文章编号：1004-0609(2009)10-1772-05

真空自耗电弧熔炼电流对 Ti-10V-2Fe-3Al 铸锭凝固组织的影响

薛祥义，孟祥炜，付宝全，杨治军，胡 锐，李金山，周 廉

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室，西安 710072)

摘 要：研究真空自耗电弧熔炼(VAR)条件下熔炼电流对 Ti-10V-2Fe-3Al 合金凝固组织的影响,分析 VAR 熔炼中熔池内部的对流类型，基于安培定理，建立 VAR 熔炼条件下熔池中的洛仑兹力与电流、磁场及铸锭半径的关系。结果表明：熔炼电流较低时，浮力的影响占据主要地位，加速热量的散失，铸锭中组织细小；随着熔炼电流变大，熔池中电磁力(洛伦兹力)的影响逐渐占据主要地位，将表面的热量带入熔池内部，增大了温度梯度，使铸锭组织变得粗大。

关键词：Ti-10V-2Fe-3Al；凝固组织；真空自耗电弧熔炼；熔炼电流；洛仑兹力；浮力

中图分类号：TG 146.2^{+}3 文献标识码： A

Influence of arc current on solidification microstructure of Ti-10V-2Fe-3Al under vacuum arc melting

XUE Xiang-yi, MENG Xiang-wei, FU Bao-quan, YANG Zhi-jun, HU Rui, LI Jin-shan, ZHOU Lian

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

Abstract: The influence of remelting current on the solidification macrostructure of Ti-10V-2Fe-3Al under vacuum arc remelting was investigated. Based on the Ampere–Maxwell equation, the relationships among the radius of the pool, intensity of magnetic field and electromagnetic (Lorentz) force were established. The results show that the flow is dominated by weaker buoyancy forces at low arc current, in this case, heat dissipation accelerate, the solidification microstructure becomes finer. With increasing arc current, the liquid metal flow is electromagnetically driven by Lorentz force, the heat is taken inside from superstratum of the pool, the temperature gradient in the pool increases, and the solidification microstructure becomes coarser.

Key words: Ti-10V-2Fe-3Al; solidification microstructure; vacuum arc remelting; arc current; Lorentz force; buoyant force

Ti-10V-2Fe-3Al 是一种近 β 型钛合金，因具有高强度、高断裂韧性等优良性能而被广泛用于制造航空、航天等领域的关键承力构件[1−2]，因此，对钛合金铸锭的质量提出了非常严格的要求。目前，生产 Ti-10V-2Fe-3Al 合金铸锭最主要的方法是真空自耗电弧熔炼法(VAR)，但生产的铸锭组织并不十分理想，而 Ti-10V-2Fe-3Al 合金铸锭的研究主要集中在由于成分偏析引起的 β 斑等[3−5]，对铸锭组织的研究报道较少。众所周知，金属的铸态组织是许多性能的重要影响因素，铸态缺陷在随后的锻造以及热处理等加工工艺过程中不易被消除，细小均匀的铸态组织是得到优良钛合金性能的基础，因此，研究真空自耗电弧熔炼 Ti-10V-2Fe-3Al 合金的凝固组织具有重要的意义。真空自耗电弧熔炼钛合金铸锭的凝固组织主要取决于熔池中的温度分布和金属液流动形态，MITCHELL 等[6−10]的研究表明，熔炼参数如电流、电压及电弧间距的变化对二者均有影响，其中熔炼电流作为真空自耗电弧熔炼中最重要的工艺参数，它的变化对熔池温度分布

基金项目：国家重点基础研究计划资助项目(2007CB613802)
收稿日期：2008-08-23；修订日期：2009-03-05
通信作者：薛祥义，教授，博士；电话：029-86529479；E-mail: xuexiangyi@tsinghua.org.cn

和金属液流动形态的影响最大，因此它对铸锭凝固组织的影响也最为重要。赵永庆等[11]和刘军林等[12]分析了 Ti-Cu 等合金熔炼过程不同阶段参数变化对铸锭结晶特点的影响，然而目前的研究主要集中在操作参数对凝固组织的影响，对熔池流动形态的作用机理却缺乏深入研究。为此，本文作者在此基础上研究了熔炼电流对钛合金铸锭凝固组织的影响，并对熔炼电流对熔池流动形态的作用机理进行了分析，期望对生产实践起到一定的指导作用。

1　实验

实验材料为经二次真空自耗电弧熔炼的 Ti-10V-2Fe-3Al 合金铸锭，尺寸为 d100 mm×140 mm。熔炼过程中未加搅拌磁场，铸锭 1 和 2 的熔炼电流随熔炼时间的变化如图 1 所示。铸锭示意图如图 2 所示，分别在铸锭顶部、中部、底部横截面取 d100 mm×10 mm 的圆柱试样对铸锭径向宏观组织进行观察，然后经过纵剖观察铸锭的纵向组织特征。试样打磨后，采用 Kroll 试剂(10%HF+20%HNO_3+70%H_2O)进行腐蚀，利用 S260 型数码相机对试样宏观组织进行观察。

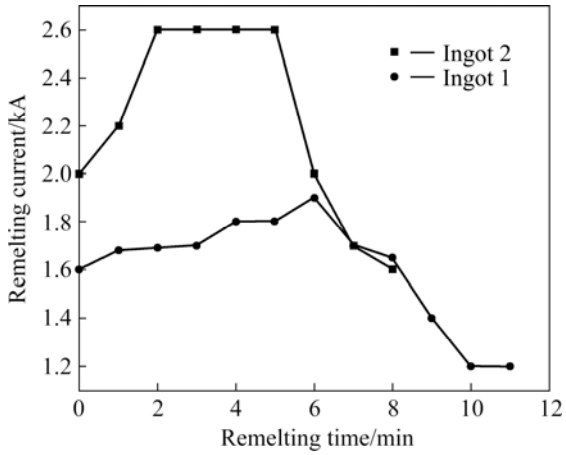

图 **1**　铸锭熔炼电流随熔炼时间的变化

Fig.1　Change of remelting arc current with remelting time of ingots

2　结果与分析

图 3 所示为铸锭 1 和 2 径向的宏观组织。图 4 所示为铸锭 1 和 2 纵向宏观组织。从图 3 和 4 中可以看出，在铸锭头部和中部(见图 3(a)和图 3(b))上分布着细小的等轴晶，铸锭底部由晶粒短小的柱状晶组成；与铸锭 1 相比铸锭 2 等轴晶数量明显减少，铸锭侧向及底部的晶粒结构完全由粗大柱状晶组成。通过以上分析可知，随着熔炼电流的增大，铸锭中的等轴晶数量明显减少，而粗大的柱状晶越来越多。

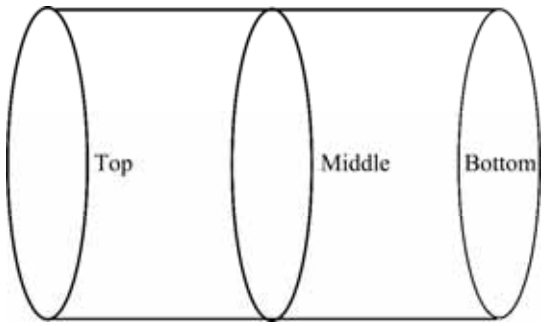

图 **2**　铸锭取样位置示意图

Fig.2　Position of ingot sampling schematic diagram of sampling positions of ingots

Ti-10V-2Fe-3Al 铸锭的凝固组织主要由熔池流动形态决定，VAR 熔炼过程中液相流动形态受到外加磁场的洛仑兹力，浮力以及由熔炼电流自身感应的洛仑兹的影响[13]，由于实验中并没有施加外加磁场，因此，铸锭熔炼过程中熔池主要受到浮力和熔炼电流自身感应产生的洛伦兹力的影响。

浮力是液相温度差及浓度差产生自然对流[14]，熔池中部的高温区与边缘低温区之间的温度差会驱动熔池中的液相沿熔池边缘向下流动。Fe 元素的密度为 7.19 g/cm^3，因此，由于溶质偏析而在 Ti-10V-2Fe-3Al 合金枝晶间的富集会增大液相的密度，使其沿熔池边缘向下流动，最终在热量和溶质作用下熔池中形成顺时针的自然对流(见图 5)。

作用在熔池中的第二种力是由熔炼电流感应出的洛伦兹力[15]。由熔炼电流自身感应会产生磁场，该磁场与熔炼电流两者相互作用产生洛伦兹力，最终使液相产生逆时针的流动单元(见图 6)。

在研究电流产生的洛仑兹力之前，首先对真空自耗电弧熔炼过程中电流的分布进行分析(见图 6)，VAR 熔炼过程中电流通过自耗电极流入，在熔池表面与电极间形成电弧，随后电流进入熔池内部。

由铸锭中的电流分布可知，垂直方向上相互平行的电流会分别在熔池中产生水平方向旋转的 B_θ，不同磁场间的相互作用最终可能使熔池中形成许多不同的流动单元。因此，为了进一步了解熔池中的流动形态，需要对电流感应磁场的洛仑兹力进行分析。

熔炼电流密度 J 产生的水平磁场 B_θ 服从安培定理，即

$$\nabla \times B = \mu J \tag{1}$$

式中：μ 为磁导率；B 为磁场强度；J 为熔炼电流密度。

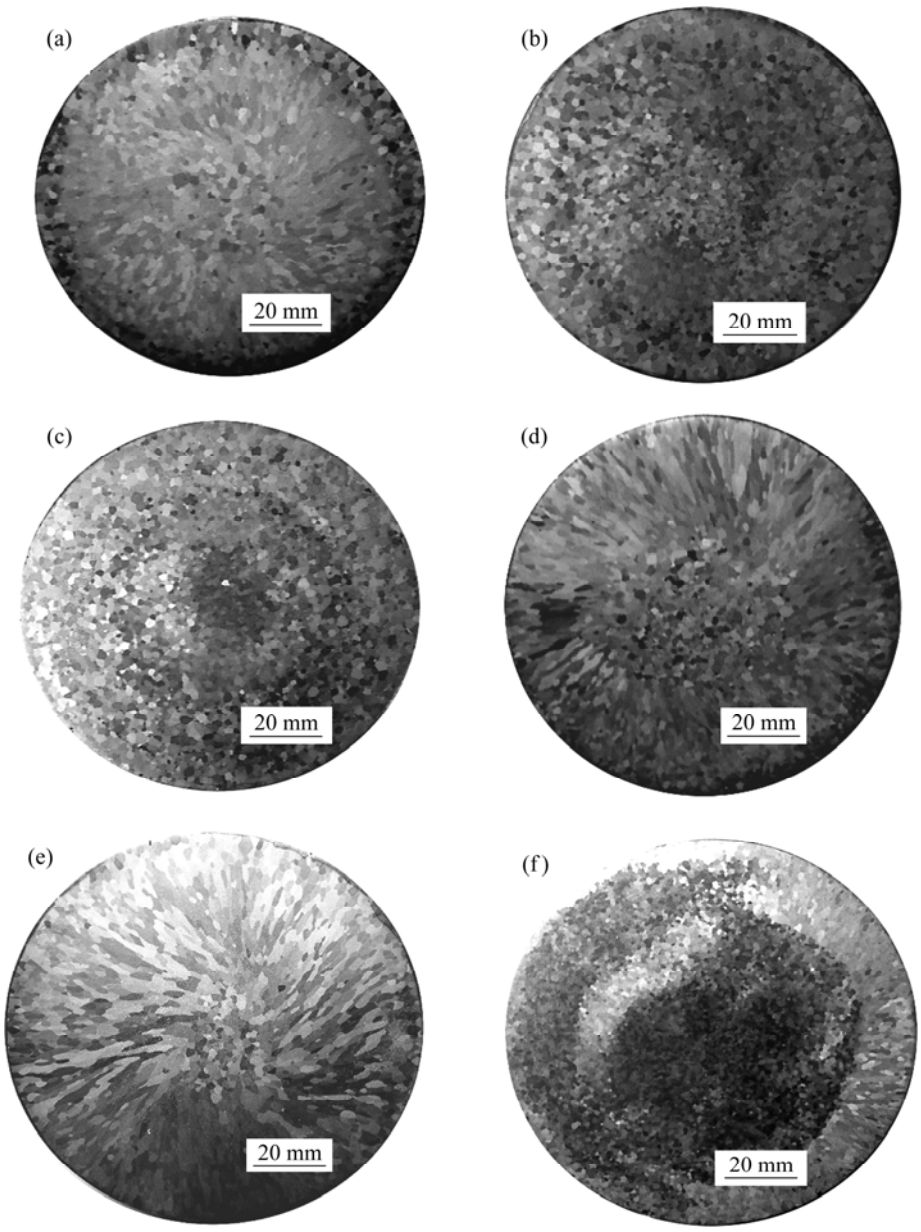

图 3 铸锭径向宏观组织

Fig3 Cross-sectional macrostructures of ingots 1 and 2: (a) Ingot 1, top; (b) Ingot 1, middle; (c) Ingot 1, bottom (d) Ingot 2, top; (e) Ingot 2, middle; (f) Ingot 2, bottom

在极坐标下安培定理可分解为

$$\nabla \times B = (\frac{1}{r}\frac{\partial B_z}{\partial \theta} - \frac{\partial B_\theta}{\partial z})e_r + (\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r})e_\theta + (\frac{1}{r}\frac{\partial (rB_\theta)}{\partial r} - \frac{1}{r}\frac{\partial B_r}{\partial \theta})e_z \quad (2)$$

式中：B_z 为极坐标中 z 方向的磁场强度；B_θ 为极坐标中 θ 方向的磁场强度；B_r 为极坐标中 r 方向的磁场强度。

熔炼电流密度 J 并不能感应出 r 和 z 方向的磁场，因此，式(1)变为

$$\nabla \times B = -\frac{\partial B_\theta}{\partial z}e_r + \frac{1}{r}\frac{\partial (rB_\theta)}{\partial r}e_z \quad (3)$$

其中

$$\mu J_z = \frac{1}{r}\frac{\partial (rB_\theta)}{\partial r}e_z \quad (4)$$

由图 6 可知，熔炼电流及外加磁场感应的洛仑兹力为

$$F_1 = J_z B_\theta \quad (5)$$

最终，

$$F_1 = \frac{B_\theta^2}{\mu r}e_z \quad (6)$$

由式(5)可知，洛伦兹力 F_1 会在熔炼池中产生径向的收缩力。且该洛伦兹力与水平磁场强度呈正比，与

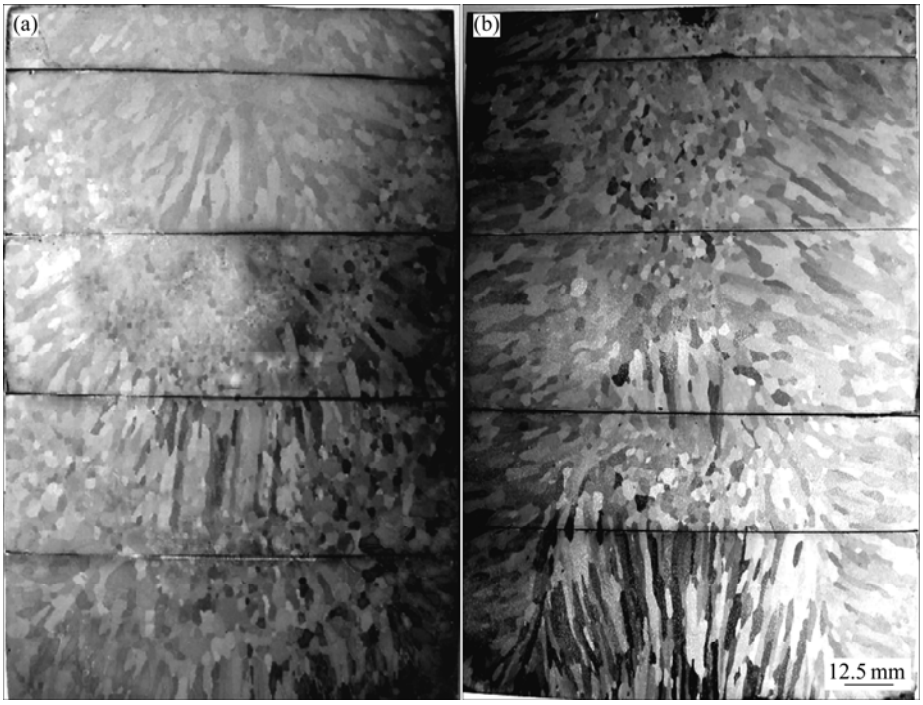

图 **4**　铸锭纵向宏观组织

Fig4　Longitudinal section macrostructures of ingots 1 and 2: (a) Ingot 1; (b) Ingot 2

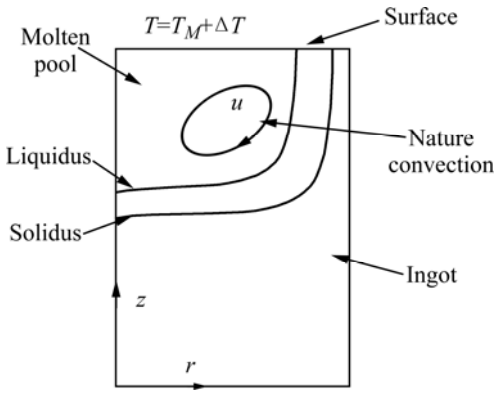

图 **5**　浮力产生的顺时针流动单元

Fig5　Clockwise flow cell driven by temperature and solute gradient

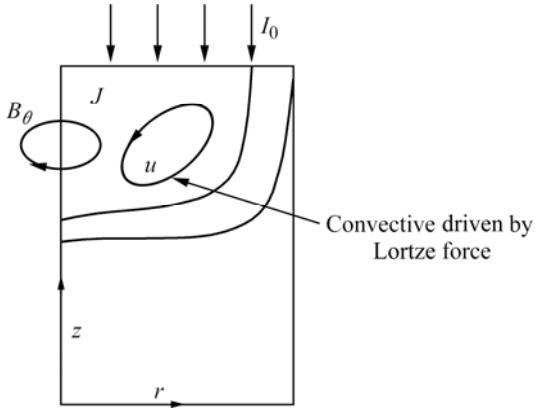

图 **6**　洛伦兹力产生的逆时针流动单元

Fig.6　Counterclockwise flow cell driven by Lorentz force

熔池半径呈反比关系。因此，在极坐标下随着作用半径的减小，熔池中的洛仑兹力越大，因此，与熔池表面其它位置相比，中部径向收缩的洛伦兹力最大，最终 F_1 产生的径向收缩力会在熔池中产生一个逆时针的流动单元。

这种流动的特点是流体从低温区流向高温区的过程中不断从电弧中获得能量，而后将热量从加热表面带入熔池底部，最终随着熔炼电流的增大熔池变得越来越深，熔池内积聚了大量热量。

基于以上分析，浮力产生的顺时针自然流动单元以及洛仑兹力产生的逆时针流动单元是两种截然相反的流动形态，两种对流形态的共同作用决定了熔池中的凝固特点。从图 4 可以看出，电弧熔炼钛合金铸锭的宏观组织结构由外部及底部的柱状晶和中部的等轴晶组成，熔池中温度梯度较小时形成等轴晶，温度梯度较大时形成柱状晶，柱状晶的生长方向沿着温度梯度的方向。熔炼电流较小时，起加速温度均匀化作用的自然对流占据主要地位。随着熔炼电流的增大，洛仑兹力产生的逆时针流动效应随之增强，将熔池表面大量过热的液体带入熔池内部，由于钛合金的导热性能差，熔池中的热量不能迅速扩散，使熔池加深，形成较大的温度梯度，这有助于柱状晶生长而推迟柱状晶转变(Columnar-equiaxed transition, CET)，不利于凝

固前沿晶核的形成，使铸锭组织变得更加粗大。图 7 所示为铸锭柱状晶转变位置。比较铸锭 1 和 2 的柱状晶转变位置可知，熔炼电流较大的铸锭 2 中柱状晶转变较迟，中部等轴晶面积明显减小。图 7 中的两条线分别为两个 1#、2#铸锭柱状晶向等轴晶的转变(CET)线，转变线上方为等轴晶区域，下方为柱状晶区域。结合图 4 和图 7 的结果可知，熔炼电流较大的 2#铸锭的，等轴晶区域较小，柱状晶区域较大，柱状晶数量较多，组织较为粗大。

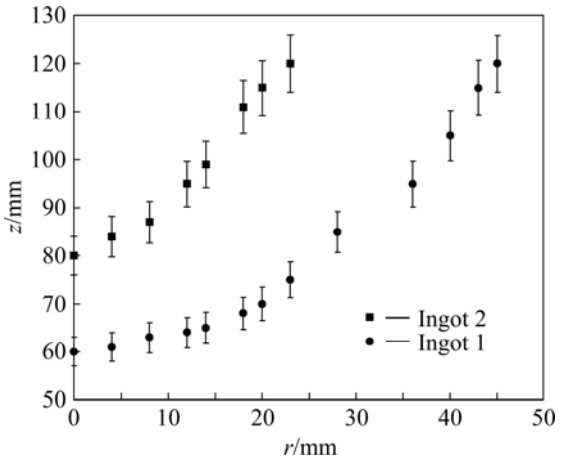

图 7 铸锭柱状晶转变位置

Fig.7 Columnar-equiaxed transition site of ingots 1# and 2#

3 结论

1) 真空自耗电弧炉熔炼出Ti-10V-2Fe-3Al合金铸锭由外侧和底部的柱状晶及中部的等轴晶组成。

2) 在真空自耗电弧熔炼过程中，在未加搅拌磁场的情况下，熔池的流动形态主要受浮力和熔炼电流感应产生的洛伦兹力影响。

3) 随着熔炼电流的增大，洛仑兹力增强，导致熔池中逆时针流动效应增大，从而温度梯度增大，铸锭中的柱状晶增多，组织变粗大。

REFERENCES

[1] WEISS I, SEMIATIN S L. Thermomechanical processing of beta titanium alloys—an overview[J]. Mater Sci Eng A, l998, 243: 46−65.

[2] ZENG Wei-dong, ZHOU Yi-gang, YU Han-qing. Effect of beta flecks on low-cycle fatigue properties of Ti-10V-2Fe-3Al[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000, 9(2): 222−227.

[3] KARASEVSKAYA O P, IVASISHIN O M, SEMIATIN S L, MATVICHUK Y V. Deformation behavior of beta-titanium alloys[J]. Mater Sci Eng A, 2003, 354: 121−132.

[4] 陈占乾, 高 欣, 刘 新, 张金波, 王韦琪, 王立平, 窦永庆. Ti-1023合金铸锭铁偏析控制[J]. 钛工业进展, 2003, 20(8): 56−58.
CHEN Zhan-qian, GAO Xin, LIU Xin, ZHANG Jin-bo, WANG Wei-qi, WANG Li-ping, DOU Yong-qing. Control of iron segregation in Ti-1023 titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(8): 56−58.

[5] ZENG W D, ZHOU Y G. Effect of beta flecks on mechanical properties of Ti-10V-2Al-3Fe alloy[J]. Mater Sci Eng A, 1999, 260: 10−18.

[6] MITCHELL A. Solidification in remelting processes[J]. Mater Sci Eng A, 2005, 413/414: 10–18.

[7] QUATRAVAUX T, RYBERON S, HANS S, JARDY A, LUSSON B, RICHY P E. Transient VAR ingot growth modelling: application to specialty steels[C]// MITCHELL A. Proceedings of the 2003 International Symposium on Liquid Metals. German: Springer Netherlands, 2004: 7183−7191.

[8] JAMES A, Van Den A, BROOKS J A, POWELL A C, Reducing defects in remelting processes for high-performance alloys[J]. JOM, 1998, 3: 22−26.

[9] MELGAARD D K, WILLIAMSON R L, BEAMAN J J. Control of remelting processes for superalloys and aerospace Ti alloys[J]. JOM, 1998, 3: 13−17.

[10] KERMANPUR A, EVANS D G, SIDDALL R J, LEE P D, MCLEAN M. Effect of process parameters on grain structure formation during VAR of Inconel alloy 718[C]// MITCHELL A. Proceedings of the 2003 International Symposium on Liquid Metals. German: Springer Netherlands, 2004: 7175−7182.

[11] 赵永庆, 刘军林, 周 廉. 典型β型钛合金元素Cu, Fe和Cr的偏析规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(4): 531−538.
ZHAO Yong-qing, LIU Jun-lin, ZHOU Lian. Analysis on the segregation of typical alloying elements of Cu, Fe and Cr in Ti alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(4): 531−538.

[12] 刘军林, 赵永庆, 周 廉. Ti-2.5Cu, Ti-3Fe, Ti-3Cr合金铸锭的偏析[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(7): 731−735.
LIU Jun-lin, ZHAO Yong-qing, ZHOU Lian. Segregation of Ti-2.5Cu, Ti-3Fe and Ti-3Cr alloy ingots[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(7): 731−735.

[13] 周尧和, 胡状麟, 介万奇. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 75−76.
ZHOU Rao-he, HU Zhuang-lin, JIE Wan-qi. Solidifying technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1998: 75−76.

[14] DMYTRO Z, MATTHEW J, KRANE M. Segregation development in multiple melt vacuum arc remelting[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2009, 40(9): 281−288.

[15] DAVIDSON P A, KINNEAR D. The role of Ekman pumping and the dominance of swirl in confined flows driven by Lorentz forces[J]. Eur J Mech B, 1999, 18(4): 693−702.

(编辑 龙怀中)