

# 商用航空发动机金属增材制造技术及装备应用

## Application of Technology and Equipment for Metallic Additive Manufacturing in Commercial Aeroengine

中航商用航空发动机有限责任公司 何艳丽 廖焕文 王禄秀

**[摘要]** 主要论述了金属增材制造技术的特点、优势及相关装备,分析了该项技术在商用航空发动机研制过程中的关键作用,并发掘可使用该技术进行加工制造或修复的商用航空发动机零部件及具体的成形方式和装备。

**关键词:** 增材制造 航空发动机 装备

**[ABSTRACT]** The characteristics, advantages of metallic additive manufacturing and the international development of the related equipments are discussed. The key role of metallic additive manufacturing during the development process of commercial aeroengine is also analyzed. In addition, the parts of commercial aeroengine which can be manufactured or repaired by this technique are explored together with the corresponding forming methods and equipments.

**Keywords:** Additive manufacturing Aeroengine Equipment

诞生于 20 世纪 70 年代末期的增材制造技术是制造技术原理的一次革命性突破,它形成了最能代表信息化时代特征的制造技术,即以信息技术为支撑,以柔性化的产品制造方式最大限度地满足无限丰富的个性化需求。增材制造技术是一种兼顾精确成形和高性能成形需求的一体化制造技术。它将信息化增材成形原理与激光熔覆技术相结合,是一门融合了激光技术、计算机软件、材料、机械、控制、网络信息等诸多现代先进技术而形成的一项实现高性能致密金属零件快速自由成形的技术<sup>[1]</sup>。

### 1 国内外发展现状

目前增材制造技术的快速成形方法有 10 多种,各种快速成形方法均具有自身的特点和适应范围。按照加工材料的类型,可以分为金属成形、非金属成形、生物材料成形等,而目前在航空发动机上应用最接近、技术相对较成熟的应属金属增材制造。金属增材制造的方法目前主要有两种,即以同步材料送进为主要技术特征的激光(或电子束)立体成形技术(LSF,见图 1(a))和

以粉末床为主要技术特征的选区激光(或电子束)熔化技术(SLM,见图 1(b))。

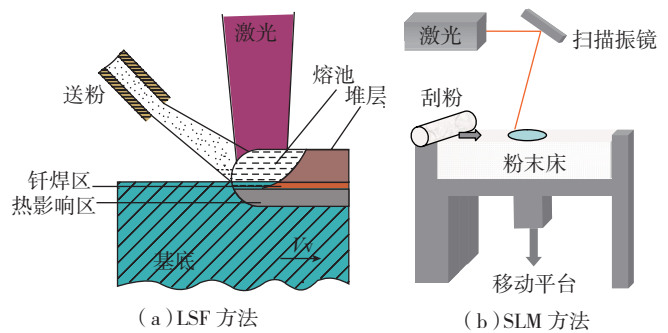


图 1 金属增材制造技术原理

Fig.1 Principle of metallic additive manufacturing technology

#### 1.1 技术研究现状

金属零件的直接增材制造的技术构思,是由美国联合技术研究中心(UTRC)在 1979 年首先提出的,其应用对象就是航空发动机涡轮盘。1994 年,国际 3 大航空发动机公司之一的英国 Rolls-Royce 公司通过英国 Cranfield 大学开始探索航空发动机机匣的 LSF 制造技术。不过直到 2000 年,美国波音公司首先宣布采用 LSF 技术制造的 3 个钛合金零件在 F-22 和 F/A-18E/F 飞机上获得应用,并在 2001 年制定了 LSF 技术的美国国家标准(该标准在 2011 年进行了修订),才在全球掀起了金属零件的直接增材制造的第一次热潮。

不过,航空发动机服役的苛刻环境决定了其对零件制造的要求极高,因此,在很长一段时间里,金属直接增材制造的重点还是着重于航空发动机零部件的修复。致力于使 LSF 技术商用化的美国 Optomec Design 公司,将 LSF 技术应用于 T700 美国海军飞机发动机零件的磨损修复,实现了已失效零件的快速、低成本再生制造。德国 MTU 公司与汉诺威激光研究中心则将 LSF 技术用于涡轮叶片冠部组里面的硬面覆层或恢复几何尺寸。德国 Fraunhofer 研究所则重点研究了 LSF 技术在钛合金和高温合金航空发动机损伤零部件修复再制造的应用。英国 Rolls-Royce 航空发动机公司则将 LSF 技术用于涡轮发动机零部件的修复及成形(图 2)<sup>[2]</sup>。瑞士洛桑理工学院 W. Kurz 教授的研究组采用 LSF 技术实现了

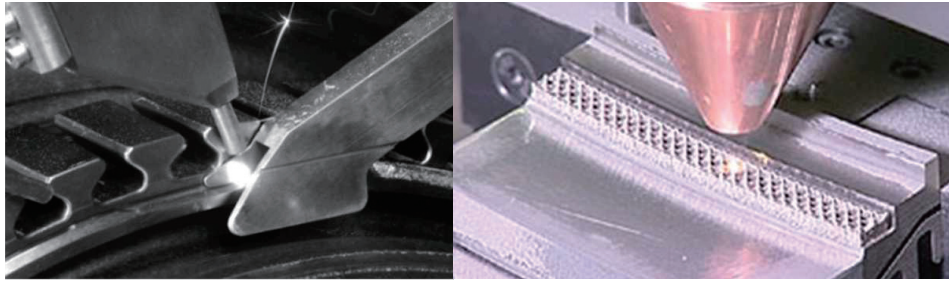


图2 英国Rolls-Royce航空发动机公司采用LSF技术修复及成形的航空发动机零件  
Fig.2 Aeroengine components repaired and formed using laser solid forming technology by British Rolls-Royce

高温合金单晶叶片的修复。

国内在航空航天高性能金属零部件的直接增材制造方面的研究单位主要以西北工业大学、北京航空航天大学、西安交通大学和华中科技大学为代表,上海交通大学、哈尔滨工业大学、华南理工大学、中航工业北京航空制造工程研究所和西北有色金属研究院等也有相关的研究工作。

西北工业大学于1995年开始在国内率先提出以获得极高力学性能构件为目标的金属LSF的技术构思,针对航空航天等高新技术领域对结构件高性能、轻量化、整体化、精密成形技术的迫切需求,开展了钛合金、高温合金、超高强度钢和梯度材料激光立体成形工艺研究,突破了结构件的轻质、高刚度、高强度、整体化成形,应力变形与冶金质量控制,成形件组织性能优化等关键技术,激光成形和修复了大量重点型号中的关键零部件,解决了重点型号任务研制过程中迫切需要解决的关键技术难题,为型号研制与生产提供了有力的技术保障。针对大型钛合金零部件的LSF,解决了大型零部件变形控制、几何尺寸控制、冶金质量控制、系统装备等方面的一系列难题。基于LSF技术开展了系统的激光成形修复的研究与应用工作,已经针对发动机部件的激光成形修复工艺及组织性能控制一体化技术进行了较为系统的研究,并在小、中、大型航空发动机机匣、叶片、叶盘、油管等重要关键零部件的修复中获得广泛应用(如图3所示)。

北京航空航天大学在增材制造方面重点研究飞机大型钛合金构件的LSF制造,并具备研制LSF激光立体成形装备的能力。在金属直接制造方面所开展的长期研究工作,突破了钛合金、超高强度钢等难加工大型整体关键零部件激光成形工艺、成套装备和应用关键技术,解决了大型整体金属零部件激光成形过程中变形与开裂“瓶颈难题”、内部缺陷与内部质量控制及其无损检验关键技术,飞机零部件综合力学性能达到或超过钛合金模锻件,已研制生产出了我国飞机装备中迄今尺寸最大、结构最复杂的钛合金及超高强度钢等高性能关键

整体零部件,并在大型客机C919等多型重点型号飞机研制生产中得到应用。2012年,“飞机钛合金大型复杂整体构件激光成形技术”获得国家技术发明一等奖。

西安交大开展了LED紫外快速成形机技术、陶瓷零件光固化制造技术、铸型制造技术、生物组织制造技术、金属

熔覆制造技术和复合材料制造技术的研究。在中小型高性能复杂结构零件的精密成形方面,用LSF技术制备出了较高表面质量的316L不锈钢、钛合金、FGH96和DZ125L高温合金叶片样件。

华中科技大学主要从事激光器件、激光加工工艺与成套设备的研究,是我国“六五”至“十五”期间国家重点科技攻关计划中“激光技术”项目的牵头单位。自21世纪初开始涉足金属激光制造技术研究以来,先后研发出基于同轴送粉的激光直接成形金属零部件技术和基于粉末床自动铺粉的激光选区熔化成形技术(SLM),目前在装备制造、成形工艺优化和粉末材料设计等方面已取得了系列研究成果。

上海交通大学密西根学院智能激光先进制造实验室的主要研究方向是先进材料的激光加工和精密制造,包括激光增材净成形制造、激光熔覆、激光微加工等,用于推进设施、能源、生命科学等其他领域的发展。

综上所述,随着增材制造技术的不断成熟,国内外在金属增材制造方面的研究投入都在不断加大,越来越多行业的人员认识到了这项技术的巨大优势。



图3 西北工业大学采用LSF技术修复的航空发动机零件  
Fig.3 Aeroengine components repaired using laser solid forming technology by Northwest Polytechnical University

### 1.2 装备研究现状

作为一种涉及到激光、电子、数控、计算机、材料、检测等多学科交叉集成的先进新技术,直接增材制造技术的发展也伴随着专用装备技术的发展。直接增材制造的技术水平不仅取决于相关的科学技术研究基础,也取决于装备的技术水平。

目前,国际上技术成熟度比较高的商业化 LSF 装备的主要特性如表 1 所示。目前,只有 Optomec 公司的 LENSTM 系统, POM 和 Trumpf 公司的 DMDTM 系统和西北工业大学所开发的 LSF 系统有商品化 LSF 产品。在 LSF 装备方面,国内北京航空航天大学从事研究的时间较长,取得了不少成果,但在提供商用化 LSF 装备方面,还属西北工业大学。从表 1 可以看到,西北工业大学所研制的 LSF 系列激光立体成形装备多项指标已处于国际领先水平。

对于商用化 SLM 装备来说,由于是由传统的 SLS

装备发展而来,因此装备的成熟度相比 LSF 装备较高。表 2 给出了国际上主要 SLM 装备的技术指标,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。

在 LSF 装备方面,国内除西北工业大学和北京航空航天大学外,目前还没有其他单位提供过商用化 LSF 装备。

在 SLM 装备方面,国内目前已进入商用化销售的、较为成熟的 SLM 装备主要来自华中科技大学和华南理工大学。与国外的 SLM 设备相比,国内的 SLM 设备还存在一定的差距,在成形精度和过程控制方面还需要进一步改进。最近,西北工业大学基于在 LSF 装备研发的成功经验,与德国 EOS 公司和比利时 Materialise 公司合作,正在联合研发大幅面 SLM 装备,有望在成形尺寸、

表1 国际商用化LSF装备技术指标

指标	Optomec 公司 LENS 系统	POM 公司 DMD 系统	Trumpf 公司 DMD 系统	西工大 LSF 系统
光源	500~4000W YAG 或 光纤激光器	1kW 盘式 / 半导体激光器	2~6kW CO <sub>2</sub> 激光器	300W~8kW CO <sub>2</sub> /YAG/ 光纤 / 半导体激光器
运动系统	五坐标数控机床	五坐标数控机床 / 机器人	五坐标数控系统 / 机器人	3~5 坐标数控系统 / 机器人
沉积效率 / (cm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	5~50	10~70	10~160	5~300
熔覆材料	金属粉末	金属粉末	金属粉末	金属粉末 / 丝材
材料利用率 / %	—	~75	—	~80
成形零件最大外廓尺寸 (长 × 宽 × 高)/mm	900 × 1500 × 900	300 × 300 × 300	2000 × 1000 × 750	5000 × 2500 × 600; 1500 × 1000 × 3000
气氛氧含量	≤ 10 × 10 <sup>-6</sup>	可配真空加工室	无气氛加工室	(5~100) × 10 <sup>-6</sup> 可控
监测环节	有	无	无	有

表2 国际商用化SLM装备技术指标

厂家	设备名称	能量源	成形尺寸 / mm	铺粉装置	层厚 / mm	光学系统	聚焦光 斑直径 / mm	最大扫 描速度 (m·s <sup>-1</sup> )	成形环境
EOS	M400	1kW 激光器	400 × 400 × 400	压紧式 铺粉刷	30~60	F-θ 聚焦镜 + 扫描振镜	60~300	7	无预热 + 惰性气氛室
ReaLizer	SLM300	200W/400W 激光器	300 × 300 × 300	柔性 铺粉刷	20~100	F-θ 聚焦镜 + 扫描振镜	70~200	5	无预热 + 惰性气氛室
Concept laser	X line 1000R	1kW 激光器	630 × 400 × 500	压紧式 铺粉刷	30~200	F-θ 聚焦镜 + 数控激光头 移动	100~500	7	预热 + 惰性气氛室
SLM solutions	SLM 500HL	2 × 1kW 激光器	500 × 280 × 325	压紧式 铺粉刷	20~200	F-θ 聚焦镜 + 扫描振镜	80~150	15	无预热 + 惰性气氛室
3D Systems	sPro 250	200W 激光器	250 × 250 × 300	柔性 铺粉刷	50~200	F-θ 聚焦镜 + 扫描振镜	50~150	7	无预热 + 惰性气氛室
Renishaw PLC	AM250	200W/400W 激光器	250 × 250 × 300	压紧式 铺粉刷	30~100	F-θ 聚焦镜 + 扫描振镜	70~100	5	无预热 + 惰性气氛室
Phenix systems	PXL	200W 激光器	250 × 250 × 300	柔性 铺粉刷	20~50	F-θ 聚焦镜 + 扫描振镜	50~100	7	无预热 + 惰性气氛室

精度和过程控制方面相比国际现有 SLM 装备取得较大提升。

## 2 增材制造技术的发展与应用趋势

增材制造技术可在无需任何硬质工装模具或模型的情况下,快速制备出不同材料的复杂形状零件,缩短制造周期,节省材料,降低成本,特别是所成形零件致密度高,具有快速凝固组织特征,零件的耐腐蚀性和力学性能达到或超过常规铸造或锻造零件的性能,能满足直接使用要求,在航空领域有着广阔的市场需求与应用前景。

### 2.1 国外航空发动机的应用

近年来,随着金属直接增材制造技术成熟度的逐渐提高,特别是金属直接增材制造装备的商用化,采用金属直接增材制造技术进行航空发动机零部件的成形制造也逐渐受到了国内外航空发动机公司和研究机构的重视。比如,德国 MTU 航空发动机公司除了将 LSF 技术应用于航空发动机零部件的修复之外,近期也开始测试采用 SLM 技术直接制造的航空发动机小型压气机静子件;英国的 Rolls-Royce 航空发动机公司同样也在考虑将金属直接增材制造技术应用于其先进航空发动机的轻量化零部件的直接制造;Pratt & Whitney 公司则依托 MTU 航空发动机公司,也在开展 SLM 技术直接制造 PurePower PW1100G-JM 航空发动机零部件的测试。

GE 公司对于航空发动机各部位可以应用金属直接增材技术制造的发动机零部件进行了预测<sup>[3]</sup>,如图 4 所示。GE 公司预计,采用金属直接增材制造的零件,未来将可占航空发动机零部件的 50%,使 GE 研发的大型航空发动机每台减重至少 454kg。

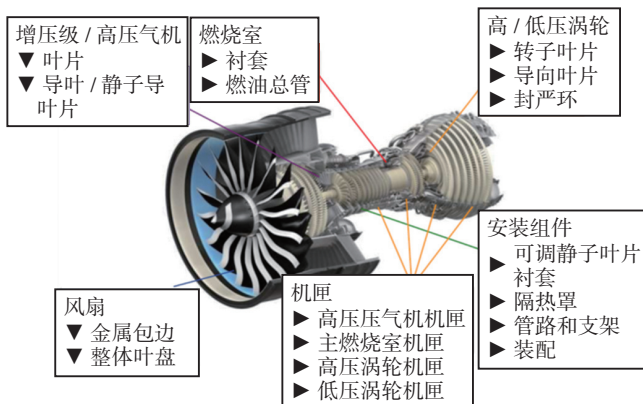


图4 可应用增材制造的航空发动机结构示意图

Fig.4 Schematic of the aeroengine components formed by additive manufacturing

### 2.2 国内商用航空发动机的应用前景

激光直接增材制造技术能够实现高性能复杂结构

金属零件的无模具、快速、全致密净成形,特别是对于激光立体成形和修复的零件,能成形近全致密的金属零件,其力学性能同锻件性能相当<sup>[4]</sup>。航空发动机零件以盘类零件和叶片为主。盘类零件虽然结构单一,但零件尺寸较大;叶片尺寸虽然较小,但型面复杂。传统的机械加工工艺实现了盘、叶片类零件的高精度加工,但加工的周期长、经费高、材料利用率低,且由于机械加工技术存在一定的局限性,零件结构形式的设计受到了限制。因此,金属增材制造技术成为了应对航空发动机领域技术挑战的最佳新技术途径。对于以大涵道商用航空发动机研制为主的中航工业商发而言,可以在以下发动机零部件的加工、修复以及相应功能方面进行尝试。

#### 2.2.1 关键零部件的加工及修复

##### (1) 喷嘴壳体及涡流器组件

发动机中燃油喷嘴壳体的传统加工方法通常是由十几个零件焊接组合而成,其结构紧凑,尺寸要求严格,需要 6 周左右的加工周期,而使用增材制造可无需其他工装,一次成形,生产周期缩短为一周内。其组件中涡流器的结构类似于叶轮,结构复杂、尺寸精度高,传统加工需要大量的工装,且生产周期需一个月左右,而使用增材制造则可在 3~5 天内完成。图 5 是利用选区激光熔化(SLM)装备成形的燃油喷嘴组件。



图5 利用增材制造成形的燃油喷嘴组件

Fig.5 Fuel nozzle components formed by additive manufacturing

##### (2) 预旋喷嘴

预旋喷嘴是一个尺寸达 400mm 的薄壁回转体高温合金零件,形状为自由曲线形式,在两壁面 3.5mm 间隙中沿圆周均布有数十个导向的小叶片,通常采用铸造的加工方式,但由于壁面仅有 2mm 厚且叶片间隙很小,零

件的废品率高,加工周期很长。而使用选区激光熔化成形(SLM)的方式则可以在10天左右完成,从而提高成品率并大大缩短加工周期。

### (3) 空心风扇叶片。

大尺寸风扇叶片是大涵道比发动机必须突破的关键技术之一。目前国内中航工业北京航空制造工程研究所在瓦伦结构空心风扇叶片研制上取得了一定的进展,基本掌握了超塑成型/扩散连接(SPF/DB)组合成型工艺。但由于超塑成型/扩散连接的工艺技术复杂,影响因素较多,目前工艺仍不稳定;同时由于国外发动机公司对该技术已申请了相关专利,因此在实际应用过程中有可能会引发国际知识产权冲突。而采用直接增材制造技术,如果在组织性能方面再有所突破的话,就可以很好地解决这些问题,并且风扇叶片减重效果将更佳,减重率可达30%以上。图6是利用现今SLM技术及装备成形的钛合金空心风扇叶片缩比件,可以看出其成形效果良好。相信随着装备技术的发展,最终可以完成1:1尺寸件的成形与制造。



图6 增材制造的缩比钛合金空心风扇叶片

Fig.6 Titanium hollow fan blade formed by additive manufacturing

### (4) 发动机流道件。

很多发动机流道件,如中介机匣、高压涡轮等的结构非常复杂,通常只能采用将结构分离并分别加工,再将其焊接成一体的方式,有些流道件甚至需将10~20件精密部件进行焊接,加工周期长,同时可靠性不容易保证。现如今SLM装备的最大成形尺寸不超过400mm,因此只能通过LSF方式进行这些零部件的毛坯件制造,或是局部发生损伤时进行快速修复。随着激光增材制造技术及装备的进一步成熟,则可采用SLM方式将发动机复杂流道件进行一次整体成形,大大提高可靠性,同时生产周期和成本还有可能大大降低。

#### 2.2.2 发动机研制过程的快速反应加工

金属直接增材制造具有高性能、快速、自由实体成形特征,不需要传统的刀具、夹具及多道加工工序,在一

台设备上可快速而精密地制造出任意复杂形状的零件,从而实现“自由制造”,解决许多过去难以制造的复杂结构零件的成形,并大大减少了加工工序,缩短了加工周期。此外,在发动机的试验以及使用过程中都不可避免地存在零部件的损伤问题,而增材制造可以快速实现损伤修复,从而大大缩短再加工的周期,保证发动机研制的进度。

#### 2.2.3 实现零部件拓扑优化设计工艺性

金属直接增材制造加工可以制造一些过去无法实现的功能结构。这些功能结构可以通过拓扑优化设计获得给定约束条件下的最佳形状结构,但拓扑优化设计的结构往往十分复杂,同传统经验方法设计的结构形状差异很大,采用传统制造技术一般无法制造出来。这使得拓扑优化设计仍然停留在研究阶段,基本上未在工程设计中应用。

增材制造技术将给拓扑优化设计提供技术实现途径,从而实现功能优先的航空发动机设计和制造,如钛合金空心风扇叶片叶型的内部结构就可按拓扑优化设计,只需考虑叶片强度和性能,而无需顾及制造工艺问题;又如油泵壳体上集成油管路的优化设计等。这些对发动机实现减重、提高性能有着深远意义。

## 3 结论

(1) 金属增材制造是目前国际新型先进制造技术,它将会对传统制造工艺提出挑战,对制造业产生深远影响,对航空发动机发展产生巨大推动作用。

(2) 增材制造将搭建发动机零部件研制新平台,能实现航空发动机研制过程快速反应加工,解决关键复杂零部件制造、修复与再制造,并为大客发动机批生产及后续维修、维护奠定基础。

(3) 通过本项目的建设,可以解决传统方法难以实现的复杂结构零部件的成形,并大大减少加工工序,缩短加工周期,降低制造成本,减轻发动机重量。

## 参考文献

- [1] 刘业胜,韩品连,胡寿丰,等.金属材料激光增材制造技术及在航空发动机上的应用.航空制造技术,2014(10): 62-67.
- [2] Rolls-Royce. Rolls-Royce dates of manufacturing technology. [2014-09-10]. [http://www.rolls-royce.com/about/technology/manu\\_tech/index.jsp](http://www.rolls-royce.com/about/technology/manu_tech/index.jsp).
- [3] GE. GE reports of advanced manufacturing technology. [2014-09-10]. <http://www.gereports.com/tagged/advanced-manufacturing>.
- [4] Abe F, Osakada K, Shiomi M, et al. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1-3): 210-213.

(责编 谷雨)