

# 激光增材制造技术在航空 航天领域的应用与发展

## Application and Development of Laser Additive Manufacturing Technology in Aeronautics and Astronautics

南京航空航天大学增材制造(3D打印)研究所 田宗军 顾冬冬 沈理达 谢德巧 王东生



田宗军

南京航空航天大学教授、博士生导师,江苏省三维打印技术联盟专家技术委员会副主任,江苏省产业技术研究院精密与微细制造技术研究所副所长。长期从事特种加工技术、激光增材制造技术、复合材料加工等学科的教学和科研工作。先后主持和参加国家自然科学基金项目、国防预研基金、江苏省重大成果转化项目等 20 余项。获得省部级科技进步奖 6 项,发表学术论文 100 余篇。

增材制造概念的提出始于 20 世纪 80 年代后期,我国则于 90 年代初期开始相关研究。经过短短 20 余年的时间,这一技术已取得了飞速发展,在航空航天、微纳制造、生物医学

在简要阐述激光增材制造技术原理和特点基础上,介绍其在航空航天领域应用的主要工艺:激光熔化沉积(Laser Melting Deposition, LMD)技术、激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术,归纳了增材制造材料体系及其在航空航天领域的具体应用,并探讨了激光增材制造技术的研究现状和发展趋势。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.038

工程等诸多领域的应用前景十分广阔<sup>[1]</sup>。航空航天工业在 20 世纪 80 年代末开始使用增材制造技术,最初增材制造在航空制造业只扮演了快速原型的小角色。而最近的发展趋势显示,这一技术将在整个航空航天产业链占据战略性的地位。市场调查公司 SmarTech Markets 2014 年初发布的报告中称,增材制造在航空航天领域未来 10 年的产业规模将达到 12 亿美元。增材制造技术之所以能在航空航天领域获得快速发展,主要是因为其不仅在无需模具和锻造的情况下帮助航空航天企业制造极其复杂的零件,一体成形大型承力结构件,减少零部件重量,缩短生产周期,而且能够减少设备所需要的零件数量,从而节省成本,提高可靠性。

本文在简要阐述激光增材制造技术原理和特点基础上,介绍其在航空航天领域应用的主要工艺:激光熔化沉积(Laser Melting Deposition, LMD)技术、激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术,归纳了增材制造材料体系及其在航空航天领域的具体应用,并探讨了激光增材制造技术的研究现状和发展趋势。

### 激光增材制造技术原理与特点

激光增材制造技术是一门融合了激光计算机软件、材料、机械、控制等多学科知识的系统性、综合性技术。采用离散化手段逐点或逐层“堆积”成形原理,依据产品三维 CAD 模型,快速“打印”出产品零件,彻底改变了传统金属零件,特别是高性能难

加工、构型复杂等金属零件的加工模式<sup>[2]</sup>。

激光增材制造技术在航空航天领域主要应用于结构和功能性金属部件的快速制造,迄今为止发展比较成熟的工艺有激光熔化沉积技术和激光选区熔化技术。

### 1 激光熔化沉积(LMD)

LMD技术作为激光金属增材制造技术的一种典型工艺,是将增材制造的“叠层累加”原理和激光熔覆(Laser Cladding)技术有机结合,以金属粉末为加工原料,通过“激光熔化-快速凝固”逐层沉积,从而形成金属零件的制造技术。其技术原理如图1所示,是利用激光的高能量使得金属粉末和基材发生熔化,在基材

上形成熔池,熔化的粉末在熔池上方沉积,冷却凝固后在基材表面形成熔覆层。根据成形件CAD模型的分层切片信息,运动控制系统控制X、Y工作台、Z轴上的激光头和送粉喷嘴运动,逐点、逐线、逐层形成具有一定高度和宽度的金属层,最终成形整个金属零件。

### 2 激光选区熔化(SLM)

激光选区熔化技术是由德国Fraunhofer研究所于1995年最早提出的<sup>[3]</sup>,它与激光熔化沉积的主要不同点在于激光功率和加工原料供给方式。为了保证金属粉末材料的快速熔化,SLM技术需要高功率密度激光器,使光斑聚焦到几十到几百微米。其技术原理如图2所示,根据成

形件的三维CAD模型的分层切片信息,扫描振镜控制激光束作用于成形缸内的粉末,一层扫描完毕后,活塞缸内的活塞下降一个层厚距离,接着送粉缸上升一个层厚的距离,铺粉系统的辊筒铺展一层厚的粉末沉积于已成形层之上。然后重复上述两个成形过程,直至所有三维CAD模型的切片层全部扫描完毕。这样,三维CAD模型经逐层累积方式可直接成形金属零件。

### 3 技术特点

直接沉积增材制造技术具有以下特点:无需零件毛坯制备,无需锻压模具加工,无需大型或超大型锻铸工业基础设施及相关配套设施;材料利用率高,机加工量小,数控机加工时间短;生产制造周期短;工序少,工艺简单,具有高度的柔性 with 快速反应能。另外,采用该技术还可根据零件不同部位的工作条件与特殊性能要求实现梯度材料高性能金属零件的直接制造,适用于大型结构件或者结构不是特别复杂的功能性零件的加工制造。

激光选区熔化技术可直接制成终端金属产品,省掉中间众多过渡环节;零件具有很高的尺寸精度及较好表面质量( $R_a$ 为 $10\sim 30\mu\text{m}$ );适合各种复杂形状的工件,尤其适合内部有复杂异型结构、用传统方法无法制造的复杂工件;适合单件和小批量复杂结构件无模、快速响应制造<sup>[4]</sup>。

## 激光增材制造材料体系及应用

### 1 可用于激光增材制造技术的航空航天材料

(1) 钛合金。航空航天用钛合金零件具有超大外形尺寸、成形加工性能差、制造工艺复杂的特点,且具有多品种、小批量和快速响应等要求,给传统加工带来了很大的困难,而激光增材制造技术恰恰可以满足这些要求。TC4钛合金在航空航天

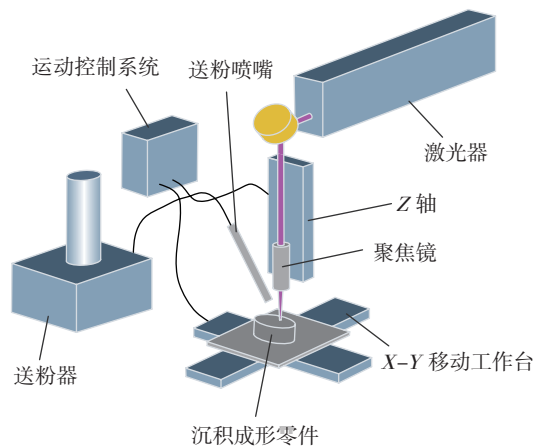


图1 LMD工作原理

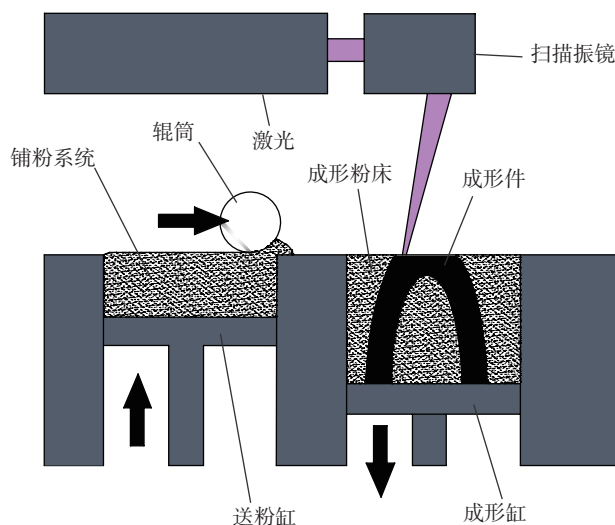


图2 SLM工作原理

工业中主要用于框架、梁、接头、叶片等部件。该合金具有良好的热塑性和可焊性,非常适合激光增材制造。此外,激光快速成形出的TA15、TC21、TC18、TC2等钛合金先进飞机大型整体主承力关键结构件,TC11、TC17、Ti60等钛合金整体叶盘等航空发动机关键部件也已在飞机研制和生产中得到成功应用<sup>[5]</sup>。

(2) 铝合金。对于力求减重、降低成本的航空航天领域来讲,铝合金一直是最主要的结构材料之一,特别是飞机制造业。然而,铝合金作为增材制造材料存在工艺难点:导热性能强、粉材质量太轻导致流动性太差、过高的反射率。德国Fraunhofer研究所于2013年已经成功攻克了该项技术难题,并且已经由EOS和Concept Laser等世界一流金属三维打印公司进行推广。现在可进行激光3D打印的铝合金材料有AlSi10Mg、A6061、AlSi12、AlSi12Mg,图3为SLM技术成形的轻质AlSiMg合金零件<sup>[6]</sup>。另外,AlSi7Mg、AlSi9Cu3、AlMg4.5Mn4和6061等铝合金材料也已被研究和应用。

(3) 铜合金。铜合金具有良好的导热、导电性能和较好的耐磨与减磨性能,是发动机燃烧室及其他零件内衬的理想材料。然而,这种属性却给铜合金增材制造带来挑战,而且铜粉具有较高的反射率,加上容易被氧化,激光很难连续熔化铜合金粉末,所以向铜粉里添加元素来改变粉材的热物特性对于激光增材成形至关

重要。2015年4月,美国NASA工程人员通过3D打印了首个全尺寸铜合金火箭发动机零件,该零件是由NASA格伦研究中心的材料科学家创造的GRCo-84铜合金制造而成,如图4所示<sup>[7]</sup>。



图4 NASA打印的铜合金火箭发动机零件

(4) 高温合金。Inconel 718合金中含有铌和钼等元素,在700℃时具有高强度、良好的韧性和耐腐蚀性,常用于汽轮机和火箭液体燃料中的零部件。此类合金还具有良好的可焊性,无焊后开裂倾向,所以特别适用于激光增材制造。另外,Inconel 625和Inconel 738也是该系列中被重点研究和应用的两种材料。此外,Inconel 600、Inconel 690和Inconel 713等材料也被用于激光增材制造技术成形研究中<sup>[5]</sup>。

(5) Invar合金。Invar合金号称金属之王,物理属性非常稳定,几乎不会因为温度的极端变化而收缩或膨胀,因此,是理想的光学设备

平台和稳定性要求比较高的设备平台制造材料,在航天领域应用广泛。Goddard太空飞行中心的技术专家Tim Stephenson与EOS北美公司合作,首次使用激光选区熔化技术开发了Invar合金结构<sup>[8]</sup>。

(6) 其他材料。铼合金、钼合金、钨合金、钛、钽、钒、梯度功能材料、金属间化合物等航空航天用材也都逐渐发展出激光增材制造工艺。

## 2 具体应用

航空航天飞行器越来越先进、越来越轻、机动性也越来越好,这对结构件提出了更高的要求:轻量化、整体化、长寿命、高可靠性、结构功能一体化、低成本运行。增材制造技术就是满足这些要求的“灵丹妙药”。增材制造在航空领域的应用主要包括以下几个方面。

(1) 大型整体结构件、承力结构件的加工,可缩短加工周期,降低加工成本。为了提高结构效率、减轻结构重量、简化制造工艺,国内外飞行器越来越多地采用大型整体钛合金结构,但是这种结构设计给制造带来了极大的困难。目前美国F35的主承力构架仍靠几万吨级的水压机压制成形,然后还要进行切割削制、打磨,不仅制作周期长,而且浪费了大量的原材料,大约70%的钛合金在加工过程中成为边角废料,将来在构件组装时还要消耗额外的连接材料,导致最终成形的构件比增材制造出来的构件重将近30%。

图5为北京航空航天大学在2013年北京科博会现场展示的“眼

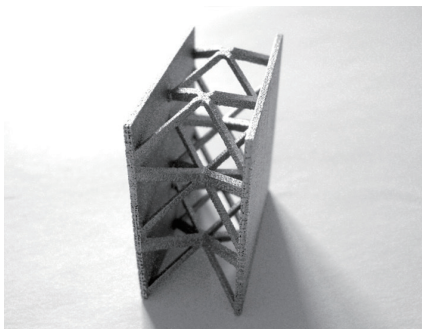


图3 SLM技术成形的轻质AlSiMg合金零件

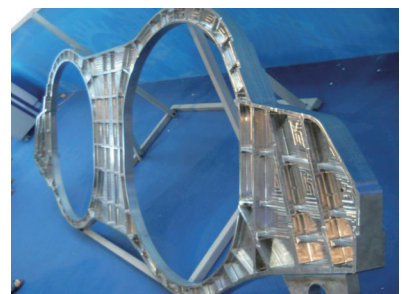
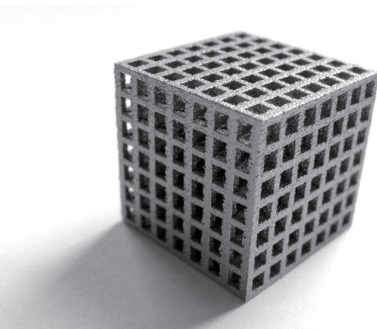


图5 钛合金主承力构件加强框

镜式”钛合金主承力构件加强框。与锻造相比,该钛合金大型复杂整体构件的材料利用率提高了5倍、制造周期缩短了2/3、制造成本降低了1/2以上。

(2)优化结构设计,显著减轻结构重量,节约昂贵的航空材料,降低加工成本。减轻结构重量是航空航天器最重要的技术需求,传统制造技术已经接近极限,而高性能增材制造技术则可以在获得同样性能或更高性能的前提下,通过最优化的结构设计来显著减轻金属结构件的重量。根据EADS介绍,飞机每减重1kg,每年就可以节省3000美元的燃料费用。图6为EADS公司为空客加工的结构优化后的机翼支架,比使用铸造的支架减重约40%,而且应力分布更加均匀<sup>[9]</sup>。



图6 激光3D打印(前)及铸造的(后)空客机翼支架

(3)加工复杂形状、具有薄壁特征的功能性部件,突破传统加工技术带来的设计约束。“制造改变设计”将成为可能,增材制造技术将必然带来对CAD模型的新的设计要求,带来设计方面革命性的变化<sup>[10]</sup>。新型航空航天器中常需制造出复杂内流道结构以便于更理想的温度控制、更优化的力学结构,避免危险的共振效应、同一零件不同部位承受不同的应力状态。增材制造区别于传统的机械加工手段,几乎不受限于零件的形状,且可以获得最合理的应力分布结构,通过最合理的复杂内流道结构实

现最理想的温度控制手段,通过不同材料复合实现同一零件不同部位的功能需求等。图7为通用航空公司设计的内置流道的航空发动机叶片。



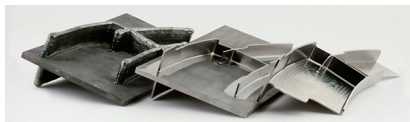
图7 内置流道的航空发动机叶片

(4)通过激光组合制造技术改造提升传统制造技术,实现复合加工。一方面,激光增材制造技术可以实现异质材料的高性能结合,可以在铸造、锻造和机械加工等传统技术制造出来的零件上任意添加精细结构,并且使其具有与整体制造相当的力学性能;另一方面,激光增材制造技术可以制造毛坯,而后用减材制造的方法进行后处理。因此,可以把增材制造技术成形复杂精细结构、直接近净成形的优点与传统制造技术高效率、低成本、高精度、优良的表面质量的优势结合起来,形成最佳的制造策略,如图8所示<sup>[11]</sup>。

(5)航空功能性零件的快速修复。飞机修复中常需要更换零部件,仅拆机时间就长达1~3个月。而利用增材制造将受损部件视为基



(a)采用“LMD+车削”的组合



(b)商用飞机采用“LMD+高速铣削”的组合  
图8 激光增材制造技术与传统制造技术组合生产的零件

体增长材料,不仅可以实现在线修复,而且修复后的零件性能仍然可以达到甚至超过锻件的标准。以制造成本高昂的整体叶盘为例,近几年来包括美国GE公司、美国H&R Technology公司、Optomec公司以及德国Fraunhofer研究所在内的多个研究机构开展了整体叶盘的激光成形修复技术研究。2009年3月,作为美国激光修复技术商用化推进领头羊的Optomec公司宣称其采用激光成形修复技术修复的T700整体叶盘通过了军方的振动疲劳验证试验。图9为Fraunhofer研究所激光增材制造修复叶片过程<sup>[12]</sup>。

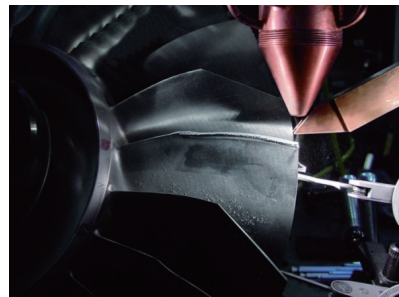


图9 激光增材制造修复叶片

## 激光增材制造技术在航空航天领域的发展和展望

### 1 研究现状

依靠自身的技术特点,激光增材制造技术在航空航天工业制造中展现出无与伦比的优越性。美国和欧盟等国家开始大力发展增材制造,将其应用于航空航天领域。2012年8月,美国增材制造创新研究所成立,它联合了宾夕法尼亚州、俄亥俄州和弗吉尼亚州的14所大学、40余家企业、11家非营利机构和专业协会。欧洲航天局则于2013年10月公布了“惊奇”计划,该计划将汇集28家机构来开发新的金属零部件,新部件要比常规部件更轻、更坚固、更廉价,旨在“将3D打印带入金属时代”。此外,美国波音公司、Lockheed Martin公司、GE航空发动机公司、Sandia国家实验室和

Los Alamos 国家实验室、欧洲 EADS 公司、英国 Rolls-Royce 公司、法国 SAFRAN 公司、意大利 AVIO 公司、加拿大国家研究院、澳大利亚国家科学研究中心等大型公司和国家研究机构都对增材制造在航空航天领域的应用开展了大量研究工作。

我国的金属材料激光增材制造处于世界先进水平,但是仍与欧美等发达国家存在一定差距。西北工业大学<sup>[13]</sup>、北京航空航天大学<sup>[14]</sup>、南京航空航天大学<sup>[15]</sup>等团队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。

## 2 挑战与展望

随着激光增材制造技术的发展,其在航空航天制造领域扮演着愈来愈重要的角色,但是要真正实现大规模产业化应用,还有很长的路要走。航空航天工业制造工艺的特殊性对激光增材制造提出了更高的要求。

(1) 进行更加深入的机理研究。激光金属增材制造的物理、化学、力学和材料冶金现象极其复杂,技术难度很大,国内外对金属零件激光增材成形内部组织形成规律和内部缺陷形成机理、零件内应力演化规律及变形开裂行为等关键基础问题缺乏深入的认识和研究,而更深入的机理研究可为工艺优化提供理论基础。

(2) 优化的工艺保证更高的加工质量。航空航天工业高工艺要求对激光增材制造技术提出更大的挑战,需扩大材料体系、突破零件尺寸来扩大激光增材技术适用范围,开发实时监测反馈系统、优化设备和工艺参数来提高加工精度及表面质量。

(3) 质量检测新手段和新的加工标准的建立。由于激光增材成形

零部件往往形状非常复杂,而且在制造的时候是一体式一次制造完成,因此应改进传统的检测方法以避免对部件造成影响,而新的检测手段必然会引起加工标准的变革。

(4) 更优化的软件、数据库支持。增材制造成形路径的规划、支撑添加以及数据库参数支持对加工质量和成形效率有着决定性的影响。

(5) 激光增材制造技术和传统加工技术的有机结合。将增材制造技术成形复杂精细结构、直接近净成形的优点与传统制造技术高效率、低成本、高精度、优良的表面质量的优势结合起来,形成最佳的制造策略。

(6) 承担更多航空航天领域的加工制造。

## 结束语

激光增材制造在航空航天领域的研究和应用越来越广泛,在先进制造技术发展的同时,也促进了结构设计思想的解放和提升,两者的相互促进必将对未来航空航天制造领域产生深远影响。

激光增材制造是涉及激光、机械、数控、材料等的多学科交叉新技术,并且发展时间很短,相对于铸、锻、焊、粉末冶金、机械加工等传统的制造技术而言,其技术成熟度还有显著差距,需要开展系统深入的基础研究和工程化研究工作。此外,多团队的精诚合作也是保障增材制造得以进一步发展的基石,以利于增材制造在航空领域发挥更大的作用。

高速、高机动性、长续航能力、安全高效低成本运行等苛刻服役条件对飞行器结构设计、材料和制造提出了更高要求。增材制造让飞行器轻量化、整体化、长寿命、高可靠性、结构功能一体化以及低成本运行成为可能,而航空航天领域则让增材制造插上了腾飞的翅膀!

## 参考文献

[1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)

技术发展.机械制造与自动化,2013(4):1-4.

[2] 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.

[3] MCP Group. The product instruction of MCP realizer SLM. Germany: MCP Group, 2005: 5-17.

[4] 李怀学,巩水利,孙帆,等.金属零件激光增材制造技术的发展及应用.航空制造技术,2012(20):26-31.

[5] 胡捷,廖文俊,丁柳柳,等.金属材料在增材制造技术中的研究进展.材料导报,2014(S2):459-462.

[6] Manfredi D, Calignano F, Krishnan M, et al. Additive manufacturing of Al alloys and aluminium matrix composites (AMCs). Light Metal Alloys Applications,2014(11):3-34.

[7] Xiaokang. 美国 3D 打印全球首个全尺寸铜合金火箭发动机零件[EB/OL]. 2015-04-24[2015-05-07]. [http://www.vx.com/news/tougao/2015\\_634.html](http://www.vx.com/news/tougao/2015_634.html).

[8] 天工社. 美国航空航天局 3D 打印应用状况综述[EB/OL]. 2014-02-13[2015-05-07]. <http://en.world3dassociation.com/anli/2014-02-12/31019.html>.

[9] Micah C. Additive Manufacturing in Aerospace[EB/OL]. 2013-11-01[2015-05-07]. <http://www.rapidmade.com/rapidmade-blog/2013/11/1/additive-manufacturing-in-aerospace>.

[10] 宋建丽,王国彪,黎明.增材制造科学与技术中青年学者论坛[EB/OL]. 2014-09-29 [2015-05-07]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab110/info45674.htm>.

[11] DMG MORI. Hybrid Machine Adds and Removes Material in One Set-Up[EB/OL]. 2014-03-01[2015-05-07]. <http://mfgnetwork.com/archives/4/602/Additive-Manufacturing-mar14/Hybrid-Machine-Adds-and-Removes-Material-in-One-Set-Up.aspx>.

[12] Antonio C-R. Precious dust[EB/OL]. 2012-05-22[2015-05-07]. [http://www.laser-community.com/application/creating-value-with-light-and-dust\\_1606/](http://www.laser-community.com/application/creating-value-with-light-and-dust_1606/).

[13] 黄卫东. 新一代飞机和发动机对材料成形技术的挑战与对策//中国航空学会.探索创新交流—中国航空学会青年科技论坛文集.银川:中国航空学会,2004:9-14.

[14] 王华明,张述泉,王向明.大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战.中国激光,2009(12):3204-3209.

[15] 黄因慧,田宗军,高雪松,等.难加工材料激光快速成形的研究现状与展望.航空制造技术,2010,(21):26-29.

(责编 谷雨)