# 铸造 TiAI 合金的凝固偏析特征

### 胡海涛,张熹雯,朱春雷,李 胜,张 继

(钢铁研究总院高温合金新材料北京市重点实验室,北京100081)

摘要:采用扫描电镜背散射模式和电子探针成分分析研究了TiAI合金铸锭的凝固偏析特征。 结果表明,沿柱状晶生长方向合金元素不存在宏观偏析。TiAI合金铸锭的微观偏析按照衬度 差别可分为三个区域,呈网状分布的暗灰色区域,以及网格中间的灰色和灰白色区域,其中 灰白色区域呈现枝干分布特点。合金元素Ti和V在灰白色区域的含量最高,暗灰色区域的含量 最低。AI在暗灰色区域的含量最高,灰白色区域的含量最低。Cr在暗灰色区域的含量最高, 灰色区域的含量最低。平行柱状晶生长方向和垂直柱状晶生长方向合金元素的微观偏析特征 没有差别,柱状晶内和柱状晶界附近合金元素的微观偏析特征也没有差别。 关键词:铸造TiAI合金;凝固组织;凝固偏析;元素分布

TiAl合金具有低密度、高比强度、良好的抗氧化和抗蠕变特点,应用于航空、 航天及车用发动机热端部件,具有重要的技术推动作用<sup>[1]</sup>。目前,采用铸造方法制备 的TiAl合金航空发动机低压涡轮叶片<sup>[2-4]</sup>和车用发动机增压器涡轮<sup>[5]</sup>均已进入工程化 应用阶段。由于合金在铸造过程中的凝固为非平衡凝固,不可避免存在合金元素的 偏析,这不仅引起了组织的不均匀性,也影响了合金的力学性能。有研究表明,Ti-44Al-4.8Nb-0.9W-0.9B合金富Nb、W的枝晶干区域的层片团尺寸仅为100  $\mu$  m, 而富 Al的枝晶间区域的层片团尺寸达到500  $\mu$  m<sup>[6]</sup>。Ti-(47-49)Al-1Re-1W-0.2Si合金在凝 固过程中,Re富集于枝晶间区域,有利于合金蠕变强度的保持<sup>[7]</sup>。

TiAl合金的凝固偏析特征主要受其凝固路径影响,凝固初生相为β和γ时,合 金元素主要呈现出90°枝晶偏析特征,凝固初生相为α时则主要呈现出60°枝晶偏析 特征<sup>[8]</sup>。在这种情况下,分配系数大于1的合金元素富集于枝晶干区域,分配系数小 于1的合金元素则富集于枝晶间区域。而当合金在凝固过程中存在包晶反应时,合金 元素的枝晶偏析特征变得不明显<sup>[9]</sup>,而且某些合金元素由于在初生相和包晶相中的分 配系数不在1的同一侧,而出现同时在枝晶干区域和枝晶间区域富集的现象<sup>[10]</sup>。合金 牌号为TAC2的铸造Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr合金由于具有良好的综合力学性能,已应用 于车用增压器涡轮和燃气轮机叶片试验件中<sup>[5]</sup>。明确这种合金的凝固偏析特征,有助 于对其组织和力学性能进行研究,从而促进该合金的工程化应用。

本研究以铸造Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr合金为研究对象,采用扫描电镜背散射模式观察合金铸锭的凝固偏析和组织特点,找出偏析和组织的对应关系。采用电子探针显微镜定量分析各合金元素的偏析分布位置和程度,从而明确铸造TiAl合金的凝固偏析特征。

### 1 试验方法

试验所用TiAl合金名义成分为Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr(at.%)。合金在真空感应悬 浮炉水冷铜坩埚中按照功率130 kW、时间10 min的工艺制度进行熔炼,并浇注到预 热温度300 ℃、内径40 mm、高度80 mm的石墨模具中,得到TiAl合金铸锭。铸锭的 化学成分分析结果如表1所示,实测成分与名义成分基本一致。采用电火花切割沿铸 锭轴向从铸锭中心剖开,在铸锭高度方向的中间部位,沿径向从边缘到中心切取4个

作者简介: 胡 海 涛(1989-), 男, 博士生,主要研究方向为 TiAl 合金铸造工艺研究。 E-mail: huhaitaotial@163. com 通讯作者: 朱春雷,男,高级工程师。 电 话: 010-62183386, E-mail: 15011595579@163. com

中图分类号:TG146.2 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2019) 07-0740-06

收稿日期: 2018-12-24 收到初稿, 2019-03-06 收到修订稿。 截面为10 mm×5 mm的试样,如图1所示。经打磨抛光后,采用JEOL JSM7800场发射扫描电镜BSE模式观察试样微观组织,采用JEOL JXA-8530F电子探针进行成分分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 TiAI 合金铸锭的宏观组织和宏观偏析

铸锭中部的宏观组织如图2所示,由从铸锭边缘向 内生长的柱状晶以及中心轴线上不连续分布的等轴晶 组成。在图1所示的四个位置采用EPMA在50倍视场下 进行合金元素的面分布扫描,视场尺寸为2.4 mm×1.8 mm,以面分布的平均值评价沿柱状晶生长方向铸锭的 宏观偏析。沿柱状晶生长方向四个位置合金元素的面 分布平均值如图3所示,可以看出,沿柱状晶生长方向 不存在合金元素的宏观偏析。

### 2.2 TiAI 合金铸锭的微观组织和微观偏析

平行柱状晶生长方向铸锭的微观组织如图4所 示,为界面与柱状晶生长方向垂直的  $\alpha_2/\gamma$  层片组 织。这种组织形成的过程是,  $\alpha$  相柱状晶沿其择优生 长方向[0001]生长<sup>[11]</sup>,在后续的冷却过程中  $\gamma$  相按照 Blackburn<sup>[12]</sup>取向关系<110>  $\gamma$  //<11 $\overline{2}$ 0>  $\alpha$  和{111}  $\gamma$  //



图2 TiAl合金铸锭宏观组织 Fig. 2 Macrostructure of TiAl alloy ingot

(0001)  $\alpha$  从  $\alpha$  相中析出,再经  $\alpha \rightarrow \alpha_2$ 的有序化转变 得到  $\alpha_2 / \gamma$  层片组织。由图4可知,铸锭的微观偏析按 照衬度差别可分为三个区域:呈网状分布的暗灰色区 域以及网格中间的灰色和灰白色区域。其中灰白色区

表1 试验用合金的化学成分 Table 1 Composition of the tested TiAlalloys

 $W_{\rm B}/\%$ 

	•			v	5	
项目	Al	V	Cr	0	Ti	
名义成分	33.66	3.34	1.37	0	余量	
实测成分	33.56	3.34	1.34	0.065	余量	



图1 偏析研究取样示意图

Fig. 1 Sampling diagram for segregation study



图3 合金元素面分布平均值 Fig. 3 Average value of alloying elements surface distribution



(a)晶内
(b)晶界附近
图4 平行柱状晶生长方向铸锭的微观组织
Fig. 4 Microstructure of ingotat the direction parallel to columnar growth

域呈现出枝干分布特点。观察不同衬度区域在柱状晶 内部和柱状晶界附近的分布可知,各衬度区域与柱状 晶的分布并没有位置上的对应关系。

图5和图6分别为平行柱状晶生长方向铸锭在晶内 和晶界附近合金元素的面分布。对应图4可知,合金元 素Ti富集于灰色和灰白色区域,在暗灰色区域含量最 低。合金元素AI富集于暗灰色区域,在灰白色区域含 量最低。合金元素V富集于灰白色区域,在暗灰色区域 含量最低。合金元素Cr富集于暗灰色区域,在灰色区 域含量最低。在图5和图6上,按照图4所示的暗灰色区 域、灰色区域和灰白色区域分别取10个点进行合金元 素的含量统计,晶内和晶界附近四种合金元素在三个 区域的含量平均值如图7所示。可见,合金元素在晶内 和晶界附近的偏析特征基本一致。 垂直柱状晶生长方向铸锭的微观组织如图8所示, 由于柱状晶生长方向的微小差别,使垂直柱状晶生长 方向呈现层片界面取向随机的 α<sub>2</sub>/γ 层片组织。与图 4相似,垂直柱状晶生长方向铸锭的微观偏析按照衬 度差别也分为呈网状分布的暗灰色区域和网格中间的 灰色和灰白色区域,且灰白色区域也呈现出枝干分布 特点。观察不同衬度区域在晶内和晶界附近的分布可 知,各衬度区域与晶粒也没有位置上的对应关系。

图9和图10分别为垂直柱状晶生长方向铸锭在晶内 和晶界附近合金元素的面分布。与平行柱状晶生长方 向合金元素的分布规律一致,合金元素Ti富集于灰色和 灰白色区域,在暗灰色区域含量最低。合金元素AI富 集于暗灰色区域,在灰白色区域含量最低。合金元素V 富集于灰白色区域,在暗灰色区域含量最低。合金元



素Cr富集于暗灰色区域,在灰色区域含量最低。在图9 和图10上,按照图8所示的暗灰色区域、灰色区域和灰 白色区域分别取10个点进行合金元素的含量统计,晶 内和晶界附近四种合金元素在三个区域的含量平均值 如图11所示。可见,垂直柱状晶生长方向合金元素在 晶内和晶界附近的偏析特征基本一致,且与平行柱状 晶生长方向没有差别。

### 2.3 TiAI 合金铸锭的偏析特征分析

本研究TiAl合金铸锭沿柱状晶生长方向不存在合 金元素的宏观偏析,这与通常柱状晶生长时溶质在生 长界面前沿富集而导致沿柱状晶生长方向溶质含量逐 渐增加的现象<sup>[13]</sup>显然不同。根据TiAl合金铸锭合金元素 的微观偏析可知,合金元素呈现网状分布的特点,表 现出与等轴晶组织相似的偏析特点,这是本研究柱状 晶组织TiAl合金沿柱状晶生长方向合金元素没有宏观偏 析的原因。

本研究TiAl合金铸锭合金元素的微观偏析呈现出 网状分布的特点,与铸锭的组织没有对应性,这也不 同于其他合金微观偏析与组织通常存在相关性的特 点。由于合金微观偏析的产生和组织的形成均与凝固 过程密切相关,则可通过分析TiAl合金的凝固过程对铸 锭微观偏析与组织的无对应性进行解释。本研究TiAl合 金铸锭层片组织的层片界面与柱状晶生长方向垂直, 通常认为α相为凝固初生相<sup>[8]</sup>,则合金元素的微观偏析 应呈60°枝晶偏析特征。但是,本研究TiAl合金铸锭 合金元素呈网状分布特征,显然其凝固初生相不是α 相。也有研究表明<sup>[14]</sup>,对于凝固初生相为β相的包晶 TiAl合金,当发生包晶反应时,若包晶α相直接在液相 中形核,也可得到层片界面与柱状晶生长方向垂直的



(a)晶内
(b)晶界附近
图8 垂直柱状晶生长方向铸锭的微观组织
Fig. 8 Microstructure of ingot at the direction perpendicular to columnar crystal growth



Fig. 9 Surface distribution of alloying elements inside grains at the direction perpendicular to columnar crystal growth



Fig. 10 Surface distribution of alloying elements near grain boundary at the direction perpendicular to columnar crystal growth

## 744 转造 FOUNDRY 试验研究

层片组织。当合金以这种方式凝固时,包晶反应前β 相的生长与包晶反应过程中α相的生长共同影响合金 的凝固偏析。在这种情况下,由于合金铸锭的组织为 α相柱状晶,晶界的形成仅与α相的生长有关,则β 相生长引起的合金元素偏析与组织没有对应性。本研 究TiAl合金铸锭合金元素的微观偏析与组织无对应性, 且元素Cr同时在暗灰色区域和灰白色区域富集,与其 他合金元素分别只在单一衬度区域富集的现象不同,

也表明凝固过程中的析出相不止一种相。由此可知, 本研究TiAl合金铸锭微观偏析与组织无对应性的原因可 能是合金的凝固路径为以β相为初生相的包晶凝固。 然而,文献[15]报道的以β相为初生相的包晶TiAl合金 元素的微观偏析呈90°枝晶偏析特征,仍然不同于本 研究铸锭合金元素的网状偏析特征。本研究TiAl合金铸 锭合金元素微观偏析的形成原因将是下一步的研究工 作。





## 3 结论

(1) Ti-47.5Al-2.5V-1.0Cr合金铸锭沿柱状晶生长 方向不存在合金元素的宏观偏析。

(2)铸锭的微观偏析按照衬度差别可分为三个 区域,呈网状分布的暗灰色区域,以及网格中间的灰 色和灰白色区域,其中灰白色区域呈现出枝干分布特 点。 (3)合金元素Ti和V均在灰白色区域的含量最高,暗灰色区域的含量最低。Al在暗灰色区域的含量最低。Cr在暗灰色区域的含量最高,灰白色区域的含量最低。Cr在暗灰色区域的含量最高,灰色区域的含量最低。

(4)平行柱状晶生长方向和垂直柱状晶生长方向 合金元素的微观偏析特征没有差别,柱状晶内和柱状 晶界附近合金元素的微观偏析特征也没有差别。

### 参考文献:

- [1] YAMAGUCHI M, INUI H, ITO K. High-temperature structural intermetallics [J]. ActaMaterialia, 2000, 48 (1): 307–322.
- [2] WEIMER M, KELLY T J. TiAl alloy 48Al-2Nb-2Cr material database and application status [C]// The 3rd international workshop on γ-TiAl technologies. Bamberg, 2006.
- [3] NORRIS G. Boeing unveils its 787 flight-test plan with four R-R Trent 1 000-powered, 2 GEnx aircraft [J]. Flight International, 2006 (6): 10.
- [4] BEWLAY B P, WEIMER M, KELLY T, et al. The science, technology, and implementation of TiAl alloys in commercial aircraft engines [J]. MRS Proceedings, 2013, 1516: 49–58.
- [5] 张继,仲增镛. TiAl金属间化合物工程实用化研究与进展 [J]. 中国材料进展,2010,29 (2):9-13.
- [6] SUN H L, HUANG Z W, ZHU D G, et al. Dendrite core grain refining and interdendritic coarsening behaviour in W-containing γ-TiAl based alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 552: 213–218.
- [7] DALOZ D, HECHT U, ZOLLINGER J, et al. Microsegregation, macrosegregation and related phase transformation in TiAl alloys [J]. Intermetallics, 211, 19 (6): 749–756.
- [8] MCCULLOUGH C, VALENCIA J J, LEVI C G, et al. Peritectic solidification of Ti-Al-Ta alloys in the region of γ-TiAl [J].Materials

Science and Engineering A, 1992, 156 (2): 153–166.

- [9] HU D, BOTTEN R R. Phase transformations in some TiAl-based alloys [J]. Intermetallics, 2002, 10 (7): 701-715.
- [10] YAMANAKA T, JOHNSON D R, INUI H, et al. Directional solidification of TiAl-Re-Si alloys with aligned  $\gamma/\alpha_2$  lamellar microstructures [J]. Intermetallics, 1999, 7 (7) : 779–784.
- [11] MCCULLOUGH C, VALENCIA J J, LEVI C G, et al. Phase equilibria and solidification in Ti-Al alloys [J]. ActaMetallurgica, 1989, 37 (5): 1321–1336.
- [12] BLACKBURN M J. Some aspects of phase transformations in titanium alloys [C]// The Science, Technology and Application of Titanium. Oxford: Pergamon Press, 1970: 633–643.
- [13] 赵光伟,石增敏,叶喜葱,等. Al-3.46Cu-5.70Si合金变截面铸件定向凝固宏观偏析研究 [J]. 铸造, 2013,62(12):1176-1180.
- [14] JOHNSON D R, INUI H, YAMAGUCHI M. Crystal growth of TiAl alloys [J]. Intermetallics, 1998, 6: 647-652.
- [15] SINGHAK, MURALEEDHARANK, BANERJEE D. Solidification structure in a cast  $\gamma$  alloy [J]. Scripta Materialia, 2003, 48 (6) : 767–772.

## Solidification Segregation Characteristics of Cast TiAl Alloy

HU Hai-tao, ZHANG Xi-wen, ZHU Chun-lei, LI Sheng, ZHANG Ji

(Beijing Key Laborary of Advanced High Temperature Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

### Abstract:

The solidification segregation characteristics of TiAl alloy ingots were studied by scanning electron microscopy backscatter mode and electron probe composition analysis. The results show that there is no macro-segregation of alloying elements along the columnar growth direction. The micro-segregation of TiAl alloy ingots can be divided into three regions according to the difference of contrast: dark gray areas distributed in the form of a network, and gray and grayish white areas in the middle of the grid. The grayish white areas show the characteristics of branch distribution. The alloying elements Ti and V have the highest content in the gray area and the lowest content in the grayish white area. Cr has the highest content in the dark gray area and the lowest content in the gray area. There is no difference in the micro-segregation characteristics of the alloying elements at the direction parallel to columnar crystal growth orperpendicular to columnar crystal growth, and there is also no difference inside the columnar crystal ornear the columnar boundaries.

#### Key words:

cast TiAl alloy; solidification microstructure; solidification segregation; elements distribution