

典型航空机电产品激光粉末床熔融技术应用现状与发展

郭朦^{1,2*}, 戴延丰^{1,2}, 黄斌达^{1,2}¹航空工业金城南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 210016;²航空机电系统综合航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要 下一代武器装备对先进飞行器航空机电系统提出了智能化、综合化、多电化、轻量化、高可靠等要求。传统产品设计、制造到验证的串联式方法已逐渐不能满足航空机电产品更轻量化、更低成本、更短研制周期的需求。因此, 需迫切发展具备材料-结构-性能-功能一体化并联式设计制造能力的金属增材制造技术。综述了激光粉末床熔融增材制造技术在液压、燃油和环控三类典型航空机电产品中的应用, 总结了该技术在航空机电产品设计与制造中的应用优势及未来发展方向, 为未来航空机电产品的轻量化设计与快速成形提供了技术指导。

关键词 激光技术; 航空机电产品; 激光粉末床熔融; 轻量化设计; 快速成形

中图分类号 V26 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230452

1 引言

航空机电产业是高附加值高科技产业, 不仅是航空工业的重要组成部分, 还是技术创新发展的重要领域。航空机电产业涵盖专业面广、科技含量高、附加值大, 易于向其他领域拓展, 可带动电子、先进材料、特种/精密加工、冶金、化工等技术和产业发展, 是各国尤其是发达国家极其重视的产业。航空机电系统作为航空机电产业中的重要组成部分, 在保障飞机功能的系统中发挥着不可替代的作用。随着武器装备的不断发展, 高性能先进飞行器对航空机电系统提出了越来越高的要求, 推动航空机电系统设计由最初的部件单独设计, 到物理集成设计, 再到功能集成设计。为了实现未来飞行器的功能集成设计, 航空机电系统需具备智能化、综合化、多电化、轻量化、高可靠等特点, 因此传统设计思路与制造技术已不能满足航空机电系统产品快速迭代、整体轻量化、功能集成的需求。

近年来, 增材制造(AM)技术的迅速发展给航空机电产品的整体设计与制造带来了全新思路。AM技术又称 3D 打印技术, 自 20 世纪 80 年代诞生以来^[1-2], 经历了三十多年的技术革新, 已在诸多重要领域中表现出出色的制造能力, 如航空航天^[3]、生物医疗^[4]、汽车模具^[5]等。相比于传统减材-切削加工方法, AM 技术基于材料离散-堆积原理, 通过材料逐点、逐线、逐层累加, 实现三维零件自下而上的制造。AM 技术极大的制造自由度打破了传统制造方法难以一体化成形复杂精密构件的技术壁垒, 在零件个性化定制、批量制造领

域中发挥着独特优势。激光增材制造(LAM)技术作为 AM 技术中最具技术挑战与发展前途的一支, 在金属增材制造方面具有巨大潜力, 并成为当下学术界和工业界的研究热点。Martin 等^[6]通过在基体粉末表面修饰纳米颗粒, 基于 LAM 技术实现了高裂纹敏感性高强铝合金 Al7075 和 Al6061 的无缺陷成形, 合金强度与锻件相当。该方法依托 LAM 技术实现了材料创新设计, 打破了增材制造金属材料的限制, 实现了裂纹敏感性合金的增材制造。Gu 等^[7]肯定了 LAM 技术有望变革零部件设计方式, 认为 LAM 技术能够实现多材料与多层级结构在复杂整体构件中的布局与设计, 实现高性能与多功能构件的一体化成形。

在航空装备领域中, 轻量化是装备发展的永恒主题。机载系统减重对减少飞机燃油代偿具有重要意义, 机载系统中航空机电产品重量约占全机的 30%, 零件数量约占全机的 60%, 具有重量大、数量多、零件复杂等特点。目前轻量化有两大主要途径: 材料升级和设计减重。常规结构优化和轻质金属材料应用等减重措施已基本达到优化极限, 逐渐不能满足新的轻量化需求。因此, 亟需开发新材料、新结构与新技术以实现航空机电产品的轻量化设计与制造。而具备材料-结构-性能-功能一体化设计与制造能力的金属激光增材制造技术可以为航空机电产品的轻量化设计与高性能制造提供先进方法, 促进了航空机电产业的快速发展。本文选取了液压、燃油和环控三类典型航空机电产品, 综述了目前三类典型航空机电产品中激光粉末床熔融增材制造技术的应用现状, 总结了该技术在航

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-02-21; 网络首发日期: 2023-03-01

基金项目: 江苏省重点研发计划产业前瞻与关键核心技术项目(BE2022069-5)

通信作者: *guomneias@126.com

空机电产品轻量化设计与快速制造中的优势及未来发展方向,为下一代先进航空机电产品设计与制造提供技术指导。

2 激光粉末床熔融技术的工艺特点

根据粉末原材料的输送方式及激光与金属粉末的作用机制,可将LAM技术分为基于粉末床熔化的激光粉末床熔融(LPBF)技术和基于同轴送粉的激光定向能量沉积(LDED)技术^[7]。其中,LPBF技术在中小型金属构件精密成形方面具有独特优势,尤其适用于航空机电产品的快速研制。

LPBF技术又称选区激光熔化(SLM)技术,是在选区激光烧结(SLS)技术基础上发展而来的。SLS技术诞生于20世纪80年代,由Deckard^[8]首次提出。早期SLS技术受限于激光器功率,在成形金属材料时需添加低熔点材料,利用熔化的低熔点材料粘结金属基体材料以实现金属构件的高致密成形^[9]。随着大功率光纤激光器的问世,基于粉末床熔化的LPBF技术在SLS技术的基础上迅速发展。相比于SLS技

术,LPBF技术使用高能量密度激光,可完全熔化金属粉末,从而获得高致密度金属构件。LPBF装备的基本原理和成形过程如图1所示。LPBF装备主要由高功率激光发生器、扫描振镜、铺粉系统、粉末供给和回收系统及成形腔体等组成(图1(a))。利用LPBF技术加工金属构件主要包括以下三个步骤:首先,通过三维建模软件建立实体构件的三维模型,基于数模处理软件对三维模型进行分层切片以获得每层轮廓特征,并通过计算机将其导入到LPBF装备控制系统中;其次,将金属粉末装入到粉料腔体中并调试成形腔内基板与粉末的位置,待基板安装调试完成后,往腔体内通入保护气使氧含量低于加工规定值;最后,开启激光器进行加工,金属粉末按照设定厚度被铺粉臂均匀铺在基板上,高能激光按照二维轮廓选择性熔化金属粉末,每层加工结束后,成形平台下降,下降距离等于粉末层厚度,同时粉料缸上升,上升距离大于粉末层厚度,这样可保证粉末供给,金属实体在激光逐点、逐线和逐层扫描金属粉末的方式下最终实现成形。

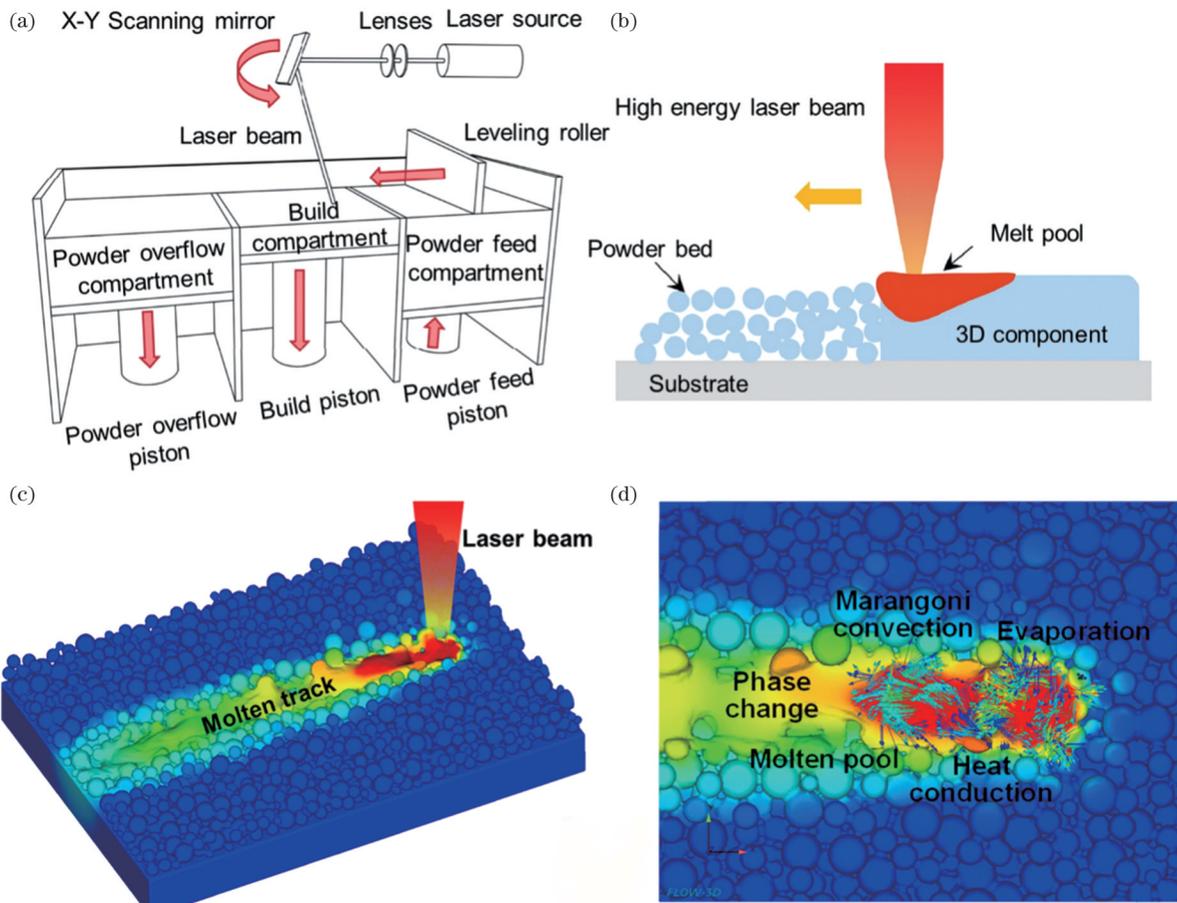


图1 LPBF装备的组成及成形过程。(a)LPBF装备的基本原理^[10]; (b)LPBF成形过程示意图^[11]; (c)LPBF焊道形成^[12]; (d)粉末熔化中的复杂物理化学现象^[12]

Fig. 1 Composition of LPBF equipment and forming process. (a) Basic principle of LPBF equipment^[10]; (b) schematic of LPBF forming process^[11]; (c) weld bead formation in LPBF^[12]; (d) complex physicochemical phenomena in powder melting^[12]

LPBF加工过程中激光与金属粉末的交互作用复杂,高能激光辐照在金属粉末表面,金属粉末吸收能

量,熔化形成微熔池(图1(b));随着激光束的移动,熔池中的熔体连续铺展形成焊道^[11](图1(c))。LPBF涉

及复杂的物理化学冶金过程,如材料快速熔化凝固、蒸发、相变等^[12](图 1(d)),此过程在极短时间内完成,因此 LPBF 成形组织相比于传统工艺获得的组织更加细小。相比于传统加工方法,LPBF 技术具有以下重要特点:1) 材料适用性强。LPBF 技术可实现 Al 合金、Ti 合金、Ni 基高温合金、不锈钢等常见金属材料的成形,同时高能量密度激光可实现难熔材料如高熔点陶瓷、W、Mo、Ta 等的成形。目前 LPBF 技术可加工材料的范围不断扩大,已发展出以金属作为基体的颗粒/纤维增强金属基复合材料及金属/陶瓷、金属/金属异质材料等新材料。2) 产品设计自由度高。LPBF 技术不受复杂构件限制,尤其适用于个性化批量产品的定制生产,加工周期短、成本低。3) 产品尺寸精度高。LPBF 技术使用金属粉末为原料,通过金属粉末粒径的调节可获得表面精度高的成形构件,大量减少了机械精加工工序。4) 产品性能优异。得益于激光加工

时迅速熔化、快速冷却的特点,LPBF 制造的金属构件显微组织细小,综合性能优异,甚至超过了传统锻件。

上述优点使 LPBF 技术被广泛应用于产品附加值高的制造领域,如航空航天^[13]、生物医疗^[14],如图 2 所示。在航空航天制造领域中,GE 公司基于 LPBF 技术一体化打印出发动机电动开门系统支架,与传统制造方法相比,该支架重量减轻了 10%,同时材料浪费量减少了 90%^[15](图 2(a))。Airbus 公司利用 LPBF 技术制造了拓扑优化 Ti6Al4V 飞机支架,相比于传统加工方式,减重约 30%^[16](图 2(b))。此外,Airbus 公司通过 LPBF 技术实现了机舱隔板零件的仿生设计与制造^[17](图 2(c))。在生物医疗领域中,华南理工大学杨永强团队基于 LPBF 技术实现了舌侧正畸托槽、全膝置换股骨假体与多孔股骨近端修复体的个性化定制与直接成形,解决了个体适配性差的问题^[18](图 2(d)~(f))。

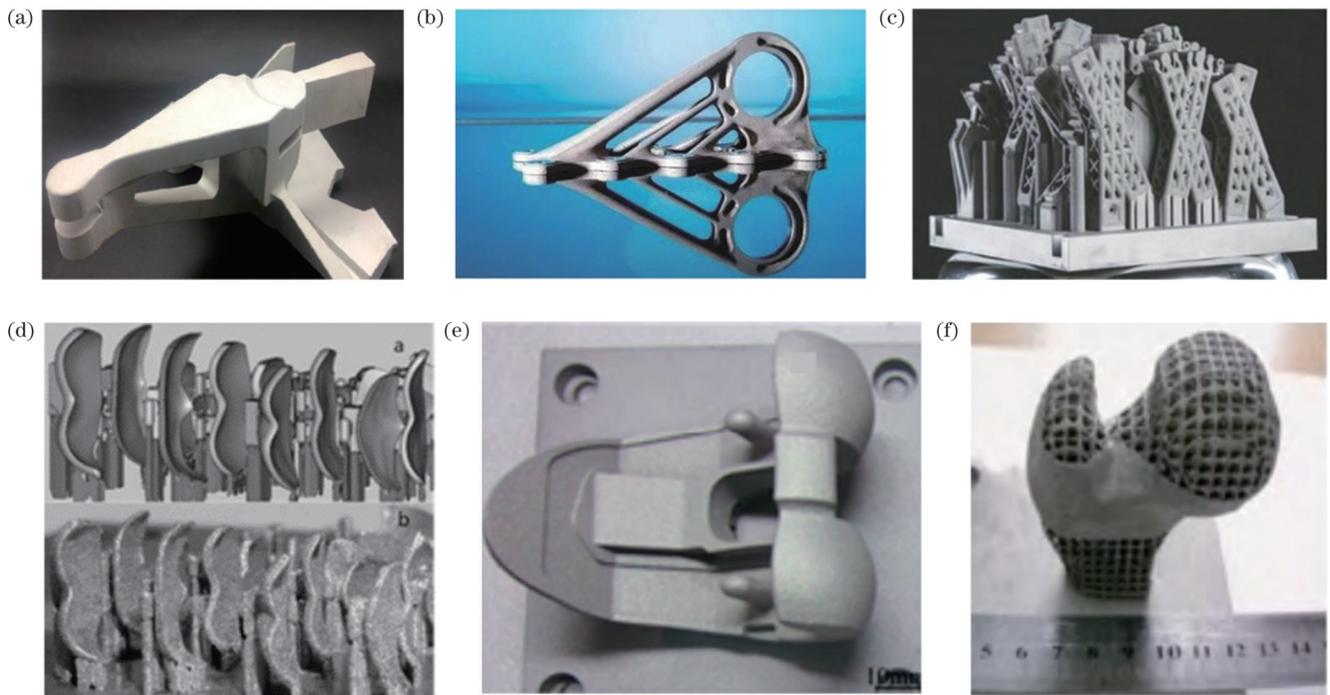


图 2 LPBF 技术在航空航天和生物医疗领域中的应用实例。(a)GEnx-2B 发动机电动开门系统支架^[15];(b)Ti6Al4V 飞机支架^[16];(c)仿生机舱隔板零件^[17];(d)舌侧正畸托槽^[18];(e)全膝置换股骨假体^[18];(f)多孔股骨近端修复体^[18]

Fig. 2 Examples of applications of LPBF technology in aerospace and biomedical fields. (a) Power door opening system (PDOS) bracket of GEnx-2B engine^[15]; (b) Ti6Al4V aircraft bracket^[16]; (c) cabin bionic partition parts^[17]; (d) lingual orthodontic bracket^[18]; (e) total knee replacement femur prosthesis^[18]; (f) porous proximal femoral prosthesis^[18]

3 激光粉末床熔融过程中典型缺陷的形成机制及调控方法

LPBF 成形产品的质量与金属粉末原材料、激光加工工艺和外在加工环境三个重要因素紧密相关^[19]。金属 LAM 过程中的物理化学反应机制复杂,粉末原材料物性成分不合适、激光加工参数如激光功率和扫描速度未优化、外在加工环境变差等会造成孔隙、球化、残余应力与裂纹等缺陷,进而影响产品的使用性

能^[20-21]。由于航空机电产品长期服役在冲击、振动与噪声等特殊环境中,疲劳裂纹极易在孔隙、表面球化位置及残余应力与裂纹区形成并扩展,最终引发疲劳破坏。因此,探明 LPBF 缺陷形成机制并针对缺陷提出调控方法,可保障增材制造航空机电产品具备可靠服役性能。

3.1 孔隙

孔隙是 LPBF 最为关注的缺陷之一,极易在产品服役过程中成为裂纹源,降低产品刚度和性能,造成失

效。LPBF 成形构件的孔隙主要包括未熔孔隙、气孔和钥匙孔三种类型,如图 3 所示。未熔孔隙是熔化过程中能量输入不足引起的,当输入能量不足时,沉积层部分熔池和未熔粉末难以与上一层完全渗透熔合(图 3(a))。未熔孔隙导致成形件各向异性和非均匀性增加,降低表面质量和力学性能^[22]。此外,形状不规则的未熔孔隙易在相邻沉积层界面处形成,进一步增加缺陷密度,造成层间结合脆弱和裂纹形成。气孔是气体无法逃逸出熔池引起的,熔池快速凝固抑制了气泡上升和逃逸,导致气泡在下部区域被困住(图 3(b))。Dai 等^[23]发现,LPBF 加工铜材料时能量输入过高会导致温度梯度较大,造成熔体紊乱,熔池底部对流加强使气体无法逸出,从而形成气孔;而降低激光能量输入可促进气体在熔池热毛细力作用下由熔池底部上升到熔池表面逸出,从而减少气孔形成。此外,粉末颗粒表面水分和溶解氢是导致气孔形成的另一重要因素。Weingarten 等^[24]研究发现,AlSi10Mg 粉末中的

水分和氢会导致构件中圆形气孔形成,降低构件致密度,且提出了基于激光干燥粉末提高粉末激光成形致密度的方法,通过内部激光干燥粉末,其成形孔隙率和湿度可减少 90%,而通过炉内恒温外部干燥粉末,其成形孔隙率和湿度只减少了 50%。钥匙孔形成受激光能量密度的影响较大,较大的激光能量输入会引起较大的熔池深度和元素蒸发,在深 V 形熔池底部气体容易聚集,从而形成钥匙孔(图 3(c))。钥匙孔也是气孔形成的重要原因。Wang 等^[25]基于多物理场热流体流动模型与 X 射线成像法,发现激光加工参数变化会引起钥匙孔不稳定,导致瞬间气泡形成,并在凝固前沿钉扎,同时气泡下方高流速会阻碍气泡上浮,最终在钥匙孔底部形成气孔。因此,对粉末进行预热处理以减少水分等杂质、合理调控激光加工参数以稳定熔池能量输入等有效措施可减少构件中孔隙数量,促进构件致密化,保证增材制造产品具有较高的致密度与一致性。

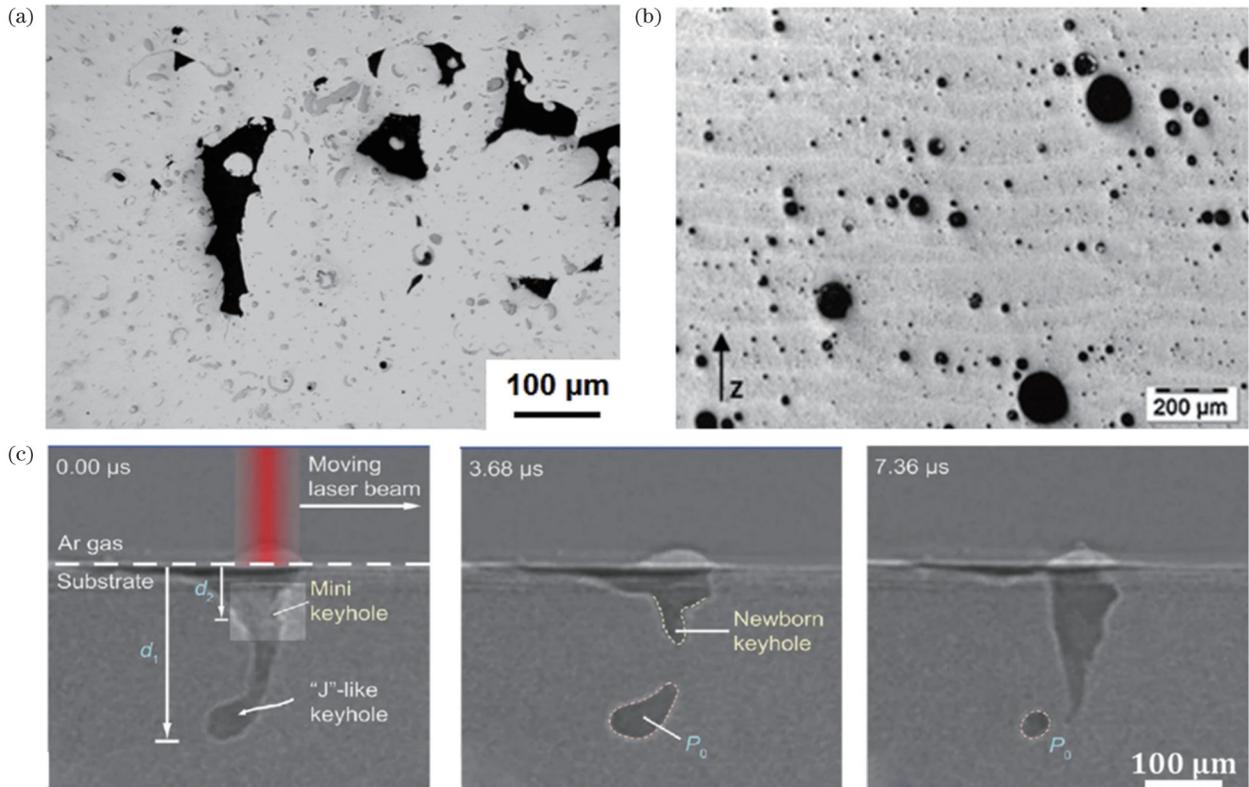


图 3 LPBF 孔隙类型。(a)未熔孔隙^[26];(b)气孔^[24];(c)钥匙孔^[25]

Fig. 3 Pore types in LPBF. (a) Unfused pores^[26]; (b) gas pores^[24]; (c) keyhole^[25]

3.2 球 化

球化是 LPBF 常见表面缺陷,会导致产品表面质量下降。高能激光作用导致熔融金属液体与接触介质表面形成的体系能量不稳定,熔融金属液面发生收缩形成球形液滴,出现显著球化现象^[27]。球化现象会造成 LPBF 成形时基板或沉积层表面出现不连续金属球,降低后续铺粉质量,导致成形构件表面粗糙、内部孔隙等缺陷,影响构件力学性能。球化缺陷的形成

主要受液态金属和固态表面润湿行为及激光加工过程中金属液滴飞溅行为的影响^[28]。一方面,激光作用下金属粉末熔化后形成金属液相,金属液相与空气、沉积层或基板之间的界面张力决定了金属液滴形状,金属液相与空气相、固相之间的接触可由 Young 方程^[27]控制:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LV}}, \quad (1)$$

式中： θ 为润湿角； σ_{SV} 为固气界面张力； σ_{SL} 为固液界面张力； σ_{LV} 为液气界面张力。式(1)表明： θ 越小，润湿性越好，当 θ 值大于 90° 时，不同界面张力引导的合力方向指向熔池内部，此时在界面张力和 Marangoni 对流力作用下，金属液体会向内部收缩成球状，导致球化现象出现(图 4(a))。Zhou 等^[29]研究了 LPBF 成形纯钨球化行为，提出了熔体扩散和凝固相互竞争模型(图 4(b))，同时提出了减弱球化效应方法，使用激光重熔扫描策略等以增加熔体扩散时间；此外，严格控制氧含量也是抑制球化现象的重要途径。在工艺调控方面，Li 等^[30]基于激光能量密度调控方法研究

了 LPBF 成形不锈钢和纯镍的表面球化行为，提出增大激光能量密度可减弱球化效应，促进润湿行为。在材料改性方面，Qu 等^[31]发现，纳米颗粒具有稳定激光-粉末交互行为的作用，通过在 Al6061 中加入纳米 TiC，有效消除了构件表面的大飞溅金属球，构件表面粗糙度由 $(20 \pm 3) \mu\text{m}$ 减小到 $(2.1 \pm 0.2) \mu\text{m}$ ，构件内部无孔隙，且热处理构件的拉伸性能达到 $(123 \pm 13) \text{MPa}$ 、延伸率达到 $7.9\% \pm 0.3\%$ ，拉伸性能比铸造 Al6061 高出 42%。这表明通过工艺与材料设计可实现球化缺陷控制，提高激光增材制造成形产品的表面质量。

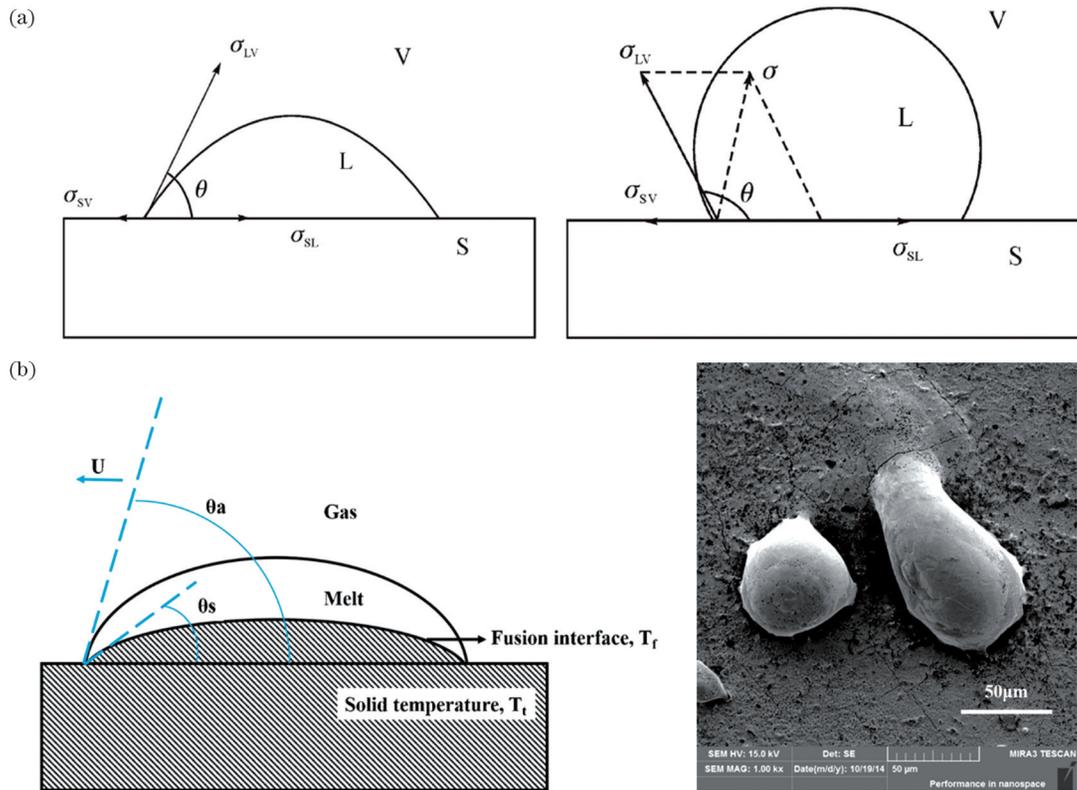


图 4 LPBF 过程中的球化现象。(a)熔体固-液-气界面张力与润湿角的关系^[27]；(b)LPBF 成形金属的球化机制^[29]

Fig. 4 Balling phenomena in LPBF process. (a) Relationship between solid-liquid-gas interfacial tension of melt and wetting angle^[27]；(b) metal spheroidization mechanism during LPBF process^[29]

3.3 残余应力与裂纹

LPBF 过程是极度非平衡过程，粉末熔化和熔体冷却都在极短时间内完成，此过程中大的温度梯度、快的凝固速度会引起熔池收缩，造成较大残余热应力，甚至导致裂纹形成^[19]。一般而言，激光工艺是影响残余应力、导致裂纹的主要因素^[32]。当激光能量输入较高时，易引起成形构件中的残余热应力。其中，LPBF 成形构件中心易形成压应力，而在构件边缘处易形成拉应力。尽管 LPBF 成形时残余应力造成的变形和开裂是常见的，但开裂程度和类型取决于所使用的材料^[33]。若材料内部残余应力超过其局部屈服应力，则会引发翘曲或变形，若残余应力超过局部极限拉应力，则会引发构件开裂。此外，成形过程

中未熔化金属颗粒和气孔也会增加裂纹形成的可能性。Vrancken 等^[34]基于热力学模拟与高速相机摄影技术研究了 LPBF 成形纯钨的裂纹形成机制，LPBF 打印钨时在最大残余应力超过屈服应力的区域形成裂纹，且裂纹局部取向取决于残余应力纵向和横向的局部分量。Bian 等^[35]基于有限元模拟和实验方法研究了 LPBF 成形 316L 不锈钢的残余应力分布，发现激光功率和扫描策略可显著改变成形构件中的残余应力分布，当使用较低激光功率和棋盘状扫描策略时，LPBF 成形 316L 不锈钢中的残余应力最小且分布均匀。Chen 等^[36]将金属增材制造中的残余应力形成机制归结于温度梯度影响机制、冷却过程收缩机制和固态相变机制三种机制(图 5)，并提出相应可行的控

制方法,如预热前处理减小温度梯度、混合增材制造减少加工过程中的残余应力和后续热处理去除残余

应力,这为激光增材制造构件的应力与变形控制提供了重要参考。

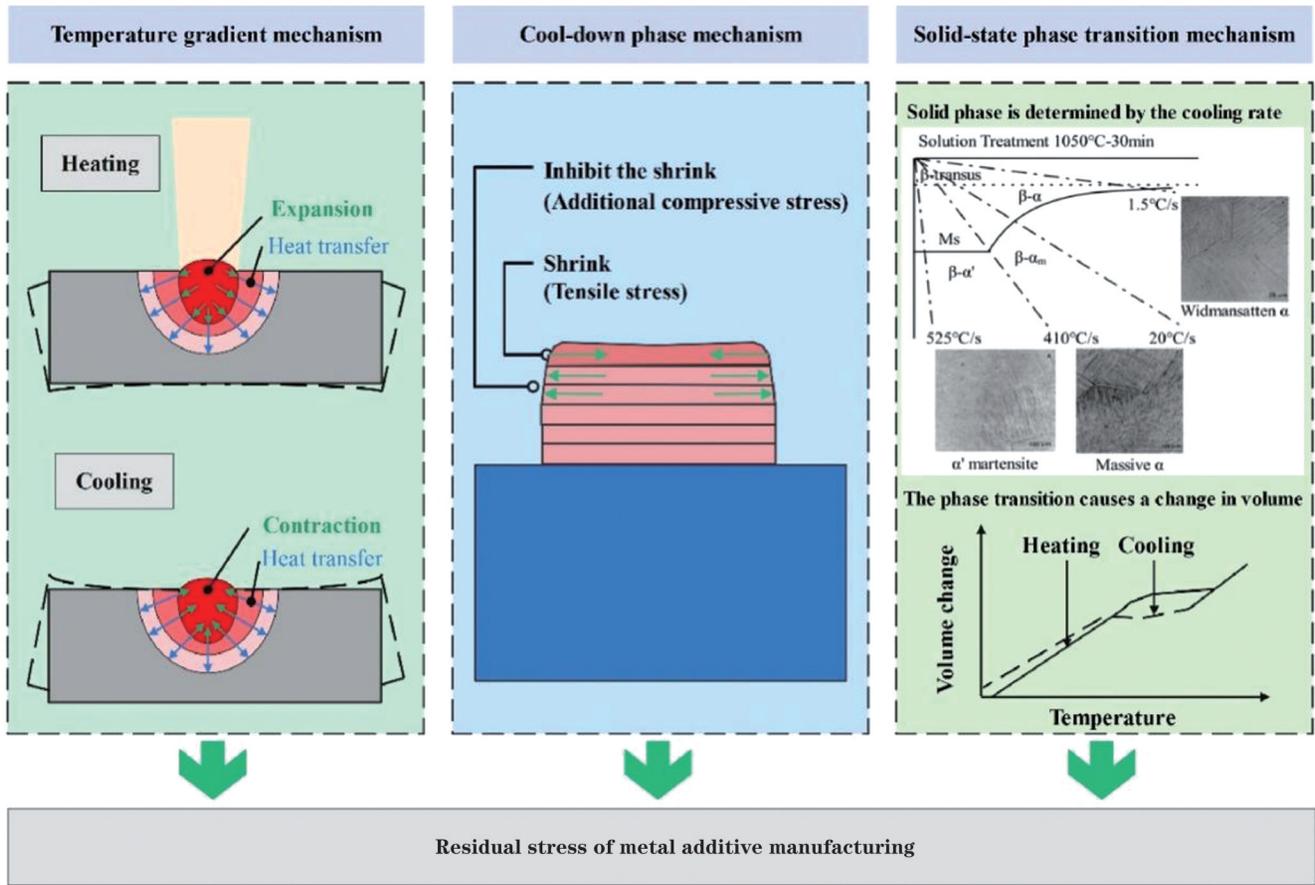


图 5 金属增材制造中的残余应力形成机制类型^[36]

Fig. 5 Types of residual stress formation mechanisms in metal additive manufacturing^[36]

4 激光粉末床熔融技术在典型航空机电产品中的应用

金属增材制造技术不受复杂形状限制,可重新定义材料与结构,从而满足航空复杂构件的制造需求。金属增材制造技术驱动下的结构创新设计与高性能制造推动航空机电产品不断向轻量化集成设计与快速制造方向发展。目前,金属增材制造技术已应用于航空复杂构件的设计与制造,具有极高的产品设计与制造能力,实现了航空构件材料与结构的一体化设计与成形^[13]。目前,铝合金、钛合金、不锈钢和镍基高温合金等金属材料在航空金属构件中应用最多^[37-39],也是激光增材制造较为关注的航空金属材料。其中,铝合金和钛合金因重量轻,被大量用于制造航空机电产品以实现航空机电系统的轻量化。

航空机电系统按功能分类,主要包括液压系统、燃油系统、环境控制系统、电源系统、辅助动力系统等,这些系统通过机、电、气、液等二次能源的产生、传输、转换,实现飞机飞行保障功能。其中,机电系统中的液压、燃油和环境控制三大系统涉及的产品种类较多,且产品形状与功能复杂(表 1),具备较大的金属增材制造应用潜力。

表 1 典型的航空机电产品分类

Table 1 Classifications of typical aviation electromechanical products

Classification	Product function	Typical product
Hydraulic products		Actuator
	Actuation	Pressure accumulator
		Hydraulic cylinder
	Valve	Hydraulic steering gear
		Hydraulic valve
Fuel oil products	Pump	Hydraulic plunger pump
	Valve	Nozzle
	Pump	Fuel centrifugal pump
Environmental control products		Fuel oil hood
		Water separator
	Heat transfer	Ejector
		Heat exchanger
	Refrigeration	Turbine cooler
	Coolant pump	

4.1 液压产品

液压系统通过改变压强来增大作用力,以传递动力和运动,被广泛应用于航空机载领域。机载液压系统具有功重比高、功率密度大、刚度大等优点,被称为“飞行器的血管和肌肉”。液压产品按照功能主要分为三大类:作动类、阀类和泵类产品。作动类产品如作动筒、蓄压器和液压缸,通过储存与输运液压油来提供动力。作动类产品尺寸较大,工作时承受较大压力与摩擦。阀类产品如舵机和液压阀,通过改变液压流量大小与方向来控制输出动力大小,对液压系统整体功重比的影响较大。阀类产品内部具有复杂的内流道结构,对精度要求较高。液压泵类产品如柱塞泵,通过吸油和压油动作连续不断地向液压系统供油,工作时承受较大压差。液压泵类产品对材料和加工精度的要求高,成本占比较高。

液压产品在工作时需借助液压油等流体工作介质来完成能量传递与控制,故此类产品对材料与结构具有较高要求。液压类产品材料需承受较大压力,同时产品内部有复杂的油路结构,在设计时需考虑流体压力、阻力、方向及油路数量等多个因素,从而最大限度减少结构重量,同时提高输运效率。传统锻造+机械

加工方法的加工时间成本较高,产品合格率较低,难以实现复杂油路的精密成形。而基于粉末床熔化的 LPBF 技术不受产品形状限制,为复杂液压产品的设计与精密成形提供了有效技术方法,国内外相继开展了应用研究。美国 MOOG 公司最早将 LPBF 技术应用到复杂液压零件制造上,在液压产品的孔隙控制、材料性能验证等方面积累了诸多经验,依托增材制造技术已生产超过 6000 件液压零件^[40]。利用 LPBF 技术,MOOG 公司开发出新型作动筒结构,该结构为一体化设计,内部集成了复杂液流通道(图 6(a)),改变了传统多组件的组装方式,大幅提高了零件可靠性^[41]。在航空液压歧管方面,MOOG 公司基于 LPBF 技术开发出下一代航空用作动器歧管(图 6(b)),该歧管大量减少了零件数量,集成了复杂流道,实现了轻量化、高性能和低成本制造^[41]。此外,MOOG 公司采用 LPBF 技术制造了 15-5PH 不锈钢液压缸用作液压飞行控制执行器(图 6(c)),与传统方法锻造+机械加工相比,在满足原先功能/性能的基础上,产品制造时间缩短至一周,大幅降低了高产量生产成本^[41]。以上成功案例证明了 LPBF 技术可降低传统机械加工方法的模具库存风险,为未来供应链创新提供定制化打印服务。

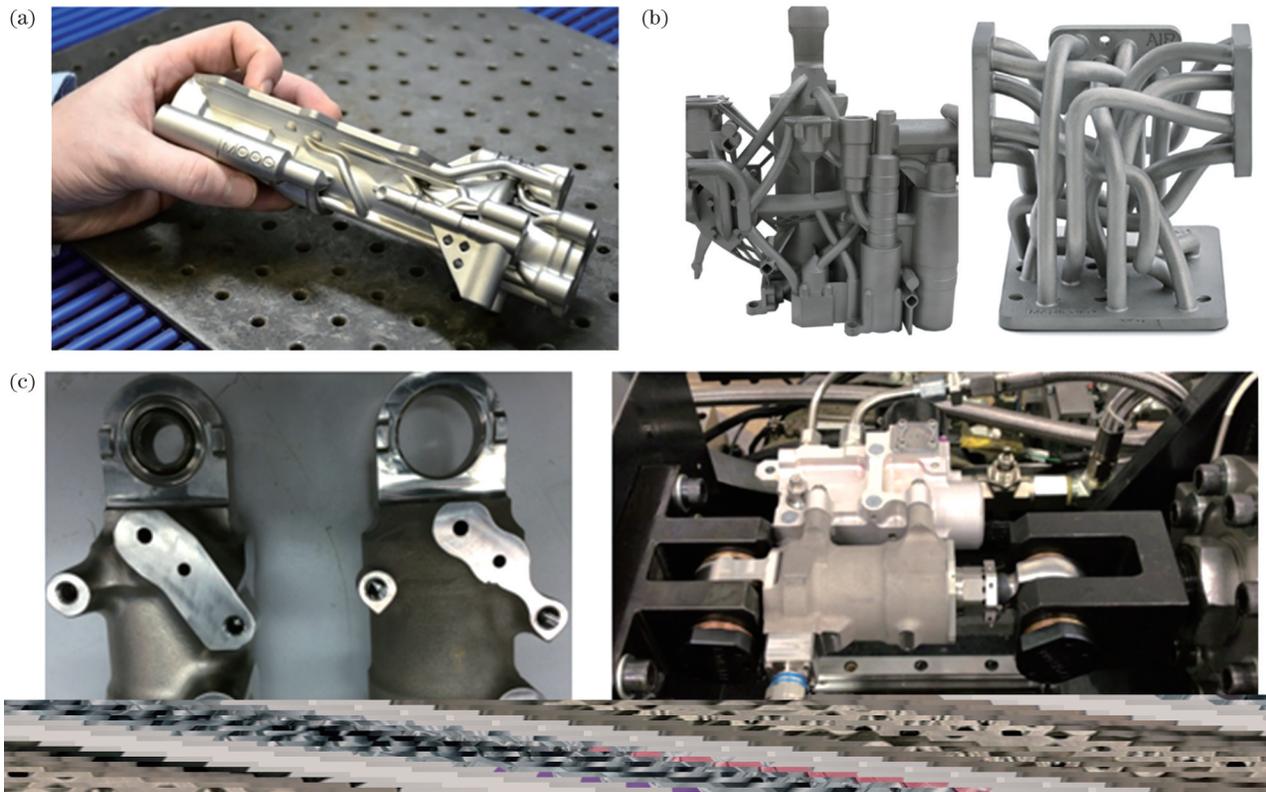


图 6 MOOG 公司利用 LPBF 制造的液压零件。(a)作动筒^[40]; (b)航空作动器歧管^[41]; (c)液压飞行控制执行器液压缸^[41]

Fig. 6 Hydraulic parts manufactured by MOOG using LPBF. (a) Actuator cylinder^[40]; (b) aero actuator manifold^[41]; (c) hydraulic cylinder in hydraulic flight control actuator^[41]

在液压阀块类产品方面,LPBF 技术具备无模具、超高自由度等设计制造优势,为液压阀块创新集成设计与高性能制造提供了技术保障。传统方法制造阀块

时工序繁琐:首先通过铸造或锻造成形材料,然后通过精密机床铣削、钻孔,加工内部复杂油路,这会导致较高加工成本。另外,传统加工方法加工工艺孔难度较

大,会带来油液泄露风险,影响液压系统可靠性。增材制造技术既可去除难加工的工艺孔,实现转角处流道圆弧过渡,减少局部油压损失,又可对阀块进行点阵晶格、拓扑优化设计等,实现整体阀块轻量化,提高液压系统功重比。此外,增材制造的最大优势在于可通过高性能仿真计算实现产品设计与制造的耦合。在集成阀块内部管道设计阶段,可通过有限元法(FEM)仿真歧管内部的受力情况并进行功能性分析,从而发现潜

在风险位置,进而对内流道结构局部采用圆弧曲面过渡、对整体采用集成式设计等进行改善^[42](图 7(a))。在集成阀体整体设计阶段,可利用计算流体动力学(CFD)先验分析,以确定最优流动路径、最小压降、最高平均流动速度和最小能量损失。在此基础上通过流固耦合仿真,对 CFD 获得的压力分布进行分析处理,确定集成阀块组件载荷和变形,如此反复迭代,最终设计出满足功能/性能要求的产品^[43](图 7(b))。

图 7 液压阀块结构设计方法。(a)基于有限元法的集成阀块内部歧管圆弧过渡与一体设计^[42]; (b)基于计算流体动力学的集成阀块载荷和变形设计^[43]

Fig. 7 Design methods of hydraulic valve block structure. (a) Arc transition and integrated design of manifold in integrated valve block based on finite element method^[42]; (b) load and deformation design in integrated valve block based on computational fluid dynamics^[43]

基于 LPBF 技术,德国利勃海尔公司开发出钛合金液压集成阀块,该阀块相比于原先产品重量减轻了 35%,并于 2017 年在空客 A380 上获得首飞认证^[44](图 8(a))。英国流体动力系统制造商 Domin Fluid Power 公司利用 LPBF 技术开发出直接驱动伺服阀,该阀体尺寸仅为原来的 1/4,但比原先产品的功率增加了 25%,且生产成本仅为原来的 1/3,制造时间也大大缩短^[45](图 8(b))。Materials Solutions 公司利用增材制造技术开发出一款高性能航空钛合金液压歧管,并基于 LPBF 技术实现了该液压歧管的精密成形,该液压歧管可满足航空航天最严苛的工况要求,同时具有较高的安全性^[46](图 8(c))。意大利著名液压零件

制造商 Aidro 公司利用增材制造技术设计自由度高的优势,开发出无交叉钻孔的液压阀块,该阀块使用圆形弯曲过渡设计代替了传统阀块内部的锋利转角,大幅减少了湍流现象。Aidro 公司目前已具备不锈钢、钛合金、铝合金等多种阀块批量定制化的生产能力(图 8(d))^[47]。

国内公司已将增材制造技术应用到液压阀体类产品生产中。其中,中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心将增材制造技术应用到液压舵机产品研发中:利用增材制造技术无需模具、加工自由度高的特点,采用集成式设计,将内部复杂流道集成到舵机中(图 9(a));然后通过机械接口对接设计,将接口

图 8 利用 LPBF 技术制造的液压阀块。(a)利勃海尔公司研制的钛合金液压集成阀块^[44];(b)Domin Fluid Power 公司开发的直接驱动伺服阀^[45];(c)Materials Solutions 公司研制的航空钛合金液压歧管^[46];(d)Aidro 公司开发的无交叉钻孔液压阀块^[47]

Fig. 8 Hydraulic valve blocks manufactured by LPBF. (a) Titanium alloy hydraulic integrated valve block developed by Liebherr^[44]; (b) direct drive servovalve developed by Domin Fluid Power^[45]; (c) aeronautical titanium alloy hydraulic manifold manufactured by Materials Solutions^[46]; (d) hydraulic valve block without cross drilling developed by Aidro^[47]

耦合到主结构,实现一体化(图 9(b));在此基础上对承力结构进行拓扑优化,减少冗余材料(图 9(c));最终添加机械加工余量,形成打印模型(图 9(d))。考虑到该舵机工作时承受较大压力且内部具有复杂流道,材料的强度和加工精度要求较高,为实现减重,该舵机打印时采用 AlSi10Mg 材料。最终利用 LPBF 技术成功打印出了 AlSi10Mg 舵机壳体结构(图 9(e)),表明 LPBF 技术可有效解决传统舵机内部油路多、工艺孔

多、结构复杂等问题。随后对接口处进行机械加工,对其进行性能测试以验证耐压强度(图 9(f))。实验结果表明:该 3D 打印舵机壳体的重量减轻了约 51%,流阻减小了约 48%,制造周期缩短了约 70%,具有较高的产品可靠性。但舵机内部流道的高精度打印一直是增材制造工艺的难点与挑战,目前,通过内部流道结构自支撑优化与拐角圆滑过渡设计,可在一定程度上实现舵机内流道的精密成形,但仍需要配合后处理。

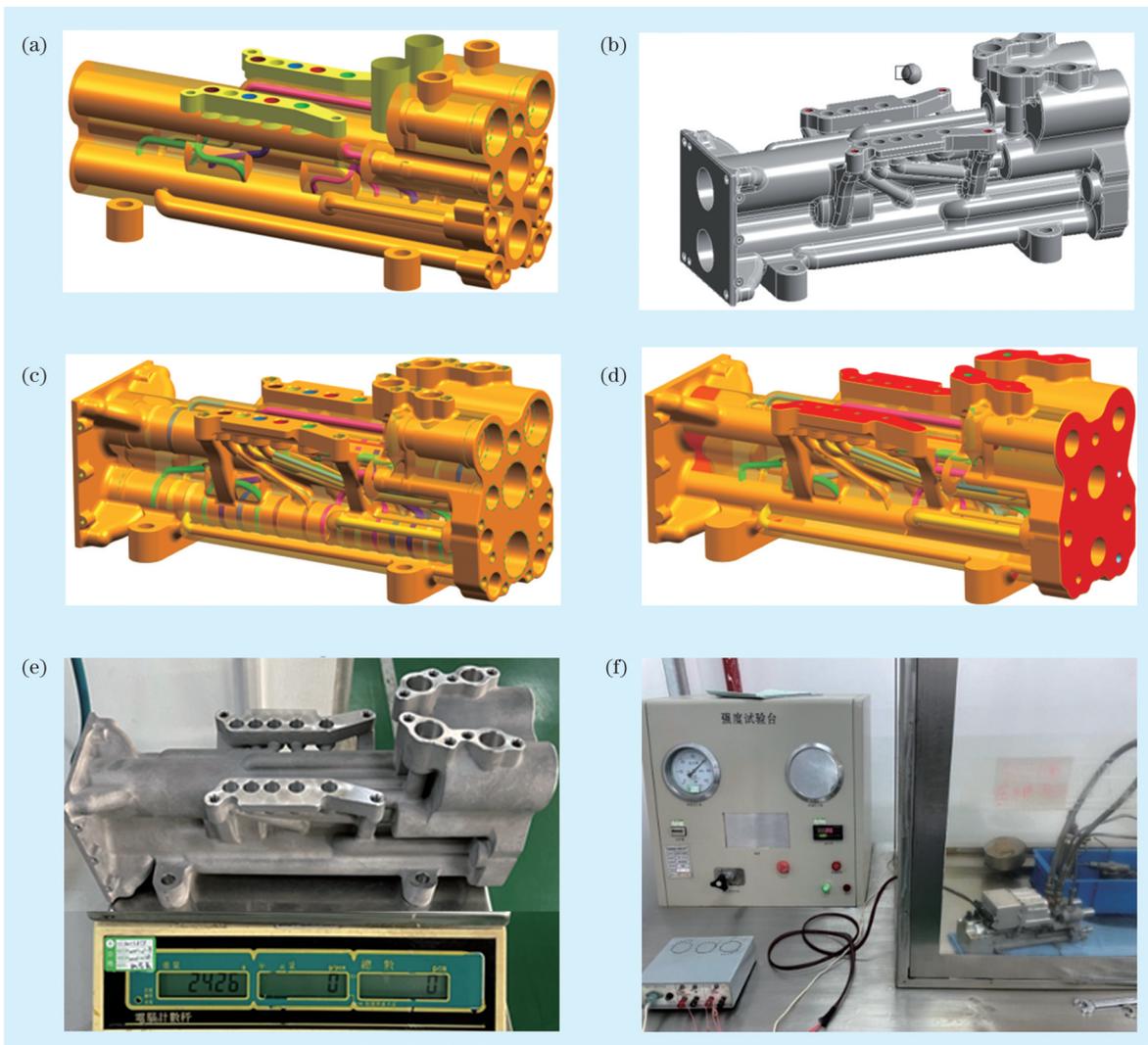


图9 基于LPBF技术研制一体化液压舵机壳体。(a)舵机壳体原始模型设计;(b)机械接口确定;(c)整体结构拓扑优化设计;(d)机械加工预留余量设计;(e)LPBF成形;(f)产品性能验证

Fig. 9 Development of integrated hydraulic steering gear shell based on LPBF. (a) Original model design of steering gear shell; (b) mechanical interface determination; (c) topology optimization design of overall structure; (d) machining allowance design; (e) LPBF forming; (f) verification of product performance

4.2 燃油产品

燃油系统贮存燃油、输运燃油,保证飞机在任何姿态和工作条件下的动力。燃油系统主要由油箱系统、输油系统、加油系统、放油系统等组成。燃油系统轻量化对飞机至关重要,决定了飞机作战半径。燃油产品按照零件特点分为三大类:活门类、泵类和罩类。活门类产品如喷嘴,通过控制燃油压力和流量,为飞机发动机和辅助动力装置不间断供油。活门类产品工作时承受一定温度与较高压力,内部结构复杂,产品精度高。泵类产品如燃油泵,通过离心作用输送油箱中的燃油并使其变为高压液体。该类产品工作时承受较高转速与压力,对材料性能要求较高。罩类产品如燃油罩,主要在加油时保护与固定输油管,此类产品对轻量化和结构强度要求较高。

增材制造技术在活门类产品中最经典的应用是

GE公司为LEAP发动机研制的高温合金燃油喷嘴^[48](图10(a))。该燃油喷嘴头部采用迷宫式复杂流道设计,可实现燃油与空气的高效混合,提高发动机性能,且该设计可保证喷嘴在高温下长时间服役(图10(b))。基于LPBF技术,单个燃油喷嘴尖端的零件数量从焊接使用的20个减少到1个,喷嘴尖端重量减少了约25%,且性能实验表明该燃油喷嘴燃油效率比CFM56发动机高15%(图10(c))。目前,利用LPBF技术,GE公司已为LEAP发动机打印了超3万个燃油喷嘴。中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心利用增材制造技术实现了铝合金空中加油燃油罩的精密成形。传统燃油罩采用机械连接结构,结构冗重(图11(a))。基于增材制造技术,中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心采用气动边条一体化布局对传统燃油罩结构进行优化,实现了壁厚减

薄与内部加强,同时对局部圆角进行了优化,减少了应力集中(图 11(b))。此外,在翼部结构处引入了晶格结构,实现了轻量化(图 11(c))。在增材制造成形时,考虑到燃油罩在工作时承受一定的振动载荷,对材料的强度要求较高,同时兼顾到轻量化要求,该燃油罩激光增材制造成形时选用 AlSi7Mg 材料。但大尺寸薄壁结构在激光加工时的应力变形控制一直是金属激光

增材制造成形的难点。针对这一问题,在该燃油罩打印前,研究者利用仿真模拟对模型进行了迭代优化,最大程度减少了应力变形,最终通过 LPBF 技术成功实现了该加油罩的一体化精密成形(图 11(d))。与传统制造方法相比,增材制造燃油罩实现了翼型一体化成形,成品率显著提升,同时零件重量减少了约 41%,生产周期缩短了 50%。



图 10 GE 公司利用增材制造技术制造燃油喷嘴^[48]。(a)燃油喷嘴 LPBF 成形;(b)喷嘴端部迷宫式复杂流道;(c)燃油喷嘴性能测试
Fig. 10 Development of fuel nozzles by GE using AM^[48]. (a) LPBF forming of fuel nozzles; (b) labyrinth-type complex flow channel on nozzle end; (c) performance test of fuel nozzles

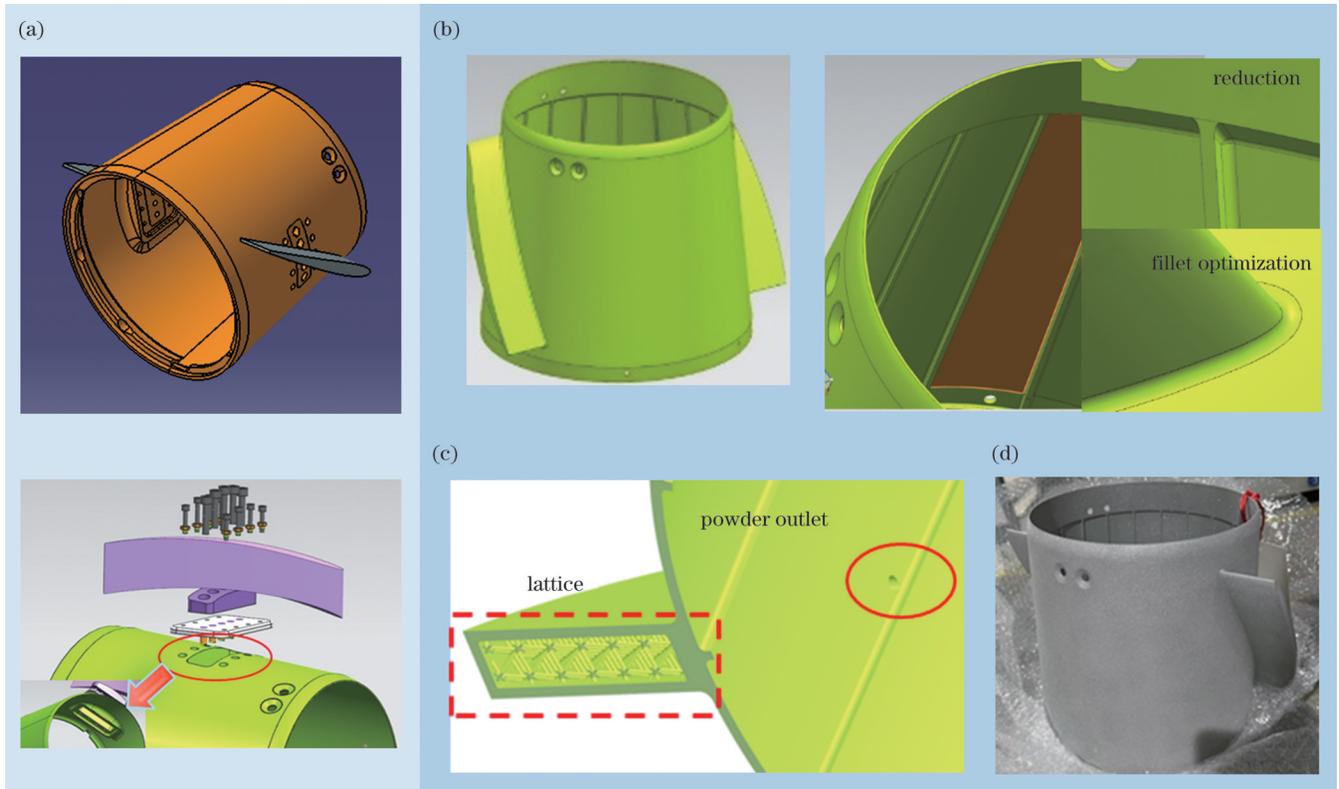


图 11 利用 LPBF 技术研制一体化空中加油燃油罩。(a)原始冗重机械连接结构的燃油罩模型;(b)气动边条一体化设计的燃油罩模型;(c)晶格轻量化的翼型结构;(d)LPBF 成形的燃油罩

Fig. 11 Development of integrated air refueling fuel hood by LPBF. (a) Original fuel hood model with redundant heavy mechanical connection structure; (b) fuel hood model with pneumatic edge integrated design; (c) lightweight airfoil structure using lattice structure; (d) fuel hood formed by LPBF

4.3 环控产品

环控系统作为机载重要系统之一,发挥着提供舒适空气环境的重要作用。环控系统通过控制机舱内的空气温度、湿度、压力、流速等,保证人员舒适的生存与工作环境。环控产品按照零件功能分为两大类:换热类和制冷类。换热类产品如水分分离器、引射器、热交换器等通过介质将热量从热流体传递到冷流体,从而调节温度。此类产品需具备一定功能结构才能完成高效热传递。制冷类产品如涡轮冷却器、液冷泵等,利用外界能量将热量从低温环境转移到高温环境。此类产品外形较复杂,工作室承受较大压力,对产品结构轻量化和强度的要求较高。

增材制造技术具有产品结构-功能一体化设计能力,为换热类产品设计与制造提供了有力保障。Saltzman 等^[49]对比了传统技术加工的波纹板翅片结构气液交叉换热器(飞机油冷却器)与增材制造技术加工的相似结构的热交换器。该团队首先通过 X 射线计算机断层扫描技术获得了传统热交换器的三维结构,以此为基础设计了两用于增材制造的热交换器三维模型,一种是基于传统设计的内部具有规则通道的模型,另一种是在空气侧附加增强功能的模型(图 12(a))。随后基于 LPBF 技术制造出了两种铝合金换热器,并与传统冲压+拼接方法制造出的波纹板

翅片结构换热器进行了对比(图 12(b))。热交换实验表明:3D 打印热交换器与传统方法制造的热交换器相比,总传热增加了 10%;增强型 3D 打印热交换器与传统方法制造的增强型热交换器相比,总传热增加了 14%(图 12(c))。此研究证明了增材制造技术在热交换器实际应用中具有改善传热的潜力。中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心利用增材制造技术制造出喷嘴与管道一体化的引射器结构。原引射器零件数量较多,组件结构复杂,制造时需要机械加工+焊接+装配等多道工艺配合(图 13(a))。喷嘴数量多,易导致焊接质量不稳定,在外力作用下易断裂,且加工效率较低。利用增材制造技术,该引射器实现了主管道结构与引射器喷嘴结构的一体化设计;同时基于静力学强度仿真与动力学流体仿真,对引射器喷嘴面、结构强度、接口位置等关键部位进行了优化(图 13(b))。考虑到该引射器工作时承受一定流体载荷压力与较高温度,材料需要具有一定的高温强度,同时兼顾到减重要求,因此激光增材制造成形时选用 TC4 材料。该引射器喷嘴和管道接口处的尺寸精度要求较高,故打印时接口应力变形控制是该引射器制造的难点与挑战。针对这一问题,研究者在该引射器接口处添加了支撑以控制应力变形,最终基于 LPBF 技术成形出该引射器结构。与

传统方法加工的引射器相比,该引射器重量减少了约 64%(图 13(c)),加工周期缩短 50% 以上,且换热性

能提高了 9.3%,实现了多结构的一体成形,产品可靠性大幅增加。

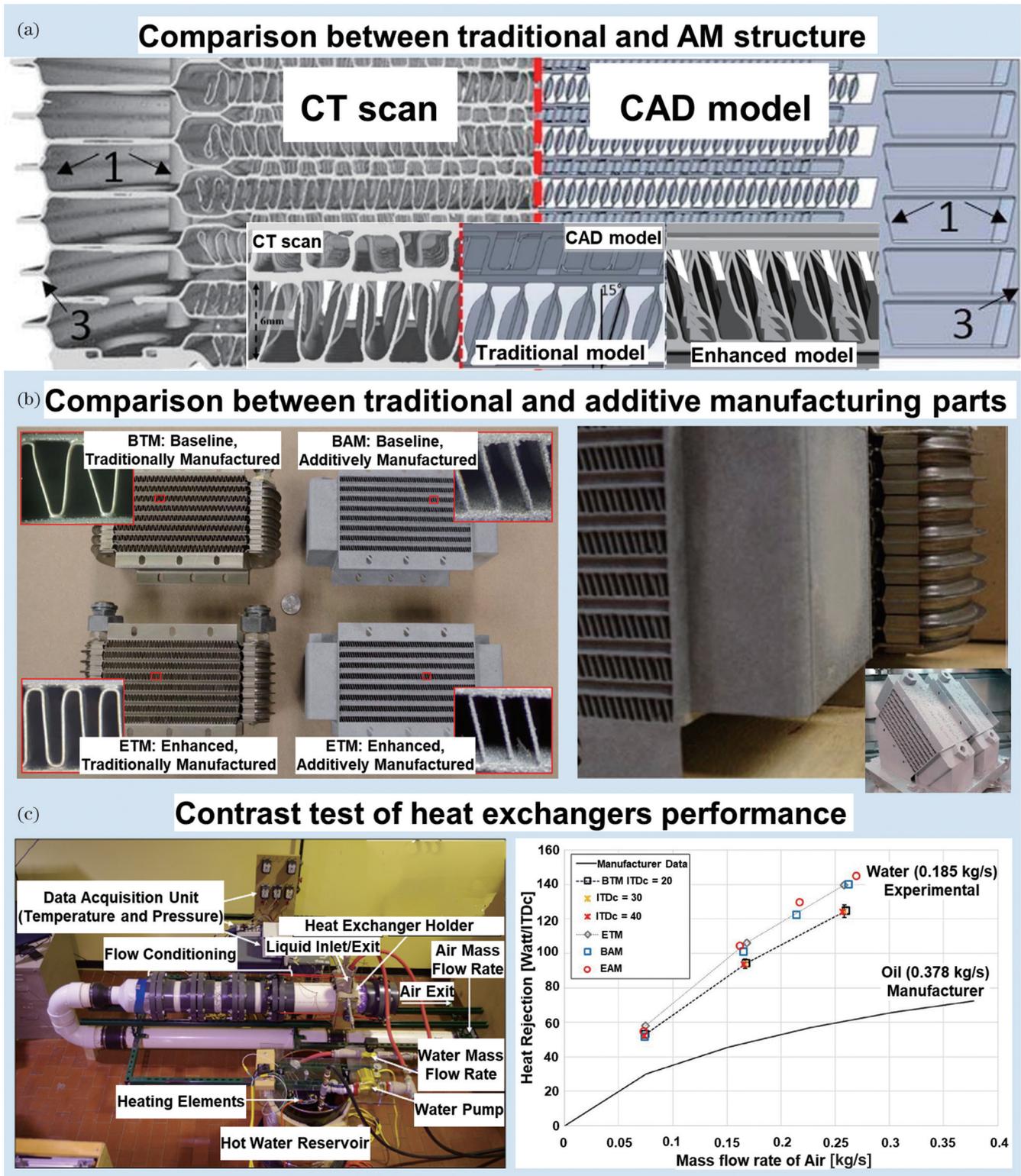


图 12 航空铝合金换热器的传统加工与增材制造加工^[49]。(a)传统换热器波纹板翅片结构与增材制造换热器内部结构的对比；(b)传统方法与增材制造加工的换热器对比；(c)两种工艺加工的换热器性能的对比

Fig. 12 Aviation aluminum alloy heat exchanger manufactured by traditional method and AM method^[49]. (a) Comparison of corrugated plate fin structure in traditional heat exchanger and internal structure of heat exchanger manufactured by AM method; (b) comparison of heat exchangers processed by traditional and AM methods; (c) comparison of performances of heat exchangers manufactured by two processes

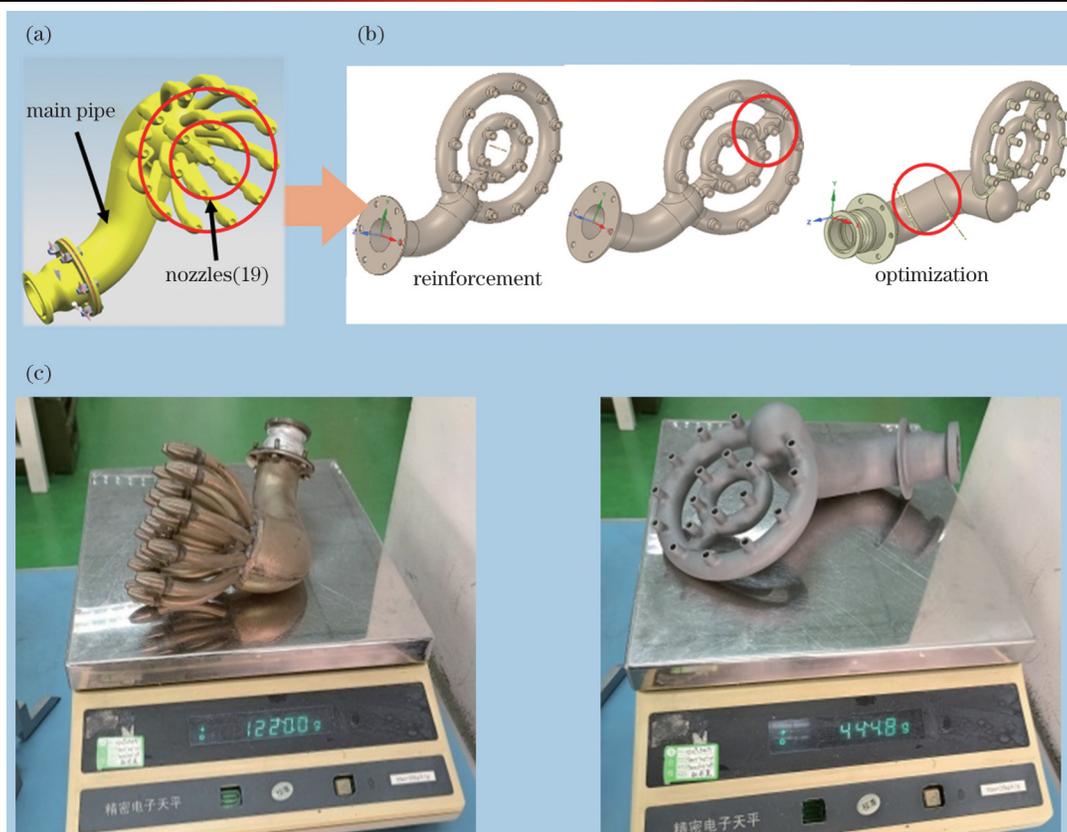


图 13 基于 LPBF 技术研制一体化结构的引射器。(a)原引射器模型;(b)基于静力学仿真与流体动力学仿真的结构优化;(c)传统工艺与增材制造工艺加工的引射器构件对比

Fig. 13 Development of integrated ejector by LPBF. (a) Original model of ejector; (b) structure optimization based on statics simulation and fluid dynamics simulation; (c) comparison of ejector components processed by traditional and AM processes

5 结束语

激光粉末床熔融技术凭借高柔性制造与精密成形能力,在航空机电产品设计与制造领域中的应用范围将越来越大。当前,航空机电产品轻量化研制迫在眉睫,以 LPBF 技术为代表的精密增材制造技术提供了技术支撑。但 LPBF 技术的发展仍存在以下几个挑战,这将是未来航空机电产品设计与制造重点突破的方向。

从 LPBF 技术本身出发,目前 LPBF 制造的航空机电产品易出现孔隙、变形等缺陷,影响产品使用寿命,故对产品制造全过程进行把控尤为重要。利用数字孪生可构建产品全生命周期的过程管控模型,因此发展数字孪生结合的增材制造技术是实现航空机电产品高质量制造的重要手段。此外,在进行大型航空机电产品制造时,LPBF 技术会受限于设备尺寸与激光数量,成形效率有待提升;对于大型构件打印过程中的应力与变形、开裂问题,需加强攻关。故大尺寸、多激光器的 LPBF 装备是今后航空机电产品制造装备的发展方向。同时,大型航空机电产品打印前的多尺度仿真分析是防止应力变形与开裂的重要途径。

从航空机电产品设计出发,目前产品设计大多以传统产品为设计模板,需对其进行结构优化设计以满

足增材制造要求,产品结构设计自由度有待提高。增材制造技术提供的高设计自由度可为航空机电产品的设计提供正向设计思维。未来,轻量化、功能集成化的航空机电产品将是产品设计方向,故需发展轻质高强度材料以替代传统材料,并引入轻量化点阵、晶格结构、拓扑优化结构等,实现结构-性能-功能耦合。

从航空机电产品功能出发,航空机电产品通过气、液等载体完成功能输出,因此产品结构功能复杂,不同产品功能对结构制造精度的要求不同。液流功能的航空机电产品往往具有复杂的内流道结构,故内流道高精度打印是未来航空机电产品制造趋势,发展高精度的激光增减材复合制造技术是提高航空内流道机电产品制造质量的重要技术途径。气流功能的航空机电产品往往承受较大压差与温度变化,对材料的强度与热物性提出了更高要求,可通过不同材料布局设计实现不同功能管理,故发展多材料增材制造技术是实现航空机电产品多功能的重要技术手段。

增材制造技术实现了材料-结构-性能-功能的一体化设计与制造,为航空机电产品的发展提供了变革技术,推动航空机电产品向智能化、轻量化方向发展。当前,增材制造技术已在多种型号航空机电产品制造中实现应用,展现出巨大的应用潜力。未来,面向更高性能的多功能航空机电产品,数字孪生结合的增材制造

技术、增减材复合制造技术及多材料增材制造技术将是航空机电产品增材制造技术的重点发展方向。

参 考 文 献

- [1] 卢秉恒. 增材制造技术: 现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
Lu B H. Additive manufacturing: current situation and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19-23.
- [2] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing(3D printing)technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.
- [3] Fasel U, Keidel D, Baumann L, et al. Composite additive manufacturing of morphing aerospace structures[J]. Manufacturing Letters, 2020, 23: 85-88.
- [4] Li C X, Pisignano D, Zhao Y, et al. Advances in medical applications of additive manufacturing[J]. Engineering, 2020, 6(11): 1222-1231.
- [5] 欧瑞康增材制造事业部. 增材制造在航空航天与汽车领域的创新应用[J]. 现代制造, 2020(1): 52-53.
Oerlikon A M. Innovative applications of additive manufacturing in aerospace and automotive[J]. Maschinen Markt, 2020(1): 52-53.
- [6] Martin J H, Yahata B D, Hundley J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549(7672): 365-369.
- [7] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [8] Deckard C R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering: US5316580[P]. 1994-05-31.
- [9] Kruth J P, Mercelis P, Van Vaerenbergh J, et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting[J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(1): 26-36.
- [10] Cooke S, Ahmadi K, Willerth S, et al. Metal additive manufacturing: technology, metallurgy and modelling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 978-1003.
- [11] Liu Z Y, Zhao D D, Wang P, et al. Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 100: 224-236.
- [12] Li W, Nagaraja K M, Zhang X C, et al. Multi-physics modeling of powder bed fusion process and thermal stress near porosity[J]. Manufacturing Letters, 2022, 31: 78-82.
- [13] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- [14] 尹滨兆, 秦瑜, 温鹏, 等. 激光粉末床熔融制备金属骨植入物[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1100001.
Yin B Z, Qin Y, Wen P, et al. Laser powder bed fusion for fabrication of metal orthopedic implants[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1100001.
- [15] GE. First additive manufactured part to be installed on GENx commercial airline engines [EB/OL]. (2018-11-02) [2023-01-09]. <https://www.ge.com/additive/press-releases/first-additive-manufactured-part-be-installed-genx-commercial-airline-engines>.
- [16] Orme M E, Gschweiltl M, Ferrari M, et al. Designing for additive manufacturing: lightweighting through topology optimization enables lunar spacecraft[J]. Journal of Mechanical Design, 2017, 139(10): 100905.
- [17] CompanyAirbus. Pioneering bionic 3D printing[EB/ OL]. (2016-03-03) [2023-01-09]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-03-pioneering-bionic-3d-printing>.
- [18] 杨永强, 宋长辉, 王迪. 激光选区熔化技术及其在个性化医学中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(21): 140-151.
Yang Y Q, Song C H, Wang D. Selective laser melting and its applications on personalized medical parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(21): 140-151.
- [19] Sames W J, List F A, Pannala S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(5): 315-360.
- [20] 李虎, 赵伟江, 李瑞迪, 等. 增材制造马氏体时效钢的研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402102.
Li H, Zhao W J, Li R D, et al. Progress on additive manufacturing of maraging steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402102.
- [21] Zhang B, Li Y T, Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 515-527.
- [22] Kok Y, Tan X P, Wang P, et al. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review[J]. Materials & Design, 2018, 139: 565-586.
- [23] Dai D H, Gu D D. Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: simulation and experiments[J]. Materials & Design, 2014, 55: 482-491.
- [24] Weingarten C, Buchbinder D, Pirch N, et al. Formation and reduction of hydrogen porosity during selective laser melting of AlSi10Mg[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 112-120.
- [25] Wang L, Zhang Y M, Chia H Y, et al. Mechanism of keyhole pore formation in metal additive manufacturing[J]. Npj Computational Materials, 2022, 8(1): 1-11.
- [26] Gu D D, Zhang H M, Dai D H, et al. Laser additive manufacturing of nano-TiC reinforced Ni-based nanocomposites with tailored microstructure and performance[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 163: 585-597.
- [27] Kruth J P, Froyen L, Van Vaerenbergh J, et al. Selective laser melting of iron-based powder[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149(1/2/3): 616-622.
- [28] 张格, 王建宏, 张浩. 金属粉末选区激光熔化球化现象研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(2): 262-265.
Zhang G, Wang J H, Zhang H. Research progress of balling phenomena in selective laser melting[J]. Foundry Technology, 2017, 38(2): 262-265.
- [29] Zhou X, Liu X H, Zhang D D, et al. Balling phenomena in selective laser melted tungsten[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 33-42.
- [30] Li R D, Liu J H, Shi Y S, et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(9): 1025-1035.
- [31] Qu M L, Guo Q L, Escano L I, et al. Controlling process instability for defect lean metal additive manufacturing[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1-8.
- [32] 姚讯杰, 王佳玮, 杨雁程, 等. 金属构件激光增材制造缺陷产生机理及控制机制探究[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 1402802.
Yao X J, Wang J W, Yang Y C, et al. Review on defect formation mechanisms and control methods of metallic components during laser additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402802.
- [33] Bourell D, Kruth J P, Leu M, et al. Materials for additive manufacturing[J]. CIRP Annals, 2017, 66(2): 659-681.
- [34] Vrancken B, Ganeriwala R K, Matthews M J. Analysis of laser-induced microcracking in tungsten under additive manufacturing conditions: experiment and simulation[J]. Acta Materialia, 2020, 194: 464-472.
- [35] Bian P Y, Shi J, Liu Y, et al. Influence of laser power and scanning strategy on residual stress distribution in additively manufactured 316L steel[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106477.

- [36] Chen S G, Gao H J, Zhang Y D, et al. Review on residual stresses in metal additive manufacturing: formation mechanisms, parameter dependencies, prediction and control approaches[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 17: 2950-2974.
- [37] 吴光辉. 大飞机引领先进材料发展[J]. *现代交通与冶金材料*, 2021, 1(5): 1-5.
Wu G H. Commercial aircraft program promotes advanced material development[J]. *Modern Transportation and Metallurgical Materials*, 2021, 1(5): 1-5.
- [38] 李红, 闫维嘉, 张禹, 等. 先进航空材料焊接过程热裂纹研究进展[J]. *材料工程*, 2022, 50(2): 50-61.
Li H, Yan W J, Zhang Y, et al. Research progress of hot crack in fusion welding of advanced aeronautical materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(2): 50-61.
- [39] 闵师领, 侯娟, 张恺, 等. 激光粉末床技术制造 GH3536 合金研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1700008.
Min S L, Hou J, Zhang K, et al. Laser powder bed fusion of GH3536 alloy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1700008.
- [40] MOOG. A new way of looking at metal additive manufacturing processes[EB/OL]. [2023-01-09]. https://www.moog.com/news/blog/Innovation/GeorgeSmallVeripart_1.html.
- [41] MOOG. Additive manufacturing [EB/OL]. [2023-01-09]. <https://www.moog.com/about-us/our-brands/3dmetal.html>.
- [42] Xie G L, Dong Y J, Zhou J, et al. Topology optimization design of hydraulic valve blocks for additive manufacturing[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234(10): 1899-1912.
- [43] Lisowski E, Rajda J. CFD analysis of pressure loss during flow by hydraulic directional control valve constructed from logic valves[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 65: 285-291.
- [44] LIEBHERR. Technologies for the future[EB/OL]. [2023-01-09]. <https://www.liebherr.com/en/usa/products/aerospace-and-transportation-systems/aerospace/technologies-for-the-future/technologies-for-the-future.html>.
- [45] 3D Printing Industry [EB/OL]. [2023-01-09]. <https://3dprintingindustry.com/news/domin-champions-fluid-power-sustainability-with-renishaw-metal-am-187753>.
- [46] Materials Solutions[EB/OL]. [2023-01-09]. <https://materialssolutions.co.uk/>.
- [47] Smelov V G, Kokareva V V, Agapovichev A V. A review of hydraulic and pneumatic aggregates manufacturing by additive technologies[C]//2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM), September 16-18, 2020, Samara, Russia. New York: IEEE Press, 2020.
- [48] GE. New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles [EB/OL]. (2018-10-04) [2023-01-09]. <https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>.
- [49] Saltzman D, Bichnevicius M, Lynch S, et al. Design and evaluation of an additively manufactured aircraft heat exchanger[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 138: 254-263.

Application Status and Development of Laser Powder Bed Fusion Technology in Typical Electromechanical Aviation Products

Guo Meng^{1,2*}, Dai Yanfeng^{1,2}, Huang Binda^{1,2}

¹AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

²Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing 210016, Jiangsu, China

Abstract

Significance Weight reduction in aircraft systems is of great significance for reducing the consumption of aircraft fuel, and therefore has always been crucial in the development of aviation equipment. The weight of electromechanical aviation products in aircraft systems accounts for approximately 30% of the whole aircraft, and the number of electromechanical parts accounts for approximately 60%, and are characterized by large weights and numbers, as well as complexity. Currently, there are two main approaches for reducing weight: upgrading materials and design. Conventional structural optimization and applications of lightweight metal materials to reduce weight have reached the optimization limit and are gradually becoming unable to meet new lightweight demands. Therefore, there is an urgent need to develop new materials, structures, and technologies to realize lightweight designs and manufacture electromechanical aviation products. Metal laser additive manufacturing technology with integrated design and manufacturing capabilities of material-structure-performance-function can provide advanced methods for lightweight design and high-performance manufacturing of electromechanical aviation products, improving the innovative design and rapid manufacturing capability of electromechanical aviation products and promoting the rapid development of the electromechanical aviation industry.

Progress With its ability for highly flexible manufacturing and precision forming, laser powder bed fusion (LPBF) technology will be increasingly used in the design and manufacture of electromechanical aviation products. MOOG was the first company to apply LPBF technology to manufacture complex hydraulic parts and has accumulated considerable experience in pore control and material performance verification during the printing process of hydraulic products. MOOG has developed a new actuator structure and the next generation of aviation motor manifolds based on LPBF (Fig. 6). Based on LPBF technology, Liebherr developed a titanium hydraulic integrated valve block, which is 35% lighter than the original product and was certified for its first flight on the Airbus A380 in 2017 (Fig. 8). Domin Fluid Power, a British manufacturer of fluid power systems, developed a direct-drive servo valve using LPBF technology (Fig. 8). Materials Solutions developed a high-performance aerospace titanium alloy hydraulic manifold using an additive manufacturing (AM) design (Fig. 8). The hydraulic manifold is precisely shaped based on LPBF technology. The hydraulic manifold can satisfy the requirements of the most stringent aerospace working conditions while ensuring high safety and reliability. In

the field of hydraulic products, an integrated hydraulic steering gear shell was successfully developed by Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems based on LPBF (Fig. 9), which demonstrated that LPBF can effectively solve the problems of multiple oil paths, multiple process plugholes, and complex structures in traditional steering gears. Compared to the traditional steering gear structure, the 3D printed steering gear shell reduced weight by approximately 51%, flow resistance by approximately 48%, and the manufacturing cycle by approximately 70%, showing high product reliability. In the field of fuel products, an integrated air refueling fuel hood was successfully developed by Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems based on LPBF (Fig. 11). By using a pneumatic edge layout, integrated precision forming of the fuel hood was realized. Compared with those by traditional manufacturing methods, the AM fuel hood achieves integrated airfoil forming, which significantly improves the yield and reduces the component weight and production cycle by approximately 41% and 50%, respectively. In the field of environmental control products, an integrated ejector was successfully developed by Nanjing Engineering Institute of Aircraft Systems based on LPBF (Fig. 13). The ejector realized an integrated design of the main pipe and ejector nozzle structures, which could reduce the risk of the manufacturing process. Compared with that by the traditional manufacturing method, the weight of the ejector was reduced by approximately 64%, processing cycle was shortened by more than 50%, and the heat transfer performance was improved by 9.3%. Moreover, multistructure integrated forming was realized, and the reliability of the product was greatly increased.

Conclusions and Prospects AM technology can help realize the integrated design and manufacturing of materials, structures, performances, and functions, aiding in the development of smart and lightweight electromechanical aviation products. Currently, AM is applied in the manufacture of various types of electromechanical aviation products, demonstrating great application potential. In the future, digital twin-driven AM technology, hybrid additive and subtractive manufacturing technology, and multimaterial AM technology will be the key research areas for the development of aviation electromechanical products.

Key words laser technique; aviation electromechanical products; laser powder bed fusion; lightweight design; rapid prototyping