

采用数值模拟方法分析影响 VAR 熔炼钛合金铸锭表面质量的因素

罗文忠, 赵小花, 刘鹏, 吴伟, 何永胜, 王凯旋, 郝芳

(西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 采用数值模拟方法分析影响铸锭表面质量的因素, 借此达到提高铸锭成品率的目的。通过 MeltFlow 软件对 VAR 熔炼过程的温度场进行分析, 将高温液相与坩埚接触长度与表面质量建立联系。分析得出, 从工艺角度考虑, 熔炼电流、稳弧电流以及稳弧周期这 3 个因素对铸锭表面质量有影响, 结合实验验证表明, 采用较大的熔炼电流、大稳弧电流以及短稳弧周期有利于铸锭表面质量提高, 提高成品率。

关键词: VAR; 数值模拟; 钛合金; 表面质量

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)03-0927-06

真空自耗电弧熔炼作为目前广泛应用在优质高温合金以及航空钛合金铸锭成熟的工业熔炼方法, 其特点是熔炼速度快, 可生产满足工业化应用的大型铸锭^[1-3]。随着钛工业的发展, 目前钛合金的制备的趋势之一为降低制备低成本, 以及采用数值模拟手段加快研发进度^[4-6]。由于钛的热导率低, 钛锭机加过程中阻碍了机加工过程中所产生热量的迅速散失, 从而加速刀具的磨损, 造成机加效率降低, 成本上升^[7-9]。因此工业化生产中提高铸锭的表面质量, 有助于降低机加成本, 同时提高成品率。采用真空自耗电弧炉熔炼钛及钛合金, 由于受到各种因素的影响, 在铸锭表面会形成冷隔、夹杂、气孔等缺陷, 恶化铸锭的表面质量, 增大了扒皮量。扒皮量大小一直是影响钛合金铸锭成品率的重要因素之一^[10]。本研究采用 MeltFlow 软件, 对 VAR 熔炼过程的温度场进行分析, 将高温液相与坩埚接触长度与表面质量建立联系, 分析了工艺参数对铸锭表面质量的影响, 以期从工艺优化角度获得提高铸锭表面质量的方法。

1 数值模型建立

铸锭的表面质量主要是指气孔多少、深度, 有无凝壳以及凝壳的厚度, 这些都与熔炼过程中温度场有关, 即从液相向固相转变过程中, 液相保持时间、高温区域与坩埚壁的接触长度有关。以典型的 $\Phi 720$ mm 规格 TC4 合金为例, 采用 MeltFlow VAR 软件建立模型, 按照实际工艺输入边界条件。分析熔炼过程的变化。

MeltFlow-VAR 软件是一个用于 VAR 熔炼模拟的专用性软件。已经进行了大量验证实验, 确定该软件的模型和边界条件与目前的电弧炉设备相匹配。

VAR 过程中温度场的计算涉及电极熔化、电弧辐射以及铸锭凝固等一系列问题, 熔炼过程中存在传导、对流和辐射等各种热量传递方式^[11,12]。随着电极熔化, 熔滴穿过电弧区进入熔池。由于熔炼过程中工艺参数以及冷却条件的变化, 铸锭形成条件也在不断发生变化。VAR 熔炼非稳态行为分析的模拟区域图如图 1 所示。

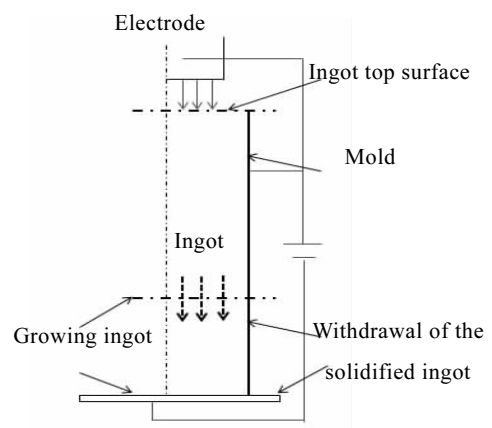


图 1 VAR 熔炼非稳态行为分析的模拟区域图

Fig.1 Computational domain analysis of the unsteady behavior of the VAR process

收稿日期: 2019-03-18

作者简介: 罗文忠, 男, 1980 年生, 博士, 高级工程师, 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018, 电话: 029-86538751, E-mail:420757100@qq.com

MeltFlow VAR 软件采用有限体积法进行模拟，建立轴对称数学模型。模型中考虑整个过程中铸锭的连续上升行为，熔炼过程中熔池健全到熔池上升整个阶段的温度场变化主要是求解能量控制方程：

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}C_pT)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}C_pT) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}}\nabla T) - \left(\frac{\partial(\rho\Delta H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\Delta H)\right) - (\nabla \cdot (\rho\bar{u}(h - C_pT))) + \frac{\partial(\rho\bar{u}(h - C_pT))}{\partial t} \quad (1)$$

式中， ρ 为密度， \bar{u} 为流速， C_p 为比热， T 为温度， t 为时间， k_{eff} 为有效传热系数， ΔH 为潜热， h 为热焓。

涉及到的边界条件为：

熔池上部散热：

$$q_{\text{loss}}(r) = \epsilon_{\text{top}}\sigma(T_s^4 - T_E^4) \quad (2)$$

式中， ϵ_{top} 为熔池上部发射率， T_E 为远端温度， σ 为电导率， T_s 为固相线温度。

电弧传递到熔池热量：

$$Q = V_{\text{arc}}I_{\text{arc}} - \dot{m}(H_{\text{superheat}} - H_{\infty}) - (1 - C_B)I_{\text{arc}}eV \quad (3)$$

式中，第 1 项表示总的电弧放热，第 2 项为熔化特定熔速下电极所需热量，第 3 项为坩埚冷却系统带走热量。

坩埚带走热量同时考虑了坩埚壁与铸锭接触和分离的情况，通过传热系数进行统一。

本研究中采用制备的 TC4 合金，进行物性参数测试，具体如表 1 所示。变温物性参数见图 2。分析典型的 $\Phi 720$ mm 规格 TC4 合金的温度场变化。

2 模拟结果及分析

2.1 熔炼过程温度场变化

图 3 是现行工艺下熔炼过程的温度场变化云图。由图 3 可见，熔炼不同时刻，高温液相与坩埚接触长度不同。分析认为，高温液相与坩埚接触长度越长，熔池到边情况越好，相应的表面质量会有所改善，而当铸锭一旦进入补缩阶段，随着熔炼电流的减小，接触距离变短，铸锭表面质量变差。由此可见，熔炼电流较小造成接触长度变短，表面质量变差。

表 1 试验材料的物性参数

Table 1 Physical properties of TC4 alloy

Parameter	Value
Liquid density/kg·m ⁻³	4050
Solid density/kg·m ⁻³	4400
Vol. Exp. Coeff./K ⁻¹	6.69×10 ⁵
Solidus temp./K	1868
Liquidus temp./K	1898
Latent heat/J·kg ⁻¹	3.50×10 ⁵
Electrical conductivity/S·m ⁻¹	7.60×10 ⁵

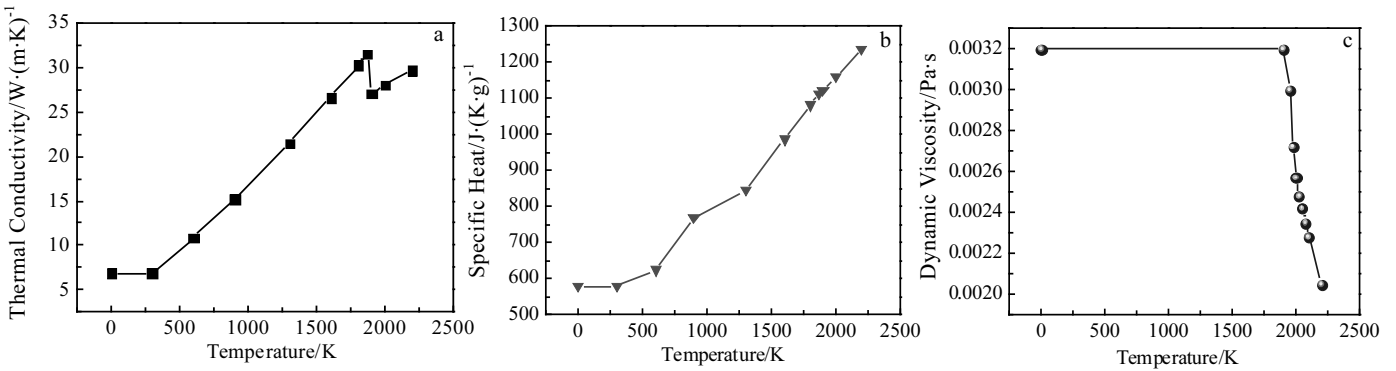


图 2 变温物性参数

Fig.2 Physical properties of TC4 alloy at different temperatures: (a) thermal conductivity, (b) specific heat, and (c) dynamic viscosity

以上分析认为熔炼电流较小造成表面质量变差，下面通过熔炼电流对比模拟进行验证。如图 4 所示，熔炼电流减小后，不但熔池深度减小，高温液相与坩埚接触距离也变短，相同铸锭高度情况下，接触长度缩短了一半。由此可见，熔炼电流大小确实为影响铸锭表面质量的一个关键因素^[13,14]。因此，在保证铸锭成分均匀性的前提下，适当提高熔炼电流，有利于熔池到边，从而提高铸锭表面质量。因此，在一次锭和

小二次上适当增大熔炼电流，增加高温液相体积，有利于熔炼过程中原材料的排气，提高表面质量的提高。

2.2 稳弧电流影响

VAR 炉外安装的稳弧线圈，接入稳弧电流后会产生纵向磁场，这一磁场与熔炼电流相互作用产生电磁搅拌^[15]，影响溶液流动。因此改变稳弧电流大小，熔池内的流动发生变化，对温度场产生影响^[16,17]。图 5 为不同稳弧电流下对于相同铸锭高度处熔池温度场

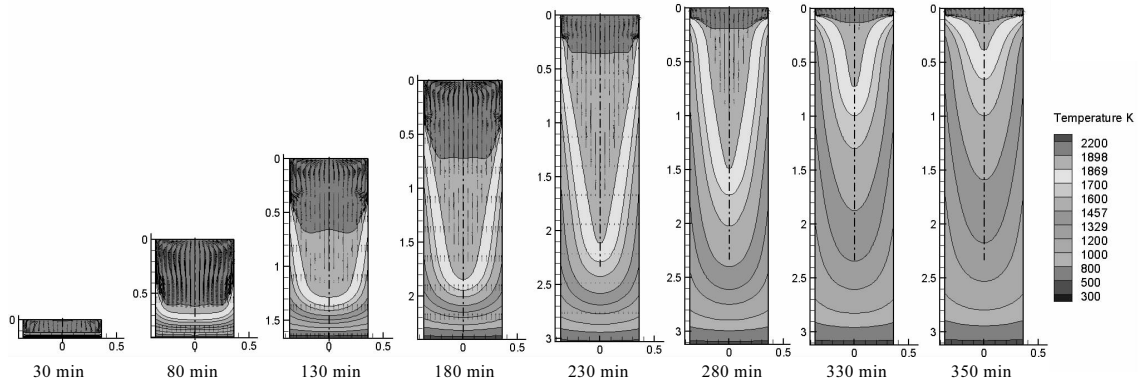


图 3 熔炼过程温度场变化云图

Fig.3 Typical temperature field distribution in the entire process

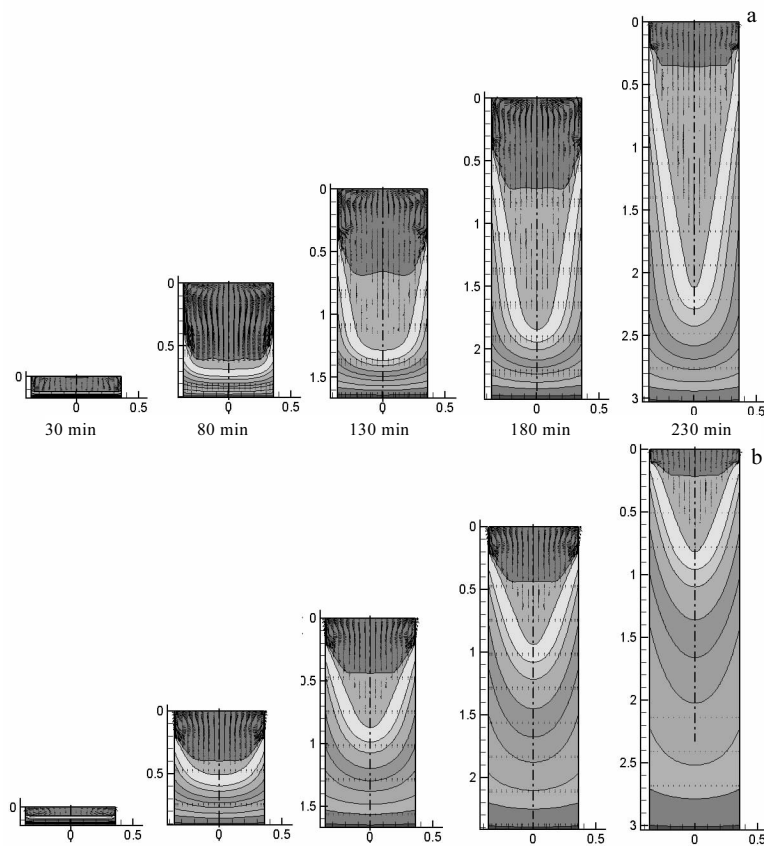


图 4 不同熔炼电流下熔池温度场

Fig.4 Temperature field results under different current conditions: (a) $I=29$ kA and (b) $I=16.5$ kA

的变化图。可见，稳弧电流增大，高温液相区域变大，熔池上部流动加剧，由于熔池边部液相与坩埚接触的部位主要是以逆时针(左侧)回路流动：熔池沿上表面向边部流动，沿边缘向下一一定深度后又流向熔池心部。因此，增大稳弧电流后，熔池表面高温液体冲击坩埚壁速度增大，有利于熔池到边，然而，速度增大后引起液体震荡，造成飞边喷溅增多，会加大无形损耗。

2.3 稳弧周期影响

熔炼过程中稳弧周期对熔池内的流动同样具有影响^[18-20]，图 6 为不同稳弧周期情况下熔池内温度场变化图。可见，当稳弧周期小于 18 s 时，熔池流动表现为逆时针(左侧)回路流动，且随周期增大，高温液相体积增大；当稳弧周期介于 18~40 s (不包含) 时，熔池流动表现为顺时针(左侧)回路流动，即熔池底部较冷液体冲刷坩埚与铸锭接触位置，因此，不利于熔池

到边；但是当稳弧周期为 40 s 时，表现的规律与低稳弧周期类似，大于 40 s 后又出现顺时针回路。由此可见，稳弧周期对熔池内流动的影响不是线性规律，基于提高成品率的考虑，选择稳弧周期时尽量避开 20~40 s 这个范围，又因为稳弧周期过大时，熔池内流动剧烈，熔池加深明显，糊状区变窄，因此大稳弧周期条件下，对铸锭凝固组织会具有非常明显的影响。综合考虑，选择稳弧周期较短时，有利于成品率的提高。

3 实验验证及分析

在模拟结果的基础上，设计 4 种熔炼工艺，如表 2 所示。其中实验 1 和 2 为对比实验，对比了熔炼电流和稳弧电流变化条件下的 TC4 铸锭表面质量如图 7，相较而言，实验 1 是提高了熔炼电流，增大了稳弧电流，实验 2 是降低了熔炼电流，减小了稳弧电流，从铸锭表面质量来看，尽管 2 种工艺下铸锭表面均存在气孔，但是实验 2 为皮下气孔，且铸锭端部的光亮

金属表面所占比例更小。因此，实验 1 表面质量较好。可见，大电流、大稳弧有利于表面质量提高。

实验 3 和 4 为对比实验，对比了稳弧周期变化条件下的 TC4 铸锭表面质量如图 8，相较而言，实验 3 大稳弧周期下铸锭表面呈现漫反射的光泽，相同冷却时间下铸锭表面为银白色。实验 4 表面发黄，有轻微氧化现象，表明出炉时实验 4 的表面温度大于实验 3，熔池到边更好。因此降低稳弧周期，铸锭的表面质量较好。

表 2 验证试验工艺参数

Table 2 Experiment process parameters

Experiment	Current/kA	Voltage/V	Coil's current/A	Coil's period/s
1	16	34	8	18
2	15	34	5	18
3	16	34	8	18
4	16	34	8	6

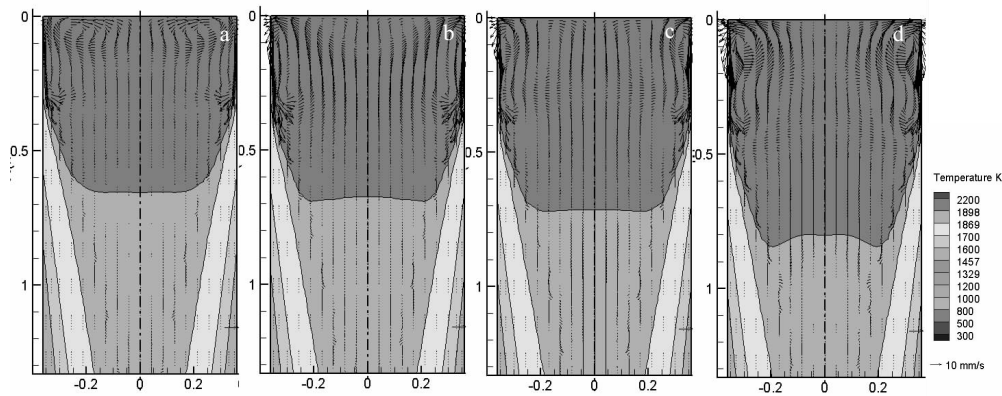


图 5 不同稳弧电流下熔池温度场

Fig.5 Temperature filed under different stirring coil's currents: (a) 10 A, (b) 18 A, (c) 23 A, and (d) 27A

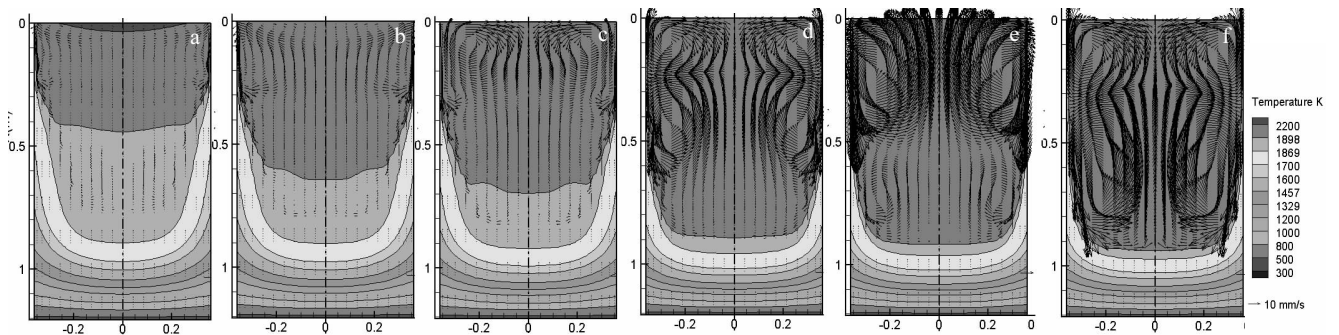


图 6 不同稳弧周期下熔池温度场

Fig.6 Temperature filed under different stirring coil's periods: (a) 5 s, (b) 10 s, (c) 18 s, (d) 30 s, (e) 40 s, and (f) 60 s

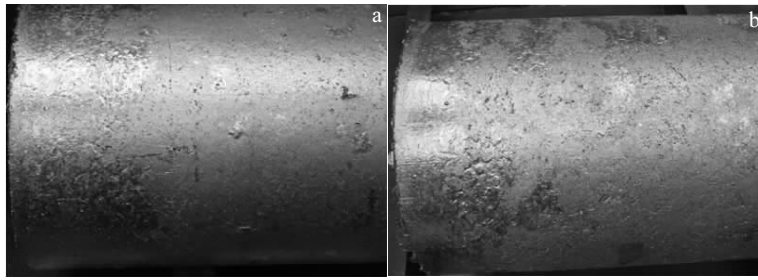


图7 不同熔炼工艺下铸锭表面质量

Fig.7 Ingot surface qualities with different process parameters: (a) experiment 1 and (b) experiment 2

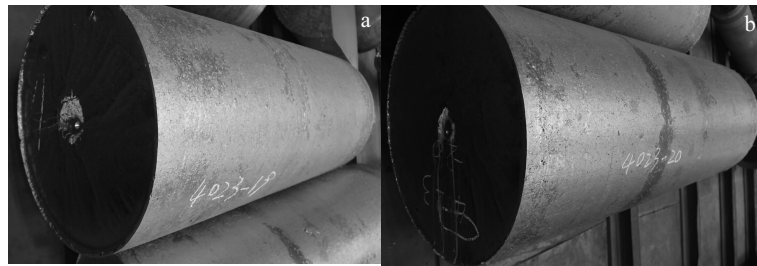


图8 不同稳弧周期下铸锭表面质量

Fig.8 Ingot surface quality with different stirring coils: (a) experiment 3 and (b) experiment 4

4 结 论

1) 采用 MeltFlow VAR 软件, 自测材料物性参数, 对 VAR 熔炼过程的温度场进行分析, 建立高温液相与坩埚接触长度与铸锭表面质量的联系。

2) 熔炼不同时刻, 高温液相与坩埚接触长度不同。对于铸锭表面质量存在变化。熔炼电流增大, 提高有利于铸锭表面质量提高。

3) 增大稳弧电流后, 熔池表面高温液体冲击坩埚壁速度增大, 有利于熔池到边; 稳弧周期对熔池内流动的影响不是线性规律, 综合考虑建议选择短稳弧周期。

4) 通过 4 组对比实验, 模拟结果与实验验证结果吻合性较好。

参考文献 References

- [1] Zhang Yingming(张英明), Zhou Lian(周 廉), Sun Jun(孙 军) *et al. Rare Metals Letters*(稀有金属快报)[J], 2008, 27(5): 11
- [2] Lei Wenguang(雷文光), Zhao Yongqing(赵永庆), Han Dong(韩 栋) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2016, 30(5): 103
- [3] Li Xianjun(李献军). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2001, 18(3): 17
- [4] Bertram L A, Schunk P R, Kempka S N *et al. JOM*[J], 1998, 50(3): 20
- [5] Lei Wenguang(雷文光), Mao Xiaonan(毛小南), Lu Yafeng(卢亚峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(10): 1724
- [6] Xiao Shulong(肖树龙), Chen Yuyong(陈玉勇), Zhu Hongyan(朱洪艳) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(5): 679
- [7] Leyens C, Peters M. Translated by Chen Zhenghua(陈振华) *et al. Titanium and Titanium Alloys*(钛及钛合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 218
- [8] Xiong Qingchun(熊青春), Song Yi(宋 戈), Zhao Wei(赵 威). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2013(14): 44
- [9] Xu Fake(徐发科). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1985, 14(1): 58
- [10] Li Xiaomeng(李小孟). *Rare Metals Letters*(稀有金属快报)[J], 2007, 26(11): 42
- [11] Zhao Xiaohua(赵小花), Li Jinshan(李金山), Yang Zhijun(杨治军) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2010, 30(11): 1003
- [12] Hafid E M, Alain J, Jean-Pierre B *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210: 566

- [13] Zhao Xiaohua(赵小花), He Long(何 龙), Wang Weidong(王 玮东) *et al. Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2013, 30(3): 18
- [14] Shevchenko D M, Ward R M. *Metall Mater Trans B*[J], 2009, 40(3): 266
- [15] Chapelle P, Jardy A, Minvielle M. *Journal of Materials Science*[J], 2008, 43: 573
- [16] Ward R M, Jacobs M H. *Journal of Materials Science*[J], 2004, 39(24): 7138
- [17] Chapelle P, Mir H El, Bellot J P *et al. Journal of Materials Science*[J], 2004, 39(24): 7149
- [18] Wu Cunyou(吴存有), Zhou Yueming(周月明), Hou Xiaoguang(侯晓光). *World Iron & Steel*(世界钢铁)[J], 2010(2): 38
- [19] Wang Binbin(王斌斌), Chang Hui(常 辉), Li Jinshan(李金山) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(11): 1971
- [20] Ward R M, Jacobs M H. *Journal of Materials Science*[J], 2004, 39: 7135

Computational Simulation of Factors Affecting Surface Quality of Titanium Alloy Ingot in VAR Process

Luo Wenzhong, Zhao Xiaohua, Liu Peng, Wu Wei, He Yongsheng, Wang Kaixuan, Hao Fang
(Western Superconducting Technologies Co., Ltd, Xi'an 710018, China)

Abstract: With the development of titanium alloy industry, the cost control of titanium alloy products has become an important competitive power. The yield rate of titanium alloy ingots is closely related to the ingot's surface quality. In this paper, the factors affecting the surface quality of ingots were analyzed by numerical simulation method to improve the yield rate. We used MeltFlow VAR software to analyze the temperature field in VAR process; the relationship between the surface quality and the contact length, which represents the distance between the high temperature liquid phase and crucible wall was established. It is concluded that the three factors, melting current, stirring coils current and period have effects on the surface quality of ingots. The experiment results show that the higher melting current, the greater stirring coils current and the shorter coils current period are beneficial to improve the surface quality and yield rate of ingots.

Key words: vacuum arc remelting; numerical simulation; titanium alloys; surface quality of ingots

Corresponding author: Luo Wenzhong, Ph. D., Senior Engineer, Western Superconducting Technologies Co., Ltd, Xi'an 710018, P. R. China, Tel: 0086-29-86538751, E-mail: 420757100@qq.com