

# 交流水平悬浮电磁连铸的数值模拟<sup>①</sup>

任忠鸣 蒋国昌

(上海大学上海市钢铁冶金重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 分析了交流水平悬浮电磁连铸的电磁场和悬浮特点, 建立了相应数学模型, 进行了数值模拟研究。结果表明, 随着输入电流增加, 悬浮力近似成抛物线迅速增加, 悬浮力随着磁场频率的增加而增加, 但达到一定值后, 增加不再明显。

**关键词** 交流水平悬浮电磁连铸 数值模拟 数学模型

水平交流悬浮电磁连铸是一种新的金属薄板近形连铸技术。它利用电磁力将液体金属成平板状悬浮进行水平连铸, 从而制得薄板。由于在金属凝固过程中, 无铸模与其表面接触, 因而铸出的金属板表面光亮, 消除了缺陷, 具有较大技术优势, 很有发展价值。此项技术的关键是使液体金属在磁场中成平板状稳定地悬浮。文献[1]和[2]曾对此进行了实验研究, 实现了金属液的悬浮。但更深刻的规律的掌握, 则需借助于计算机数值模拟研究。

本文的目的是分析该技术中电磁场和金属悬浮特点, 建立相应数学模型, 进行数值模拟研究, 并结合实验研究, 深入考察悬浮规律和电磁特性。

## 1 理论分析

水平交流悬浮磁场示意于图1中, 其  $y$  向分量为零, 并且在此方向上均匀分布。在  $y$  向上, 金属板和屏蔽板为无限长。由电磁感应定律知, 由线圈电流所产生的交变磁场将在金属板和屏蔽板中感生电流。此电流与磁场相互作用, 产生作用于金属板和屏蔽板的电磁压力, 此即悬浮力。当悬浮力与金属板的静压力相平衡时, 即悬浮起金属板。

由安培环路定律, 有

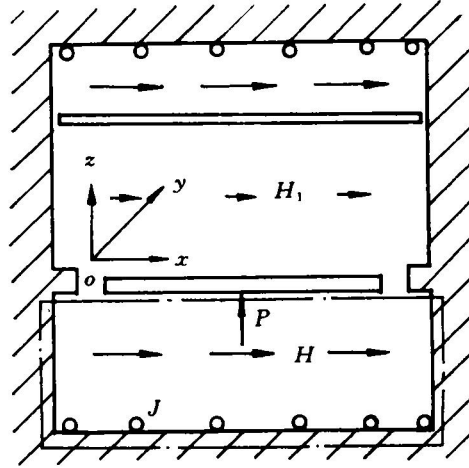


图1 悬浮磁场示意图

$$\oint H dl = IN \quad (1)$$

式中  $H$  为磁场强度;  $l$  为积分路径长度;  $I$  为电流强度;  $N$  为通以电流  $I$  的线圈匝数。

在图示的积分路径中, 铁磁体的磁阻可忽略, 而在气隙空间中的磁场强度均匀分布, 所以式(1)简化为

$$HW = IN \quad (2)$$

式中  $W$  为气隙空间的宽度。在金属板-屏蔽板之间, 因金属的屏蔽作用而使磁场强度削弱为  $H_1$ 。

这一交变电磁场在金属板中感生出电流  $J$ 。它与磁场作用产生电磁力  $f$ ;

① 国家自然科学基金和上海市博士后科研基金资助项目 收稿日期: 1995-02-06; 修回日期: 1995-03-17

$$f = J \times B = -(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} / \mu - \nabla B^2 / (2\mu) \quad (3)$$

式中  $\mu$  为导磁率；右边第一项为电磁搅拌力；第二项为电磁压力梯度，即  $\nabla P_m$ 。

在本研究中，考虑金属板上部的磁场的影 响，作用于金属板上的电磁压力为：

$$P_m = \frac{\mu}{2} (H^2 - H_1^2) \quad (4)$$

将(2)式代入，有

$$P_m = \frac{\mu}{2} \left[ \left( \frac{IN}{W} \right)^2 - H_1^2 \right] \quad (5)$$

为使金属板悬浮，电磁压力应与金属静压 力平衡，即：

$$P_m = \rho gh \quad (6)$$

式中  $\rho$  为金属密度； $g$  为重力加速度； $h$  为金 属板厚度。

由式(5)和(6)可得：

$$I = \frac{W}{N} \sqrt{\frac{2\rho gh}{\mu} + H_1^2} \quad (7)$$

$H_1$  的大小除与输入电流有关外，主要受 金属的集肤层厚度大小和金属板厚度影响。集 肤层厚度  $\delta$  为：

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma} \quad (8)$$

其中  $\omega$  为磁场角频率； $\sigma$  为金属导电率。如 果金属厚度  $h$  超过  $\delta$ ，则  $H_1$  趋于零，式(7)简 化为：

$$I = \frac{W}{N} \sqrt{\frac{2\rho gh}{\mu}} \quad (9)$$

## 2 数值模拟

描述电磁场的基本方程是 Maxwell 方程。 在正弦交变电磁场下，各变量采用复矢量表 示，方程为：

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{J}} \quad (10)$$

$$\nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -j\omega \dot{\mathbf{B}} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{B}} = 0 \quad (12)$$

各量之间有如下关系

$$\dot{\mathbf{B}} = \mu \dot{\mathbf{H}} \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{J}} = \sigma \dot{\mathbf{E}} \quad (14)$$

式中  $\sigma$  为导电率； $j = \sqrt{-1}$ 。

引入矢量磁位  $\dot{\mathbf{A}}$

$$\dot{\mathbf{B}} = \nabla \times \dot{\mathbf{A}} \quad (15)$$

式(10)、(11)、(12)化为

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = \dot{\mathbf{J}}_w - j\omega \sigma \dot{\mathbf{A}} \quad (16)$$

式中  $\dot{\mathbf{J}}_w$  为外施电流密度。

在本研究中，为简化做如下假设：

- (1) 导电率和导磁率为常数；
- (2)  $y$  向为无限长；
- (3)  $\dot{A}_x = \dot{A}_z = 0$ ，即  $\dot{\mathbf{A}}$  只有  $y$  向分量。

这样，方程简化为二维方程：

$$\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial^2 \dot{A}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_y}{\partial z^2} \right) = \dot{J}_w - j\omega \sigma \dot{A}_y \quad (17)$$

取图 1 所示空间的右半部作为求解区域。

其边界条件为：

在对称轴上， $\frac{\partial \dot{A}_y}{\partial x} = 0$ ；

在上端， $\frac{\partial \dot{A}_y}{\partial z} = \mu \dot{J}_w$ ；

在下端， $\frac{\partial \dot{A}_y}{\partial z} = -\mu \dot{J}_w$ ；

在其余边界上均为铁磁体， $\frac{\partial \dot{A}_y}{\partial n} = 0$  ( $n$  为 法线方向)。

计算所用参数列于表 1 中。

表 1 计算参数

装置尺寸：200 mm(高)×60 mm(宽)
铝板厚度：4 mm
铜板(屏蔽板)厚度：2 mm
铝电阻率 <sup>[3]</sup> ：2.67 $\mu\Omega \cdot m$ (固)
0.2425 $\mu\Omega \cdot m$ (液)
铜电阻率 <sup>[3]</sup> ：1.694 $\mu\Omega \cdot m$ (固)

在求得  $\dot{A}_y$  后，由下式计算  $\dot{\mathbf{B}}$ ：

$$\dot{B}_x = \frac{\partial \dot{A}_y}{\partial z} \quad (18)$$

$$\dot{B}_z = -\frac{\partial \dot{A}_y}{\partial x} \quad (19)$$

电磁压力  $P_m$  由下式计算：

$$P_m = \frac{1}{4\mu} [(\dot{B}_x \cdot \dot{B}_x^* + \dot{B}_z \cdot \dot{B}_z^*) - (\dot{B}_{1x} \cdot \dot{B}_{1x}^* + \dot{B}_{1z} \cdot \dot{B}_{1z}^*)] \quad (20)$$

式中 上标 \* 表示共轭复数，下标 1 表示金属板上表面处的磁感应强度。

### 3 实验

实验装置如图 2 所示，详细说明见文献 [2]。

磁场测量采用如下方法：将匝数一定的小线圈放入磁场中，测量其上感应出的电势，代入下式计算  $B$  值：

$$B = E / (4.44fNS) \quad (21)$$

式中  $E$  为感应电势，V； $f$  为磁场频率，Hz； $N$  为线圈匝数； $S$  为线圈横截面积， $m^2$ 。

为测量电磁压力(悬浮力)，在悬浮的金属板上放置重量适宜的重物，使金属板处于刚浮起状态，根据重物和金属板的重量来计算电磁压力。

### 4 结果及讨论

图 3 比较了数值模拟和实测的磁感应强度  $B$  矢量的分布。可以看出数值模拟结果与实验值相吻合。图 3 表明，金属板与屏蔽板之间的  $B$  值很小，趋于零。而金属板下方和屏蔽板上方的  $B$  值较大。如前述，这是金属屏蔽电磁场的缘故。其屏蔽作用的大小与金属的厚度和集肤层厚度的比值  $h/\delta$  相关。该值越大，则屏蔽作用越强，当其大于 1 以后，几乎将磁场完全

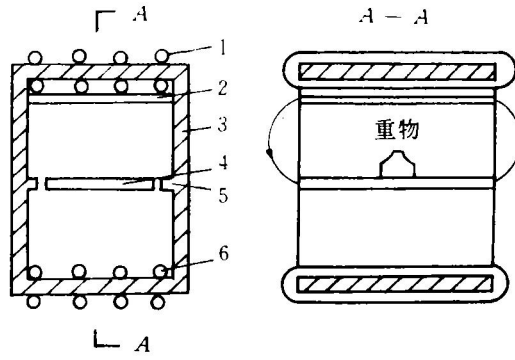


图 2 交流水平悬浮电磁连铸装置

- 1—上感应圈；2—屏蔽板；3—磁轭
- 4—金属板；5—凸台；6—下感应圈

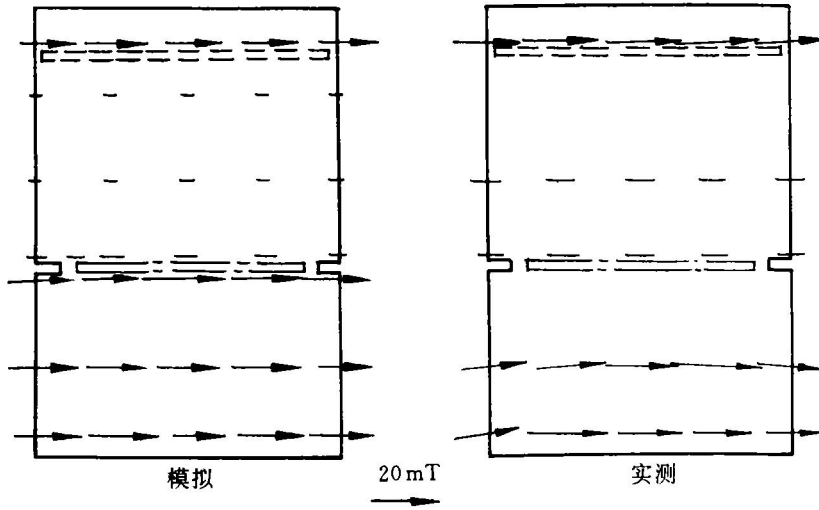


图 3 数值模拟和实测的磁感应强度  $B$  矢量分布

$$J = 21\,300 \text{ A/m}, f = 1\,300 \text{ Hz}$$

屏蔽。从(5)式知道, 悬浮力的大小取决于金属板上下两侧的  $B$  值的差别。差别越大, 则悬浮力越大。因此, 为获得较大的悬浮力, 应使金属板上侧的  $B$  值趋于零。为此, 应使  $h/\delta$  值大于 1。

图 4 为磁力线的数值模拟分布图, 可见在

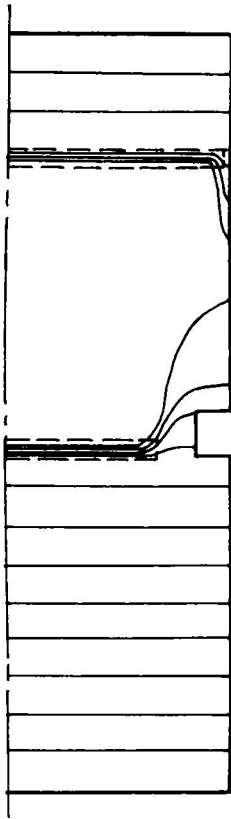


图 4 数值模拟的磁力线分布  
( $J=21\ 300\ \text{A/m}$ ,  $f=1\ 300\ \text{Hz}$ )

金属板下方离开一定距离处, 磁力线基本为平直分布; 在板的下表面处, 中部的磁力线仍为平直分布, 但边部的磁力线发生较大弯曲。由电磁理论知道, 磁场在金属中产生的力一个是垂直磁力线的压力, 一个是沿磁力线的拉力。在金属板中部的磁力线平直, 所以其压力为垂直向上方向, 起悬浮作用。在金属板边部的磁力线弯曲, 其压力偏向内部, 有利于液体金属成形。在另一方面, 沿磁力线方向的拉力则不

利于液体金属稳定成形。因此如何改善磁场分布, 利用磁拉力仍需深入研究。

图 5 表示了输入电流与悬浮力间的关系。可看出, 随电流增加, 悬浮力明显增加, 两者基本为抛物线关系, 与式(5)一致。此图也表明数值模拟结果与实验值相吻合。由于实验电流取值范围较小, 因而悬浮力与电流近似成线性关系<sup>[2]</sup>。该图还表明固体的悬浮力较大, 这是固体的导电率较大的缘故。

图 6 表示了磁场频率对悬浮力的影响。它表明随频率的增大, 悬浮力显著增加。但当频率达到 10 kHz 以后, 其增加不再明显。所以, 实用频率可选择 10 kHz, 以获得较大悬浮力。

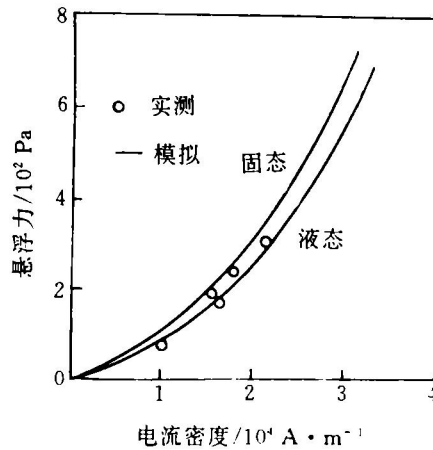


图 5 悬浮力与感应圈输入电流密度的关系  
( $f=1\ 300\ \text{Hz}$ )

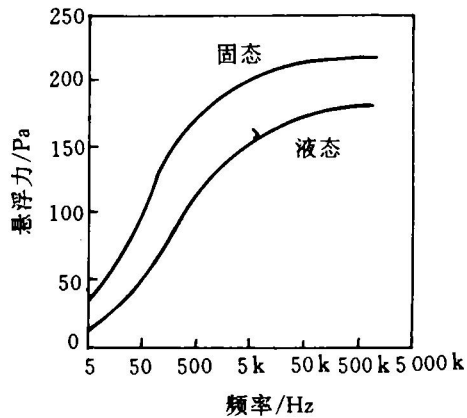


图 6 磁场频率对悬浮力的影响  
( $J=16\ 000\ \text{A/m}$ )

式(3)表明电磁力是由电磁压力和搅拌力两部分组成。这两部分力的比值,即电磁压力/电磁搅拌力,与磁场频率有关。频率越高,则此比值越大,即电磁压力越大<sup>[4]</sup>。因此应选择较高的频率。但过高的频率将使表面加热增加,不利于连铸,且频率过高时增加悬浮力的效果并不明显。所以,应选择适宜的频率。

## 5 结论

本文对交流水平悬浮电磁连铸的电磁场和悬浮特点进行了较系统的分析,所建立的数值模拟电磁场和悬浮规律的数学模型与实验相吻合。研究表明,为获得较大的悬浮力,应使金属板或屏蔽板与其集肤层厚度之比  $h/\delta$  大

于1。悬浮力与输入电流间基本成抛物线关系。在一定范围内,增加磁场频率将明显提高悬浮力。在本研究条件下,10 kHz 的频率较为适宜。

### 参考文献

- 1 任忠鸣,范江虹,金俊泽. 中国有色金属学报, 1993, 3(2): 93.
- 2 任忠鸣,杨眉. 中国有色金属学报, 1994, 4(4): 78.
- 3 Brands Eric A. Smithells Metals Reference Book. London: Butherworths & Co. Ltd., 1983.
- 4 Asai S. In: Sohn H Y, Geskin E S eds, Metallurgical Processes for the Year 2000 and Beyond. Pittsburgh: The Mineral, Metals and Materials Society, 1988: 7.

# NUMERICAL SIMULATION OF HORIZONTAL ELECTROMAGNETIC CONTINUOUS CASTING WITH ALTERNATIVE ELECTRICITY

Ren Zhongming, Jiang Guochang  
Shanghai University, Shanghai 200072

**ABSTRACT** The electromagnetic field in horizontal electromagnetic continuous casting with alternative electricity has been analysed. A mathematical model has been built to describe the field and the electromagnetic levitative force. The result of numerical simulation shows that the levitative force increased parabolically with increase of the electricity current. With increase of the frequency of the electricity, the force increased apparently. However, when the frequency was over a certain value, the increase in the force was not apparent.

**Key words** continuous casting electromagnetic field numerical simulation

(编辑 彭超群)