

航空装备激光增材制造技术发展及路线图

王天元^{1,2,3}, 黄 帅^{1,2,3}, 周 标^{1,2,3}, 郑 涛^{1,2,3},
张国栋^{1,2,3}, 郭绍庆^{1,2,3*}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 中国航发集团增材制造技术创新中心, 北京 100095; 3. 北京市航空发动机先进焊接工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: 激光增材制造支持结构设计创新、快速研制和验证, 是当前航空装备领域最具代表性的增材制造方法, 其中激光选区熔化主要应用于复杂精密功能结构的精确近净成形制造, 激光直接沉积主要用于大尺寸复杂承载结构的制造。为支撑航空领域增材制造技术发展的战略布局, 本文对激光增材制造现状和发展趋势进行梳理, 指出增材制造发展重点必然会转向产品的冶金质量、力学性能及其稳定性控制方面, 增材制造设备的在线监测、参数自整定控制等智能化功能的研究开发正成为设备的研发热点, 基于损伤失效分析、寿命预测研究的增材制件力学行为研究以及基于元件、特征结构的性能考核验证技术, 开始引起工程应用部门的关注。在对技术发展趋势分析的基础上, 提出 2035 年航空领域激光增材制造技术发展目标和相应的政策和环境支撑、保障需求, 并给出 2035 年技术发展路线图建议。

关键词: 激光增材制造; 金属材料; 飞机; 航空发动机; 发展路线图

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2022.000210

中图分类号: TG665

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2023)01-0001-17

Development and roadmap of laser additive manufacturing technology for aviation equipment

WANG Tianyuan^{1,2,3}, HUANG Shuai^{1,2,3}, ZHOU Biao^{1,2,3}, ZHENG Tao^{1,2,3},
ZHANG Guodong^{1,2,3}, GUO Shaoqing^{1,2,3*}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. AECC Innovation Center of Additive Manufacturing Technology, Beijing 100095, China; 3. Beijing Research Center of Advanced Welding Engineering Technology for Aeroengine, Beijing 100095, China)

Abstract: As the most representative additive manufacturing method in the field of aviation equipment at present, the laser additive manufacturing supports the structure design innovation, rapid development and verification. Among them, selective laser melting is mainly used for precision near net shape manufacturing of complex precise functional structures, and laser direct metal deposition is mainly used for manufacturing large and complex load-bearing structures. In order to support the strategic layout of the development of additive manufacturing technology in the aviation field, this paper sorts the current situation and development trend of laser additive manufacturing, and points out that the focus of additive manufacturing development is bound to turn to the metallurgical quality, mechanical properties and their stability control of products. The research and development of intelligent functions such as online monitoring, parameter self-tuning control of additive manufacturing equipment are becoming a research hotspot. Either the research on mechanical behavior of additive parts based on damage failure analysis and life prediction or the performance evaluation and verification technology based on components and characteristic structures have begun to attract the attention of engineering application departments. Based on the analysis of the technology development trend, the development goal of laser additive manufacturing technology in the aviation field in 2035 and the corresponding policy and environmental support and guarantee needs are proposed, and the technical development roadmap in 2035 is put forward. In 2025-2035, the control technology of microstructure,

property and deformation for additive manufacturing of ordinary metal, intermetallic compound, Nb-Si and ceramic based material is to be made a comprehensive breakthrough, the performance verification is to be basically completed, the functional assessment has been partially completed, and some products are to be entered mass production. Important load-bearing structures of aircraft and rotating parts of aeroengine made by additive manufacturing are to be widely used.

Key words: laser additive manufacturing; metal materials; aircraft; aeroengine; development roadmap

增材制造从三维模型出发实现零件的直接近净成形制造。相比传统的减材制造,增材制造将多维制造变成简单的由下而上的二维叠加,降低了设计与制造的复杂程度。航空装备领域目前涉及的增材制造主要是金属材料增材制造,已发展出激光增材制造、电子束增材制造和电弧增材制造三类增材制造技术。

激光增材制造是当前航空装备领域最具代表性的增材制造方法,主要包括以粉床铺粉为技术特征的激光选区熔化和以同步送粉为技术特征的激光直接沉积^[1]。激光选区熔化工艺热输入小、成形尺寸精度高,适合制造航空发动机喷嘴、涡流器等复杂结构零件以及拓扑点阵等新型结构;激光直接沉积工艺效率较高、力学性能较好,但制造精度不高,适合制造飞机框梁等重要承力结构。由于国内外对激光增材制造技术非常重视,其技术发展迅速,陆续应用于飞机和航空发动机的制造,并且呈现出快速增长的趋势^[2-3]。

为了更好地把握增材制造的发展现状和趋势,

提前做好航空领域增材制造技术发展的战略布局,推进增材制造在航空领域的发展与应用,本文针对激光增材制造最近几年的发展,开展文献、资料、信息的搜集、整理、分析。在对增材制造现状和发展趋势分析的基础上,提出 2035 年航空领域增材制造技术发展目标和相应的政策和环境支撑、保障需求,并尝试给出 2035 年技术发展路线图建议。

1 激光增材制造的工艺原理及特点

激光选区熔化(SLM)基于分层叠加制造原理,利用高能量激光束逐层熔化金属粉末成形复杂结构金属零件^[4]。图 1 为激光选区熔化示意图。SLM 在已有的 3D 模型切片数据的轮廓数据基础上,生成填充扫描路径,设备按照这些填充扫描线,控制激光束选区熔化各层的金属粉末材料,逐步堆叠成三维金属零件。

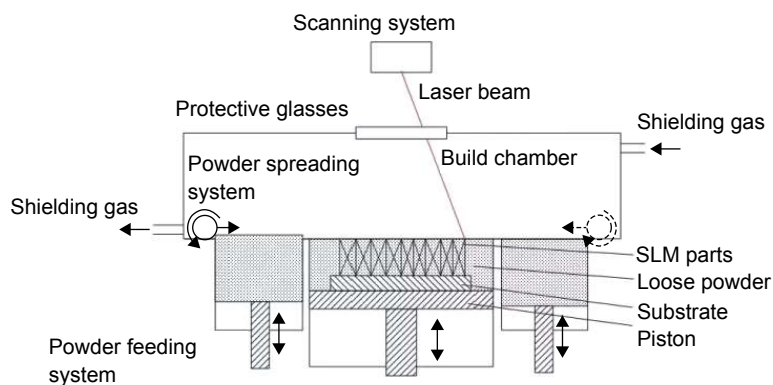


图 1 激光选区熔化(SLM)示意图

Fig. 1 Schematic diagram of selective laser melting (SLM)

激光选区熔化技术具有以下特点:(1)成形原料一般为一种金属粉末,主要包括不锈钢、镍基高温合金、钛合金、钴-铬合金、铝合金以及贵金属等;(2)采用细微聚焦光斑的激光束成形金属零件,成形的零件精度较高,表面稍经打磨、喷砂等简单后处理即可达到使用精度要求;(3)成形零件的力

学性能较好,一般拉伸性能可超铸件,达到锻件水平;(4)高向沉积速度较慢,导致成形效率较低,零件尺寸会受到铺粉工作箱的限制,不适合制造大型的整体零件。

激光选区熔化的局限性主要表现在:(1)由于激光器功率和扫描振镜偏转角度的限制,设备能够

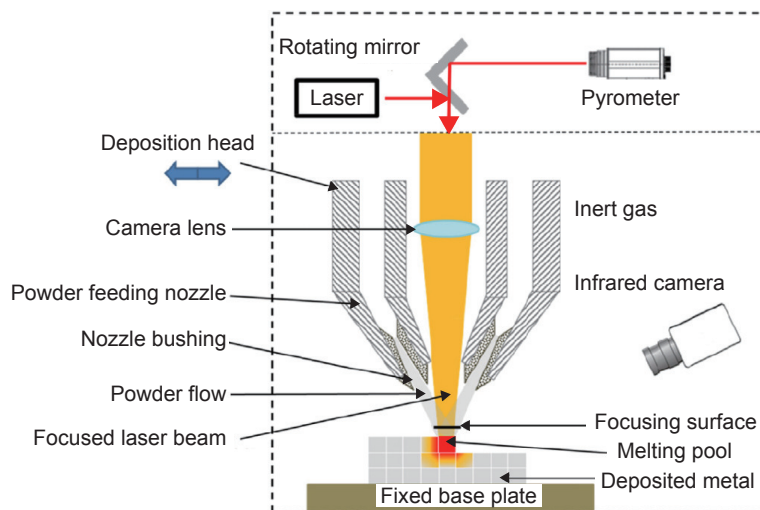


图 2 激光直接沉积成形原理

Fig. 2 Principle of laser direct metal deposition

成形的零件尺寸范围有限,目前整体制造 800 mm 以上尺寸零件的设备不够成熟;(2)加工过程中,容易出现翘曲,还容易因粉末熔化后不能均匀地铺展于前一层发生球化现象;(3)成形体结构密度控制效果不好,难以承受高载荷的结构效应。

激光直接沉积工艺如图 2 所示。激光从熔覆头顶部沿轴线方向向下射出,经聚焦镜汇聚在粉末聚焦点附近,将同步出射的粉末熔化;同时,熔覆头或工作台按每层图形的扫描轨迹移动,熔化的金属液就在基体或上一层凝固层基础上完成一层实体的成形;计算机继续调入下一层图形扫描数据,重复上述动作,如此逐层堆积,最终成形出一个具有完全冶金结合的金属零件^[4]。

激光直接沉积技术具有以下特点:(1)无需模具,可实现复杂结构的制造,但悬臂结构需要添加相应的支撑结构;(2)成形尺寸受限制小,可实现大尺寸零件的制造;(3)可实现不同材料的混合加工与梯度材料制造;(4)可对损伤零件实现快速修复;(5)成形组织均匀,具有良好的力学性能,可实现定向组织的制造。

激光直接沉积技术的局限性主要表现为:(1)成形时热应力较大;(2)成形精度不高;(3)所得金属零件尺寸精度和表面粗糙度都较差,需较多的机械加工后处理才能使用。

目前激光选区熔化主要应用于小尺寸或中等尺寸复杂精密结构的精确近净成形增材制造,结构的功能属性一般大于承载属性。激光直接沉积主要用于中等或大尺寸复杂承力结构的增材制造,结构的承载属性一般大于功能属性。

2 国外激光增材制造技术发展现状和趋势

2.1 工艺研究

2.1.1 激光选区熔化

激光选区熔化对粉体材料的要求为:尺寸在 15 ~ 60 μm 的金属颗粒群,并尽可能同时满足纯度高、少或无空心、卫星粉少、粒度分布窄、球形度高、氧含量低、流动性好和松装密度高等要求。通过近 30 年的发展,国外成功采用真空感应雾化法(VIGA 法)、无坩埚电极感应熔化气体雾化法(EIGA 法)、等离子旋转雾化法(PREP 法)以及等离子火炬法(PA 法)等制备 SLM 增材制造专用粉体材料,已经具备成熟稳定的批量供货能力,并垄断了全球大部分 SLM 增材制造专用粉体材料市场。

在成形工艺研究方面,波音、洛克希德-马丁、诺斯罗普-格鲁曼、通用动力、GE、霍尼韦尔、派克-汉尼汾等公司已利用激光选区熔化技术开发出商业化的金属零部件。

在 SLM 成形过程中伴随着复杂的物理、化学、冶金等过程,容易产生球化、孔隙、裂纹等缺陷。白俄罗斯科学院研究了金属粉末球化形成的具体过程,指出球化主要会形成碟形、杯形、球形 3 种典型的形状,并分析了各自形成的机理^[5]。德国鲁尔大学研究了不锈钢粉末激光选区熔化成形的相对密度与工艺参数的关系,发现高的激光功率有利于成形出高密度的金属零件,低的扫描速率有利于扫描线的连续,促进致密化^[6]。英国利兹大学对不锈钢和工具钢合金粉末进行了 SLM 研究,分析了扫

描速率、激光功率和扫描间隔对成形件质量的影响^[7]。

国外对增材制造工艺研究非常细致,例如,德国某设备商为开发一种新粉末(可用粒度为20~60 μm)的激光选区熔化工艺,往往需要6~8个月的工艺摸索,涉及的参数多达70余项。

国外已将拓扑优化设计与轻量化技术应用于SLM增材制造,实现了由“制造引导设计、制造性优先设计、经验设计”的传统设计理念向“设计引导制造、功能性优先设计、拓扑优化设计”的增材制造设计理念转变。支撑设计方面,国外已经应用无需线切割即能分离打印件与基板的特殊支撑设计技术,大大缩短了取件周期。

在后续热处理技术方面,2002年美国汽车工程师协会发布了第1个增材制造技术标准《退火Ti-6Al-4V钛合金激光沉积产品》,至今已陆续颁布了19项标准。这些标准涵盖了产品的退火和热等静压、消除应力退火以及退火或热等静压后的时效制度,反映国外已经在控制内部缺陷、消除残余应力、减少变形等方面开展了大量的研究工作。

航空航天等领域对增材制造零件表面粗糙度有较高的要求,金属增材制造零件的后续光整加工不可或缺。磨粒流加工方法具有高加工可达性,对复杂内腔结构进行光整加工具有显著的优势。采用磨粒流抛光增材制造零件,对由“阶梯效应”导致的粗糙表面具有良好的改善效果。国外研究发现,采用磨粒流加工抛光SLM制造的叶片,沿流动方向存在明显的抛光不一致性,叶片进排气边的抛光效果明显好于叶盆及叶背中心区域,叶片型面精度降低。

2.1.2 激光直接沉积

激光直接沉积增材制造对粉末的要求为:粒度分布一般在45~420 μm范围内,同时尽可能满足纯度高、少或无空心、卫星粉少、球形度高、氧含量低、流动性好和松装密度高等要求。粉末制备推荐采用电极感应熔化高纯氩气雾化或等离子旋转电极法。

激光直接沉积技术效率高,成形零件的尺寸大,还可在原有零件上进行修复和再制造,但缺点是不具备制造复杂空心结构的能力,成形的毛坯还需要经过较多的机械加工才能获得最终零件。值得指出的是,激光直接沉积方法还能同步混合不同材料的粉末来实现复合材料的成形。

1995年起,美国约翰霍普金斯大学、宾夕法尼亚州立大学和MTS公司共同开发了利用大功率

CO₂激光器实现大尺寸钛合金零件的制造技术,并合作成立了AeroMet公司,实现了Ti-6Al-4V合金1~2 kg/h的沉积速率^[8]。

对于激光直接沉积技术的研究主要从成形工艺和成形组织性能两方面展开。美国的Sandia国家实验室和Los Alamos国家实验室针对镍基高温合金、不锈钢、钛合金等金属材料进行了大量的激光直接沉积成形研究,所制造的金属零件不仅形状复杂,且其力学性能接近甚至超过传统锻造技术制造的零件^[9]。瑞士洛桑理工学院深入研究了激光快速成形工艺参数对成形过程稳定性、成形零件的精度、显微组织以及性能的影响,并将该技术应用于单晶叶片的修复^[10]。

增材制造材料的显微组织是由移动熔池中熔体的冶金动力学行为与晶体形核/长大机制决定的,激光直接沉积技术在材料显微组织控制方面具有较大的自由度,早在2001年Gäumann等^[11]就实现了单晶与多晶镍基高温合金的调控,而Liu^[12]等通过送粉量与激光功率的匹配实现了具有等轴晶与柱状晶混合组织钛合金的成形。

激光直接沉积成形过程中随着高能激光束长时间周期性剧烈加热和冷却、移动熔池在池底强约束下的快速凝固收缩及其伴生的短时非平衡循环固态相变,会在零件内部产生极大的内应力,容易导致零件发生严重变形、甚至开裂。

美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室开发出一种新的激光金属直接成形技术,可在一个部件上混合打印多种金属或合金,解决了长期以来飞行器零部件制造中所面临的一大难题——在同一零件的不同部位具有不同性能。

德国DMG MORI旗下的Lasertec系列,整合了激光增材制造技术与传统切削技术,不仅可以制造出传统工艺难以加工的复杂形状,还改善了增材制造过程中存在的表面粗糙问题,提高了零件的精度^[13]。

2.2 工艺设备

经济、高效的设备是激光增材制造技术广泛推广和发展的基础。目前,激光选区熔化增材制造设备的研究主要集中在德国、法国、英国、日本、比利时等国家。激光直接沉积增材制造设备的研究主要集中在美国、德国等国家。

2.2.1 激光选区熔化增材制造设备

激光选区熔化SLM技术及设备研究起步最早的国家当属德国,其技术也比较成熟。德国EOS公司是全球最大,同时也是技术较为领先的激

光选区熔化增材制造成形系统制造商。

目前 EOS 设备主要有 EOSINT M280、M290 和 M400 三款。EOSINT M280 激光烧结系统采用 Yb-fibre 激光发射器, 高效能、长寿命, 光学系统精准度高。根据 IDTechEx 的数据, M280 曾用于制造当前 GE 航空发动机 LEAP 的喷油嘴。

为全面取代 EOS M280, EOS 公司推出升级版的增材制造设备 EOS M290。EOS M290 提升了过程监控能力, 尤其适合航空航天和医疗等高精尖行业的要求。除此之外, EOS M290 在其他方面也做了一些改进。EOS M290 增材制造设备的新增功能包括:

(a) EOSTATE PowderBed, 一个内置在构建腔室的摄像头, 通过静止图像监视粉末床上的粉末沉积状况。

(b) EOSTATE Base, 统一监控一系列参数, 包括 Z 轴或扫描仪的位置、激光功率、空气湿度、温度和压力。

(c) EOSTATE LaserMonitoring, 检测在整个构建期间的激光功率。该系统配备有一个 400 W 的激光, 该激光具备高辐射品质和稳定的性能。

(d) EOS ParameterEditor, 用户可以使用它修改一系列的曝光参数。该工具使客户能够在 EOS 参数集的基础上根据具体应用开发自己的参数, 包括激光功率和曝光速度或策略。参数编辑器的更新版本正在开发中, 新版本的参数编辑器还可以修改层厚度、惰性气体流、构建平台的温度等。

EOS M400 是 EOS 公司尺寸最大的金属选区熔化设备, 也是目前市场上较为成熟的大尺寸选区熔化设备, 其最大成形尺寸为 400 mm×400 mm×400 mm。该设备采用 1 kW 的光纤激光器及双向铺粉方式, 可以有效提高成形效率; 同时设备集成了监控系统, 可对铺粉情况、Z 轴位置、激光功率、湿度、温度、压力等参数进行监控, 保证成形过程的稳定和产品的可追溯性。

目前国际上主要 SLM 装备的技术指标如表 1 所示, 其中 Concept Laser 公司生产的 SLM 装备可成形的零件尺寸最大, EOS 公司生产的 SLM 装备可成形的零件尺寸次之, 但是 EOS 公司生产的 M 系列 SLM 装备的商用化成熟度最高, 应用最广。

2.2.2 激光直接沉积设备

在激光直接沉积设备制造研究方面, 美国

表 1 国际商业化 SLM 装备指标参考
Table 1 Index reference of international commercialized SLM equipments

Manufactor	Equipment	Energy source/W	Build dimension/mm ³	Powder spreading brush	Layer thickness/ μm	Optical system	Focus spot diameter/ μm	Maximum scanning speed/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Forming environment
EOS	M 290	400	250×250×325	Compression type	20-100	F- θ focus mirror+scanning galvanometer	100	7	Preheating+inert atmosphere chamber
EOS	M 400	1000	400×400×400	Compression type	30-60	F- θ focus mirror+scanning galvanometer	60-300	7	No preheating +inert atmosphere chamber
Realizer	SLM 300	200/400	300×300×300	Flexible	20-100	F- θ focus mirror+scanning galvanometer	70-200	5	No preheating +inert atmosphere chamber
Concept laser	X line 1000R	1000	630×400×500	Compression type	30-200	F- θ focus mirror+CNC laser head movement	100-500	7	Preheating+inert atmosphere chamber
SLM solution	SLM 500HL	2×1000	500×280×325	Compression type	20-200	F- θ focus mirror+scanning galvanometer	80-150	15	No preheating +inert atmosphere chamber
3D Systems	sPro250	200	250×250×300	Flexible	50-200	F- θ focus mirror+scanning galvanometer	50-150	7	No preheating +inert atmosphere chamber
Renishaw PLC	Am250	200/400	250×250×301	Compression type	30-100	F- θ focus mirror+scanning galvanometer	70-100	5	No preheating +inert atmosphere chamber
Phenix systems	PXL	200	250×250×302	Flexible	20-50	F- θ focus mirror+scanning galvanometer	50-100	7	No preheating +inert atmosphere chamber

EFESTO 公司堪称大尺寸 3D 金属打印专家。该公司推出典型设备为大型的同步送粉激光增材制造设备 EFESTO 557, 该设备拥有一个 1500 mm×1500 mm×2100 mm 的超大工作室。

美国 Optomec 公司推出的激光直接沉积设备型号为 LENS 850-R, 该设备拥有一个 900 mm×1500 mm×900 mm 的超大工作室, 并配有 5 轴移动工作台, 最大成形速度为 8.19 cm³/min。

德国阿诺德激光系统制造有限公司推出的激光综合加工系统, 也是国际上一款主流的激光直接沉积增材制造设备。

国际上近些年还推出了增减材复合加工设备和技术。日本 DMG 公司 (DMGMORI) 推出的 LASERTEC653Dt331, 配有 2 kW 的激光器, 可进行激光直接沉积, 辅以全功能的高刚性单体结构的 5 轴联动数控铣床进行高精度的铣削加工, 构成独特的混合加工机床, 最高可比普通粉床中成形速度快 20 倍, 并允许直接铣削最终零件中无法达到的加工部位。

日本 Mazak 公司也推出了增减材复合制造装备。其典型设备 INTEGREX i-400AM 能够进行全面的五轴车铣复合加工, B 轴摆动幅度在 -30°~+210°之间, 同时配置了全 C 轴分度车削主轴及可编程尾座。

2.3 技术应用

激光增材制造技术最早于 2001 年开始应用于美国的舰载歼击机中, 通过钛合金增材制造技术生产出飞机的承力结构件。2011 年英国的南安普顿大学通过增材制造技术生产出包括无人机的机翼、控制面板和舱门的整体框架。

2012 年之后, 钛合金增材制造技术在航空领域的应用取得前所未有的发展, 钛合金零件不仅在飞机制造中得到广泛的应用, 而且新型的钛合金材料开始在火箭、航天飞机等航天装备中得到应用。钛

合金增材制造技术生产的零件大大减少了航天设备之间的焊缝数量, 由于钛合金的强度更高, 使得航天设备的安全性大大提高。

NASA 马歇尔航天中心采用激光增材制造技术制备大量的火箭发动机零件, 包括发生器导管、旋转适配器等。激光增材制造的 RS-25 火箭发动机弯曲接头, 与传统设计相比, 减少 60% 以上的零件数量、焊缝以及机械加工工序。NASA 还提出 AMDE 计划, 对增材制造技术在氢氧发动机整体化设计制造中的应用进行验证。与传统制造方法相比, 采用增材制造技术设计制造的氢氧发动机零件总数减少 80%。

法国泰雷兹阿莱尼亚宇航公司将激光直接沉积制造的铝合金大尺寸遥测及指令天线支撑零件应用于 Koreasat5A 和 Koreasat7 通信卫星的制造。零件已经通过振动验收测试, 展示了很好的动态特性重复性。使用增材制造技术可减重 22%, 缩短生产时间 1~2 个月, 节省经费约 30%, 并可提高产品的性能。

基于激光增材制造工艺的结构拓扑优化设计在航天领域得到应用。结构拓扑优化技术与激光增材制造工艺相结合, 可以发挥出激光增材制造工艺在零件轻量化制造方面的最大优势, 同时能够实现拓扑优化结构的制造。空中客车防务与宇航公司英国分部采用激光增材制造技术制备了欧洲航天局 Eurostar E3000 的铝合金支架(图 3), 用于安装遥测和遥控天线。通过拓扑优化以及激光增材制造工艺, 实现原本由 4 个零件通过 44 个铆钉连接而成支架结构的整体制造, 并且通过优化设计, 在实现 35% 减重的同时使结构刚度提高 40%。该铝合金支架已经完成质量检测, 具备卫星装载飞行的资质。

2012 年, GE 公司收购了 Morris 公司以及其兄弟公司 Rapid Quality Manufacturing。这两家公司

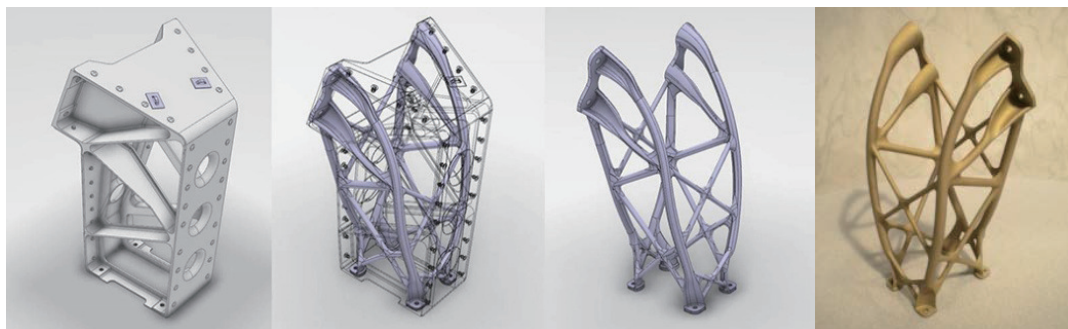


图 3 激光增材制造的 Eurostar E3000 卫星支架

Fig. 3 Laser additive manufactured Eurostar E3000 satellite support

均是增材制造领域的佼佼者,同时也是 GE 公司下一代 LEAP 发动机的零部件供应商。收购 Morris 公司后,GE 立即开始探索增材制造技术的极限,寻找新的应用点。GE 商用发动机获得 FAA 批准的首个增材制造零件为高压压气机温度传感器(T25)外壳(图4)。T25 传感器外壳由钴铬合金制造,保护温度传感器脆弱的电子器件,防止其结冰以及被急速气流损坏。T25 传感器外壳于 2014 年 10 月完成最终设计,2015 年 2 月获得 FAA 认证,在第二周就投入使用。2015 年 4 月 GE 公司宣布,该公司有超过 400 台 GE90-40B 发动机加装了用增材制造技术生产的 T25 传感器外壳。GE 航空公司还采用激光增材制造技术制造了新一代的 LEAP 喷气发动机燃油喷嘴(图5),并于 2015 年服役。

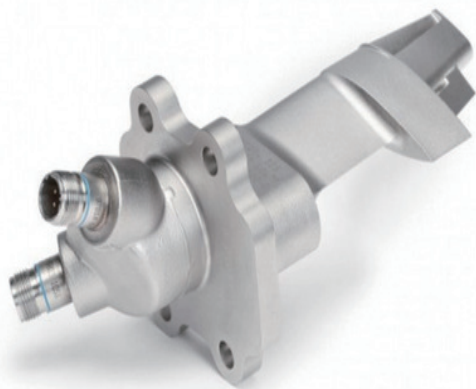


图4 T25 传感器壳体
Fig. 4 T25 sensor housing



图5 增材制造燃油喷嘴
Fig. 5 Additive manufactured fuel nozzle

2015 年 GE 公司设在印度 Chakan 的增材制造工厂开始运营。GE 公司希望该工厂最终使 GE 公司具备每年超过 44000 个燃油喷嘴的增材制造能力。2016 年 4 月,GE 公司斥资 4 亿美元在匹兹堡

建设新的增材制造技术发展中心(The Center for Additive Technology Advancement, CATA), 希望将其打造成为能够为设计和应用提供开发服务的创新中心,通过共享其设施,由公司每个事业部来分担费用,从而整合整个公司的力量,改变各事业部各自投资增材制造、研发效率低下的状况。CATA 将会把精益生产、生产力优化与先进的软件分析结合起来,用于提升增材制造在整个 GE 公司内部的创新能力和使用情况。

2016 年 9 月,GE 以 14 亿美元收购两大金属增材制造设备制造商瑞士 Arcam 公司和德国 SLM Solutions 公司。GE 公司计划通过 GE Store 模式将增材制造技术用于 GE 的所有业务。GE 公司预计到 2020 年增材制造业务将增长至 10 亿美元,在未来十年内节约 30 亿到 50 亿美元的成本。

2016 年 10 月 27 日 GE 公司宣布以 5.99 亿美元的价格收购德国 Concept Laser 公司 75% 的股份。GE 公司将在航空航天、医疗等领域获得或者重塑多个平台的产品销售渠道。

根据已经披露的 GE 公司增材制造计划,很多增材制造的发动机零部件已通过美国联邦航空管理局(FAA)的认证,并且已经在 LEAP 发动机上使用。GE 航空公司将进一步在旗下最先进涡轮螺旋桨发动机(ATP)上应用增材制造零部件。通过增材制造技术,将传统工艺所需的 855 个零件(占到总零件数的 35%)减少为 12 个。可以通过增材制造的零部件分别是:机油箱、轴承座、框架、排气机匣、燃烧室、热交换器和固定流通组件等,该发动机的总压比将达到 16:1,质量减少 5%,油耗将比现在同类型竞争型号低 20% 左右,同时返修周期延长 30% 以上。

英国罗罗公司 1994 年开始与英国 Crankfield 大学一起探索航空发动机机匣的激光直接沉积技术。2008 年初,罗罗公司宣布与 GKN 航宇公司(GKN Aerospace)成立一家合资公司,目的在于为下一代发动机提供低成本的发动机风扇叶片,其中增材制造技术将得到大规模应用。2015 年罗罗公司通过与英国制造技术中心(MTC)所属的新国家增材制造中心合作,利用增材制造打印出了有史以来最大的增材制造发动机组件——遄达 XWB-97 发动机直径 1.5 m 的钛合金前轴承,组件包含的 48 个翼型导叶也采用增材制造技术生产。罗罗公司于 2016 年开发出自动化的涡轮叶片激光增材制造工艺流程,该流程可以实施小的系列生产。

2016 年罗罗公司和 GKN 航宇公司达成协议,

扩展双方在遑达 XWB-84 发动机项目上的合作, GKN 负责为 XWB-84 发动机设计供应高性能中间级压缩机匣(图 6)。该机匣采用包括增材制造工艺和新的焊接技术等最新设计方法和制造技术。首件产品于 2018 年初交付。Trent XWB-84 发动机用来为空客 A350 900 飞机提供动力, 计划于 2020 年初投入使用。



图 6 Trent XWB-84 发动机中间级压缩机匣

Fig. 6 Case of intermediate stage compressor in Trent XWB-84 engine

与很多大型科技企业不同, 罗罗公司自身很少从事基础理论研究工作, 而是依赖与世界顶级大学建立的协同创新体系, 即大学技术中心网络。

普惠公司主要将增材制造用于塑料部件的制造, 作为金属部件的原型和型芯等工艺辅助器材。迄今为止已经制造了超过 10 万件原型零件, 仅在 Pure Power 齿轮传动式涡扇发动机的开发过程中就使用了数百个增材制造零部件的原型。普惠公司采用激光选区熔化制造了 PurePower PW1100G-JM 发动机的管道镜套筒, 可直接使用管道镜检查涡轮壳体和叶片的磨损和损坏状况。在 PurePower 齿轮传动式涡扇发动机开发过程中, 使用增材制造技术生产了压缩机定子和同步环支架。几十件增材制造钛金属和镍金属部件已经通过飞行测试并将应用于庞巴迪和空客飞机。

印度 INTECH DMLS 公司通过 SLM 增材制造技术为印度斯坦航空公司(HAL)生产 25KN 发动机燃烧室机匣。首个增材制造的燃烧室机匣已交付给 HAL 公司, 并通过了用户性能测试。

2019 年 1 月, 金属增材制造部件在 F-22 猛禽上得到应用。犹他州希尔空军基地的仓库维修车间第 574 飞机维修中队在 F-22 猛禽上安装了一个金属增材制造部件(飞机支架)。增材制造能够在短时间内获得维修更换部件, 不再需要订购。这不仅节省费用, 而且减少飞机的维修时间。激光选区

熔化的飞机支架不会被腐蚀, 从订购到交付至仓库再到安装最快需要三天。此外, 维修人员还会使用增材制造的部件来替换驾驶舱总成中易腐蚀的铝部件, 至少还有 5 个金属增材制造部件计划在 F-22 上进行验证。如果能够打印更复杂的部件, 可能会使飞机的维修时间减少 60~70 天。

美国宇航局马歇尔航天飞行中心、格林研究中心、阿姆斯特朗飞行研究中心正在与维珍轨道公司合作开发和测试增材制造的火箭发动机燃烧室部件。他们的目标是制造一个燃烧室, 结合多种材料, 并利用先进的制造工艺。传统的燃烧室制造、测试和交付周期需要数月时间。采用增材制造技术, 交付周期将会大大缩短, 并为发动机零部件提供新的设计理念和制造机会。维珍轨道公司使用了增/减材混合机床对零部件进行制造与精加工。在 2018 年末和 2019 年初, 使用高压液氧/煤油推进剂对燃烧室进行了测试。在近 24 次 60 s 的测试发射中, 该实验装置成功地提供了超过 8890 N 的推力。

2019 年 7 月, 美国 Carpenter 技术公司和比利时 BMT 航空航天国际公司合作开发了一种金属增材制造航空齿轮。零件由 Carpenter 技术公司的业务单位 Carpenter 增材制造公司生产, 使用其高强度的定制 465[®] 不锈钢增材制造而成。该产品的合作研发表明, 在原材料、生产、验证和设计方面的合作能够迅速将具有潜力的新产品实现商业化。

2019 年 8 月, 发动机制造商 Cobra Aero 与英国金属增材制造公司 Renishaw 合作, 成功优化了飞机和摩托车发动机的设计流程。Cobra 的团队与 Renishaw 的工程师合作, 优化了一种无人机发动机气缸的设计。重新设计的部分是一个用来改善气流的复杂网格结构, 并将各种组件合并成一个单个轻质部件。通过使用金属增材制造, Cobra Aero 能够生产出具有复杂晶格结构的单一部件, 性能优于传统制造技术生产的组件。Cobra Aero 公司预判, 金属增材制造将成为其主导制造方法。

据美国空军实验室 2019 年 8 月 22 日消息, AF-9628 钢的增材制造零件在极限抗拉强度方面比传统增材制造合金提高 20% 左右。AF-9628 是一种高强度和高韧性的合金钢, 也叫 Rachel 钢, 它不含钨, 比 Eglin 钢和 HP-9-4-20 等其他一些高性能钢合金的价格更低; 但它比常规弹药中使用的普通等级钢更昂贵。美国空军实验室的研究确定 AF-9628 是增材制造的最佳材料。其增材制造的力学性能好, 没有发现裂纹的迹象, 与传统制造的部件非常相似。在强度增加的同时并没有变脆, 满

足 10% 伸长率要求。采用激光选区熔化制造的复杂零件,包括几个复杂的弹丸、钢瓶。制造的零件适合于武器应用,能够使未来的穿透武器具有理想的爆炸外形,最终用于制备质量更轻的弹药,使飞机可以携带更多的武器。

3 国内激光增材制造技术发展现状和趋势

3.1 工艺研究

3.1.1 激光选区熔化工艺研究

西安交通大学在激光增材制造技术的基础研究、装备制造、相关软件开发以及技术应用等方面展开全方位研究,尤其是在应用方面展开深入研究,已将激光增材制造技术应用于快速模具制造、汽车零部件制造等技术领域。并且为其在航空空心涡轮叶片、航天发动机推进器等核心零部件制造方面的应用作了基础准备。除此之外,还在陶瓷材料的激光增材制造基础研究和技术应用方面展开大量深入的研究,取得了丰硕的研究成果。

西安铂力特激光成形技术有限公司现已掌握了钛合金、铝合金、高温合金等材料增材制造工艺,组织和性能数据库完备。流道类零件可成形的小孔直径最小仅为 0.3 mm 左右,且能保证孔和流道的流通性;薄壁零件的最小薄壁尺寸约为 0.2 mm,大面积薄壁的尺寸精度可以控制在 ± 0.3 mm 左右;整体成形零件的整体尺寸精度基本上可以达到 ± 0.2 mm,粗糙度可达 $R_a 3.2 \mu\text{m}$ 以下。无论是工艺技术还是装备水平,铂力特公司都已经迈入工程化应用阶段。

华中科技大学研发出系列增材制造专用材料制备方法,并实现产业化,包含聚合物、金属、陶瓷、铸造型(芯)等材料及其复合材料,研发了系列材料制备成形一体化工艺与装备,包括建立材料制备成形一体化的数字化表达方法、发明材料制备成形一体化过程多状态测量与形性调控方法、国际独创多材料激光 3D 打印一体化制备成形工艺与装备等。

中国航发北京航空材料研究院系统开展了激光选区熔化用钛合金和铝合金超细粉在飞机复杂结构上的工程化应用研究,积累了粉末特性评价、增材成形工艺、成形后热处理与热等静压、无损检测、冶金组织和缺陷分析、力学性能测试、零件性能验证等各环节的研究经验和基础数据。针对航空发动机燃油喷嘴、预旋喷嘴、涡流器、轴流机匣、轴承座、整体导向器、涡轮叶片、管接头、阻尼环等

典型复杂结构,采用常规铸造高温合金、铝合金、钛合金、不锈钢以及钛铝金属间化合物、单晶高温合金、铌硅超高温合金等各种材料,深入开展粉末成分设计和粉末制备、激光选区熔化工艺、后处理及组织性能等研究,试制出十多种典型零件,为激光选区熔化技术在航空发动机上的应用奠定了基础^[14]。

南京航空航天大学以选区激光熔化(SLM)精密增材制造技术为主线,开展了航空航天难加工金属材料构件激光精密增材制造应用基础研究,在激光精密增材制造装备研发、专用金属粉末设计制备、激光成形工艺及机理、高性能复杂金属零件控制与控性等方面积累并凝练了关键技术及科学理论,实现了激光成形零件综合性能提升及实际工程应用。

北京星航机电装备有限公司掌握了钛合金、高温合金、铝合金等材料的增材制造工艺,重点突破了 TA15 钛合金、GH99 高温合金激光选区熔化成形工艺技术,形成了金属粉末原材料、产品制造、检测规范等多项企业标准。

大连理工大学针对增材制造铝合金异形群孔格栅结构外表面和内孔表面磨粒流抛光,设计了格栅件磨粒流加工夹具,建立了内外表面一体化磨粒流抛光技术方案,采用混合磨粒进行格栅表面和内孔均匀一体化加工,磨粒介质采用含有 24[#](20%)、80[#](80%)SiC 混合磨粒介质。不仅有效去除了格栅表面附着的金属球、粉末颗粒,而且显著降低了工件表面粗糙度值。

中国科学院金属研究所致力于增材制造用高温合金粉末、钛合金粉末等高性能金属粉末的研发及成形构件组织性能调控技术研究,开发出激光增材制造专用高温合金粉末、钛合金粉末等材料,突破了激光选区熔化成形技术用超细钛合金、高温合金粉末的洁净化制备技术,粉末特性达到国外进口粉末水平。

西安欧中材料科技有限公司专业从事金属球形粉末及制件生产与服务。针对激光增材制造的球形金属粉末生产部署了国际先进水平国内首条超高速 (30000 r/min) 等离子旋转电极雾化 SS-PREPTM 金属球形粉末工业化生产线。在钛合金和高温合金球形粉末制备技术、PREP 设备装置设计优化等方面拥有核心技术 100 余项。粉末产品通过了中国航发商用发动机有限责任公司、航天材料及工艺研究所等 20 余家航空航天单位供方评审。

3.1.2 激光直接沉积工艺研究

北京航空航天大学在飞机钛合金大型主承力结构件激光快速成形工艺研究、工程化成套装备研

发与装机应用关键技术攻关等方面取得突破性进展,提出大型金属构件激光直接成形过程“内应力离散控制”的新方法,解决了大型金属构件激光快速成形过程翘曲变形与开裂的“瓶颈难题”,突破了激光快速成形钛合金大型结构件内部缺陷和内部质量控制及其无损检测关键技术,飞机构件综合力学性能达到或超过模锻件^[15]。

西北工业大学团队采用激光增材制造技术打印了最大尺寸3 m、质量达196 kg的飞机钛合金左

上缘条。该成品在放置了一个月之后,最大变形量小于0.8 mm,表明其成形精度和变形控制都达到了很高的技术水平。

沈阳航空航天大学提出基于分区扫描成形的激光增材制造工艺方法(图7)。通过反馈沉积层面温度分布,动态规划激光扫描轨迹,显著减小沉积过程温度梯度,降低热应力、约束应力和晶格储存能,离散成形过程的残余应力,有效地控制了沉积过程零件的变形和开裂。

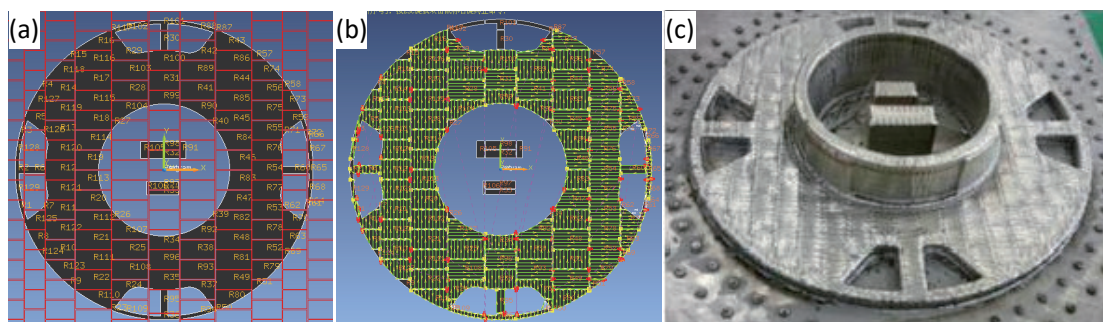


图7 基于分区扫描成形的激光增材制造工艺(a)、(b)分区扫描轨迹规划;(c)增材制造毛坯

Fig. 7 Laser additive manufacturing process based on zonal scanning forming (a), (b) zonal scanning trajectory planning; (c) additive manufactured blank

有研工程技术研究院有限公司开展了钛合金整体叶盘激光修复、激光增材制造 Ti_2AlNb 基合金开裂控制及组织性能调控、TC11/ Ti_2AlNb 双合金整体叶盘及TA15/ Ti_2AlNb 异种材料进气道一体化成形研究,突破了修复界面、异种材料界面质量控制及复杂外形一体化控制难题,激光修复的飞机钛合金整体叶轮及不同材料飞机部件获得实际应用,激光增材制造的TA15钛合金薄壁进气道通过地面试验考核。

北京航空材料研究院是中国航空发动机集团增材制造技术创新中心依托单位。掌握粉末材料成分设计和控制技术,拥有较为完善的粉末性能检测体系。采用激光直接沉积增材制造的镍基双合金涡轮整体叶盘通过超转试验考核,增材修复的伊尔76飞机起落架获得批量应用。研制出3D打印制件超声扫描与评价系统,建立了检测标准与对比试块。成果应用于飞机型号装机件批量检测,累计检测滑轮架、框架、短梁等增材制造零件近500件。对增材制造材料力学行为表征与评价、损伤失效分析形成了一整套组织性能损伤关联性研究、疲劳定量化分析以及寿命预测的理论、技术和方法集成。

3.2 激光增材制造设备

3.2.1 激光选区熔化设备

西安铂力特激光成形技术有限公司自主开发

了激光选区熔化成形装备系列BLT-S300和BLT-S200,激光高性能修复系列BLT-C600和BLT-C1000。其中S300型设备通过CE认证。公司累计交付各类增材制造设备60余台,广泛应用于航空、航天、船舶、兵器、核工业、汽车和医疗等领域。

湖南华曙高科技有限责任公司主攻增材制造主流技术——选择性激光烧结/选区激光熔融装备制造、材料生产和加工服务,持续开展高频度自主创新与实践,先后研制出全球最快、唯一可烧结PA6材料和开源可定制化的7型11款高分子、金属材料工业级增材制造装备,以及20余款增材制造专用高分子及金属粉末材料。华曙的所有设备均采用开源性系统平台,客户可根据自身需求调整系统参数,还可以利用华曙设备进行二次研发,开发新的材料、工艺及应用。

北京星航机电装备有限公司在增材制造设备研发方面,实现光路系统设计、高精度运动控制、设备电气控制等一系列技术突破,完成8台工业级、3台小型金属SLM设备小批量生产;在非金属材料增材制造设备方面,研制生产2台500 mm非金属SLS设备,及1台700 mm非金属SLS设备。

北京易加三维科技有限公司专注于研发、生产制造工业级SLS、SLM和SLA型3D打印设备,聚焦于工业3D打印装备并围绕3D打印工艺应用的

加工服务业务和产业应用,与传统制造和桌面型3D打印形成差异化。目前已经成功开发出金属材料打印、工程塑料材料打印、砂型及蜡型材料打印、光敏树脂材料打印等5大系列、20余种机型的产品链条。

北京工业大学2014年研发出国内首台基于DLP技术的面曝光3D打印设备,并通过北京市科委的验收。2016年开发出基于粉末床技术的金属3D打印设备。

上海航天设备制造总厂有限公司研制出铺粉型激光选区熔化增材制造设备,经过多代迭代已经形成成熟的市场型号。先后研制了多激光束金属熔化增材制造设备(成形空间 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$)、标准型激光选区熔化增材制造设备(成形空间 $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}\times 280\text{ mm}$)、大幅面选区熔化增材制造设备(成形空间 $350\text{ mm}\times 350\text{ mm}\times 300\text{ mm}$)。此外,鉴于国外数据处理软件以及控制软件对用户处于封闭状态,用户无法根据工艺研究需求对其中的相关工艺参数进行更改,团队自主研发了基于三维数字模型分层切片处理软件及全流程金属增材制造设备控制软件。

3.2.2 激光直接沉积设备

南京中科煜宸激光技术有限公司自主研发6 kW光纤激光器、全自动变焦同轴送粉喷头、高稳定长程送粉器、高效惰性气体循环净化箱体等核心器件,形成具有自主核心知识产权的高性能合金激光定向能量沉积3D打印系列化装备,包括:LDM 2020、LDM 8060、LDM 1500、LDM 4000,并成功实现航空航天整体叶盘、起落架等结构件及汽车发动机的3D打印制造。

上海航天设备制造总厂有限公司研制出机器人型同轴送粉激光直接沉积增材制造设备(成形空间 $1500\text{ mm}\times 1200\text{ mm}\times 900\text{ mm}$)。团队自主研发了基于三维数字模型分层切片处理软件及全流程金属增材制造设备控制软件。

3.3 技术应用

激光直接沉积主要应用于承载结构件的研发和小批试制。

北京航空材料研究院将激光直接沉积技术应用于伊尔76飞机超高强度钢起落架作动筒修复,修复的前起作动筒经900 h起落飞行,状态良好,修复的起落架已实现批量应用。激光直接沉积修复的伊尔76飞机襟翼滑轨、环控导管,军用飞机端轴颈、摇臂、螺栓、扭力臂,以及民航飞机转轴、阀芯等零件也实现了批量应用。此外,将激光选区熔

化应用于航空涡轴发动机导向叶片高温合金导流管的成形制造,并实现了批量应用。

中国航空制造技术研究院激光选区熔化技术在国内率先实现装机应用,并于2014年先后向航空、航天、兵器等行业领域推广应用。

航空工业成都飞机设计研究所通过设计及需求牵引,组织国内优势单位联合攻关,将激光选区熔化成形的发动机舱进、排气门格栅结构应用于某型飞机。

沈阳飞机设计研究所基于设计/制造一体化新概念结构创新技术研究,通过结构设计牵引激光增材制造技术发展,通过工程化应用验证促进技术成熟度的提升,实现了8种金属材料、10类3D打印制造结构件(框、梁、肋、接头、耳片、起落架)在4个飞机型号或项目中的应用。

航空工业第一飞机设计研究院经过近10余年的自主设计和创新,在飞机大型整体钛合金主承力结构件激光增材制造及装机应用研究方面取得突破性进展,大型飞机钛合金外主襟翼滑轮架、尾翼方向舵支臂两个零件得到装机应用。

航空工业直升机所在直升机前期设计阶段,吹风模型、驾驶舱人机功效模型等大量采用激光3D增材制造技术完成数模加工。通风格栅结构、淋雨密封结构、进气道多腔体结构等功能结构及复杂外形结构件已实现3D打印加工制造及装机,某些主受力结构件,如起落架、多管路辅助接头也进行了3D打印预先研究。

2005年来,北京航空航天大学研制生产了飞机机身主承力框、翼身根肋、主起落架等100余种大型整体钛合金及超高强度钢承力关键构件,在我国舰载机、大型运输机、C919大型客机、四代机等7个重点型号飞机及大型运载火箭等5型火箭/导弹、新型卫星、燃气轮机/汽轮机等10多型重大装备研制和小批量生产中得到实际应用。

除航空领域外,激光直接沉积技术还应用于航天等行业。

西安铂力特激光成形技术有限公司针对航空航天极端复杂的精密构件加工制造问题,利用SLM技术,解决了随形内流道、复杂薄壁、镂空减重、复杂内腔、多部件集成等复杂结构问题,每年可为航空航天领域提供复杂精密结构件8000余件。

鑫精合激光科技发展(北京)有限公司采用激光选区熔化技术自主研发制备了大尺寸薄壁钛合金点阵夹层结构件——集热窗框,满足了火星车产品的技术要求,保障了火星车产品的顺利研发与实验。

上海航天设备制造总厂有限公司采用激光增材制造技术制造的火箭箱间断支架、卫星散热器、导弹导引头关键零件等产品,已实现型号应用。

北京星航机电装备有限公司在产品结构优化设计、创新成形工艺、复合增材制造等方面开展了深入的工艺技术验证,积极推动增材制造技术在航天舱段类结构件、舵面产品上的应用,部分产品通过地面试验及飞行试验验证。

北京机电工程研究所已实现大尺寸薄壁骨架舱段结构的激光直接沉积和小型复杂零部件的激光选区熔化制造,提高了产品的研发效率,缩短了研发周期。目前相关产品,包括舵面翼面、支架等的技术成熟度达到5级。

华中科技大学激光增材制造技术在多家企业得到应用,提升了传统制造业水平,效果显著。通过增/减制造具有随形冷却水道的梯度材料模具,保证了模具的整体性能,成果在广东科龙模具和湖北三环锻造等企业应用,内嵌冷却水道的注塑模硬度提高2倍、冷却周期缩短68%以上,模具使用寿命提高3倍,再制造模具成本仅为重新制造的10%。

3.4 国内外激光增材制造重点领域的技术发展趋势研判

增材制造材料和零件的性能要求不断提高,推动激光增材制造工艺方法不断发展丰富。增材制造的材料由固溶强化高温合金延伸至固溶时效高温合金,由普通钛合金延伸至高温钛合金、钛铝金属间化合物,由单一金属材料延伸至金属基/陶瓷基复合材料、梯度材料。增材制造的零件由次承载、功能结构向承载、结构功能一体化结构发展,零件增材组织由等轴晶向定向凝固、单晶组织发展。“材料-结构-性能一体化增材制造”整体性概念开始被接受,并引导增材制造走向材料-结构-工艺-性能一体化“并行模式”^[16]。材料性能提高,伴随增材制造工艺性降低;零件组织性能提高,伴随增材制造难度增大;这些都催生多能量场、多物理场增材制造新工艺的发展^[17]。由于航空领域对激光增材制造结构的高可靠、长寿命要求,在一定程度上会制约其在飞机、发动机关键部位的应用。可以推测,增材制造发展重点必然会转向增材制造产品的冶金质量、力学性能及其稳定性控制方面。另外,基于增材制造技术,设计制造一体化开发的散热器、框梁等新型结构开始应用于飞机制造^[18]。激光选区熔化制造复杂、轻质、新型次承力或功能性结构也会成为国内外增材制造技术的重

要发展方向^[19]。

在设备方面,增减材复合加工设备和技术成为一个重要发展方向,对于提高制造效率、降低制造成本会产生重要影响。大尺寸、超大尺寸激光选区熔化设备正在成为国内外设备制造商竞相开展研发的增材制造设备。增材制造设备的智能化,包括在线监测、参数自整定控制等功能的研究开发,正成为增材制造设备的研发热点。尤其是激光增材制造的熔池动态监测、粉末床和熔融层的可见光检测技术,近年来发展迅速,其中熔池动态监测已应用于工艺反馈控制。

在增材制造制件评价技术方面,针对增材制造组织、结构开发专门的超声波、工业CT技术是一个重要研究方向。基于损伤失效分析、寿命预测研究的增材制造结构力学行为研究,以及基于元件、单元体和特征结构的结构使用性能考核验证技术研究,正在引起越来越多的关注。

4 航空装备激光增材制造路线图研究

4.1 2035年发展目标

4.1.1 需求

激光增材制造基于数模切片通过逐层堆积实现零件近净成形制造,无需模具,节省材料,缩短研制和生产周期,降低制造成本。特别适合复杂形状零件、梯度材质与性能构件、复合材料零件和难加工材料零件的制造,还支持结构设计创新和结构功能一体化制造。

航空航天领域的零件,外形复杂多变,材料硬度、强度等性能要求较高,难以加工且成本较高。而新生代飞行器正在向高性能、长寿命、高可靠性以及低成本的方向发展,采用整体结构、复杂大型化是其发展趋势。正是基于此发展趋势,激光增材制造技术越来越受到航空航天制造商的青睐。

航空发动机燃油喷嘴、轴承座、控制壳体、叶片等零件,内部具有复杂油路、气路和型腔,为提高效能而进行结构创新设计,更增加了结构的复杂性和制造难度。飞机发动机舱进、排气门格栅结构,武器舱的舱门支座等部件,结构非常复杂,这些新型复杂构件的成形对基于激光选区熔化的增材制造技术具有迫切需求。

航空发动机各类机匣、压气机/涡轮整体叶盘、尾喷调节片等结构,形状复杂,为提高效能甚至需采用异种或梯度材料结构。飞机超高强度钢和不锈钢接头、滑轨、起落架,铝合金承力框、梁,钛合

金框、支座、滑轨、滑轮架、筋壁板等承力构件,高马赫飞行器翼舵格栅结构承载骨架,为提高减重和承载效能须进行拓扑优化结构创新设计,结构的复杂性和制造难度增加,采用传统工艺制造难度大,对激光直接沉积增材制造具有明确技术需求。

高推重比发动机涡轮进口温度的提高,要求采用超高温金属间化合物以及金属基/陶瓷基复合材料等新型高温结构材料。新型高温/超高温材料零部件的研制对激光增材制造技术提出了潜在需求。

飞机、发动机某些带局部凸台、耳片等特殊结构的承力构件,采用锻造工艺无法保证局部组织和性能;大型飞机的超大规格钛合金承力框,超出现有锻造设备的加工能力。对锻造+增材制造/增材连接的复合制造技术具有明确技术需求。

激光增材制造技术经过近年的项目支持,基本解决了原材料、成形工艺、复杂零件制造等关键技术,开始获得应用。目前制约激光增材制造大规模应用的瓶颈之一是疲劳问题。需要特别重视激光增材制造疲劳问题的原理性研究。

为了提高航空产品激光增材制造的工艺过程稳定性和质量,需要发展基于熔池动态监测、粉末床和熔融层可见光检测的在线监测、检测技术。

航空领域对激光增材制造的需求主要体现在以下几个方面:

(1) 飞机钛合金框梁重要承力结构高性能高可靠激光直接沉积;

(2) 飞机超高强度钢起落架抗疲劳长寿命激光直接沉积;

(3) 飞机钛合金、铝合金格栅点阵复杂结构激光选区熔化;

(4) 航空发动机燃油喷嘴类零件激光选区熔化;

(5) 航空发动机涡流器、叶片类零件激光选区熔化;

(6) 航空发动机控制、附件壳体类零件激光选区熔化;

(7) 航空发动机机匣、轴承座类承力零件激光选区熔化;

(8) 航空发动机整体叶盘/机匣类承力零件激光直接沉积;

(9) 飞机、发动机超大规格结构锻造+增材制造/增材连接的复合制造;

(10) 激光增材制造疲劳问题的原理性研究;

(11) 激光增材制造过程的在线监测、检测技

术研究。

4.1.2 目标

突破飞机、发动机材料激光增材制造缺陷、组织、力学性能控制关键技术,掌握粉末设计与制备技术,制定材料、工艺、检测标准,建立工艺、性能数据库和冶金图谱,掌握零件产品质量控制技术,制定零件产品技术标准。在产品增材制造质量控制技术、产品技术标准研究和零件充分考核验证的基础上,推进激光增材制造在航空、航天、船舶、核工业等重点制造领域的应用。至2035年,在航空领域普通金属激光增材制造全面量产应用;金属间化合物增材制造的组织-性能-变形控制技术全面突破,性能验证基本完成,功能考核部分完成,部分产品进入量产。铌-硅、陶瓷基材料增材制造物理冶金原理得到揭示,性能验证基本完成,部分产品开始装机应用。

4.2 2035年发展路线图

4.2.1 重点产品

(1) 飞机: 钛合金框梁重要承力结构; 超高强度钢起落架外筒; 钛合金、铝合金格栅点阵复杂结构。

(2) 发动机: 航空发动机燃油喷嘴类零件; 航空发动机涡流器、叶片类零件; 航空发动机控制、附件壳体类零件; 航空发动机机匣、轴承座类承力零件; 航空发动机整体叶盘/机匣类承力零件。

表2为2035年航空领域激光增材制造技术发展路线图。

4.2.2 关键共性技术

(1) 激光选区熔化用高品质粉末成分设计与制备技术

激光增材制造成形制件的组织与铸件、塑性成形件具有显著差别,为获得相当的性能水平,通常需要对材料成分进行设计调整,即开发适合增材制造的专用材料。为获得良好的成形工艺性、优良的制件内部和外部质量,激光选区熔化增材制造工艺对所采用的粉末原材料的质量,如粉末的球形度、空心粉率、气体含量、夹杂率、粒径分布、流动性等,均提出严格的要求。加之所采用的材料为了提高力学性能,均采用特殊的成分体系,导致其液态和固态塑性加工性能较差。这些都增加了高品质粉末制备的挑战性。

(2) 激光增材制造的缺陷控制和组织性能改善技术

飞机、发动机优良的综合性能的获得,通常以牺牲材料的热加工性为代价。用于燃油喷嘴、涡流

表 2 2035 年航空领域激光增材制造技术发展路线图

Table 2 Development roadmap of laser additive manufacturing technology in aviation field to 2035

重点方向 Key directions	2025年 2025	2030年 2030	2035年 2035
1: 复杂结构 激光选区熔 化增材制造	技术: 普通金属增材制造的组 织-性能-变形控制技术全面突 破, 性能验证基本完成, 功能 考核部分完成, 部分产品进入 量产。金属间化合物增材制造 物理冶金原理得到揭示。	技术: 普通金属增材制造全面 量产应用。金属间化合物增材 制造的组-性能-变形控制技术 全面突破, 性能验证基本完 成, 功能考核部分完成, 部分 产品进入量产。铌-硅、陶瓷基 材料增材制造物理冶金原理得 到揭示。	技术: 金属间化合物增材产品 完成性能验证、功能考核、定 型, 进入全面批量应用。铌- 硅、陶瓷基材料增材制造的组 织-性能-变形控制技术全面 突破, 性能验证、功能考核部 分完成, 部分产品开始进入应 用。
2: 承力结构 激光直接沉 积增材制造	应用: 增材制造的航空飞机次 承力结构和发动机静止零部件 得到大量应用。	应用: 增材制造的航空飞机重 要承力结构和发动机旋转零部 件得到大量应用。	应用: 增材制造的航空新材 料、新结构零部件得到应用。
3: 耐高温新 型材料增材 制造	1: Selective Technology: The control laser melting technology of microstructure, of complex property and deformation for structures additive manufacturing of	2: Laser ordinary metal has made a direct metal comprehensive breakthrough, The control technology of deposition of the performance verification has microstructure, property and load-bearing been basically completed, the deformation for additive and products related have structures functional assessment has been manufacturing of intermetallic entered into full batch	3: Additive partially completed, and some compound has made a application. The control manufactur- products have entered mass comprehensive breakthrough, technology of microstructure, ing of high production. The physical the performance verification has property and deformation for temperature metallurgy principle of been basically completed, the additive manufacturing of Nb- resistant new intermetallic compound additive functional assessment has been Si and ceramic based material material manufacturing has been partially completed, and some additive manufacturing has revealed. products have entered mass made a comprehensive Application: The secondary production. The physical breakthrough. The performance load-bearing structures of metallurgy principle of additive verification and functional aircraft and static engine parts manufacturing in Nb-Si and assessment of these materials made by additive manufacturing ceramic matrix material has have been partially completed, have been widely used. been revealed. and some products have begun Application: The important to be applied. load-bearing structures and Application: New aeronautical engine rotating parts of aircraft materials and new structural made by additive manufacturing parts made by additive have been widely used. manufacturing are applied.

器等零件的高温合金、钛合金、铝合金、马氏体不锈钢等材料, 在凝固过程中, 发生裂纹的倾向性普遍较高, 容易导致制件报废, 或严重降低制件的可靠性^[20-21]。对于钛合金的增材制造, 产生气孔的概率很高。增材制造采用逐层堆积, 如工艺参数选取

不合适, 容易在层间产生未熔合或熔合不充分等缺陷。飞机重要承力结构, 要求长寿命、抗疲劳、高可靠。发动机热端部件还对持久、蠕变等性能提出了要求, 这就要求对增材制造的组织形态进行严格的控制。因此, 需要通过工艺优化及合适的后续处

理,防止缺陷产生、获得优良组织,保证制件性能。由于工艺参数的调整,对于不同性质缺陷的产生、组织形态和力学性能的变化等所产生的影响十分复杂,最优的工艺窗口可能很窄,必须经过实质上的一一个多目标优化过程才可能确定。

(3) 复杂结构精确成形的增材制造应力变形控制技术

增材制造过程的逐层堆积引起热应力和变形的累积。每层材料的熔融、凝固均会产生一次凝固收缩。因此,增材制造的制件内部存在较大的应力,这会引起制件开裂或宏观变形。对于飞机框梁、起落架等大投影面积、大厚度结构,以及发动机燃油喷嘴、涡流器、机匣等复杂、薄壁结构,应力变形问题更为突出,导致制件外观尺寸和内部通道等形状控制难度大为增加。因此,需要通过优化制件的空间摆放,采用合适的沉积策略、工艺支撑,优化成形工艺参数、采用合适的预热及后热处理,才能实现对应力变形的有效控制。

(4) 激光选区熔化成形复杂结构的评价与测试技术

激光增材制造技术应用于飞机重要承力和功能结构,其内部缺陷、组织特点不同于锻造、铸造结构,导致传统的检测、评价方法和技术标准未必适用。激光增材制造技术应用于发动机燃油喷嘴、涡流器、轴承壳体等带内部流道或者中空薄壁类的复杂结构,这些结构的内部流道角度、形状和尺寸公差、表面粗糙度,对结构功能均有重要影响;但是这些结构特征采用常规的检测技术难以检测,必然会对增材制造技术的推广应用造成限制。由于激光选区熔化成形材料及结构的组织、缺陷有其特殊性,常见的气孔、未熔合、裂纹等缺陷的尺寸仅为微米量级,采用常规的方法难以检测,另外,材料的组织特征及缺陷的类型、尺寸、分布等对结构的力学性能、可靠性和使用寿命影响还缺乏系统性研究。这些问题严重限制了激光增材制造技术在航空领域应用。

(5) 增材制造元件级及零件级力学性能考核

由于增材制造与传统的铸造、锻造组织缺陷存在明显差异,使增材制造构件的力学性能及其断裂行为存在显著不同。对于增材制造整体叶盘,如何表征材料及整体叶盘的力学行为也是亟待解决的科学问题之一。增材制造整体叶盘的力学行为研究,包括增材制造材料力学行为、元件级(单元体)力学行为、零件典型件力学行为研究。对于单元体力学行为、零件典型件力学行为,国内还没开展相

关研究,国外RR、GE、MTU等机构的研究也鲜有公开报道,仍处于保密阶段。

5 结论与建议

(1)增材制造特别适合零件的快速研制、快速验证和设计改进,并且支持结构设计创新,因此在飞机钛合金承力框、滑轮架和超高强度钢起落架外筒等重要承力结构以及飞机舱门连接件、辅助动力舱进气门、排气门格栅结构、武器舱门支座、横梁等复杂结构的制造中得到应用,在航空发动机燃油喷嘴、涡流器、涡轮叶片、传感器壳体、燃油控制系统壳体等复杂结构的制造中也得到批量应用。不仅缩短了零件研制周期,降低了制造成本,而且增加了设计的自由度,通过结构功能一体化设计创新,取得了质量减轻、承载耐温能力提高、工作效能提高等效果。一方面加快了飞机、发动机的研制进度,另一方面由于采用结构功能一体化制造,大大减少了零件数量,显著提高了装备的可靠性。

(2)国内增材制造技术发展仍存在短板和不足,制约着增材制造技术创新及产业化应用。增材制造设备激光器、光路、加工头等核心器件自主保障能力不足,零件数模切片、扫描路径规划、实时监测控制软件研发能力欠缺,限制了工艺创新的上升空间。对传统材料和新材料增材制造组织、性能、缺陷、应力变形发展规律的研究不深入,导致制件增材制造的控性控形工艺开发效果不佳。对于粉末、丝材原材料和增材制造工艺过程的质量控制以及制件性能评价研究不充分,导致相关材料规范、工艺标准、检测方法、产品技术标准的缺失,严重制约增材制造的批量化规模化应用推广。

(3)为推动我国增材制造技术在航空领域的发展和应用推广,需要从科研项目支持、科研生产条件配套、设备研发能力提升等方面提供全方位的战略保障。具体建议如下:

① 设立不同类型科研项目支持技术研发

结合在研、在役飞机、发动机型号研制和性能提升,设立型号课题,针对已具备较好研究基础的TC4钛合金、AlSi10Mg铝合金、GH3536高温合金增材制造技术,支持开展工程化应用研究,解决产品质量控制和产品技术标准关键技术,推动技术的规模化量产应用。针对预研飞机、发动机型号研制需求,设立预先研究课题,针对高强高韧钛合金、高铝钛高温合金等高性能材料增材制造技术,支持开展控性、控形关键技术研究,研制典型零件并开展

相关考核试验,推动技术型号应用。面向未来飞机、发动机型号需求,设立应用基础研究课题,支持开展超高温结构材料、新型材料、新型结构增材制造技术研究,为新概念航空装备设计制造储备技术基础。

② 配套科研条件建设

根据型号课题、预先研究课题、应用基础研究课题需要,进行配套科研条件建设,建立各阶段研究所需设备、计算机软件等硬、软件设施。

③ 支持相关基础元器件、设备集成、软件开发

支持提升国内增材制造设备集成能力、重要核心元器件的研发制造能力,支持开展国内数模切片软件、扫描策略规划软件、工艺参数控制软件、模拟仿真软件的优化、开发,提高装备和工艺的智能水平。

参考文献:

- [1] 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):41-45.
TIAN Z J, GU D D, SHEN L D, et al. Application and development of laser additive manufacturing technology in aeronautics and astronautics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 41-45.
- [2] 林鑫,黄卫东.应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J].中国材料进展,2015,34(9):684-688.
LIN X, HUANG W D. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field[J]. Materials China, 2015, 34(9): 684-688.
- [3] 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 X, RUAN X Q. Application and development of additive manufacturing technology in aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 70-75.
- [4] 熊华平,郭绍庆,刘伟,等.航空金属材料增材制造技术[M].北京:航空工业出版社,2019.
- [5] NIKOLAY K T, SERGEI E M, IGOR A Y, et al. Balling processes during selective laser treatment of powders[J]. Rapid Prototyping Journal, 2004(10): 78-87.
- [6] MEIER H, HABERLAND C. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2008, 39(9): 665-670.
- [7] CHILDS T H C, HAUSER C, BADROSSAMAY M. Mapping and modeling single scan track formation in direct metal selective laser melting[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 191-194.
- [8] 陈玮,李志强.航空钛合金增材制造的机遇和挑战[J].航空制造技术,2018,61(10):30-37.
- CHEN W, LI Z Q. Additive manufacturing of aerospace titanium alloys: opportunities and challenges[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 30-37.
- [9] GRIFFITH M L, SCHLIENGER M E, HARWELL L D, et al. Understanding thermal behavior in the LENS process[J]. Materials & Design, 1999, 20(2): 107-113.
- [10] GUNATNNA M, HENYR S, CLETON F, et al. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation[J]. Materials Science & Engineering:A, 1999, 271(1/2): 232-241.
- [11] GÄUMANN M, BEZENCON C, CANALIS P, et al. Single-crystal laser deposition of superalloys: processing-microstructure maps[J]. Acta Materialia, 2001, 49(6): 1051-1062.
- [12] LIU C M, TIAN X J, TANG H B, et al. Obtaining bimodal microstructure in laser melting deposited Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe near β titanium alloy[J]. Materials Science & Engineering:A, 2014, 609: 177-184.
- [13] 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 Q, LU Z L, HUANG F X, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(12): 26-31.
- [14] LI N, HUANG S, ZHANG G D, et al. Progress in additive manufacturing on new materials: a review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35: 242-269.
- [15] 王华明.高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J].国防制造技术,2013(3):5-7.
Wang H M. Additive manufacturing of high-performance metallic structures opens a new page of manufacturing for the national defense industry[J]. Defense Manufacturing Technology, 2013(3): 5-7.
- [16] GU D D, SHI X Y, POPRAWA R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science 2021, 372, eabg1487.
- [17] 姚喆赫,姚建华,向巧.激光再制造技术与应用发展研究[J].中国工程科学,2020,22(3):63-70.
YAO Z H, YAO J H, XIANG Q. Development of laser remanufacturing technology and application[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 63-70.
- [18] 吴斌,王向明,玄明昊,等.基于增材制造的新型战机结构创新[J].航空材料学报,2021,41(6):1-12.
WU B, WANG X M, XUAN M H, et al. Structural innovation of new fighter based on additive manufacturing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(6): 1-12.

- [19] 杨胶溪, 吴文亮, 王长亮, 等. 激光选区熔化技术在航空航天领域的发展现状及典型应用 [J]. *航空材料学报*, 2021, 41(2): 1-15.
- YANG J X, WU W L, WANG C L, et al. Development status and typical application of selective laser melting technology applications in aerospace field[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(2): 1-15.
- [20] 王迪, 钱泽宇, 窦文豪, 等. 激光选区熔化成形高温镍基合金研究进展 [J]. *航空制造技术*, 2018, 61(10): 49-60,67.
- WANG D, QIAN Z Y, DOU W H, et al. Research progress on selective laser melting of nickel based superalloy[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(10): 49-60,67.
- [21] 刘小辉, 刘允中. 激光选区熔化成形高强铝合金晶粒细化抑制裂纹研究现状 [J]. *材料工程*, 2022, 50(8): 1-16.
- LIU X H, LIU Y Z. Research status of crack inhibition via grain refinement of high-strength aluminum alloys fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(8): 1-16.

收稿日期: 2022-12-30; 修订日期: 2023-01-06

通讯作者: 郭绍庆(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事的研究方向为熔化焊及增材制造工艺, 联系地址: 北京市海淀区温泉镇环山村路8号(100095), E-mail: gsq0046@sina.com

(责任编辑: 徐永祥)