

# TiAl系金属间化合物球型预合金粉末制备及粉末冶金工艺研究

郎泽保<sup>1</sup> 崔玉友<sup>2</sup> 王亮<sup>1</sup> 徐磊<sup>2</sup> 张绪虎<sup>1</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 中国科学院金属研究所,沈阳 110016)

**文 摘** 成功制备了 Ti-46Al-2Cr-2Nb-0.2B-0.1W (原子分数)球型预合金粉末,并对粉末的特性进行了研究。在随后的粉末冶金技术研究中,运用热等静压技术得到了组织细小、均匀的粉末 TiAl系金属间化合物,但材料的伸长率很低。经热处理后,材料的伸长率达到了 2.5%。

**关键词** TiAl金属间化合物,球型预合金粉末,粉末冶金

## Production of Pre-Alloyed Gamma Titanium Aluminate Spherical Powder and P/M Processing

Lang Zebao<sup>1</sup> Cui Yuyou<sup>2</sup> Wang Liang<sup>1</sup> Xu Lei<sup>2</sup> Zhang Xuhu<sup>1</sup>

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

(2 Institute of Metal Research Chinese Academy of Science, Shenyang 110016)

**Abstract** Pre-alloyed gamma titanium aluminate spherical powders with composition Ti-46Al-2Cr-2Nb-0.2B-0.1W (at%) have been successfully produced by PIGA. The characteristics of prealloyed gamma titanium aluminate powders have been investigated. In the further P/M processing, gamma titanium aluminate compact with fine and homogeneous microstructure has been obtained by HIP, although elongation of the compact is poor. After heat treatment, the elongation of the compact has reached 2.5%.

**Key words** Titanium aluminate, Spherical pre-alloyed powders, P/M

### 1 前言

TiAl系金属间化合物具有轻质、高强,900℃下抗氧化性能好等特点,因此被认为是研制超音速飞行器中最合适的备选材料之一<sup>[1~3]</sup>。但是,TiAl系金属间化合物在铸造和锻造大尺寸坯料等方面还存在一些问题,如缩孔、疏松、成分不均匀等。此外,TiAl系金属间化合物较低的室温塑性使得一些传统的加工方法,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系金属间化合物的室温塑性上。由于粉末冶金工艺可以通过热等静压处理TiAl系金属间化合物预合金粉末得到组织细小、均匀,并且完全致密的部件,因此成为最有可能解决上述问题的途径之一<sup>[4~6]</sup>。此外,采用热等静压工

艺,还可以制备用于后续再加工的毛坯,从而解决了铸造及锻造遇到的问题。国外的一些研究机构,如Plansee AG公司,已经通过轧制热等静压后的粉末冶金毛坯制备了厚度为0.17mm的箔材<sup>[7]</sup>。我国对运用元素粉末制备TiAl系金属间化合物的粉末冶金工艺有所研究<sup>[8~9]</sup>,但对TiAl系金属间化合物预合金球型粉制备工艺则涉及较少。本文介绍了TiAl系金属间化合物预合金球型粉的研制工作以及后续粉末冶金工艺方面的一些研究。

### 2 试验

#### 2.1 TiAl系金属间化合物预合金粉末的制备

试验采用的TiAl系金属间化合物的名义成分为:Ti-46Al-2Cr-2Nb-0.2B-0.1W(原子分

收稿日期:2007-09-30

作者简介:郎泽保,1975年出生,硕士,主要从事粉末冶金的研究

数),在本文中简写为 46 - 2 - 2 +B +W。在研究中,联合中国科学院金属研究所开展了材料熔炼和气体雾化制粉方面的研究。TiAl系金属间化合物预合金粉末常用的制备工艺有等离子感应熔炼气体雾化法(PIGA)和电极自耗熔炼气体雾化法(EIGA)。目前,

已经通过 PIGA法成功制备出了用于试验的 46 - 2 - 2 +B +W 球型预合金粉末,粉末的化学成分见表 1。经分析,粉末中杂质元素 C、H、O 的含量相对于母材略有增加。因此,控制基材杂质元素的含量对预合金粉末的质量十分重要。

表 1 46 - 2 - 2 +B +W 预合金粉末的化学成分

Tab 1 Chemical composition of pre-alloyed 46 - 2 - 2 +B +W powder

%(质量分数)

Ti	Al	Cr	Nb	B	W	H	C	O
58.5569	33.28	2.88	4.63	0.096	0.48	0.0011	0.0084	0.059

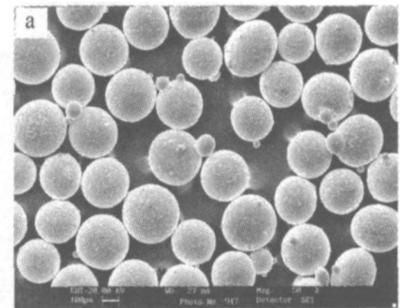
## 2.2 46 - 2 - 2 +B +W 预合金粉末的粉末冶金处理工艺

TiAl系金属间化合物致密化成型常用的工艺有热等静压工艺和挤压工艺,而热等静压工艺的应用则更为广泛。因为在热等静压过程中,材料在高温下受到各个方向相同的压力,从而使粉末达到完全致密化。此外,运用热等静压工艺也可近净成型形状比较复杂的部件<sup>[10-13]</sup>。在致密化之前,首先在振动的条件下将预合金粉末装入碳钢包套中,在 400 ~ 600 下抽真空,并保持一段时间后密闭包套。TiAl系金属间化合物的热等静压温度范围在 1 000 ~ 1 300 之间,不同的热等静压温度可以得到不同类型的组织,并且对热等静压后材料的晶粒大小影响很大<sup>[14]</sup>。本文在研究 46 - 2 - 2 +B +W 的致密化过程中,采用的热等静压工艺为:1 200 /3 h,压力为 140 MPa。然后,对热等静压后的 46 - 2 - 2 +B +W 材料热处理,改善其组织类型。在经过 1 250 /2 h,FC + 900 /2 h,FC处理后,得到了具有双态组织的 46 - 2 - 2 +B +W 合金材料。

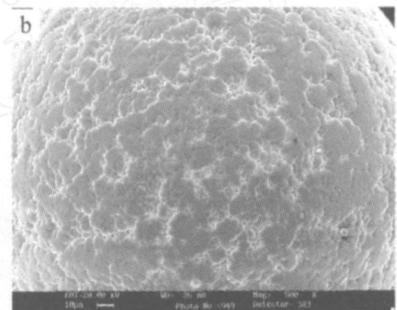
## 3 结果与讨论

### 3.1 46 - 2 - 2 +B +W 预合金粉末的特点

TiAl系金属间化合物粉末的形状决定了粉末的松装密度和振实密度,从而对坯料在致密化过程中尺寸变化有很大的影响。因此,很多人研究着重研究了如何控制预合金粉末形状<sup>[15]</sup>。图 1 是运用 PIGA法制备的典型粉末的 SEM 照片。PIGA法制备的 46 - 2 - 2 +B +W 预合金粉末的形状大部分为球型,其中有些粉末带有行星颗粒。测试结果表明这些粉末的振实密度达到了材料理想密度的 64%。图 2 是 46 - 2 - 2 +B +W 预合金粉末的截面照片。粉末的内部呈现出了网格状的微观组织,表明了粉末在成形过程中冷却速度很快。网格的尺寸大约为 17 μm,并且网格尺寸不会随粉末的尺寸而发生明显的变化。



(a) 整体形貌



(b) 表面组织

图 1 46 - 2 - 2 +B +W 预合金粉末的 SEM 照片

Fig 1 SEM micrographs of gas atomized 46 - 2 - 2 +B +W pre-alloyed powder

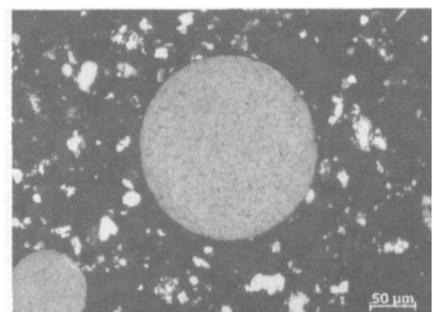


图 2 46 - 2 - 2 +B +W 预合金粉末的截面照片

Fig 2 Cross-section of gas atomized of pre-alloyed 46 - 2 - 2 +B +W powder

PIGA法制备的 46 - 2 - 2 +B +W 粉末分布很宽。运用筛分法对粉末的分布进行了研究,如图 3 所示。通过 - 60 目筛分后,粉末的尺寸主要分布在 50 ~ 190 μm 范围内,并且其分布符合高斯分布。

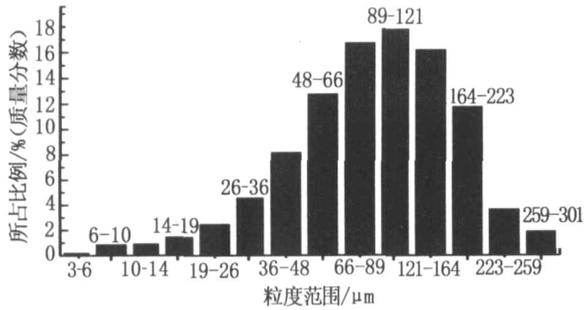


图 3 46 - 2 - 2 + B + W 预合金粉末的独立分布示意图  
Fig 3 Distribution of pre-alloyed 46 - 2 - 2 + B + W powders after - 60 mesh screening

最后通过 XRD 法研究了 46 - 2 - 2 + B + W 预合金粉末的相组成,如图 4 所示,发现其相组成主要为  $\alpha_2$  相。

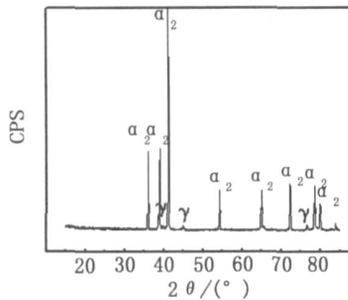
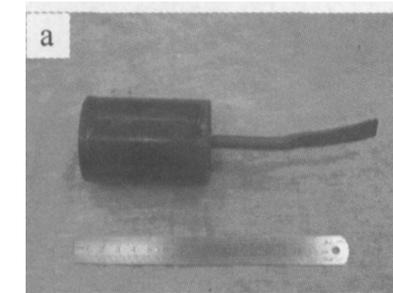


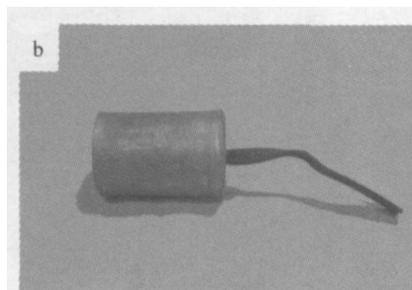
图 4 46 - 2 - 2 + B + W 预合金粉末的相组成示意图  
Fig 4 Phase composition of pre-alloyed 46 - 2 - 2 + B + W powder

### 3.2 微观组织及性能

在 TiAl 系金属间化合物预合金粉末致密化的过程中,包套的尺寸会发生明显变化,图 5 示出了热等静压前后的包套照片。



(a) 热等静压前



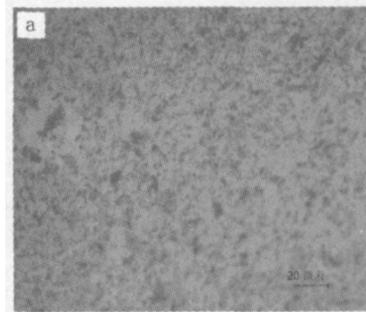
(b) 热等静压后

图 5 热等静压前后包套的示意图

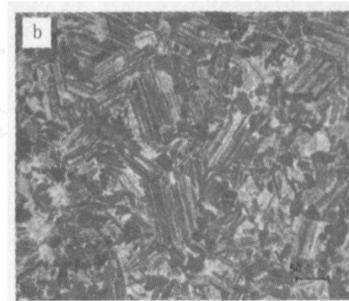
Fig 5 Graphs of caning before HIP and as-HIP

包套在热等静压后,其轴向和径向的尺寸均会缩小,包套顶部用于抽真空的管道会由于没有填装粉末而被压扁。

在经过 1 200 、 140 MPa 3 h 的热等静压后,46 - 2 - 2 + B + W 材料的组织为等轴晶组织,细小,均匀 [图 6 (a)],但其伸长率很低。一般来讲,具有双态组织或者全片层状组织的 TiAl 系金属间化合物在室温下才具有良好的伸长率<sup>[16]</sup>,因此需要进行热处理改善组织。在经过 1 250 / 2 h + 900 / 2 h 的热处理后,46 - 2 - 2 + B + W 合金的微观组织变为双态组织 [图 6 (b)]。



(a) 热等静压状态



(b) 热处理状态

图 6 46 - 2 - 2 + B + W 合金的金相组织照片

Fig 6 Backscatter electron images of 46 - 2 - 2 + B + W

通过观察 46 - 2 - 2 + B + W 热处理状态的微观组织发现:片层状组织占整个微观组织的一半,其晶粒大小约为 50 μm;等轴晶组织的晶粒尺寸小于 30 μm。热等静压前后 46 - 2 - 2 + B + W 合金的伸长率如表 2 所示。

表 2 不同状态下 46 - 2 - 2 + B + W 合金的拉伸性能

Tab 2 Tensile strengths of 46 - 2 - 2 + B + W under different status

状态	屈服强度 /MPa	拉伸强度 /MPa	伸长率 /%	拉伸模量 /GPa
热等静压态	-	703	0.4	147
	-	706	0.4	151
	-	636	0.5	150
热处理态	452	558	2.0	153
	460	555	2.5	174
	455	527	2.0	153

TiAl系金属间化合物的力学性能在很大程度上取决于材料的组织类型。在热处理之后,粉末冶金 46-2-2+B+W 材料形成了双态组织,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,不利于裂纹形核。此外,片层组织的界面对裂纹扩展有阻力,其断裂抗力高于等轴组织。因此,细小的片层组织的出现提高了材料的塑性。但是,热处理后的 46-2-2+B+W 的晶粒相对于热等静压状态要粗大,双态组织的出现也增加了组织的不均匀性,从而使得材料的强度有所降低。

#### 4 结论

(1)利用 PIGA法成功地制备了 46-2-2+B+W 预合金球型粉末。在 -60目过筛后,粉末的尺寸分布范围为 50~190  $\mu\text{m}$ ,并且粉末尺寸的分布符合高斯分布。

(2)热等静压后制备的 46-2-2+B+W 合金的微观组织为等轴晶组织,并且细小、均匀,但其伸长率很低。在热处理后,合金的伸长率达到了 2.5%。

#### 参考文献

- 1 Bartolotta P A, Krause D L. Titanium Aluminate applications in the high speed civil transport NASA/TM - 1999 - 209071, Ohio: Glenn Research Center, 1999
- 2 Carrell Elizabeth Weeks. Evaluation of a gamma Titanium Aluminate for hypersonic structural applications Master Thesis, Georgia Institute of Technology, 2005
- 3 Acquaviva C S. Structures and acoustics division annual report for 1997 to 1999. NASA/TM - 2001 - 210366, Ohio: Glenn Research Center, 2001
- 4 Yolton C F, Young-Won Kim, Ulrike. Powder metallurgy processing of gamma Titanium Aluminate. In: YW Kim, Helmut Clemens, Andrew H Rosenberger ed. Gamma Titanium Aluminate 2003. Pennsylvania: The Minerals, Metals & Materials Society, 2003: 233~240
- 5 Rainer Gerling, Helmut Clemens, Frank-Peter et al. PM-Process of an advanced  $\gamma$ -TiAl alloy: technologies, microstructures and mechanical properties. In: Henker K J, Dimiduk D M, Clemens H eds. Structural Intermetallics 2001. Wyoming: The Minerals, Metals & Materials Society, 2001: 139~148

- 6 Habel U, Yolton C F, Moll J H. Gas atomized  $\gamma$ -titanium aluminate based alloys processing, microstructure and mechanical properties. In: Kim Y W, Dimiduk D M, Loretto M H eds. Gamma titanium aluminate 1999. Pennsylvania: The Minerals, Metals & Materials Society, 1999: 301~306

- 7 LeHohn R, Clemens H, Kestler H. Powder metallurgy (PM) gamma-based Titanium Aluminate structures for use in various high temperature aerospace applications. In: Kim Y W, Dimiduk D M, Loretto M H eds. Gamma titanium aluminate 1999. Pennsylvania: The Minerals, Metals & Materials Society, 1999: 25~33

- 8 刘咏,黄伯云,周科朝等.粉末冶金 TiAl基合金显微组织及力学性能的研究.稀有金属材料与工程,2000;29(4):251~254

- 9 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.粉末冶金技术,2001;19(3):165~169

- 10 Rainer Gerling, Frank-Peter Schimansky, Helmut Clemens. Powder production techniques and P/M processing routes for gamma titanium aluminides. In: Kim YW, Clemens H, Rosenberger A H eds. Gamma titanium aluminate 2003. Pennsylvania: The Minerals, Metals & Materials Society, 2003: 233~240

- 11 周科朝. TiAl基金属间化合物的成形技术研究.中南大学博士论文,1998

- 12 刘咏,黄伯云,周科朝等.粉末冶金  $\gamma$ -TiAl基合金的最新进展.航空材料学报,2001;21(4):50~55

- 13 欧阳洪武,刘咏,贺跃辉等.粉末冶金 TiAl合金排气门的研制.中国有色金属学报,2002;12(2):334~337

- 14 Habel U, McTieman B J. HIP temperature and properties of a gas-atomized  $\gamma$ -titanium Aluminate alloy. Intermetallics, 2004; 12: 63~68

- 15 Gerhard Wegmann, Rainer Gerling, Frank-Peter Schimansky. Temperature induced porosity in hot isostatically pressed gamma titanium aluminate alloy powders. Acta Materials, 2003; 51: 741~752

- 16 Kim YW. Gamma titanium aluminate: their status and future. JOM, 1995; 47(7): 39~41.

(编辑 任涛)