

# 电磁控制下结晶器内流谱和 夹杂轨迹的数值预测

李宝宽 张永杰 赫冀成

东北大学

**摘要** 对直线电磁铁作用下板坯连铸机结晶器内磁场、钢液流谱和夹杂物运动轨迹进行数值预测,并提出用壁面承受的剪应力的最大差值来标定液流对结晶器窄面凝固壳的冲击强度.结果表明,采用电磁控制(EMB)时,结晶器内的钢液流谱能被有效地控制,水口钢液射流对结晶壁的冲击可大大减弱,源电流强度和线圈安放位置是决定控制效果的关键因素.

**关键词** 结晶器,流谱,夹杂物轨迹,电磁控制

## Numerical Prediction on the Flow Patterns of Molten Steel and Trajectories of Inclusions in Continuous Casting Mold Controlled by the Electromagnetic Field

*Baokuan Li Zhang Yongjie He Jicheng*

Department of Thermal Engineering, Northeastern University Shenyang 110006, Liaoning, P. R China

**ABSTRACT** The numerical prediction is conducted on the magnetic field, fluid patterns of molten steel and trajectories of inclusion particles in continuous casting mold controlled by the electromagnetic brake (EMB). The difference between maximum and minimum of shear stress on wall is used to scale the strength of jet imping on the solidified shell in the narrow face wall by molten steel discharged from the immeresd nozzle. When the EMB is applied, the flow patterns of molten steel in the mold is greatly changed, and the impingement strength of the jet is reduced. It is found that the successful control of flow pattern depends on the coil current and location of direct-current magnet.

**KEY WORDS** continuous casting mold, flow pattern, trajectories of inclusion, electromagnetic

采用电磁场控制结晶器内钢液流动,其原理是运动的钢液与外加磁场交互作用产生感应电流,感应电流与磁场作用产生一个与钢液流动方向相反的电磁力,利用电磁力控制或制动结晶器内流谱.关于电磁场控制的工艺特性研究已有很多报道.<sup>[1,2]</sup>

本文应用数值分析方法研究电磁控制对结晶器内的钢液流谱和夹杂物运动特性的影响,为改

善电磁控制的效果提供理论依据。

## 1 数学模型

### 1.1 磁场的计算

描述电磁场的 Maxwell 方程组为：

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}_r \quad (1)$$

磁场性质方程：

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2)$$

对直流电产生的静磁场，涡电流不存在；对于导电率很高的液态金属，稳态时自由电荷不存在。引入磁矢位  $\vec{A}$ ，使  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 。整理上述方程，得：

$$-\nabla^2 A = \mu \cdot \vec{j}_r \quad (3)$$

故磁场特性的计算归结为求解方程 (3)。该式忽略了运动钢液产生的电流对静磁场的影响（经估算，数量级相差  $10^3$ ）。

电流密度  $\vec{j}_r = I/S$ ，其中  $I$  是电流强度， $S$  是导线横截面。

### 1.2 磁流体流动计算

如图 1 所示，板坯连铸机结晶器宽厚比较大，其流动与传热过程可以用平行宽面且通过水口中心的二维平面加以很好地展示，由于对称性，只需模拟结晶器的二分之一区域即可。假定钢液是稳定的湍流，忽略结晶器内凝固壳的厚度和液面上渣层的存在。钢液的缓慢流动对磁场分布的影响可忽略，但流动钢液与磁场产生的感应电流是产生电磁力的基础，计算时不可忽略。

#### (1) 基本方程

结晶器内钢液流动的基本方程如下：

$$\text{连续性方程为：}\nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0$$

动量方程为：

$$\vec{\mu} \cdot \nabla (P \vec{U}) = -\nabla p + \nabla (\mu_e \nabla \cdot \vec{U}) + \vec{F}_{em} + \vec{g}$$

$$\text{其中 } \mu_e = \mu + C_{\mu} \rho \frac{K^2}{\epsilon}$$

湍动能  $K$  方程及其耗散率  $\epsilon$  由 Launder 和 Spalding<sup>[6]</sup> 提出的湍流模型方程计算。

#### (2) 冲击强度确定

由粘性流体理论可知，射流对壁的冲击强度越大，壁承受的摩擦力或剪应力也越大，故将冲击强度  $Q$  用固体壁承受运动流体的剪应力的最大差值来标定：

$$Q = (\tau_w)_{\max} - (\tau_w)_{\min} \quad \text{其中：}\tau = -\mu \frac{\partial v}{\partial x}$$

#### (3) 电磁力的计算

动量方程中的  $\vec{F}_{em}$  是流动的钢液和外加磁场作用所产生的感应电流  $\vec{j}$  与磁场  $\vec{B}$  作用产生的电磁力，由  $\vec{F}_{em} = \vec{j} \times \vec{B}$  计算<sup>[23]</sup>。

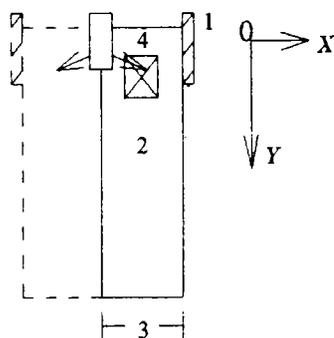


图 1 计算区域示意图

- 1、结晶器壁面，2、钢液  
3、计算区域宽度，4、线圈

磁感应强度  $\vec{B}$  在连铸结晶器中的分布由前节计算, 而电流密度  $\vec{J}$  则需采用磁流体力学理论<sup>[2]</sup> 计算:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad \vec{E} = -\nabla \cdot \varphi \quad \vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B})$$

由以上 3 式可推得电位  $\varphi$  方程如下:  $\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = \nabla \cdot \sigma(\vec{U} \times \vec{B})$

在方程中出现了流体流动速度, 也就是说流体流动速度对电位  $\varphi$  有影响, 而电位分布又对电流密度  $\vec{J}$  有影响; 电流密度  $\vec{J}$  则通过电磁力  $\vec{F}$  对流场发生作用, 故需要将电位方程与流场耦合求解.

#### (4) 边界条件及算法

① 窄面 本计算区域不包括糊状区以外的区域, 窄面边界对应着糊状区内侧的树枝状晶梢部.  $k-\epsilon$  模型是适用于高湍流运动的数学模型, 固体壁面附近通常用壁面函数法处理. 固体壁面上电位  $\varphi$  的边界条件为第一类边界条件.

② 中心对称面 法向速度以及其它变量的法线方向导数为零.

③ 顶表面 法向速度为零, 其它变量的法线方向导数为零.

④ 底部出口 若计算域足够长, 流动可视为充分发展流, 因此令所有变量沿底部边界法线方向导数为零.

⑤ 入口 流场的入口速度由铸造速度折算, 湍流参数按文献 [5] 给定, 电位  $\varphi$  按第二类边界条件确定.

采用控制容积积分法离散模型方程, 以交错网格系统存储速度分量, 主网格数为  $34 \times 60$ , 流场计算采用 SIMPLEC 法进行, 离散后的代数方程用 ADI 法求解, 当连续方程的质量源小于  $10^{-4}$ , 认为迭代收敛.

### 1.3 夹杂物在钢液流场中的运动

图 4 是一个球形颗粒在稳态流场受力分析, 根据牛顿第二运动定律, 可写出如下运动方程:

$$V_p \rho_p \frac{d\vec{V}}{dt} = V_p \rho g - V_p \rho_p g - \frac{\pi}{8} \rho d^2 C_d |\vec{V} - \vec{U}| (\vec{V} - \vec{U}) - C_A \rho \frac{d\vec{V}}{dt}$$

式中  $V_p$  颗粒体积,  $d$  颗粒直径,  $\rho$  流体密度,  $\rho_p$  颗粒密度,  $g$  重力常数,  $U$  流场速度,  $V$  颗粒速度,  $t$  时间,  $C_d$  阻力系数.

该方程中右侧第一项是颗粒所受浮力, 第二项是颗粒重力, 第三项是颗粒运动时所受粘性阻力, 第四项是附加质量力, 其中  $C_A$  的理论值是 0.5, 实际用时考虑颗粒背涡等因素, 取 0.3.

利用四阶的 Rounge-kutta-Gill 求解上述方程, 时间步长取 0.00025s.

## 2 结果与讨论

### 2.1 无电磁场影响时结晶器内流谱

无电磁场影响时, Thomas 等<sup>[3]</sup> 已报导了结晶器内各种条件下流场的模拟结果, 其中分析了出口边界条件、模拟区域长度、水口倾角及水口浸入深度对流场的影响. 本文利用 Thomas 等无电磁场控制的结晶流场实验结果检验模拟结果的准确性, 然后对电磁控制下的流场进行分析.

结晶器的几何参数、操作条件及钢液热物性见表 1.

表 1 计算时结晶器输入条件

	钢液	水
粘度, $\mu/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	0.0055	0.000959
密度, $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	7015	1000
电导率 $\sigma$ ( $1/\Omega \cdot \text{m}$ )	$7.14 \times 10^5$	~
水口宽度/m	0.0148	0.0432
水口出流角/ ( $^\circ$ )	28.3	28.3
结晶器半宽度/m	0.660	0.6856
水口浸入深度/m	0.265	0.265
铸速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.0167	0.0167

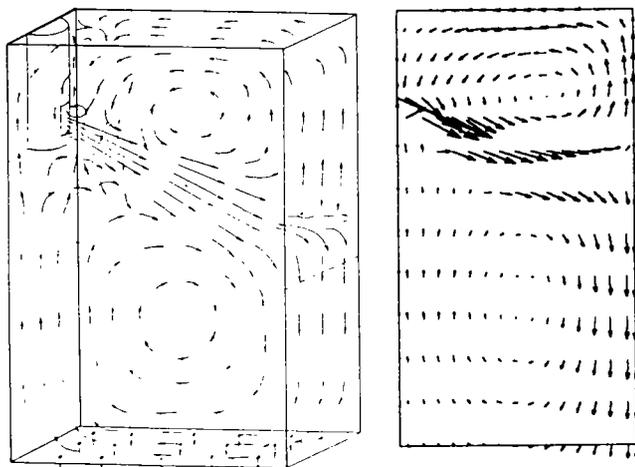
图 2 Thomas 等<sup>[3]</sup>实验结果与本模型计算结果比较

图 2 是 Thomas 等<sup>[5]</sup>的水模型实验结果与本研究的计算结果对比. 其流动趋势上基本一致, 即上、下各有一个回流区, 中间为射流区. 用水模型实际结晶器流场有一个缺陷, 即模型很难获得足够长度模拟出口部位的现象, 因而影响整个流场模型的准确性.

图 3a、b 是不同铸速时模拟的结晶器流场 (水口倾角为向下  $15^\circ$ , 钢液的出流角约为  $28^\circ$ ). 该结果与 Thomas 等的结果十分吻合, 随铸速的增加, 两回旋区回旋速度加剧, 下旋区涡心有上移倾向.

## 2.2 电磁场作用下结晶器内流谱

图 3c、d 是相同铸造条件下, 施加电磁场时结晶器中流谱的模拟结果, 可见加与不加电磁场结晶器中流谱改变很大, 表明电磁场能够强烈地影响结晶器内钢液流动路径.

没有电磁场作用时, 流场在浸入式水中上下形成两个回旋区. 这是由于钢液从水口出来, 形成一股很强射流. 射流撞击窄面受阻, 形成向上、向下两个分散流股. 向上流股在重力作用下向下流动, 且由于粘性存在, 射流对附近的钢液有带动作用, 这样形成上、下两个大回旋区.

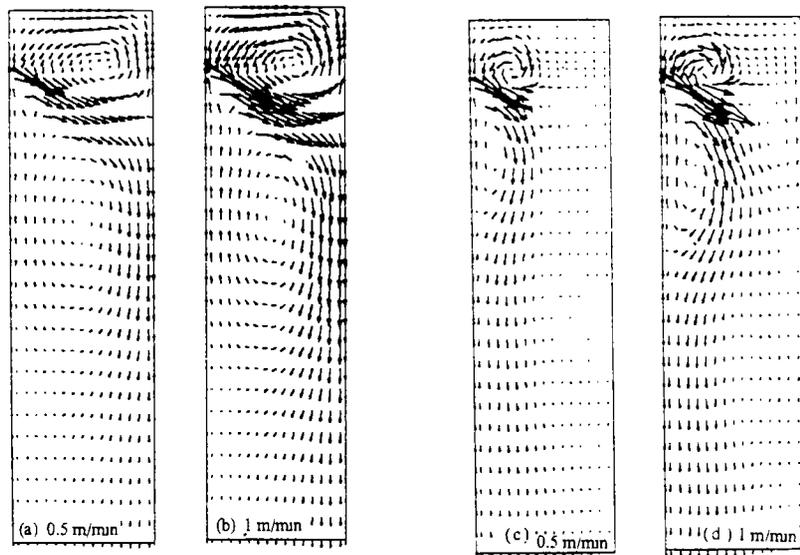


图3 无 (a、b) 或有 (c、d) 电磁场时结晶器内流谱，铸速 (m/min): a. 0.5, b. 1; C. 0.5, d. 1

当有电磁场作用时，在未达到结晶器窄面时钢液射流就被强制地改变方向，分成上、向下两个流股，形成两个相对小的回旋区，且回流有加剧趋势，而对窄面冲击却变得非常弱。图4是铸速为1m/min时窄面凝固壳承受的剪应力分布，可见电磁场作用下凝固壳承受的剪应力显著下降，

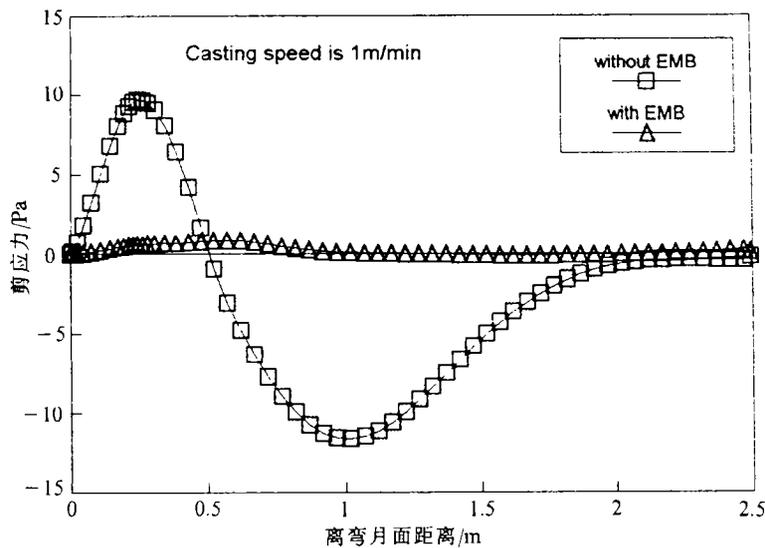


图4 加与不加电磁场时，结晶器窄面凝固壳承受剪应力对比

同时弯月面下钢液的流速也大大降低。

### 2.3 夹杂物的运动

尽管所生产的钢种有差异，但都有一些直径在  $50\sim 200\mu\text{m}$  的大夹杂粒子在生产过程中形成，并进入凝固坯中影响产品质量。针对该直径范围内气泡 ( $\text{Ar}$  气密度为  $0.37\text{kg}/\text{m}^3$ ) 和非金属 (密度为  $3000\text{kg}/\text{m}^3$ ) 夹杂粒子进行模拟计算。计算中注意到，结晶器内能够上浮的气泡直径大于

80 $\mu\text{m}$ ，非金属夹杂直径大于130 $\mu\text{m}$ 。无磁场作用时，钢液射流将所有直径的夹杂粒子带到窄面凝固壳的冲击点，在该点随流股转向，直径大的随上流股浮向弯月面，直径小的随下流股下潜。由于凝固壳是处在增长状态，可捕获贴近它的上浮粒子并带入固相，造成最终的产品缺陷。当有电磁场作用时，射流在流动中途磁铁作用处被堵截，夹杂粒子也随流股在此转向，分为向上和向下运动的两部分，因该位置远离凝固壳，故可避免直径大的粒子在上浮过程中被凝固壳捕获。

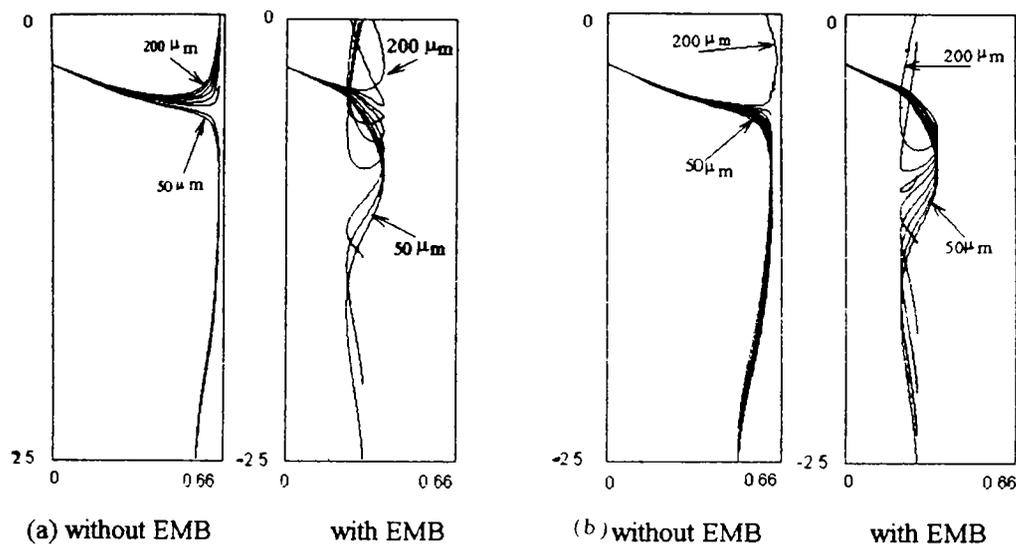


图5 运动轨迹 (a) 氩气泡 (b) 夹杂物

### 3 结论

(1) 比较计算的直流线圈磁铁产生的磁场和结晶器水模型流场与文献中的实验结果，发现预测与测量的结果十分接近，故本文计算方法及所编制的程序是可靠的。

(2) 施加电磁场可以实现对结晶器内流谱的控制，其中线圈源电流强度和磁场作用位置是决定控制效果的两个决定性的因素。

(3) 有效的电磁场控制可大大地减轻液流对窄面凝固壳的冲击，使凝固壳承受的剪应力大幅度下降。并且，夹杂物粒子随流股在远离凝固的电磁场作用处转向，从而减少了粒子上浮过程中被凝固壳捕获的机会。

(4) 本文提出的用壁面承受的剪应力最大差值来标定液流对壁冲击的方法，可方便、有效地分析壁面承受的冲击情况，具有很好的应用效果。

#### 参考文献

- 1 Nagoya J, Kojima S. Iron and Steel Engineer, 1984, 61: 41
- 2 Takatai K, Nakai K. Proc of 6th Int Iron and Steel Congress, Nagoya, 1990
- 3 Thomas B G. Metall Trans, 1990, 21B: 387