

## 异相位电磁连铸的电磁场分析 \*

王哲峰<sup>1,3)</sup> 崔建忠<sup>1)</sup> 杨院生<sup>2)</sup> 郑辉<sup>3)</sup>

1) 东北大学材料电磁过程教育部重点实验室, 沈阳 110004

2) 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016

3) 沈阳航空工业学院, 沈阳 110034

**摘要** 采用 ANSYS 有限元软件对空心管异相位电磁连铸中电磁场、力场的分布进行了模拟。结果表明: 异相位磁场作用下, 铸管中磁感应强度高且分布均匀; 壁厚中部的金属熔体受到沿径向的电磁推力, 向外结晶器方向流动; 石墨环附近的金属熔体和初凝壳受到电磁斥力的作用, 可以避免“抱芯”, 减少摩擦, 抑制了偏析瘤的形成, 进而提高了铸管表面质量。

**关键词** 异相位电磁连铸, 电磁场, 数值模拟, 表面质量

中图分类号 TG249.7

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2006)03-0317-04

## ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC FIELD DURING OUT-PHASE ELECTROMAGNETIC CONTINUOUS CASTING

WANG Zhefeng<sup>1,3)</sup>, CUI Jianzhong<sup>1)</sup>, YANG Yuansheng<sup>2)</sup>, ZHENG Hui<sup>3)</sup>

1) The Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004

2) Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

3) Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034

Correspondent: CUI Jianzhong, professor, Tel: 13514286803, E-mail: zhefeng\_w@126.com

Supported by National High Technology Research and Development Programme of China (No. 2001AA332030)

Manuscript received 2005-06-27, in revised form 2005-09-12

**ABSTRACT** Numerical simulations of electromagnetic field and force field during electromagnetic continuous casting in hollow billets are carried out by ANSYS software. The simulation results show that the magnetic flux density is strong and its distribution is even in tube ingot in out-phase electromagnetic field; Metal melt in the central section of the wall flows toward the outer mold due to the electromagnetic force; Metal melt and initially solidified shell near graphite were pushed by the electromagnetic force, which can avoid “hold core”, decrease friction, restrain segregation burl, and increase surface quality.

**KEY WORDS** out-phase electromagnetic continuous casting, electromagnetic field, numerical simulation, surface quality

EMC(electromagnetic casting) 和 CREM (casting, refining, electromagnetic) 等铝合金电磁连铸技术已经得到了迅速发展<sup>[1-4]</sup>, 但仅限于单线圈的实心铸锭. 针对电力工业中广泛应用的薄壁铝合金空心管, 在铸造过程中施加双线圈异相位磁场, 开发出空心管异相位电磁连铸技术 (out-phase electromagnetic continuous cast-

ing, OPEC), 即由内线圈和外线圈分别产生不同相位的两个磁场, 两磁场叠加后同时作用于金属的凝固区域, 从而提高管坯表面质量以及内部组织的新型电磁铸造技术. 该技术实施简单, 应用前景广阔, 不仅适于铝合金管, 对于铁、铁合金以及其它有色合金均适用. 但目前有许多问题尚需研究, 如异相位电磁连铸的磁场分布、磁场对铸管表面质量的影响机制等. 铸造中, 线圈产生的电磁场为近场源的感应场, 满足准稳条件<sup>[5,6]</sup>; 调整电磁场、力场的分布是控制金属凝固过程的重要手段. 杨院生<sup>[7]</sup>研究了电磁离心铸管过程的电磁力场; Harada<sup>[8]</sup>及李丘林<sup>[9]</sup>研究了单线圈电磁连续铸管过程的电磁场分布. 本研究采用

\* 国家高技术研究发展规划资助项目 2001AA332030

收到初稿日期: 2005-06-27, 收到修改稿日期: 2005-09-12

作者简介: 王哲峰, 男, 1970 年生, 博士生

ANSYS 软件对异相位电磁场、力场的分布做了初步的模拟, 并且分析了异相位磁场改善铸管表面质量的作用机理.

## 1 实验方法及数值分析原理

### 1.1 实验方法

本工作电磁铸造过程研究的半剖示意图见图 1. 实验的主要设备由内结晶器(芯)、外结晶器、雨淋式分流槽、水冷内/外线圈、热顶、内/外石墨环、引锭座组成. 其中内线圈为全内置水冷线圈(内置于结晶器中), 线圈与铸管距离近, 加强了磁场作用效果. 内线圈为 120 匝, 内/外径为 (35/180)mm; 外线圈为 50 匝, 内/外径为 (334/386)mm. 高度均为 60 mm. 通入 120 A, 50 Hz 的交变电流. 结晶器、分流槽及引锭座均由无磁性的不锈钢制成, 以减少磁场损失. 异相位电磁连铸条件下各种设备以及铸管、空气的磁性参数如下: 相对磁导率均为 1, 铝熔体、铸管和结晶器的电导率分别为  $4.13 \times 10^6$ ,  $3.78 \times 10^7$  和  $1.03 \times 10^7$  S/m. 实验用 6063 铝合金的成分(质量分数, %)为: Al 97.89, Mg 0.2—0.6, Si 0.45—0.9, Fe 0.34, Mn 0.09, Cu 0.09, Cr 0.09. 实验中, 将金属熔化后在中间包除气、除渣, 待温度达到 730 °C 进行浇注, 同时施加异相电磁场.

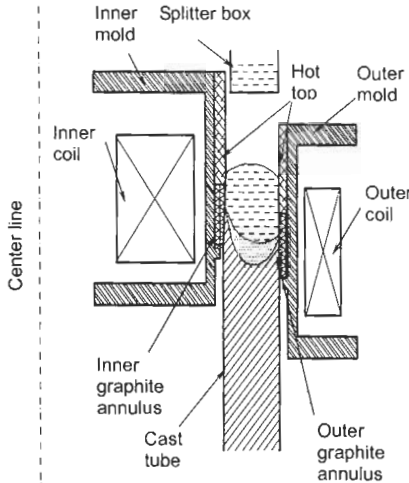


图 1 电磁铸造过程半剖示意图

Fig.1 Schematic illustration of semi-section of the electromagnetic casting process

### 1.2 数值分析原理

整个计算区域由包含导电介质的涡流区  $\Omega_1$  和不包含导电介质的非涡流区  $\Omega_2$ , 组成.  $\Omega_1$  区包括熔体、铸管及结晶器,  $\Omega_2$  区包括已知的电流源、空气介质等. 采用矢势  $\vec{A}$  和标势  $V$  来描述空间中的电磁场, 有如下关系:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (1)$$

$$\vec{E} = \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (2)$$

式中,  $\vec{B}$  为磁感应强度, T;  $\vec{E}$  为电场强度, V/m;  $t$  为时间, s.

根据 Maxwell 方程组, 在区域  $\Omega_1$  中有<sup>[10,11]</sup>

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V) = 0 \quad (4)$$

在区域  $\Omega_2$  中有

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \vec{A} = \vec{J}_s \quad (5)$$

式中,  $\nu$  为磁阻率,  $\nu = 1/\mu$  m/H (其中  $\mu$  为磁导率, H/m);  $\vec{J}_s$  为感应线圈中的已知源电流密度, A/m<sup>2</sup>.

铸造过程的模型区域及网格划分见图 2. 铸管、结晶器、线圈、空气等均采用 plane 53 四边形单元. 为了减少计算量、保证计算的精度, 在空气单元的外部采用了模拟远场空间的 INFIN110 二维远场单元.

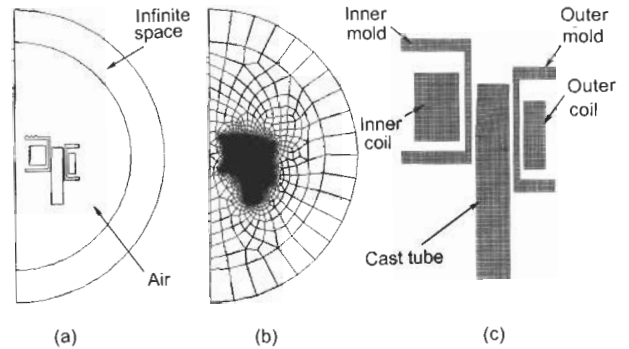


图 2 电磁铸造过程的模型区域及网格划分

Fig.2 Model region and mesh division during electromagnetic casting

- (a) the whole model region
- (b) mesh division of the whole region
- (c) mesh division of the casting region

所用的边界条件为: 在区域  $\Omega_1$  与  $\Omega_2$  的边界上有<sup>[12]</sup>

$$\vec{A}_1 = \vec{A}_2 \quad (6)$$

$$\nu_1 \nabla \times \vec{A}_1 \times \vec{n}_1 + \nu_2 \nabla \times \vec{A}_2 \times \vec{n}_2 = 0 \quad (7)$$

$$\nu_1 \nabla \cdot \vec{A}_1 - \nu_2 \nabla \cdot \vec{A}_2 = 0 \quad (8)$$

$$\vec{n} \cdot (-\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V) = 0 \quad (9)$$

式中,  $\vec{n}$  为边界的法线方向,  $\vec{n}_1$  指向  $\Omega_1$ ,  $\vec{n}_2$  指向  $\Omega_2$ ;  $\nu_1$  与  $\nu_2$  分别为区域  $\Omega_1$  与  $\Omega_2$  的磁阻率. 在对称中心和表示开放空间的远场, 则通过下式给出了磁力线平行边界条件和磁力线垂直边界条件:

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0, \quad \nu \nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (10)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{A} = 0, \quad \nu \nabla \times \vec{A} \times \vec{n} = 0 \quad (11)$$

以上方程组与边界条件满足 Coulomb 规范, 由此构成了求解异相位电磁连铸过程中电磁场的边值问题. 电磁力由下式求得:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} = \frac{1}{\mu}(\vec{B} \cdot \nabla)\vec{B} - \frac{1}{2\mu}\nabla B^2 \quad (12)$$

式中,  $\vec{J}$  和  $\vec{B}$  分别为铸管中的感应电流密度和磁感应强度, 单位分别为  $A/m^2$  和 T.

## 2 数值模拟结果与讨论

图 3 为单线圈(内线圈不通电)及双线圈异相磁场条件下, 铸管中磁感应强度的分布(内/外表示管壁的内/外表面). 单线圈时, 外石墨环处磁场强, 并略强于双线圈时该处的磁场, 但内石墨环处的磁场很弱. 实验中液态金属受电磁力作用, 从外结晶器向内结晶器流动, 与单线圈电磁铸造实心锭的情况相同. 双线圈异相磁场时, 在靠近外石墨环处的液态金属主要受外线圈磁场作用, 具有沿径向指向管内侧的电磁压力; 在内石墨环处的液态金属主要受到内线圈磁场作用, 具有沿径向指向管外侧的电磁压力. 而在铸管壁厚中部的大范围区域, 由于内线圈产生的磁场其相位超前外线圈  $90^\circ$ . 因此, 由内线圈产生的感应电流与外线圈产生的磁场相位一致, 交互作用形成向管壁外侧的推力; 由外线圈产生的感应电流与内线圈产生的磁场相位相反, 交互作用形成向管壁外侧的拉力. 上述作用叠加后, 实验中液态金属从结晶器内侧流向结晶器外侧.

图 4 为内石墨环及外石墨环中心沿管壁径向磁场的变化. 从图可见, 双线圈磁场总体场强大、分布均匀, 内石墨环处更大一些; 单线圈磁场从外石墨环开始持续减少, 到内石墨环处为十几毫特. 上述磁场分布主要通过以下 3 方面影响金属的凝固: (1) 磁场变化决定感应电流的分布(见图 5a, b), 在微观上改变粒子的运动, 加强溶质

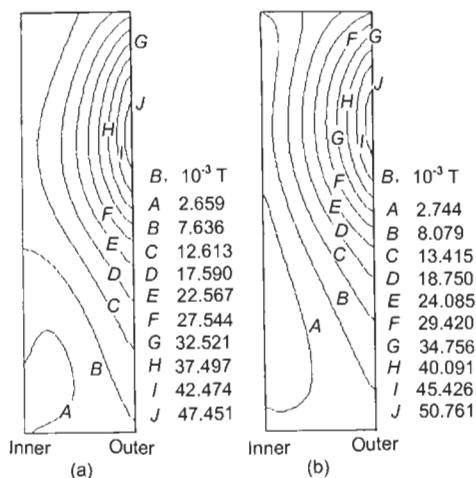


图 3 管壁中磁感应强度的分布

Fig.3 Distributions of magnetic flux density in tube wall  
(a) out-phase magnetic field  
(b) single-coil magnetic field

元素的固溶<sup>[4]</sup>. (2) 磁场分布决定 Joule 热的分布(见图 5c), 影响金属凝固时的温度场. (3) 磁场分布决定电磁力的分布, 改变初始凝壳的受力状态以及液态金属的流动. 以下主要讨论电磁力改变初凝壳的受力状态能够提高铸管内表面质量的原因.

图 6a, b 分别为内、外石墨环及整个铸管所受电磁力的分布. 双线圈异相条件下, 内石墨环处的初凝壳及其附近液态金属受到较大的沿径向向外的电磁推力. 此力部分抵消了液态金属对初凝壳的静压力: (1) 使初凝壳与内石墨环接触压力减小; (2) 在初凝壳中, 因内部过热熔体重熔的枝晶间低熔点物质, 不至于在熔体静压力作用下渗出凝壳, 形成偏析瘤. 另一方面, 此力使初凝壳具有与内石墨环分离的趋势, 减少了凝固收缩的接触压力: (1) 使一次冷却强度降低, 形成较薄的具有一定塑性的凝壳, 避免出现因强烈的凝固收缩使铸管与内结晶器直接抱死的“抱芯”现象; (2) 使摩擦降低, 使凝壳与内石墨环之间容易出现空隙, 减少摩擦距离, 实现连铸空心管内表面的“软接触”, 提高铸管的内表面质量. 而单线圈的情况是: 内石墨环处的金属熔体和凝壳受到的电磁力较小, 且沿径向指向管的内表面, 不能起到上述作用. 至于电磁场提高空心管的外表面质量的原因与电磁连铸实心锭<sup>[12]</sup>的情况相同.

图 7a—c 分别为双线圈异相位、单线圈和普通无磁场条件下制备的尺寸为  $290\text{ mm} \times 35\text{ mm}$  空心管的内、外表面照片. 从图可见, 双线圈异相条件下铸管内、外表面均好, 偏析瘤得到有效抑制; 单线圈条件下偏析瘤也得到抑制, 但效果不如双线圈的, 且其内表面受电磁力作用容易出现压痕、裂纹等; 而无磁场条件下, 内、外表面的偏析瘤比较严重, 表面质量不好.

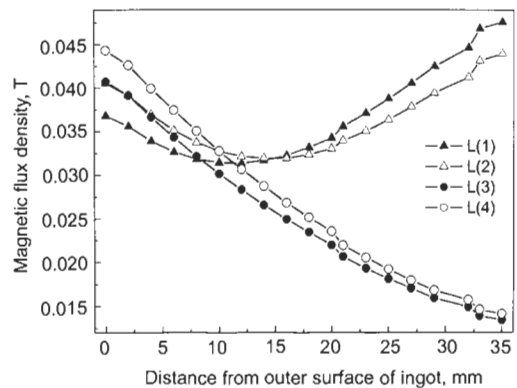


图 4 沿石墨环中心径向磁感应强度的分布

Fig.4 Distributions of magnetic flux density along the radial from the center of graphite annulus  
(L(1)—Inner graphite annulus in out-phase magnetic field, L(2)—Outer graphite annulus in out-phase magnetic field, L(3)—Inner graphite annulus in single-coil magnetic field, L(4)—Outer graphite annulus in single-coil magnetic field)

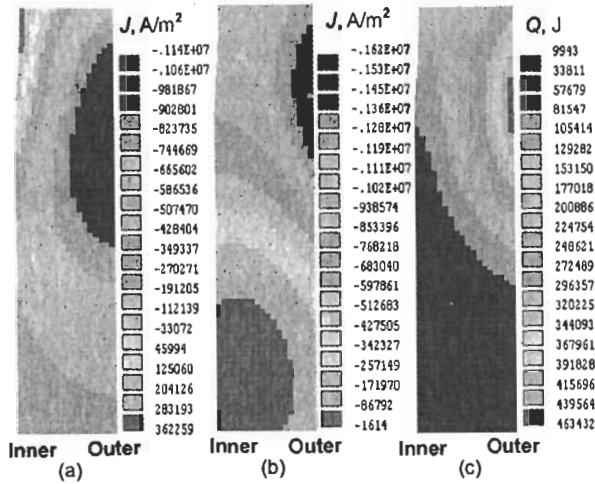


图5 管壁中的感应电流及 Joule 热分布

Fig.5 Distributions of induced current and Joule heat in pipe wall

- (a) real part of induced current
- (b) imaginary part of induced current
- (c) Joule heat

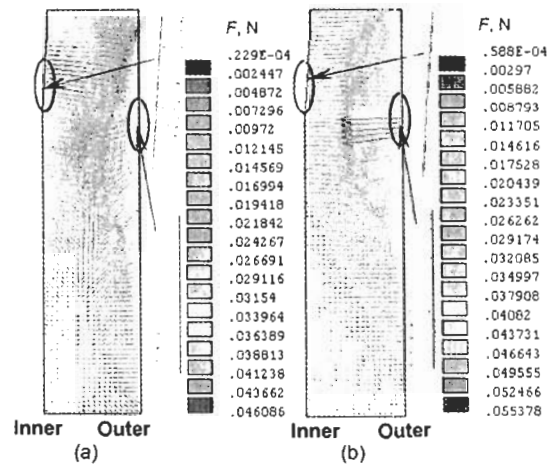


图6 铸管中电磁力的分布

Fig.6 Distributions of Lorentz force in tube wall

- (a) out-phase magnetic field
- (b) single-coil magnetic field

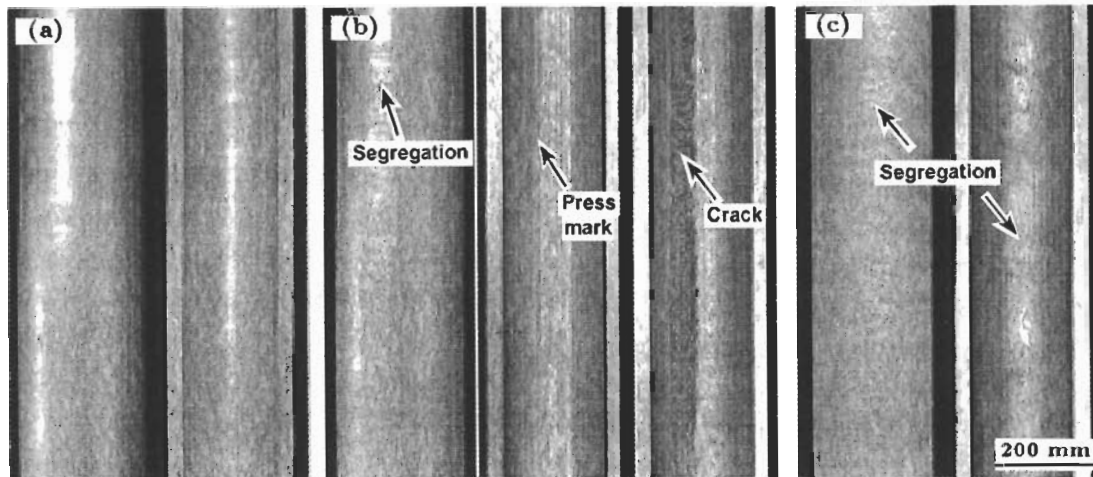


图7 铸管的内、外表面照片

Fig.7 Inner/outer surface of casting pipe with dimension of 290 mm×35 mm

- (a) out-phase magnetic field
- (b) single-coil magnetic field
- (c) without magnetic field

### 3 结论

(1) 获得了双线圈异相位磁场、力场以及感应电流、焦耳热的分布。管壁中的磁场为交变磁场，与单线圈比较，总体磁场强度高、分布均匀且内石墨环处略高。

(2) 异相位磁场改变了铸造中液态金属的自然流动状态，壁厚中部的金属熔体受到沿径向向外的电磁推力，使熔体向外结晶器方向流动。

(3) 内、外石墨环附近的金属熔体和初凝壳受到电磁斥力的作用，可以避免“抱芯”，减少摩擦力和摩擦距离，抑制偏析瘤形成，进而提高铸管表面质量。

### 参考文献

[1] Richter R T, Ekenes J M. *JOM*, 2004; 56: 10  
 [2] Kim S W, Hao H. *Metall Mater Trans*, 2003; 34A: 1537

[3] Zhang Q. *Acta Phys Sin*, 2003; 52: 2642  
 (张 勤. 物理学报, 2003; 52: 2642)  
 [4] Dong J, Cui J Z. *J Aeronaut Mater*, 2003; 23: 16  
 (董 杰, 崔建忠. 航空材料学报, 2003; 23: 16)  
 [5] Wang Z F. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 2005; 27: 325  
 [6] Zhang B J, Cui J Z. *Chin J Nonferrous Met*, 2002; 12: 112  
 (张北江, 崔建忠. 中国有色金属学报, 2002; 12: 112)  
 [7] Yang Y S. *Acta Metall Sin*, 1994; 30: B208  
 (杨院生. 金属学报, 1994; 30: B208)  
 [8] Harada H. *Can Metall Q*, 2000; 39: 307  
 [9] Li Q L. *Rare Met Mater Eng*, 2004; 33: 429  
 (李丘林. 稀有金属材料与工程, 2004; 33: 429)  
 [10] Oszkár B, Preis K. *IEEE Trans Magn*, 1989; 25: 3145  
 [11] Biro O. *IEEE Trans Magn*, 1988; 24: 102  
 [12] Zhang Q. *J Northeast Univ*, 2002; 23: 671  
 (张 勤. 东北大学学报, 2002; 23: 671)