

## 复杂钛合金进气道热等静压近净成形技术研究\*

张海洋, 史金靓, 张绪虎, 阴中炜, 邓太庆, 许秀芝

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

**摘要:** 冲压发动机进气道是一种复杂异形薄壁钛合金构件, 成形难度非常大。以TA15钛合金粉末为原材料, 利用热等静压近净成形技术在国内首次研制成功进气道, 实现了整体结构的一次成形, 并成功通过飞行考核。从进气道本体取样, 测试了不同位置的组织。结果表明: 热等静压TA15钛合金不同位置组织均匀性好, 主要以板条状或片层状 $\alpha$ 相为主。在粉末颗粒边界大应变带周围分布着等轴 $\alpha$ 相, 相间分布少量的细小 $\beta$ 相。测试了材料各项性能, 其平均室温抗拉强度、屈服强度、伸长率、断面收缩率、500℃抗拉强度、断裂韧性和冲击韧性分别为995MPa, 924MPa, 18.2%, 43%, 673MPa,  $90.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 和 $51.4\text{J}/\text{cm}^2$ , 各项性能数据均达到了GJB2744A-2007中规定的TA15钛合金锻件的水平, 综合性能良好。

**关键词:** 冲压发动机; 进气道; 钛合金; 薄壁结构; 成形技术; 力学性能; 热等静压

中图分类号: TG146.23 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 08-200967-07

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200967

## Near-Net-Shaping Hot Isostatic Pressing of Complicated Titanium Alloy Air Inlet

ZHANG Hai-yang, SHI Jin-liang, ZHANG Xu-hu, YIN Zhong-wei, DENG Tai-qing, XU Xiu-zhi

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

**Abstract:** The air inlet of the ramjet is a complex shaped thin-walled titanium alloy component, which is very difficult to form. Using TA15 titanium alloy powder as the raw material, the air inlet was successfully developed for the first time in China by using near-net-shaping hot isostatic pressing technology. The overall structure was formed once, and the flight test was successfully passed. Samples were taken from the inlet body and microstructure at different locations were observed. The results show that the microstructure of TA15 titanium alloy is uniform at different positions, mainly lath-like or lamellar  $\alpha$ -phase. Equivalent  $\alpha$ -phase is distributed around the large strain zone of powder grain boundary, and a small amount of  $\beta$  is distributed between phases. The various properties of the material were tested. The average room temperature tensile strength, yield strength, elongation, reduction of area, 500℃ tensile strength, fracture toughness and impact toughness were 995MPa, 924MPa, 18.2%, 43%, 673MPa,  $90.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  and  $51.4\text{J}/\text{cm}^2$ . All performance data have reached the level of the TA15 titanium alloy forgings standard, which show excellent comprehensive performance.

**Key words:** Ramjet engine; Air inlet; Titanium alloy; Thin-walled structures; Forming techniques; Mechanical performance; Hot isostatic pressing

\* 收稿日期: 2020-12-04; 修订日期: 2021-06-03。

通讯作者: 张海洋, 硕士, 高级工程师, 研究领域为热等静压钛合金近净成形技术。

引用格式: 张海洋, 史金靓, 张绪虎, 等. 复杂钛合金进气道热等静压近净成形技术研究[J]. 推进技术, 2022, 43(8): 200967. (ZHANG Hai-yang, SHI Jin-liang, ZHANG Xu-hu, et al. Near-Net-Shaping Hot Isostatic Pressing of Complicated Titanium Alloy Air Inlet[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8):200967.)

# 1 引言

冲压发动机利用高速迎面气流进入发动机后减速使空气增压,它结构简单、重量轻,适合高速飞行,是目前高超声速武器动力系统的研究热点<sup>[1-2]</sup>。进气道作为冲压发动机的进气装置,是该型发动机的关键核心构件,材料一般选用钛合金<sup>[3-4]</sup>,其流道部分是异形曲面,而且附属结构非常多,为了控制重量,壁厚也非常薄,因此进气道是一种复杂异形薄壁钛合金构件,成形难度非常大。目前国内进气道的制造工艺类型非常多样,但都是多种工艺组合叠加的形式,包括分段铸造+焊接、超塑成形+铸造+焊接或者3D打印+铸造+焊接等,所有的组合成形方式最后均是需要通过焊接来实现整体成形,也都存在生产周期长、可靠性低、重量控制难度大、尺寸精度较低等问题。

热等静压(HIP)近净成形技术是近几十年来发展起来的新型成形技术,该技术以热等静压设备为基础,通过将粉末加热到一定温度,在高温高压下实现粉末材料致密和成形。该技术和铸造技术类似,首先是根据产品结构设计的模具(行业内称之为包套),包套通过各种方式装配后形成类似产品形状的空腔,将粉末装入空腔中,氩弧焊接后形成一个密闭空间,通过预留的除气管将密闭空间抽真空,达到一定真空度后封焊,然后进行热等静压处理,粉末在高温高压下经历粒子重排、塑性变形和扩散蠕变后达到完全致密,实现了构件成形,最后采用机加和化学方式将包套去除,即可得到热等静压构件,工序流程如图1所示。

与传统的铸、锻等技术相比,高性能钛合金热等静压近净成形技术有如下优点:(1)材料性能高,可

全面达到不低于锻件的水平;(2)具有较强的成形能力,易于制备形状复杂的产品,可制备出大型、整体、复杂形状构件;(3)高性能粉末钛合金材料可实现全致密,无气孔、缩孔等内部缺陷;(4)组织均匀细致,无织构、偏析,残余应力小,尺寸稳定性好;(5)易于实现多种功能钛基复合材料构件的制备<sup>[5-6]</sup>。

由于技术自身具备的显著特点,热等静压技术从诞生伊始就受到了广泛关注,并且很早就开始了钛合金材料的工艺研究。早在20世纪70年代,美国Crucible公司和Grumman公司利用粉末冶金陶瓷模技术研制了大量的飞机、导弹用钛合金复杂构件,如F101压气机短轴、F14A短舱骨架、F107巡航导弹发动机离心叶轮、隐形轰炸机复杂骨架、航空发动机支架等<sup>[7]</sup>。同期,俄罗斯轻合金研究院(VILS)也开展了利用粉末钛合金HIP近净成形技术生产飞机和火箭发动机部件的相关研究,最先研制出具有复杂流道结构的粉末钛合金氢泵涡轮,并在RD-0120等型氢氧发动机上得到了应用<sup>[8]</sup>。

目前,美国、俄罗斯、法国和英国等国家都在该技术领域投入了巨大的财力和人力。美国Synertech PM公司生产大量的钛合金结构件,包括火箭发动机、压缩机、飞机机架以及油气开发和电力系统部件,多数产品已大批量市场化。法国的Vinci公司利用该技术制备了阿里安火箭的上面级火箭发动机的氢泵叶轮,在减少了该叶轮的零件个数和降低了生产成本的同时,又增加了材料的服役性能。英国的罗-罗发动机公司与伯明翰大学联合,通过计算机仿真模拟与HIP近净成形技术相结合制备了钛合金航空发动机机匣,材料利用率超过90%。借助于计算机模拟技术系统研究粉末的收缩变形,并结合长期的实践积累,欧美发达国家突破了形变控制和性能优化等关键技术,使钛合金热等静压近净成形技术在近几十年来得到了长足的发展,在航空航天领域已经实现了一定规模的工程化应用,并逐步扩大到其它行业<sup>[9-11]</sup>。

中国从20世纪70年代开始了热等静压设备和技术的研究,但钛合金热等静压近净成形技术的研究起步于20世纪90年代,主要研究单位包括航天材料与工艺研究所、中科院金属所、华中科技大学以及北京航空材料研究院等科研院所。航天材料及工艺研究所从20世纪90年代开展该技术的研,是中国最早的研究单位之一,经过近30年的持续努力,航天材料及工艺研究所已经掌握了生产钛合金热等静压近净成形复杂构件的能力,研制了空气舵、导弹壳体

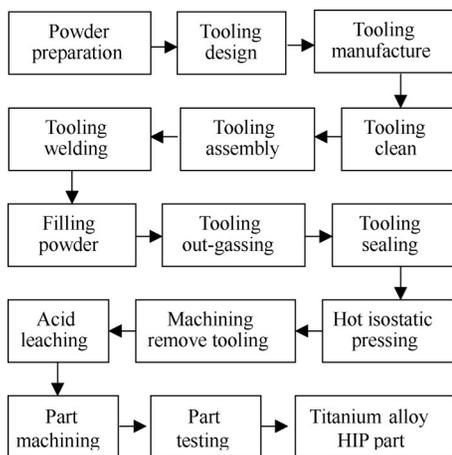


Fig. 1 HIP process flow chart

等多个类型典型产品,并在多个航空航天型号中得到了应用,占据了国内80%以上的市场<sup>[5-6,12]</sup>。

高性能的热等静压近净成形技术将锻造与铸造两种传统成形方式的优点结合在一起,在制造复杂结构关键件、重要件及大型钛合金构件方面有突出的优势,可以制备高性能、低成本、近净形、无缺陷的产品,提高构件可靠性,且工艺过程简单、制造周期短、加工量小、节省材料,产品组织均匀、残余应力小、尺寸稳定性好<sup>[12]</sup>。本研究以TA15钛合金粉末为原材料,以冲压发动机进气道为目标件,利用热等静压近净成形技术成形了进气道,并分析了整体成形进气道构件的精度、微观组织和各项力学性能,验证了技术的可行性和先进性,为以进气道为代表的复杂薄壁钛合金成形提供了新的技术途径。

## 2 实验

### 2.1 TA15钛合金粉末

实验采用西安欧中材料科技有限公司提供的等离子旋转电极法制备的TA15钛合金球形粉末,形貌如图2所示。粉末的球形度非常高,片状、条状、哑铃形的不规则颗粒的比例不超过3%,粉末粒度分布在45~250 $\mu\text{m}$ ,振实密度接近64%,粉末化学成分如表1所示。

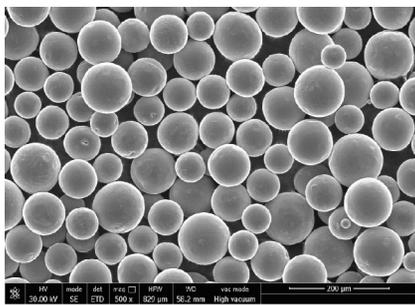


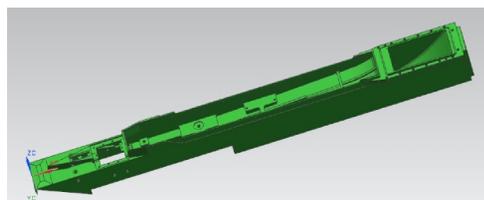
Fig. 2 Morphology of TA15 titanium alloy powders

Table 1 Chemical composition of alloy powder

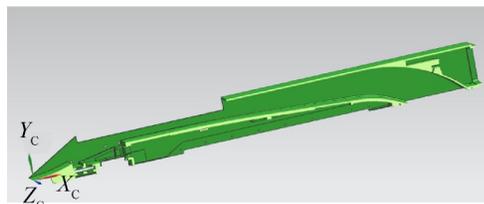
Al	V	Mo	Zr	Si	Fe
6.16	2.06	1.56	1.97	0.015	0.05
C	N	H	O	Ti	
0.004	0.013	0.0013	0.13	Bal.	

### 2.2 热等静压工艺

进气道结构如图3所示,最突出的特点是大长径比和异形薄壁,构件总长超过1m,截面轮廓尺寸约为100mm×100mm,内流道面为异形曲面结构,为了实现减重,除部分安装座和过渡位置外,其余主体位置的厚度均为2mm。



(a) Overall structure



(b) Sectional structure

Fig. 3 Air inlet structure

针对进气道的结构,设计热等静压近净成形包套,材料选用低碳钢,将加工好的包套组件先进行预装配,然后采用手工氩弧焊的方式将包套组件组合连接,包套焊接完成后从预留的装粉孔充填TA15钛合金粉末,通过机械振动和敲击振实粉末。装粉完成后,通过预留的除气管对进气道包套进行高温除气,除气温度为650 $^{\circ}\text{C}$ ,真空度要求小于 $5 \times 10^{-3}\text{Pa}$ ,除气完成后封焊除气管。对封焊完成后的进气道包套进行热等静压,热等静压工艺参数为温度920 $^{\circ}\text{C}$ ,压力140MPa,保温保压时间3h。设备采用Quintus公司的大尺寸热等静压机,有效炉腔尺寸为 $\Phi 1046\text{mm} \times 2500\text{mm}$ 。

### 2.3 实验方法

热等静压后采用机加工和电化学腐蚀的方法去除进气道钢包套,得到进气道构件,如图4所示,图中左侧为进气道进口端,右侧为进气道出口端,以进气道进口端最左侧上平面为基准面,分别在距基准面10mm,500mm和1000mm处取金相试样,然后进行镶样、打磨和抛光处理,最后用Kroll试剂(Kroll试剂为2%vol HF,10%vol HNO<sub>3</sub>,其余为水)腐蚀约20s。利用LEICA DM4000M金相显微镜观察微观组织,利用JSM-7900F热场发射扫描电子显微镜配Hikari xp探头进行电子背散射衍射(Electron back-scattered diffraction, EBSD)测试。

采用相同处理工艺压制进气道随炉试样,加工成尺寸为 $\Phi 300 \times 500\text{mm}$ 的钛棒。不规定取样位置,从中取样加工成拉伸试样、断裂韧性试样和冲击韧性试样,按照GB/T228标准进行室温和高温拉伸测试,试验设备为MTS的CMT5105万能试验机。按照GB/T4161标准进行断裂韧性测试,试验设备为Zwick的



Fig. 4 Powder air inlet

RKP450 数字式摆锤冲击试验机。按照 GB/T229 标准进行冲击韧性测试,试验设备为 Zwick 的 HFP5100 高频疲劳试验机,最后利用 JSM-7900F 热场发射扫描电子显微镜观察拉伸断口形貌和微观组织。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 进气道构件尺寸精度分析

图 4 所示的进气道是国内首次采用该工艺形成的复杂异形薄壁进气道,除安装边和安装座留有部分加工余量外,内流道直接成形,后续不再加工,最终产品顺利通过飞行考核。

进气道对流道面的精度要求最高,采用三坐标测量机对剖切件的上、下流道面进行尺寸测量,内流道轮廓实测尺寸和设计尺寸偏差如图 5 所示,尺寸精度达到了  $\pm 0.3\text{mm}$ ,相比其他组合工艺有明显提升,组合工艺由于最终都是通过焊接实现最终成形,流道精度很难控制,该进气道最初方案是采用分段铸造+超塑成形+焊接方式成形,其最终流道的尺寸偏差均在 1.2mm 以上,且数据离散型非常大。热等静压钛合金构件尺寸精度高的原因主要有以下三个方面:(1)热等静压成形过程不存在固液相变,始终是固态变化过程。(2)虽然粉末振实密度约为 64%,意味着粉末在热等静压过程中有 36% 的收缩空间,但由于进气道流道位置的厚度均为 2mm,成形过程中的实际变形量非常小且可控。(3)包套设计过程中,成形流道用的包套芯模采用的是实芯碳钢,变形量小且维持形状能力强,而且设计时考虑了热等静压过程中不同线膨胀系数带来的尺寸差异,进一步提高了流道的尺寸精度。

#### 3.2 进气道微观组织分析

从进气道本体的上、中、下三个位置分别取样观察微观组织,如图 6 所示。三个位置 TA15 钛合金微观组织状态基本一致,都是由大多数白色相和相间的灰色相组成,采用 EDS 对白色相和灰色相进行成分分析,发现白色相 Al 元素含量更高,Mo 和 V 元素含量更低,而且 TA15 钛合金是近  $\alpha$  型钛合金,因此可以

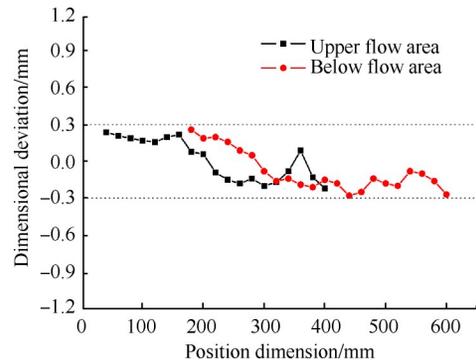
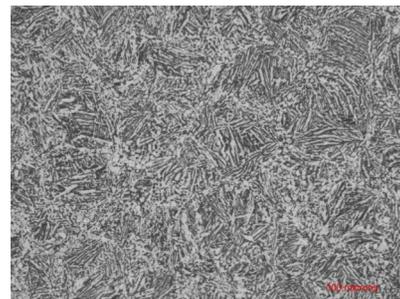
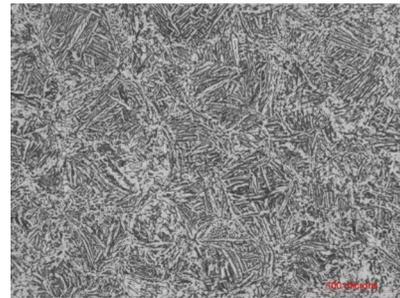


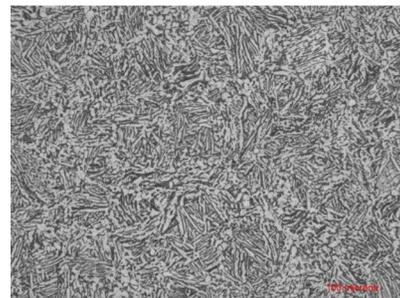
Fig. 5 Dimensional deviation of the flow area



(a) Top



(b) Middle



(c) Bottom

Fig. 6 Metallographic structure

判定白色相为  $\alpha$  相,灰色相为  $\beta$  相。从整体组织形貌看,粉末 TA15 钛合金以板条状、片层状  $\alpha$  相为主,在粉末颗粒边界周围分布着少量等轴  $\alpha$  相,细小  $\beta$  相组织在相间分布,比例很低。热等静压 TA15 钛合金组织形貌区别于传统的四种钛合金组织形貌,介于网篮组织和双态组织之间,具有自己独特的特点,可以将其称之为类网篮状组织。组织的形成必然和成形

过程密切相关,在热等静压之前,粉末颗粒间紧密堆积,相互间处于点接触状态,颗粒中不存在应力和应变。热等静压过程中,温度、压力逐渐上升,粉末颗粒间的接触点在温度、压力的作用下相互挤压变形,颗粒间接触面积逐渐变大,接触区域附近的形变越来越大,导致在颗粒边界处发生晶格畸变,产生较为集中的、较大的应变能,形成边界大应变带<sup>[13-14]</sup>。大应变带发生再结晶,形成一定量的等轴 $\alpha$ 。颗粒内部应变较小,再结晶的情况少,组织主要是板条状、片层状 $\alpha$ 相,原始粉末颗粒采用超高速的等离子旋转电极方法制备,冷却速度非常快,内部组织为非平衡的针状 $\alpha'$ 马氏体相,由于热等静压温度为 $920^{\circ}\text{C}$ ,处于 $\alpha+\beta$ 区的中部,比TA15钛合金的相变点温度低近 $70^{\circ}\text{C}$ ,因此 $\alpha'$ 马氏体相直接分解转化为 $\alpha$ 相,细小的 $\beta$ 相则沿晶界析出,在热等静压随炉冷却过程中,细小的 $\alpha$ 相逐渐粗化,转变为板条状、片层状 $\alpha$ 相<sup>[15-19]</sup>。

通过EBSD观察三个不同位置的组织状态,不同位置的晶粒取向分布如图7所示。从图中可以看出,不同位置的晶粒取向随机分布,无任何方向性,这也就是热等静压工艺制备的粉末钛合金材料各向同性的原因。上、中、下三个位置的晶粒尺寸分别为 $12.5$ 、 $12.1$ 和 $11.6\mu\text{m}$ ,由此可见热等静压TA15钛合金晶粒尺寸细小,且不同位置的晶粒尺寸偏差很小,组织均匀性好<sup>[20-22]</sup>。组织均匀性好的原因主要是热等静压提供给包套的是各向同性静水压力和均匀温度场,不考虑包套厚度对压力和温度的屏蔽作用<sup>[23]</sup>,每个位置的粉末颗粒受到的温度和压力是相同的,因此塑性变形和扩散蠕变状态也基本相同,最终的组织形态也基本一致。

### 3.3 材料拉伸性能分析

拉伸性能测试结果如表2所示。

从表中可以看出,热等静压TA15钛合金材料室温下的平均抗拉强度 $R_m$ 和屈服强度 $R_{p0.2}$ 分别为 $995\text{MPa}$ 和 $924\text{MPa}$ ,同时平均伸长率 $A$ 和平均断面收缩率 $Z$ 也分别达到了 $18.2\%$ 和 $43\%$ 。在 $500^{\circ}\text{C}$ 下,平均抗拉强度也达到了 $673\text{MPa}$ ,超过锻件指标要求最低值 $38\text{MPa}$ 。热等静压钛合金材料力学性能的数据全面达到了《航空用钛及钛合金锻件规范》(GJB2744A-2007)里规定的TA15钛合金锻件指标,而且数据的离散性非常小,性能非常稳定,再一次印证了热等静压钛合金材料的各向同性。

利用SEM观察室温拉伸试样的断口,1#拉伸试样的形貌如图8(a),(b)所示,断口总体较灰暗,存

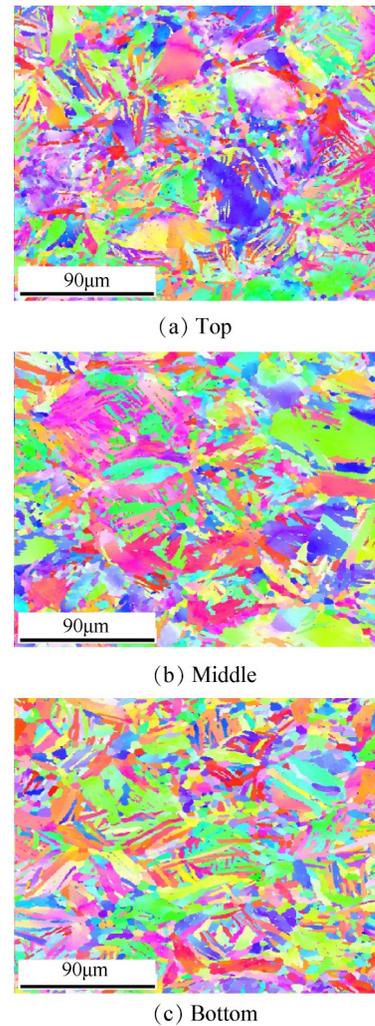


Fig. 7 Electron back-scattered diffraction

Table 2 Tensile property of material

Category	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
Room temperature	926	995	17.0	37
	921	994	19.0	46
	925	996	18.5	46
Forging standard	$\geq 855$	930~1130	$\geq 10$	$\geq 25$
$500^{\circ}\text{C}$	548	674	19.0	56
	549	667	17.0	41
	552	679	23.0	65
Forging standard	-	$\geq 635$	-	-

在明显缩颈,是典型的杯锥状断口,在断口的显微图像上可观察到大量韧窝,且边缘处有剪切唇,可以看出材料的韧性非常好,这和材料的拉伸性能结果一致<sup>[23-24]</sup>。

### 3.4 材料综合性能分析

从进气道热等静压随炉试样中取样,加工测试其断裂韧性、冲击韧性,测试结果见图9,热等静压TA15钛合金平均断裂韧性为 $90.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,平均冲击

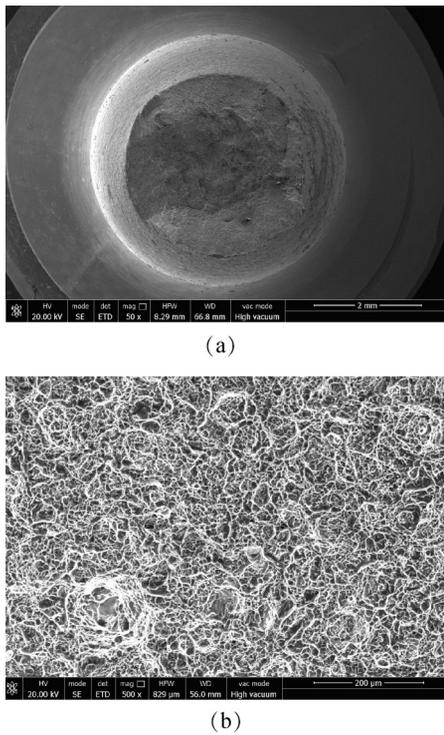


Fig. 8 Appearance of fracture

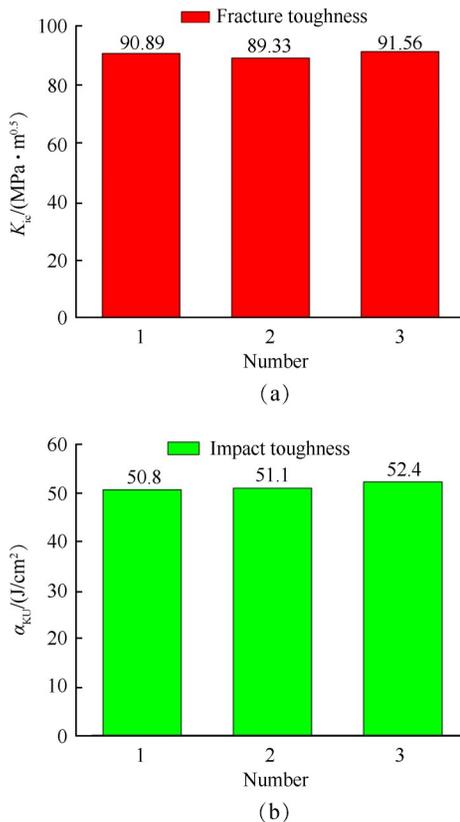


Fig. 9 Fracture toughness and impact toughness

韧性为 51.4J/cm<sup>2</sup>。断裂韧性反应材料抵抗裂纹扩展断裂的能力,冲击韧性反应材料对外来冲击载荷的抵抗能力,对比TA15钛合金锻件相应的性能,粉末TA15钛合金材料的断裂韧性和冲击韧性均和锻件相

当,综合性能优越。粉末TA15钛合金制备的进气道构件之所以有如此良好的综合性能,主要有两个原因:一是因为该工艺具有自身特点决定的组织,类网篮状的组织相当于在网篮组织之间添加了等轴 $\alpha$ 相,网篮状组织增加了相界面,使材料的变形抗力增大,有利于提高材料的强度。等轴 $\alpha$ 相又具备较好的抗裂纹萌生能力,有利于钛合金塑性和冲击韧性的提高;二是因为HIP后的粉末钛合金材料通过超声和X射线检测发现无偏析、气孔、缩孔、夹杂等内部缺陷,高的材料纯净度也显著提高了断裂和冲击韧性。

#### 4 结论

本文对热等静压近净成形技术制造冲压发动机整体进气道进行了研究,可以得到以下一些结论:

(1)利用热等静压近净成形技术在国内首次整体成形了复杂薄壁进气道,提高了进气道构件的流道尺寸精度和可靠性,同时为未来更高性能的进气道构件研制奠定了技术基础。

(2)进气道本体取样观察组织,粉末TA15钛合金组织为类网篮状组织,以板条状、片层状 $\alpha$ 相为主,在粉末颗粒边界周围分布着等轴 $\alpha$ 相,微量的细小 $\beta$ 相组织在相间分布,而且不同位置的组织基本一致,组织均匀性好。

(3)TA15钛合金进气道构件的平均室温抗拉强度、屈服强度、伸长率、断面收缩率、500℃抗拉强度分别为995MPa,924MPa,18.2%,43%,673MPa,各项力学性能均达到同牌号国军标锻件标准,断口也是典型的韧性断裂。平均断裂韧性和冲击韧性分别为90.6MPa·m<sup>1/2</sup>和51.4J/cm<sup>2</sup>,综合性能良好。

**致谢:**感谢装备发展部先进材料项目以及中国运载火箭技术研究院工艺改进项目的资助,感谢航天材料及工艺研究所特种金属材料及工艺事业部提供的帮助。

#### 参考文献

[1] 刘兴洲. 中国超燃冲压发动机研究回顾[J]. 推进技术, 2008, 29(4): 385-395. (LIU Xing-zhou. Review of Scramjet Research in China[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(4): 385-395.)

[2] 叶定友. 固体火箭冲压发动机的若干技术问题[J]. 固体火箭技术, 2007(6): 470-473.

[3] 龚 晰, 何保成, 刘志明. 固体火箭冲压发动机发展与流量调节现状[J]. 飞航导弹, 2015(2): 74-78.

[4] 梁 彦, 谌国森, 梁 明. 固体冲压发动机在飞航导弹上的应用及前景展望[J]. 飞航导弹, 2015(6): 81-84.

- [5] 徐磊, 郭瑞鹏, 吴杰, 等. 钛合金粉末热等静压近净成形研究进展[J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1537-1552.
- [6] 刘文彬, 陈伟, 王铁军, 等. 粉末钛合金的热等静压技术研究进展[J]. 粉末冶金工艺, 2018, 28(2): 1-7.
- [7] Loh N L, Sia K Y. An Overview of Hot Isostatic Pressing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 30: 45-54.
- [8] Katukov S A, Garibov G S. Production of P/M Large Size VT25UP Titanium Alloy Disks via the As-HIP Technique and Investigation of Their Quality[C]. *Stockholm: 11th International Conference on Hot Isostatic Pressing*, 2014.
- [9] Baccino R, Moret F, Pellerin F, et al. High Performance and High Complexity Net Shape Parts for Gas Turbines: The ISOPREC Powder Metallurgy Process [J]. *Materials & Design*, 2000, 21(4): 345-352.
- [10] Georgy G Demchenkov. Technological Features of Production Stages of Various Purpose Titanium Alloy Components Using Hot Isostatic Pressing and Powder Metallurgy [C]. *Stockholm: 11th International Conference on Hot Isostatic Pressing*, 2014.
- [11] Atkinson H V, Davies S. Fundamental Aspects of Hot Isostatic Pressing: An Overview [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2000, 31A: 2981-2987.
- [12] 阴中炜, 孙彦波, 张绪虎, 等. 粉末钛合金热等静压近净成形技术及发展现状[J]. 材料导报, 2019, 33(4): 1099-1108.
- [13] 吴言, 薛鹏举, 魏青松, 等. Ti6Al4V合金整体叶盘热等静压近净成形研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(2): 360-364.
- [14] 王亮, 郎泽保, 贾文军, 等. 粉末冶金 Ti-6Al-4V 的组织及形成机理[J]. 宇航材料及工艺, 2012(1): 46-49.
- [15] 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, 2015, 29(5): 336-339.
- [16] Kadiri H E, Wang L, Gulsoy H O, et al. Development of a Ti-Based Alloy: Design and Experiment [J]. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2009, 61: 60-66.
- [17] Yuan W X, Mei J, Samarov V, et al. Computer Modeling and Tooling Design for near Net Shaped Components Using Hot Isostatic Pressing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182: 39-49.
- [18] Kim Y, Song Y B, Lee S H, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Hot Isostatically Pressed Ti-6Al-4V Alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 603: 207-212.
- [19] Kim Y, Young B S, Lee S H, et al. Microstructure and Intermediate-Temperature Mechanical Properties of Powder Metallurgy Ti-6Al-4V Alloy Prepared by the Prealloyed Approach [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 637: 234-241.
- [20] Cai Chao, Song Bo, Xue Peng-ju, et al. A Novel Near  $\alpha$ -Ti Alloy Prepared by Hot Isostatic Pressing: Microstructure Evolution Mechanism and High Temperature Tensile Properties [J]. *Materials and Design*, 2016, 106: 371-379.
- [21] Cai Chao, Song Bo, Xue Peng-ju, et al. Effect of Hot Isostatic Pressing Procedure on Performance of Ti6Al4V: Surface Qualities, Microstructure and Mechanical Properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 686: 55-63.
- [22] 王亮, 吕宏军, 郎泽保, 等. 粉末耐热钛合金组织性能及成形技术[J]. 宇航材料及工艺, 2011(2): 90-94.
- [23] 郎利辉, 王刚, 黄西娜, 等. 包套在铝合金粉末热等静压成形中的屏蔽效应及其对性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 261-270.
- [24] 薛鹏举. Ti6Al4V粉末热等静压近净成形工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

(编辑: 史亚红)