

# 板坯连铸结晶器全幅二段和全幅三段 电磁制动钢水流的数值模拟

何 达 毛 斌 荣 陞

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 研究在静磁场作用下,结晶器中钢水的流动。建立了基于磁流体力学的二维数学模型并考虑了湍流的影响,采用数值分析方法分析了全幅二段和三段电磁制动对钢水流的影响。计算结果说明全幅二段和三段电磁制动能有效制动并分散流股,结晶器下部钢水流均匀,磁极宽度、中心距、拉速增加,制动效果变弱,高拉速时全幅三段电磁制动效果好于全幅二段电磁制动。

**关键词** 磁流体力学 连续铸钢 电磁制动

## NUMERICAL SIMULATION OF MOLTEN STEEL FLOW IN CONTINUOUS CASTING MOLD WITH EMBR OF TWO AND THREE STATIC MAGNETIC FIELDS ON WHOLE WIDTH

HE Da MAO Bin RONG Sheng

(The Chinese Academy of Science)

**ABSTRACT** A mathematical model based on magnetohydrodynamics has been developed to describe the turbulent flow in slab continuous casting mold with electromagnetic brake (EMBr) of two and three static magnetic fields on whole width, and effect of the static magnetic field on the molten steel flow is studied by means of numerical analysis. Computational results show that two and three static magnetic fields can brake and disperse molten steel flow in mold, get more uniform velocity field. Worse braking effects will be obtained with broader magnetic pole width, longer pole distance and higher continuous casting speed. For higher continuous casting speed, using three static magnetic fields will get better braking effects and more uniform velocity field than two static magnetic fields brake.

**KEY WORDS** magnetohydrodynamics, continuous casting, electromagnetic brake

### 1 前言

连铸结晶器内钢水流的特征是:钢水从浸入式水口两个侧孔吐出的过热的钢水流股,以高速冲向结晶器的窄面,在冲击点附近分裂成向上反流转流股和向下侵入流股。由于板坯结晶器内流股比较集中,流速较高,由此造成窄面附近初生坯壳重熔;夹杂物和气泡不易上浮;保护渣卷吸等冶金学的问题,严重制约了铸坯质量和拉速的进一步提高。解决上述问题的关键是要有效地制动从水口侧孔吐出的流股并控制结晶器内钢水的流动。

由磁流体力学理论可知,一定构形的外加恒定磁场有阻滞导电流体的流动和抑制湍流的作用。基于这一思路,将磁流体力学和冶金学相结合,开发出板坯结晶器电磁制动技术(EMBr)。目前,它已成为控制高速板坯连铸结晶器内钢水流来获得优质铸坯的重要技术手段,成为连铸技术的重要发展之一。

自80年代初以来,国外已先后开发了局部区域的EMBr和全幅一段的EMBr,相继进行了数值模拟、实验研究和工业应用,都取得了良好的冶金效果。然而需要指出的是,前者不能制动整个宽度的流

联系人:毛斌,研究员,北京(100080)中国科学院力学研究所

动,使水口下方和窄面附近分流过强;后者不能有效制动向上反转流股,使弯月面(自由面)波动仍然较大。为了克服两者的不足之处,90年代中开发了全幅二段EMBr(FC Mold),其中上段磁场位于弯月面附近,用于抑制弯月面的波动;下段磁场位于水口下方,用于制动从水口吐出的高速流股,并在其下游获得“活塞”流动。工业实践表明,FC Mold比前两者有更好的冶金效果。

80年代末以来国内也相继开展了电磁制动技术的研究,首先由中科院力学所和北京科技大学共同进行了低熔点合金的局部区域电磁制动的模拟实验。研制成国内第一台板坯连铸局部区域电磁制动装置,取得了改善铸坯表面质量和减少内部夹杂物的良好效果;与此同时,开展了电磁制动钢水流流动的数值模拟的研究。

本文基于磁流体力学原理,建立描述板坯连铸结晶器全幅二段电磁制动钢水流流动的二维数学模型,用 $k-\epsilon$ 方程描述湍流运动,利用Simple算法求解控制方程。

## 2 数学模型

在具有电磁制动系统的结晶器中,钢水从浸入式水口两侧孔以速度 $v$ 吐出,形成两股射流,俗称流股。水口插入深度 $h$ ,水口内径 $r_{in}$ 和外径 $r_{out}$ ,侧孔半径 $r_s$ ,倾角 $\alpha$ ,板坯宽度 $2a$ ,浇铸速度 $v_c$ 。弯月面为自由面。电磁制动系统采用全幅二段和全幅三段两种,全幅二段电磁制动系统在结晶器两个宽面上安装一对II形电磁铁,其长度与结晶器宽度相当,上段磁极在弯月面处,下段磁极在水口下方,上下两段磁极形成一磁回路,通过两段磁极的磁通量相同,磁力线方向相反;全幅三段电磁制动是在两个宽面上配置一对E形电磁铁,其长度与结晶器宽度相当,中间磁极位于水口出口处,中间磁极分别和上下两段磁极各形成一磁回路,上下两段磁极产生的磁力线方向与中间磁极产生的磁力线方向相反,通过上下两段磁极的磁通量之和与通过中间磁极的磁通量相同。每对磁极间形成垂直钢水流股的磁场,磁通密度矢量为 $B$ ,磁极中心距 $\tau$ 。

基本假定如下:流动为二维对称定常流动,自由面为水平面,钢水为不可压缩粘性流体,运动粘性系数 $\nu$ 和导电率 $\sigma$ 均为常数,忽略温度对流动的影响,磁雷诺数很小。

钢水流股流经垂直于它的磁场时,在其中产生感应电流 $J$ ,它与当地磁场作用产生一个洛伦兹体力 $J \times B$ 作用于钢水上,因此动量方程中增加了电

磁体力。由于结晶器内钢水流流动的雷诺数较高,一般大于 $10^4$ ,故流动为湍流;采用有效粘性系数 $\mu_{eff}$ 和 $k-\epsilon$ 湍流模型,板坯连铸结晶器电磁制动钢水流流动满足的磁流体力学方程组,即动量方程、连续方程、欧姆定律、电流连续方程、法拉第定律,分别为:

$$\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\rho \nabla P + \nabla \cdot (\mu (\nabla \mathbf{V} + \mathbf{V} \nabla)) + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

由于对称,笔者仅考虑 $\frac{1}{2}$ 铸坯宽度内流动。在自由面上有自由滑移条件和电绝缘条件;窄面上有无滑移条件和电绝缘条件;在出流边界上, $u=0$ 和 $v$ 的法向导数为零,电场电位为零;在中心对称线上,流场有对称条件,电位为零;在入口边界, $u=0$ 和 $v=v_{in}$ 。磁感应强度的分布采用实测值。

## 3 计算方法和结果

计算区域为矩形,长 $l=4520$  mm,宽 $a=600$  mm,网格点 $192 \times 38$ ,在水口附近区域和流动变化较大的区域加密网格点,采用自然网格与交错网格,用控制容积法离散化方程,用Simple方法求解。值得指出的是,Simple计算程序要求计算域为规则区域,为处理这个不含水口壁的不规则区域内的流场,本文采用矩形区域,利用大源项方法处理水口壁,其中动量方程取水口固壁为隔离体,电场方程取整个水口区域为隔离体,使它们占据的控制容积不起作用。

本计算采用以下各参数值: $h=250$  mm, $r_{in}=40$  mm, $r_{out}=65$  mm, $r_s=40$  mm, $\alpha=-15^\circ$ , $v_c=1.7$  m/min,3.4 m/min, $\tau=300$  mm,450 mm,最大磁感应强度 $B_0=0, 0.075$  T,0.15 T,0.30 T,第一段磁极宽度 $c_1=100$  mm,200 mm,第二段磁极宽度 $c_2=100$  mm,200 mm,第三段磁极宽度 $c_3=100$  mm, $\rho=7.1 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, $\mu=0.006$  kg/(m·s)。

一些典型的计算结果见速度矢量图1(a)~(f),图中虚线表示磁极位置。图1(a)为无磁场 $B=0$ 和拉速为1.7 m/min时坯中钢水二维流动的速度矢量图。可以看到,从水口侧孔吐出的流股以较高的速度冲击窄面,向上反转回流和向下回流较强,弯月面附近钢水流速较高。图1(b)表示二段制动外加磁场 $B=0.15$  T时速度矢量图,可以看出流股冲击窄面速度、向上和向下流股、弯月面附近钢水流速都大大

减小,冲击点上移,下部回流消失,流动均匀;图 1(c)、(d)分别表示二段制动当磁极宽度增加和磁极中心距增大时的速度矢量图,与图 1(b)相比,流股冲击窄面变强,下部钢水回流增加,制动效果变弱。图 1(e)表示二段制动当拉速增大为 3.4 m/min 时的速度矢量图,可以看出二段制动不能有效的制动和分散流股,流股冲击窄面,下部回流较大,制动效

果也变弱。图 1(f)为采用三段制动后拉速为 3.4 m/min 时流场速度矢量图,与图 1(e)比较,在相同磁通量下,比全幅二段电磁制动有更好的制动效果。由此可见,变场强的全幅三段电磁制动技术不仅能实施二次制动,有效地制动和分散高速流股,在其下游形成更为均匀的“活塞”流动,而且能在弯月面附近使钢水保持一定的流速,更符合冶金学的要求。

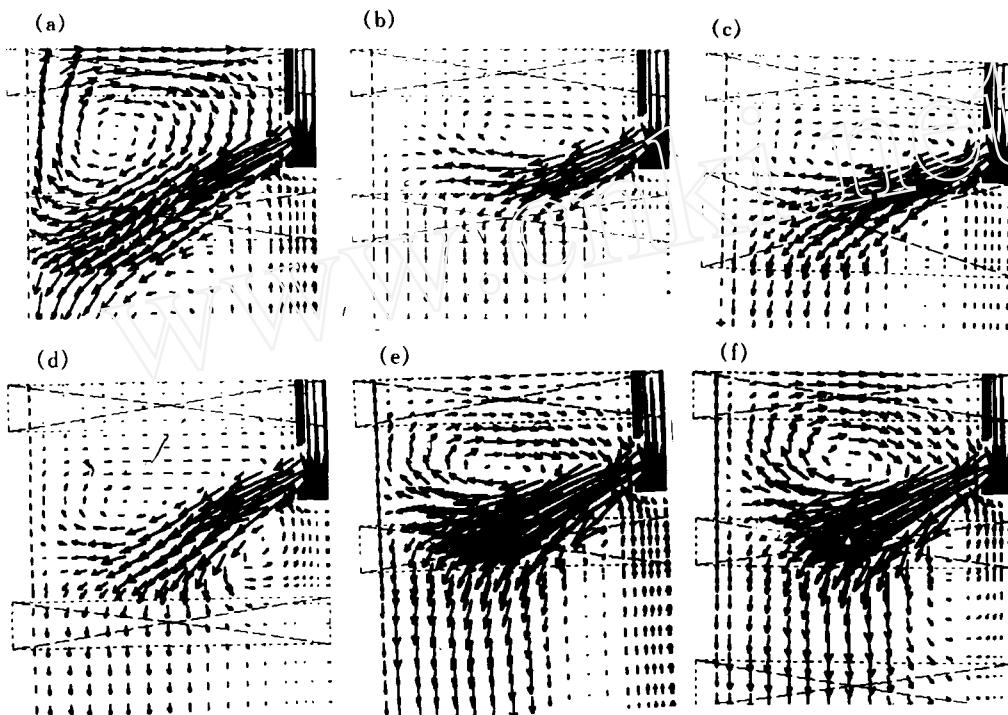


图 1 速度矢量图

Fig. 1 Velocity vector

#### 4 结论

- (1) 全幅二段和三段电磁制动能有效减小流股速度并使流股分散,流动趋向于均匀。
- (2) 当磁极宽度、磁极中心距或拉速增大时,全

幅二段电磁制动效果变弱。

- (3) 高速连铸时,在相同磁通量下,全幅三段电磁制动效果好于全幅二段电磁制动。