DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.08.002

飞机用 TC4 钛合金连接箱体复合制造技术研究

王　瑞[1],冯　军[1],李　辉[1],杨　健[1],马健凯[2]
(1.航空工业第一飞机设计研究院,陕西 西安 710089;2.西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

摘　要:以 TC4 钛合金连接箱体为对象,研究了 TC4 锻件与激光立体成形复合制造技术。通过研究激光工艺参数及基体预热温度对锻件与激光立体成形复合制造工艺的影响,确定了增材制造最佳工艺参数;按照设计模型,在锻件基体上用该增材制造最优工艺制备了 TC4 钛合金连接箱体;对零件尺寸、内部缺陷进行了无损检测,评价了力学性能,并对 TC4 钛合金连接箱体进行了承载试验研究。结果表明,当激光功率为 1 500 W,扫描速度为 15 mm/s,基体预热温度为 400 ℃时,增材制造的 TC4 钛合金连接箱体零件满足制造要求,并通过了 100% 承载试验考核。

关键词:TC4 钛合金; 锻件基体; 激光立体成形; 复合制造
中图分类号:TG146.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)08-0656-06

Research on Hybrid Manufacturing Technology of TC4 Titanium Alloy Connecting Box for Aircraft

WANG Rui[1], FENG Jun[1], LI Hui[1], YANG Jian[1], MA Jiankai[2]
(1. First Aircraft Institute of AVIC, Xi'an 710089, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Taking TC4 titanium alloy connecting box as the object, the hybrid manufacturing technology of TC4 forging and laser three-dimensional forming was studied. By studying the influence of laser processing parameters and substrate preheating temperature on the hybrid manufacturing process of forging and laser three-dimensional forming, the optimal processing parameters of material additive manufacturing were determined. According to the design model, the TC4 titanium alloy connecting box was fabricated on the forging matrix by the optimal manufacturing process. The dimensions and internal defects of the parts were tested nondestructive, and the mechanical properties were evaluated. The load bearing test of TC4 titanium alloy connecting box was carried out. The results show that when the laser power is 1 500 W, the scanning speed is 15 mm/s, and the preheating temperature of the matrix is 400 ℃, the TC4 titanium alloy connecting box part manufactured by additive meets the manufacturing requirements, and passes the 100% bearing test.

Key words: TC4 titanium alloy; forging substrate; additive manufacturing; hybrid manufacturing

TC4(Ti-6Al-4V)合金具有良好的综合力学性能,比强度高,耐蚀性好,是钛合金中的热门金属,其优异的性能可以充分发挥设计/制造一体化的技术优势,在航空航天等很多领域皆有广泛应用[1]。激光立体成形技术[2],是采用自动送粉熔覆的方式按照轮廓轨迹逐层堆积材料,形成高致密度的三维实体零件或需进行少量加工的毛坯。

目前,传统的减材制造材料利用率低,并且有很多复杂结构不能实现。增材制造可以设计复杂多变的结构特性,实现不同材料之间的复合制造,但是存在成本高、成型效率低等问题[3]。将两者有效结合起来,用传统加工件做基体,在基体上复合制造增材结构,既节约成本,又提高效率,是近年来突破增材制造和传统加工的一种新型途径。

本文作者以飞机 TC4 钛合金连接箱体这种带局部复杂结构的关键金属构件为典型应用对象,研究在 TC4 锻件传统制造基体上激光立体成形局部复杂/精细结构的复合制造工艺,解决基体、增材及结合区的组织与性能匹配优化性以及复合制造构件结构考核评价等关键技术。

1　TC4 钛合金复合制造工艺参数研究

1.1　工艺参数对钛合金复合制造工艺的影响分析

激光成型工艺参数一般包括激光功率、扫描速率、送粉速率、光斑直径等,激光成型样品的冶金质量是这些因素综合影响的结果[4]。激光功率可以影响基体表面和粉末吸收的能量,扫描速度影响单

收稿日期:2021-04-19
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1106005)
作者简介:王　瑞(1994—)女,陕西西安人,硕士,助理工程师. 主要从事飞机材料设计方面的工作. 电话:02986832882, Email:1872204172@qq.com

位时间粉末进入熔池并与基体结合的效率,送粉率能够在一定程度影响熔覆的效率[5]。

本试验采用退火态 TC4 锻件基体,TC4 粉末利用旋转电极法制备,卫星球数量较少,使用前烘干 TC4 粉末,在 LSF-Ⅶ激光立体成形设备上进行试验件的制备。根据前期的研究工作,选取表 1 工艺参数来进行具体的试样工艺研究。

表 1 复合制造工艺参数

Tab. 1 Hybrid manufacturing process parameters

序号	激光功率/W	扫描速度/mm · s^{-1}	光斑直径/mm	送粉率/g · min^{-1}
1	1 500	15	4.5	12
2	2 500	15	4.5	12
3	2 500	10	4.5	12

增材制造完成后的试样如图 1 所示,对 3 种工艺参数制成的试样分别取结合区位置的组织进行宏观组织观察,其宏观组织形貌如图 2。从图中看出:复合制造 TC4 合金的结合区包含 3 个明显区域,包括增材区、热影响区和基材区,其中热影响区的组织为过渡区域。

图 3 是 3 种工艺参数制成的试样测得热影响区的上部、中部及下部的显微组织形貌,图中亮色部分是 α 相,包括等轴 α 相和片状 α 相。从图中看出,从下向上亮色部分越来越暗,数量越来越少,等轴 α 相越来越少;在热影响区上部、中部及下部,不同工艺参数下从左向右,同一位置高度,等轴 α 相尺寸和片状 α 相宽度均增大。

在试样的热影响区取拉伸试样,拉伸试样中基体区和增材区各占 50%,具体尺寸及取样示意如图 4。

对拉伸试样进行室温拉伸试验,测得的不同试样的应力应变曲线如图 5 所示,具体的力学性能数值如表 2,结果表明,从试样 1 到试样 3,极限抗拉强度和屈服强度不断降低,伸长率增大。试样 1 的极限抗拉强度和屈服强度最高,分别为 953.8 MPa 和 859.74 MPa,试样 3 的伸长率最大。

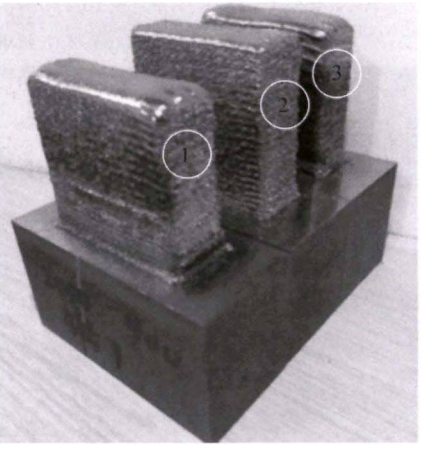
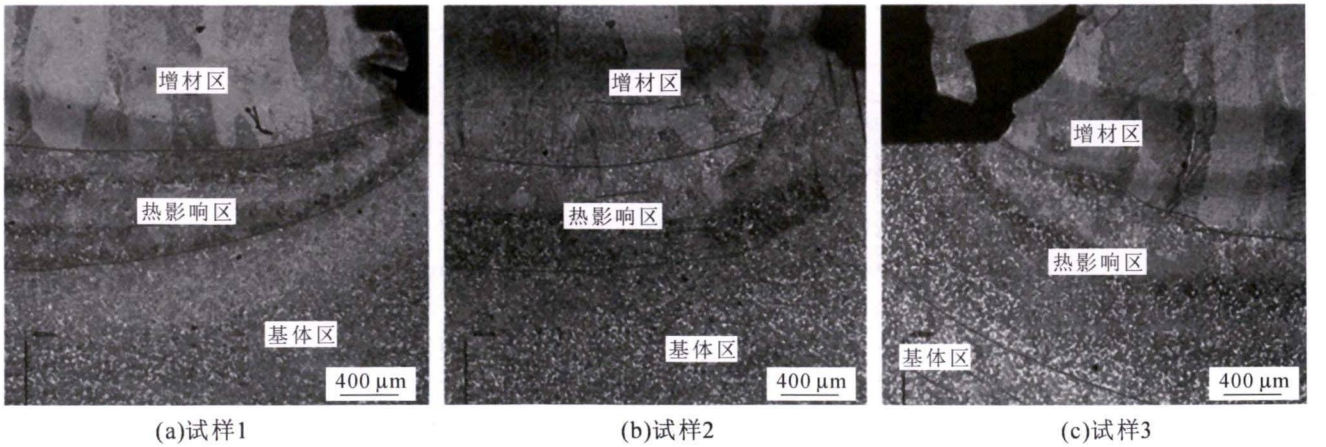


图 1 增材制造完成的试样

Fig. 1 Additively manufactured samples



(a)试样1　　(b)试样2　　(c)试样3

图 2 结合区的宏观组织形貌

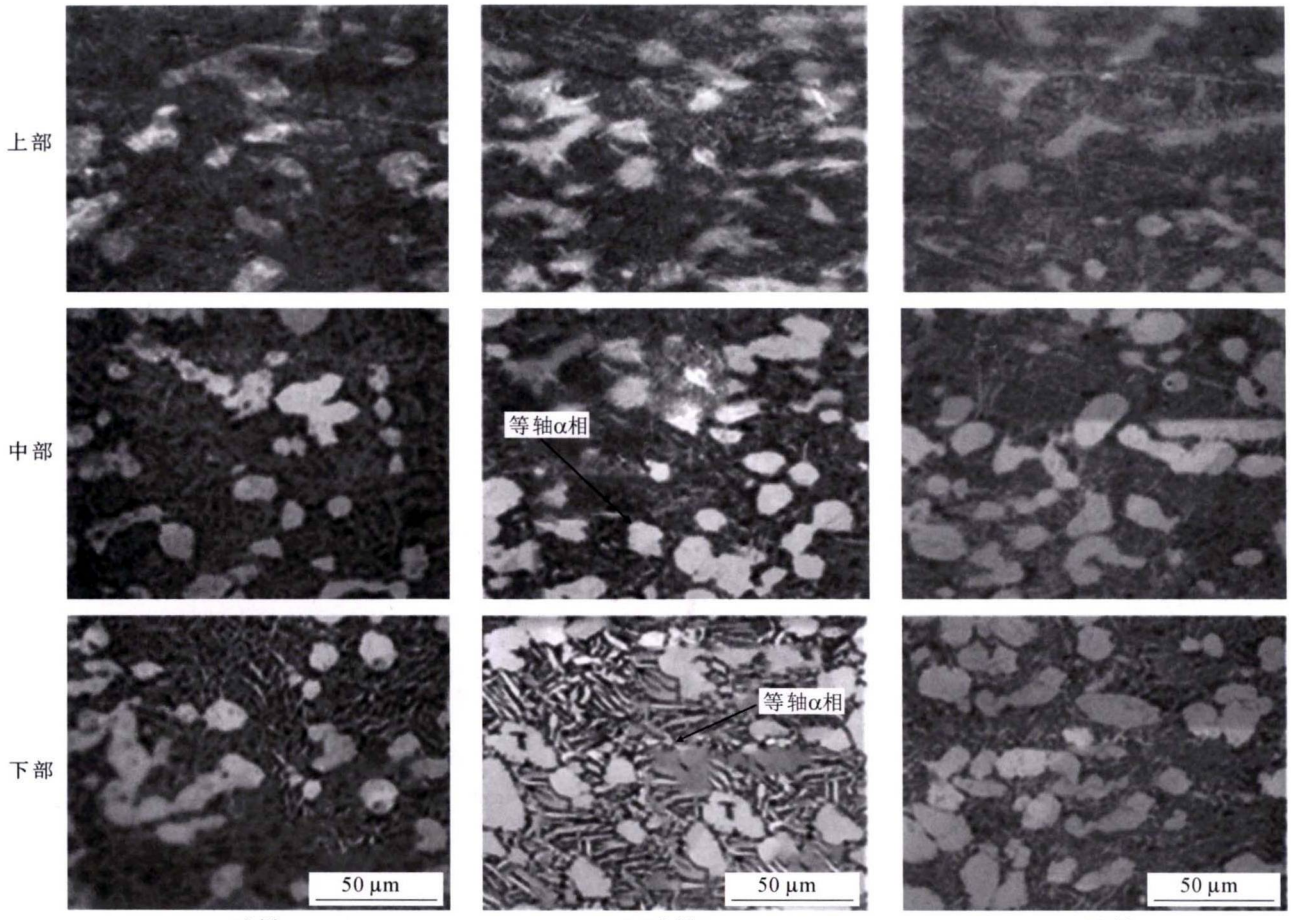
Fig. 2 Macroscopic microstructure morphology of the bonding zone

综合考虑,在试样 1 的工艺参数条件下,等轴 α 相尺寸和片状 α 相宽度均最小,极限抗拉强度和屈服强度最高,所以当激光功率为 1 500 W,扫描速度为 15 mm/s 时的工艺参数,满足要求。

1.2　基材预热对钛合金复合制造工艺的影响分析

激光立体成形过程中会产生大量的热量,与基体的温度差会导致两者结合部分的组织差异,进而影响性能,所以对基体进行预热对复合制造件的最

终性能具有积极的影响。为了研究基体预热温度对TC4合金复合制造工艺的影响，分别设计了对基体未预热（即室温）、预热200 ℃、预热400 ℃ 3个试验，具体的工艺参数如表3。



(a)试样1　(b)试样2　(c)试样3

图3 热影响区微观显微组织形貌

Fig. 3 Microstructure morphology of heat affected zone

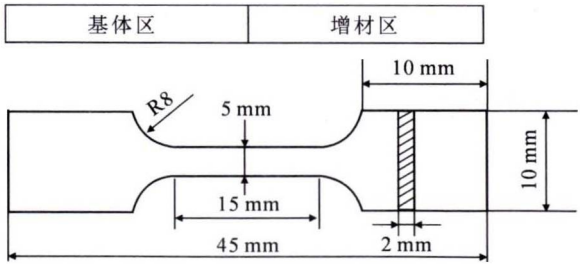


图4 热影响区拉伸试样取样位置及试样尺寸

Fig. 4 Sampling location of tensile specimen and its dimension

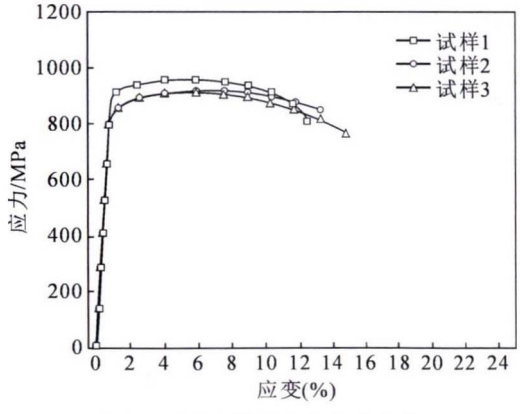


图5 不同试样的应力应变曲线

Fig. 5 Stress strain curves of different specimens

表2 不同工艺参数试样的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of samples with different process parameters

试样	极限抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)
1	953.80 ± 0.4	859.74 ± 3.2	12.50 ± 0.24
2	915.00 ± 8.1	824.23 ± 7.8	14.13 ± 0.45
3	916.86 ± 10.5	814.60 ± 5.5	15.28 ± 2.25

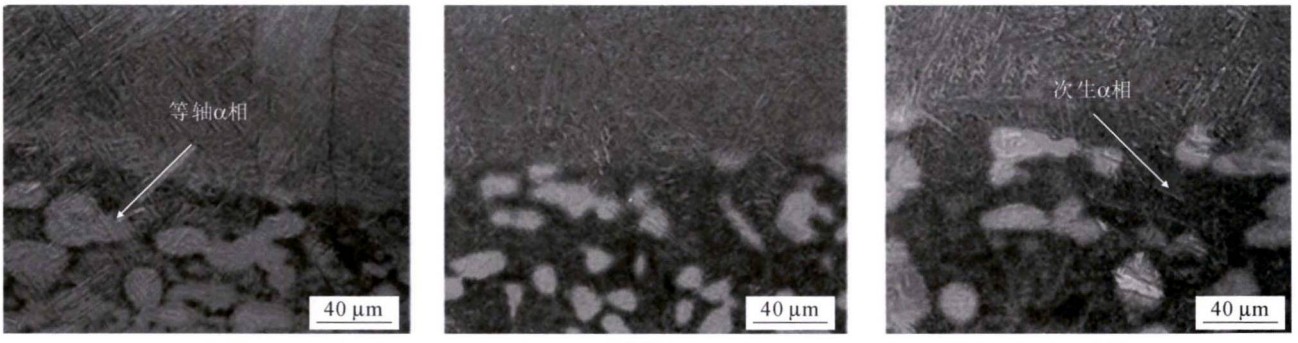
表 3 不同基体预热温度试验工艺参数

Tab. 3 Test process parameters of different substrate preheating temperature

试样编号	预热温度/℃	功率/W	扫描速度/mm · s^{-1}	光斑直径/mm	送粉率/g · min^{-1}
4	未预热	1 250	10	2	12
5	200	1 250	10	2	12
6	400	1 250	10	2	12

图 6 是基体不同预热温度的 TC4 合金复合制造试样的热影响区微观组织形貌图,从图中可以看出,从左向右,等轴 α 相数量在减小,次生 α 相的数量增多。

测得的 TC4 合金复合制造不同预热温度试样的力学性能测量结果如表 4,从表中看出随着基体预热温度的升高,结合区试样的力学性能提高。当试样的基体预热 200 ℃时具有较好的伸长率;随着预热温度的升高,极限抗拉强度和屈服强度提高。当基体预热温度为 400 ℃时,结合区试样的抗拉强度和伸长率为 968 MPa 和 8.7%。



(a)试样4　　(b)试样5　　(c)试样6

图 6 基体不同预热温度下的微观组织形貌

Fig. 6 The microstructure morphology of the substrate at different preheating temperatures

表 4 不同预热温度试样的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of samples at different preheating temperatures

试样预热温度	极限抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)
未预热	948 ± 14	875 ± 21	9.0 ± 1.0
200 ℃	963 ± 12	896 ± 20	11.5 ± 1.3
400 ℃	968 ± 16	924 ± 14	8.7 ± 1.1

2　TC4 钛合金连接箱体制造过程

2.1　连接箱体零件的制造

钛合金连接箱体是由两部分组成的一个整体构件,如图 7,首先通过锻件得到一个基体,再通过增材制造在基体上生成增材体,最终通过补加工和热处理得到一个整体粗坯零件,最后精加工后得到该零件。利用上述研究得到的工艺参数,根据连接箱体结构示意图进行 3D 打印,最后顺利打印完成了 TC4 钛合金连接箱体,得到复合制造加工后的零件如图 8。

2.2　连接箱体的检测

为了保证复合制造零件与设计的尺寸一致性,采用三坐标测量机对复合制造件进行三维尺寸检测,零件尺寸符合试验要求。

2.2.1　超声检测

对 TC4 连接箱体试验件进行超声检测,采用超声纵波直入射水浸聚焦 C 扫描方法和超声纵波直入射接触式扫描方法,具体检测方法如图 9,其中 1 ~ 3 面采用水浸法检测,4 ~ 6 面采用接触法检测。

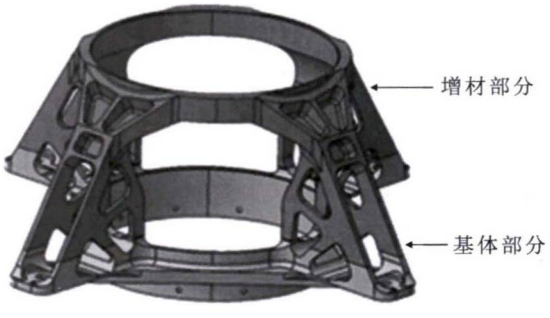


图 7 复合制造的连结箱体结构示意图

Fig. 7 Schematic structure of hybrid manufactured connection box

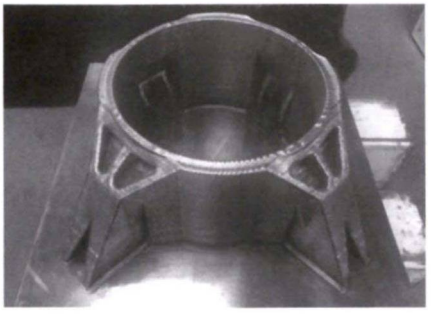


图 8 增材打印的 TC4 连接箱体试验件

Fig. 8 Additive printed TC4 experimental connection box

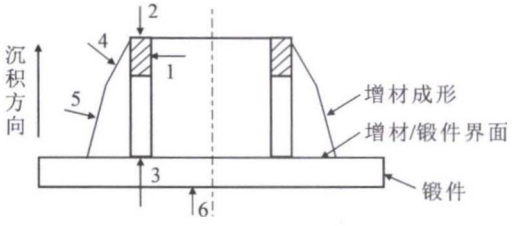


图 9 超声检测示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ultrasonic testing

检验过程制作了专用对比试块，如图 10。试验测得的部分详细检查结果如图 11。

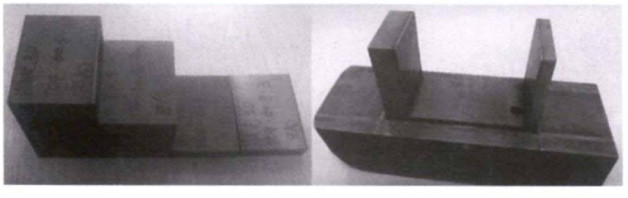


图 10 超声检测专用对比试块

Fig. 10 Special contrast test block for ultrasonic testing

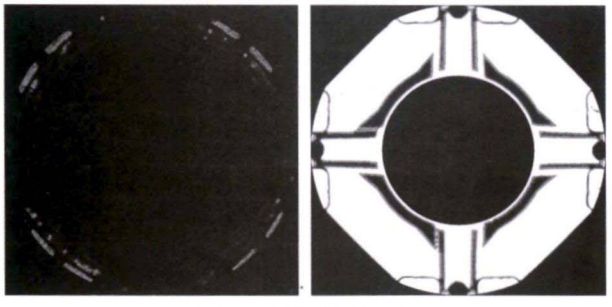


图 11 超声检测结果

Fig. 11 Ultrasonic test results

图中左侧是 2 号面测量结果，灵敏度 ϕ0.8，检测范围 4 ~ 40 mm，右侧是 3 号面测量结果，灵敏度 ϕ0.8 mm，范围 65 ~ 75 mm。检查结果表明该试验件整体满足 GJB1580 AA 级验收要求。

2.2.2 力学性能

对 TC4 锻造增材复合制造零件测量了力学性能，测量结果是：横向的抗拉强度平均值为 964 MPa，竖向的抗拉强度平均值为 950 MPa，都大于合格指标 910 MPa；横向的伸长率平均值是 18.8%，竖向的伸长率平均值是 17.7%，皆大于合格指标 8%；横向的断裂韧性 KQ 平均值是 83.3 MPa · $m^{1/2}$，设计值是 60 MPa · $m^{1/2}$。从以上数据来看，TC4 锻造增材复合制造的主要力学性能均达到了合格要求。

TC4 钛合金连接箱体具体的加工工艺流程如图 12，前期需要先确认设计模型与加工工艺，然后在准备的基体材料上激光立体成形，对加工后的零件进行热处理，最后对零件进行尺寸检测、无损检测和力学性能测量等最终检测，检验合格后零件便可入库。

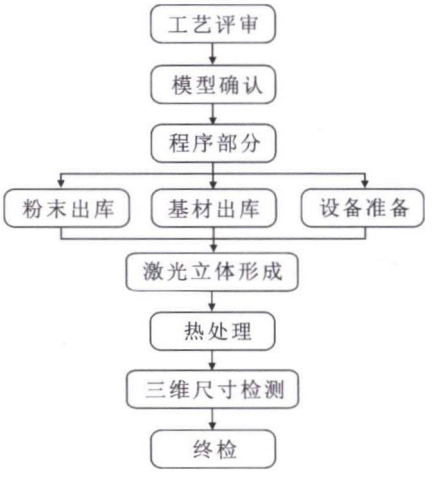


图 12 工艺流程图

Fig. 12 Process flow chart

3 连接箱体承载试验研究

连接箱体承载试验的试验目的是为了验证在锻件基体上进行复合增材制造零件的零件的承载特性，为复合制造技术提供试验支持，为后续结构进行复合制造提供试验依据。

试验共设置 3 个钛合金连接箱体承载特性试验考核项目，包括两个 100% 极限载荷试验项目及一个破坏试验项目，试验载荷按表 5。试验一共包括两件试验件，每件试验件均需要完成工况 1 及工况 2 的极限载荷，再选取一件试验件完成破坏载荷。具体的试验安装及加载方式见图 13 所示。每个试验件上均设置有 104 个单片进行应变监控。

表 5 载荷工况

Tab. 5 Load condition

载荷工况号	F_x/N	F_y/N	F_z/N	M_x/N · mm	M_y/N · mm	M_z/N · mm
1	5.0E4	1.0E4	−8.0E3	0	0	0
2	2.0E4	4.5E4	−1.2E4	0	0	0
3	1.0E5	1.0E5	0	0	0	0

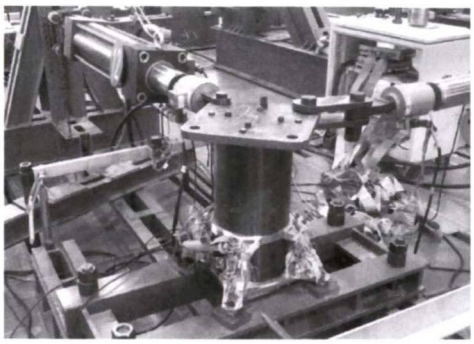


图 13 试验件支持及加载现场

Fig. 13 Test piece support and loading site

试验测量数据显示静力考核工况 1、工况 2 连接箱体结构未进入材料的塑性变形范围,满足设计要求;连接箱体基材、热影响区及增材重点区域应变分布均匀、应变控制合理、无任何突变存在,说明在锻件基础上增材制造精细化结构,基材、热影响区及增材重点考核区域力学性能稳定,无明显的力学性能上的不一致;破坏工况 3,作为探索连接箱体承载极限的试验,在载荷加载到约 67% 时,发现试验件已经屈曲破坏,试验完整的获取了连接箱体的实际承载能力及薄弱位置数据。试验件的合格制造及成功试验充分说明在锻件基体上进行复合增材制造零件无论从设计还是制造上都是合理可行的。

4　结论

(1)TC4 钛合金连接箱体零件的成功制造和承载试验充分说明在锻件基体上进行复合增材制造零件是合理可行的。

(2)通过研究 TC4 钛合金增材复合制造时的工艺参数对复合制造工艺的影响,当激光功率为 1 500 W,扫描速度为 15 mm/s,基体预热温度为 400 ℃时,可以制造出合格零件。

(3)在传统制造锻件上,增材制造局部复杂/精细结构,将激光增材制造技术与传统加工制造技术相结合,不仅保证复合制造综合性能不降低,同时,大大地缩短了制造时间,降低了材料用量,提升了制造效率。

参考文献:

[1]　王金友,葛志明,周彦邦. 航空用钛合金[M]. 上海:上海科学技术出版社,1985.

[2]　黄卫东. 激光立体成形[M]. 西安:西北工业大学出版社,2007.

[3]　曹铭. TC4 钛合金锻件上 LMD 成形复杂结构的界面组织及性能调控[D]. 廊坊:北华航天工业学院,2019.

[4]　张洪宇,何波,楚莎莎,等. 钻基高温合金的激光成型工艺研究能[J]. 热加工工艺,2017(7): 40-44.

[5]　李文涛,朱红钢,耿军儒,等. 航空发动机 TC4 合金风扇叶片在激光熔覆修复工艺研究//第 17 届全国特种加工学术会议[C]. 广州:2017.

2021年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，被20余家数据库收录。中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、实用工艺技术、生产管理经验以及铸造行业发展动态。内容涵盖铸造成型工艺和铸造材料研究，并兼顾其他金属材料成型方法。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、装备技术、特种铸造、实用成型技术、材料改性、应力控制与理化测试技术、今日铸造、企业精英人物专访等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造设备、熔炼设备、环保设备、铸造原辅材料、检测仪器以及铸件生产、热处理设备、科研成果转让等相关信息。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：陕西省西安市碑林区友谊西路127号西北工业大学凝固楼301室

联系人：李巧凤　　电话/传真：13991824906

网址：www.zhuzaojishu.net　　E-mail: zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道