



# 利用稳恒磁场控制结晶器钢水流动的分析

荣 毛 斌

(中国科学院力学研究所, 100080)

**摘要** 对稳恒磁场作用下结晶器内二维钢水的流动进行了数值模拟, 结果表明, 磁场的作用可以有效地减少钢水流股速度并使流股分散, 随着哈特曼数的增大, 磁场的制动效应增强.

**关键词** 连续铸钢, 电磁制动, 磁流体力学流动

## 引 言

连续铸钢实践表明, 板坯表面和内部的缺陷及初生坯壳的腐蚀大都与结晶器内钢水流动结构密切相关. 当拉速提高时, 从水口两侧孔吐出的过热钢水流股高速冲向窄面, 易使初生坯壳重熔、拉漏; 高速的流股将阻断夹杂物的上浮并且沿窄面上升的反转流加强, 使其中保护渣易被卷吸, 增加了内部夹渣. 因此, 为了减少板坯的缺陷和提高拉速, 必须减小结晶器内流股的速度并改变其中的流动结构, 行之有效的手段是采用电磁制动技术.

80年代初期, 瑞典A SEA公司和日本川崎公司联合开发了板坯结晶器电磁制动技术(EMBR)并在水岛钢厂进行了实机实验, 取得了良好冶金效果<sup>[1]</sup>. 80年代末期川崎公司等进行了电磁制动条件下结晶器内流动和传热的理论研究<sup>[2,3]</sup>, 中国科学院力学研究所和北京科技大学共同进行了低熔点合金的电磁制动模拟实验<sup>[4]</sup>, 取得了减少流股速度的明显效果. 目前国际上电磁制动技术有了很大发展, 已成为控制高速板坯连铸中钢水流动的重要手段.

为了更合理更有效地设计和使用电磁制动系统, 本文采用数值分析方法, 研究了稳恒磁场作用下, 结晶器内钢水二维定常流动, 并考虑了湍流因素的影响. 计算结果表明, 外加稳恒磁场不仅可以有效地减少流股速度达50%以上, 而且改变铸坯中钢水流动结构, 使流股分散. 随着磁场增强或哈特曼数增大, 制动效果加强.

## 1 二维钢水流动的数学模型

在具有电磁制动系统的铸坯中, 钢水从浸入式水口两侧侧孔以速度 $V_0$ 吐出, 形成两股射流, 称为

流股. 水口插入深度为 $h$ , 侧孔半径 $r$ , 倾角 $\alpha$ , 板坯宽度 $2a$ , 钢水的弯月面为自由面. 浇注速度 $V_c$ . 电磁制动器由一对 $\pi$ 形电磁铁组成, 安装在结晶器的两个宽面上, 构成横穿结晶器的闭合磁路. 每对磁极产生垂直于流股速度的磁场, 其磁感应强度矢量为 $B$ . 假定流动为二维定常对称流动, 自由面为水平面, 钢水不可压缩, 导电率 $\sigma$ 和粘性系数 $\mu$ 是常数, 小磁雷诺数和不考虑温度对流动的影响.

钢水流股流经垂直于它的磁场时, 就在其中产生感应电流, 其密度为 $J$ , 它与当地磁场相互作用产生一个洛仑兹体积力作用于钢水上, 因此在动量方程中增加了一个电磁体积力 $J \times B$ . 重力与压力梯度合并考虑, 引入归一化压力 $P^*$ ,  $\Delta P^* = \nabla p - \rho g$ ,  $p$ 、为流体压力和密度,  $g$ 为重力加速度矢量. 钢水的雷诺数较高, 流动为湍流, 由于钢水的导电率较高, 在一般情况下, 作用于钢水上的电磁力远大于粘性力, 因此, 我们可以采用有效粘性系数 $\mu_e = \mu + \mu_i = \text{常数} = 100\mu^{[5]}$ ,  $\mu_i$ 为湍流粘性系数, 这一简化的模型在实际应用中是可行的和方便的. 在小磁雷诺数假定下, 钢水中磁场等于外加稳恒磁场 $B$ . 选取直角坐标系 $\{xoy\}$ , 采用无量纲量 $u, v, p, b, \phi, x$ 和 $y$ , 它们分别表示无量纲的速度 $x, y$ 分量, 压力, 磁感应强度, 电场电位, 坐标. 相应的特征量分别为 $V_c, \rho V_c^2, B_0, aB, \mathcal{N}_c$ 和 $a$ . 其中 $B_0$ 为最大磁感应强度. 钢水和电磁场满足以下无量纲磁流体力学方程组

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{M^2 b}{Re} \left( ub + \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{M^2 b}{Re} \left( vb - \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{\partial(\nu b)}{\partial x} - \frac{\partial(\mu b)}{\partial y} \quad (4)$$

磁感应强度  $b$  采用实测分布. 在有效磁场区内: 在一般情况下  $b \leq 1$ , 在均匀磁场情况下  $b = 1$ ; 在有效磁场区之外  $b = 0$ . 无量纲方程组 (1) ~ (4) 中仅含两个独立的无量纲参数: 哈特曼数  $M = aB \cdot \sqrt{\sigma/\mu_c}$  和雷诺数  $Re = \rho V_c a / \mu_c$ .  $M$  表示电磁力相对粘性力的大小, 无磁场时  $M = 0$ . 在钢水中, 一般  $M \geq 10^2$ , 电磁力远大于钢水的有效粘性力.

流场和电位应满足的边界条件见图 1. 由于对称, 我们仅考虑半坯内流动. 在窄面上有无滑移条件和电绝缘条件, 自由面上有自由滑移条件和电绝缘条件, 在中心线上有对称条件. 钢水自水口侧孔吐出, 方向与水平面成倾角  $\alpha$ . 流出边界上有坯中流动不受下游流动影响的条件.

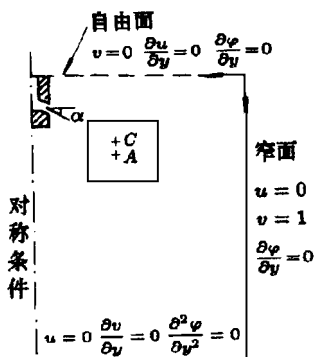


图 1 边界条件

## 2 计算方法和结果

计算域为矩形 (水口除外), 长宽比为 8: 1. 计算域划分成  $14 \times 132$  个均匀控制体. 控制体中心点为主网格点 (包括边界点),  $P$  和  $\phi$  在主网格点上求解. 同时, 采用速度分量交错网格<sup>[6]</sup>.  $u, v$  分别在相应的网点上求解. 用控制容积法将方程 (1) ~ (4) 离散, 采用解压力耦合方程的半隐式方法<sup>[6]</sup>求解离散化方程组.

钢水的物性参数是  $\rho = 7.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\sigma = 7.14 \times 10^5 \text{ s/m}$ ,  $\mu_c = 0.6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 板坯宽度  $2a = 1.4 \text{ m}$ . 水口侧孔倾角  $\alpha = -30^\circ$  和直径  $2r = 0.036 \text{ m}$ . 浇注速度  $V_c = 0.6036 \text{ m/min}$ ,  $0.8048 \text{ m/min}$ ,  $1.006 \text{ m/min}$ . 最大磁感应强度  $B_0$  为  $0, 0.1 \text{ T}, 0.15 \text{ T}, 0.2 \text{ T}, 0.3 \text{ T}$ , 无量纲参数  $h/a = 0.24285$ ,  $r/a = 0.025714$ ,  $Re$  为  $83, 111, 139, M$  为  $0, 76, 114, 152, 228$ . 磁场中心位置: (1) 在  $A$  点, 坐标

(0.5857, 0.3529); (2) 在  $C$  点, 坐标 (0.5857, 0.2928); (3) 在  $D$  点 (0.8, 0.1857).

一些典型的计算结果在图 2 (a)、2 (d) 中给出. 图 2 (a) 为无磁场  $M = 0$  和  $Re = 139$  ( $V_c = 1.006 \text{ m/min}$ ) 时, 无量纲速度矢量图. 由图可见, 自浸入式水口侧孔吐出的流股以极高的速度冲向窄面, 在冲击点处流股向上和向下分岔, 其上、下方各形成环流. 流股向上部分形成反转流, 流股的向下部分以较高的速度浸入钢水深处. 当外加磁场后, 钢水流动的速度矢量图改变了, 见图 2 (b) 和图 2 (c), 它们的磁场中心位置设在  $A$  点, 图 2 (b) 中  $M = 114$ ,  $Re = 139$ , 图 2 (c) 中  $M = 228$ ,  $Re = 139$ , 两图中, 窄面处流股的冲击点消失了, 钢水流动结构也有较大改变, 这是由于钢水流股在流经与之垂直的磁场时, 受到与其速度方向相反的电磁阻力作用, 使流股减速并分散. 向下的钢水流速明显减小, 同时上升到弯月面的反转流亦减弱且环流范围缩小. 当磁场增强或哈特曼数增大时, 流股减速更快, 弯月面附近反转流亦迅速减弱, 其环流范围越趋近水口.

磁场的位置对铸坯中钢水流动亦有显著影响. 磁场中心在  $A$  点时, 磁场作用区与弯月面和水口距离较大, 流股受磁场阻尼后向弯月面和水口下方分流; 当磁场增强或哈特曼数  $M$  增大时, 流股的分流趋势加剧. 这种分流不利于夹杂物上浮. 若磁场中心  $A$  沿着  $y$  的负方向移近弯月面到  $C$  点时, 上升到弯月面的分流大大减弱, 见图 2 (d). 若磁场中心向弯月面和水口靠近, 移至  $D$  点时, 计算结果表明在弯月面附近和水口下方的分流消失了, 但是当磁场太强时, 流股会向下严重偏斜, 使夹杂物上浮受到限制<sup>[3]</sup>. 因此要选择最佳磁场强度和磁场位置. 原则上磁场的有效作用区应靠近弯月面和水口, 以避免流股的分流.

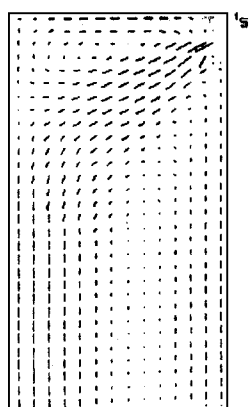
随着浇注速度或雷诺数的提高, 流股减速变缓. 但是在连铸中, 钢水的浇注速度变化范围不大, 它对于流股的电磁制动效应影响亦不大.

## 3 结论

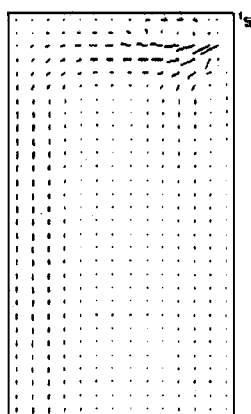
通过对以上计算结果的分析, 我们得到如下结论:

(1) 稳恒磁场与钢水流股的相互作用能有效地减少流股速度并使流股分散. 流股减速率可达 50% 以上.

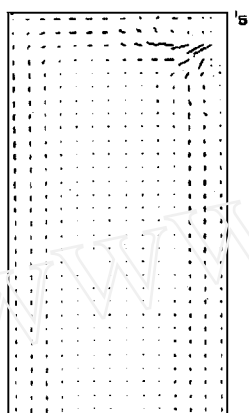
(2) 稳恒磁场的作用使流股对窄边的冲击明显减小.



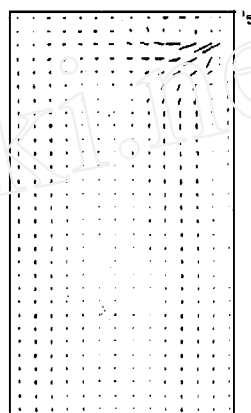
(a)  $Re = 139, M = 0$



(b)  $Re = 139, M = 114$



(c)  $Re = 139, M = 228$



(d) 磁场中心在  $c$  点,  $Re = 139, M = 114$

图 2 速度矢量图

(3) 稳恒磁场的作用使上升到弯月面的反转流减弱, 其范围亦缩小。

(4) 稳恒磁场的强度和位置对铸坯中钢水流动和流股的制动均有显著影响。当磁场强度增强或哈特曼数增高时, 磁场对流股制动效应显著增强, 同时弯月面附近的反转流更迅速减弱和范围缩小。磁场太强, 则流股向下严重偏斜, 使夹杂物上浮受到抑制。因此, 要适当选择磁场强度和位置。

### 参 考 文 献

- 1 Nagai J, Suzuki K, Kujima S, et al. Steel flow control in a high-speed continuous slab caster using an electromagnetic brake. *Iron and Steel Engineer*, 1984, 61 (5): 41~ 47
- 2 Takatani K, Nakai K, Kasai N, et al. A nalysis of heat transfer and fluid flow in the continuous casting mold with electromagnetic brake. *ISIJ International*, 1989,

29 (12): 1063~ 1068

- 3 Tozawa H, Kitaoka H, Sorimachi K, et al. Flow Control of Molten Steel in Continuous Casting Mold. In: *Proceedings of the Sixth International Iron and steel congress, Nagoya, 1990, ISIJ, 1990: 438~ 445*
- 4 毛斌, 邢文彬等. 结晶器电磁制动的实验研究. 见: 第四届连铸铸钢学术会议论文选 (桂林, 1990年12月22~ 26日). 北京: 中国金属学会连铸学会, 1990: 189~ 194
- 5 Genma N, et al. The linear-motor type in mold electromagnetic stirring technique for the slab continuous caster. *ISIJ International*, 1989, 29 (12): 1056~ 1062
- 6 帕坦卡 S V. 传热与流体流动的数值计算. 北京: 科学出版社, 1984: 136~ 156

(1995年10月29日收到第1稿,  
1996年4月12日收到修改稿)