

Ti6Al4V 合金整体叶盘热等静压近净成形研究

吴 言, 薛鹏举, 魏青松, 史玉升

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 本研究结合模具工艺与热等静压方法, 整体近净成形出了复杂叶盘零件, 并对模具变形、成形精度以及组织性能进行系统分析。结果表明, 整体近净成形叶盘相对致密度达到 99.5%。SEM 结果显示: 零件内部为均匀细小的 $\alpha+\beta$ 长条状组织, 无明显孔隙和裂纹; 组织致密, 微观组织出现“分层”现象; 同炉拉伸件抗拉强度可达 920 MPa, 性能优于同规模铸件, 与锻件性能相当; 分析断口微观形貌得出试样为韧性断裂; 该方法成形零件材料利用率高, 工艺成本低, 成形周期较长。本研究为叶盘类零件热等静压近净成形提供了参考依据。

关键词: 热等静压; 近净成形; 叶盘; 模具

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)02-0360-05

整体叶盘是将传统结构的叶片和轮盘设计成整体结构, 可使发动机整体结构简化, 推重比和可靠性明显提高^[1]。目前整体叶盘的制造主要采用五轴数控加工、电解加工、电火花加工、线性摩擦焊接和精密铸造等方法。但这些方法均存在材料利用率低、加工周期长等问题^[2-7]。

热等静压近净成形技术 (near-net-shaping hot isostatic pressing, NNS-HIP) 结合粉末冶金与模具工艺, 利用高温高压复合载荷, 在模具控形作用下, 可在较短时间内将粉末致密化为复杂结构的高性能零件^[8,9]。该方法材料利用率超过 90%, 特别适用于钛基、镍基高温合金等难加工贵重材料, 技术受到国内外航空界的特别关注^[10-12]。在粉末冶金领域, 热等静压最开始用于难成形材料的固结。随着设备技术及计算机技术的发展, 热等静压在近净成形难加工材料复杂零件方面的技术优势和经济优势逐渐显现出来, 成为当今世界工业发达国家竞相研究的热点。

本研究以 Ti6Al4V 合金粉末作为成形材料, 进行热等静压实验, 近净成形致密整体叶盘, 分析零件的成形误差、微观组织以及成本和周期问题, 将为整体叶盘类零件热等静压近净成形提供参考依据。

1 实 验

1.1 钛合金粉末

采用等离子旋转电极法制得 Ti6Al4V 粉末, 形貌

如图 1。粉末呈球形, 外表面光滑, 少量粉末带有行星球。粉末粒径在 60~300 μm 区间, 平均粒径为 200 μm 。理论密度 4.4 g/cm^3 , 熔点 1375~1400 $^\circ\text{C}$ 。含量 (质量分数) Al 为 6.10%, V 为 4.2%, Fe 为 0.12%, C 为 0.01%, O 为 0.08%, N 为 0.01%, H 为 0.002%, 基体为 Ti。

1.2 叶盘零件与模具设计

研究的整体叶盘零件如图 2 所示。沿轮毂周围均匀分布 12 个径向叶片, 叶片延伸到外部环形叶冠, 叶片呈月牙形半封闭结构。

针对叶盘零件的结构特点, 设计 HIP 模具如图 3 所示。在 HIP 过程中, 内外壁发生形变, 致使型腔收缩, 驱动粉末进入叶片控形型芯中, 从而最终得到致密叶盘零件。叶片形状由控形型芯保证, 控形上下盖均有 5 mm 的倒角, 以便于内外壁平缓变形, 避免拉裂。轮毂和叶冠部分预留一定加工余量, 由控形型芯、控形上

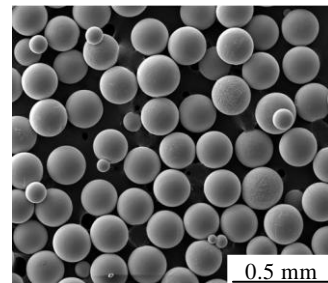


图 1 Ti6Al4V 粉末颗粒 SEM 形貌

Fig.1 SEM image of powder particles of Ti6Al4V

收稿日期: 2014-03-01

基金项目: 国际科技合作项目 (S2010GR0956)

作者简介: 吴 言, 男, 1989 年生, 硕士, 华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074, 电话: 027-87558155, E-mail: 1103297077@qq.com

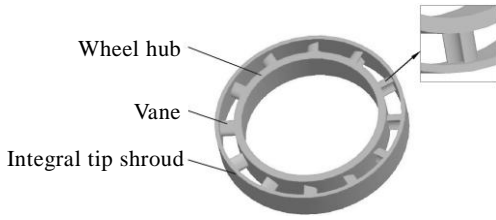
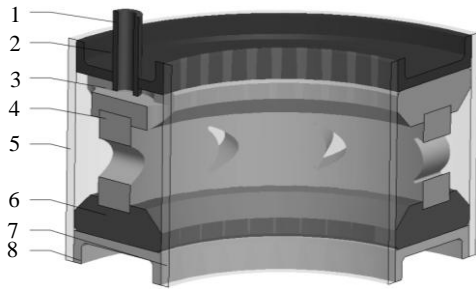


图 2 叶盘三维模型

Fig.2 3D model of the bladed disk



1-Bleeding pipe; 2-Top cover; 3-Top shape-controlled cover;
4-Shape-controlled mold core; 5-External wall; 6-Bottom
shape-controlled cover; 7-Bottom cover; 8-Inner wall

图 3 HIP 模具三维模型

Fig.3 3D model of the HIP mold

下盖以及模具内外壁形成型腔成形,最后去除多余材料即可。控形型芯采用 45 钢,其余结构均采用 SUS304 不锈钢。

1.3 热等静压工艺

考虑模具及 Ti6Al4V 材料的熔点和屈服特性,选用先升温后升压的热等静压工艺^[13]。3 h 升温到 930 °C,再加压到 120 MPa,然后保温保压 3 h,最后随炉冷却,热等静压加载曲线如图 4 所示。

将热等静压模具装配并封焊、充填 Ti6Al4V 合金粉末,粉末振实达 65% 相对致密度。在 600 °C 下保温抽气,直至真空度达 10⁻³ Pa 时封焊抽气管。封焊完毕后采用图 4 所示的热等静压工艺实施试验。试验在 QIH15 热等静压试验机 (ABB, 美国) 上完成。

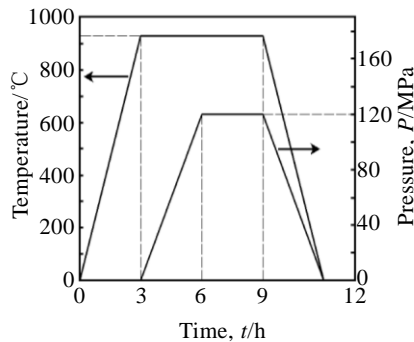


图 4 热等静压加载曲线

Fig.4 HIP loading curves

2 结果与分析

2.1 模具变形分析

如图 5a, 左为 HIP 前的模具, 右为 HIP 后的模具, HIP 后模具内外壁发生明显收缩变形。模具具体尺寸由图 5b(括号内为 HIP 前的尺寸)可知, 内壁直径和外壁直径均有 2 mm 变形; 内外壁之间的型腔宽度发生明显变化, 由初始的 28.00 mm 变形为 20.00 mm, 内壁壁厚变化 0.34 mm; 其它部分尺寸均变化微小。由数据可以看出, 型腔部分尺寸变化较大, 说明粉末流动较充分; 控形部分尺寸变形较小, 控形效果良好。

2.2 零件尺寸精度分析

热等静压后采用机加工与选择性腐蚀结合的方法去除控形模具, 得到最终的叶盘零件 (如图 6a, 1/2 零件)。由排水法测得叶盘零件相对致密度为 99.5%。

对成形叶盘实物进行尺寸测量, 轮毂外径和叶冠内径误差分别为 +0.4 mm 和 -0.2 mm。叶片 3 个主要尺寸 (如图 6b) 与设计尺寸对比关系如图 7 所示。尺寸 1 的误差在 -0.11~ +0.20 mm 间, 尺寸 2 的误差在 -0.11~ +0.12 mm 之间, 尺寸 3 的误差在 -0.11~ +0.09 mm 之间。与设计尺寸相比, 误差较小, 且分布较为均匀。

进一步分析误差原因得出, 热等静压模具加工时存在有一定的加工误差, 再加上热等静压过程中控形模具发生了较小的变形, 在这 2 个因素的作用下, 最终得到的叶盘存在一定的误差。

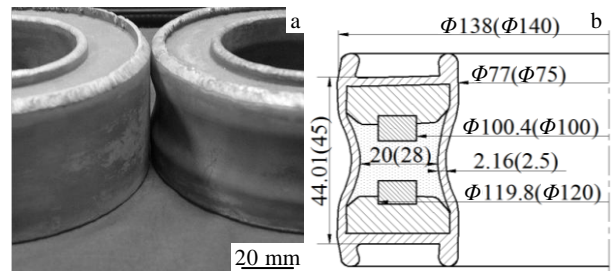


图 5 热等静压前后的模具图及尺寸

Fig.5 Molds before and after HIP (a) and the dimensions (b)

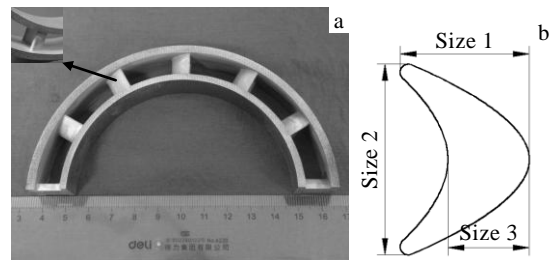


图 6 叶盘零件实物图及叶片主要尺寸

Fig.6 Physical map (a) of bladed disk and main dimensions of vanes (b)

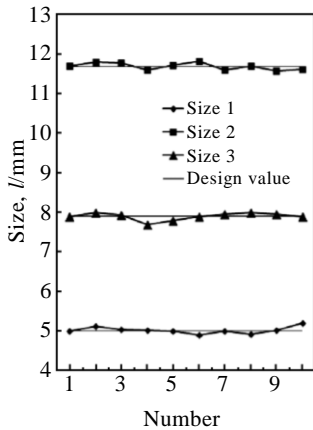


图 7 叶片主要尺寸分布图

Fig.7 Scattergram of the main dimension of the vane

2.3 拉伸特性及断口分析

2.3.1 拉伸性能

对同炉 HIP 试件进行拉伸试验，试验在德国 Zwick/Roell 公司 Z010 型拉伸试验机上进行，拉伸参数为预载 100 N，弹性模量测试速度 2 mm/min，试验速度 2 mm/min。得到以下数据：弹性模量 109 GPa，屈服强度 846 MPa，抗拉伸强度 920 MPa，延伸率 14.3%，断面收缩率 48.9%。

拉伸试验结果显示，该工艺下的 HIP 试件性能优于同规模 TC4 铸件（抗拉伸强度为 890 MPa，屈服极限为 825 MPa），与同规模 TC4 锻件（抗拉伸强度为 930 MPa，屈服极限为 860 MPa）性能相当^[14]。

2.3.2 断裂机理分析

图 8a 为 ESEM 显微镜上看到的断口宏观形貌，拉伸断口与正面成约 45°，表明为剪切断裂，其剪切极限比抗拉强度要小。断口部分总体较灰暗，局部可观察到光亮的脆性断裂的特征。在断口的显微图像上可观察到大量韧窝，这是韧性断裂的标志。图 8a 中 b 处为断裂的策源区。

试样中央处的策源区发现一个大范围的准解离区，从宏观上观察到该区显示出光亮的金属光泽。图 8b 是解离区的 1000 倍显微图像，可以看到一系列平行的小刻面，这是非常明显的解理断裂特征。在策源区发现的这样的大范围解离区表明在裂纹的开始阶段的塑性形变过程受到很大限制，因而以分离的方式顺应外加应力，表现出脆性倾向^[15]。

图 8c 为策源区附近的韧窝形貌，韧窝呈等轴状，大小不均匀，尺寸从 2 μm 到 15 μm 不等，深浅不一。图 8d 为边缘附近的韧窝形貌，边缘处的韧窝明显的比中部

的小而浅，直径在 7~10 μm 之间，且呈等轴状均匀分布。

综上，该断口的断裂形式是以准解理断裂开始，以

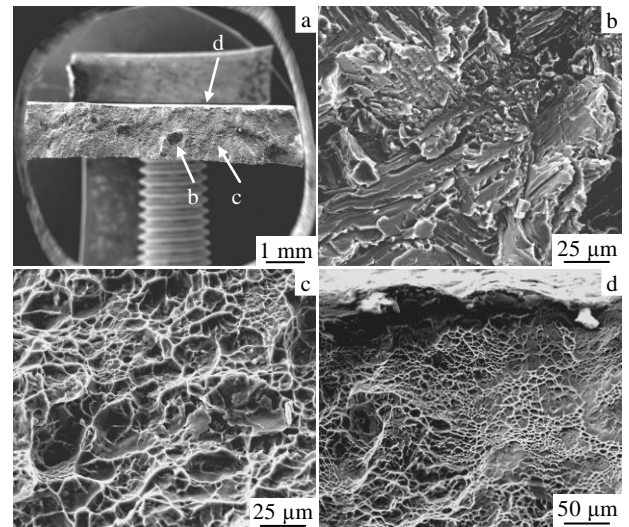


图 8 热等静压 Ti6Al4V 合金断口微观形貌

Fig.8 Fracture morphology of the HIPed Ti6Al4V alloy

韧性断裂为主。当断裂开始的时候，解理区因为杂质或空隙的原因，应力集中，断裂快速开始，造成脆断的形貌；然后断口以韧性断裂发展直至结束。

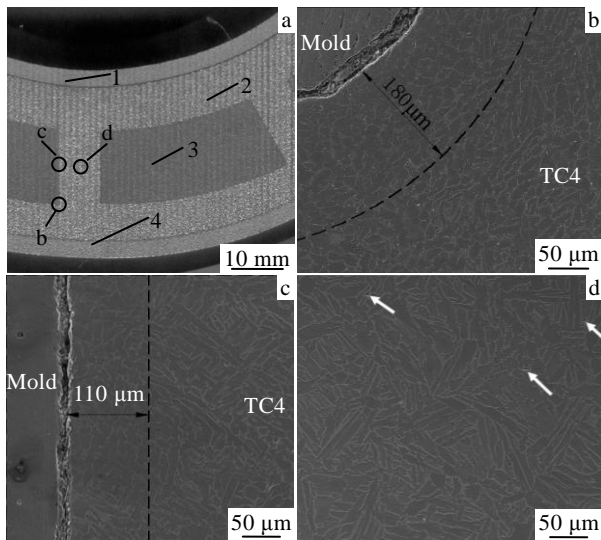
2.4 组织形态分析

2.4.1 边界组织分析

图 9a 为热等静压后模具的部分横截面，图中相邻控形型芯所夹区域为叶片部分横截面。图 9a 中 b 区和 c 区的 SEM 显微组织如图 9b 和图 9c。图 9b 为模具拐角处的组织结构，可以明显看出靠近拐角处组织出现“分层”现象：靠近模具拐角处的组织完全呈球状等轴晶，沿模具均匀分布，厚度大约为 180 μm；远离模具处的组织为均匀的板条状 α+β 相组织；图 9c 为叶片心部组织结构，也出现明显的“分层”：靠近模具处同时混有球状等轴晶组织与板条状 α+β 相组织，厚度大约为 110 μm；远离模具处的组织为均匀的板条状 α+β 相组织。另外，9b 和 9c 两图中，模具与 TC4 合金之间界面出现明显裂缝，原因是模具材料与 TC4 合金的收缩率不同，在热等静压冷却阶段中，两部分收缩量不一致导致在界面处开裂。

上述“分层”现象中产生的原因是，靠近模具表面的粉末与模具之间存在剪切应力，板条组织受剪切应变发生剪切变形，在剪切线上形成位错，由交滑移产生的回复导致相交滑移面上的异号位错相互抵消，剩下的同号位错群沿剪切线形成界面，界面因扩散而迁移，从而减小界面能，最终形成球化等轴晶组织^[16-20]，

而远离模具区域的粉末未受到这种剪切力的作用, 呈均匀板条状组织, 最终造成图 9b 和 9c 中这种“分层”现象。



1- Inner wall; 2- TC4; 3- Shape-controlled mold core; 4- External wall

图9 叶盘横截面 SEM 照片

Fig.9 SEM images of cross section of the bladed disk

造成图 9b 和图 9c 球状等轴晶组织厚度不一致及球化程度不同的原因为模具不同区域的粉末受剪切应力不同; 靠近模具拐角处的钛合金粉末所受的剪切应力明显大于叶片心部的粉末, 变形程度大, α 相转化为等轴组织的程度相应地增大。这是因为剪切应力越大, 被弯曲和切断的板条状 α 组织数量越多, 同时晶内缺陷也越多, 储存在变形合金内的畸变能也越大, 在随后的过程中再结晶容易形核。而剪切应变较小变形程度不足时, 晶内储存的变形能低, 某些部位未达到新晶粒形核所需激活能, 再结晶不易发生, 球化程度小^[21,22]。

2.4.2 叶片组织分析

图 9d 为叶片区域微观组织的 SEM 照片, 图中未见原始颗粒边界, 说明颗粒达到了冶金结合。仔细观察可见微小空洞, 如白色箭头所示。 α 相 (图中暗色) 呈长条状或短粗球状, β 相 (图中亮色) 分布在 α 片间。条状 α 相宽度为 2~8 μm , 长度 30~40 μm , β 相宽度 0.5~3 μm 。

2.5 周期与成本分析

航空航天领域中的一些关键零部件常由镍基合金、钛合金等难加工材料加工而成, 采用常规方法加工和成形, 工艺难度大, 材料浪费多, 制造成本高。

采用热等静压整体近净成形工艺路线如下: 首先

设计并制造出经计算机模拟和优化后的金属模具; 接着, 在其中填装待成形零件的金属粉末并紧实; 然后, 抽真空密封并实施 HIP; 最后, 去除包套, 便可获得致密零件。

该工艺流程短, 只需热等静压一次整体近净成形, 从设计到制造时间间隔较短。材料利用率高, 可以超过 90%, 整个过程几乎不产生任何废料, 大大提高贵重材料的利用率, 从而降低零件的制造成本。鉴于以上特点, 使用钛合金这种贵重且难加工材料成形复杂叶盘零件比较合适。

3 结论

1) 针对涡轮叶盘零件的结构特点, 设计了热等静压近净成形模具。热等静压实物零件致密度为 99.5%。轮毂和叶冠直径尺寸误差 +0.4 和 -0.2 mm, 叶片成形误差在 -0.11~+0.20 mm 以内。

2) 对同炉 HIP 试件进行拉伸试验, 得出抗拉强度 920 MPa, 屈服强度 846 MPa, 性能优于同规模铸件, 与锻件性能相当; 分析断口得出断裂形式是以准解理断裂开始, 以韧性断裂为主。

3) 对热等静压后模具横截面组织进行分析, 微观组织结构显示组织出现“分层”现象。进一步分析原因, 得到粉末受到剪切应力不同, 导致球化程度不同。

4) 热等静压成形叶盘零件的工艺流程短, 材料利用率高, 工艺成本降低, 针对钛合金这种贵重且难加工材料成形复杂叶盘零件比较合适。

参考文献 References

- [1] Wang Zengqiang(王增强). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2007(1): 52
- [2] Ren Junxue(任军学), Zhang Dinghua(张定华), Wang Zengqiang(王增强) et al. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica* (航空学报)[J], 2004, 25(2): 205
- [3] Wang Kaixuan(王凯旋), Zeng Weidong(曾卫东), Zhao Yongqing(赵永庆) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(5): 784
- [4] So B S, Jung Y H, Kurfess T R et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 187(1): 2
- [5] Wang Jianye(王建业), Xu Jiawen(徐家文). *The Principle and Application of Electrochemical Machining*(电加工原理及应用)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 193
- [6] Zhang Xuemin(张雪敏), Cao Fuxiang(曹福洋), Yue Hongyan(岳红彦) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(5): 937

- [7] Xu Jiawen(徐家文) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2003(6): 31
- [8] Zhang Yiwen(张义文), Li Chenggong(李成功), Shi Likai(石力开) *et al. Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2009, 19(4): 32
- [9] Wang Wen-Tsai. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2001(115): 284
- [10] Leyens C, Chen Zhenhu(陈振华). *Titanium and Titanium Alloys*(钛与钛合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 19
- [11] ZhaoYongqing(赵永庆). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2001(1): 33
- [12] Zhang Xiaowei(张晓伟), Liu Hongxi(刘洪喜), Jiang Yehua(蒋业华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(1): 178
- [13] Zhang K, Mei J, Wu X. *Metall Trans A*[J], 2010, 1(4): 1033
- [14] Shima S, Oyane M. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 1976, 18(6): 285
- [15] Yuan W X, Mei J, Samarov V *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 182(1): 39
- [16] Semiatin S L, Thomas J F, Dadras J P *et al. Metall Trans A* [J], 1983, 1(14): 2363
- [17] Shell E B, Semiatin S L. *Metall Trans A*[J], 1999, 30: 3219
- [18] Wang Xuebing(王学滨). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(2): 320
- [19] Stefansson N, Semiatin S L, Eylon D. *Metall Trans A*[J], 2002, 33: 3527
- [20] Yao Zekun(姚泽坤), Shu Hua(苏 华). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 1995(1): 6
- [21] Weiss I, Froes F H, Eylon D. *Metall Trans A*[J], 1986, 17: 1935
- [22] Seshacharyulu T, Medeiros S C, Morgan J T *et al. Scripta Materialia*[J], 1995, 78(8): 2153

Near-Net-Shaping Hot Isostatic Pressing of Ti6Al4V Alloys Monolithic Bladed Disks

Wu Yan, Xue Pengju, Wei Qingsong, Shi Yusheng

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This study combines the mold process with the hot isostatic pressing method, and the complex monolithic bladed disks are formed by near-net-shaping. Based on this, it gives a scientific analysis of the mold deformation, forming precision and structure property. The results show that the near-net-shaped monolithic bladed disks have a relative density of 99.5%. The SEM results indicate that there is fine and homogeneous strip $\alpha+\beta$ phase in the parts, with no obvious pores and cracks. Besides, the structure is compact, and the "layered" phenomenon appears in the microstructure. The tensile strength of parts in the same furnaces can reach 920 MPa, which is better than that of the same size castings, and as same as that of the forgings. The fracture morphology analysis suggests that the sample has a ductile fracture. The HIP method has a high material utilization, which can reduce the process costs, and the molding cycle is longer. This study provides a reference to the near-net-shaping hot isostatic pressing for the bladed disk parts.

Key words: hot isostatic pressing; near net shape; bladed disk; mold

Corresponding author: Wei Qingsong, Associate Professor, State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China, E-mail: wqs_xn@163.com