

# 真空自耗电弧熔炼中电磁搅拌的数值模拟

王斌斌, 常 辉, 李金山, 王锦程, 寇宏超, 胡 锐, 周 廉

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 利用 ANSYS 软件对真空自耗电弧熔炼的电磁搅拌过程进行三维模拟计算, 分析重熔电流、磁场和洛伦兹力的分布情况, 讨论了搅拌线圈对磁场和搅拌力的影响。结果表明: 重熔电流从坩埚壁经熔池表面流回电极, 铸锭和坩埚底部几乎没有电流; 重熔电流产生环绕对称轴的磁场, 磁场强度从电极中心到坩埚外壁呈先增大后减小的趋势; 搅拌线圈产生平行于对称轴的磁场, 其磁感应强度在铸锭部分呈均匀分布; 施加搅拌线圈产生了使熔池发生旋转的洛伦兹力。

**关键词:** 真空自耗; 电磁搅拌; 数值模拟; ANSYS; 洛伦兹力

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)11-1969-05

由于钛合金具有比强度高、耐蚀性能好、熔点高等一系列的显著优点, 已经在航空航天、设备制造、医用器材、体育用品等领域得到越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。真空自耗电弧熔炼(Vacuum Arc Remelting, VAR)是目前钛合金铸锭的主要生产方法, 它具有设备投资和运行成本较低、操作技术简单等优点<sup>[2,3]</sup>, 但该法生产的铸锭中存在宏观成分偏析、夹杂等质量问题也是不容忽视的。VAR 过程中的电磁搅拌可以起到改善铸坯凝固组织、扩大等轴晶区以及减小宏观偏析等<sup>[4]</sup>作用, 是一项非常重要的控制技术。电磁搅拌的效果在很大程度上取决于坩埚中电磁场分布和在熔池中所产生的电磁力。熔炼电流、自感磁场和搅拌磁场间的电磁相互作用对熔炼过程中温度场分布、熔池形状以及最终铸锭中的组织与成分均匀性都有非常重要的影响。但由于这种发生在坩埚之中的电磁相互作用, 无论从测试手段和方法上都难以实现, 数值模拟就成为对其进行研究的重要方法<sup>[5~7]</sup>。鉴于此, 利用电磁场相关理论建立真空自耗电弧熔炼电磁搅拌过程数学物理模型, 然后在此基础上使用 ANSYS 软件计算熔炼电流、熔炼电流自感磁场和搅拌磁场的分布, 并对电磁搅拌力进行分析, 以期改善 VAR 过程中的电磁搅拌效果奠定基础。

## 1 电磁搅拌模拟的数学物理模型

### 1.1 电磁场计算的控制方程

在真空自耗电弧熔炼过程中熔炼电流、熔炼电流自感磁场和搅拌磁场的计算求解要满足麦克斯韦方程

组, 包括:

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{B} = -\mu \varepsilon \partial \vec{E} / \partial t + \mu \vec{J} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \varepsilon \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

式中,  $\vec{J}$  为感应电流,  $t$  为时间,  $\vec{E}$  为电场强度,  $\vec{B}$  为磁感应强度,  $\rho$  为电荷密度,  $\sigma$  为电导率,  $\mu$  为磁导率,  $\varepsilon$  为介电常数。

对于电场和磁场的计算, 分别使用 ANSYS 软件中的电标势法和磁矢势法进行数值求解<sup>[8]</sup>。利用标量电势  $\varphi: \vec{E} = -\nabla \varphi$  和矢量磁势  $\vec{A}: \vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ , 经推导, 可得到磁场偏微分方程和电场偏微分方程:

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (5)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\rho / \varepsilon \quad (6)$$

由于真空自耗电弧熔炼中的熔炼电流为直流电, 电磁搅拌采用低频电源, 位移电流可以忽略<sup>[9]</sup>, 因此可以认为整个过程中电场与磁场都是准静态问题。式(5)、(6)可以简化为

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (7)$$

$$\nabla^2 \varphi = -\rho / \varepsilon \quad (8)$$

利用相应的边界条件和初始条件解得磁势和电势的场分布值, 然后根据标量电势和矢量磁势定义式就可以得到相应电场与磁场的分布。利用电场的计算结果结合欧姆定律:  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ , 可以得到熔炼电流的分布。电流与磁场相互作用产生的洛伦兹力则由公式

收稿日期: 2008-10-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2007CB613802)

作者简介: 王斌斌, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88493484, E-mail: wangbinbin17121@163.com

$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$  得到。

### 1.2 电磁搅拌的物理模型及计算条件

计算中采用三维轴对称模型如图 1 所示(1/2 模型)。主要包括自耗电极、铸锭、铜坩埚、电弧区、空气层、线圈 5 部分, 为简化计算, 做如下假设:

(1) 由于电弧弧压与电流成正比<sup>[10]</sup>, 认为电弧区是具有一定电阻的导体, 电阻率由实验中电流与电压大小反推得到;

(2) 空气层足够大, 在模型外不存在漏磁现象, 在整个计算区域外部施加磁力线平行边界条件;  $n \times A = 0$ ;

(3) 计算中的材料均为弱磁性物质, 相对磁导率为 1, 电磁属性均为各向同性且为常数。

计算中相关的 VAR 过程的参数见表 1。其中铸锭和电极是 TC4 合金, 坩埚与线圈是纯铜, 详细的材料参数见表 2。

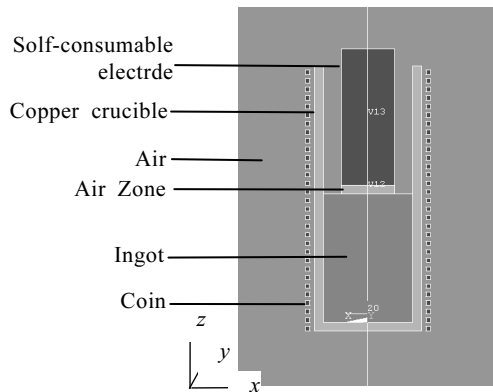


图 1 计算模型

Fig.1 Calculation model

表 1 VAR 过程的参数

Table 1 VAR process parameters

$d_i$ /mm	Thickness/mm	$I$ /A	$N$	$d_E$ /mm	$U$ /V
100	10	75	31	60	30

Note:  $d_i$ -inner diameter,  $N$ -number of turn,  $d_E$ -electrode diameter

表 2 材料物性参数

Table 2 Physical properties of material

Model parte	Resistivity/ $\Omega \cdot m^{-1}$	Relatively, $\mu$
Electrode and Ingot	$1.9 \times 10^{-6}$	1
Crucible	$2.0 \times 10^{-8}$	1
Arc zone	$3.5 \times 10^{-3}$	1
Air	$+\infty$	1
Coin	$2.0 \times 10^{-8}$	1

采取间接耦合的方法对 VAR 电磁搅拌过程进行分析, 具体分析步骤为: (1)进行电场分析, 得到重熔电流在电极, 电弧区, 铸锭和坩埚中的分布; (2)利用电场分析结果计算重熔电流产生自感磁场和搅拌线圈产生的磁场; (3)计算和分析铸锭中的洛仑兹力。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 重熔电流的分布

重熔电流不但是磁场的激励条件, 而且根据公式  $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$  可知, 电流在熔池上的分布对电磁搅拌力也有直接的影响<sup>[11]</sup>, 因而在做磁场分析前必须首先对电流分布进行计算分析。

计算中, 以坩埚壁顶端作为正极, 电极作为负极, 从而形成坩埚-铸锭-电弧-电极-坩埚的回路。图 2 是重熔电流在体系中的分布图, 图 3 是熔池表面电流密度矢量俯视图。由图 2 可看出, 重熔电流主要集中在坩埚壁上以及熔池表面和电极上, 也就是说电流沿较短的路径从坩埚流向电极, 在铸锭和坩埚底部则几乎没有电流; 另外, 电流密度大小在坩埚和电极上也比较均匀。

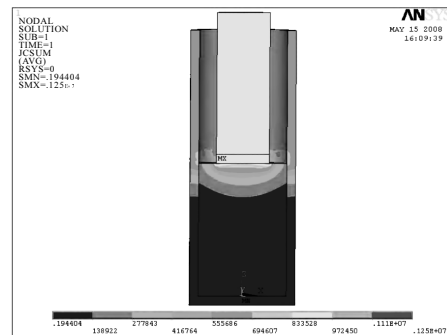


图 2 电流密度分布

Fig.2 Distribution of the electric current density

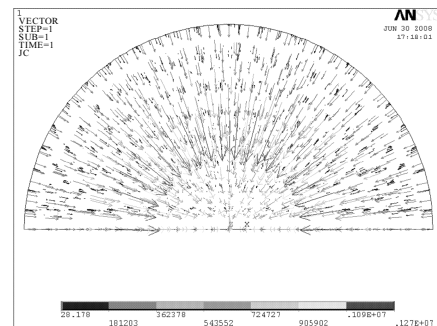


图 3 熔池表面电流密度矢量俯视图

Fig.3 Vector distribution of current density at the surface of the molten pool

由图 3 可以看出, 电流从坩埚经熔池表面流向电极过程中, 在熔池表面呈典型的向心分布, 这种分布有利于加磁搅拌后洛伦兹力的产生。

图 4 是熔池表面各个方向上电流密度分布。从  $x$  方向电流变化可以看出, 由于电流从坩埚壁流向电极过程中, 电流不断集中, 电流密度逐渐增大, 在铸锭与电弧区交界处(虚线)达到最大值, 而在铸锭与电弧区相交的部分则主要是沿对称轴流向电极方向( $z$  方向)的电流, 流向中心电流减小。

## 2.2 磁场的分布

### 2.2.1 自感磁场的分布

采用间接耦合的方法, 将重熔电流作为磁场计算的激励载荷, 计算得到了重熔电流的自感磁场分布。

图 5 是计算得到的磁场分布云图。由于重熔电流主要分布在电极与坩埚部分, 结合安培环路定律可知坩埚内的磁感应强度要大于坩埚外。图 6 是在模型中部从对称轴到模型边缘的磁场分布。可以看出, 自感磁场是以电极中线为轴的旋转磁场( $y$  方向), 磁场强度从电极中心到坩埚外壁呈先增大后减小的趋势; 在电极的边缘达到最大值, 同时在坩埚外磁场几乎减为零,

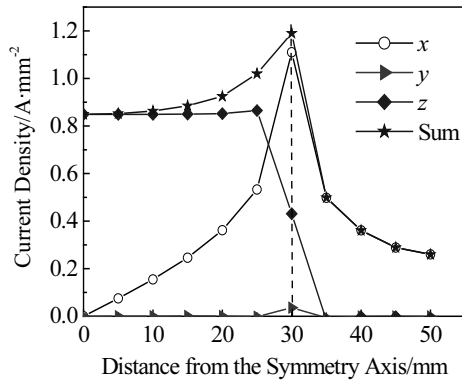


图 4 熔池上表面各方向电流密度大小  
Fig.4 Current density at the surface of the molten pool in different directions

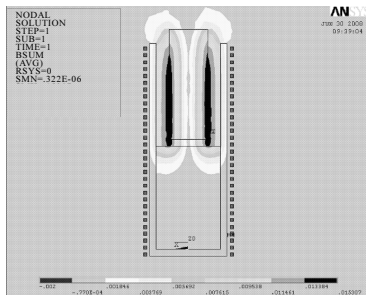


图 5 自感磁场分布  
Fig.5 Distribution of the self-induced magnetic flux

这与磁场环路定理是一致的。

### 2.2.2 搅拌线圈作用下的磁场分布

图 7 为有无搅拌线圈时熔池表面磁场的对比曲线。从中可以看出, 添加搅拌线圈后熔池表面的磁场图 7b 与未加磁搅拌的图 7a 相比, 径向( $x$ )和切向( $y$ )的磁场变化不大, 但在对称轴方向( $z$ )上, 产生了一个均匀的磁场, 结合电流分析的结果,  $z$  方向的磁场与径向电流相互作用就可以产生使熔池旋转的力。

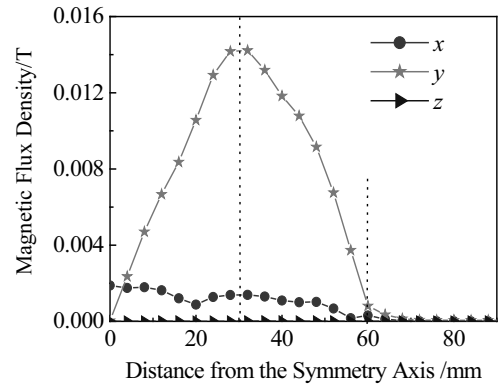


图 6 模型中部沿径向磁场大小  
Fig.6 The self-induced magnetic flux at the middle part of mould

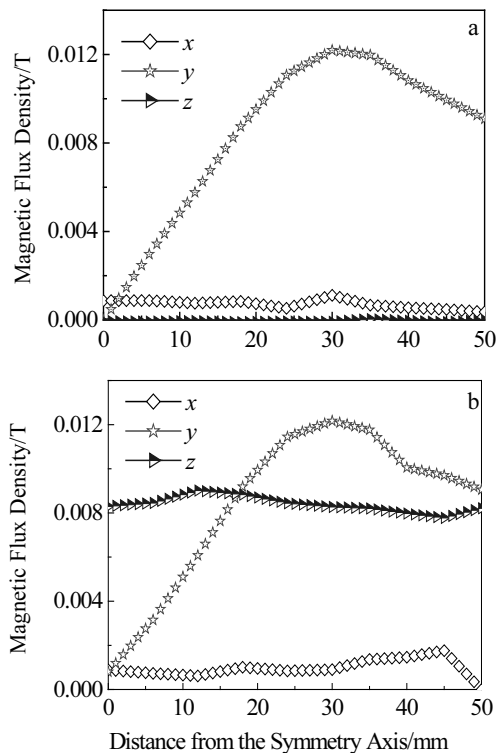


图 7 有无搅拌线圈时熔池表面磁场的对比曲线  
Fig.7 Magnetic field at the surface of molten pool without coil (a) and with coil (b)

### 2.3 洛伦兹力的分布

图 8 是添加搅拌磁场前后熔池表面洛伦兹力矢量图。从图中可以看出，没有磁搅拌时，在重熔电流与自感磁场相互作用下，产生了指向轴心的力，从垂直剖面图中可以看到该力还有一个向下分量，这时洛伦兹力是轴对称的；加磁搅拌之后，熔池表面洛伦兹力的形态发生了明显的变化，产生了一个使熔池旋转的

力。由此可知，加入磁搅拌后，电磁力不但可以使熔池产生沿纵向的旋转，而且使得熔池在其驱动下产生横向的旋转。

图 9 是在磁搅拌下得到铸锭中部的宏观组织照片。可以明显的看出这种洛伦兹力的作用痕迹，即加入磁搅拌后熔池的流动得到加强，进而起到减少宏观成分偏析和改善铸锭质量的效果。

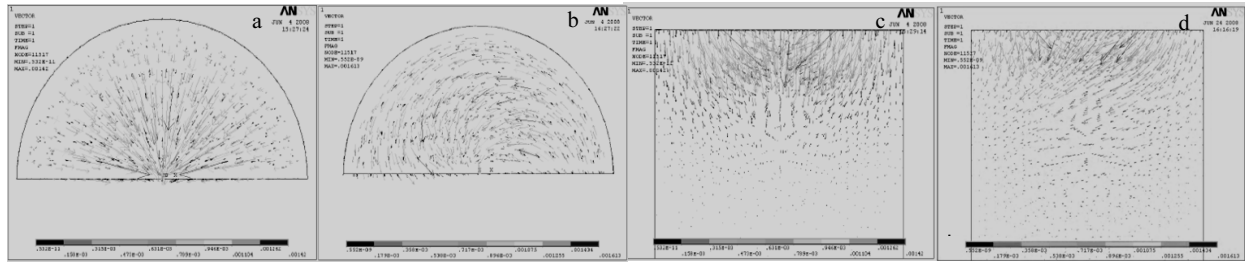


图 8 铸锭中的洛伦兹力分布

Fig. 8 Vector distribution of Lorentz force in cast ingot (a) x-y plane without coil, (b) x-y plane with coil, (c) x-z plane without coil, and (d) x-z plane with coil



图 9 磁搅拌铸锭横截面宏观组织

Fig. 9 Macrostructure of ingot cross direction with coil

### 3 结 论

1) 在对电磁场理论和电磁搅拌过程分析的基础上，利用 ANSYS 电磁分析模块可以建立真空自耗电弧熔炼三维轴对称电磁场模型。

2) VAR 过程中的重熔电流主要集中在坩埚壁上以及熔池表面和电极上；同时电流在熔池表面呈典型的向心分布，电流密度最大值在铸锭与电弧区交界处外延；重熔电流产生的磁场主要是环绕对称轴的方向，磁场强度呈从中心到远场先增大后减小的趋势，在电极的边缘达到最大值，同时在坩埚外磁场几乎减为零。

3) 添加搅拌线圈后，磁场在原有环绕对称轴分量基础上增加了平行于对称轴的分量，其磁感应强度在

铸锭部分呈均匀分布；洛伦兹力的形态发生明显的变化，产生一个使熔池旋转的力。

#### 参考文献 References

[1] Shu Qun(舒 群), Guo Yongliang(郭永良), Chen Ziyong(陈子勇) *et al.* *Materials Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 2004, 6(12): 332

[2] Li Xianjun(李献军). *Titanium Industry Process* (钛工业进展)[J], 2001, 17(3): 16

[3] Wang Gao(王 镐), Zhang Zhen(张 震), Li Benfang(李奔放). *Titanium Industry Process* (钛工业进展)[J], 1998, 14(5): 4

[4] Yu Yang(于 洋), Li Baokuan(李宝宽). *Shanghai Metals*(上海金属)[J], 2006, 28(2): 51

[5] Asai S, Nishio N, Muchi I. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*[J], 1982, 22(2): 126

[6] Spizer K H, Dubke M, Schwerdtfeger K. *Metallurgical Transactions B*[J], 1986, 17(1): 119

[7] Meyer J L, Szekely J, El-Kaddah N. *Transations ISU* [J], 1987, 27: 25

[8] Yan Zhaowen(阎照文) *et al.* *Ansys10.0 Engineering Electromagnetic Analysis and Detailed Interpretation of Example*(Ansys10.0 工程电磁分析技术与实例详解)[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006: 10

[9] Liu Guoping(刘国平), Tian Naiyuan(田乃媛), Wu Yaoguang(吴耀光) *et al.* *Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2006, 28(2): 119

- [10] Zhang Jingyu(张晶宇), Fan Lijuan(范丽娟), Zhang Yipeng(张一鹏) *et al. Vacuum(真空)[J]*, 2003(3): 21
- [11] Ward R M, Jacobs M H. *Journal of Materials Science[J]*, 2004, 39: 7135

## Numerical Simulation of Electromagnetic Stirring during Vacuum Arc Remelting

Wang Binbin, Chang Hui, Li Jinshan, Wang Jincheng, Kou Hongchao, Hu Rui, Zhou Lian

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In the present paper, 3-D numerical simulations of electromagnetic stirring during vacuum arc remelting (VAR) were conducted by using the ANSYS software to study the distribution of remelting current, magnetic field and Lorentz force. The effects of coil on magnetic and Lorentz force were also discussed. The results show that the current flows during VAR from crucible wall to the electrode via the surface of the ingot melt pool, and the currents in the crucible base and the ingot base are almost zero. The magnetic field induced by remelting current is axisymmetric and rounding, and the magnetic flux density along radial direction increases to a maximum value near the edge of the electrode and then decreases. The magnetic field in ingot induced by coil is parallel to the symmetry axis and the magnetic flux density is nearly uniform. The Lorentz force of coil could circumrotate the ingot melt pool.

**Key words:** vacuum arc remelting (VAR); electromagnetic stirring; numerical simulation; ANSYS; Lorentz force

---

Biography: Wang Binbin, Candidate for Master, State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88493484, E-mail: wangbinbin17121@163.com