

固体火箭发动机 TC4 构件的 3D 打印制造研究 *

赵 勇^{1,2,3}, 林 峰^{2,3}, 田银俊¹

(1. 中国航天科工动力技术研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010;

2. 清华大学 机械工程系, 北京 100084;

3. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 为了研究 3D 打印制造技术在固体火箭发动机领域的应用可行性, 以某典型铣削制造难加工的固体火箭发动机用金属支撑构件为研究对象, 在制备技术、基础性能、效率对比、结构轻量化、使用性能等方面进行了研究, 获得了 3D 打印制造 TC4 构件的性能数据、数值分析结果及实现工程应用的研究路径。较传统铣削制造工艺, 3D 打印构件不仅可满足工程应用要求, 还可协同结构优化设计, 实现制备效率提升 50%、轻量化结构最大减重 13.6% 及最大拉力达 63.9kN, 为难加工、复杂零件的轻量化高效成型提供了新的途径, 值得进一步深入系统研究。

关键词: 固体火箭发动机; 轻量化; 支撑构件; 3D 打印; TC4

中图分类号: V463 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 12-2209065-09

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2209065

3D Printing Manufacture of TC4 Component of Solid Rocket Motor

ZHAO Yong^{1,2,3}, LIN Feng^{2,3}, TIAN Yin-jun¹

(1. China Aerospace Science and Industry Power Technology Academy, Hohhot 010010, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education of China, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to study the feasibility of the application of 3D printing manufacturing technology on solid rocket motor (SRM), a typical milling to manufacture difficult-to-process metal support components for SRM was studied. The preparation techniques, basic performance, efficiency comparison, structure weight-lightening, use performance and other aspects were studied. The performance data, numerical analysis results and engineering application research path of a TC4 component manufactured by 3D printing were obtained. Compared with the traditional milling manufacturing process, 3D printed components can not only meet the requirements of engineering applications, but also cooperate with structural optimization design, achieving a 50% increase in manufacturing efficiency, a maximum weight reduction of 13.6% and a maximum tension of 63.9kN for lightweight structures. It provides a new way for the lightweight and efficient molding of difficult and complex parts to process, which is worthy of further in-depth systematic research.

Key words: Solid rocket motor; Weight-lighten; Supporting components; 3D printing; TC4

* 收稿日期: 2022-09-22; 修订日期: 2022-11-04。

作者简介: 赵 勇, 博士生, 研究领域为先进制造技术。

通讯作者: 林 峰, 博士, 教授, 研究领域为增材制造、生物制造、重型液压机。

引用格式: 赵 勇, 林 峰, 田银俊. 固体火箭发动机 TC4 构件的 3D 打印制造研究[J]. 推进技术, 2022, 43(12):2209065.
(ZHAO Yong, LIN Feng, TIAN Yin-jun. 3D Printing Manufacture of TC4 Component of Solid Rocket Motor[J].
Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(12):2209065.)

1 引 言

固体火箭发动机(以下简称固体发动机)作为航天运载器的主动力,其重量和体积均占整体运载系统的约 80%,其性能优劣对航天运载器的性能影响很大。高性能的固体发动机要求尽可能轻的自重(不包括推进剂在内的结构质量)和尽可能高的推进剂能量。固体发动机的性能不仅取决于材料的选择(低密度的结构件材料和高能量的推进剂),同时也和制造技术紧密相关。先进制造技术既可以提高制造的精度、效率、节约成本,还可以实现轻质结构的广泛应用。结构轻质化是固体发动机发展的重要方面,当前主要通过选用低密度材料实现,如轻质化复合材料的广泛应用。但受限于结构及服役环境要求,仍有许多零部件以金属材料为主。这些结构复杂且加工精度高的金属件,用传统机械加工方法制备,存在工序复杂、周期长、成本高、材料利用率低等问题,已成为制造高性能固体发动机的瓶颈。

以 3D 打印为代表的增材制造技术迅速发展,其在复杂结构成型、轻质化、低成本高效率、快速成型等方面表现出极大的优势^[1-4],在航空航天领域引起了高度关注^[5-9]。相比于传统的机械加工减材制造技术,3D 打印属于增材制造技术,具有加工效率高、制造时间短、材料利用率高等特点,而且在复杂结构零件一体化成型方面具有独特的优势,可以实现自由制造。基于上述特点,3D 打印技术成为当前解决固体发动机复杂难加工零部件成型的较优技术手段。此外,3D 打印技术在满足零部件成型性能的前提下,还可以对零部件结构进行优化设计,实现轻量化的目的,这为高性能固体发动机的设计、制造带来了全新的发展。

近年来,国内外陆续将 3D 打印技术引入固体发动机研究领域,国外如美国轨道 ATK 公司利用 3D 打印技术制造了某战术火箭发动机喷口及盖板,并完成首个工业演示。美国火箭工艺公司 RCI 用 3D 打印技术制备了满足设计要求的内部几何形状独特的混合火箭发动机管状药柱,并获得相关专利。澳大利亚国防科学与技术组织与多方面合作,探索将 3D 打印技术用于推进剂、火炸药等含能材料的研制和生产领域。国内中国航天科工动力技术研究院与航天动力技术研究院分别开展了 3D 打印固体发动机非金属点火装置壳体、钛合金尾管和收敛段壳体等制备研究工作^[10]。总结国内外固体发动机领域研究现状,现有研究主要集中于 3D 打印工艺成型和基础性

实验考核方面,缺少轻质化设计及型号产品工程化应用的系统研究,而轻量化和可靠性对航天产品至关重要^[11-12],直接影响航天装备的高水平和高质量发展。虽然 3D 打印已在多个行业领域广泛研究和应用,但是将 3D 打印技术引入固体发动机制造并实现工程化应用尚需开展产品设计、制造工艺、实验验证、工程性能考核等多方面的系统研究。

本文选取固体发动机中某典型的结构相对复杂的金属构件为研究对象,采用 3D 打印技术,通过样件制备-试验研究-结构分析-数值模拟-工程验证的研究思路,对 3D 打印制造该构件的系列问题进行研究,以探索 3D 打印技术引入固体发动机工程应用可行的有效途径。

2 3D 打印制造零件 A 的效能考察

2.1 被研究构件的结构及功能介绍

本文所选的研究对象是固体发动机复合材料壳体上的金属支撑构件(下称零件 A),其作用在于解决复合材料结构件连接端无法制备螺纹孔的问题,并增强复合材料结构件抗拉强度、缓冲连接组件间力学性能差异(结构示意图见图 1)。零件 A 为 TC4 材质,在同一产品上成组使用,要满足“质量稳定、连接过渡、应力缓冲、轻质化”等使用要求。

The diagram illustrates the assembly of Part A. A horizontal 'Composite component' is shown at the top, with a vertical 'Metal component' attached below it. 'Part A' is a small, complex metal piece that fits into a slot in the composite component and is secured by a 'Screw' passing through it into the metal component. The diagram uses hatching to differentiate the materials: diagonal lines for the composite and cross-hatching for the metal.

Fig. 1 Schematic of part A

2.2 3D 打印制造零件 A 的实现路径

本文所选零件 A 尺寸较小、结构较复杂,其传统成型工艺为:选用 TC4 钛合金锻料为原材料,原材料取样测试合格后经切割、铣削加工成型及后处理,产品性能测试合格后投入使用。由于零件 A 呈多弧面、多孔的结构特性,产品加工过程要经历多道机加工序,存在切削量大、不便成组加工、生产周期长、加工成本高等问题。加之零件 A 又是使用量较多的构件,传统切削加工制造方式使得零件 A 成为典型的“费工、费时又费钱”的构件,与智能制造、敏捷制造等新要求不相协调。另外,由于切削制造的限制,零件 A

也无法设计成惰性质量更小的轻质化结构。

基于上述问题,考虑批量化快速研制、节约成本、结构轻质化、设计与制造一体化等要求,分析选用已在工程领域研究应用较多的3D打印技术来实现上述目标^[13-15],并通过相关的实验,验证路径的可行性和效能的适宜性。拟定的研究路径见图2。

2.3 3D打印制造零件A

零件A的材质为常用的TC4,实际上目前用3D打印方法制造该类材料的制件在各个行业都有比较广泛的应用^[16],无论是电子束选区熔化(Electron Beam Selective Melting, EBSM)还是选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM),打印该类材料的技术工艺都已相对成熟。用3D打印方法替代传统的切削工艺制造零件A不存在太大技术障碍,参经常用的工艺即可制得,本文不再对具体工艺过程做太多描述,以下所涉及的样件均为SLM方法打印。

2.3.1 粉体选取

在充分调研市售粉体的基础上,结合零件A的设计指标要求,选用粒度为15~53 μm 的球形TC4粉材,通过光学显微镜(Optical Microscope, OM)和扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观测,粉体球形度较好,无空心粉、卫星粉,球径符合正态分布。粉体微观形貌见图3。

2.3.2 零件A及随炉试样制备

按照固体发动机对产品制造生产可靠性的相关要求,零部件力学性能测试试样需在主体材料取样或随炉制备。零件A和随炉试样(空间布局见下图4)采用上述粉体3D打印制备后同时进行真空热处理,零件A采用竖立打印,在圆柱段侧施加网格支撑,打印参数和热处理参数见表1。随炉试样按标准GB/T228-2002(金属材料室温拉伸试验方法)制备。零件A(受限该成型技术工艺特点及精度要求,螺纹

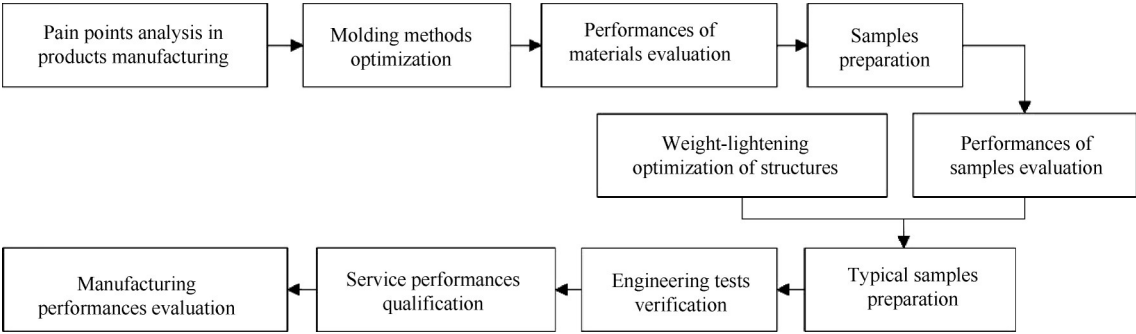


Fig. 2 Technology route for 3D printing manufacture of part A

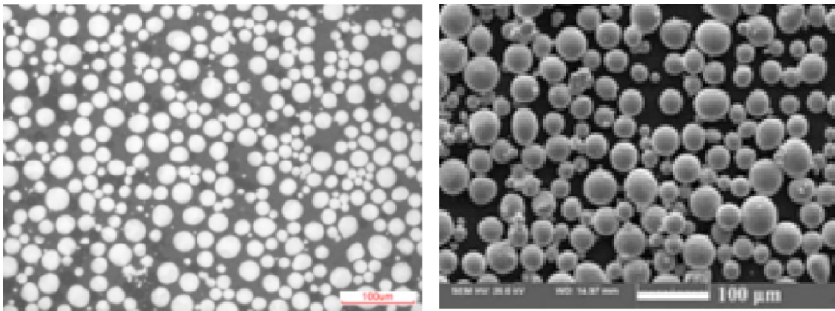


Fig. 3 Micrograph of spherical powder TC4

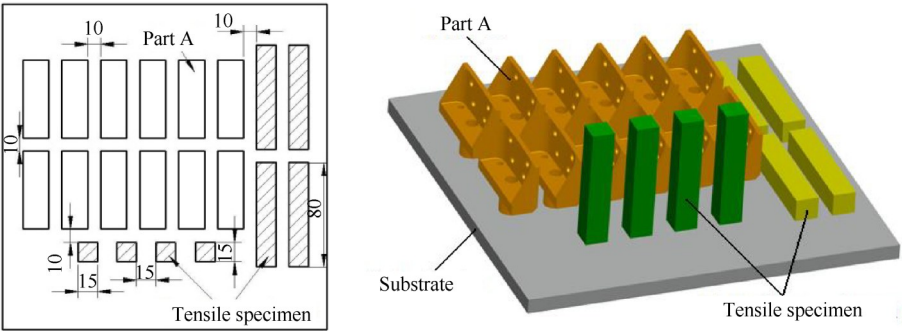


Fig. 4 Space layout of part A and tensile specimens (mm)

Table 1 Parameter of 3D printing and heat treatment		
Type	Name	Value
3D printing	Model	BLT-S310
	Drawing partition	Strip
	Scanning strategy	Zigzag
	Laser power/W	300
	Scanning speed/(mm/s)	1100
	Scanning interval/mm	0.12
	Layer thickness/mm	0.06
Heat treatment	Vacuum/Pa	≤0.05
	Temperature/°C	800
	Soaking time/h	4
	Cooling medium	Ar

孔需机加成型)三维模型及 SLM 法打印成型的产品见图 5 所示。参照设计指标对零件 A 进行测量,尺寸偏差≤0.2mm,表面粗糙度 $Ra=3.2\sim6.4$,位置度良好,表面质量较高,满足设计指标要求。

2.4 3D 打印零件 A 性能测试

工程应用要求零件 A 满足成分组成、材料本体力

学性能、产品综合负载性能的设计指标要求。

2.4.1 化学成分分析测试

3D 打印的零件 A 化学成分测试采用 GB/T 4698-2017(海绵钛、钛及钛合金化学分析方法)进行,测试结果表明 3D 打印零件 A 化学成分符合设计要求。测试结果见表 2。

2.4.2 本体力学性能测试

3D 打印零件 A 本体力学性能以随炉试样性能进行表征,标准为 GB/T228-2002。数据见表 3(H-横向,S-高向),试样拉伸试验前后对比情况见图 6,拉伸曲线见图 7。

由表 3 可见,试样抗拉强度均>895MPa,断裂伸长率均>10%,屈服强度均>825MPa,断面收缩率均>25%,达到 GJB2218A-2018(航空用钛及钛合金棒材和锻坯规范)规定中 TC4 锻件指标。测试结果表明,3D 打印零件 A 室温力学性能达到锻件水平,满足使用要求。

2.4.3 3D 打印零件 A 综合负载性能测试

以传统工艺制备零件 A(下称锻件零件 A)为参

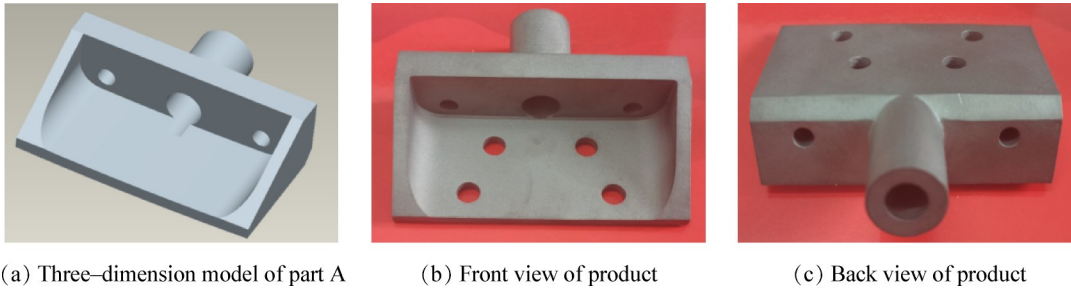


Fig. 5 Appearance of part A manufactured by 3D printing (unweight-lightened)

Table 2 Chemical component		
Chemical component	Standard content/%	Measured content/%
Al	5.5~6.8	6.12
V	3.5~4.5	4.01
H	≤0.015	4.1×10^{-3}
N	≤0.05	9.7×10^{-3}
Fe	≤0.30	0.14
C	≤0.10	8.0×10^{-3}
O	≤0.20	0.14

Table 3 Mechanical properties of samples manufactured by 3D printing					
No.	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation at break/%	Reduction of area/%	Elastic modulus/GPa
Direction H-1	957	870	16.5	60	110
Direction H-2	966	881	16.5	59	111
Direction H-average	961.5	875.5	16.5	59.5	110.5
Direction S-1	966	899	16.5	63	114
Direction S-2	969	902	16	58	115
Direction S-average	967.5	900.5	16.25	60.5	114.5

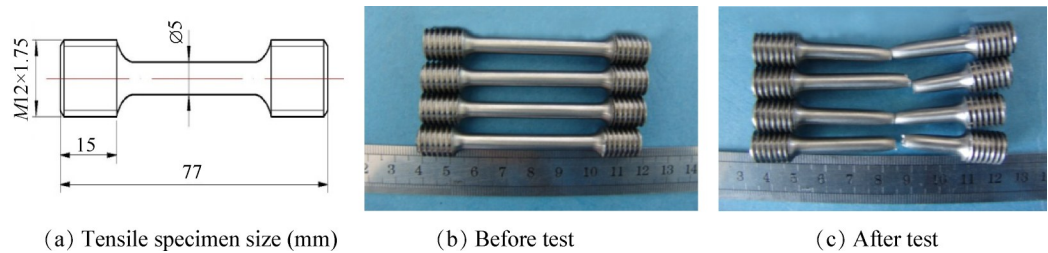


Fig. 6 Comparison pictures of parts manufactured by 3D printing before and after tensile tests

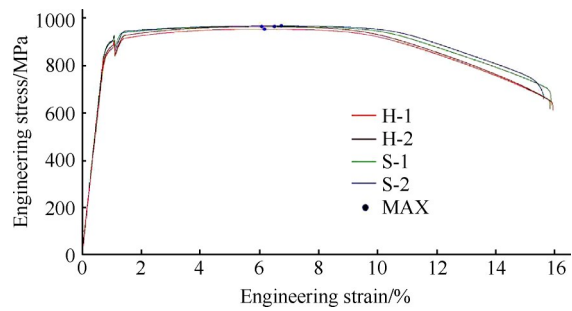


Fig. 7 Tensile performance

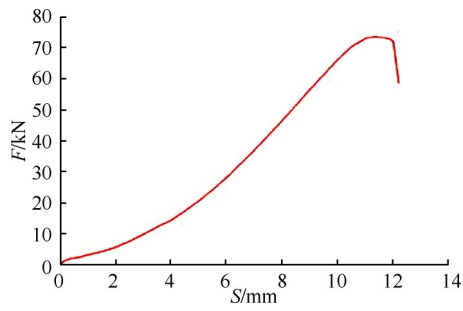


Fig. 9 Curve of tensile test

照物,3D 打印零件 A 的综合负载性能通过对拉试验验证,当拉力施加到 73.51kN(使用载荷的 2.7 倍)时,螺栓断裂,试验终止。试验后,3D 打印零件 A 和锻件零件 A 结构均保持完整。综合尺寸和材料均匀度等指标和性能分析,初步得出 3D 打印零件 A 使用性能具备应用条件。对拉试验样件形貌见图 8 所示,试验曲线见图 9。

综上分析,3D 打印零件 A 通过与锻件零件 A 做对比,综合负载性能、力学性能、化学成分、表观质量均符合设计指标要求,从样件测试角度判定满足应用要求。



3D printing (L) and forging (R)

Fig. 8 Tensile test schematic of part A

2.5 3D 打印和传统切削加工制造零件 A 的效率对比

传统切削加工方法制造零件 A 需经过 5 道工序,除热处理外均为单件加工,平均每件占机时为 3.97h;3D 打印方式需要经过 4 道工序,除螺纹加工为单件处理,其他工序均可成组处理,平均每件占机时为 1.62h。相比传统切削加工方法,采用 3D 打印制备效率提升了 50% 以上。具体情况见表 4。

3 3D 打印零件 A 轻质化研究

3.1 轻质化零件 A 结构设计思路

零件 A 轻质化的主要设计思路(见图 10)为:

- (1)经过基本实验研究,建立基础数据;
- (2)引入点阵结构、拓扑优化、结构整体化等轻质化方式^[17-20],设计关键区域及非关键区域材料减重方案;
- (3)采用数值模拟的方法,分析典型结构承载能力;
- (4)制备典型样件,进行试验研究,测试承载

Table 4 Efficiency comparisons of manufacturing part A by 3D printing and cutting

Traditional process and volume	Laying-off 1 unit	Rough milling 1 unit	Heat treatment 50 units	Finish milling 1 unit	Threading 1 unit	Average operation time per piece
Traditional operation time/h	0.05	1.5	6	2	0.3	3.97
3D process and volume	Group printing 50 units	Post-treating 50 units	Heat treating 50 units	Threading 1 unit	-	Average operation time per piece
3D operation time/h	40	20	6	0.3	-	1.62

能力；

(5)对比分析轻质化结构基础性能、使用性能、力学性能；

(6)总结形成轻质化设计、制备工艺路径。

3.2 轻质化零件 A 三维模型设计及强度分析

3.2.1 零件 A 轻质化构型

基于设计思路及上述试验结果,针对零件 A 结构进行设计空间分析,依据零件外部装配要求及边界条件,确定设计域,进一步考虑零件关键载荷边界条件,归纳形成相应工况。为高效获得零件特定工况下的轻量化结构形式,以最大化刚度为结构优化目标,以结构质量分数为约束,对结构施加对应工况,通过拓扑优化分析求解结构在对应工况下的分布情况。结合 3D 打印制造工艺特点对结构进行重构,设计了中空夹层、拓扑优化薄壁加筋(下称薄壁加筋)、镂空点阵三种典型轻质化结构,三种结构设计三维模型见图 11 所示。

3.2.2 典型轻质化结构承载能力数值模拟分析

以工程中出现的最大载荷 50kN 为载荷条件,基于第 2 节试验所得材料参数,应用 Workbench 19.0 中 Static Structural 计算模块,对未轻质化、中空夹层、薄壁加筋、镂空点阵的零件 A 开展承载能力分析。计算材料采用双线性本构关系,弹性模量取 106GPa,泊松比 0.36,屈服强度 870MPa,切向模量 5.5GPa,材料本构关系如图 12 所示。在零件 A 的螺栓孔内表面施加

50kN 的轴向集中力载荷,固定螺栓孔和端面施加全位移约束边界条件,如图 13 所示。

对各结构零件 A 进行有限元仿真分析,仿真结果见图 14。受力分析结果见表 5。

在相同载荷作用下,四种结构的最大等效应力发生的区域相同,均处于螺栓孔根部。未轻质化结构最大等效应力为 826MPa,没有超过材料的屈服强度,表明该种载荷作用下,结构不会被破坏。中空夹层结构最大等效应力为 894MPa,大于材料的屈服强度,小于抗拉强度,说明在该种载荷作用下,结构的等效应力最大点附近可能出现屈服,但是不会出现破坏。薄壁加筋和镂空点阵两种结构最大等效应力分别为 1021MPa 和 1150MPa,超过材料的抗拉强度。分析可知,等效应力最大截面由外向内方向,螺栓孔壁厚 1/6 处的材料受力超过其抗拉强度,其余部位等效应力值在 600MPa 左右,初步判断在该种载荷作用下,这两种结构出现局部屈服,结构整体不会发生破坏。

3.3 轻质化零件 A 样件制备及使用性能分析

3.3.1 轻质化零件 A 样件制备

基于上述实验数据及数值仿真分析结果,3D 打印成型各轻质化结构零件 A,具体样件形貌见图 15 所示。

3.3.2 三种轻质化结构零件 A 使用性能对比分析

参照航天产品研制生产的质量管控要求,对上述三种轻质化结构零件 A 进行分析,成形表面质量较

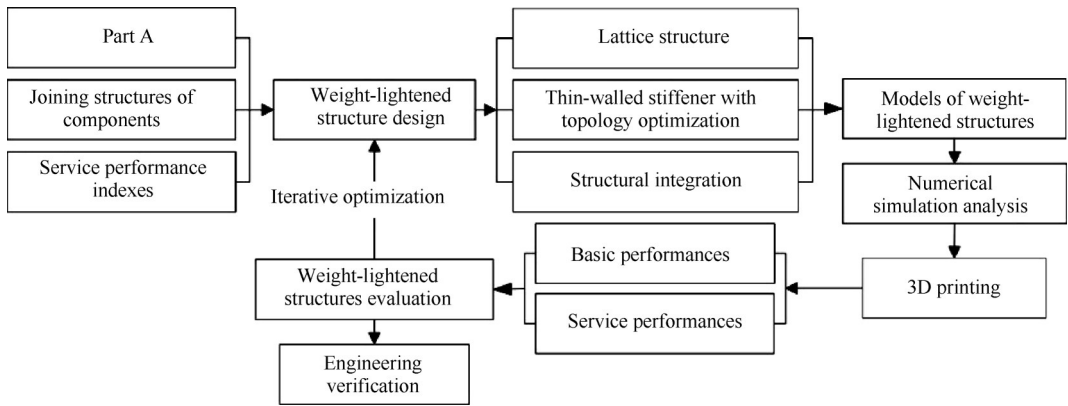


Fig. 10 Weight-lightened structural design of part A

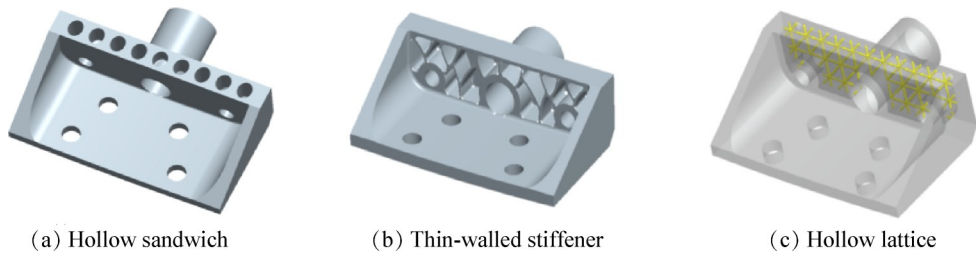


Fig. 11 Three dimension models of the weight-lightened part A

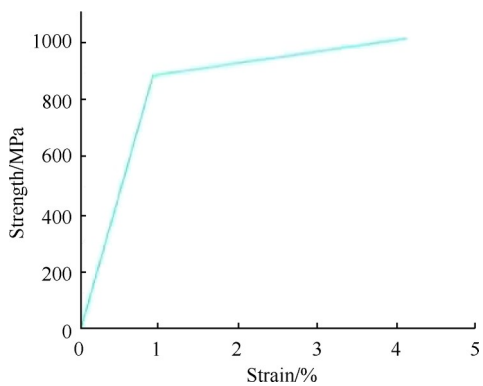


Fig. 12 Constitutive relation of materials

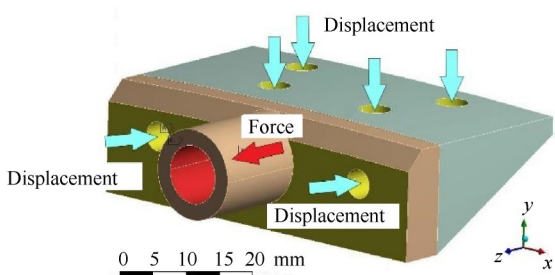


Fig. 13 Load and boundary condition

高,尺寸偏差 $<0.2\text{mm}$,尺寸和位置度均满足设计指标要求。试样随炉制作,同未轻质化 3D 打印零件 A 的试样力学性能测试数据相当,满足设计指标。轻质化减重效果见表 6。从表中可见,三种轻质化结构减重效果最大的为薄壁加筋结构,减重比为 13.60%。

为验证轻质化结构零件 A 的实际使用性能,将三种结构件与壳体连接件进行交叉对拉试验。将 3D 打印轻质化零件 A 分编 4 组,与壳体连接件配装后形成对拉试验样件,样件见图 16 所示。

采用金属拉伸试验机开展对拉试验。试验前后共进行了两次,第一次加载至工程最大使用载荷 (50kN),试验停止,样件外观完整,未出现结构破坏,结果表明四种零件 A 均满足使用要求,也验证了表 5 仿真计算结果的正确性。为进一步探究 3D 打印轻质化零件 A 的极限承载能力,又分别对样件进行第二次对拉试验,试验中保持载荷持续增长,直至试件破坏。各结构最大拉力值与破坏形式见表 7 所示,破坏局部情况见图 17。

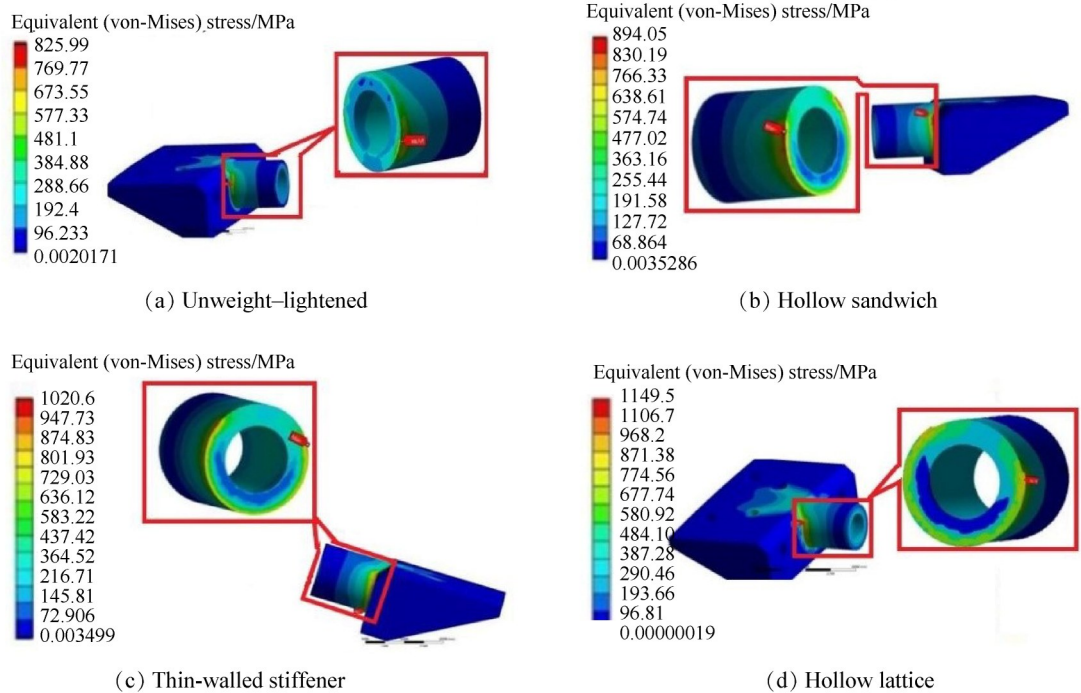


Fig. 14 Equivalent (von-Mises) stress distribution of the weight-lightened part A

Table 5 Maximum stress and strain of part A under load

Structure	Load/kN	Plastic strain/%	Equivalent stress/MPa	Simulation result
Unweight-lightened	50	2.00	826	Structural integrity
Hollow sandwich		3.58	894	
Thin-walled stiffener		4.13	1021	
Hollow lattice		4.32	1150	



Fig. 15 Products of the weight-lightened part A manufactured by 3D printing

Table 6 Comparison of weight reduction of the weight-lightened part A

Weight-lightened structure	Weight/g	Weight reduction ratio/%
Unweight-lightened	61.03	—
Hollow sandwich	56.06	8.14
Thin-walled stiffener	52.73	13.60
Hollow lattice	56.24	7.85

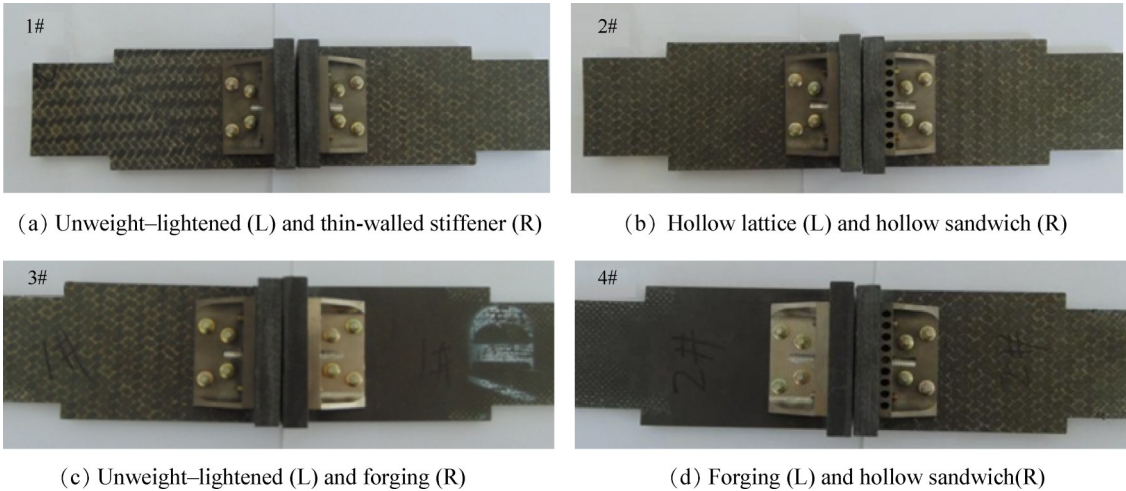


Fig. 16 Samples of tensile test

Table 7 Measuring results of tensile test

No.	Maximum tension load/kN	Fracture behavior
1#	66.05	Part A(thin-walled stiffener)fractured
2#	63.86	Part A(hollow lattice)fractured
3#	73.51	Bolt fractured
4#	71.45	Part A(hollow sandwich)fractured

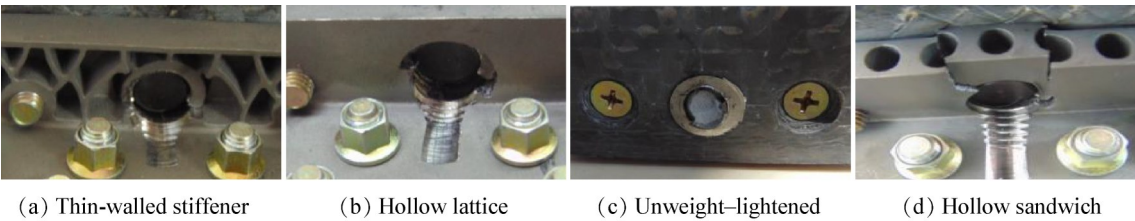


Fig. 17 Structure fracture of part A in tension test

试验后,未轻质化零件 A 本体未发生破坏;中空夹层、薄壁加筋、镂空点阵三个结构破坏位置相似,均在零件 A 本体圆柱端区域附近。由表 7 可知,轻质化零件 A 对拉试验最大拉力均达到 60kN 以上,轻质化零件 A 与锻件零件 A 对拉试验最大拉力均大于 70kN,远大于 50kN(工程使用最大载荷),远高于设计指标($\geq 27\text{kN}$)要求,接近现有锻件产品对拉试验结果(50~70kN)高值端,说明四种 3D 打印零件 A 均具备工程应用的条件。以承载能力为主要依据,兼顾结构质量的原则,对各结构零件 A 的使用性能进行排序:未轻质化(与锻件相当)>中空夹层>薄壁加筋>镂空点阵。

4 结 论

本文采用 3D 打印制造技术,以固体火箭发动机典型难加工金属构件 A 为研究对象,完成了“初样成型-试样研究-结构设计-数值模拟分析-样件成型-性能分析-工程验证”的实践研究,得到如下结论:

(1)3D 打印可实现固体火箭发动机中小型零件 A 精密近净成型,力学性能达到同类锻件水平,使用性能满足工程应用要求。与传统减材成型方式相比,制备效率提升 50% 以上。

(2)3D 打印制造了三种典型轻质化结构件并开展试验研究,其使用性能、尺寸、表观、力学性能均满足当前设计指标要求,可实现引入应用。其中,三种轻质化结构件最高减重 13.6%,对小尺寸零件,减重效果明显。轻质化零件 A 对拉试验最大拉力为 63.9kN,远高于设计指标,满足使用性能要求,可应用于工程实践。

(3)3D 打印制造技术的优势与固体火箭发动机零部件轻质化、复杂结构一体成型及高效批产的发展趋势一致,将其引入必然带来航天产品制造技术的革新发展,成为有效提升高性能固体火箭发动机研发制造能力的重要途径。

参考文献

- [1] 林 鑫,黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(9): 1111-1126.
- [2] 郭 超,张平平,林 峰. 电子束选区熔化增材制造技术研究进展[J]. 工业技术创新, 2017, 4: 6-14.
- [3] 李怀学,巩水利. 金属零件激光增材制造技术的发展

- [J]. 航空制造技术, 2012, 20: 26-31.
- [4] Kumar S. Selective Laser Sintering/Melting[J]. *Comprehensive Materials Process*, 2014(10): 93-134.
- [5] 赵志国,柏林. 激光选区熔化成形技术的发展现状及研究进展[J]. 航空制造技术, 2011, 19: 46-49.
- [6] 杨浩亮,郭凤明. 增材制造技术在我国航天领域的发展与应用需求分析[J]. 航天制造技术, 2016, 10: 1-4.
- [7] 阮崇智. 大型固体火箭发动机研制的关键技术[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(1): 23-28.
- [8] Li Y K, Han J L, Chen X, et al. Numerical Study of the Internal Flow Field of a Dual Pulse Solid Rocket Motor Including Conjugate Heat Transfer[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 231(8).
- [9] 唐雁宇. 3D 打印技术在航空航天领域应用浅析[J]. 中国设备工程, 2016(11): 123-126.
- [10] 何 君,李 颖,杨 玲,等. 3D 打印技术在固体火箭发动机上的应用进展研究[C]. 洛阳: 中国航天第三专业信息网第三十九届技术交流会暨第三届空天动力联合会议, 2018.
- [11] Blakey M B, Gradl P, Snedden G, et al. Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A Review[J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 110008.
- [12] 汉斯·爱瑞克森. 以高性能低成本 EBM 技术服务航空航天领域[J]. 航空制造技术, 2008(7): 49-50.
- [13] 张希平,苏建强,高 健. 3D 打印技术及我国的发展现状[J]. 信息技术与标准化, 2015(6): 17-21.
- [14] 郭继周,邓启文. 我国 3D 打印技术发展现状及环境分析[J]. 国防科技, 2015, 36(3): 35-39.
- [15] 张 驰,赵 航,孙晓红,等. 航天耐高温钛合金零件 3D 打印质量优化研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(3): 88-91.
- [16] 曾 光,韩志宇,梁书锦,等. 金属零件 3D 打印技术的应用研究[J]. 中国材料进展, 2014(6): 376-382.
- [17] Bendsoe M P, Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1998, 71: 197-224.
- [18] Guest J K. Topology Optimization with Multiple Phase Projection[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2009, 199(1): 123-135.
- [19] Guo X, Zhang W, Zhong W. Explicit Feature Control in Structural Topology Optimization via Level Set Method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2014, 272(2): 354-378.
- [20] 蒋在卓. 面向增材制造的拓扑优化方法研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.

(编辑:白 鹭)