

真空自耗电弧熔炼过程中电磁场的数值模拟

赵小花, 李金山, 常 辉, 杨治军, 寇宏超, 胡 锐, 周 廉

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 采用 ANSYS10.0 软件建立电磁搅拌条件下真空自耗电弧熔炼过程三维电磁场数学模型, 计算电流密度和磁场强度, 并对对比分析搅拌磁场对电磁力的影响。结果表明: 电流沿坩埚壁向下流动, 并在铸锭与坩埚的接触部位转为横向流动, 在铸锭表面横向电流最大; 随着熔炼的进行, 铸锭上部自感磁场基本不变, 下部的自感磁场强度减小; 搅拌磁场的添加使得铸锭表面产生水平旋转洛伦兹力, 且磁感应强度和功率损失随电流频率的增大而增大。

关键词: 真空自耗电弧熔炼; 电磁场; 电磁力; 数值模拟

中图分类号: TF062

文献标志码: A

Numerical simulation of electromagnetic field in vacuum arc remelting process

ZHAO Xiao-hua, LI Jin-shan, CHANG Hui, YANG Zhi-jun, KOU Hong-chao, HU Rui, ZHOU Lian

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

Abstract: 3-D numerical simulations of electromagnetic field during vacuum arc remelting (VAR) were made by ANSYS software to calculate the remelting current and magnetic field, and the stirring magnetic field on the magnetic force was analyzed. The results show that current flows down crucible wall and turns transversely via the surface of the ingot, where the currents are the largest in the horizontal direction. Magnetic field induced by remelting current is almost the same at the ingot surface, but decreases at the bottom of the ingot during the remelting process. Magnetic flux and the power loss induced by stirring coils increase with the current frequency increasing. The Lorentz force with stirring coils can circumrotate at the ingot surface.

Key words: vacuum arc remelting; electromagnetic field; Lorentz forces; numerical simulation

钛及钛合金因比强度高、热稳定性好、耐腐蚀及无磁性等优异性能成为飞机结构材料以及高性能航空发动机风扇、压气机轮盘和叶片等重要构件的首选材料^[1-3], 而大型飞机的研制对大型钛合金铸锭的成分均匀性和性能一致性提出了更高的要求, 因此, 钛合金铸锭的缺陷形成机制及成分均匀性控制成为重要的研究课题之一。真空自耗电弧熔炼(VAR)以其技术成熟、设备投资和运行成本低、操作简单而成为最主要的铸锭制备方法^[4], 并且在工艺控制等方面不断的得到改进和完善, 如 BERTRAM 等^[5]早在 1998 年就提出以大

电流、大熔速以及施加独立于熔炼电流和自感磁场的外加轴向磁场来改进钛合金铸锭熔炼的质量和效率。

VAR 是指在真空或惰性气体保护条件下, 利用直流或交流电弧做热源, 将自耗电极逐渐消熔, 熔化金属滴入水冷铜结晶器内冷凝成锭的过程^[6]。由于熔炼过程中, 冷却条件、熔池形状和深度并非一成不变, 因此, 不可避免地使合金元素或化合物在树枝晶间富集而形成偏析^[7], 从而影响合金的加工和使用性能。VAR 过程中电磁场直接影响铸锭温度场及熔池特征, 因此, 加强 VAR 过程中熔炼区域电场和磁场分布规律的研究

究,不仅能进一步理解熔炼工艺与铸锭质量的关系,而且对建立工艺过程的控制模型,实现熔炼工艺的优化控制具有现实的指导意义^[8]。采用实验方法研究大型铸锭的VAR过程成本高、实验周期长且实施困难,而数值模拟为深入理解这一物理过程和预测不同工艺参数的作用提供了一个科学有效的途径^[9],因此越来越多的研究人员开始关注VAR过程的数值模拟,如DAVIDSON等^[10]模拟了VAR过程中电磁力引起的熔池流动行为,CHAPELLE等^[11]采用FLUENT软件研究了VAR过程中电磁搅拌对熔池表面的影响。但由于VAR过程的复杂性,在模型以及边界条件的建立上还没有统一的认识。本研究采用ANSYS10.0软件建立了真空自耗电弧熔炼过程电磁场数学模型。对熔炼电流和自感磁场进行了数值模拟,并对搅拌磁场和电磁力进行了分析,期望对生产实践起到一定的指导作用。

1 数学物理模型

1.1 电磁场控制方程

在ANSYS中,采用麦克斯韦方程组来求解真空自耗电弧熔炼过程中熔炼电流、自感磁场以及搅拌磁场,包括:

安培定律

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

法拉第定律

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

高斯电通定律

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

高斯磁通定律

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

式中: \mathbf{J} 为感应电流, t 为时间, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{B} 为磁感应强度, ρ 为电荷密度, μ 为磁导率, ε 为介电常数。

利用相应的边界条件和初始条件求解得到相应的电场与磁场的分布。电磁力在不同坐标系下有不同的表达形式^[12]。若为直角坐标系,由 $\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{H}$ 和 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ 得^[13]

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} =$$

$$\frac{1}{\mu} \left[\left(\frac{\partial B_x}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_z}{\partial y} \right) k \right] \quad (5)$$

而由 $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 可知,

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu} \begin{vmatrix} i & j & k \\ J_x & J_y & J_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} =$$

$$(J_y B_z - J_z B_y) i + (J_z B_x - J_x B_z) j + (J_x B_y - J_y B_x) k \quad (6)$$

则

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu} \left\{ \left[\left(\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) B_z - \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) B_y \right] i + \right.$$

$$\left[\left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) B_x - \left(\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) B_z \right] j +$$

$$\left. \left[\left(\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} \right) B_y - \left(\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \right) B_x \right] k \right\} \quad (7)$$

1.2 边界条件

计算中采用的三维模型(1/4模型)如图1所示,相对实际工艺过程作如下简化:1)忽略坩埚壁与铸锭间的接触电阻,认为坩埚壁与铸锭间为理想导体接触;2)计算中的材料均为弱磁性物质,设定相对磁导率为1;3)由于真空环境下测试难度大,电弧区电阻通过欧姆定律反推获得;4)假定熔池表面为平直表面,不考虑表面张力等引起的熔池表面不平整。计算中采用的几何参数及工艺参数如表1和2所示。

本研究采取间接耦合方法^[14]对VAR电磁场进行分析,包括3个步骤:1)进行熔炼电流计算,得到重熔电流的分布规律;2)将电场计算的结果作为体载荷读入磁场,进行自感磁场和搅拌磁场的计算;3)利用

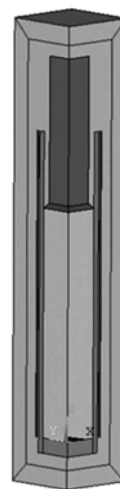


图1 VAR模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of VAR model

表 1 模型参数

Table 1 Parameters in VAR process

Height of electrode/mm	Diameter of electrode/mm	Height of crucible/mm	Wall thickness of crucible/mm	Diameter of crucible/mm
2 000	280	1 600	30	360

表 2 材料物性参数

Table 2 Materials properties in VAR process

Material	Resistivity/($\Omega\cdot\text{m}^{-1}$)	Relative permeability
Electrode, ingot	1.7×10^{-6}	1
Copper crucible	1.85×10^{-8}	1
Arc	0.01	1
Air	$+\infty$	1
Coil	1.85×10^{-8}	1

2 维轴对称模型研究电流频率对搅拌磁场的影响。其中电场计算的主要边界为电极上部施加电压 0 V，坩埚上表面电压 30 V；自感磁场的计算将电场结果导入，在空气区外围和对称轴施加磁矢势平行边界；搅拌磁场的主要边界为搅拌线圈施加电流密度 1.875 MA/m²，对称轴和空气外围施加磁矢势平行边界，远场单元施加远场边界；自感磁场和搅拌磁场耦合计算中，将电场所得结果和搅拌电流作为载荷同时读入，空气外围和对称轴施加磁矢势平行边界。

2 计算结果与讨论

2.1 熔炼电流在坩埚壁中的分布规律

熔炼电流作为联系电场和磁场的桥梁，研究其分布为分析自感电磁力和搅拌电磁力提供依据。图 2 中两条曲线分别表示坩埚壁中的电流密度与沿坩埚壁流走的电流密度分布。由图 2 可知，坩埚壁中的电流在接触到铸锭顶部之前基本保持不变，一旦流到铸锭顶部便迅速减小，在坩埚下部很大一部分区域内基本没有电流分布。而流入铸锭的电流(离开坩埚壁的电流)在铸锭顶部附近有一个最大值，铸锭下部几乎没有电流，也就是说电流在流动过程中一旦接触到铸锭就会发生偏转，流向铸锭，在铸锭表面横向电流最大。

2.2 VAR 过程中自感磁场分布

由于坩埚内熔炼电流主要分布在铸锭表面，结合安培环路定律可知，坩埚内的磁感应强度大于坩埚外。

因此，对不同熔炼阶段铸锭上表面和轴线上的磁感应强度进行分析(见图 3)。可以看出，不同阶段铸锭表面磁感应强度几乎没有变化，从铸锭中心向边缘磁感应强度递增，距离铸锭中心大约 0.16 m 时达到最大值(见图 3(a))。而沿铸锭轴向不同熔炼阶段磁感应强度变化

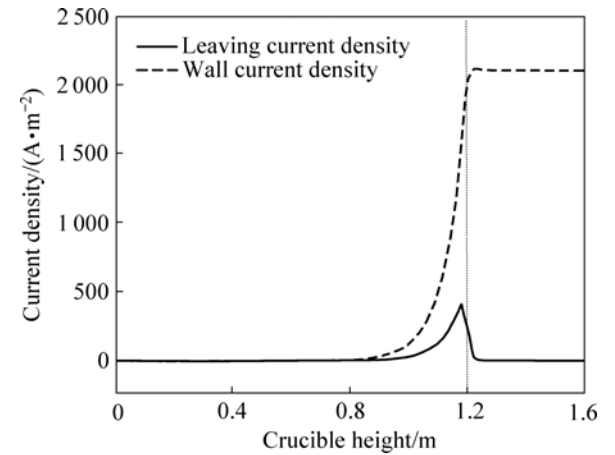


图 2 坩埚壁中电流密度分布
Fig.2 Current density distribution in crucible wall

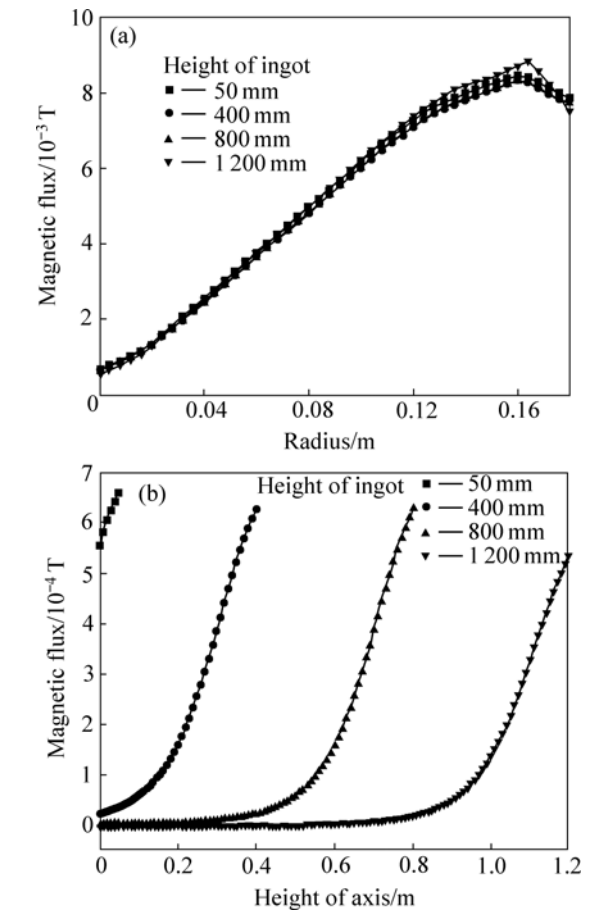


图 3 不同时刻铸锭上表面(a)和轴线上(b)磁感应强度分布
Fig.3 Magnetic flux distribution at different time: (a) On ingot surface; (b) Along ingot axis

明显,当熔炼进行到铸锭高度为 50 mm 时,铸锭底部磁场约为 5.5×10^{-4} T;随着熔炼进行,铸锭高度上升,当铸锭高度达到 400 mm 时,铸锭底部磁感应强度约为 0.2×10^{-4} T;当熔炼进行到铸锭高度为 800 mm 以后,铸锭下部很大一部分区域内磁感应强度几乎为 0。磁场的分布与坩埚内电流分布密切相关,熔炼刚开始时铸锭较短,由于铜坩埚的电导率大于 TC4 合金,因此电流沿坩埚壁向下传导的过程中,没有完全流向铸锭,相当一部分电流流向坩埚底部,再由坩埚底部流向铸锭。而随着铸锭的升高,传导到坩埚下部的电流越来越少(见图 2),即电流沿较短的路径从坩埚流向电极。由安培定律可知,铸锭底部的磁场也越来越小。

2.3 不同电流频率对搅拌磁场的影响

ANSYS 对搅拌磁场的计算可以通过 2 维模型实现。图 4 为搅拌线圈电流频率分别为 5、10、20、30 Hz 条件下搅拌磁感应强度分布云图。由图可知,随着电流频率的增大,搅拌磁场的磁感应强度逐渐增大,并且磁场分布向坩埚壁集中。这与电磁场的“集肤效应”有关。电磁场在导体中的穿透深度是频率、导磁率和导电率的函数,通过在导体表面附近划分足够细的有

限元网格来模拟集肤现象。趋肤深度可以按下式进行估算^[15]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (8)$$

式中: δ 为集肤深度, f 为频率, μ 为绝对导磁率, σ 为导电率。

在交变电流加载情况下,电流变化在导体中引起功率损失。电流频率与功率损失的关系如图 5 所示。由图可知,随着电流加载频率的增大,功率损失值增大。在热-电磁耦合分析中,功率损失项被表示为焦耳热生成率^[15],可以作为分析 VAR 过程的温度场的能量来源项。

2.4 有无搅拌线圈电磁力变化比较

计算自感磁场和搅拌磁场引起的耦合磁场电磁力的分布,与之前自感磁场单独作用引起的电磁力对比,所得结果如图 6 所示。图 6(a)所示为自感磁场引起的铸锭表面电磁力分布曲线。可以看出,电磁力沿 X 和 Z 方向均为负值,沿 Y 方向几乎为 0。即电磁力在铸锭表面斜向下分布,合力最大值出现位置与自感磁场

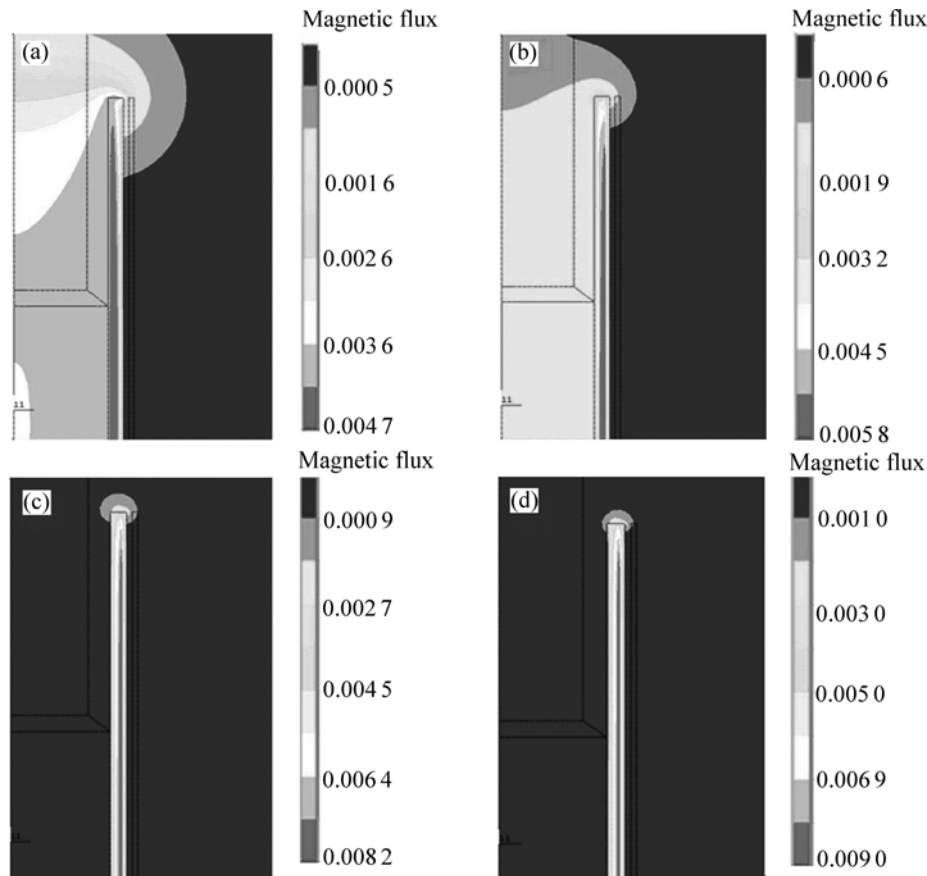


图 4 不同频率下搅拌磁感应强度分布云图

Fig.4 Magnetic flux nephogram at different frequency: (a) 5 Hz; (b)10 Hz; (c)20 Hz; (d) 30 Hz

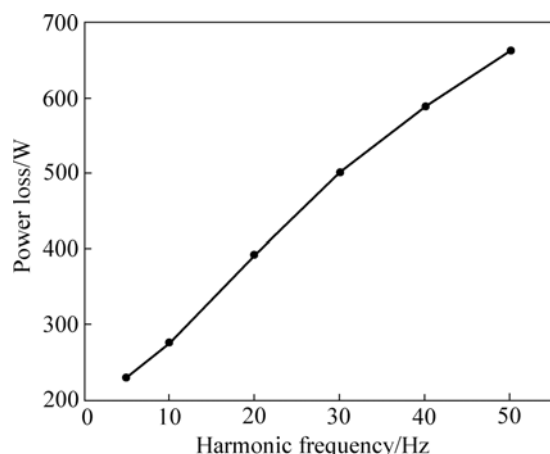


图5 功率损失与电流频率关系

Fig.5 Relationship between power loss and current frequency

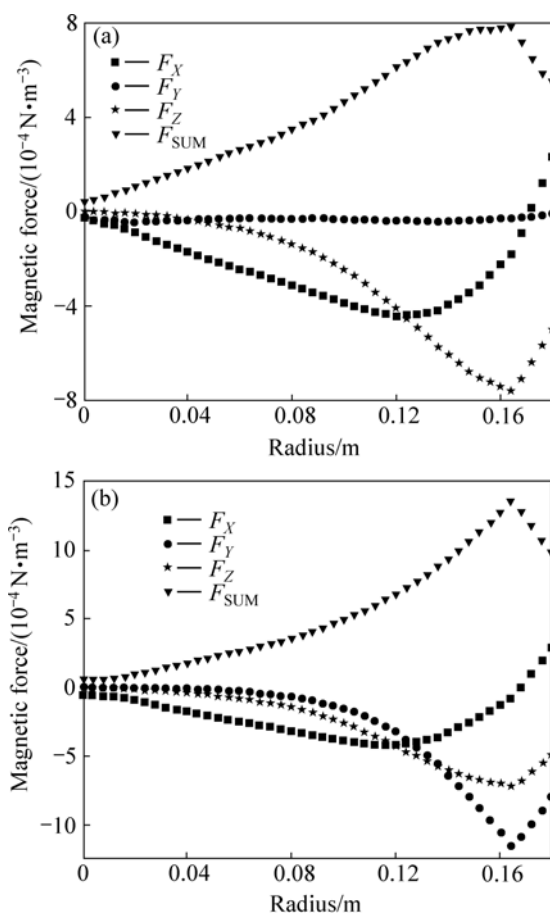


图6 有无搅拌磁场时铸锭表面电磁力的分布

Fig.6 Differences of surface Lorentz force with (a) or without (b) stirring coils

最大值位置基本一致。外加搅拌磁场后增大了电磁力沿 Y 方向的分量(见图 6(b)), 这样使得电磁力在铸锭表面产生两种运动趋势, 即斜向下运动和水平运动。并且通过对比可知, 施加搅拌磁场后, 电磁力整体增

大, 促使熔池中流动加剧, 从而影响铸锭的凝固组织和成分均匀性。

3 结论

1) 电流沿坩埚壁向下流动, 流经铸锭与坩埚的接触部位时发生横向流动, 在铸锭表面横向电流最大。

2) 随着熔炼的进行, 铸锭上部自感磁场基本不变, 铸锭下部的自感磁感应强度减小。

3) 搅拌磁场的磁感应强度和功率损失随电流频率的增大而增大; 外加搅拌磁场后, 铸锭表面产生水平旋转洛伦兹力, 电磁力整体增大。

REFERENCES

- [1] 刘彬, 刘延斌, 杨鑫, 刘咏. TITANIUM 2008: 国际钛工业、制备技术与应用的发展现状[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2009, 4: 67-73.
LIU Bin, LIU Yan-bin, YANG Xin, LIU Yong. TITANIUM 2008: Development of international titanium industry, preparation technology and applications[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2009, 14(2): 67-73.
- [2] 黄伯云. 我国有色金属材料现状及发展战略[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14: 122-127.
HUANG Bai-yun. Status and developing strategy for China's nonferrous metal materials industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14: 122-127.
- [3] ABDEL-WAHAB E M. Microstructure characterization of Ti-6Al-4V machining chips after remelting and severe deformation[J]. Materials and Design, 2009, 30: 1825-1829.
- [4] 李献军. 真空自耗电弧炉熔炼技术和铸锭质量问题[J]. 钛工业进展, 2001, 18(3): 16-18.
LI Xian-jun. Vacuum arc remelting technology and the ingot quality[J]. Titanium Industry Process, 2001, 18(3): 16-18.
- [5] BERTRAM L A, SCHUNK P R, KEMPKA S N, SPADAFORA F, MINISANDRAM R. The Macroscale simulation of remelting processes[J]. JOM, 1998: 18-21.
- [6] 计玉珍, 郑赟, 鲍崇高. 真空电弧炉设备与熔炼技术的发展[J]. 铸造技术, 2008, 29(6): 827-829.
JI Yu-zhen, ZHENG Yun, BAO Chong-gao. Process in equipment and melting techniques of vacuum arc furnace[J]. Foundry Technology, 2008, 29(6): 827-829.
- [7] 王镐, 李成刚. 真空自耗电弧炉熔炼钛锭偏析缺陷的分析和改进[J]. 钛工业进展, 2000, 4: 16-18.
WANG Gao, LI Cheng-gang. Vacuum arc remelting of titanium ingots and segregation defects reclassification[J]. Titanium Industry Process, 2000, 4: 16-18.

- [8] 邹伟,高颀,陈战乾,郭廷中,刘会英. VAR炉熔炼过程中磁场作用的分析[J]. 钛工业进展, 2004, 20(4/5): 59-62.
ZOU Wei, GAO Qi, CHEN Zhan-qian, GUO Ting-zhong, LIU Hui-ying. Analysis of magnetic field action in vacuum arc remelting[J]. Titanium Industry Process, 2004, 20(4/5): 59-62.
- [9] KELLKAR K M, PATANKAR S V, MITCHELL A, KANOU O, FUKADA N, SUZUKI K. Computational Modeling of the vacuum arc remelting (VAR) process used for the production of ingots of titanium alloys[C]//NINOMI M, AKIYAMA S, IKEDA M, HAGIWARA M, MARUYAMA K. Proc of the Ti-2007 Science and Technology. The Japan Institute of Metals, 2007: 1279-1282.
- [10] DAVIDSON P A, HE X, LOWE A J. Flow transitions in vacuum arc remelting[J]. Mater Sci Tech, 2000, 16: 1-13.
- [11] CHAPELLE P, JARDY A, MINVIELLE M. Effect of electromagnetic stirring on melt pool free surface dynamics during vacuum arc remelting[J]. J Mater Sci, 2008, 43: 5734.
- [12] 张先棹. 冶金传输原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 23-58.
ZHANG Xian-zhao. Metallurgical transmission principle[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988: 23-58.
- [13] 刘国平,田乃媛,吴耀光,汪国才. 圆坯连铸结晶器电磁搅拌数学模拟[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(2): 119-123.
LIU Guo-ping, TIAN Nai-yuan, WU Yao-guang, WANG Guo-cai. Numerical simulation on the electromagnetic field of round billet continuous casting moulds in electromagnetic stirring process[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(2): 119-123.
- [14] 唐兴伦,范群波,张朝晖,李春阳. ANSYS工程应用教程热与电磁学篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003: 7.
TANG Xing-lun, FAN Qun-bo, ZHANG Chao-hui, LI Chun-yang. ANSYS application tutorial on thermal and electromagnetic post[M]. Beijing: China Railway Press, 2003: 7.
- [15] 孙明礼,胡仁喜,崔海荣. ANSYS10.0电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 73-79.
SUN Ming-li, HU Ren-xi, CUI Hai-tang. ANSYS10.0 examples of finite element analysis of electromagnetic guided tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 73-79.

(编辑 袁赛前)