

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.001

## 航空航天结构轻量化设计制造技术发展现状与挑战

廖文和<sup>1,2</sup>, 戴宁<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 轻量化技术是指在满足结构性能需求的前提下, 通过对材料、结构和制造工艺等方面的优化, 减少结构质量的技术, 已经成为新一代航空航天装备发展的关键技术之一。本文首先分析了轻量化技术的发展历程。其次, 从设计原理、组成方式和优化方法角度, 介绍了仿生结构设计、胞元结构设计和高效拓扑优化设计三类轻量化设计方法。然后, 从轻量化制造工艺和模式的角度阐述了增材制造、协同制造和复合材料制造在航空航天结构轻量化制造中的应用。最后, 讨论了轻量化技术面临的挑战和未来的发展。

**关键词:** 轻量化设计; 胞元结构设计; 增材制造; 复合材料制造

**中图分类号:** TH16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)03-0347-14

## Development and Challenge of Lightweight Design and Manufacturing Technology for Aerospace Structures

LIAO Wenhe<sup>1,2</sup>, DAI Ning<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Lightweight technology refers to the technology of reducing the weight of structures by optimizing materials, structures, and manufacturing processes while meeting structural performance requirements. It has become one of the key technologies for the development of a new generation aerospace equipment. This paper firstly analyzes the development process of lightweight technology. Secondly, from the perspectives of design principles, composition methods, and optimization methods, three lightweight design methods are reviewed in detail: bionic structure design, cellular structure design, and efficient topology optimization design. Then, the applications of additive manufacturing, collaborative manufacturing, and composite material manufacturing in the lightweight manufacturing of aerospace structures are introduced from the perspectives of lightweight manufacturing processes and modes. Finally, the challenges and development prospects of lightweight technology are discussed.

**Key words:** lightweight design; cellular structure design; additive manufacturing; composite manufacturing

深空探测器、先进战机和高超声速飞行器等航空航天装备当前正朝着长航时、高承载和高机动等方向发展, 对轻量化技术提出了迫切需求。航空航天结构轻量化技术可以减少飞行器燃料消耗, 提升续航能力和机动性, 是未来航空航天装备发展关键

技术之一。

轻量化技术是指在满足结构性能需求的前提下, 通过对材料、结构和制造工艺等方面的优化, 减少结构质量的技术。轻量化技术主要分为材料轻量化和结构轻量化。材料轻量化是开发和利用新

**收稿日期:** 2023-05-01; **修订日期:** 2023-06-10

**作者简介:** 廖文和, 男, 教授, 博士生导师, 国家万人计划领军人才, 研究方向: 微小卫星总体设计、航空航天产品数字化设计制造和数字化医疗装备。

**通信作者:** 廖文和, E-mail: cnwho@njust.edu.cn。

**引用格式:** 廖文和, 戴宁. 航空航天结构轻量化设计制造技术发展现状与挑战[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 347-360. LIAO Wenhe, DAI Ning. Development and challenge of lightweight design and manufacturing technology for aerospace structures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 347-360.

型轻质材料来制造零部件的技术,如目前广泛用于航空航天飞行器结构的碳纤维复合材料以及镁铝等各类轻质合金。结构轻量化是指通过调控零件可设计区域的形状、尺寸及材料分布,降低整体质量的技术,主要包括仿生结构设计、胞元结构设计以及拓扑优化设计等。轻量化技术发展的主线自20世纪50年代起一直以材料轻量化为主,航空航天飞行器材料使用中钢材占比持续减少,钛合金在关键件的占比稳步上升,自20世纪60年代起铝合金一直占据主导地位,进入20世纪80年代后纤维复合材料发展迅速,如美国F35战机相比于第3代战机F16复材结构占比增加了约30%,而合金材料的占比则下降了约60%;同时以拓扑优化、胞元

结构设计、仿生结构设计为代表的高效结构设计技术的发展,掀起了轻量化技术发展的浪潮,如图1所示。本文对现有结构轻量化设计和制造技术发展现状进行了调研,如图2所示,并探讨了轻量化技术未来的发展趋势。

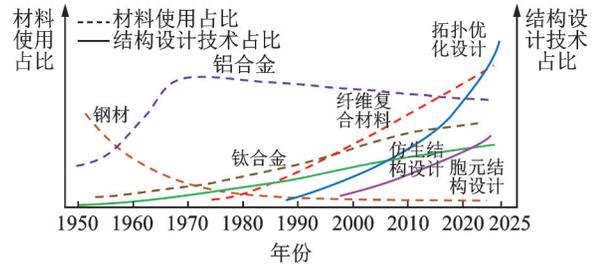


图1 轻量化技术发展

Fig.1 Development of lightweight technology

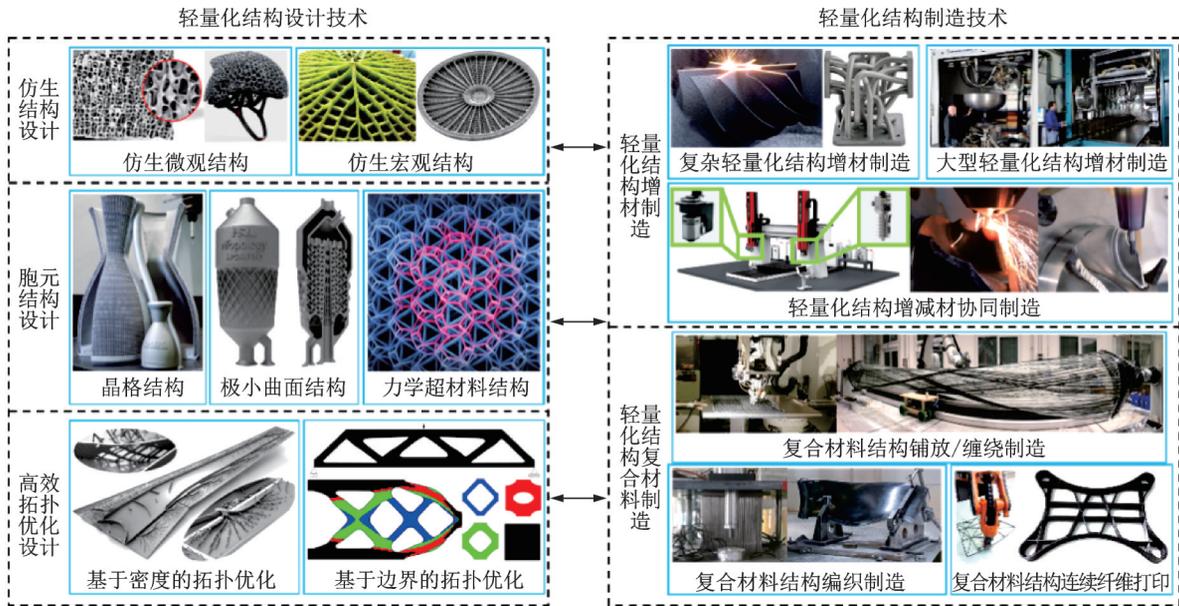


图2 应用于航空航天结构的轻量化设计制造技术

Fig.2 Lightweight design and manufacturing technology applied in aerospace structure

# 1 轻量化结构设计技术

## 1.1 仿生结构设计技术

在自然界中,许多生物经过亿万年进化生成了与其特定环境相适应的极致高效功能结构,具有低密度、高强韧的结构特征。仿生轻量化设计从独特的生物宏观结构功能和结构尺寸出发,依据相似性原理,采用仿生设计方法和手段获得与原生物具有相似功能和力学特征的结构设计方法,该方法有望获得综合力学性能优异、功能独特的轻质结构,从而满足航空航天领域的应用需求<sup>[1]</sup>。

### (1) 仿生微观结构设计

仿生微结构具有孔隙率高,表面积大和质量轻等特点,是仿生功能结构的主要表现形式之一。骨骼属于典型的轻质多孔结构,如图3(a)所示,具有轻质高强和耐冲击的特点<sup>[2]</sup>。蝴蝶翅膀在纳

米尺度下表现为三周期极小曲面多孔结构<sup>[3]</sup>,在轻量化和光学等领域有着广泛的应用,如图3(b)所示。Mao等<sup>[4]</sup>从轻质高强墨鱼骨中获得灵感,设计了具有出色强度和能量吸收能力的多孔微结构,如图3(c)所示。竹子具有轻质、高强韧和能量吸收效率高的特点,如图3(d)所示。文献<sup>[5]</sup>根据竹壁微结构设计出含有类筛管的梯度竹子仿生微结构,将能量吸收能力提升了4倍。Caiazza等<sup>[6]</sup>利用激光选区熔化(Selective laser melting, SLM)制造技术制作了泡沫仿生多孔结构,其体积减少了68%,如图3(e)所示。马玉秋等<sup>[7]</sup>根据白金花龟鞘翅表皮层中纤维铺排方式以及微观结构特征设计了如图3(f)所示的仿鞘翅的轻质高韧夹芯结构,该结构具有更优异的韧性,且与蜂窝夹芯结构承压能力相当。

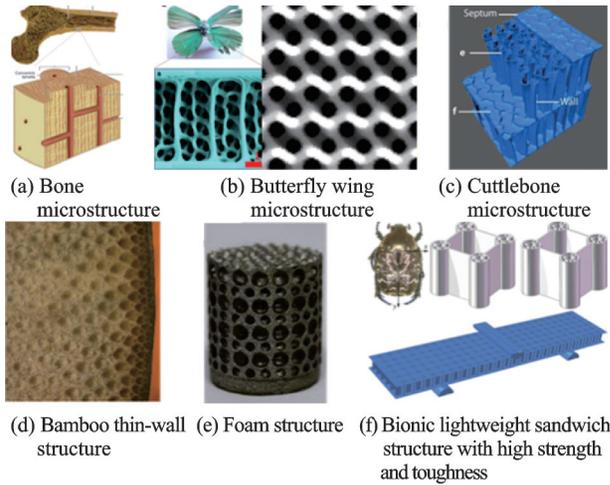


图 3 仿生微观结构及其应用

Fig.3 Biomimetic microstructures and applications

(2) 仿生宏观结构设计

宏观仿生结构一直是航空航天高效承载结构设计研究的重点之一。宏观仿生结构通过参考自然界相似工况下生物进化的结构外形,通过外形的仿生设计优化,获得轻质高效的承载性能。张伟南等<sup>[8]</sup>探究了王莲筋脉布局的仿生原理,提出了主应力场驱动的薄壁异形舱段加强筋设计方法,该方法生成的仿生加强筋结构与传统的加强筋相比提高了33%的比刚度,如图4(a,b)所示。Liu等<sup>[9]</sup>受到了叶脉结构的启发,提出了仿生自适应结构设计方法,该方法能够以生长的方式设计出性能优异的轻质加筋板,如图4(c,d)所示。蜂窝结构具有优异的承载性能,是目前应用最广泛的仿生结构之一<sup>[10]</sup>,如图4(e)所示。Sun等<sup>[11]</sup>设计了铝制蜂窝夹层板三点弯曲和板内压缩试验,研究了蜂窝夹层失效行为。Han等<sup>[12]</sup>采用梯形蜂窝块填充波纹板的间隙,制备了一种新型轻质蜂窝复合芯夹层结构,与同等质量的轻质夹层结构相比,该复合结构在强度和能量吸收方面优势明显,如图4(f)所示。

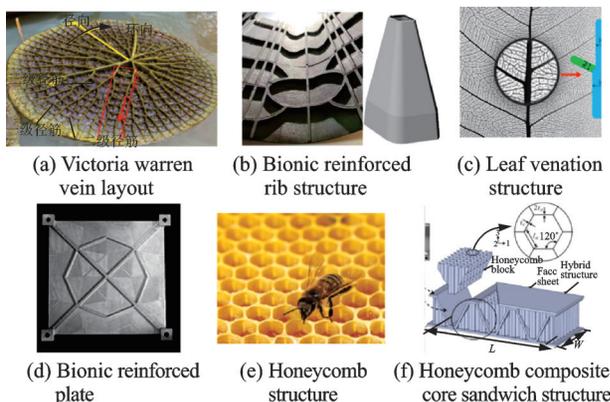


图 4 仿生宏观结构及其应用

Fig.4 Bionic macrostructures and applications

1.2 胞元结构设计技术

随着参数化设计技术和先进制造技术的发展,具有较强的可设计性和多功能性的胞元结构得到了迅猛发展和应用。胞元结构的多样性建模可以在轻量化的同时实现对材料结构、强度刚度和韧性等宏观力学性能调控和功能设计,近年来成为研究的热点之一。

(1) 晶格结构设计

晶格结构是一种由梁、面或点等基本几何单元组成的空间桁架结构,一般具有规则的排列方式,如图5(a)所示。晶格结构利用参数化调节杆径可以高效地改善结构性能<sup>[13]</sup>。Li等<sup>[14]</sup>提出了一种各向异性晶格结构的设计优化方法,优化后的各向异性共形梯度晶格结构具有更强的刚度和抗屈曲性能。Wang等<sup>[15]</sup>基于拓扑优化和尺寸优化,实现了舵翼结构实体与晶格的混合设计,如图5(b)所示。任利民等<sup>[16]</sup>使用参数化边界强化技术,对晶格结构和实体结构的连接区域进行了增强,确保了载荷向内部结构的有效传递,如图5(c)所示。徐赣君等<sup>[17]</sup>基于仿真结果对晶格结构的节点进行了优化增强,节点增强后的齿轮可以在提高承载能力的同时降低振幅。Moon等<sup>[18]</sup>设计了最佳弹性性能的晶格桁架结构,并用于无人机机翼设计,如图5(d)所示,该机翼具有柔性结构的特点,可提高无人机的机动性。

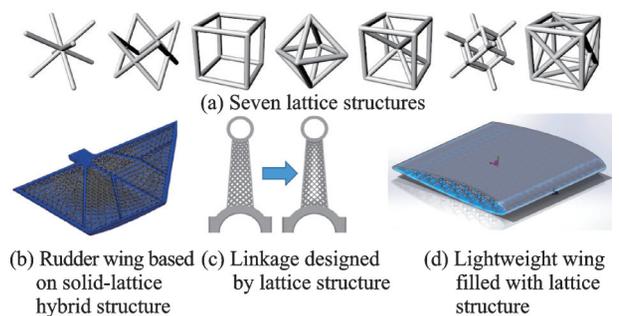


图 5 晶格结构及其应用

Fig.5 Lattice structure and applications

(2) 极小曲面结构设计

三周期极小曲面(Triply periodic minimal surface, TPMS)在3个方向上具有周期性,是一种平均曲率为零的曲面,具有光滑的表面和连通的内部空腔。在设计上有显著的优势。围绕结构对散热、换热和承载等性能的需求,异质极小曲面<sup>[19]</sup>、功能梯度极小曲面<sup>[20]</sup>以及多尺度极小曲面<sup>[21]</sup>等研究备受关注,如图6(a~c)所示。为了改善结构的力学性能,Jiang等<sup>[22]</sup>提出了功能梯度极小曲面结构的自适应生成和优化方法,并使用该方法设

计了卫星铰链支架,将结构的压缩性能提高了25.23%,如图6(d)所示。Ren等<sup>[23]</sup>基于拓扑优化和主应力方向设计了如图6(e)所示的具有功能梯度的异质TPMS结构,在质量相同的前提下提高了结构的刚度。在能量吸收方面,Peng等<sup>[24]</sup>基于极小曲面结构设计了新型夹芯板,提高了结构的弯曲性能和能量吸收能力,如图6(f)所示。

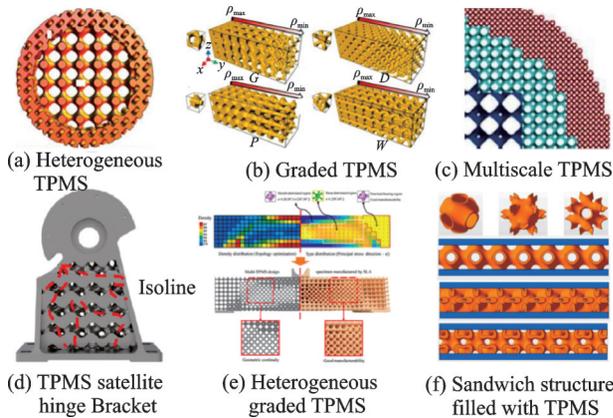


图6 TPMS结构及其应用

Fig.6 TPMS structure and applications

(3) 力学超材料结构设计

力学超材料是近年来智能材料领域的研究热点,因其具备不同于天然材料的超常物理性质而备受关注<sup>[25]</sup>。通过人工设计各种不同的微结构,力学超材料可以在载荷的作用下呈现正泊松比、负泊松比、零泊松比与扭转等不同的力学性能<sup>[26]</sup>。2017年Frenzel等<sup>[27]</sup>首次设计出了可在压缩载荷作用下发生扭转的新型力学超材料,如图7(a)所示。力学超材料由于其性能独特和可编程设计的优点可以作为柔性机械臂和变体机翼的结构单元。程基彬等<sup>[28]</sup>以力学超材料为基础设计了柔性机械臂,该机械臂可通过力学超材料的变形实现多

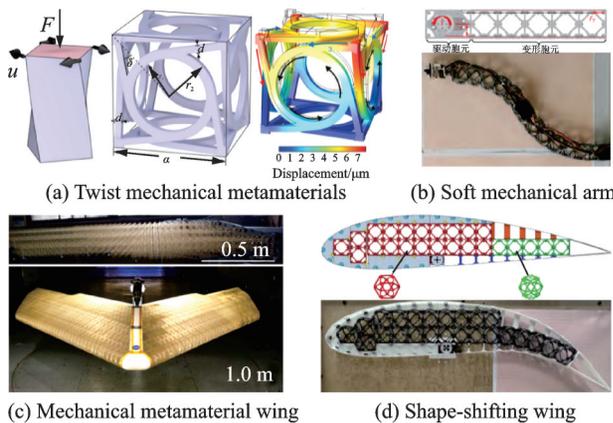


图7 力学超材料在航空航天领域的应用

Fig.7 Applications of mechanical metamaterials in the aerospace

重弯曲运动,如图7(b)所示。Cramer等<sup>[29]</sup>使用超材料结构作为构建单元,组装完成了超材料机翼,如图7(c)所示,提高了气动效率。熊继源等<sup>[30]</sup>提出了一种基于力学超材料的柔性可变后缘结构,该结构具有质量轻以及变形响应速度快的特点,如图7(d)所示。

1.3 高效拓扑优化技术

拓扑优化是一种根据给定的载荷工况、约束条件和性能指标,在给定的区域内对材料分布进行优化的数学方法,是目前主流的结构轻量化技术之一。现有的拓扑优化算法可分为基于密度拓扑优化和基于边界拓扑优化

(1) 基于密度的拓扑优化

将单元的相对密度作为设计对象,优化相对密度分布从而得到最佳拓扑结构的方法是目前常用的拓扑优化技术之一,其中固体各向同性惩罚法(Solid isotropic material penalization, SIMP)和进化结构法(Evolutionary structural optimization, ESO)都是代表性密度优化技术。SIMP方法使用指数的方式来表示单元的相对密度,从而确保单元的密度可以在0和1之间连续变化<sup>[31]</sup>。Xie等<sup>[32]</sup>采用SIMP方法对强制对流空气散热器结构进行优化设计,以最小压降为优化目标,以传热性能为约束,设计了直翅片散热器,该散热器将平均温度降低了5.76%,如图8(a)所示。Aage等<sup>[33]</sup>使用超级计算机对机翼进行了全尺寸的拓扑优化,该机翼具有与鸟类的骨骼相似的结构,如图8(b)所示。受到自然界结构演化过程的启发,Xie等<sup>[34]</sup>提出了ESO,并进一步提出了双向进化结构优化法(Bi-directional evolutionary structural optimization, BESO)<sup>[35]</sup>,该方法可以从结构中去多余或低效的材料同时添加新的材料来改善结构的性能。与SIMP方法相比,BESO在微观结构的设计中展示出了稳健和高效的性能。Gonçalves等<sup>[36]</sup>将改进的ESO算法与径向点插值法相结合,实现了最佳材料配置,该方法设计的机翼翼肋如图8(c)所示。Song等<sup>[37]</sup>建立了结合随机抽样灵敏度分析策略的BESO方法,并利用该方法设计了涡轮盘子午面构型,将总质量减轻了21.35%,应变能提高了8.5%。

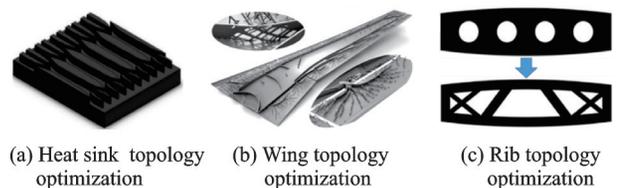


图8 基于密度的拓扑优化

Fig.8 Topology optimization based on density

(2) 基于边界的拓扑优化

为了直接对结构的边界进行优化,从而得到具有清晰边界的优化结果,研究人员提出并发展了基于水平集方法的拓扑优化方法<sup>[38]</sup>,如图 9(a)所示。水平集的基本思想是将结构边界看成高一维空间隐函数的零水平集,同时边界的演化也扩充到高一维的空间中。为了减少设计变量,提高优化效率,Guo 等<sup>[39]</sup>提出了一种移动可变形组件(Moving morphable component, MMC)拓扑优化方法,如图 9(b)所示。Gao 等<sup>[40]</sup>基于水平集方法提出了一种新的多尺度拓扑优化方法,该方法考虑了宏观结构的拓扑结构、多种材料微结构的拓扑结构以及它们在宏观结构中的总体分布,提高了结构的刚度和优化过程的稳定性,如图 9(c)所示。Jiang 等<sup>[41]</sup>使用 MMC 拓扑优化方法对薄壁件的加强筋进行了优化。该方法可以获得清晰的结构边界,并且改善了结构的局部失效和屈曲,如图 9(d)所示。张横等<sup>[42]</sup>提出了一种基于水平集方法融合自适应贴体网格的拓扑优化并行计算的新框架,可以直接获得优化连杆结构的网格模型,提高了优化效率,如图 9(e)所示。Zhou 等<sup>[43]</sup>提出了一种基于移动立方体算法的参数化水平集几何拓扑优化方法,使用该方法生成的三维悬臂梁如图 9(f)所示。

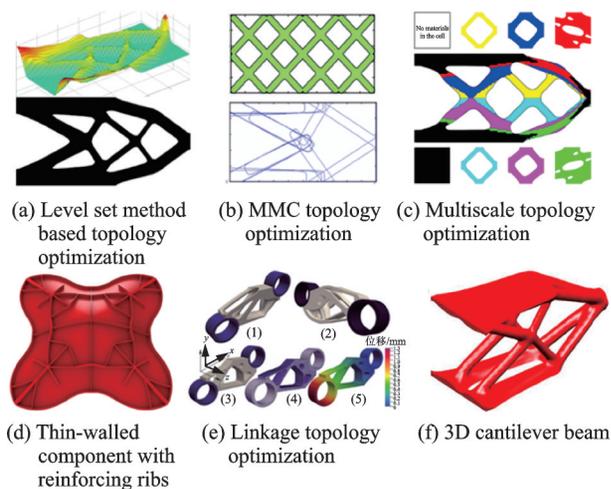


图 9 基于边界的拓扑优化

Fig.9 Topology optimization based on boundary

2 轻量化结构制造技术

在通过拓扑优化减少结构体积,晶格填充降低结构质量的同时,轻量化结构的制造难度显著提升。为了满足复杂轻量化结构的制造工艺要求,增材制造技术、协同制造技术和复合材料成形技术等成为制造轻量化结构的主要技术手段。

2.1 轻量化结构增材制造技术

增材制造具有制造灵活性强、生产效率高等优

点,已成为复杂轻量化结构主要的制造手段。随着轻量化结构在航空航天领域应用范围不断扩大,增材制造技术也随之逐渐向复杂化、大型化和协同化方向发展。

(1) 复杂轻量化结构增材制造技术

仿生晶格结构和极小曲面结构易于建模设计,结构连通性好,具备轻质高强的特点,但由于结构复杂,通常需采用增材制造技术进行制造。激光粉末床熔融技术通过选择性熔化薄层金属粉末的特定部分,实现逐层制造,能够以较高效率制造高强度的复杂结构<sup>[44]</sup>,如图 10(a)所示。美国 MOOG 公司基于 SLM 技术开发了航空用液压歧管,通过集成了复杂流道,极大地减少了零件数量,实现了轻量化、高性能和低成本制造<sup>[45]</sup>,如图 10(b)所示。美国 nTop 公司使用 SLM 技术基于极小曲面结构制造了新型热交换器,并用于涡轮发动机中<sup>[46]</sup>,如图 10(c)所示。

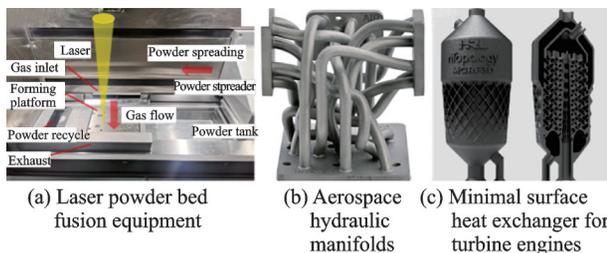


图 10 激光粉末床熔融制造技术

Fig.10 Laser powder bed fusion technology

精密固相增材制造技术可以在室温环境中进行冶金结合<sup>[47]</sup>,如图 11(a)所示,相较于其他增材制造技术具有无变形、效率高且绿色环保等特点。George 等<sup>[48]</sup>利用固相增材技术制造了轻质结构板,如图 11(b)所示。精密固相增材制造技术能够制造出内腔复杂且精确的叠层结构,所以在航空精密电子元器件的结构件中有广泛的应用,如图 11(c)所示。

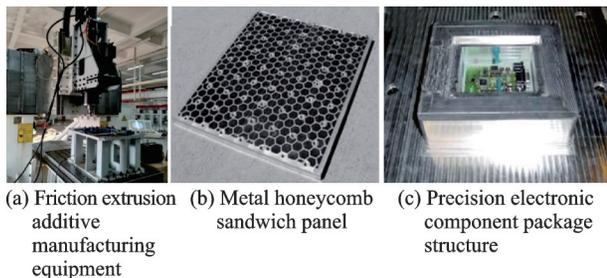


图 11 精密固相增材制造技术

Fig.11 Precision solid phase additive manufacturing technology

(2) 大型轻量化结构增材制造技术

随着航空航天装备向大型化、整体化方向发展,大型装备的主、次承载结构等轻量化结构制造难度日益上升<sup>[49]</sup>,推动了大型轻量化结构增材制

造技术的发展。电弧熔丝增材制造(Wire arc additive manufacturing, WAAM)自动化程度优异,可制造结构的设计自由度高,是大型复杂结构制造的重要手段<sup>[50]</sup>。Williams等<sup>[51]</sup>基于高强度铝合金WAAM技术,制造了长6 m、质量300 kg的大型机翼梁和起落架支撑外翼肋,如图12(a)所示。卢秉恒团队<sup>[52]</sup>分析了大型结构件的打印残余变形机理,开发了电弧增材多路打印运动控制算法,实现了1 m级铝合金火箭贮箱的一体化成形,制备了10 m级高强度铝合金重型运载火箭连接环样件,如图12(b,c)所示。

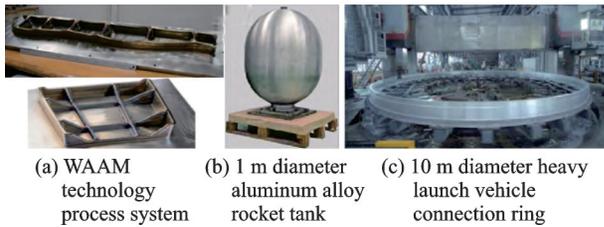


图12 大型钛合金结构电弧增材制造技术

Fig.12 Large titanium alloy structure arc additive manufacturing technology

金属粉/丝激光熔融沉积技术凭借直接成形的特点,在大型复杂零部件的制造上有独特的优势<sup>[53]</sup>。英国GKN Aerospace公司<sup>[54]</sup>设计了专有丝材激光金属沉淀设备,可打印尺寸3 m的航空零部件,如图13(a)所示。2016年王华明等<sup>[55]</sup>在国内率先突破了钛合金大型复杂整体关键构件的激光增材成形技术,可制造范围达到了4 m×3 m×2 m,已应用在多种大型航空装备的研制,如图13(b,c)所示。

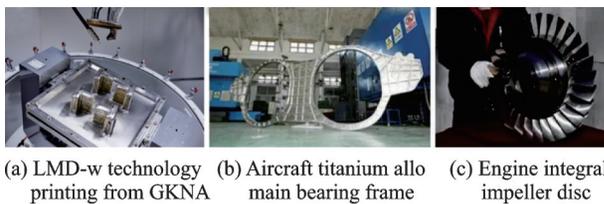


图13 激光增材制造大型钛合金结构

Fig.13 Laser additive manufacturing of large titanium alloy structures

电子束增材制造技术可以实现难熔合金的成形,已被广泛应用于大型发动机叶片等金属结构件的制造。2018年Lockheed Martin Space Systems公司<sup>[56]</sup>制备了直径为1.17 m的燃料卫星大型高压油箱,提高了制造效率,降低了成本,如图14(a)所示。2022年美国Sciaky公司<sup>[57]</sup>设计了最大的电子束定向能沉积3D打印机,该系统工作范围为6 m×2 m×1.8 m,对于许多金属材料的沉积速率可达20 kg/h,如图14(b)所示。



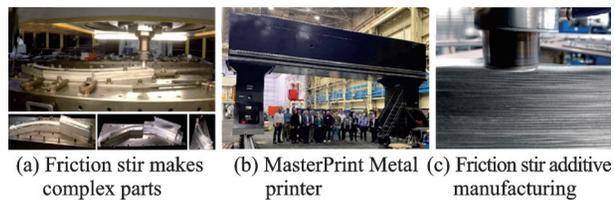
(a) Lockheed Martin large satellite tank

(b) Sciaky 300 Series electron beam Additive manufacturing systems

图14 大型结构电子束增材制造设备

Fig.14 Large structural electron beam additive manufacturing equipment

搅拌摩擦增材制造技术凭借无需沉积环境和熔化过程的优势,解决了传统增材制造方法晶粒粗大、气孔多等难题,特别适用于铝合金等轻金属材料的大型整体结构件制造<sup>[57]</sup>,如图15(a)所示。2022年英格索兰机床公司<sup>[58]</sup>利用摩擦搅拌焊接金属沉积系统设计了目前最大的固相金属3D打印机MasterPrint Metal,其最大工作范围为10 m×7 m×4 m,如图15(b,c)所示。



(a) Friction stir makes complex parts

(b) MasterPrint Metal printer

(c) Friction stir additive manufacturing

图15 大型固相增材制造

Fig.15 Large solid phase additive manufacturing

### (3) 轻量化结构增减材协同制造

增材制造工艺会出现台阶效应、尺寸精度和表面光洁度差等问题,难以满足航空航天零件的高精度要求。为了提高加工精度,增减材复合工艺协同制造技术成为研究的热点<sup>[59]</sup>,协同制造零件加工尺寸精度可以达到5 μm以下,如图16(a)所示。五轴铣削和增材制造之间的自由转换是增减材协同制造研究的重点。Soshi等<sup>[60]</sup>通过使用定向能沉积打印和减材加工制造模具,缩短了生产周期,如图16(b)所示。Behandish等<sup>[61]</sup>提出了一种自动化工艺规划方法,考虑了空间限制、无障碍和碰撞的问题,可以实现增减材协同制造工艺规划中零件的高质量与低成本的统一,如图16(c)所示。

Chen等<sup>[62]</sup>使用典型的先增材后减材的制造方式,提出一种低成本打印策略,先通过电弧增材制造进行复杂几何形状零件的打印成形,然后通过减材制造满足零件的精度要求。高凯等<sup>[63]</sup>设计了增减材协同复合制造工艺流程,实现了中空离心叶轮的整体高精度加工,满足了应用需求,如图17所示。

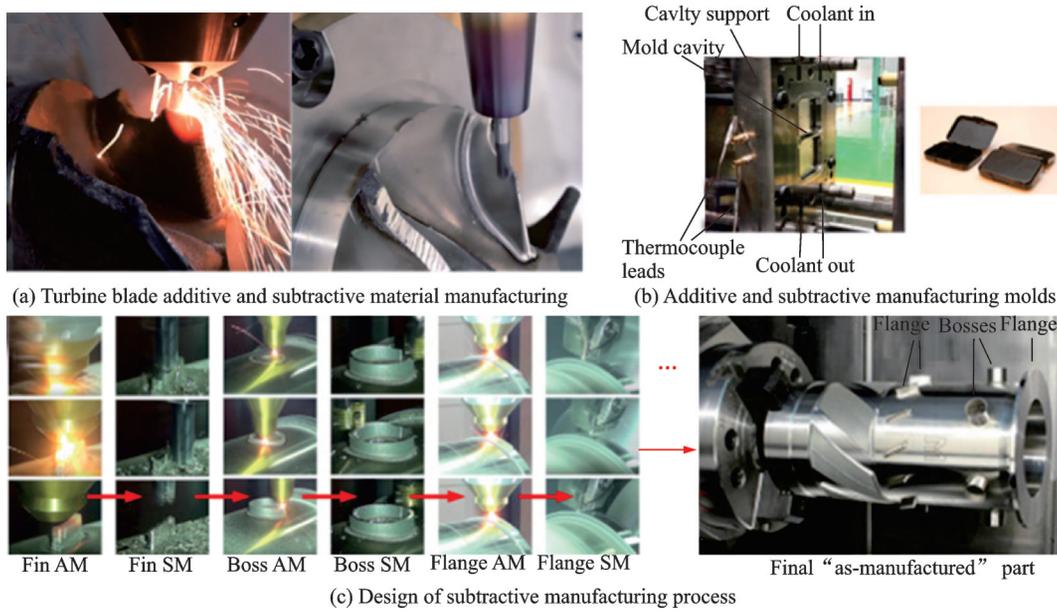


图 16 增减材协同制造技术

Fig.16 Additive and subtractive manufacturing technology

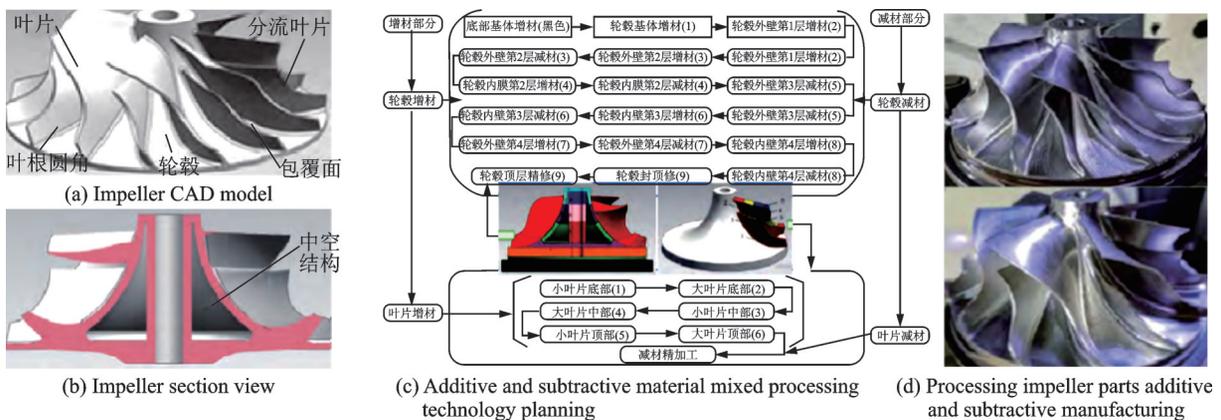


图 17 中空离心叶轮增减材混合加工工艺

Fig.17 Mixed processing technology of additive and subtractive manufacturing

大型复合材料增减材协同制造工艺相较于其他复合材料的制造工艺具有可成形尺寸大、效率高、成本低和净成形的特点<sup>[64]</sup>。Thermwood公司开发了大尺寸增材制造(Large scale additive manufacturing,LSAM)技术,加工范围达到了 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,LSAM系统采用了随行滚压整形装置以辅助层间粘合,热塑性复合材料被打印在特制的底板上,用以消除制造过程中的冷却应力,如图18(a~c)所示。

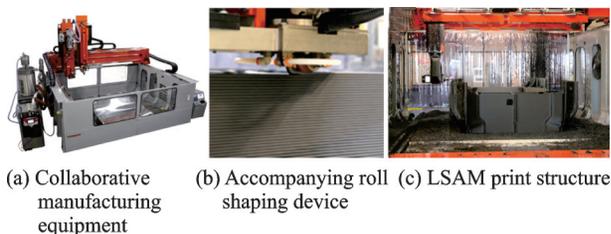


图 18 复合材料增减材协同制造

Fig.18 Composite additive and subtractive material collaborative manufacturing

### 2.2 轻量化结构复合材料制造技术

以连续纤维复合材料为代表的新材料,具有强度和刚度高,质量轻等优点,能够更好地满足轻量化结构的设计需求,在航空航天领域应用广泛。

#### (1) 复合材料结构铺放/缠绕制造技术

复合材料自动铺放制造技术与传统手糊成型相比,降低了人工成本、提高了生产率和可重复性,广泛用于复合材料轻质结构的制造,常用于成型平板,壳体等类型零件<sup>[65]</sup>,如图19(a,b)所示。Shadmehri等<sup>[66]</sup>提出了一种针对纤维铺放成型的原位处理方法,利用末端执行器对基板进行加热和加压,研究了原位处理对纤维铺放成型质量的影响,其制造的碳纤维复合材料板材孔隙率大幅减少,表面光洁度得到显著提升,如图19(c)所示。Halbritter等<sup>[67]</sup>利用先进复合材料结构装配机器人系统,开发了用于制造复合材料航空发动机叶片的铺放成型设备,实现了复杂结构自动化成型,如图19(d,e)所示。

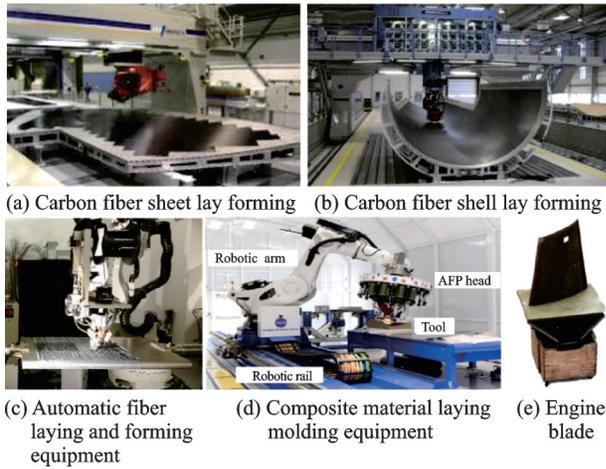


图19 复合材料结构铺放制造技术  
Fig.19 Technology of laying composite structure

复合材料缠绕成型具有成本低、效率高等优点,常用于轴对称零件的成型。Chang等<sup>[68]</sup>提出了一种“先设计部分,后连接整体”的设计方法来解决轨迹间的耦合问题。结合机器人缠绕技术,开发了6轴机器人纤维缠绕系统及专用CAD/CAM软件,如图20(a~c)所示,实现了三通管的纤维缠绕成型。Mindermann等<sup>[69]</sup>通过监测树脂浸渍及纤维张力,分析纤维的张力变化,开发了9轴机器人纤维缠绕系统,制造了9.2 m长的大尺寸碳纤维复合材料构件,如图20(d,e)所示,构件的纤维体积比控制在50%左右,能够在保证成型质量的同时,缩短成形时间。

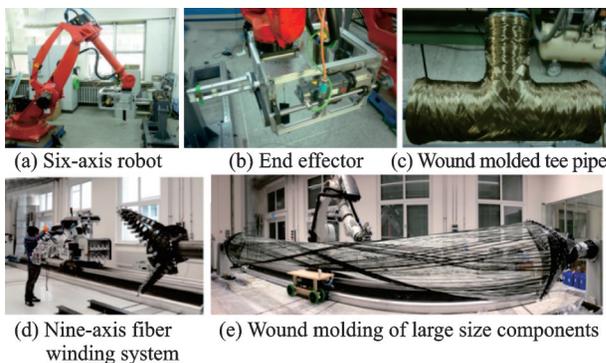


图20 复合材料结构缠绕制造技术  
Fig.20 Composite structure winding manufacturing technology

(2) 复合材料结构编织制造技术

复合材料编织预制体结构的制造工艺有多种,包括机织制造工艺、编织制造工艺及缝合制造工艺等<sup>[70]</sup>。机织制造工艺是利用织机的梭子把多向纱线交错组织为立体编织物的方法。2017年瑞士Stäubli公司研发的Unival 100提花织机<sup>[71]</sup>能够独立控制单根经纱,如图21(a)所示。2019年英国Optima 3D公司开发了Series 500三维机织机<sup>[72]</sup>,

其可快速生产多种异形截面编织预制体,如图21(b)所示。Snecma公司与AEC公司合作<sup>[73]</sup>通过预制体的三维机织及RTM成型工艺技术制造了Leap-X发动机风扇叶片,如图21(c,d)所示。黄浩等<sup>[74]</sup>提出分区域织造的工艺方案,利用柔性导向三维织造设备,通过分段拟合逼近截面形状,有效解决了复杂异形截面构件成形难的问题,如图21(e)所示。

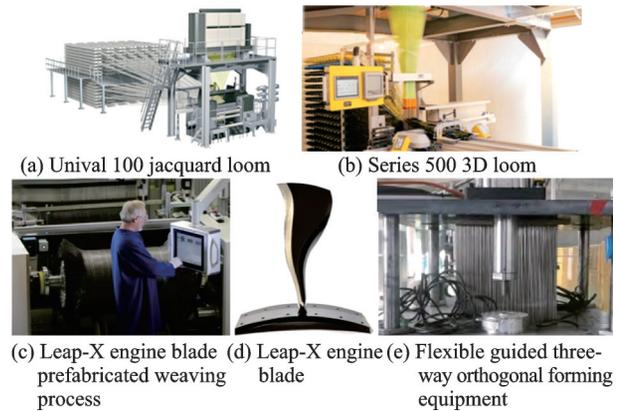


图21 机织工艺编织物制造技术  
Fig.21 Woven fabric manufacturing technology using weaving process

编织制造工艺是由若干携带编织纱的编织锭子,沿着设计轨迹在编织平面上移动,使得编织纱在编织平面上方某点形成交错编织结构的方法。2019年德国Herzog公司研发的径向三维编织机<sup>[75]</sup>通过角轮传动来实现携纱器运动,该编织机直径可达6 m,配合大量携纱器可显著增大预制体轴向制造尺寸,提高了成形率,如图22(a)所示。北京柏瑞鼎公司研发了大型三维旋转编织机<sup>[76]</sup>,可以针对制造结构的具体形状,将矩形编织模块单元组合以实现复合成形,如图22(b)所示。A&P Technology<sup>[77]</sup>公司基于编织制造工艺,利用芳纶纤维和碳纤维制造了喷气发动机定子叶片及涡轮风机机匣,如图22(c)所示。

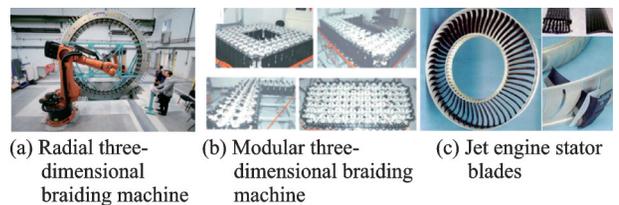


图22 编织工艺编织物制造技术  
Fig.22 Weaving manufacturing technology

缝合制造工艺是利用缝合纱线将具有一定铺放规则的复合材料预制体固定成为复合材料缝合预制体的制造工艺。潘杰等<sup>[78]</sup>将单边双针缝合头

与三轴联动工作平台相结合缝合复合材料预制体,探索双针之间运动夹角对线圈成型情况的影响,如图 23(a)所示。2013 年 NASA 与波音公司联合提出了先进亚声速技术(Advanced subsonic technology, AST)计划<sup>[79]</sup>,研究出了比铝合金机翼减重 25% 的缝合复合材料机翼,并利用缝合技术和树脂膜熔融渗透(Resin film infusion, RFI)技术制造了 13.5 m×2.7 m 的半翼展机翼壁板,如图 23(b,c)所示。2016 年,KSL 公司开发了基于六自由度机器人的缝合装备<sup>[80]</sup>,通过引入机器人技术提高了复合材料三维预制体的成形精度,可制备变曲率复合材料三维预制体,如图 23(d)所示。

(3) 复合材料结构连续纤维打印技术

相较于自动铺丝、编织等复合材料制造工艺,复合材料连续纤维打印技术具有灵活性强、材料损耗低的优点,能够以较高的自动化水平制造复杂的连续纤维复合材料结构,是当前复合材料结构制备的研究热点。Wang 等<sup>[81]</sup>根据应力分布规律,利用连续纤维力学性能的各向异性,沿载荷传递方向规划打印路径,如图 24(a)所示,开发了应力矢量跟踪算法优化复合材料结构连续纤维打印,取得了相较于传统打印技术更优的力学性能和制造工艺性,

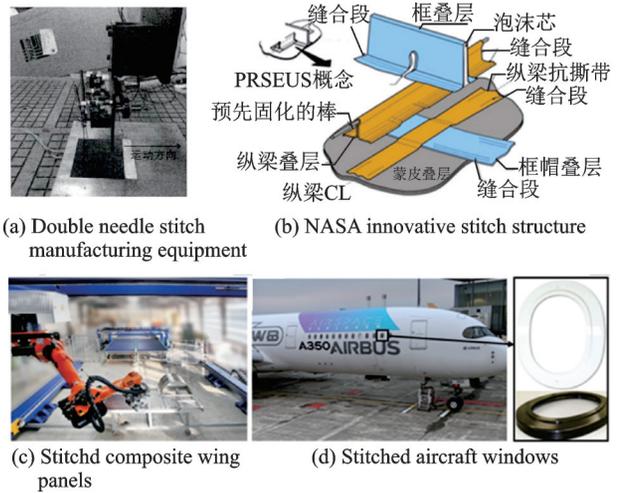


图 23 缝合工艺编织物制造技术

Fig.23 Stitch process weaving manufacturing technology

如图 24(b)所示。Chen 等<sup>[82]</sup>进一步分析结构中的载荷传递规律,连续纤维在关键区域沿拉伸应力方向规划打印路径的自适应路径规划算法,将零件强度提高了 71.4%,如图 24(c)所示。Tian 等<sup>[83]</sup>基于连续纤维的各向异性,提出了一种集成纤维取向和宏观结构拓扑并行的优化技术,并开发了基于 Hamilton 图的打印路径规划算法,将 MBB 梁的刚度和峰值载荷分别提高了 36.27% 和 64.43%,如图 24(d)所示。

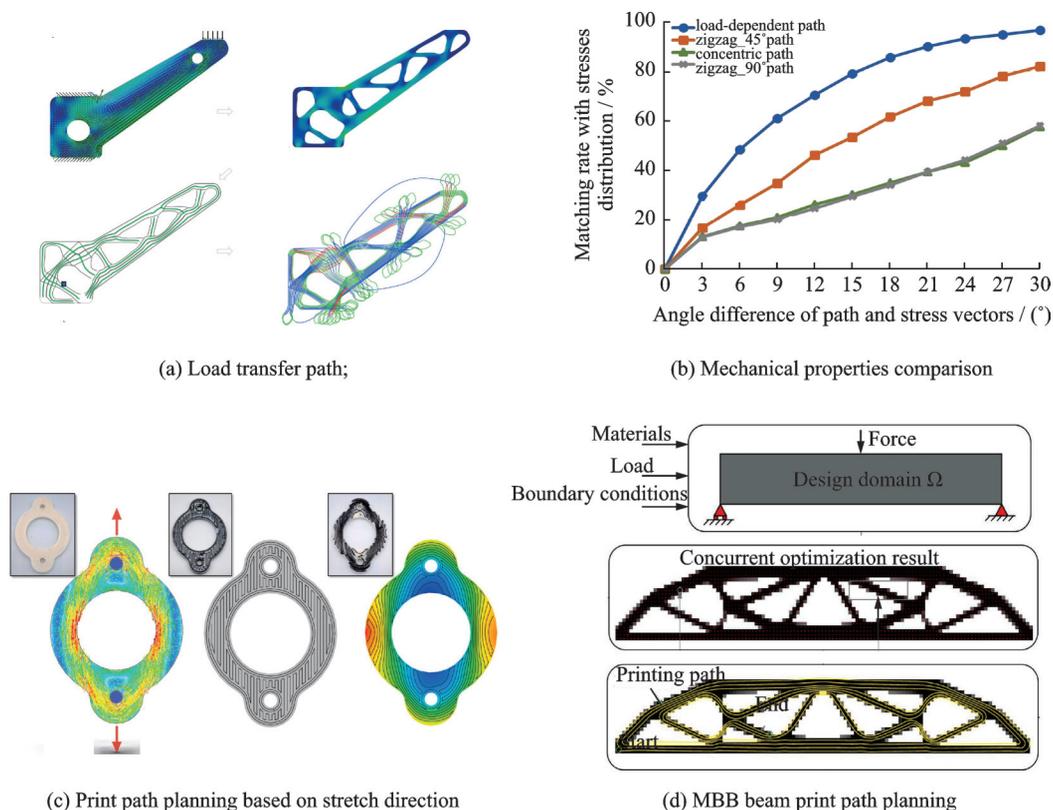


图 24 连续纤维打印路径规划

Fig.24 Continuous fiber print path planning

复合材料连续纤维3D打印的结构强度可与铝合金相媲美,可直接应用于最终产品<sup>[84]</sup>,如图25(a,b)所示。9T Labs公司开发了增材融合技术(Additive fusion technology, AFT),制造了碳纤维增强的直升机舱门铰链,显著降低了3D打印结构的孔隙率<sup>[85]</sup>,如图25(c)所示。复合材料连续纤维打印技术及其制造的产品在民用领域同样已有广泛应用。Arevo公司开始采用复合材料连续纤维打印技术生产飞机座椅支架,以减轻结构质量<sup>[84]</sup>,如图25(d)所示。

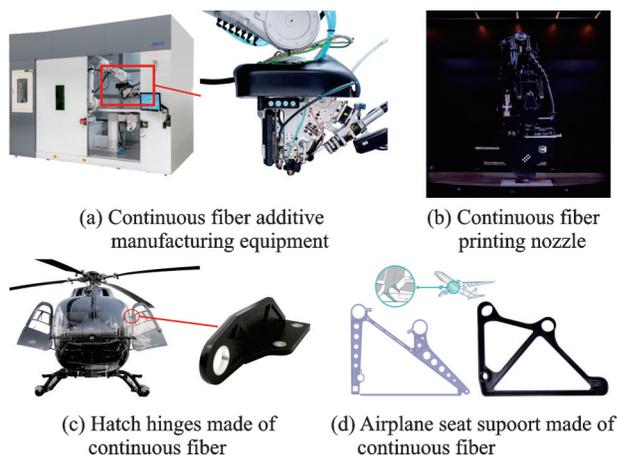


图25 连续纤维打印技术与应用

Fig.25 Continuous fiber printing technology and application

### 3 挑战与展望

针对航空航天装备对结构轻量化的需求,仿生结构设计、胞元结构设计、高效拓扑优化设计技术以及金属/复合材料增减材制造和协同制造等技术已经得到了快速发展。然而,当前的轻量化结构设计制造技术依然面临着许多挑战:

(1) 高效实现米级以上大尺寸结构件的轻量化设计新方法有待提出;

(2) 宏观与微观相结合的多尺度结构深度仿生设计技术还有待突破;

(3) 大型复杂轻量化构件增材制造精度、效率和缺陷监测准确度有待提高;

(4) 复合材料制造中增强纤维设计与工艺协同制造能力有待提升。

随着高性能计算、人工智能和智能制造技术的发展及结构优化新理论新方法的突破,上述挑战有望取得突破性进展:

(1) 高效并行计算技术为多物理场下米级大尺寸结构轻量化设计提供新技术;

(2) 生物进化原理的创成式设计为宏微观结构深度仿生设计提供新设计范式;

(3) 数字孪生技术为轻量化大型复杂构件制造提供全流程虚实优化解决方案;

(4) 机器学习技术为纤维增强复合材料结构设计与制造工艺融合提供新思路。

#### 参考文献:

- [1] YANG Y, ZHU Q X, WANG W, et al. Structure bionic design method oriented to integration of biological advantages[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 64(3): 1017-1039.
- [2] LAUNEY M E, BUEHLER M J, RITCHIE R O. On the mechanistic origins of toughness in bone[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2010, 40: 25-53.
- [3] GAN Z, TURNER M D, GU M. Biomimetic gyroid nanostructures exceeding their natural origins[J]. *Science Advances*, 2016, 2(5): e1600084.
- [4] MAO A, ZHAO N, LIANG Y, et al. Mechanically efficient cellular materials inspired by cuttlebone[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(15): e2007348.
- [5] UFODIKE C O, WANG Hui, AHMED M F, et al. Design and modeling of bamboo biomorphic structure for in-plane energy absorption improvement[J]. *Materials & Design*, 2021. DOI: <http://10.1016/j.matdes.2021.109736>.
- [6] CAIAZZO F, CAMPANELLI S L, CARDAROPOLI F, et al. Manufacturing and characterization of similar to foam steel components processed through selective laser melting[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(5/6/7/8): 2121-2130.
- [7] 马玉秋, 郭策, 陈光明, 等. 仿生轻质高韧夹芯结构设计及其韧性性能分析[J]. *机械科学与技术*, 2022, 41(5): 801-807.  
MA Yuqiu, GUO Ce, CHEN Guangming, et al. Design and toughness analysis of bionic lightweight sandwich structure with high strength and toughness[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2022, 41(5): 801-807.
- [8] 张伟南, 戴宁, 郭策, 等. 主应力场驱动的复杂薄壁件刚度增强方法[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(12): 1479-1485.  
ZHANG Weinan, DAI Ning, GUO Ce, et al. Stiffness enhancement method for complex thin-walled parts driven by principal stress field[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(12): 1479-1485.
- [9] LIU H, LI B, YANG Z, et al. Topology optimization of stiffened plate/shell structures based on adaptive morphogenesis algorithm[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2017, 43: 375-384.

- [10] WANG Z. Recent advances in novel metallic honeycomb structure[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166: 731-741.
- [11] SUN G, HUO X, CHEN D, et al. Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression[J]. *Materials & Design*, 2017, 133: 154-168.
- [12] HAN B, QIN K, YU B, et al. Honeycomb-corrugation hybrid as a novel sandwich core for significantly enhanced compressive performance[J]. *Materials & Design*, 2016, 93: 271-282.
- [13] XIONG J, MINES R, GHOSH R, et al. Advanced micro-lattice materials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(9): 1253-1264.
- [14] LI D, LIAO W, DAI N, et al. Anisotropic design and optimization of conformal gradient lattice structures [J]. *Computer-Aided Design*, 2020, 119: 102787.
- [15] WANG C, ZHU J, WU M, et al. Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to aerospace vehicle components[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(5): 386-398.
- [16] 任利民,戴宁,程筱胜,等.点阵结构填充模型的边界强化设计方法[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(5): 594-599.
- REN Limin, DAI Ning, CHENG Xiaosheng, et al. Method of boundary strengthening design for lattice structure filling model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(5): 594-599.
- [17] 徐赣君,戴宁.基于节点增强的功能点阵设计方法[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(13): 1537-1544.
- XU Ganjun, DAI Ning. Functional lattice structures design method based on strengthening nodes[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(13): 1537-1544.
- [18] MOON S K, TAN Y E, HWANG J, et al. Application of 3D printing technology for designing lightweight unmanned aerial vehicle wing structures[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2014, 1: 223-228.
- [19] MA S, SONG K, LAN J, et al. Biological and mechanical property analysis for designed heterogeneous porous scaffolds based on the refined TPMS[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, 107: 103727.
- [20] LI D, DAI N, TANG Y, et al. Design and optimization of graded cellular structures with triply periodic level surface-based topological shapes[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2019. DOI:10.1115/1.4042617.
- [21] FENG J, FU J, SHANG C, et al. Efficient generation strategy for hierarchical porous scaffolds with free-form external geometries[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31: 100943.
- [22] JIANG W, LIAO W, LIU T, et al. A voxel-based method of multiscale mechanical property optimization for the design of graded TPMS structures[J]. *Materials & Design*, 2021, 204: 109655.
- [23] REN F, ZHANG C, LIAO W, et al. Transition boundaries and stiffness optimal design for multi-TPMS lattices[J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110062.
- [24] PENG C, FOX K, QIAN M, et al. 3D printed sandwich beams with bioinspired cores: Mechanical performance and modelling[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 107471.
- [25] YU X, ZHOU J, LIANG H, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 94: 114-173.
- [26] MD A, TD A, JMW B, et al. Double-wall ceramic nanolattices: Increased stiffness and recoverability by design[J]. *Materials & Design*, 2021, 208: 109928.
- [27] FRENZEL T, KADIC M, WEGENER M, et al. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist[J]. *Science*, 2017. DOI: 10.1126/science.aao4640.
- [28] 程基彬,戴宁,郭培,等.基于力学超材料的柔性臂设计技术[J/OL]. [2023-06-21]. *中国机械工程*: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20221118.1745.008.html>.
- CHEN Jibin, DAI Ning, GUO Pei, et al. Reverse design of soft robot arm based on mechanical metamaterial[J/OL]. [2023-06-21]. *China Mechanical Engineering*: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20221118.1745.008.html>.
- [29] CRAMER D, NICHOLAS B, DANIEL W, et al. Elastic shape morphing of ultralight structures by programmable assembly [J]. *Smart Materials & Structures*, 2019, 28(5): 55006.
- [30] 熊继源,戴宁,叶世伟,等.力学超材料柔性后缘设计技术[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(12): 81-87.
- XIONG Jiyuan, DAI Ning, YE Shiwei, et al. Design techniques for flexible trailing edges of mechanical metamaterials[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(12): 81-87.
- [31] ZHANG G, LIU Y, LV Z, et al. Research on impact resistance of ceramic matrix composites [J]. *Composite Structures*, 2021, 268: 113977.
- [32] XIE L Y, ZHANG Y, GE M H, et al. Topology optimization of heat sink based on variable density method [C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Power and Energy Systems Engineering*. [S.l.] :

- Elsevier, 2022: 718-726.
- [33] AAGE N, ANDREASSEN E, LAZAROV B S, et al. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design[J]. *Nature*, 2017, 550(7674): 84-86.
- [34] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization[J]. *Computers & Structures*, 1993, 49(5): 885-896.
- [35] HUANG X, XIE Y M. A further review of ESO type methods for topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, 41: 671-683.
- [36] GONÇALVES D C, LOPES J D F, CAMPILHO R, et al. The radial point interpolation method combined with a bi-directional structural topology optimization algorithm[J]. *Engineering with Computers*, 2022, 38: 5137-5151.
- [37] SONG J, ZHANG Y, GUO X, et al. Topology and shape optimization of twin-web turbine disk[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, 65(2): 44.
- [38] WEI P, LI Z, LI X, et al. An 88-line MATLAB code for the parameterized level set method based topology optimization using radial basis functions[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, 58: 831-849.
- [39] GUO X, ZHANG W, ZHONG W. Doing topology optimization explicitly and geometrically—A new moving morphable components based framework[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, 81(8): 081009.
- [40] GAO J, LUO Z, LI H, et al. Topology optimization for multiscale design of porous composites with multi-domain microstructures[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 344: 451-476.
- [41] JIANG X, LIU C, DU Z, et al. A unified framework for explicit layout/topology optimization of thin-walled structures based on moving morphable components (MMC) method and adaptive ground structure approach[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, 396: 115047.
- [42] 张横, 李昊, 丁晓红, 等. 基于贴体网格的高分辨率三维结构拓扑优化研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(5): 136-143.
- ZHANG Heng, LI Hao, DING Xiaohong, et al. Numerical study on the body-fitted topology optimization for three-dimensional high resolution structure design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(5): 136-143.
- [43] ZHOU M, XIAO M, ZHANG Y, et al. Marching cubes-based isogeometric topology optimization method with parametric level set[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 107: 275-295.
- [44] 尹浜兆, 刘金戈, 刘冰川, 等. WE43 镁合金激光粉末床熔融工艺研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 76-86.
- YIN Bangzhao, LIU Jingge, LIU Bingchuan, et al. Process optimization on laser powder bed fusion of WE43 magnesium alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 76-86.
- [45] 郭朦, 戴延丰, 黄斌达. 典型航空机电产品激光粉末床熔融技术应用现状与发展[J/OL]. [2023-06-21]. *中国激光*: 1-28. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20230309.2057.042.html>.
- GUO Meng, DAI Yanfeng, HUANG Binda, Application status and development of laser powder bed fusion technology in typical aviation electromechanical products [J/OL]. [2023-06-21]. *Chinese Journal of Lasers*: 1-28. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.tn.20230309.2057.042.html>.
- [46] 周祥, 周静, 宗晓同, 等. 基于 TPMS 结构的高效换热技术研究综述[C]//第七届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第四十三届技术交流会论文集(第三册). 苏州:[s.n.], 2023: 10-20.
- [47] 唐文坤, 杨新岐, 田超博, 等. 工艺参数对铝合金摩擦挤压增材组织及性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2022, 42(1): 59-67.
- TANG Wenshen, YANG Xinqi, TIAN Chaobo, et al. Effects of process parameters on microstructure and properties of aluminum alloy fabricated by friction extrusion additive manufacturing[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2022, 42(1): 59-67.
- [48] GEORGE J, STUCKER B. Fabrication of lightweight structural panels through ultrasonic consolidation[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2006, 1(4): 227-241.
- [49] 高飞, 于济菘, 赵相禹. 增材制造技术在航天领域的应用与前景[J]. *卫星应用*, 2020, 101(5): 61-66.
- [50] CUNNINGHAM C R, FLYNN J M, SHOKRANI A, et al. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 672-686.
- [51] WILLIAMS S W, MARTINA F, ADDISON A C, et al. Wire + Arc additive manufacturing[J]. *Materials Science and Technology*, 2016, 32: 641-647.
- [52] 方学伟, 杨健楠, 陈瑞凯, 等. 铝合金电弧增材制造技术研究进展[J]. *电焊机*, 2023, 53(2): 52-67.
- FANG Xuewei, YANG Jiannan, CHEN Ruikai, et al. Research progress of wire arc additive manufacturing technology for aluminum alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2023, 53(2): 52-67.
- [53] KOTAR M, GOVEKAR E. The influence of the workpiece illumination proportion in annular laser beam wire deposition process[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 228-232.

- [54] ZHANG D, LIU A, YIN B, et al. Additive manufacturing of duplex stainless steels—A critical review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 73: 496-517.
- [55] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [56] 田文琦, 杨冬野, 李九霄. 高能束增材制造钛铝合金的研究进展[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(6): 1-7. TIAN Wenqi, YANG Dongye, LI Jiuxiao. Research progress on Ti-Al alloy prepared by high-energy beam additive manufacturing technique[J]. *Materials For Mechanical Engineering*, 2021, 45(6): 1-7.
- [57] SRIVASTAVA A K, KUMAR N, DIXIT A R. Friction stir additive manufacturing—An innovative tool to enhance mechanical and microstructural properties[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2021, 263: 114832-114845.
- [58] HASSAN A, PEDAPATI S R, AWANG M, et al. A comprehensive review of friction stir additive manufacturing (FSAM) of non-ferrous alloys[J]. *Materials*, 2023, 16(7): 2723.
- [59] KUMBHAR N N, MULAY A V. Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: A review[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2018, 99(4): 481-487.
- [60] SOSHI M, RING J, YOUNG C, et al. Innovative grid molding and cooling using an additive and subtractive hybrid CNC machine tool[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 401-404.
- [61] BEHANDISH M, NELATURI S, KLEER J D. Automated process planning for hybrid manufacturing[J]. *Computer-Aided Design*, 2018, 102: 115-127.
- [62] CHEN N, FRANK M. Process planning for hybrid additive and subtractive manufacturing to integrate machining and directed energy deposition[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 34: 205-213.
- [63] 高凯, 王振忠, 孔刘伟, 等. 基于增减材复合制造的中空离心叶轮工艺设计[J]. *航空制造技术*, 2021, 64(12): 72-79, 84. GAO Kai, WANG Zhenzhong, KONG Liuwei, et al. Process design of hollow centrifugal impeller based on additive-subtractive hybrid manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(12): 72-79, 84.
- [64] Thermwood. LSAM—large scale additive manufacturing [EB/OL]. [2023-05-15]. [https://www.thermwood.com/lсам\\_home.htm](https://www.thermwood.com/lсам_home.htm).
- [65] 曹忠亮, 郭登科, 林国军, 等. 碳纤维复合材料自动铺放关键技术的现状与发展趋势[J]. *材料导报*, 2021, 35(21): 21185-21194. CAO Zhongliang, GUO Dengke, LIN Guojun, et al. Current situation and development trend of key technologies for automated placement of carbon fiber composites[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(21): 21185-21194.
- [66] SHADMEHRI F, HOA S V, FORTIN-SIMPSON J, et al. Effect of in situ treatment on the quality of flat thermoplastic composite plates made by automated fiber placement (AFP) [J]. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2018, 4(2): 41-47.
- [67] HALBRITTER J, HARIK R, JEGLEY D, et al. Rapid prototyping of wind tunnel blade geometry for composite manufacturing using automated fiber placement [J]. *Proceedings of CAD' 19*, 2019. DOI: 10.14733/cadconf.2019.298-302.
- [68] CHANG C, HAN Z, LI X, et al. A non-geodesic trajectory design method and its post-processing for robotic filament winding of composite tee pipes[J]. *Materials*, 2021, 14: 847.
- [69] MINDERMANN P, BODEA S, MENGES A, et al. Development of an impregnation end-effector with fiber tension monitoring for robotic coreless filament winding[J]. *Processes*, 2021, 9(5): 806.
- [70] 檀晨晨, 单忠德, 孙正, 等. 预制体织造过程的数字单元法模拟研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(5): 889-898. TAN Chenchen, SHAN Zhongde, SUN Zheng, et al. Research on digital element method simulation of weaving process of preforms[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(5): 889-898.
- [71] Textile Excellence. Stäubli to display two new machines for technical textiles at techtextil Germany [EB/OL]. [2023-05-15]. <https://www.textileexcellence.com/news/staubli-to-display-two-new-machines-for-technical-textiles-at-techtextil-germany>.
- [72] Basalt Today. Optima develops the next generation weaving machines [EB/OL]. [2023-05-15]. <https://basalt.today/2019/06/39389>.
- [73] 马子于, 苏震宇, 魏然. 复合材料风扇叶片的发展与思考[J]. *科技与创新*, 2020, 13: 34-37.
- [74] 黄浩, 单忠德, 张丽娇, 等. 异形截面复合材料构件成形及力学性能预测方法研究[J/OL]. [2023-06-06]. *机械工程学报*: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20230428.1622.042.html>. HUANG Hao, SHAN Zhongde, ZHANG Lijiao, et al. Research on forming and mechanical properties prediction method of special-section composite component [J/OL]. [2023-06-06]. *Journal of Mechanical Engi-*

- neering: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20230428.1622.042.html>.
- [75] SALTMARSH A. Thinking big with a large-scale robotic braider [EB/OL]. [2021-07-07]. <https://emag.directindustry.com/thinking-big-with-a-large-scale-robotic-braider>.
- [76] 李静. 三维编织机的研究现状与发展趋势[J]. 纺织科学研究, 2020, 2: 78-80.
- [77] KARADUMAN N S, KARADUMAN Y, OZDEMIR H, et al. Textile reinforced structural composites for advanced applications[J]. *Textiles for Advanced Applications*, 2017. DOI: 10.5772/intechopen.68245.
- [78] 潘杰, 文立伟, 肖军, 等. 复合材料预制件单面双针缝合装备技术研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(2): 76-81.  
PAN Jie, WEN Liwei, XIAO Jun, et al. Research on the technology of single-sided two needles stitching equipment for composite preform fiber[J]. *Reinforced Plastics/Composites*, 2017(2): 76-81.
- [79] LI V. Hybrid wing body (HWB) aircraft design and optimization using stitched composites [C]//Proceedings of the 16th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. [S.l.]: AIAA, 2015: 2325.
- [80] SCHWINN T, KRIGE O D, MENGES A. Robotic sewing: A textile approach towards the computational design and fabrication of lightweight timber shells [C]//Proceedings of ACADIA. Ann Arbor, United States:[s.n.], 2016: 224-233.
- [81] WANG T, LI N, LINK G, et al. Load-dependent path planning method for 3D printing of continuous fiber reinforced plastics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 140: 106181.
- [82] CHEN X, FANG G, LIAO W H, et al. Field-based toolpath generation for 3D printing continuous fibre reinforced thermoplastic composites[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 49: 102470.
- [83] HUANG Y, TIAN X, ZHENG Z, et al. Multiscale concurrent design and 3D printing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites with optimized fiber trajectory and topological structure[J]. *Composite Structures*, 2022, 285: 115241.
- [84] Arevo. Manufacturing-as-a-service [EB/OL]. [2023-05-15]. <https://arevo.com/reinventparts>.
- [85] 9T Labs. Produce strong, lightweight and sustainable products like never before [EB/OL]. <https://www.9tlabs.com/>

(编辑:陈珺)