

第 1 章

增材制造技术概述

1.1 增材制造技术的内涵

增材制造 (additive manufacturing, AM) 依据设计的三维 CAD 模型数据, 通过数字驱动逐层堆积的方式将粉材、丝材、液材和片材等各种形态的材料成形为三维实体。

自 20 世纪 80 年代开始, 增材制造技术逐步发展, 其间也被称为材料累加制造 (material increase manufacturing)、快速原型 (rapid prototyping)、分层制造 (layered manufacturing)、实体自由制造 (solid free-form fabrication)、三维喷印 (3D printing) 等。在我国早期, 称为快速原型制造、快速成形、快速制造或快速成形制造等, 各种各样的叫法分别从不同侧面表达了该技术的特点。

从加工过程材料的变化角度来看, 制造技术可分为以下三种形式:

(1) 等材制造。如铸造、锻压、冲压、注塑等方法, 主要是利用模具控形, 将液体或固体材料成形为满足设计结构和性能的构件。

(2) 减材制造。一般是指利用刀具或电化学方法, 去除毛坯中不需要的材料, 剩下的部分即是满足设计结构和性能的构件。

(3) 增材制造。利用粉材、丝材、液材和片材等形状的材料, 通过某种方式逐层堆积成形复杂结构和性能的物体。

等材制造中的铸造工艺有 3000 多年历史, 减材制造中的切削加工有 300 多年历史, 增材制造中的 3D 打印仅有 30 多年的历史。

增材制造具有明显的数字化智能化特征, 其工作过程可以分为如下两个阶段:

(1) 数据处理过程。对三维 CAD 模型进行平面或曲面分层“切片”处理, 将三维 CAD 数据分解为若干二维数据。

(2) 叠层制作过程。依据分层的二维数据, 采用某种工艺制作与数据分层厚度相同的薄片实体, 将每层薄片叠加起来, 构成三维实体, 从而实现从二维薄层到三维实体的成形。



制造技术
三分天下
增材制造
就是 3D
打印

从数学角度来看,数据从三维到二维是一个“微分”过程,数据从二维薄层叠加成三维实体是一个“积分”过程。由于增材制造工艺将三维复杂结构降为二维结构进行叠层成形,降低了成形维度,所以其在成形复杂结构(如栅格、内流道等)方面较传统方法具有突出的优势。

采用增材制造技术,人们可以发挥最大的想象力,创造出各种各样的成形方法。例如,利用光化学反应原理,研发出光固化成形方法;利用叠纸切割的物理方法,研发出叠层实体制造方法;利用喷胶黏结方法,研发出三维喷印成形方法;利用金属熔焊原理,研发出金属熔覆成形方法等。上述多种成形方法表明,增材制造技术已从传统制造技术向多学科融合发展,物理、化学、生物和材料等新技术的发展给增材制造技术注入新的生命力。增材制造给制造业带来巨大的变革,有可能彻底改造传统的制造模式,使得人人都可能成为设计者、创造者和制造者。

增材制造技术的发展历程和特点见图 1-1。

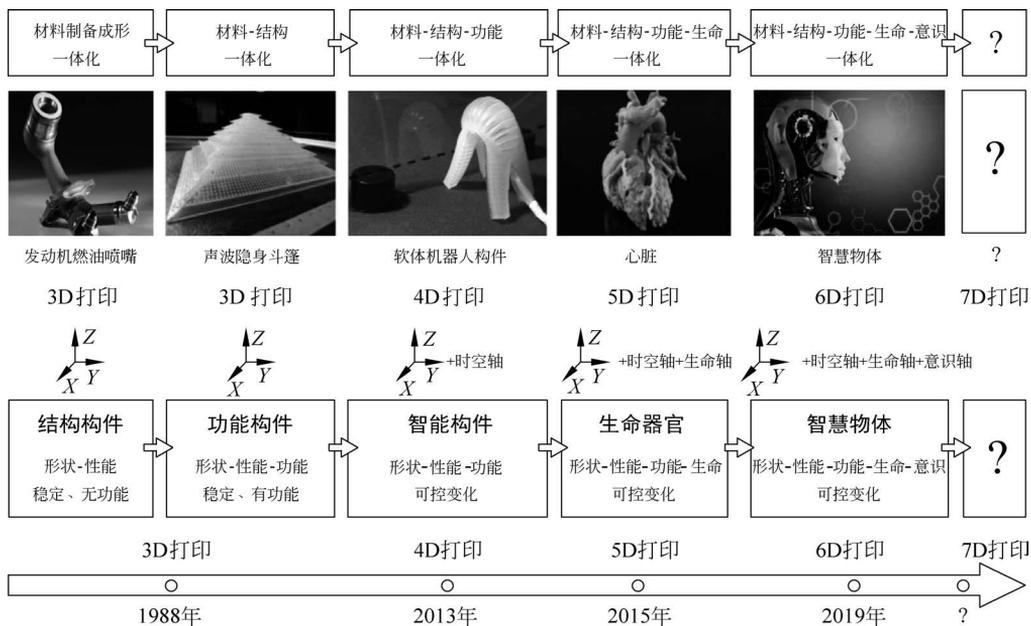


图 1-1 增材制造的分类、发展历程和技术特点

1.2 增材制造技术产生的背景

第一阶段,思想萌芽。增材制造技术的核心思想最早起源于美国。早在 1892 年,美国的 Blanthier 就在其专利中提出利用分层法制作地形图;1902 年,美国的 Carlo Baese 在一项专利中提出用光敏聚合物分层制造塑料件的原理;1940 年,美

国的 Perera 提出切割硬纸板并逐层黏结成三维地图的方法。直到 20 世纪 80 年代中后期,增材制造技术才开始了根本性发展,出现了一大批专利,仅在 1986—1998 年注册的美国专利就达到 20 多项。但这期间增材制造仅仅停留在设想阶段,大多还是一个概念,并没有付诸应用。

第二阶段,技术诞生。标志性成果是五种主流增材制造技术的发明。1986 年,美国 Uvp 公司的 Charles W. Hull 发明了立体光固化成形(stereo-lithography apparatus,SLA)技术;1988 年,美国的 Feygin 发明了叠层实体制造(laminated object manufacturing,LOM)技术;1989 年,美国德州大学的 Deckard 发明了激光选区烧结(selective laser sintering,SLS)技术;1992 年,美国 Stratasys 公司的 Crump 发明了熔融沉积成形(fused deposition modeling,FDM)技术;1993 年,美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)的 Sachs 发明了三维喷印(three-dimensional printing,3DP)技术。

第三阶段,装备推出。1988 年,美国 3D Systems 公司根据 Hull 的专利,制造出第一台增材制造装备 SLA250,开创了增材制造技术发展的新纪元。在此后的 10 年,增材制造技术蓬勃发展,涌现出 10 余种新工艺和相应的成形装备。1991 年,美国 Stratasys 公司的 FDM 装备、Cubital 公司的实体平面固化(solid ground curing,SGC)装备和 Helisys 公司的 LOM 装备都实现了商业化。1992 年,美国 DTM 公司(现属于 3D Systems 公司)的 SLS 装备研制成功。1994 年,德国 EOS 公司推出 EOSINT 型 SLS 装备。1996 年,3D Systems 制造出第一台 3DP 装备 Actua2100。同年,美国 Zcorp 公司也发布了 Z402 型 3DP 装备。总体上,美国在增材制造装备研制和生产销售方面占全球的主导地位,其发展水平及趋势基本代表了世界增材制造技术的发展历程。另外,欧洲和日本也不甘落后,纷纷进行了相关技术研究和装备研制。

第四阶段,应用推广。随着材料、工艺和装备的日益成熟,增材制造技术的应用范围由模型和原型制作进入产品制造阶段。早期增材制造技术由于材料种类和工艺水平的限制,主要应用于模型和原型制作,如制作新型手机外壳模型等,因而被称为快速原型制造技术(rapid prototyping,RP)。

第五阶段,4D 打印诞生。4D 打印的概念最初是由美国麻省理工学院的 Tibbitts 教授在 2013 年的 TED(technology,entertainment,design)大会上提出,他将一个 3D 打印制备的软质细长圆柱体放入水中,该物体自动折成“MIT”的形状,这一形状改变的演示即是 4D 打印技术的开端,随后掀起了研究 4D 打印的热潮。4D 打印在提出时被定义为“3D 打印+时间”,即 3D 打印的构件,随着时间的推移,在外界环境的刺激(如热能、磁场、电场、湿度和 pH 值等)下,能够自动地发生形状的改变。由此可见,最初的 4D 打印概念主要体现在现象演示方面,注重的是构件形状的改变,并且认为 4D 打印是智能材料的 3D 打印,关键要在 3D 打印中应用智能材料。随着研究的深入,4D 打印的概念和内涵也在不断演变和深化。2017 年,

华中科技大学的史玉升教授组织国内的有关专家,在武汉召开了第一届 4D 打印技术学术研讨会,提出 4D 打印的内涵,即增材制造构件的形状、性能和功能能够在外界预定的刺激(热能、水、光、pH 值等)下,随时间发生变化,推动了 4D 打印技术由概念向内涵方向发展。相较于最初的 4D 打印概念,新提出的内涵表明 4D 打印构件随外界刺激的变化不仅是形状,还包括构件的性能和功能,这使得 4D 的内涵更丰富,有利于 4D 打印技术从现象演示逐渐走向实际应用,只有性能和功能发生变化才能满足功能化、智能化的定义,才能具备应用价值。然而,上述新提出的 4D 打印内涵仍然存在一定的局限性,尚未完全揭示 4D 打印的本质。为此,通过系列 4D 打印技术大会的持续交流讨论,得出如下阶段性结论:4D 打印不仅可以应用智能材料,还可以应用非智能材料,也应当包括智能结构,即在构件的特定位置预置应力或者其他信号;4D 打印构件的形状、性能和功能不仅是随着时间维度发生变化,还应当包括随空间维度发生变化,并且这些变化是可控的。因此,进一步深化的 4D 打印内涵注重在光、电、磁和热等外部因素的激励诱导下,4D 打印构件的形状、性能和功能能够随时空变化而自主调控,从而满足“变形”“变性”和“变功能”的应用需求。今后,随着 4D 打印研究的持续深入,其内涵也必将进一步得到升华。

1.3 增材制造技术的发展

1.3.1 增材制造技术在国外的发展概况

国外增材制造技术的发展主要集中在欧美地区,其中美国是增材制造技术的发源地,也是对此技术研究和应用最广泛的国家。美国得克萨斯大学奥斯汀分校的 Laboratory for Freeform Fabrication 是世界上最早成立的增材制造技术研究中心之一,研究领域涵盖了增材制造技术的各个方面;美国得克萨斯大学埃尔帕索分校设立的 W. M. Keck Center for 3D Innovation 联合了新墨西哥大学、扬斯敦州立大学、洛克希德·马丁公司、诺斯罗普·格鲁曼公司、RP+m 公司和 Stratasys 公司,重点研究用于航空航天领域的增材制造技术;美国宾夕法尼亚州立大学联合 Battelle Memorial Institute and Sciaky Corporation 成立了 Center for Innovative Materials Processing Through Direct Digital Deposition(CIMP-3D),重点偏向金属、高分子等材料的设计及工业应用研究。欧美地区其他发达国家的科研单位也设立了增材制造研究中心。例如,英国谢菲尔德大学设立了先进增材制造中心,重点研究喷墨打印、生物材料激光成形、航空材料激光选区熔化成形、增材制造构件的结构设计、激光选区烧结新材料研究等方向;英国诺丁汉大学成立了 EPSRC Centre for Innovative Manufacturing in Additive Manufacturing,针对多功能 3D 打印技术、3D 打印材料体系设计等方面进行创新突破;英国埃克塞特大学设立的

Centre for Additive Layer Manufacturing 致力于解决增材制造技术与工业应用结合的难题；德国弗朗霍夫(Fraunhofer)激光技术研究所成立了弗朗霍夫增材制造联盟,着眼于金属、高分子、陶瓷及生物材料的增材制造技术研究,其下属 11 个研究中心遍布全国；法国设立了 Center for Technology Transfers in Ceramics (CTTC),利用喷墨打印、黏结喷射、陶瓷直接沉积等增材制造技术成形难加工的脆性材料；比利时鲁汶大学机械工程学院则针对增材制造技术的种类进行了深入研究,并应用于实际生产。除了上述欧美地区国家,澳大利亚莫纳什大学成立的莫纳什增材制造中心,拥有世界上最大的激光选区熔化装备 Concept Laser X-Line 1000,并在 2015 年成形出世界上第一个全金属航空发动机结构样件。在亚洲地区,新加坡也成立了增材制造中心,研究面向海洋应用、医疗组织和建筑打印,几乎囊括了食品、金属、生物等各个领域的增材制造装备,致力于打造东南亚的增材制造强国。

4D 打印的概念自 2013 年提出以来,就引起了很多学者广泛的研究兴趣。国内外很多学者在智能构件设计、模拟仿真、材料、制造工艺与装备和智能构件评测等方面对 4D 打印智能构件展开了初步研究。4D 打印智能构件的形状变化、性能变化和功能变化是 4D 打印研究的三个方面。然而,现在 4D 打印技术的总体现状是:研究集中在将智能材料应用到增材制造工艺中,仍然仅处于形状变化的现象演示阶段,至于如何实现性能变化和功能变化,目前报道极少,并且尚未形成可靠的、具体的研究思路。4D 打印技术的研究目前仅处于起步阶段,诸多方面亟待研究。目前缺乏针对智能构件设计的理论与方法体系,缺乏材料与工艺的匹配性研究,尚无对智能构件功能的评测与验证方法。

1.3.2 增材制造技术在中国的发展概况

自 20 世纪 90 年代初开始,以清华大学、华中科技大学、西安交通大学和北京隆源公司为代表的几家单位,在国内率先开展增材制造技术的研发。清华大学开展了 FDM、EBM(electronic beam melting,电子束熔化)和生物 3DP 打印技术的研究;华中科技大学开展了 LOM、SLS、SLM(selective laser melting,激光选区熔化)、WAAM(wire and arc additive manufacture,电弧熔丝增材制造)等增材制造技术的研究;北京隆源公司重点研发和销售 SLS 装备;西安交通大学重点研究 SLA 技术,并开展了增材制造生物组织工程方面的应用研究。随后又有一批高校和研究机构参与到该项技术的研究中。北京航空航天大学 and 西北工业大学开展了 LENS(laser engineering net shaping,激光近净成形)技术研究,中航工业航空制造工艺研究所和西北有色金属研究院开展了 EBM 技术的研究,华南理工大学、南京航空航天大学开展了 SLM 技术的研究等。国内高校和企业通过研发改变了该类装备早期依赖进口的局面,通过 20 多年的技术研发与应用推广,在全国建立了数十个增材制造服务中心,用户遍布航空航天、汽车、船舶、生物医疗等行业,改进和

提升了我国的传统制造业。

4D 打印构件能实现三个方面的可控变化,分别是形状变化、性能变化和功能变化,简称为“变形”“变性”和“变功能”。这“三变”中只要实现其中一个,便认为是实现了 4D 打印。西安交通大学的李涤尘教授团队研究了离子高分子-金属复合材料(ionic polymer-metal composites, IPMC)的 4D 打印技术,通过控制不同电极电压的加载方式,可以使柱状的 IPMC 发生多自由度弯曲,同时,材料的刚度也发生了变化。华中科技大学的史玉升教授团队利用材料组合的思想,将增材制造的磁电材料相组合,制备了柔性磁电器件。该柔性磁电器件由高度相同的多孔结构和螺旋结构组成,多孔结构由于具有永磁性而能产生磁场,具有导电性的螺旋结构(相当于导电线圈)处在该磁场中,在外界压力的作用下循环压缩/回复,在这一过程中,穿过线圈的磁通量发生变化,根据法拉第电磁感应定律可知,在两块平行板之间会产生电压,所以,增材制造构件产生了压电性能和感知外界压力的功能,而这种性能和功能是磁性多孔结构和导电结构原本均不具备的,因此,增材制造构件的性能和功能均发生了变化,从而使变性能、变功能的 4D 打印得以实现。



1.4 增材制造先进材料、先进结构、智能构件

增材制造技术的优势在于突破了传统等材制造和减材制造技术在材料、尺度、结构、功能、智能、生命、智慧等方面的复杂性,对各行各业必将带来深远影响。从理论上来说,增材制造可成形任何材料、可成形任何物体、可应用于任何领域。

相较于传统的等材制造和减材制造技术,增材制造技术在控形、控性成形构件的同时,还可以创造新材料、生命器官和智慧物体。

本书只介绍增材制造大家族中的 3D 打印和 4D 打印技术。

1.4.1 增材制造先进材料

1. 提升材料性能

以 SLM 和 LENS 两种主流金属增材制造技术为例进行说明。在 SLM 加工过程中,激光与粉末相互作用,形成尺度约为 $100\mu\text{m}$ 的微小熔池,由于激光的快速移动($100\sim 1000\text{mm/s}$),熔池具有极高的冷却速率($10^3\sim 10^8\text{K/s}$),快速冷却抑制了晶粒的长大和合金元素的偏析,加之熔池内马兰戈尼(Marangoni)对流的搅拌作用,最终获得了晶粒细小、组织均匀的微观结构,大幅提高了材料的强度。美国 OPTOMECH 公司和 Los Alamos 实验室、欧洲宇航防务集团 EADS 等研究机构针对不同的材料(如钛合金、镍基高温合金和铁基合金等)进行了工艺优化研究,使

SLM 构件的缺陷大大减少,致密度增加,性能接近甚至超过同种材料的锻件水平。美国空军研究实验室的 Kobern 等优化了 Ti6Al4V 的 LENS 成形工艺,研究了热处理和热等静压等后处理工艺对 LENS 构件的微观组织和性能的影响规律,认为后处理可大大降低 LENS 构件的内应力,消除其气孔等缺陷,使构件沿沉积方向的韧性和高周疲劳性能达到了锻件水平。北京航空航天大学主要研究了钛合金构件的 LENS 成形工艺,并通过热处理工艺的优化,使钛合金构件的组织得到细化,性能明显提高,成功应用于飞机等大型承力构件的制造。

2. 创造新材料

利用增材制造技术,通过混合粉末或控制喷嘴同时输送不同的粉末,可以制备金属/金属和金属/陶瓷等梯度材料。美国理海大学利用 LENS 技术制备 Cu 与 AISI1013 工具钢梯度材料,通过工艺优化以及利用镍作为中间过渡层材料,解决了梯度材料制备过程中两相不相容和熔覆层开裂的问题。美国南卫理公会大学的 MultiFab 实验室利用 LENS 技术制备了同时具有纵向和横向梯度的金属/陶瓷复合材料。美国 Sandia 国家实验室和密苏里科技大学等研究机构也分别研究了 Ti/TiC、Ti6Al4V/In625 和 In718/Al₂O₃ 等不同梯度材料的增材制造工艺。巴基斯坦白沙瓦工程和技术大学研究了 LENS 技术制备的 316L/Inconel718 梯度材料,发现在沉积过程中形成了 NbC 相和 Fe₂Nb 相,生成的碳化物能够选择性地控制梯度材料的硬度和耐磨性。美国宾夕法尼亚州立大学帕克分校通过定向能量沉积技术制备了 Ti6Al4V/Invar36 梯度材料,结合实验表征和计算分析发现梯度区金属间化合物(FeTi、Fe₂Ti、Ni₃Ti 和 NiTi₂)的存在是导致梯度材料在制备过程中断裂的原因。波兰华沙董布罗夫斯基军队技术学院利用 LENS 技术制备了 Fe₃Al/SS316L 薄壁管梯度材料,结果表明,梯度材料管具有在 316L 钢和 Fe₃Al 合金两种成分之间过渡平稳、冶金质量高、S 形形状重现性好等特点。华盛顿州立大学利用 LENS 技术制备了结构和成分梯度变化的 Ti/TiO₂ 新型结构,发现在多孔钛表面添加全致密、成分梯度变化的 TiO₂ 陶瓷,可显著提高样品的表面润湿性和硬度。美国理海大学采用 LENS 技术制备了 Ti/TiC 梯度材料,结果表明,与高 TiC 含量的均匀复合镀层相比,梯度材料有效地防止了裂纹的形成。

在国内,西北工业大学研究了 316L/Rene88DT 梯度材料的 LENS 制备工艺,并总结了熔覆层微观组织和硬度随着梯度材料成分含量不同而变化的规律。西安交通大学研究了 Ti6Al4V/CoCrMo 梯度材料的 LENS 制备工艺。华中科技大学利用 SLM 技术制备了钛/羟基磷灰石(Ti/HA)梯度材料,发现随着 HA 含量从 0wt% 增加到 5wt%,各梯度层的微孔比例从 0.01% 增加到 3.18% (图 1-2)。北京有色金属研究总院采用 LENS 技术制备了 Ti/TiC 功能梯度材料,发现样品的拉伸强度受 TiC 含量的影响不大,但韧性随 TiC 添加量的增加而急剧下降。

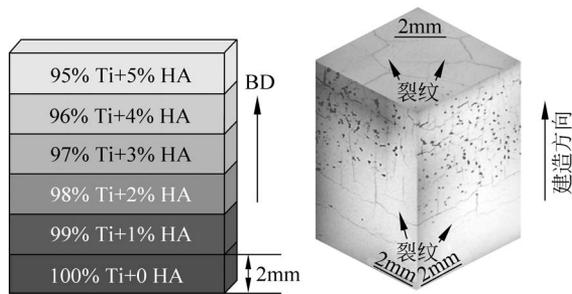


图 1-2 利用 SLM 技术制备的钛/羟基磷灰石(Ti/HA)梯度材料及孔隙分布情况

1.4.2 增材制造先进结构

1. 整体结构

受制造工艺约束,一些构件采用传统制造技术无法实现整体制造,只能分体制造然后再进行焊接或铆接连接。增材制造技术几乎不受制造工艺约束,可实现“化零为整”的整体制造,从而减少加工和装配工序,缩短制造周期,减轻重量,提高装备的可靠性和安全性。

美国 GE 公司的应用案例及其效果如下: LEAP 发动机采用增材制造整体成形喷嘴,由原来的 18 个组件减少为 1 个整体构件(图 1-3),其重量减少了 25%,效益提高了 15%;高级涡轮螺旋桨(ATP)飞机发动机通过增材制造整体成形出 35%的构件,组件由原来的 855 个减少至 12 个,重量减少了 5%,大修时间间隔延长了 30%,燃油消耗减少了 30%。

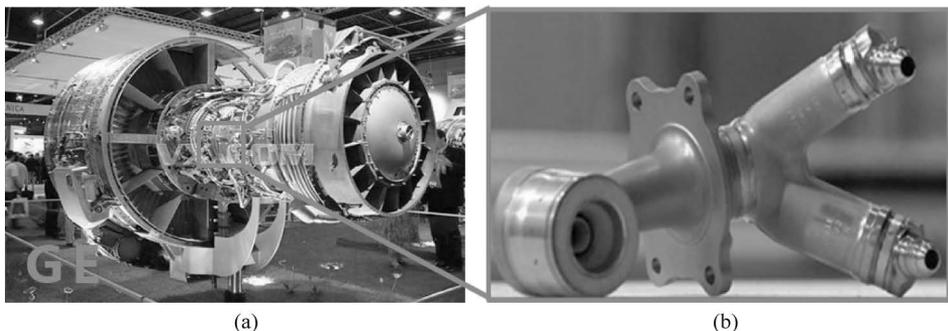


图 1-3 增材制造成形的整体喷嘴

(a) LEAP 发动机; (b) 增材制造整体喷嘴

美国 NASA 马歇尔航天中心的应用案例及其效果如下:采用激光增材制造技术成形了大量的火箭发动机构件,包括发生器导管、旋转适配器等(图 1-4);采用激光增材制造技术成形的 RS-25 火箭发动机弯曲接头,与传统设计相比,采用激光增材制造优化设计可以减少 60%以上的构件数量、焊缝以及机械加工工序(图 1-5)。

表 1-1 和表 1-2 为激光增材制造技术与传统制造技术的对比,结果表明,采用激光增材制造技术可以大幅节约制造成本与时间。

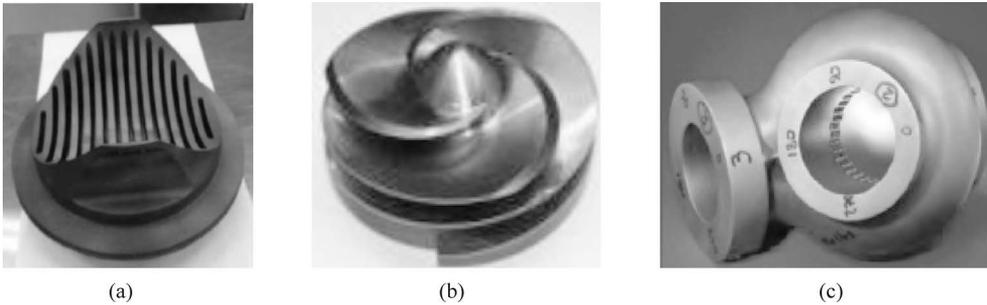


图 1-4 NASA 采用激光增材制造技术成形的典型构件

(a) 弹簧 z 向挡板; (b) 诱导轮; (c) 泵壳体

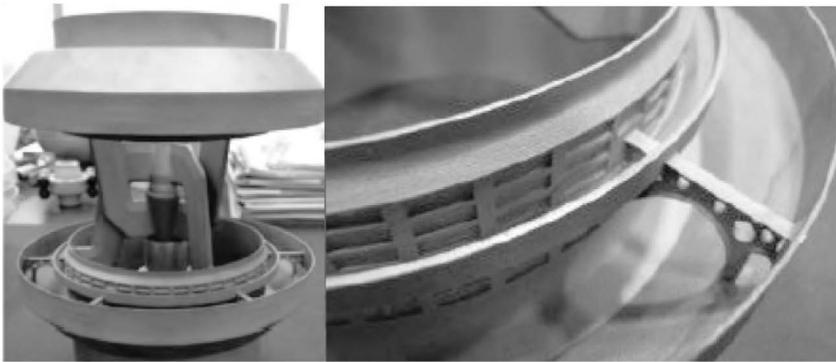


图 1-5 NASA 采用激光增材制造技术成形的 RS-25 火箭发动机弯曲接头

表 1-1 NASA 的 RS-25 火箭发动机弯曲接头传统制造设计与激光增材制造设计对比

比较项目	传统制造设计	激光增材制造设计	减少比例/%
构件数量/个	45	17	62
焊缝/个	70+	26	62
机械加工工序/道	147	57	61

表 1-2 NASA 采用激光增材制造技术与传统制造技术的对比

构件名称	节约成本/%	节约时间/%
J-2X 发动机燃气发生器导管	70	50
F-1 发动机旋转适配器	N/A	70
弹簧 z 向挡板	64	75
定制扳手	N/A	70
涡轮泵壳体	87	75
涡轮泵诱导轮	50	80

2. 点阵结构

增材制造技术除了可实现“化零为整”外,还可实现结构的轻量化设计制造。轻量化在航天领域的地位举足轻重,因为每减轻 1kg 质量将使航空航天装备和燃料质量减少 30~100kg,从而大幅节省发射成本,提高载荷效率。

采用拓扑优化方法,可以设计出满足性能指标的最优点阵结构,但通常会导致点阵结构中出现传统制造工艺难以加工的复杂三维曲面以及中空结构。增材制造技术为拓扑优化设计的点阵结构提供了一种几乎无工艺限制的制造手段。

空中客车防务与宇航公司(Airbus Defence and Space)英国分部采用激光增材制造技术成形出欧洲航天局 EurostarE 3000 的铝合金支架,用于安装遥测和遥控天线。图 1-6 为该支架结构的拓扑优化结果,通过拓扑优化以及激光增材制造工艺,实现了由 4 个构件完成传统方法需要 44 个铆钉连接支架结构的整体制造,减重 35%的同时,提高了 40%的结构刚度,铝合金支架已经成功地完成了质量检测,具备了卫星装载飞行的资质。

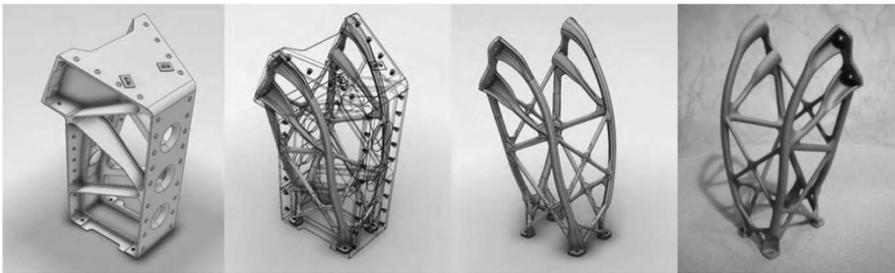


图 1-6 激光增材制造成形的 EurostarE 3000 卫星支架

图 1-7 为欧洲航天局 Sentinel-1 卫星天线支架的拓扑优化设计与制造,通过拓扑优化以及激光增材制造工艺,实现了由数个构件铆接而成的天线支架的整体轻量化制造,且质量由 1.626kg 降到 0.936kg,减重 42%。

3. 仿生结构

生物经过 10 多亿年连续的进化、突变和选择,已经形成多样化的材料和结构。这些天然生物材料通常利用有限的组分构造复杂的多级结构,并利用这种多级结构实现多功能性,达到人工合成材料不可比拟的优越性能。例如,珠线结构的蜘蛛丝具有高强度、可延展性、超级收缩性以及定向集水能力;蝴蝶的翅膀具有特殊微纳结构,兼具超疏水性和结构显色功能。然而,天然生物材料的一些主要特征,如精妙复杂的微纳结构、不均匀结构的分布和取向等,很难使用传统制造方法精确模仿制造出来,因此,利用增材制造技术成形具有类似性能的仿生结构至关重要。

以仿生表面减阻结构为例。仿鲨鱼皮减阻是众多减阻方法中的一个热点。鲨鱼皮表面具有顺流向沟槽,能够高效地保存黏液,从而抑制和延迟紊流的发生,减