

# 粉末冶金 $\gamma$ -TiAl 系合金的性能及成形工艺

郎泽保 于峰 毕建勋 张绪虎 史金靓

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 利用预合金球形粉末,制备了高性能的粉末冶金 TiAl 系合金材料,对其性能和微观组织做了测试和分析,并介绍了粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的钎焊工艺和研制的部分典型样件。研究发现:粉末冶金 TiAl 系合金具有较高的力学性能、细小的微观组织和优异的抗氧化性能,能够成为研制某些飞行器的备选材料。

**关键词** 粉末冶金 TiAl 合金,性能,钎焊工艺

## Properties and Forming Technologies of P/M $\gamma$ -TiAl Based Alloy

Lang Zebao Yu Feng Bi Jianxun Zhang Xuhu Shi Jinliang

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The properties and microstructure of P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy obtained from pre-alloyed spherical powders by HIP process were tested and analyzed. As the applications of P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy, brazing technologies and some typical components were introduced at the end of the article. The results show that P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy can be an attractive candidate material for some aerospace vehicles due to its good mechanical properties, fine microstructures and excellent oxidation resistance.

**Key words** P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy, Property, Brazing technology

### 0 引言

$\gamma$ -TiAl 系合金具有轻质、高强,在 900℃ 左右抗氧化性能好等特点,是研制高温轻质结构件最合适的备选材料之一<sup>[1-3]</sup>。但是, TiAl 系合金较低的室温塑性导致如轧制、锻压和车加工,变得十分困难。因此,很多研究都集中于如何提高 TiAl 系合金的室温塑性上。由于粉末冶金工艺可以烧结致密 TiAl 系合金的预合金粉末,进而得到组织细小、均匀,并且完全致密的材料,因此成为解决上述问题的工艺途径之一<sup>[4-5]</sup>。本文以 Ti-46Al-2Cr-2Nb+W+B 为例,利用粉末冶金技术开展了粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金性能与微观组织的研究,并结合粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的特点,开展了粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的钎焊工艺与典型样件的研制。

### 1 实验

#### 1.1 材料

通过热等静压烧结包套内的 TiAl 系合金预合金球形粉末获得了粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料,在坯料上进行线切割取圆棒,然后进行热处理进行组织调整,最后按照试验要求加工试棒。

#### 1.2 室温及高温拉伸实验

室温和高温拉伸性能试验用试棒按照 GB 228—

90 的要求加工而成,轮廓尺寸为 M12 mm×68 mm,见图 1。可以看出,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金经过组织调整后可以进行传统的车、磨等传统加工,螺纹尺寸及外观质量符合拉伸试验的要求,显示了粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金具有良好的室温机械加工能力。粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的室温和高温拉伸性能试验在 CMT-5105 万能拉伸试验机上完成。



图 1 粉末冶金 TiAl 系合金拉伸试棒

Fig. 1 Specimen of P/M TiAl based alloy for tensile property test

#### 1.3 高温持久性能实验

试棒的形状及尺寸与室温拉伸性能试验用的一致,其测试是在 CWT-304 高温持久性能试验机上完成。

#### 1.4 高温抗氧化性能试验

高温抗氧化性能用试样单位面积上的氧化速率来表示。在试验中首先将试样置入马弗炉中,加热温

表 1 粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的室温拉伸性能Tab. 1 Tensile properties of P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy at room temperature

组织类型	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta_5$ /%
全片层组织	425	555	1.3
	440	540	1.5
	440	565	1.7
双态组织	470	610	3.1
	475	624	2.9
	471	608	3.0

度为 900℃,保温一定的时间,用高精度电子天平测试试样表面的氧化增重,再除以试样的表面积,得到试样在一定时间内单位面积上的氧化增重,作为材料抗氧化性能的指标。马弗炉的额定温度为 1 200℃,电子天平的精度为十万分之一克。

### 1.5 钎焊性能实验

在试验中将试块的表面清洗干净,在钎焊的部位涂抹 Ti-Cu 系钎焊料,利用工装施加压力,在真空钎焊炉中完成钎焊,将得到的钎焊接头加工成拉伸试棒,进行抗拉强度试验和微观组织分析。

## 2 结果与讨论

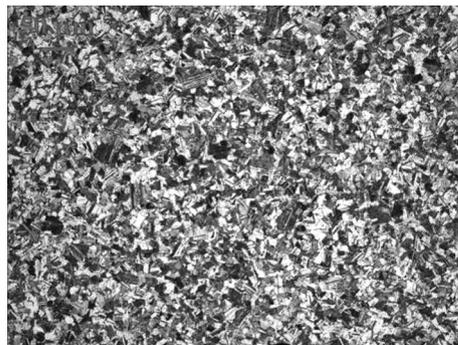
### 2.1 粉末冶金 $\gamma$ -TiAl 系合金的性能及显微组织

#### 2.1.1 室温拉伸性能及微观组织

粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的微观组织形态有近  $\gamma$  态组织、双态组织和全片层组织。根据 C. T. Liu 等人的研究结果,当具备了细小晶粒的双态组织或者全片层组织时,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金才会表现出较好的综合性能。根据差热分析测试得到的粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的  $T_a$  温度转变点,制定了不同的热处理制度来调整材料的组织,得到了双态组织和全片层组织的粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料,其室温拉伸性能结果如表 1 所示。



(a) 全片层组织

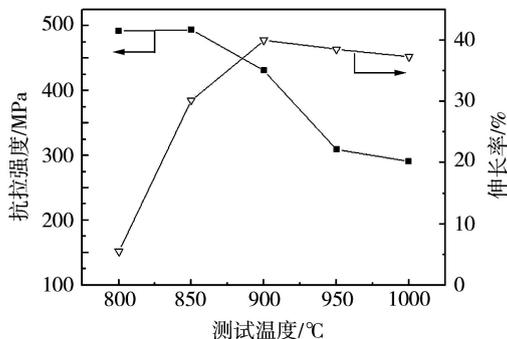


(b) 双态组织

图 2 粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料的金相组织Fig. 2 Metallurgical structures of P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy

#### 2.1.2 高温拉伸性能

$\gamma$ -TiAl 系合金的高温拉伸性能结果见图 3。

图 3 粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金在 800-1 000℃ 的拉伸性能Fig. 3 Tensile properties of P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy tested during 800-1 000℃

从表 1 可以看出,具备双态组织的 TiAl 系合金的抗拉强度和伸长率都优于具备全片层组织材料。

两种不同组织状态的粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料的金相组织见图 2。可知粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金形成的双态组织相对全片层组织来讲,其晶粒比较细小。细小的晶粒可缩短滑移带长度,减少滑移面位错运动长度和位错堆积,降低了滑移面交接处和晶界的应力集中,阻止裂纹的产生。此外,等轴晶组织和片层组织之间的界面可以阻碍裂纹的扩展。因此,细小的双态组织表现出了较高的抗拉强度和较好的伸长率。

从图 3 可以看出,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料的抗拉强度随温度的变化而发生剧烈变化:800-850℃,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的强度变化不大;当测试温度超过 850℃ 时,抗拉强度下降明显,并在 1 000℃ 时,抗拉强度下降到 290 MPa 左右。粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的伸长率随着测试温度的升高而增加,尤其当测试温度由 800℃ 上升到 900℃ 时,伸长率急剧增大,而当超过 900℃ 之后,伸长率变化不大。

#### 2.1.3 高温持久强度

对粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料在 900℃、持续加载为 170 MPa 下的持久性能做了测试,当测试时间为 10 h 时,测试试棒仍没有断裂,表现出了良好的高温持久性能。

#### 2.1.4 抗氧化性

经热处理之后,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金也表现出了较好的抗氧化性能。在 900℃ 下,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料的抗氧化性能如图 4 所示。

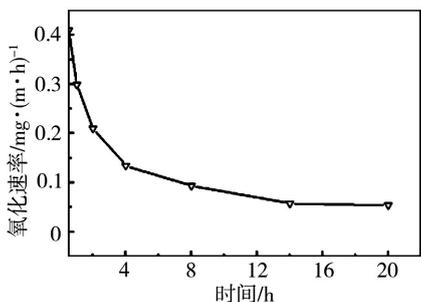


图 4 900℃ 下粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的氧化速率与时间的关系

Fig. 4 Relationship of oxidation speed and period for P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy at 900°C

从图 4 可以看出,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料在氧化过程中,其氧化速率逐渐降低,从开始的 0.41  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  减少到 54.1  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。经分析,在氧化过程中,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金材料的表面开始形成了致密的氧化膜,阻碍了氧化的剧烈发生。随着氧化时间的延长,氧化膜的厚度增加,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的氧化速率也越来越慢,并趋向于一个恒定值。

## 2.2 粉末冶金 $\gamma$ -TiAl 系合金的钎焊性能及组织

### 2.2.1 钎焊接头的抗拉强度

对利用钎焊技术制备的粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金进行了抗拉强度的测试结果表明,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金钎焊接头的平均抗拉强度达到了 388 MPa,接头强度系数达到了 0.8,满足了 TiAl 系合金在实际应用中的需求。

### 2.2.2 粉末冶金 $\gamma$ -TiAl 系合金钎焊接头的微观组织

粉末冶金 TiAl 系合金钎焊接头的微观组织见图 5。

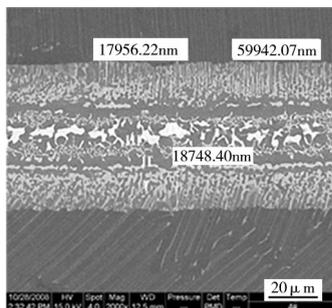


图 5 粉末冶金 TiAl 系合金钎焊接头试棒断口 SEM 照片

Fig. 5 SEM photo of cracking specimen in P/M TiAl based alloy

可以看出,TiAl 系合金钎焊接头的微观结构可大致分为柱状两相区、网状析出区、过渡区和残余钎料区等四个区域。这四个区域的形成是由于在钎焊过程中,随着保温时间的延长,TiAl 系合金基体及钎焊料内的各种元素相互扩散而形成的。由于各种元素

的激活能不同,其扩散距离也不同,从而导致各种元素在钎焊区域的浓度分布不同,造成了钎焊材料内部形成了不同的微观组织区域。

## 2.3 粉末冶金 $\gamma$ -TiAl 系合金典型构件

在航空航天领域,粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金主要应用的部位有舱体、薄壁夹层结构和发动机等部位。根据粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金的特点,利用热等静压技术和钎焊技术成功研制了壳体、薄壁筒形件、锥形网格和舵芯骨架等典型结构。

### 2.3.1 壳体典型样件

粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金壳体是配合我国在航天领域开展的某型号研究而制备的,其轮廓尺寸为  $\Phi 600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ,见图 6。粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金壳体是由内壳和外壳组成的中空薄壁结构,壁厚为 3 mm。



图 6 粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金壳体

Fig. 6 Shell structure of P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy

### 2.3.2 薄壁筒体

图 7 所示为 TiAl 系合金薄壁筒体,其轮廓尺寸为  $\Phi 540 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ ,壁厚为 4 mm。该筒体的壁厚波动在 1 mm 以内,同心度也比较好,为以后的机械加工提供了良好的外形条件。

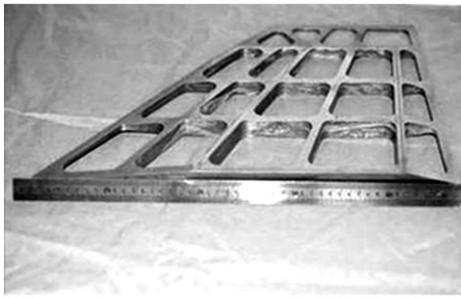


图 7 粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金薄壁筒体

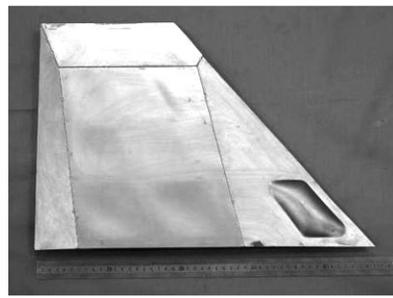
Fig. 7 Cylinder structure with thin wall of P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy

### 2.3.3 薄壁夹层结构

薄壁夹层结构是 TiAl 系合金在飞行器上应用的重要部件之一。为了推动 TiAl 系合金的应用,利用粉末冶金技术成功研制 TiAl 系合金骨架结构,见图 8 (a)。然后在骨架的表面钎焊上 TiAl 系合金薄板作为蒙皮,形成了 TiAl 系合金薄壁夹层结构,见图 8 (b)。粉末冶金 TiAl 系合金薄壁夹层结构的成功研制使 TiAl 系合金在飞行器上的应用成为可能。



(a) 骨架



(b) 薄壁夹层结构

图8 粉末冶金  $\gamma$ -TiAl 系合金骨架及薄壁夹层结构

Fig. 8 Skeleton and sandwich structure of P/M  $\gamma$ -TiAl based alloy

### 3 结论

(1) 利用粉末冶金技术制备了高性能的粉末冶金 TiAl 系合金, 其室温强度超过了 600 MPa, 伸长率达到了 3.0%。

(2) 粉末冶金 TiAl 系合金材料的晶粒细小、均匀。

(3) 利用钎焊技术制备了高强度的 TiAl 系金属间焊接材料, 其平均强度系数达到了 0.8。

(4) 针对航空航天型号对 TiAl 系合金的需求, 成功制备了壳体、薄壁筒体及薄壁夹层结构等典型样件。

#### 参考文献

[1] Bartolotta P A, Krause D L. Titanium aluminide applications in the high speed civil transport[R]. NASA/TM-1999-209071, Ohio: Glenn Research Center, 1999

[2] Carrell Elizabeth Weeks. Evaluation of a gamma titanium aluminide for hypersonic structural applications[D]. Master Thesis, Georgia Institute of Technology, 2005

um aluminide for hypersonic structural applications[D]. Master Thesis, Georgia Institute of Technology, 2005

[3] Acquaviva C S. Structures and acoustics division annual report for 1997 to 1999[R]. NASA/TM-2001-210366, Ohio: Glenn Research Center, 2001

[4] Yoltan C F, Kim Youngwon, Ulrike. Powder metallurgy processing of gamma titanium aluminide[C]//Kim Y W, Clemens Helmut, Rosenberger Andrew H eds. Gamma Titanium Aluminide 2003. Pennsylvania: The Minerals, Metals & Materials Society, 2003: 233-240

[5] Habel U, Yoltan C F, Moll J H. Gas atomized  $\gamma$ -titanium aluminide based alloys processing, microstructure and mechanical properties[C]//Kim Y W, Dimiduk Dennis M, Loretto Michael H eds. Gamma Titanium Aluminide 1999. Pennsylvania: The Minerals, Metals & Materials Society, 1999: 301-306

(编辑 李洪泉)

(上接第 82 页)

### 3 结论

(1) 乙炔炭黑含量对导电硅橡胶的力学性能有明显影响。但含量超过 45 phr 后, 其体积电阻率变化不明显。

(2) 炭黑在硅橡胶内部形成“球链”的导电通路, 过量的炭黑在硅橡胶内部可形成“炭黑簇”结构, 进一步提高硅橡胶的导电性能。

(3) 50 phr 是乙炔炭黑填充导电硅橡胶的最佳耐热性填充量。

(4) 填充 50 phr 乙炔炭黑导电硅橡胶随温度的增加, 拉伸强度下降; 在 100℃ 下长期老化后的导电性能下降。

#### 参考文献

[1] 许龙根, 王建, 吴生泉, 等. 导电硅橡胶的研制[J]. 特种橡胶制品, 1982(4): 25-31

[2] 张洁, 冯圣玉. 导电硅橡胶理论研究进展[J]. 功能高分子学报, 2002, 15(1): 87-90

[3] 雷海军, 宫文峰, 武晶, 等. 金属填料对高导电硅橡胶性能的影响[J]. 橡胶工业, 2005, 52(11): 667-669

[4] 吴石山, 张军, 窦强. 导电硅橡胶的研究[J]. 橡胶工业, 1998, 4(11): 669-671

[5] 焦冬生, 任宗文, 刘君, 等. 乙炔炭黑填充导电硅橡胶的研究[J]. 材料工程, 2007(10): 11-13

[6] 杨绪迎, 吴文彪. 炭黑填充型导电硅橡胶的性能研究[J]. 橡胶工业, 2007, 54(11): 677-678

[7] 肖建斌, 王伟, 杨庆华, 等. 用正交试验法研究硅橡胶的导电性能[J]. 青岛化工学院学报, 2002, 23(1): 56-58

[8] 谢泉, 罗姣莲, 干福熹, 等. 炭黑填充复合型导电硅橡胶的导电机理研究及电阻率计算[J]. 长沙交通学院学报, 2000, 16(3): 4-7

[9] Princy K G, Joseph R, Kartha S. Studies on conductivity of nitrile rubber and its blends with NR, EPDM and PVC, plastics[J]. Rubber and Composites, 2002, 31(3): 114-118

[10] 张洁, 冯圣玉. 电-热平衡态下不同电阻率-温度效应的导电硅橡胶的直流电流-电压特性[J]. 材料工程, 2003(4): 24-26

[11] 王鹏, 丁天怀, 徐峰, 等. 炭黑/硅橡胶复合材料的压阻特性研究与改进[J]. 传感技术学报, 2004(1): 15-18

[12] 仇怀利, 黄英, 向蓓, 等. 炭黑/硅橡胶纳米复合材料的结构和压阻特性研究[J]. 仪表技术与传感器, 2010(4): 1-3

[13] 李鹏, 刘顺华, 陈光钧. 电磁波屏蔽橡胶的线性电阻特性研究[J]. 特种橡胶制品, 2005, 26(1): 12-15

[14] 周重光, 贝小来, 周长忍. 双马来酞亚胺在改进硅橡胶热稳定性中的作用[J]. 高分子学报, 1991(1): 26-30

(编辑 任涛)