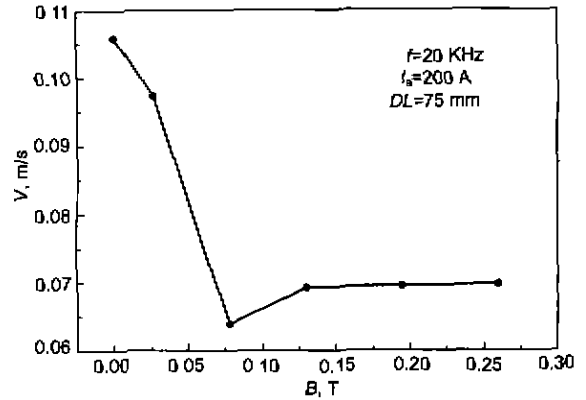


图5 接触点处流体压力与静磁场磁感应强度的关系

Fig.5 Relationship of the pressure on contact point and static magnetic flux density

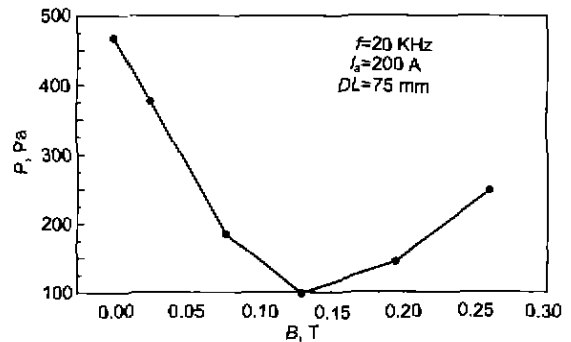


图6 液面最大流速与静磁场磁感应强度的关系

Fig.6 Relationship of the maximum velocity on the surface and static magnetic flux density

大流速进行了计算，结果如图 6 所示。由图 6 中结果可以看出，随着静磁场磁感应强度的增大，液面处的流速迅速减小，在达到某一值后略有回升并维持在一定范围内。可见，组合磁场能控制液面处的流速，有利于减少卷渣事故的发生。

3 电磁连铸复合式结晶器的工作原理分析

从图 3 和图 4 可以看出，随着静磁场磁感应强度的增大，弯月面区域的涡旋流逐渐变得明显。本文认为，在电磁连铸复合式结晶器内，静磁场主要作用于浸入式水口的出流和上下两个回返流，而对交变电磁力的搅拌作用引起的涡旋流影响不大。真正影响涡旋流大小的是上返流。图 7 是静磁场磁感应强度变化时，组合磁场作用下的流场示意图，图中 $B_b=0$ 表示软接触单独作用。由图 7 可以看出，在 $B_b=0$ 时，上返流在与涡旋流接触点处与涡旋流方向相同，因此，增大了液面处的流速；在 $B_b=0.13 T$ 时，上返流破坏了涡旋流的形成，此时，上返流对涡旋

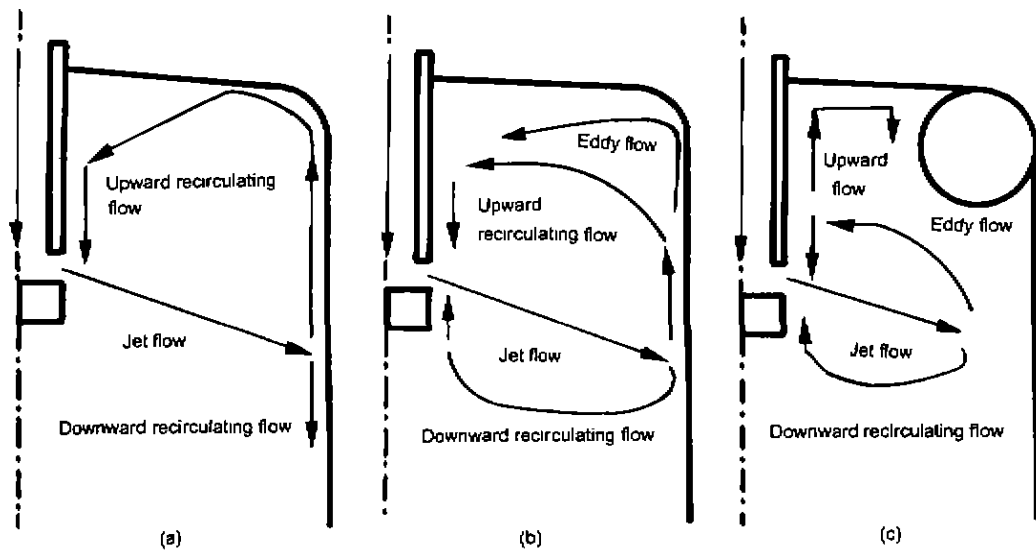


图7 电磁连铸复合式结晶器工作原理图

Fig.7 Principle of the mold with hybrid magnetic fields

(a) $B_b=0$ (b) $B_b=0.13\text{T}$ (c) $B_b=0.26\text{T}$

流的抑制作用使液面处的流速达到最小。在 $B_b=0.26\text{T}$ 时，上返流对涡旋流已没有抑制作用，而上返流在水口处形成的二次回旋流与涡旋流方向相同，因此对涡旋流有促进作用。这就完整地解释了图 4.5 中接触点流体压力与液面处的最大流速随静磁场磁感应强度的增大先减小后增大的原因。

4 结论

(1) 电磁连铸复合式结晶器能同时实现电磁制动和软接触两种功能。

(2) 与传统的软接触结晶器相比，电磁连铸复合式结晶器的软接触效果更加明显，液面的流速得到控制，有利于减少卷渣事故的发生。同时，克服了电磁制动结晶器在需要较大静磁场强度时对弯月面制动过死从而发生凝固的弊端。

(3) 在电磁连铸复合式结晶器内，影响弯月面处涡旋流大小的主要是上返流。

参考文献

- [1] Toh T, Takeuchi E, Hojo M, Kawi H, Matsumura S. *ISIJ Int*, 1997; 37: 1112
- [2] Cha P R, Hwang Y S, Nam H S, Chung S H, Yoon J K. *ISIJ Int*, 1998; 38: 403
- [3] Deng K, Ren Z M, Jia G C. *Acta Metall Sin*, 1999; 10: 1112
(邓康, 任忠鸣, 蒋国昌. 金属学报, 1999; 10: 1112)
- [4] Hwang Y S, Cha P R, Nam H S. *ISIJ Int*, 1997; 37: 659
- [5] Qian Z D, Li B W, He J C, Jia G L. *J Northeastern Univ*, 2001; 1: 79
(钱忠东, 李本文, 赫冀成, 贾光霖. 东北大学学报(自然科学版), 2001; 1: 79)
- [6] Gandhi Om P, Chen J Y. *Bioelectromagnetics Suppl*, 1992; 1: 43-60
- [7] Yee K S. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1966; 3: 302
- [8] Taflov A E, Brodwin M. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1975; 23: 623
- [9] Sadiku M N O. *Numerical Techniques in electromagnetics*, London: CRC Press Inc. 1992
- [10] Ji H C, Gardener R A. *Int J Heat Mass Trans*, 1997; 40: 1839