

# 粉末冶金 Ti-6Al-4V 的组织及形成机理

王亮 郎泽保 贾文军 史金靓 黄国基

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文摘** 利用热等静压(HIP)技术及旋转电极粉,采用预合金粉工艺制备了全致密的粉末冶金 Ti-6Al-4V 合金,用光学显微镜对其金相组织进行了观察,分析其形成机理,并对粉末冶金 Ti-6Al-4V 合金的室温拉伸性能、弹性模量、冲击性能及断裂韧性进行了研究。结果表明:粉末冶金 Ti-6Al-4V 金相组织主要由条片  $\alpha$  相+相间  $\beta$  相组成,有细小的等轴  $\alpha$  相分布在晶粒界面处,包裹着条片  $\alpha$  相,这种独特的组织状态是由制备工艺决定的,具有良好的综合性能。

**关键词** 钛合金, Ti-6Al-4V, 粉末冶金, 热等静压, 组织, 性能

## Microstructure and Forming Mechanism of Powder Metallurgy Ti-6Al-4V

Wang Liang Lang Zebao Jia Wenjun Shi Jinliang Huang Guoji

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

**Abstract** The prealloyed powder metallurgy (PM) process is studied in this paper to prepare PM Ti-6Al-4V alloy. And hot isostatic pressing (HIP) technology and the plasma rotating electrode processing (PREP) powders are used in the prealloyed processing to get full density material. The microstructures are examined by optical microscope, and the forming mechanism is studied. Room temperature tensile properties and elastic modulus and impact toughness and fracture toughness of PM Ti-6Al-4V alloy are tested and discussed. The results show that the typical microstructures of the PM Ti-6Al-4V alloy are platelet  $\alpha$  + fine transformed  $\beta$  structure, surrounded by equiaxed  $\alpha$  on boundaries of the grains. The special microstructure is formed by the reason of special prealloyed process and has excellent comprehensive properties.

**Key words** Titanium alloy, Ti-6Al-4V, Powder metallurgy, Hot isostatic pressing, Microstructure, Property

### 0 引言

粉末钛合金技术可制造出高性能、低成本的钛合金构件,具有材料性能高、成形能力强(易于制备形状复杂的产品)、成本较低、可制备全致密材料、无内部缺陷、组织均匀细致无偏析、材料内应力小、尺寸稳定性好等优点<sup>[1-4]</sup>。高性能的粉末冶金技术已实现了商业化应用<sup>[5-12]</sup>。Ti-6Al-4V 是一种应用范围广、使用量大的  $\alpha$ - $\beta$  型中强钛合金,具有良好的综合性能,航天材料及工艺研究所对其高性能粉末冶金技术开展了研究<sup>[4,13-15]</sup>。

在钛合金材料中,组织状态对性能有很大的影响,而金相组织是由制备工艺和处理方式决定的。由于钛合金粉末冶金工艺过程与传统的铸、锻工艺过程有本质的区别,粉末钛合金金相组织的特征与铸造和锻造材料相比必然会发生变化。

本文开展了粉末冶金 Ti-6Al-4V 合金的金相组织及其形成机理的研究工作,并对其室温拉伸性能、

冲击性能、断裂韧性及弹性模量进行了测试,并对组织与性能间的关系进行研究。

### 1 实验

采用预合金粉工艺制备高性能的粉末冶金 Ti-6Al-4V 合金,制备流程见图 1。

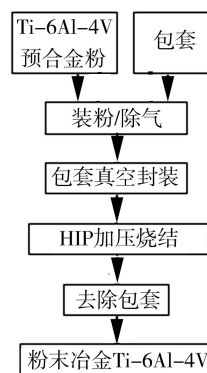


图 1 粉末冶金 Ti-6Al-4V 合金制备工艺流程

Fig. 1 Illustration of process for preparing PMTi-6Al-4V alloy

采用旋转电极法制备 Ti-6Al-4V 球形预合金粉, 粒径为 45 ~ 250  $\mu\text{m}$ , 粉末颗粒基本为球形, 异形形状的颗粒很少, 表面较光滑(图 2)。HIP 后粉末冶金 Ti-6Al-4V 试样包套及去除包套后的材料见图 3。

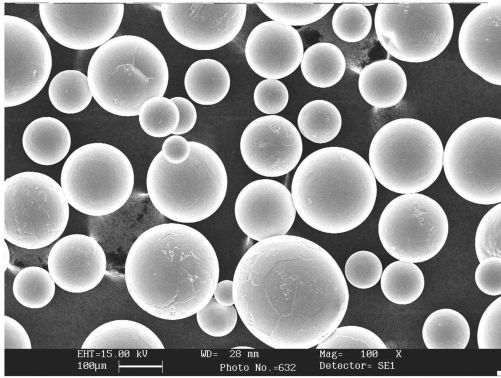


图 2 旋转电极法制备的 Ti-6Al-4V 粉末 SEM 照片

Fig. 2 SEM morphologies of PREPTi-6Al-4V powders



图 3 HIP 后粉末冶金 Ti-6Al-4V 试样包套及材料

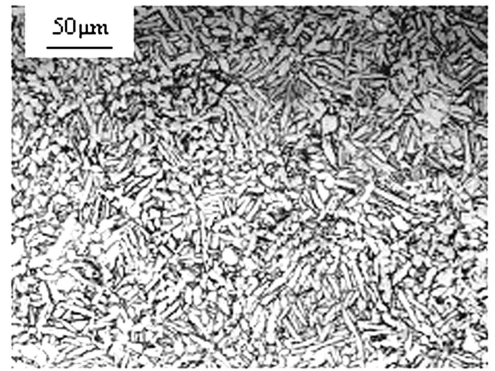
Fig. 3 PM Ti-6Al-4V alloy and the capsule for HIP

用光学金相技术观察粉末冶金 Ti-6Al-4V 的金相组织, 在制备的粉末冶金 Ti-6Al-4V 试块上取样加工标准拉伸试棒、U 型缺口冲击试样和紧凑拉伸试样, 分别测试拉伸性能及弹性模量、冲击韧性和断裂韧性。

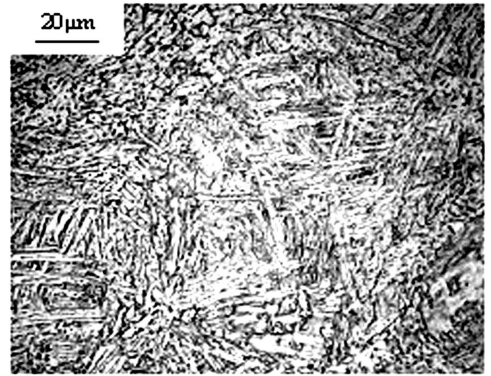
## 2 结果与讨论

### 2.1 粉末冶金 Ti-6Al-4V 金相组织

图 4 所示为典型粉末冶金 Ti-6Al-4V 金相组织。可以看到, 组织均匀、细致, 主要由条片  $\alpha$  相+相间  $\beta$  相组成,  $\alpha$  条片交错分布或形成网篮组织, 并有细小的等轴  $\alpha$  相分布其间, 等轴  $\alpha$  相分布的位置主要在由原始粉末颗粒形成的晶粒界面处, 包裹着交错分布或网篮状的  $\alpha$  条片。这种组织形貌类似锻件中的双态组织, 但其等轴  $\alpha$  相的分布方式不同。锻造材料的双态组织如图 5 所示, 其等轴  $\alpha$  相一般较均匀地分布在基体中, 而粉末冶金 Ti-6Al-4V 中的等轴  $\alpha$  相一般较细且集中分布在晶粒界面附近, 而晶粒与 HIP 前的粉末颗粒相对应。粉末的原始颗粒边界已不存在, 其位置上分布的是细小的等轴  $\alpha$  相。



(a)



(b)

图 4 粉末冶金 Ti-6Al-4V 典型金相组织

Fig. 4 Typical optical micrographs of PM Ti-6Al-4V alloy

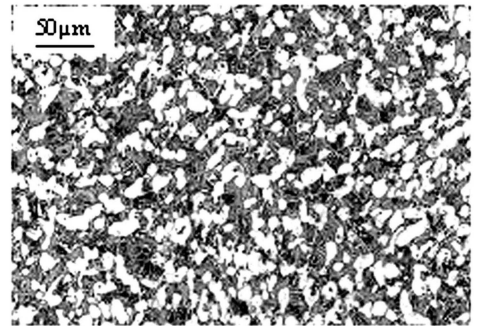


图 5 Ti-6Al-4V 锻造材料的双态组织

Fig. 5 Bimodal structure of wrought Ti-6Al-4V alloy

### 2.2 粉末冶金 Ti-6Al-4V 组织形成机理

粉末冶金 Ti-6Al-4V 与铸、锻材料的金相组织有明显的区别, 其原因在于特殊的粉末冶金预合金粉制备工艺。

在钛合金粉末冶金预合金粉工艺中, 采用球形预合金粉(图 2), 这种粉具有较高且稳定的松装密度, 装入包套后, 直接进行 HIP 致密化。通过对钛合金粉末冶金预合金粉工艺特点及 HIP 加压烧结过程的分析, 推演出用预合金粉工艺制备粉末冶金 Ti-6Al-4V 的致密化及其组织演变、形成过程, 如图 6 所示。

首先, 将 Ti-6Al-4V 球形预合金粉装入包套中,

并进行真空封装,这时在包套内,粉末颗粒间紧密堆积,相互间一般处于点接触状态。在 HIP 处理过程中,温度、压力逐渐上升,粉末颗粒间相互接触的界面在温度、压力的作用下相互挤压变形,颗粒间接触面积逐渐变大,颗粒界面附近的形变越来越大。由于粉末颗粒承受的是静压,与材料锻造所承受的整体冲击力不同,不会使粉末颗粒产生整体性的应变,而是在形变较大颗粒边界的局部范围内产生晶格畸变,产生较为集中的、较大的应变能。在合适的 HIP 加压烧

结的条件下,材料可实现全致密,粉末边界完全贴合,在相互接触的颗粒界面附近产生很大的应变,形成边界大应变带,在这一大应变带影响范围内,积累了较大的应变能,在保温保压过程中,在材料致密化的同时,驱动边界大应变带进行再结晶,通过这一再结晶过程,在边界大应变带位置上形成大量等轴  $\alpha$  相。而颗粒内部一般应变较小,再结晶的情况少,主要还是以条片  $\alpha$  相+相间  $\beta$  相为主,部分  $\alpha$  条片在保温、变形过程中交织分布形成网篮。

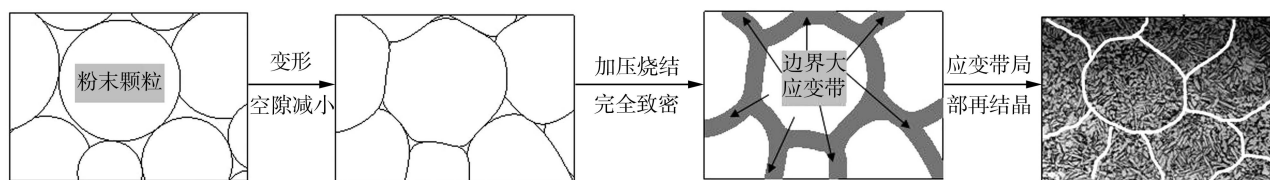


图 6 粉末冶金 Ti-6Al-4V 致密化及组织演变过程

Fig. 6 Densification and forming process of microstructure of PM Ti-6Al-4V alloy

在预合金粉工艺过程中,粉末冶金 Ti-6 Al-4V 的致密化按图 6 所示过程实现,而其最终的金相组织状态受粉末颗粒在这一过程中的变化影响,最终演变为图 4 所示金相组织,形成了等轴  $\alpha$  相包裹条片  $\alpha$  相的组织特征。

在这一过程中伴随着粉末原始颗粒边界的变化。钛合金粉末颗粒表面有一层致密的氧化膜,可以在室温下保护粉末颗粒不被继续氧化,但这一原始界面的存在也会阻碍颗粒间的烧结、扩散过程。粉末颗粒表面致密的氧化膜在 550℃ 下稳定存在,在 800℃ 以上会分解<sup>[16]</sup>,而要制备全致密材料,一般 Ti-6Al-4V 进行 HIP 处理的温度均会高于 800℃。根据图 6 所示,在 HIP 致密化过程中,首先粉末颗粒挤压变形,当形变达到一定程度时表面氧化膜破裂,因为包套内处于真空状态,破裂的氧化膜不会再生,超过 800℃ 后,钛合金粉末颗粒表面氧化膜分解,在界面处形成

O 等富集元素,根据扩散原理,这些富集元素向颗粒内部扩散,以实现成分均匀匹配,在高温条件下,这一扩散、均匀化过程可在较短的时间内完成<sup>[17]</sup>。这样,采用合适的 HIP 保温温度、时间,在粉末冶金 Ti-6Al-4V 合金中,粉末颗粒原始界面可以得到消除。

Ti-6Al-4V 在粉末冶金预合金粉工艺中,一方面由粉末颗粒形变在界面处局部产生较大应变,通过再结晶在颗粒界面位置附近生成大量等轴  $\alpha$  相,形成等轴  $\alpha$  相包裹条片  $\alpha$  相的组织特征,同时,粉末颗粒表面氧化膜破裂,在高温下分解、扩散,粉末颗粒原始界面消除。正是在这两方面共同作用下,粉末冶金 Ti-6Al-4V 形成了独特的组织特征。

### 2.3 粉末冶金 Ti-6Al-4V 的力学性能

粉末冶金 Ti-6Al-4V 在室温下的力学性能与铸、锻材料的对比见表 1。

表 1 粉末冶金 Ti-6Al-4V 的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of PM Ti-6Al-4V alloy

材料	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%	$E_t$ /GPa	$\alpha_k$ /kJ·m <sup>-2</sup>	$K_{Ic}$ /MPa·m <sup>1/2</sup>
PM Ti-6Al-4V	965	890	18.0	43.5	116	622	106
锻棒 <sup>[18]</sup>	≥895	≥825	≥10	≥25	109	≥295 ~ 400 <sup>1)</sup>	78.3
铸件 <sup>[18]</sup>	≥835	≥765	≥5	≥12	-	≥295	-

注:1) 因标准不同规定不一样,其规定范围为 295 ~ 400 kJ/m<sup>2</sup>

从表 1 中可以看到,粉末冶金 Ti-6Al-4V 具有优良的综合性能,全面达到了不低于锻件的水平。由于制备工艺有本质区别,粉末冶金 Ti-6Al-4V 的金

相组织与锻件相比有较大差异,但这种差异对性能没有不利影响,而且其晶粒界面位置上分布的细小的等轴  $\alpha$  相有利于提高材料的强度和塑性。由此可见,

粉末冶金 Ti-6Al-4V 的金相组织对应着良好的综合性能。

### 3 结论

(1)粉末冶金 Ti-6Al-4V 金相组织主要由条片  $\alpha$  相+相间  $\beta$  相组成,有细小的等轴  $\alpha$  相分布在晶粒界面处,包裹着条片  $\alpha$  相。

(2)在粉末冶金预合金粉工艺中,通过粉末颗粒形变在界面处局部产生较大应变,通过再结晶在颗粒界面附近生成大量等轴  $\alpha$  相,同时粉末颗粒表面氧化膜破裂,在高温下分解、扩散,粉末颗粒原始界面消除,在这两方面共同作用下,粉末冶金 Ti-6Al-4V 形成了独特的组织特征。

(3)粉末冶金 Ti-6Al-4V 的金相组织对应着良好的综合性能,全面达到了不低于锻件的水平。

### 参考文献

[1] Eylon D, Froes F H, Parsons L D. Titanium PM components for advanced aerospace applications [J]. Met. Powder Rep., 1983, 38(10): 567-571

[2] Froes F H. Prealloyed titanium powder metallurgy-barriers to use [J]. Int. J. Powder Metall., 1987, 23(4): 267-269

[3] Froes F H, Hebeisen J. Emerging and future applications for HIPing of titanium based materials [C]//Li Chenggong, Chen Hongxia, Ma Fukang. Hot Isostatic Pressing Conference Proceedings, HIP'99. Beijing: International Academic Publishers, 1999: 1-24

[4] 王亮,史鸿培,郎泽保. 高性能粉末钛合金及钛基复合结构材料构件制备技术研究[C]//中国航天第十三专业信息网 2003 年度学术会议文集,2003:230-235

[5] Anoshkin N F. General results of HIP development and new arising problems [C]//Miyamoto Y, Buekenhout L, Fujikawa T. Proceedings of International Conference on Hot Isostatic Pressing, HIP'02. Moscow: JSC "All-Russia Institute of Light Alloy" (VILS), 2003: 7-14

[6] Rachuk V S, Goncharov N S, Martynenko Y A, et al. Design, development, and history of the oxygen/hydrogen engine RD-0120 [R]. AIAA 95-2540

[7] Froes F H, Eylon D. Developments in titanium powder metallurgy [J]. J. Met., 1980(4): 47-54

[8] Sheinker A A, Chananic G R, Bohlen J W. Evaluation and application of prealloyed titanium P/M parts for airframe structures [J]. Int. J. Powder Metall., 1987, 23(3): 171-179

[9] Demchenkov G G. Progress trend titanium granules metallurgy-A perspective technology for manufacture of super-sophisticated aerospace components [J]. Titan, 2003, 13(2): 35-41

[10] Guichard D, Raisson G, Pieronner M. Cost effective production of Ti alloy net-shape parts by the isoprec powder metallurgy process [C]//Miyamoto Y, Buekenhout L, Fujikawa T. Proceedings of International Conference on Hot Isostatic Pressing, HIP'02. Moscow: JSC "All-Russia Institute of Light Alloy" (VILS), 2003: 103-107

[11] Valjukhov S G, Scopov J V, Azarov A F, et al. Development of complex-shaped impellers with small flow sections made from titanium alloy powders by HIP [C]//Miyamoto Y, Buekenhout L, Fujikawa T. Proceedings of International Conference on Hot Isostatic Pressing, HIP'02. Moscow: JSC "All-Russia Institute of Light Alloy" (VILS), 2003: 108-110

[12] 曾汉民. 高技术新材料要览[M]. 北京:中国科学技术出版社,1993:119-123

[13] 王亮,史鸿培. 高性能钛合金粉末冶金技术研究[J]. 宇航材料工艺,2003,33(3):42-44

[14] Wang Liang, Lang Zebao, Shi Hongpei. Properties and forming process of prealloyed powder metallurgy Ti-6Al-4V [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2007, 17: s639-s643

[15] 王亮,郎泽保,史鸿培. TC4 粉末钛合金的应用技术研究[C]//2007 全国粉末冶金学术及应用技术会议及海峡两岸粉末冶金技术研讨会论文集,2007: 22-27

[16] 谭树松. 有色金属材料学[M]. 北京:冶金工业出版社,1993:77

[17] 吴引江,兰涛,周廉,等. Ti-5Al-2.5Sn 粉末颗粒界面在热等静压过程中的变化[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(5): 336-339

[18] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册,第 4 卷. 钛合金 铜合金[M]. 北京:中国标准出版社, 2002:108-195

(编辑 李洪泉)