

基于激光选区熔化的航空发动机 喷嘴减重设计及制造技术研究*

杜宝瑞,姚俊,郑会龙,于浩,林宏杰,丁若晨

(中国科学院工程热物理研究所,北京 100190)

[摘要] 航空发动机喷嘴是影响燃烧性能的关键部件,其组件众多、结构复杂,尤其内部流道加工困难,导致制造周期长、成本高。然而,作为非主承力件的喷嘴非常适用于激光选区熔化制造技术(SLM),这得益于激光选区熔化加工精度高,自由成形能力强,材料组织致密度高。基于 SLM 可实现自由制造的技术优势,首先对喷嘴的壳体组件进行了一体化设计,并进行了受力分析和拓扑优化,然后采用 SLM 打印了成形件,经过测量,可获得 13.5% 的轻量化效果,打印误差小于 0.2mm,满足局部精加工的余量要求,随炉试件力学性能达到传统铸锻件水平。SLM 简化了喷嘴的加工工序,缩短了制造周期,流道成形精度高,达到了减轻重量和改善性能的目的。

关键词:增材制造;激光选区熔化;拓扑优化;喷嘴;点阵结构

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.11.014



杜宝瑞

研究员,“万人计划”科技创新领军人才,研究领域为复杂金属结构件增材制造技术、航空数字化制造与智能制造技术。

高温合金高压涡轮预旋喷嘴组件是影响发动机性能的微小、复杂、精密结构件之一。喷嘴研制生产中存在着制造一致性差(变形控制难、尺寸精度低)、加工效率低、检测能力弱、产品合格率低、生产成本控制难等问题,成为喷嘴研制生产的掣肘与壁障,更严重制约着发动机工作性能和安全稳定。然而,作为非主承力件的喷嘴非常适用于激光选区熔化制造技术(SLM),这得益于 SLM 加工精度高,自由成形能力强,材料组织致密度高^[1-3]。同时,基于 SLM 可实现自由制造的技术优势,可对喷嘴进行一体化设计和拓扑优化设计,从而减轻重量,提高工作性能。美国 GE 公司已将激光增材制造技术用于制造 10 万个以上的燃油喷嘴,并装配到新一代 CFM Leap 发动机上,20 多个喷嘴零件变成了一个,重量减轻了 25%,新的设计引入了复杂的内部冷

却通道及支撑条使喷嘴的使用寿命或者耐用性增加了 4 倍,有助于燃料燃烧和排放减少 15%^[4]。

此外,GE 公司还在最新研制的 GE9X 发动机上采用了增材制造技术生产的 T25 传感器外壳、热交换器、第五和第六级透平低压叶片等部件。英国 Rolls-Royce 公司采用 3D 打印技术制造出 Trent XWB-97 航空发动机用钛合金前轴承机匣,该机匣尺寸为 $\phi 1500\text{mm} \times 500\text{mm}$,含有 48 个翼面,是目前航空发动机上最大的 3D 打印部件,可节省 30% 的制造时间^[5]。德国 MTU 公司是首家采用 3D 打印技术生产镍基高温合金管道镜轴套的公司,该管道镜轴套已经应用于 PW 公司的新型 PW1100G-JM 发动机的低压涡轮部分,并装配于空客 A320neo 飞机上^[6]。国内的北京航空航天大学、西北工业大学、华中科技大学、清华大学、中国

* 基金项目:中国科学院工程热物理研究所创新引导基金(Y85401BZ11)。

航空制造技术研究院等研究机构都开展了广泛的增材制造技术研究,目前在飞机座椅支座、腹鳍接头、起落架、翼肋构件等飞机零部件上都达到了装机应用的程度,但在航空发动机上的实际应用还鲜有报道^[7-10]。

本文基于 SLM 可实现自由制造的技术优势,首先对喷嘴的壳体组件进行了一体化设计,并进行了受力分析和拓扑优化,然后针对优化的模型研究 SLM 打印工艺,采用优化的工艺支撑和打印参数,最终实现含有内部流道和外部点阵结构的喷嘴壳体一体化成形。经过优化设计和 SLM 成形的喷嘴壳体简化了装配和焊接等加工工序,缩短了制造周期,流道成形精度高,达到了减轻重量和改善性能的目的。

基于 SLM 技术的再设计

1 喷嘴一体化设计

喷嘴结构复杂,由 20 多个零件组装而成,内部流道复杂(图 1(a)),原有工艺需要喷嘴杆处钻削深孔,然后将薄壁细长管插入深孔并与喷嘴壳体钎焊焊接(图 1(b))。喷嘴材质为 GH4169,深孔钻削困难,钎焊焊缝在壳体内部,焊接加工难度大,缺陷检测困难,成品率低。基于 SLM 技术可实现自由制造的技术优势,可对含有内部流道的喷嘴壳体进行一体化结构设计(图 1(c)),然后一体化加工成形,大大降低了制造难度,免去了钻削、焊接等工序,缩短了加工周期,并提高了产品的合格率。

2 喷嘴轻量化设计

减重一向是航空航天领域关键的研究内容和技术难点,在传统设计接近最优且传统制造达到极限的情况下,采用基于增材制造的轻量化设计将得到意想不到的效果^[11-12]。喷嘴作为非主承力件,具备轻量化设计空间。首先对喷嘴壳体安装板进行拓扑优化设计,喷嘴壳体主要受到飞机起飞时的超重力、发动机运转及燃

油喷出时的激励力,然而考虑到在拓扑优化和点阵结构优化分析时添加动力学激励载荷求解的复杂性,本文通过在喷嘴壳体质心处添加足够大倍数(40 倍)重力的静载荷来简化替代重力加速度及发动机、燃油喷出的动力学激励载荷,且在分析时也选取了较大的安全系数,保证强度可靠性(安全系数均高于 6)。喷嘴壳体质量为 250g,添加足够大倍数(拟添加 40 倍)的重力为 100N,螺钉孔位置限定约束,图 2(a)棕色位置即安装板设定为设计空间,为了控制拓扑优化的形状,设计对称面,拓扑优化前后模型如图 2 所示。优化结果显

示,喷嘴壳体受到的应力较小,远低于 GH4169 的屈服极限,具有足够的安全性。拓扑优化安装板部分材质已被去除,达到了一定的减重效果。

拓扑优化后的模型结果比较粗糙,可以通过 UG 等三维建模软件并根据优化结果重新建模,如图 3(a)所示,其中棕色部分为下一步进行点阵微桁架结构设计的设计区域。而由拓扑优化的结果可以看出喷嘴杆壳体位置应力较小,可以采用点阵微桁架结构替换。研究表明点阵结构是三维有序多孔结构的一种,由周期性的点阵桁架组成,可以通过桁架单胞的构型和几何尺寸设计实现其功

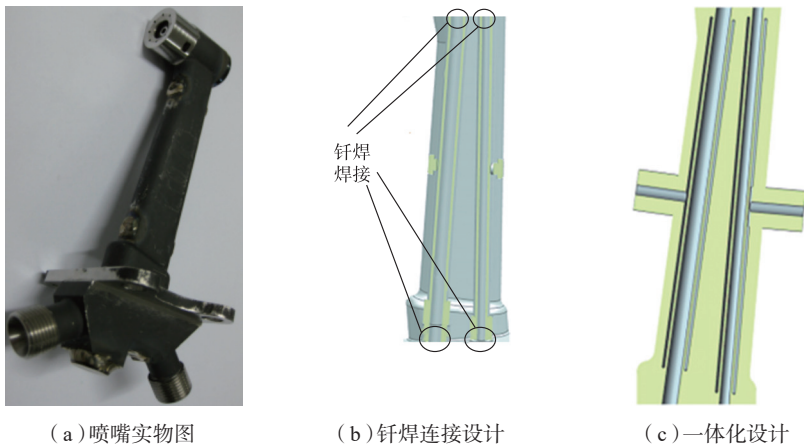


图1 喷嘴模型
Fig.1 Model of nozzle

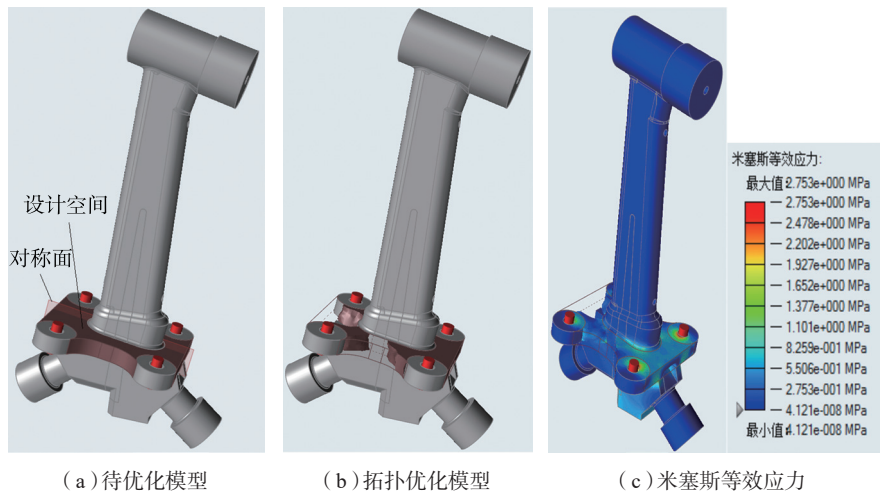


图2 喷嘴壳体拓扑优化
Fig.2 Topology optimization of nozzle shell

能性的调控^[9-12]。点阵结构天然的多孔特性和可设计性,具有高强度、传热性能好、减振效果优等多种优良特性,成为结构、功能一体化的优良载体,但可制造性成为制约其发展的关键瓶颈,而增材制造技术为攻破这一难题带来了新的曙光^[13-14]。在软件中设置点阵微桁架长度、最大直径、最小直径及质量目标等参数后,由软件平台进行点阵结构设计,并得出对应点阵结构的米塞斯等效应力云图、位移云图、安全系数云图等,更改不同的参数设置查看对应云图,当云图满足要求后即可选取合适的点阵微桁架结构参数。由图3(b)点阵结构米塞斯等效应力云图可以看出,包含点阵结构的喷嘴壳体所受最大应力为4.678MPa,远低于GH4169的屈服极限,具备足够的安全性,此时点阵结构参数为目标长度0.8mm,最小和最大直径0.4mm,100%填充点阵。相比于原模型,点阵结构设计后的喷嘴壳体减重22%。

SLM 打印工艺、效果及性能测试分析

1 喷嘴打印工艺优化

对拓扑优化和点阵微桁架结构的喷嘴壳体进行打印试验,试验粉材为GH4169,颗粒直径为15~60 μm ,根据前期打印经验确定工艺参数为:光斑直径为0.1mm,激光功率300W,每层厚度0.04mm,扫描速度为960mm/s,打印时舱体内充满氩气使含氧量保持在 1000×10^{-6} 以下。使用工艺支撑软件添加块状支撑如图4(a)所示,块状支撑表面分布方孔有利于打印后夹杂粉末的排出。打印效果如图4(b)所示,可以明显看出:(1)上下两端均有喷嘴结构与工艺支撑分离的情况发生,分析原因是由于喷嘴壳体结构受到交变及残余热应力的影响而发生较大的变形,其变形力大于支撑齿顶与喷嘴的结合力;(2)表面较为粗糙,附着粉末

颗粒较多,尤其圆圈标记的悬垂结构处粗糙,且呈焦黄色,分析原因为激光能量密度较大,存在过烧情况;(3)点阵结构表面粗糙,表面附着颗粒较多,部分微桁架变形断裂存在缺陷,分析原因为点阵跨距过大,微桁架直径过小,微桁架长度与直径比值过大,而不适于打印。为改善打印效果,采取如下改进措施:(1)在原有块状支撑的基础上复合添加柱状支撑(图5(a)),增加支撑与喷嘴壳体的结合力,防止喷嘴受热应力而变形;(2)将粉层厚度减小为0.03mm,扫描速度提高到1060mm/s,降低激光的工作时间,防止打印点阵结构时熔池过大粘接周围的粉末;(3)将微桁架直

径由0.4mm增加到0.8mm,从而缩短点阵间的悬垂距离,避免点阵结构打印缺陷。改进模型及工艺后,打印结果如图5(b)所示,喷嘴表面亮泽,不存在过烧现象,没有粉末粘连,喷嘴结构与支撑结合紧密无分离。

2 打印性能的测试

经过拓扑优化和点阵微桁架结构优化设计,并采用SLM技术制造的喷嘴和试棒都需在真空环境下进行热处理工艺,1100~1180 $^{\circ}\text{C}$ 温度下保温3h,随炉冷却。相对于原工艺方式,本文制造的喷嘴壳体减重13.5%,壳体表面不同位置粗糙度值 R_a 在3.6~8 μm 范围内, R_a 整体小于8 μm 。经三坐标测量机检测,喷嘴壳

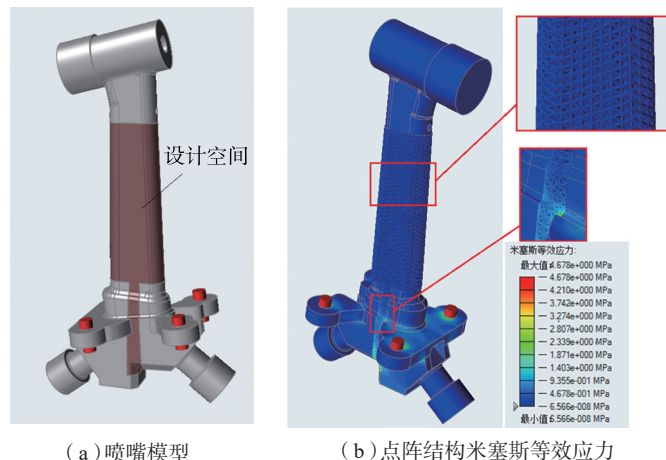


图3 点阵微桁架结构分析
Fig.3 Analysis of lattice microtruss structure

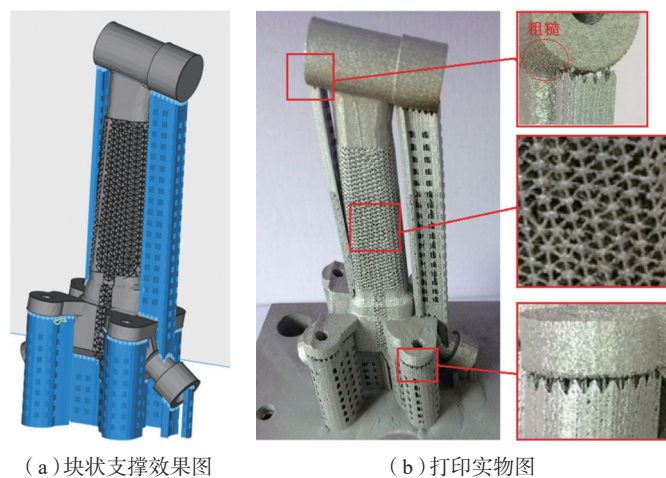


图4 工艺模型及打印实物图
Fig.4 Process model and printing physical photo

体表面不需精加工的部位轮廓误差为 +0.05~+0.20mm,需精加工的部位加工余量为 +0.30~+0.50mm,满足精加工余量要求。

为了对打印性能进行测试,对热处理后的随炉试棒(图6)进行拉伸试验,结果显示,SLM成形的GH4169试棒抗拉强度 $R_m \geq 1290\text{MPa}$,屈服强度 $R_{p0.2} \geq 1150\text{MPa}$,延伸率 $A \geq 7\%$ (铸件退火标准态^[15]:抗拉强度 $R_m \geq 1230\text{MPa}$,屈服强度 $R_{p0.2} \geq 1020\text{MPa}$,延伸率 $A \geq 6\%$),可见 SLM 成形件的力学性能较优异,SLM 成形件的强度和延展性均优于同种材料的铸件试样。

对 SLM 技术一体化设计和打印的喷嘴进行流量试验,如图7所示,在不同进口压力下,喷嘴出口流量均匀,雾化效果好,说明一体化设计及打印的喷嘴内流道壁面结构、精度和表面粗糙度均满足使用

要求。

结论

本文首先基于 SLM 技术对喷嘴进行一体化设计,然后进行拓扑优化和点阵微桁架结构设计,接着进行了打印工艺试验和工艺优化,打印出了理想的喷嘴壳体部件,最后对随炉试棒进行了力学拉伸试验,对喷嘴进行了流量试验,均取得较好的效果,满足使用性能。由此说明 SLM 技术在制造性能上不逊于传统制造,在创新设计、轻量化设计等方面具有独到优势。

(1)基于 SLM 能实现自由制造的技术优势,可对零件进行一体化、拓扑优化、点阵结构等创新设计,从而改善部件性能、减轻重量。

(2)点阵微桁架结构采用 SLM 技术制造可以取得良好的效果,结构参数完全可控,成形精度高,这既有利于优良性能点阵结构的推广应用,

又可反推增材制造技术的发展。

(3)采用 SLM 技术制造的喷嘴最终减重 13.5%,表面粗糙度 R_a 小于 $8\mu\text{m}$,经三坐标测量机检测外观尺寸误差小于 0.2mm,满足局部精加工余量的要求,随炉试棒拉伸力学性能达到铸件水平,满足要求。

(4)目前针对拓扑优化及点阵微桁架结构的设计-制造-评价体系还不是很成熟,有待进一步的发展和完善。本文侧重于燃油喷嘴的减重设计,还未考虑内部流道减阻、防止燃油结焦的温度控制等的拓扑优化,以及缺乏针对喷嘴拓扑优化和点阵微桁架结构更为有效的强度测试与评价方法。本文的不足之处将在后续的研究工作中进一步补充和完善。

参考文献

[1] 郝晓宁. 激光增材制造毛坯与传统锻件铸件差异性分析[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 82-86.
 HAO Xiaoning. Difference analysis between laser additive manufacturing and conventional forging and casting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 82-86.
 [2] HE B, LI J, CHENG X, et al. Brittle fracture behavior of a laser additive manufactured near- β titanium alloy after low temperature aging[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 699: 229-238.
 [3] MARCHESI T R, LAHUERTA R D, SILVA E C N, et al. Topologically optimized diesel engine support manufactured with additive manufacturing[J]. IFAC-Papers on Line, 2015, 48(3): 2333-2338.

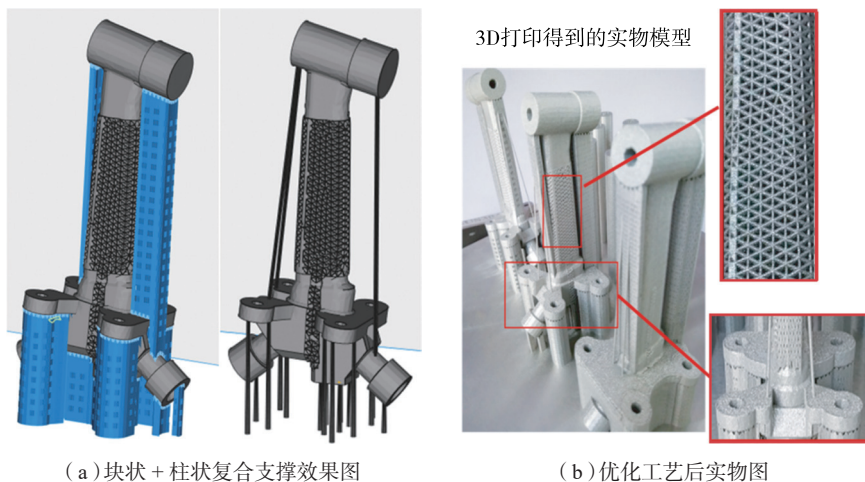
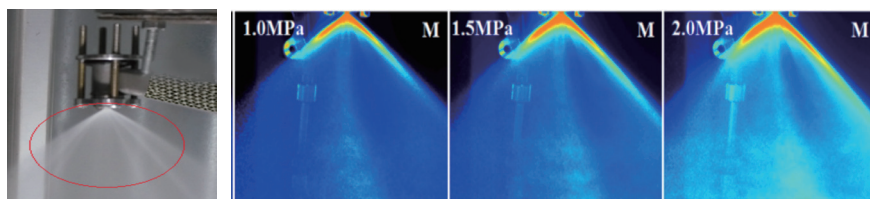


图5 优化工艺模型及实物图
 Fig.5 Optimization of process model and physical photo



图6 拉伸试棒
 Fig.6 Tensile test bar



(a) 流量试验实物图 (b) 不同进口压力下雾化效果 CCD 测量图

图7 喷嘴流量试验
 Fig.7 Nozzle flow experiment

[4] 张小伟. 金属增材制造技术在航空发动机领域的应用[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 10-15.

ZHANG Xiaowei. Application of metal additive manufacturing in aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 10-15.

[5] 闫雪, 阮雪茜. 增材制造技术在航空发动机中的应用及发展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 70-75.

YAN Xue, RUAN Xueqian. Application and development of additive manufacturing technology in aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 70-75.

[6] BAMBERG J, DUSEL KH, SATZGER W. Overview of additive manufacturing activities at MTU aero engines[J]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2014, 1650(1): 156-163.

[7] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-135.

LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 129-135.

[8] 张国庆, 杨永强, 张自勉, 等. 激光选区熔化成型零件支撑结构优化设计[J].

中国激光, 2016, 43(12): 59-66.

ZHANG Guoqing, YANG Yongqiang, ZHANG Zimian, et al. Optimal design of support structures in selective laser melting of parts[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 59-66.

[9] HU R, CHEN W J, LI Q H, et al. Design optimization method for additive manufacturing of the primary mirror of a large-aperture space telescope[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2017, 30(3): 04016093.

[10] WANG C, ZHU J H, ZHANG W H, et al. Concurrent topology optimization design of structures and non-uniform parameterized lattice microstructures[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58: 35-50.

[11] MIRZENDEHDEL A M, SURESH K. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing[J]. Computer-Aided Design, 2016, 81: 1-13.

[12] WANG Y Q, ZHANG L, DAYNES S, et al. Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing[J]. Materials and Design, 2018, 142: 114-123.

[13] 李修峰, 高令飞, 王伟, 等. 一种面向增材制造技术的桁架式支架结构设计方

法[J]. 宇航学报, 2017, 38(7): 751-757.

LI Xiufeng, GAO Lingfei, WANG Wei, et al. An additive manufacturing oriented structural design method for trussed bracket[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(7): 751-757.

[14] 刘书田, 李取浩, 陈文炯, 等. 拓扑优化与增材制造结合: 一种设计与制造一体化方法[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 26-31.

LIU Shutian, LI Quhao, CHEN Wenjiong, et al. Combination of topology optimization and additive manufacturing: an integration method of structural design and manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 26-31.

[15] 王会杰, 崔照雯, 孙峰, 等. 激光选区熔化成型技术制备高温合金 GH4169 复杂构件[J]. 粉末冶金技术, 2016, 34(5): 368-372.

WANG Huijie, CUI Zhaowen, SUN Feng, et al. Superalloy GH4169 complicated components prepared by selective laser melting forming technique[J]. Powder Metallurgy Technology, 2016, 34(5): 368-372.

通讯作者: 姚俊, 博士, 助理研究员, 研究方向为增材制造、智能制造, E-mail: yaojun@iet.cn.

Optimization Design and Manufacturing Technology for Aero-Engine Nozzle Based on Selective Laser Melting Fabrication

DU Baorui, YAO Jun, ZHENG Huilong, YU Hao, LIN Hongjie, DING Ruochen
(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

[ABSTRACT] The aero-engine nozzle is a key component that affects combustion performance. It has many components and complex structure, especially the difficulty of the processing of nozzle internal flow channel, resulting in long manufacturing cycle and high cost. However, the nozzle as a non-main load-bearing part is very suitable for laser selective melting manufacturing (SLM), which is due to the high precision of processing, strong free-form ability and high density of material of laser selection melting. In this paper, based on the technical advantages of SLM, the shell of the nozzle is integrally designed, and the mechanical analysis and topological optimization were analyzed. The molding part was printed by SLM and about 13.5% of its weight has been reduced. The printing error is less than 0.2mm, meeting the margin requirement of local finishing, and the mechanical properties of the furnace specimen reach the level of traditional casting and forging. SLM simplifies the processing of the nozzle, shortens the manufacturing cycle, and has high precision of flow path forming, which achieves the goal of reducing weight and improving performance.

Keywords: Additive manufacturing; Selective laser melting; Topology optimization; Nozzle; Lattice structure

(责编 铃兰)