

# PM-TiAl 基合金热处理及其性能

马明珠<sup>1,4</sup> 黄源珣<sup>1</sup> 薛志勇<sup>1</sup> 李冬青<sup>2</sup> 李双寿<sup>3</sup>

(1 华北电力大学,北京 102206)

(2 哈尔滨工业大学,哈尔滨 150001)

(3 清华大学,北京 100084)

(4 天润曲轴股份有限公司,文登 264400)

**文 摘** 为了优化 TiAl 合金的使用性能,本文研究了热等静压后的 PM-TiAl 基合金经过热处理后显微组织的变化情况及力学性能,发现其在热处理温度为 1 355℃ 为全片层组织,在 1 335℃ 为双态组织。全片层组织常温下的抗拉强度为 446 MPa,随着温度的升高而增加;屈服强度为 386 MPa,随着温度的升高而降低。

**关键词** TiAl,热处理,全片层组织,相变

## Heat Treatment and Performance of PM-TiAl Base Alloy

Ma Mingzhu<sup>1,4</sup> Huang Yuanxun<sup>1</sup> Xue Zhiyong<sup>1</sup> Li Dongqing<sup>2</sup> Li Shuangshou<sup>3</sup>

(1 North China Electric Power University, Beijing 102206)

(2 Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(3 Tsinghua University, Beijing 100084)

(4 Tianrun Crankshaft. Co., LTD, Wendeng 264400)

**Abstract** In order to optimize the usability, microstructure and mechanical property of TiAl based alloy after hot isostatic pressing and hot treatment was studied. After heat-treatment of 1 355℃, organization of TiAl based alloy transformed to full lamellar microstructure. After heat-treatment of 1 335℃, organization of TiAl based alloy transformed to double pattern microstructure. Tensile strength of full lamellar TiAl under room temperature is 446 MPa, and will increase with temperature; yield strength of full lamellar TiAl under room temperature is 386 MPa, and will increase with temperature.

**Key words** TiAl, Heat treatment, Full lamellar organization, Phase transition

### 0 引言

随着航天工业的飞速发展,TiAl 合金已经逐渐显示出低密度、高熔点、良好的高温强度以及出色的抗氧化、抗蠕变和抗疲劳性能的优点,成为具有发展前景的航天材料之一。TiAl 合金的使用能够大大降低航天发动机、飞行器的结构质量,提高发动机的推重比。但同时 TiAl 合金的室温塑性较低,室温加工性能较差,一直限制了其在实际生产中的应用。由于 TiAl 合金铸态组织通常是粗大的片层状组织,其室温延性很低,只有通过合金化、变形热处理和特殊热处理等方法才能显著细化晶粒,将铸态 TiAl 合金作用于高温结构材料。文献[1]表明,利用气体雾化法已经成功地研制出 Ti-46Al-2Cr-2Nb-0.2B-0.1W 球

形合金粉末,粉末的粒径呈正态分布,主要分布在 50~190 μm 之间;利用热等静压工艺制备的粉末冶金 TiAl 合金在 1 200 和 1 300℃ 下分别热压 1 h 后可以得到显微组织细小的 TiAl 基合金,Cr 的分布比较均匀,但是存在一些 Nb 的扩散不完全现象。通过后序热等静压工艺可以改善合金元素在显微组织中的均匀分布<sup>[2]</sup>。本文期望通过研究 PM-TiAl 合金的热处理工艺及其组织性能的关系,优化 PM-TiAl 合金的使用性能,推动其走向实用。

### 1 实验

#### 1.1 材料

采用粉末冶金的方法制备 TiAl 合金,并对其进行处理热等静压处理。合金的成分为 Ti-47Al-2Cr-2Nb

收稿日期:2011-11-28

基金项目:航天科技创新基金重点资助项目(20094030090);中央高校基本科研业务费资助(09MG27);航天创新基金重点项目(CASC200906)

作者简介:马明珠,1984 年出生,硕士,主要从事 TiAl 新材料与钢材锻件的热处理研究

联系作者:薛志勇,E-mail:xuezy101@163.com

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 5 期

-0.2W-0.5B(at%),其热等静压温度为1200℃,压力≥130 MPa,保温保压4 h。其合金成分见表1。

表1 TiAl 基合金化学成分

Tab.1 Composition of TiAl alloys at%					
Ti	Al	Cr	Nb	W	B
48.3	47	2	2	0.2	0.5

## 1.2 热处理工艺

结合 TiAl 基合金试样的 DSC 分析曲线和 Ti-Al 二元相图,制定 TiAl 基合金的热处理工艺见表2。

表2 TiAl 基合金热处理工艺

Tab.2 Heat Treatment Process of TiAl alloys

处理方案	热处理温度/℃	保温时间/min	冷却方式
1	1355	30	随炉冷却
2	1355	30	放入900℃的加热炉中时效30 min后空冷
3	1335	30	随炉冷却
4	1335	30	放入900℃的加热炉中时效30 min后空冷
5	1355	30	真空环境、随炉冷却

## 1.3 测试方法

### 1.3.1 DSC 测试

对 PM-TiAl 基合金试样进行了 DSC 分析,仪器型号为 DSC Q2000。

### 1.3.2 拉伸试验

采用北京科技大学新金属材料国家重点实验室的 ss520 型原位拉伸试验机。根据实验设备要求,拉伸试样如图1所示,采用线切割方式制得。

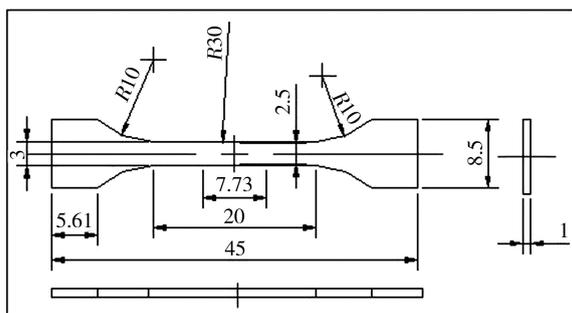


图1 拉伸试样示意图

Fig.1 Diagram of tensile samples

### 1.3.3 显微组织观察

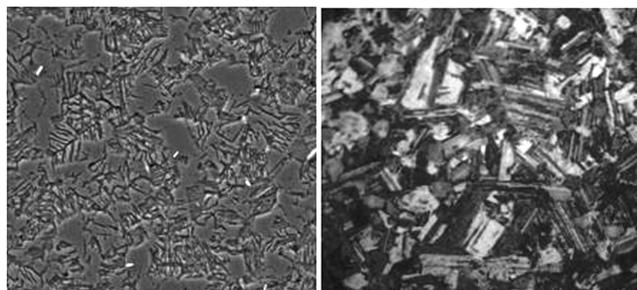
用 ZEISS EV018 的扫描电镜对试样进行显微组织观察。

## 2 结果与分析

### 2.1 DSC 分析

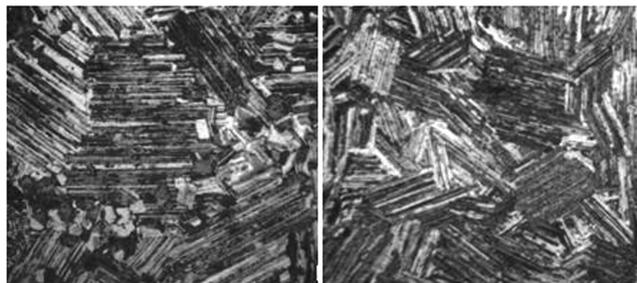
TiAl 合金共有四种显微组织状态:近  $\gamma$  组织、双态组织、近全片层组织、全片层组织,如图2所示。

对于 TiAl 基合金的显微组织而言,根据不同的热处理方式可得到四种类型的典型组织<sup>[3-5]</sup>。



(a) NG

(b) DP



(c) NFL

(d) FL

图2 TiAl 合金的典型显微结构

Fig.2 Typical microstructure of TiAl alloys

(1) NG 为等轴近  $\gamma$  组织,是在如图3所示<sup>[6]</sup>Ti-Al 二元相图上刚超过共析温度的  $\alpha+\gamma$  两相区进行退火热处理,得到由等轴晶粒和包含细小  $\gamma$  和  $\alpha_2$  晶粒的条带状区域晶界,即非均匀的粗大  $\gamma$  晶粒并伴有少量的  $\alpha_2$  粒子。

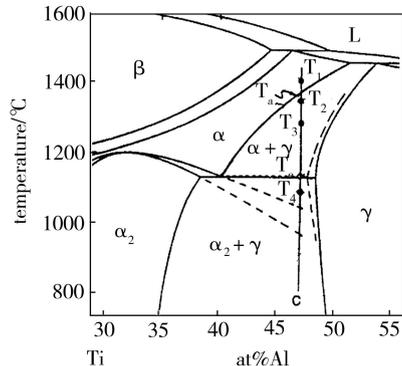


图3 Ti-Al 二元相图

Fig.3 Binary phase diagram of TiAl alloy

(2) DP 为双态组织,是在  $\alpha+\gamma$  两相区体积分数大致相等的温度进行退火热处理,得到细小晶粒的  $\gamma$  相和  $\alpha_2$  相复合组织。

(3) NFL 为近全片层组织,是在  $\alpha+\gamma$  两相区中接近与  $\alpha$  单相区分界线的温度进行退火热处理,可得到由  $\gamma/\alpha_2$  片层团和少量分布于片层团间的等轴  $\gamma$  晶粒组成的近全片层组织。

(4) FL 为全片层组织,是在  $\alpha$  单相区超过与  $\alpha+\gamma$  相区分界线 50℃ 以内进行退火热处理,可得到由  $\gamma/\alpha_2$  片层团组成的全片层组织。

由于 TiAl 基金属间化合物为高温结构材料,在航空航天工业主要应用其高温性能。据有关材料宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第5期

究表明<sup>[7]</sup>,TiAl 基金属间化合物全片层组织的高温力学性能优于其他的三种。片层具有较高的蠕变特性<sup>[8]</sup>,因此选择全片层组织作为研究的内容。

对于 TiAl 合金,由于添加元素种类不同使材料具有不同的性能,如适量添加 Cr 可提高 TiAl 合金的延性<sup>[9]</sup>;添加 Nb 可改善 TiAl 合金的高温抗氧化性<sup>[10]</sup>。由于合金元素的存在,必然对材料的相变温度产生一定的影响,导致不同成分 TiAl 合金的相变温度产生一定程度的差异。为确定全片层组织的热处理温度,本文首先对 TiAl 坯料进行了差热分析。

图 4 为 DSC 曲线。图中出现了两个放热峰,根据第一个峰判断相变点在 1 364℃ 左右,在 TiAl 二元相图中,Ti-47Al 由单相  $\alpha$  相向  $\alpha+\gamma$  双相转变的温度大约为 1 350℃,因此可选择热处理温度为 1 355℃。由于本文材料供应单位推荐的相变点温度为 1 315℃,故选择 1 335℃ 作为参考热处理温度。结合 DSC 所得结果和 TiAl 二元相图,确定 TiAl 由 NG 向 FL 转变的温度为 1 355℃,制定如表 2 所示的五种热处理工艺。

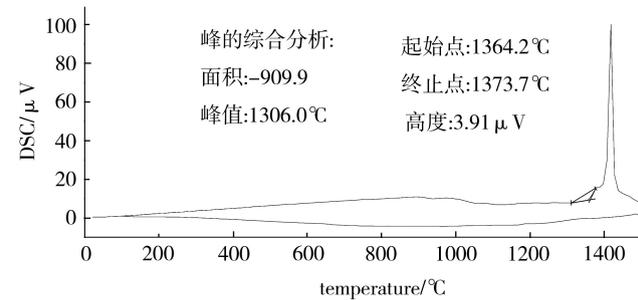


图 4 DSC 分析曲线

Fig. 4 DSC curve of TiAl alloy

## 2.2 显微组织分析

PM-TiAl 合金显微组织如图 5 所示。

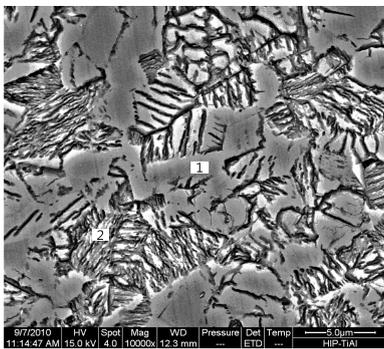


图 5 PM-TiAl 原始组织

Fig. 5 PM-TiAl original microstructure

可以看出粉末冶金所制备的 TiAl 基合金组织非常均匀,等轴状的  $\gamma$  相周围均匀分布着少量的片层组织,为典型的近  $\gamma$  组织。所制备试样晶粒尺寸为 5 ~ 10  $\mu\text{m}$ 。存在两种相,分别由点 1 和点 2 标识出来,其元素成分如表 3 所示。点 1 和点 2 的扫描曲线如图 6 所示。由表 3 中 Ti 和 Al 的含量比可以看出,点 1、点 2 处,Ti 和 Al 的原子比都近似于 1:1,可见粉末宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 5 期

未冶金经热等静压的近  $\gamma$ -TiAl 基合金主要以 TiAl 的形态存在。

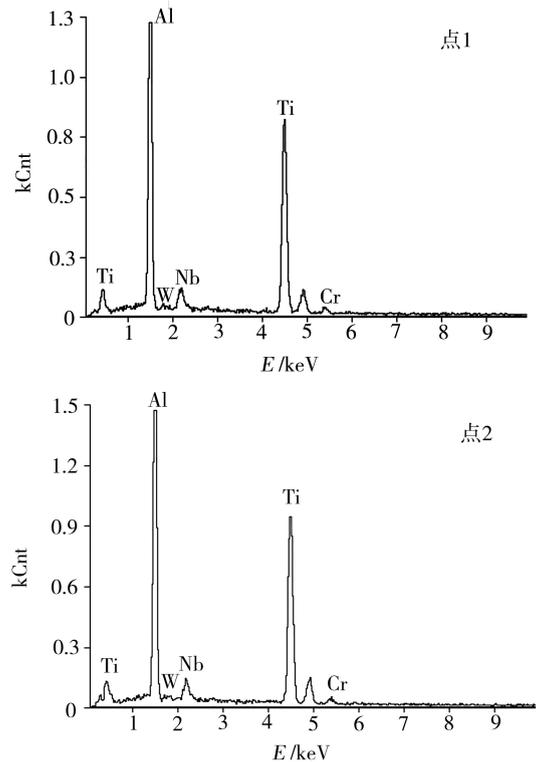


图 6 点 1 和点 2 处的元素点扫描曲线

Fig. 6 Spectral energy distribution of point 1 and point 2

表 3 点 1 和点 2 处点扫描元素成分

Tab.3 Ratio of element composition of point 1 and point 2 at%

位置	Al	W	Nb	Ti	Cr
点 1	48.36	0.45	2.34	46.55	2.30
点 2	48.10	0.30	2.26	47.03	2.31

图 7 为经过表 2 所述五种不同的热处理工艺后的组织,图中 A ~ E 分别对应方案 1 ~ 5。其中 A、B、E 中 TiAl 基合金已经全部由近  $\gamma$  组织转变为全片层组织,其中 A、B 两种热处理没有在真空中进行,试样的表面氧化比较严重,真空热处理的试样在热处理结束后,表面仍然保持较好的金属光泽,且同为 1 355℃ 保温 30 min 后炉冷的工艺,真空条件下所获得的试样的全片层组织相对细小,不仅高温性能较好,而且能够保证一定的室温性能。粉末冶金 TiAl 基合金的力学性能与其显微组织有着密切的联系,显微组织越细小,室温强度和延性就越高,但是在高温下,TiAl 基合金的屈服强度随着晶粒尺寸的增加而增加<sup>[2]</sup>。A 的晶粒过于粗大,虽然高温性能良好,但是室温塑性的降低将很大程度上影响其整体性能。C 中仍然存在着大量的  $\gamma$  晶组织,相变过程进行的很少,只有少量部分转变为了片层组织。D 因温度较低且保温时间短,使得仍有一部分没有转化为全片层组织。C 和 D 的晶粒转变状态表明,在 1 335℃ 的条件下进行热处理,因为相变温度不够,不能够得到完全的片层组织。最终结果表明,在同样取得了全片层组织的情况

下,E 中的晶粒相对细小,不但能满足高温性能,而且有一定的室温塑性,是五种热处理工艺中最为优良的

一种,因此在后续的热处理中选择 1 355℃ 真空热处理 30 min 后随炉冷却。

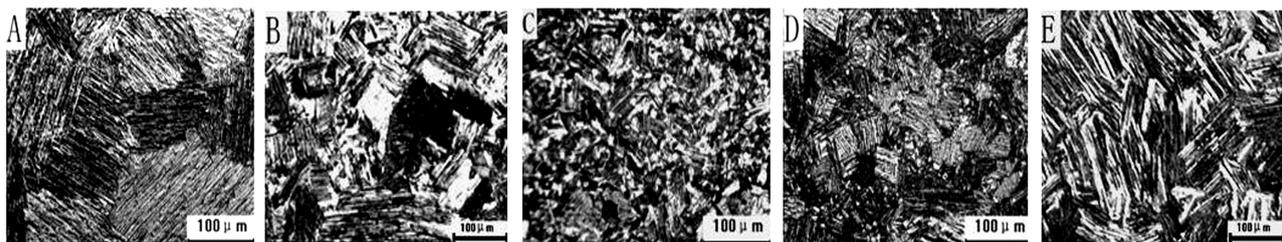


图 7 不同热处理工艺后的组织

Fig. 7 TiAl alloy microstructure after different heat processing

从图 7 中可以看出,层片状组织具有类似钢中马氏体的形貌特征,这与 Ti 具有同素异构的特性有关。一组层片与相邻层片间存在着确定的晶体学取向关系,这很难通过热处理改变。不过,由于各种不同取向的层片组所构成的区域相当于一个晶粒,因此,若能显著地细化晶粒,将使每个晶粒含有更多的层片结构,再加上晶粒间晶界的阻挡作用,将可能比较显著地提高该材料的塑性。

一般认为片层结构晶粒是由高温  $\alpha$  相在冷却过程中析出  $\gamma$  相,然后  $\alpha$  相发生  $\alpha \rightarrow \alpha_2$  有序转变后形成的<sup>[11]</sup>。这说明 TiAl 合金在 1 355℃ 热处理时,合金已经处于  $\alpha$ -Ti 单相区,在冷却过程中, $\gamma$  相沿着  $\alpha$  相 (0001) 面析出,从而形成了片层结构;而在 1 335℃ 时,合金位于  $\alpha$  相区但靠近  $\alpha/(\alpha+\gamma)$  温度转变线,部分发生了  $Ti_3Al+TiAl \rightarrow \alpha-Ti$  相变反应,并在原片层晶粒晶界处形成  $\gamma$  单相等轴晶粒。这样在随后的冷却中, $\alpha$ -Ti 发生共析反应生成层状结构, $\gamma$  单相晶粒保持不变,使得最终组织为  $(\alpha_2+\gamma)$  片层结构和  $\gamma$  单相晶粒的混合组织形貌,即双态组织。

### 2.3 力学性能

图 8 为经过 1 355℃ 热处理后,全片层组织 TiAl 基合金的抗拉强度和屈服强度。可以看出,其抗拉强度常温时是 446 MPa,随着温度的升高而升高,最高可达 543 MPa,体现了其高温结构材料的高温强度特性;屈服强度常温下是 386 MPa,随着温度的升高,其屈服强度总体呈下降趋势,到 600℃ 时达到 286 MPa。

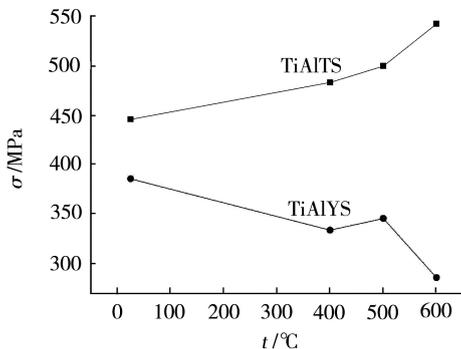


图 8 TiAl 基合金热处理后的抗拉强度和屈服强度

Fig. 8 Tensile strength and yield strength of TiAl alloy after heat processing

### 3 结论

(1) 在热等静压温度为 1 200℃,压力  $\geq 130$  MPa,保温保压时间为 4 h 的工艺条件下,制备出了组织均匀的钛铝合金,其组织为近  $\gamma$  组织。

(2) TiAl 合金获得全片层组织的最佳热处理工艺为在 1 355℃ 真空热处理 30 min 后随炉冷却。而在 1 335℃ 的热处理温度可获得双态组织。

(3) 全片层组织的抗拉强度常温下为 446 MPa,随着温度的升高而增加;常温下的屈服强度为 386 MPa,随着温度的升高而降低。

### 参考文献

- [1] 张绪虎,郎泽保. TiAl 金属间化合物粉末冶金制备技术研究[J]. 宇航材料工艺,2007,37 (5): 53-55
- [2] 刘咏,黄伯云,周科朝,等. 热等静压对粉末冶金 TiAl 合金显微组织和相成分的影响[J]. 粉末冶金技术,2001,19 (3): 165-169
- [3] Chan K S, Kim Y W. Influence of microstructure on cracktip micromechanics and fracture behaviors of a two-phase TiAl alloy[J]. Metall. Trans. A, 1992,23A(6): 1663-1677
- [4] Campbell J P, Venkateswara K T, Riithchie R O. The effect of microstructure on fracture toughness and fatigue crack growth behavior in  $\gamma$ -titanium aluminide based intermetallics[J]. Metall. Mater. Trans. A,1993, 30A(31): 563-577
- [5] Chan K S. Toughening mechanisms in titanium aluminides[J]. Metall. Trans. A, 1993,24A(3): 569-583
- [6] McCullough C, Valencia J J, Levi C G, et al. Phase equilibria and solidification in Ti-Al alloys[J]. Acta Metallurgica, 1989, 37(5): 1321-1336
- [7] Chen W R, Triantafillou J, Beddoes J, et al. Effect of fully lamellar morphology on creep of a near  $\gamma$ -TiAl intermetallic [J]. Intermetallics, 1999(7): 171-178
- [8] Chen W R, Triantafillou J, Beddoes J, et al. Effect of fully lamellar morphology on creep of a near  $\gamma$ -TiAl intermetallic [J]. Intermetallics, 1999,7(2): 171-178
- [9] Huang S C, Halle L. The effects of Cr additions to binary TiAl-base alloys [J]. Metall Trans. A, 1991, 22A (9): 2619-2627
- [10] Yoshihara M, Miura K. Effects of Nb addition on oxidation behavior of TiAl [J]. Intermetallics, 1995,3(5):357- 363
- [11] 陈进,黄伯云,曲选辉. 热处理对 TiAl 基合金的组织结构和室温性能的影响[J]. 中南矿冶学院学报,1993,24(3): 378-383

(编辑 李洪泉)