

真空感应熔炼 TiAl 基合金中熔体流场的研究

王玮东¹, 刘 奎², 李依依²

(1. 西部超导材料科技有限公司, 陕西 西安 710018)

(2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)



王玮东

摘 要: 利用计算机模拟研究真空感应熔炼 TiAl 基合金过程中输入频率和功率对熔体流场的影响。以 Ti45Al8Nb0.8B 为实验原料进行模拟, 结果表明, 输入频率和功率仅影响流速的大小, 而不改变熔体内流场分布。当输入频率一定, 伴随着输入功率的增加, 熔体流速明显增加; 当输入功率一定, 频率越高流速越小。为了验证模拟结果的可信度, 实验测量了不同功率和频率下对应的熔体驼峰高度。经比较, 发现模拟和实际测量驼峰高度相当, 并且随着输入频率和功率的变化表现出相同的规律性, 模拟结果可信。

关键词: 真空感应熔炼; TiAl 基合金; 熔体流场模拟

中图分类号: TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2011)-12-0056-05

Study on Melt Velocity Field of TiAl Alloy in the Vacuum Induction Melting

WANG Weidong¹, LIU Kui², LI Yiyi²

(1. Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

(2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Effects of input power and frequency on flow field in vacuum induction melting TiAl-based alloy have been investigated by simulation using finite element simulation software-ANSYS. It was found that the distribution of flow velocity was insensitive to increasing input power and frequency which only altered the values of flow velocity. It was also showed that the flow velocity significantly increased with the increment of input power at the same frequency and decreased with increasing input frequency at the same input power. With loading different input powers and frequencies, the heights of free surface profile were measured to confirm the validity of the model. A relatively good agreement was found in comparison between results from calculation and those from direct measurement.

Key words: vacuum induction melting; TiAl-based alloy; simulation of flow field

1 前 言

真空感应熔炼 (Vacuum Induction Melting, VIM) 是一种冶炼 TiAl 基合金的有效方法^[1] (图1)。该熔炼技术采用热力学稳定性高的 CaO 坩埚在氩气保护下熔炼 TiAl-Nb-B 合金, 具有工艺简单、成本低、合金成分均匀等优点^[2-3]。但是, 强活性合金液与氧化物坩埚直接接触且存在强烈的交互作用, 导致坩埚中的微粒进入合金液中形成夹杂; 同时, 流速过大会降低合金液与坩埚之间层流层的厚度, 使坩埚产物更容易进入合金液, 造成合金液中杂质元素 (O, N, Si 等) 浓度增加^[4]。杂质元素浓度的增加除与坩埚氧化物种类有关外, 冶炼工艺

参数, 如熔炼功率和频率均会通过影响熔体在坩埚内的流场和温度场, 给合金带来不同的“增氧”效果 (或 N, Si 等元素)^[5]。

迄今为止, 对 TiAl 基合金熔炼中流场和温度场的研究都针对感应凝壳熔炼法 (Induction Skull Melting, ISM)^[6-9]。但是 ISM 法获得的合金液过热度较低, 容易使铸件产生浇不足、冷隔和疏松等缺陷。关于 VIM 法中流场和温度场的研究数据非常少, 本模拟研究以 Ti45Al8Nb0.8B 合金 (原子分数, 下同) 为实验原料, 该合金具有熔点高、活性大的特点 (Ti45Al8Nb0.8B 合金的熔点为 1550℃, 合金液与除 CaO, Y₂O₃ 外绝大多数常用氧化物起反应), 用实验的方法很难测出高温熔体内的流速, 不能直观的反映高温熔体的流场。因此, 为了优化熔炼工艺参数, 十分必要应用计算机模拟的方法, 模拟 VIM 熔炼过程中输入频率和功率对熔体流场的影响,

收稿日期: 2011-02-22

通信作者: 王玮东, 男, 1982 年生, 博士

并与实验可测得的间接数据进行对比,以确定模拟结果的准确性。图 1 是 VIM 炉熔炼 TiAl 基合金的示意图。本文利用计算机模拟的方法,模拟了 VIM 熔炼 TiAl 基合金过程中频率和功率对流场的影响规律,模拟的“悬浮驼峰”与实验测得的结果吻合很好,可见,模拟结果正确。

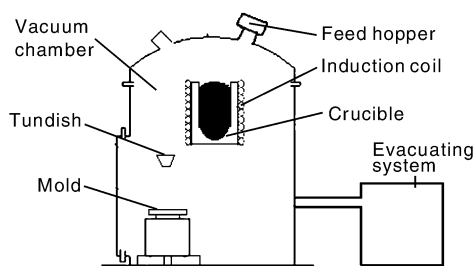


图 1 VIM 炉熔炼 TiAl 基合金示意图

Fig. 1 Sketch of melting TiAl based alloy in VIM furnace

2 实验

2.1 数值模拟

数值模拟基于如下假设条件:①激励源与各场量均按正弦规律变化,即电磁场为谐波磁场;②材料均质,各向同性,且电导率为常数^[10];③TiAl 基合金密度、

粘度不变,为不可压缩的牛顿型流体。

模拟步骤:①利用 ANSYS 的电磁场分析模块,进行三维谐波磁场分析,得到坩埚内各点的磁感应强度 B ;②将磁场分析获得的电磁强度结果,作为流场分析的载荷,代入到流场分析中,得到金属熔体中各点的流速;③选取一组加载参数作为基准,模拟计算时只改变其中某个参数,而保持其它参数不变。

2.2 驼峰测量

在熔炼过程中,熔体表面的电磁力、静压力、表面张力处于动态平衡,使其在熔炼过程中拱起一个弧形表面,即悬浮驼峰,悬浮驼峰的高度可以直观地反映出电磁搅拌的强弱程度。

采用烧痕法,测量悬浮驼峰轮廓^[11-12]。测量装置是一块长方形不锈钢薄板(132 mm × 270 mm × 1.2 mm),悬挂于 CaO 坩埚上方的加料斗上。将 Ti45Al8Nb0.8B 合金锭加入坩埚中,关闭炉门,抽空后通入氩气,熔炼开始。当炉料完全熔化后,慢慢放下加料斗,不锈钢板缓慢与熔体接触,由于 TiAl 基合金熔体温度高于不锈钢熔点,钢板同熔体接触的区域被熔化,最后在钢板上留下悬浮驼峰的痕迹,此痕迹作为测量悬浮驼峰轮廓的依据。实验过程中选用的参数见表 1。

表 1 输入频率、功率和坩埚尺寸

Table 1 Values of input frequency, power and dimension of crucible

Input power/Input current						Input frequency/Hz						Dimension of crucible/mm	
Power/kW	20	30	40	50	60	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000		Diameter	Height
Current/A	600	900	1 050	1 200	1 350							120	285

表 2 电磁参数和热物理参数

Table 2 The EM-properties and thermal-physical data

Section/ Material	Relative magnetic permeability	Resistivity / $\times 10^{-6} \Omega \cdot m$	Dynamic viscosity/Pa $\cdot s$	Density/kg $\cdot m^{-3}$
Alloy/ TiAl	1.00	1.71	3.50×10^{-3}	3.81×10^3
Coils/ Copper	1.00	1.67		
Crucible/ CaO	1.00	1.00		
Air area/ Air	1.00			

3 结果

3.1 电磁场

水冷铜线圈中通有高频电流。图 2 为熔炼炉内磁场分布情况,不同颜色代表磁场强度的大小。可以看出,电磁场被压缩在熔体与线圈之间的区域(区域 A);相比之下,熔体中心(区域 B)磁场强度较小,这是由于金属对电磁场有屏蔽作用,磁力线难以穿透至金属内部,仅分布在金属表面(趋肤效应)。此外,图 2 还显示,区域 A 的中下部其磁场强度明显大于区域 A 的其它部分,这种分布情况主要与线圈及坩埚设计有关。

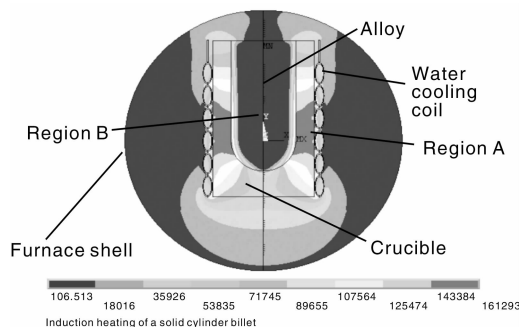


图 2 炉壳内磁场的分布情况

Fig. 2 Distribution of the magnetic intensity within furnace shell

磁场强度的分布规律表明,电磁感应加热和电磁搅拌仅发生在金属熔体和坩埚壁接触的区域,而金属熔体内部并没有受到电磁场的直接作用,熔体流动将热量和搅拌从金属的表面区域传递到内部。线圈中下部磁场强度较大,在熔炼过程中必然导致这个区域的温度和电磁搅拌都高于熔体其它部分。

3.2 流场

图3是一组典型的熔体流场模拟图,箭头表示流动方向,颜色代表流速大小。熔体中包含两个“漩涡”,其旋转方向相反,分别位于熔体的上半部和底部。熔体中流速最大的区域处于靠近坩埚底部的漩涡内(图3b),这与3.1中磁场强度的分布规律相吻合。值得注意的是当感应线圈一定时,流速的分布情况相似,不会随着输入频率和功率的改变而明显变化^[5]。

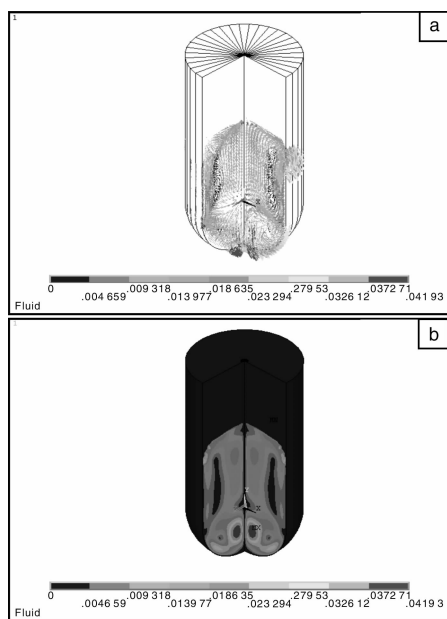


图3 熔体流场的矢量图(a)和熔体流速的分布情况(b)

Fig. 3 Flow field vector diagram of the molten alloy (a) and distribution of velocity in molten alloy (b)

根据电磁搅拌力公式^[12]:

$$F_j = 31\,600 \sqrt{\frac{1}{\rho_2 f} \frac{P_2}{S}} \quad (1)$$

式中: F_j 为电磁搅拌力, Pa;

P_2 为线圈的输入功率, kW;

ρ_2 为炉料的电阻率, Ω/cm ;

f 为输入频率, Hz;

S 为被感应器包围的炉料的面积, cm^2 。

由式(1)可知,搅拌力与输入功率成正比,与频率的平方根呈反比。提高输入频率可以降低熔体流速,减弱对坩埚壁的冲刷作用。模拟结果证实,平均流速(算

术平均值)和输入频率呈反比关系(如图4),两者的关系由式(2)表达:

$$V = 0.810\,4 - 5.35 \times 10^{-5} f + 1.534 \times 10^{-8} f^2 - 1.423 \times 10^{-12} f^3 \quad (2)$$

式中: V 为平均流速, m/s。

由图4看出,输入频率由2 500 Hz升高到4 500 Hz,流速仅降低了3 mm/s,这说明在使用高频电源的情况下,通过提高输入频率来减弱电磁搅拌效果不明显。

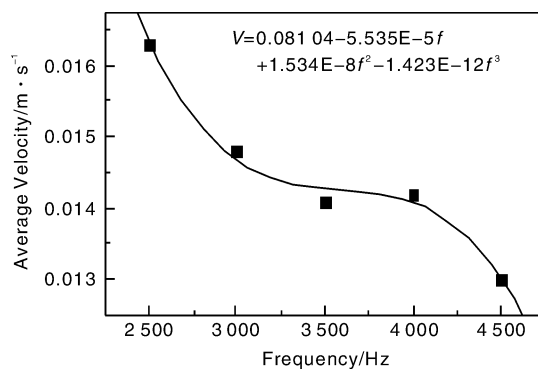


图4 平均流速和输入频率的关系(熔炼功率为100 kW)

Fig. 4 Relationship between input frequency and average velocity under smelting power of 1 kW

模拟结果还证实,电磁搅拌力和输入功率呈正比关系。图5显示,给定输入频率为2 500 Hz,增大功率,平均流速显著增加,两者的关系遵循式(3)。

$$V = 0.008\,36 - 5.143 \times 10^{-6} P + 6.892 \times 10^{-7} P^2 \quad (3)$$

式中: V 为平均流速, m/s。

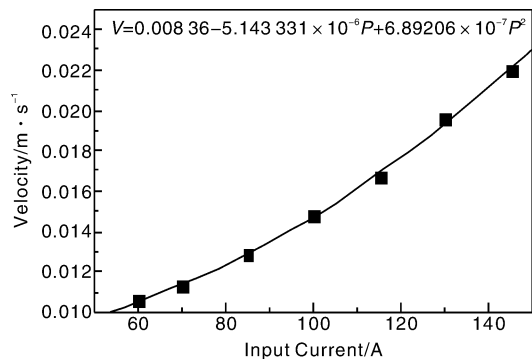


图5 平均流速和输入功率的关系(输入频率为2 500 Hz)

Fig. 5 Relationship between average flow velocity and input power under input frequency of 2 500 Hz

高温熔体的流速难以直接测量,但是一定量合金的“驼峰”高度 h 和流速呈正比关系。因此,可以通过驼峰高度间接反应流速和电参数的关系。实验中采用“烧痕

法”测定不同频率和功率时的驼峰高度,结果列于表 3。可以看出,驼峰高度的模拟结果低于实验测定结果,原因是在模拟过程中,忽略了流场对磁场的影响,但这两种结果都呈现相同的规律性,即驼峰高度和输入功率呈

正比关系,且频率对驼峰高度影响不大。输入功率越大,模拟结果和实验测定结果偏差越大,这是因为功率越大,流场对磁场的影响越大,从而造成模拟结果偏差大。

表 3 10 kg 合金不同功率和频率时的驼峰高度 (m)

Table 3 Heights of free melt surface with loading different input powers and frequencies (m)

Input power/kW	Frequency/Hz					
	2 990		2 795		2 595	
	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation	Experiment	Simulation
70	0.035	0.023	0.037	0.024	0.035	0.021
85	0.045	0.037				
100	0.062	0.055				
115	0.072	0.057				

4 讨 论

频率和功率是熔炼过程中最重要且可控制的两个工艺参数。一方面,基于输入频率对流速和升温速率的影响,频率应选取可调节范围的上限部分,以获得低流速和高升温速率。为了验证选取高频率熔炼 TiAl 基合金的合理性,实验使用相同批次的海绵 Ti、工业纯 Al、金属 Nb 屑和中间合金 TiB₂ 作为炉料,分别在 2 500 Hz 和 2 990 Hz 的频率下熔炼 Ti45Al8Nb0.8B 合金。铸态合金的 O 含量结果列于表 4。从表 4 看出,2 500 Hz 时的 O 含量明显比 2 990 Hz 时高,这是由于流速过快会降低合金液与坩埚之间层流层的厚度,使坩埚产物更容易进入合金液,造成合金液中杂质元素浓度增加。另一方面,

表 4 采用不同熔炼频率时铸态 TiAl 基合金的 O 含量

Table 4 The oxygen contents of as-cast TiAl-based alloy loading different input frequencies

No.	Alloy	Frequency/Hz	Oxygen content/ $\times 10^{-6}$
1	Ti45Al8Nb0.8B	2 500	2 100
2			2 000
3		2 990	1 700
4			1 300

由于合金熔炼是一个复杂的物理和化学过程,还应考虑合金与坩埚冶金物理化学反应的剧烈程度,在给定的频率下,要限制单位容量输入功率来降低流速和控制升温速率,以避免升温速率过快导致炉料快速烧损。实际生产中应该综合考虑这两个方面,合理调整输入功率和频率的匹配,以达到获得优质合金的目的。基于文中模拟和实验结果,真空感应熔炼 5.5 kg Ti45Al8Nb0.8B 合金

的冶炼工艺曲线见图 6。具体操作工艺如下:工业纯 Al、金属 Nb 屑、Ti-B 中间合金和部分海绵 Ti 装于 CaO 质坩埚内,剩余海绵 Ti 置于加料器中;合炉后先抽真空,待真空度优于 2 Pa 时,炉内充氩气,加压至 0.15 ~ 0.02 MPa;选取输入频率 2 990 Hz,开始以 40 kW 小功率送电 5 min,过 5 min 后送电功率继续加大到 60 kW 直至全熔,熔化过程中,向 CaO 坩埚内加入剩下的海绵 Ti。待炉料全熔后,进行充分的搅拌,然后停电冷冻去气,进行结膜处理。待熔池合金液结膜后,再大功率 60 kW 送电进行冲膜熔化,熔池的结膜冲开后(从结膜刚开始破裂到完全消失大约需要 30 ~ 60 s),加大功率到 70 kW 送电,并保持 90 s,此时炉温大约在 1 970 K,降低送电功率,带电浇注到熔模壳型中,铸成铸件。

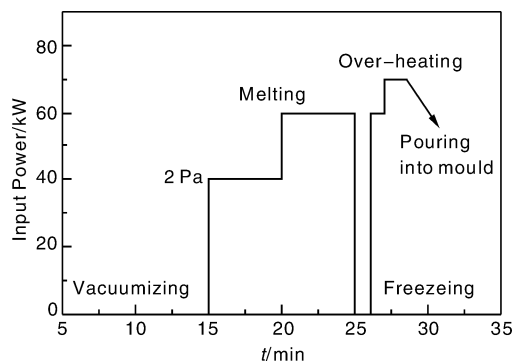


图 6 Ti45Al8Nb0.8B 合金的真空冶炼工艺

Fig. 6 Vacuum induction melting process of Ti45Al8Nb0.8B

5 结 论

(1) 电磁场被压缩在熔体与线圈之间的区域;相比之下,熔体中心磁场强度较小。线圈中下部的磁场强度高于线圈其它部分,导致这个区域的温度和电磁搅拌强

度都高于其它部分。熔体流场内包含有两个“漩涡”，其旋转方向相反，整个熔体中流速最大的区域处于近坩埚底的漩涡内。

(2) 输入频率和功率基本不影响流速的分布。当功率一定，流速随着频率增加而减小，但是减小的幅度有限。当输入频率一定，平均流速随着功率增加而明显增加。基于本模拟和实验结果，熔炼 5.5 kg Ti45Al8Nb0.8B 合金料，最佳的输入频率为 2 990 Hz，过热功率为 70 kW。

参考文献 References

- [1] Chu S C, Lian S S, A 2-D Finite Element Model Simulation of the Melting Process of Al-Ti Alloy in Vacuum Induction Furnace with Cold Crucible (VIFCC) [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004, 17: 229.
- [2] Liu Kui(刘奎), Ma Yingche(马颖澈), Gao Ming(高明), et al. *The Technology of Vacuum Induction Melting Ti-Al-Nb-B Alloy* (Ti-Al-Nb-B 合金的工艺): CN, 01138917.6[P]. 2001.
- [3] Liu K, Ma Y C, Gao M, et al. Loretto, Single Step Centrifugal Casting TiAl Automotive Valves [J]. *Intermetallics*, 2005, 13: 925.
- [4] Chen B, Jiang Z G, Liu K, et al. Modeling of Velocity Field for Vacuum Induction Melting Process[J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2005, 15: 447.
- [5] Chen Bo(陈波). *TiAl Alloy Vacuum Induction Melting, Casting Processes Simulation and Microstructure Controlling* (TiAl 合金的真空感应熔炼、铸造模拟和组织控制)[D]. Shenyang: Institute of Metal Research, the Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [6] Pericleous K, Bojarevics V, Djambazov G, et al. Experimental and Numerical Study of the Cold Crucible Melting Process [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2006, 30: 1 262.
- [7] Zhu Shouli(朱寿礼), Liao Qiang(廖强), Li Zengmin(李增敏), et al. 中频无芯感应炉熔化过程的数值模拟[J]. *Journal of Thermal Science and Technology* (热科学与技术), 2004, 3(1): 39.
- [8] Li Jianchao(李建超), Cui Jianzhong(崔建忠), Wang Baofeng(王宝峰), et al. 大方坯连铸跨结晶器电磁搅拌的数值模拟[J]. *Journal of Northeastern University* (东北大学学报), 2006(5): 497.
- [9] Liu Guoping(刘国平), Tian Naiyuan(田乃媛), Wu Yaoguang(吴耀光), et al. 圆坯连铸结晶器电磁搅拌数学模拟[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing* (北京科技大学学报), 2006(2): 119.
- [10] Jim Fort, Mark Garnich, Nick Klymyshyn. Electromagnetic and Thermal-Flow Modeling of a Cold-Wall Crucible Induction Melter [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2005, 36B: 141.
- [11] Wang Yanli(王艳丽), Ding Hongsheng(丁宏升), Bi Weisheng(毕维生), et al. TiAl 基合金感应熔炼自由页面的变化规律研究[J]. *Materials Science & Technology* (材料科学与工程), 2007, 2(15): 149.
- [12] Zhang Wucheng(张武城). *The Casting and Melting Technology*, 1-2(铸造和熔炼技术, 1-2) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004: 117.

ITER 计划中国制造任务首件产品启运

2011 年 12 月 2 日，中科院等离子所为国际热核聚变实验堆(ITER)计划中国制造任务的首件产品“ITER 环向场(TF)超导体”在安徽合肥举办交付启运仪式。科技部副部长曹健林、ITER 国际组织总干事本岛修、中国国际核聚变能源计划执行中心副主任罗德隆等出席仪式。

即将交付的全长 780 米 ITER-TF 导体是中国 ITER 采购包的首件正式产品，将用于 ITER 装置的建造，也是中国领先于 ITER 计划所有参与方完成的首件产品，这意味着中国在 ITER 采购包中进度第一，为开发完善核聚变相关技术，为我国今后建立自己的聚变堆奠定了基础。本岛修对此评价：“中国已处于引领地位。”

据介绍，中国的 ITER 导体生产实现了百分之百国产化，这在 ITER7 方中只有中国、日本能达到。在承担 ITER 导体任务的 6 方中，中国是唯一一个做到所有试验样品全部一次性通过苛刻的国际验证的国家，且产品性能优异，处于 6 方的前列，而中国相关企业界在此过程中也取得了飞速发展。

曹健林指出，中国是个发展中国家，按照国际标准设计、制造的中国首件 ITER 产品交付并运往国外意义重大。中国已为 ITER 投入了大量支持，今后将继续支持有关的国内研发和生产制造技术工作。他表示，研究院所发展快、科技进步快，得益于国家兴旺发达和连续高速发展，得益于不断改革创新和强化工程技术能力，今后需要更多企业界和科研院校等参与，共同努力，在 ITER 建造、解决中国和世界的能源问题方面作出我们应尽的贡献。

(来源：科技日报)