

交流悬浮水平电磁铸造初步研究^①

任忠鸣 范江虹 金俊泽

(大连理工大学)

摘 要

在自行设计的水平悬浮电磁铸造装置内,进行了金属悬浮特性研究。测定了磁场分布和悬浮力,考察了电磁学参数及装备条件的影响规律。结果表明,除电流外,屏蔽宽度、金属液所处位置和屏蔽-金属液回路的电阻值也对悬浮力有较大影响。

关键词: 水平悬浮电磁铸造 电流 屏蔽 连续铸造

电磁铸造技术是一种利用电磁场力支撑和约束液体金属成型凝固的连续铸造工艺。它所生产的铸坯表面光亮,内部质量高,具有很大的技术经济优势,因而受到高度重视。其中,垂直电磁铸造技术已有大量研究。有很多研究者^[1-6]重点研究了该技术中的电磁流体力学问题,建立了多种数学模型;由于该技术中金属在特殊条件下凝固,因而它的凝固过程、凝固组织也被深入研究^[7,8]。同时,也提出了很多专利。该技术已投入大规模工业生产中。

关于水平电磁连续铸造技术的研究较少,该技术的关键是将液体金属由电磁力稳定地悬浮。浅井滋生^[9,10]首先探讨了液体金属在静磁场和直流电的共同作用下悬浮的可能性,分析了铸造薄板和圆棒时的各种力间的关系,并铸造出了薄板。关于具有实用价值的交流水平电磁铸造技术,仅有两项专利^[11,12],尚未见关于悬浮特性研究的报道。

本文的目的是研究交变电磁铸造中的电磁场和液体金属悬浮特性,考察各种因素对液体金属悬浮力的影响。

1 实验

实验装置如图1所示。它由磁轭、线圈和

屏蔽组成(图1中铝板模拟实际铸造中的铝液)。当线圈中通入交变电流后,在装置内产生交变磁场(图中所示 Φ_1 和 Φ_2)。该磁场使由屏蔽和铝板组成的回路感生出电流,该电流与磁场作用产生作用于铝板上的悬浮力。

装置的尺寸为400 mm×200 mm×200 mm。屏蔽一般用导电良好的铜板制成。

1.1 电磁场测量

采用线圈法测量磁感应强度 B 。测量中,将一小线圈放入磁场中,用微伏计测量线圈两端的电势 E ,由下式计算出 B 值:

$$B = E / (4.44fSN) \quad (1)$$

式中 B —磁感应强度, T; E —电势, V; f —电流频率, Hz; S —线圈横截面积, m²; N —线圈匝数。

分别测量了无屏蔽和屏蔽宽度为10、20、34 cm时的 B 矢量分布。 B 矢量是在分别测得 B 的三个分量后,再加以合成得到的。

1.2 悬浮力测量

采用直接加重法测量悬浮力,如图1所示,在铝板上放置不同重量的重物,相应地调整电流大小,使铝板刚好浮起。以此重量计算悬浮力。

分别测定了屏蔽宽度、凸台位置、屏蔽与铝板间距各不相同时的悬浮力。

^①国家青年自然科学基金课题;1992年10月13日收到初稿

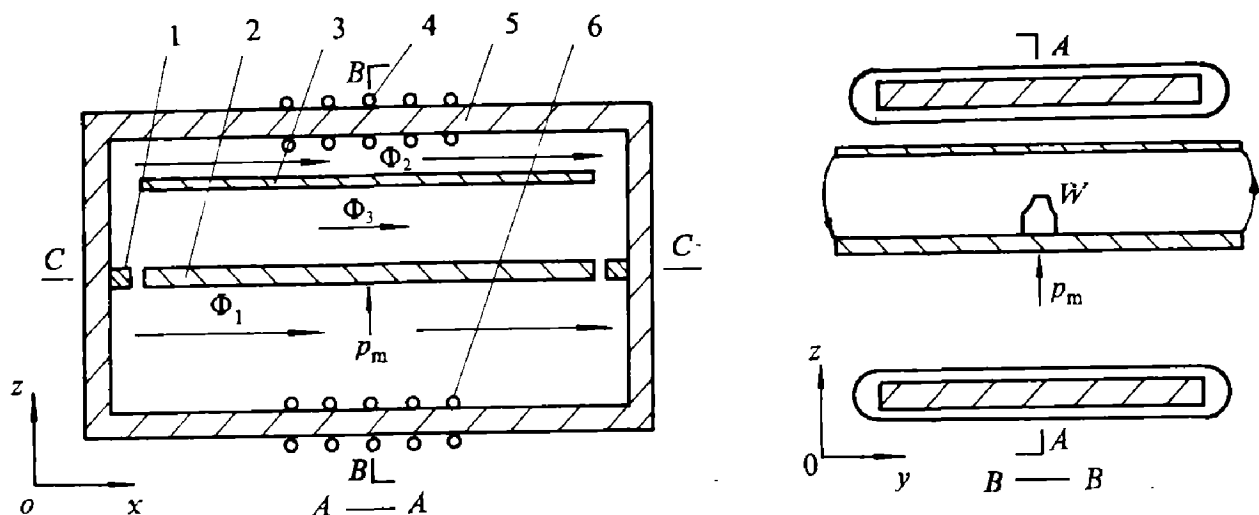


图 1 水平悬浮电磁铸造中的悬浮装置示意图

1—凸台；2—铝板代替铝液；3—屏蔽板；4—上线圈；5—磁轭；6—下线圈

2 实验结果及分析

2.1 电磁场分布

图 2 所示为无屏蔽时在截面 A-A 和截面 C-C (图 1) 上的 B 矢量分布。从图中可看出：(1) B 在 x 轴上的分量远大于其它轴上的，尤其在中心部位；(2) 靠近左右两端磁轭处， B 的 z 轴分量增大；(3) 与中心部位比较，两端 B 值较小，上下两边的 B 较大，且其最大值点均偏离垂直中心线。

由电磁感应原理可知， x 轴方向上的 B 分量将产生作用于液体金属（这里为铝板）上的悬浮力，而 z 轴分量将产生指向液体金属内部的横向压力，约束液体金属。所以，上述结果中的(1)和(2)两点将有利于液体金属的悬浮成型。上下两边 B 值较大的原因是靠近感应线圈处磁场较大的缘故。而最大点偏离中心线和两端磁场较小，则是由于感应线圈长度小且位置偏离中心线的原因。这种磁场不均匀性对液体金属的稳定成型是不利的。

当施加屏蔽并与铝板构成回路后，磁场发生了很大变化。图 3(a)、(b)、(c) 分别表示了屏

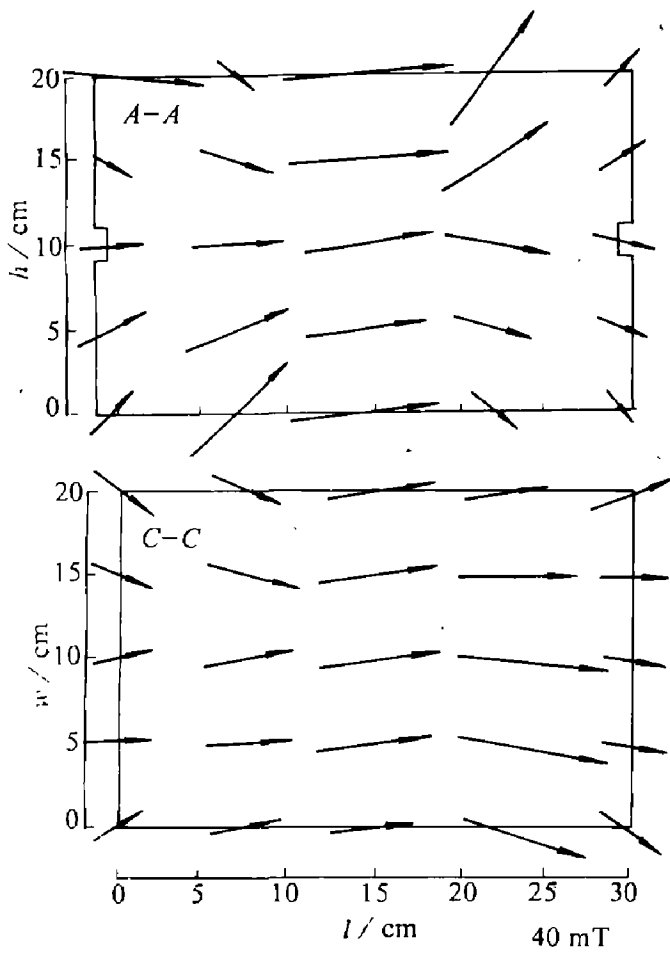


图 2 无屏蔽时 A-A 和 C-C 面上的磁感应强度 B 矢量的分布

蔽宽度为 10、22、34 cm 时在 A-A 截面上的

磁场分布。可以看出,加屏蔽后,由屏蔽和铝板组成的回路内的磁场强度明显减弱,但更均匀;上下两边处的磁场有所增加,其分布仍是中间大,两端小,说明感应线圈长度较小所产生的影响仍存在。铝板下部的最大 B 值约为 58 mT,比垂直电磁铸造工艺中同样电流下的磁场强度略大^[5],这意味着有可能产生较大的磁压力,即悬浮力。

比较图 3(a)、(b)、(c)可看出,尽管屏蔽宽度发生较大变化,但磁场变化并不明显,其原因有待进一步研究。

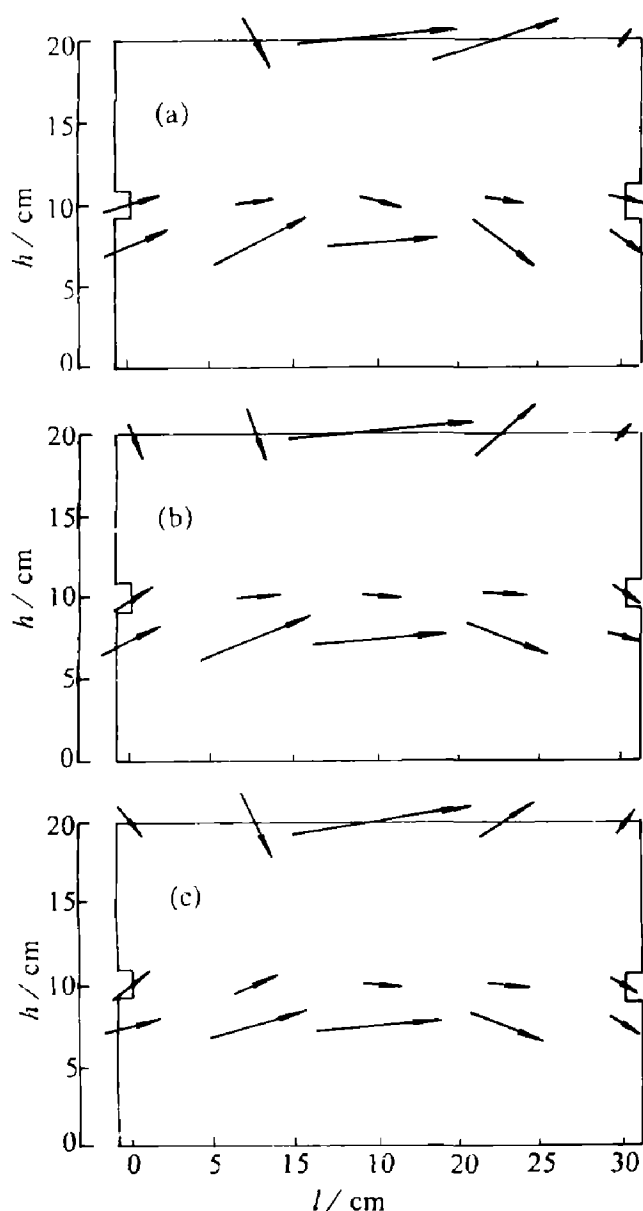


图3 有屏蔽时 A-A 面上的 B 矢量分布

(a)—屏蔽宽度为 10 cm; (b)—屏蔽宽度为 22 cm;
(c)—屏蔽宽度为 34 cm

2.2 悬浮力

图 4 表示了不同屏蔽宽度和凸台与铝板位置的悬浮力与电流间关系。从图中可看出: (1)随电流增加,悬浮力几乎成线性增加,当电流为 3 000 A 时,悬浮力可达 112 Pa,基本可悬浮厚度为 5 mm 的铝液层; (2)随屏蔽宽度增加,悬浮力有较大幅度的增加; (3)凸台与铝板所处的位置对悬浮力也有影响,它越偏下,则悬浮力越大。

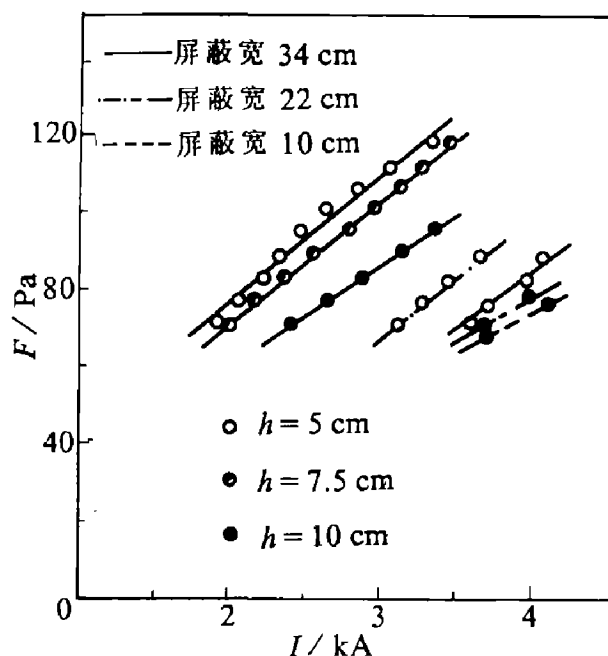


图4 屏蔽宽度,铝板位置和电流(I)
对悬浮力(F)的影响

图 5 表示了屏蔽与铝板间距对悬浮力的影响。可以看出,所实验的三个间距中,该值为 8 cm 时的悬浮力最大。说明存在着一个最佳间距值。

由电磁感应原理,电磁力 $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$, 其中 $\vec{J}$ 为电流密度矢量。通常,电磁悬浮力可由下式粗略计算:

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

此力应与液体金属静压力 P_g 平衡,即

$$P_m = P_g \quad P_g = \rho gh \quad (3)$$

式中 ρ 为液体金属密度; g 为重力加速度; h 为液体金属层厚度

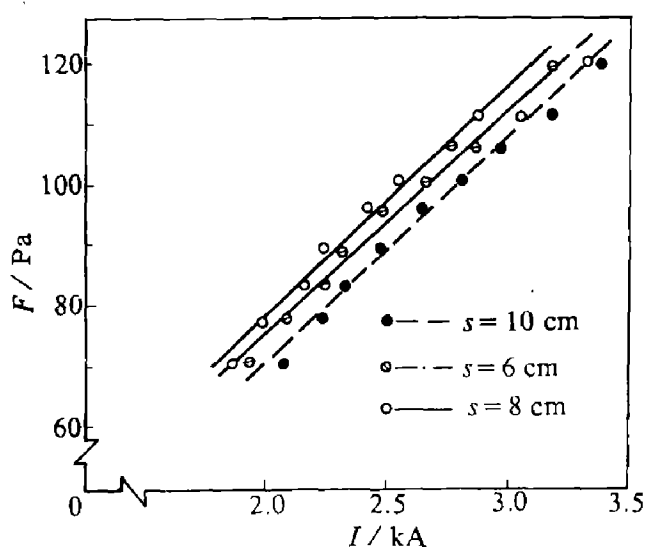


图5 屏蔽与铝板间距对悬浮力的影响

屏蔽宽度为 34 cm, 铝板在半高处

设悬浮的液体铝厚度为 5 mm, 则可算得所需 B 值为 17 mT, 与实验中的 50 mT 相差甚大。其原因分析如下: 从式 $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ 可知, 在同样 B 值下, F 值的大小取决于 J , 而 J 的大小是屏蔽和铝板所组成回路的长度 L 的函数:

$$J = \frac{1}{S} \frac{E}{\sqrt{R^2 + \chi^2}} \quad (4)$$

$$R = \frac{L}{\sigma S} \quad (5)$$

其中 σ 为铝液电导率; S 为屏蔽或铝板的横截面积; E 为感应电势; χ 为屏蔽-铝板回路的感抗, 它随 L 增大而增大。

从上两式可知, 在其它条件不变情况下, E 值不变, 如果 L 增加, 则 J 减小, 因而 F 减小。所以, 本实验中, 虽然 B 值较大, 但 L 也较大, 即电阻较大, 所以, 悬浮力仍较小。这说明, 欲获得较大的悬浮力, 必须有效地减小回路中的电阻。

图 4 表明随屏蔽宽度增加, 悬浮力相应增加。但此时 B 值却并无大变化 (图 3)。这种现象的产生可能是由于以下原因:

在屏蔽-铝板回路中, 下式成立

$$E_s + E_m = J_m \delta_m l_m$$

$$\sqrt{(L_s / \sigma_s \delta_s l_s + L_m / \sigma_s \delta_s l_s)^2 + \chi^2} \quad (7)$$

本实验中, χ 基本不变。屏蔽宽度 l_s 增加, 则 J_m 将增大, 尽管 B 值不变 (图 3), 作用于铝板上的力 $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ 也将增大。

凸台和铝板的位置下移时, 它们更接近感应线圈。此处 B 值较大, 因此悬浮力增大, 如图 4 所示那样。

3 结论

(1) 感应线圈的结构对磁场分布有较大影响, 不合理结构将导致不均匀磁场分布;

(2) 随屏蔽宽度增加和凸台连同铝板 (液) 的位置下移, 悬浮力显著增加; 存在一个可使悬浮力达最大值的屏蔽与铝板间距最佳值;

(3) 屏蔽-铝板 (液) 回路的电阻值对悬浮力有较大影响。

参考文献

- 1 Lavers J D. In: IEEE-IAS Conf Proc, San Fransisco, CA, IEE-Industry Applications Society, 1982. 954.
- 2 Vives Ch, Ricou R. Metall Trans, 1985, 16B: 377.
- 3 Li B Q, Evans J W, Cook D P. Metall Trans, 1991, 22B: 121.
- 4 朱晓鹰. 博士论文. 大连理工大学, 1990.
- 5 Ren Zhongming, Jin Junze. In: Proc of TMS Annual Meeting, San Diego, 1992, 175.
- 6 任忠鸣, 李挺举, 朱晓鹰, 金俊泽. 轻金属, 1991, (11): 53.
- 7 任忠鸣, 张维平, 李挺举等. 大连理工大学学报, 1992, 32: 121.
- 8 Goodrich D G, Dassel J L. In: Andersen J E (ed.), Light Metals. AIME, Dallas Texas. 781.
- 9 浅井滋生, 小 敏之, 鞭岩. 钢铁杂志, 1986, 72: 2218.
- 10 小 敏之, 浅井滋生, 鞭岩. 钢铁杂志 (日文), 1988, 74: 1794.
- 11 Yoshida M, Inumaru S. Us Patent 4 694 888.
- 12 Hull J R, Lari R J, Turner L R. Us Patent 4 678 024.