

航空钛合金零件激光选区熔化3D打印技术应用的 关键基础研究

高 健¹, 刘立彬², 贺 韡², 张 婷³

(1. 驻 769 厂军事代表室, 宝鸡 721006;
2. 中国人民解放军驻西飞公司军事代表室, 西安 710089;
3. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

[摘要] 以 TC4 钛合金航空零件为研究对象, 开展了激光选区熔化 3D 打印技术的模型 CAD 优化设计、成形工艺参数设计、后处理技术等应用关键基础研究, 对影响 3D 打印质量控制的各个环节进行了分析, 提出了航空钛合金零件激光选区熔化 3D 打印技术产业化的建议。

关键词: 钛合金; 3D 打印; 激光选区熔化; 质量控制

Research on Key Application Problems of Selective Laser Melting 3D Printing Technology in Aeronautical Titanium Alloy Parts

GAO Jian¹, LIU Libin², HE Wei², ZHANG Ting³

(1. Military Representative Office 769 Factory, Baoji 721006, China;
2. Military Representative Office of the Chinese People's Liberation Army in Xifei Company, Xi'an 710089, China;
3. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group), Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Aeronautical TC4 Titanium alloy parts is fabricated by selective laser melting 3D printing. Some key application problems of selective laser melting are investigated about optimization design of CAD model, building parameters and post-processing. We analyze the factors that affect the quality of 3D printing. Some suggestions and advices are made about the industrialization of titanium alloy selective laser melting 3D printing.

Keywords: Titanium alloy; 3D printing; Selective laser melting; Quality control

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.23/24.087

增材制造俗称 3D 打印技术, 是基于离散—堆积原理, 综合计算机图形处理、数字化信息和控制、激光技术、机电技术和材料技术, 实现零件三维实体快速成形制造的一种新技术^[1]。3D 打印原材料形状分为粉末、线材、液体等; 根据加工中使用的能量分为激光、电子束、等电子弧等。目前 3D 打印技术应用最广泛的一个分类是由 ISO 和 ASTM 开发的增材制造开发框架, 特别是由 ASTM F42 增材制造项目描述的 7 类工艺: 光聚合、粉末床熔融(PBF)、黏结剂喷射、材料喷射、层压、材料挤出、直接能量沉积。

近年来, 全球 3D 打印产业呈现快速增长态势, 由于增材制造在原材料利用率、制造自由度、零件轻量化、部件集成化等方面存在明显的优势, 金属直接能量沉积和粉末床激光选区熔化 3D 打印技术在航空航天领域

率先取得应用^[2], 其中最为经典的案例是 GE (美国通用电气公司) 著名的 LEAP (欧洲空客发动机系列) 引擎, 内置 3D 打印喷嘴^[3]。美国 F/A-18E/F “大黄蜂” 战机翼根吊环采用 3D 打印技术生产^[4], 其疲劳寿命达到疲劳寿命谱 4 倍要求, 且在静力加载试验中, 载荷过载至 225% 时零件也未被破坏, 完全满足飞机使用需求; 同时, 由于采用了 3D 打印技术, 该零件生产成本降低 20%~40%, 生产周期缩短 80%。F22 战机的钛合金框质量为 144kg, 但其原始锻件质量高达 2980kg, 材料利用率仅为 4.8%。运用 3D 打印制造技术, 可以把高性能金属零件的材料利用率大幅提高, 节约 2/3 以上的昂贵材料。英国已经在空客 A320 上广泛使用 3D 打印技术, 其中仅一个活页零件就可以为飞机减重 10kg 左右, 减轻了飞机质量, 节约了飞机运营成本。在国内, 金属 3D

技术同样取得了不少显著成果。北航进行了飞机大型钛合金结构件 3D 激光快速成形技术研究,使我国成为继美国之后世界上第二个掌握大型钛合金结构件激光快速成形技术的国家^[4-5];中国商飞生产的 C919 飞机钛合金机翼梁采用 3D 打印技术生产,经过各项严格性能测试,其力学性能等优于锻件。近期报道配装 3D 打印喷嘴的 CJ-1000A 国产的发动机业已试车成功。

本文针对航空钛合金零件的激光选区熔化 3D 打印技术应用,研究了 3D 模型处理、工艺参数设计、后处理等工程应用中关键基础问题,提出了航空钛合金零件激光选区熔化 3D 打印技术产业化的建议和意见。

1 激光选区熔化 3D 打印技术原理及工艺特点

3D 打印之激光选区熔化技术,先利用计算机绘图软件(如 CATIA 等)绘制所需零件和试样的三维模型图,然后通过专用软件对零件和试样的三维实体模型进行 Z 向切片离散并规划激光束扫描路径,从而获得各个截面的轮廓数据,然后将得到的数据导入到 3D 打印设备中,设备将按照这些轮廓数据,通过控制激光束有选择性地熔化各层金属粉末,使得金属粉末相互粘接并达到冶金结合,随后层层堆积最终制得三维金属零件和试样。整个成形可以分为软件处理和成型制造两个部分。3D 打印之激光选区熔化技术工艺制造原理^[6-7]如图 1 所示。激光选区熔化 3D 打印技术工艺优点^[7]如下:

(1) 成形零件的开发周期短。能直接制成终端金属或近终端金属零件,不用任何处理或者只需简单的表面处理,极大地缩短了产品开发周期。

(2) 成形零件致密度高。制得的金属零件是具有完全冶金结合的实体,且具有快速凝固的组织,成形零件的机械性能与锻件工艺所得相当。

(3) 成形零件的精度高。使用具有光斑小、高密度的激光器打印金属,使得金属零件具有很高的尺寸精度(达 0.1mm)以及好的表面质量($R_a30\sim50\mu\text{m}$)。

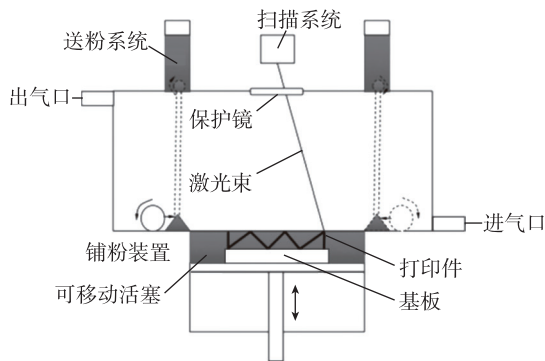


图1 选区激光熔化技术原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of selective laser melting technology

(4) 成型零件高柔性化。成形过程不受零件复杂程度限制,特别适合于单件小批量、个性化定制或采用传统工艺方法制造复杂或异性结构的金属零件。

(5) 成形材料来源广泛。

(6) 应用范围广。

2 TC4 钛合金激光选区熔化 3D 打印技术应用关键基础

2.1 工艺 3D 模型设计

工艺 3D 模型优化设计应根据 3D 打印的工艺性和零件的成型复杂性,需考虑成形毛坯放置形式、工艺支撑设置以及随炉样件的摆放位置。典型件及试样一般遵循如下摆放原则:

(1) 尽可能将零件大的平面朝下。

(2) 需要倾斜角度的零件,一般按 45° 倾斜,以保证添加最少的支撑。

(3) 对于壁厚在 1~3mm、高度 <50mm 的薄壁零件则采用竖直摆放,可单件成形。

图 2 给出了航空 TC4 钛合金某零件及试验件的工艺 3D 模型设计最终方案。

2.2 成形工艺参数设计

3D 打印成形工艺参数包括:激光功率、扫描速度、光斑直径、供粉量、循环风速以及铺粉厚度等。激光功率与扫描速度对粉料熔透性、成形效率等密切相关,扫描路径与扫描速度还与成形件的尺寸精度、冶金组织致密度有关联。一般设备出厂前已根据用户需要将上述参数调整完毕,英国 RENISHAW 公司 AM400 型 3D 打印设备全参数开放,用户可根据成形材料、成形件复杂程度等随时调整设备所需参数。3D 打印 TC4 钛合金某零件最终确定的成形工艺参数如表 1 所示。3D 打印 TC4 钛合金样件性能检测参数如表 2 所示。

从表 2 可以看出 3D 打印 TC4 钛合金样件性能明显高于钛合金铸件性能,达到甚至超过锻件性能。

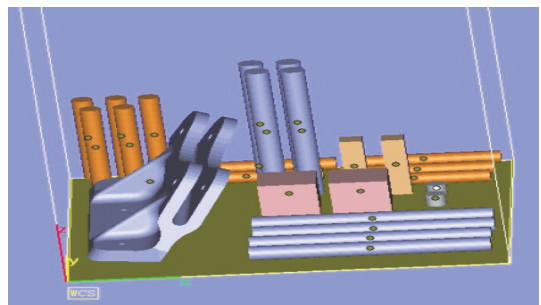


图2 航空TC4钛合金某零件及试验件工艺3D模型设计方案

Fig.2 Building 3D model of aeronautical TC4 titanium alloys part and sample

表1 3D打印TC4钛合金某零件成形工艺参数

Table 1 3D printing process parameters for TC4 titanium alloy parts

扫描方向	激光功率/W	扫描速度/(mm·min ⁻¹)	光斑直径/mm	供粉量/mm	循环风速V/(m·s ⁻¹)	铺粉厚度/mm
分层旋转扫描	320	1200	0.08	0.15	4.0	0.06

表2 3D打印TC4钛合金样件性能检测参数

Table 2 Performance parameters of 3D printing TC4 titanium alloy sample

样件	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	延伸率 A /%	断面收缩率 Z /%	冲击韧性 a_k /J	硬度 HBW
H	1058.1	984.0	16.3	47.7	38.0	347.4
S	1050.5	994.4	17.8	55.2	51.7	345.5
TC4 (锻)	895	825	10.0	25.0	350kJ/m ²	3.35HB
ZTC4	835	765	5	12	—	—

注:其中H是3D打印增长方向,S是垂直于增长方向。

2.3 后处理

2.3.1 不同热处理状态下力学性能

研究了不同热处理状态下TC4钛合金的力学性能。钛合金试样热处理工艺参数如表3所示,力学性能试验数据表4所示。

由表3~4可以看出,随着退火温度升高,TC4钛合金的抗拉强度由初始状态的1054.3MPa先增加到

1256.7MPa,再减少至966.3MPa。因热处理前后TC4钛合金金相组织在经过高温退火后,过饱和的初始态 $\alpha+\beta$ 固溶体析出针状 α 相,产生复相强化,使合金强度增加;随着退火温度升高,第二相析出完成,此时处于去应力退火状态,内应力逐渐消除,材料强度降低,塑性提高^[8]。

2.3.2 表面处理

根据反复试验结果得到以下结论:钛合金TC4经6~12min的酸洗表面有光亮的金属色,同时计算出钛合金不同情况下的腐蚀速率为0.038~0.127mm/(单面·h),完全满足现有企业相关标准要求。按照试验结果和试验中取得的数据,为后续3D打印成型零件的表面处理工艺提供依据,3D打印TC4钛合金某零件最终形貌,如图3所示。

3 3D打印质量相关环节

3.1 金属粉末

激光选区熔化3D打印是通过控制高亮度激光束有选择性地熔化各层金属粉末,使得金属粉末快速熔化而

表3 TC4试样不同热处理工艺参数

Table 3 Different heat treatment parameters of TC4 sample

状态代码	退火设定温度/°C	保温/h	冷却方式
1#	600	4.0±1/6	5000Pa氩气压力冷却至250℃以下
2#	700	4.0±1/6	5000Pa氩气压力冷却至250℃以下
3#	900	4.0±1/6	5000Pa氩气压力冷却至250℃以下

表4 不同热处理状态钛合金TC4力学性能试验数据

Table 4 Test data of mechanical properties of titanium alloy TC4 under different heat treatment conditions

项目 序号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸率 A /%	断面收缩率 Z /%	状态代码
H	1213.0	1143.3	7.7	15.3	1#
S	1256.7	1216.7	9.8	31.0	
H	1099.0	1046.3	13.3	39.7	2#
S	1122.3	1094	14.2	50.0	
H	966.3	891.7	17.7	50.0	3#
S	1000.3	938.3	16.8	52.0	

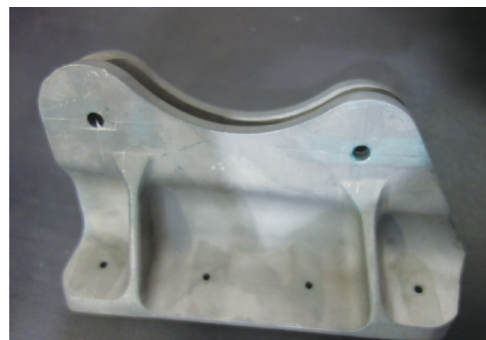


图3 3D打印某零件最终形貌

Fig.3 Final shape of 3D printing part

凝固达到冶金结合。除了粉末的化学成分以外,影响3D打印质量金属粉末的因素还包括粉末形状与粒度、夹杂物等。为了能够制造出高品质的金属零件,要求金属粉末颗粒尺寸一般要求20~60 μm ,应为球形或近似球形,其流动性和松装密度等满足一定要求。另外,每一批粉末必须由同一牌号、同一熔炼炉号、同一工艺、同一生产周期、同一机械加工工艺制备的棒材在同一制粉生产装备中,在完全相同的工艺参数条件下生产制备。

3.2 3D打印参数

激光功率与扫描速度对粉末层熔透性、成形效率等密切相关,扫描路径与扫描速度还与成形件的尺寸精度、冶金组织致密度有关联。在激光选区熔化3D打印设备出厂前具有一定参数工艺包,安装调试完,航空企业需要联合厂家一起校核、调准3D打印设备的参数。批量生产时依据研制周期、生产效率、毛坯质量以及验收标准等微调设备的参数,设备必须定期校验、调准3D打印设备的成形尺寸精度,设备监测设备成形室氧含量的自检结果,氧含量大于0.10%时必须报警并停止工作,否则氧含量超标对TC4钛合金的成形会造成致命的空洞、夹杂等冶金缺陷^[8]。

3.3 工艺数模设计

激光选区熔化3D打印件的变形除与激光功率与扫描速度等参数的设置有关外^[9],还与工艺数模摆放密切相关,合适的摆放原则,可有效防止成型件的变形发生。另外合理设置工艺支撑,必须尽量减小或消除悬空的成形面、成形体,工艺支撑可以防止悬空面局部球化以及变形。为满足航空零件对外廓以及装配尺寸公差要求,工艺数模设计需要联合激光路径与扫描速度协同控制,确保获得合格的3D打印零件。

3.4 3D打印件理化以及无损检测

增材制造技术制造的物理、化学、力学和材料冶金现象极其复杂,其内部组织及内部缺陷、应力及变形开裂、尺寸精度等关键基础质量问题,需要通过热处理及热等静压、表面处理等后处理保证满足相关质量要求^[10]。通过激光选区熔化3D打印随炉件的理化以及无损检测,可以进一步确认3D打印件的质量。

4 航空企业3D打印产业化相关建议和意见

4.1 加快建立3D打印行业标准

目前,处于知识产权或本单位内部信息保护的考虑,国内从事金属选区激光熔化研究的企业、科研院校等各自为政,缺乏统一的设计、材料、工艺标准和验收等标准的支撑,这也是制约3D打印技术在航空航天领域应用的主要原因之一。借鉴ASTM和ISO系列标准,

加快行业内标准的建立,将对国内增材制造技术的开展起到统领的作用。

4.2 制定3D打印企业规划

航空企业应该和国内研究所、高校积极联合,形成一整套产、学、研、教的产业联盟,针对企业薄弱的3D打印基础,必须做出长远的规划,依托研究所、高校的基础研究以及3D打印技能人才的培养壮大自身,加大在材料、工艺控制、后处理等方面的预研投资,这样才能使企业处于3D打印行业的领先地位。

4.3 加强3D打印人才培养

目前航空行业内多是铸造、焊接或锻造专业技术人员兼职增材制造技术,严重缺乏从事3D打印的高级专业人才。因此,加强增材制造技术人才队伍建设至关重要。切实推进人才培养模式,建立院企联合培养人才的新机制;运用外派或请进来等方式锻炼、培育人才;加强高层次人才引进,从而提升本企业增材制造技术的整体水平。

5 结论

(1)针对航空钛合金零件激光选区熔化3D打印的工程化应用,应从材料、工艺模型及参数、设备、产品等全链条角度,加强对3D打印过程以及影响成形质量因素等机理深入研究,联合制定相关规范及标准,控制3D打印件的质量。

(2)随着数字化技术快速发展,激光选区熔化3D打印技术应该加强数值模拟仿真能力以及相关人才培养,大幅减少试错成本。

参 考 文 献

- [1] 刘焕文. 金属增材制造技术在飞机研制生产中的应用综述[J]. 西飞科技, 2017(3): 10-13.
- LIU Huanwen. Application of metallic additive manufacturing in aircraft development and production[J]. Xifei Technology, 2017(3): 10-13.
- [2] 谭立忠, 方芳. 3D打印技术及其在航空航天领域的应用[J]. 战术导弹技术, 2016(4): 1-7.
- TAN Lizhong, FANG Fang. 3D Printing technology and its application in aerospace industry[J]. Tactical Missile Technology, 2016(4): 1-7.
- [3] 何艳丽, 廖焕文, 王禄秀. 商用航空发动机金属增材制造技术及装备应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(22): 47-51.
- HE Yanli, LIAO Huanwen, WANG Luxiu. Application of technology and equipment for metallic additive manufacturing in commercial aero engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(22): 47-51.
- [4] 梁朝阳, 张安峰, 梁少端, 等. 高性能钛合金激光增材制造技术的研究进展[J]. 应用激光, 2017, 37(3): 17-21.

(下转第95页)

使得试验件在达到要求的振幅下,需要的激励最小。

(2) 叶片在受到一阶共振频率相同外部激励条件下,叶片的变形规律与其一阶振型相似。

(3) 大展弦比弯扭复合叶片在受到一阶共振频率相同外部激励条件下,表面振动应力仍以展向应变为主,弦向应变相对较小。

研究结果表明,如果试验中要求发动机转子叶片产生较大响应,可以通过优化装夹形式,降低对激励设备的要求。对于大涵道比复合弯扭叶片,仍可以采用 HB5277—1984 中的方法确定试验状态。

参考文献

- [1] 林杰威. 航空发动机叶片疲劳寿命和可靠性研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- LIN Jiewei. Study on fatigue life and reliability of aeroengine blades[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [2] 胡海岩. 机械振动基础[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- HU Haiyan. Mechanical vibration foundation[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.
- [3] NOWAK W. Fatigue stress analysis[EB/OL]. [1978-01-10]. <https://scholarworks.rit.edu/theses/7513>.
- [4] 陈光. 新型发动机的一些新颖结构[J]. 航空发动机, 2001, 27(1): 3-10.
- CHEN Guang. New structure in advanced aeroengine[J]. Aeroengine, 2001, 27(1): 3-10.
- [5] 刘大响, 程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 490-496.
- LIU Daxiang, CHEN Ronghui. Current status and development direction of aircraft power technology in the world[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 490-496.
- [6] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散连接技术的应用进展和发展趋势[J]. 航空制造技术, 2010, 53(8): 32-35.
- LI Zhiqiang, GUO Heping. Application progress and development tendency of superplastic forming/diffusion bonding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(8): 32-35.
- [7] 梁春华. 高性能航空发动机先进风扇和压气机叶片综述[J]. 航空发动机, 2006, 32(3): 48-52.
- LIANG Chunhua. Over view of advanced fan and compressor blade/vane in high performance aeroengine[J]. Aeroengine, 2006, 32(3): 48-52.
- [8] 张强, 张永峰, 马双元. 大涵道比涡扇发动机风扇叶片振动模态分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(3): 14-17.
- ZHANG Qiang, ZHANG Yongfeng, MA Shuangyuan. Modal analysis of high bypass ratio fan blade[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2011, 28(3): 14-17.
- [9] 邓瑛, 韩秀全, 邵杰, 等. 钛合金三层空心结构模拟件设计及高周疲劳实验[J]. 航空制造技术, 2013, 56(16): 52-54.
- DENG Ying, HAN Xiuquan, SHAO Jie, et al. Titanium alloy three

layers hollow component-like specimen design and high cycle fatigue test[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(16): 52-54.

[10] 姚磊, 李志强, 邓瑛, 等. 钛合金薄壁空心结构阻尼特性研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(16): 91-95.

YAO Lei, LI Zhiqiang, DENG Ying, et al. Research on damping characteristics of titanium alloy thin wall hollow structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(16): 91-95.

通讯作者: 邓瑛, 高级工程师, 研究方向为轻量化结构设计、强度及振动, E-mail: yingdeng@buaa.edu.cn.

(责编 古京)

(上接第90页)

LIANG Chaoyang, ZHANG Anfeng, LIANG Shaoduan, et al. Research progress on high properties titanium alloys of laser additive manufacturing technology[J]. Applied Laser, 2017, 37(3): 17-21.

[5] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 38-42.

TIAN Zongjun, GU Dongdong, SHEN Lida, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 38-42.

[6] 史玉升. 激光制造技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

SHI Yusheng. Laser manufacturing technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.

[7] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 66-71.

GONG Shuili, SUO Hongbo, LI Huaixue. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 66-71.

[8] 廖海洪, 梁敏洁, 白培康, 等. 镍铁金属粉末选区激光熔加工工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(1): 12-15.

LIAO Haihong, LIANG Minjie, BAI Peikang, et al. Experiment research of selective laser melting of Ni-Fe metal powder[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(1): 12-15.

[9] 杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(12): 26-31.

Yang Qiang, LU Zhongliang, HUANG Fuxiang, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 26-31.

[10] 李轩, 莫红, 李双双, 等. 3D 打印技术过程控制问题研究进展[J]. 自动化学报, 2016, 42(7): 983-1003.

LI Xuan, MO Hong, LI Shuangshuang, et al. Research progress on 3D printing technology process control problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(7): 983-1003.

通讯作者: 张婷, 硕士, 工程师, 研究方向为金属锻铸, E-mail: 864458972@qq.com.

(责编 古京)