引用格式：韩振忠，谌广昌，李伟，等.旋翼飞行器结构增材制造技术研究进展与应用[J].材料工程，2026，54(4)：64-85.
HAN Zhenzhong，CHEN Guangchang，LI Wei，et al.Research progress and application of additive manufacturing technology for rotorcraft structure[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(4)：64-85.

旋翼飞行器结构增材制造技术研究进展与应用

韩振忠[1]，谌广昌[1*]，李　伟[2]，何培刚[3]，温培刚[4]，叶书群[5]，梁　昆[1]，邓旭东[1]
（1 中国直升机设计研究所，江西 景德镇 333001；2 昌河飞机工业（集团）有限责任公司，江西 景德镇 333003；
3 哈尔滨工业大学 特种陶瓷研究所，哈尔滨 150001；4 中国航发北京航空材料研究院，北京 100095；
5 中航天地激光科技有限公司，北京 102211）

摘要：旋翼飞行器结构兼具多品种、小批量、外形复杂及高性能要求等典型特征，增材制造技术具备复杂外形结构的整体成型和按需生产能力，可实现结构的轻量化和快速制备，是理想的旋翼飞行器结构工艺制备方案。然而，源于快速原型制造的增材制造技术在旋翼飞行器结构上的应用虽已有10余年，但因增材制造结构件制备稳定性问题、极高的研发认证成本和技术快速迭代等诸多挑战，对旋翼飞行器结构而言，增材制造仍属于新材料新工艺新技术范畴。为满足国内旋翼飞行器结构对增材制造技术的高效应用需求，对欧美旋翼飞行器结构增材制造技术应用现状及技术发展趋势进行了回顾和审视，在此基础上提出了国内旋翼飞行器结构增材制造技术工程应用的发展建议：构建旋翼飞行器结构件增材制造技术应用的量化评估准则，建立面向增材制造的结构设计优化技术，研发高性能材料、新型增材制造工艺和增材制造结构件高质量后处理方法，实现增材制造过程实时监测与工艺参数控制及普适性高效适航认证。

关键词：旋翼飞行器；结构；增材制造；后处理；实时监测；适航认证
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000319　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000319
中图分类号：V262　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)04-0064-22

Research progress and application of additive manufacturing technology for rotorcraft structure

HAN Zhenzhong[1]，CHEN Guangchang[1*]，LI Wei[2]，HE Peigang[3]，WEN Peigang[4]，
YE Shuqun[5]，LIANG Kun[1]，DENG Xudong[1]
（1 China Helicopter Research and Development Institute，Jingdezhen 333001，Jiangxi，China；2 Changhe Aircraft Industries (Group) Ltd.，Jingdezhen 333003，Jiangxi，China；3 Institute for Advanced Ceramics，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001，China；4 AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials，Beijing 100095，China；
5 China Aviation Laser Manufacturing Co.，Ltd.，Beijing 102211，China）

Abstract：The rotorcraft structures have typical characteristics such as small batches，multi-specifications，complex shape and high-performance requirements. Additive manufacturing technologies have the ability to integrally form complex shapes and structures and produce on demand，which can achieve lightweight and rapid preparation of structures. It is an ideal process preparation solution for rotorcraft structures. However，although additive manufacturing technologies originating from rapid prototype preparation have been used in rotorcraft structures for more than 10 years，due to many challenges such as the stability of additive manufacturing technology structural parts preparation，extremely high R&D certification costs and rapid technology iteration，for rotorcraft structures，additive manufacturing technology still belongs to the category of new materials，new processes and new technologies. In order to meet the efficient application demand of additive manufacturing technology in domestic rotorcraft structures，based on the application status and development trend of additive manufacturing technology in foreign rotorcraft structures are reviewed and examined，development suggestions for the engineering application of additive manufacturing

technology in domestic rotorcraft structures are proposed: constructing quantitative evaluation criteria for the application of additive technology in rotorcraft structures, establishing structural design optimization technology for additive manufacturing, developing high-performance materials, new additive manufacturing processes and high-quality post-processing methods for additively manufactured structural parts, realizing real-time monitoring and process parameter control of additive manufacturing process and universal and efficient airworthiness.

Key words: rotorcraft; structure; additive manufacturing; post-processing; real-time monitoring; airworthiness

增材制造技术为采用3D模型数据结合材料逐层叠加沉积实现零部件成型及批量化生产的一种制造工艺，该技术起源于20世纪80年代因技术和成本等因素限制采用塑料等非金属材料实现新研制产品的快速原型制造技术[1]。因增材制造具有提升材料利用率、缩短交货周期、可对零件结构进行创新设计、适合制备功能梯度材料等新材料及按需生产等诸多优势，迅速成为一种具备工业变革潜力的革命性工艺制备技术[2]。

目前，空客(Airbus)、西科斯基(Sikorsky)及贝尔(Bell)公司研制的旋翼飞行器，其旋翼结构件呈多品种、小批量典型生产特征，结构外形通常相对复杂，传统减材工艺方法制备需要较长生产周期。同时，旋翼及传动等旋翼飞行器的特有动部件诱发的整机复杂高/低周疲劳载荷力学环境，导致结构失效间隔平均周期(mean time between failure，MTBF)分布在数十小时到数百小时之间，为确保型号出勤率，结构备件交付的快速响应尤其重要。因此，增材制造是旋翼飞行器结构理想的工艺制备方案。但是，增材制造技术至今仍属于旋翼飞行器结构的新工艺新技术范畴，究其原因，旋翼飞行器结构中增材制造技术的大面积推广应用，面临着大尺寸部件增材制造相比传统方法制备性能下降、结构件增材制造质量稳定性较低及高昂的研发验证认证成本等诸多挑战。

为充分发挥增材制造技术应用于旋翼飞行器结构的显著优势，对国外增材制造技术在旋翼飞行器结构应用面临设计工程经验缺乏、材料工艺快速迭代发展与高昂的应用验证认证成本之间等矛盾冲突和问题，所采取的技术发展路径进行了调研和分析，在此基础上，凝练形成了国内旋翼飞行器结构增材制造技术应用的系统性发展路线和总体实施方案，提出了构建基于结构轻量化设计效益、成本降低、交货周期缩短及面向增材制造的设计(design for additive manufacturing，DFAM)适用性等方面的旋翼飞行器结构增材制造技术应用的量化评估准则，并针对选定的可发挥增材制造技术优势的旋翼飞行器结构，提出了国内旋翼飞行器结构增材制造技术工程应用的技术发展重点，具体如下：降低结构研发成本的DFAM技术，提升增材制造结构件性能的高性能材料、新型制备工艺和高质量后处理方法，增材制造过程实时监测(*in-situ* monitoring，ISM)与工艺参数智能调控技术，以及缩短结构应用验证经费及时间成本的增材制造普适性高效适航认证技术。

1　旋翼飞行器结构增材制造技术需求与应用历程

增材制造技术已形成系列化的工艺方法，在航空领域主要应用有2类：粉末床熔融(powder bed fusion，PBF)和直接能量沉积(directed energy deposition，DED)。PBF技术可实现复杂外形部件的打印且具有极佳的精度，在所有增材制造技术中具有最佳的质量稳定性和尺寸精确度[3-4]，对于生产航空轻质结构件非常重要，在航空轻质结构件的生产中占据越来越重要的位置。DED技术相比其他的金属增材制造技术，具有较高的材料利用率和生产效率，同时能够实现整体大尺寸构件的一次成型，在航空工业钛合金部件等高价值结构件生产中起到重要作用[5]。

航空领域中应用的PBF和DED技术主要采用金属和聚合物材料，包括钛合金、铝合金、镍合金及热塑性树脂和尼龙等材料。钛合金中的Ti6Al4V具有低密度、高强度、高断裂韧性和低热系数等众多优点，广泛应用于航空承力结构件的增材制造[6]。镍基合金中的In718具有高强度(拉伸、蠕变及疲劳)、耐腐蚀和耐高温等优点，一般用于航空高温结构件的增材制造[7]。以AlSi10Mg合金为代表的铝硅镁系铝合金具有良好的化学稳定性、高热导率及优异的力学性能等优点，目前大量应用于航空非承力结构件的增材制造[8]。ULTEM™9085树脂是美国Stratasys公司开发的用于增材制造的热塑性树脂，具有良好的耐热、力学和化学性能，兼具极佳的阻燃、低烟雾及低毒特性，已通过FAA适航认证，大量应用于航空航天众多内饰件的增

材制造。

1.1 旋翼飞行器结构增材制造技术需求分析

以旋翼桨叶为代表的旋翼飞行器主承力结构对于强度、刚度和特定载荷工况下的稳定性等力学性能有着极高要求，连续碳纤维复合材料增材制造技术为旋翼飞行器主承力结构，特别是旋翼桨叶提供了一种高性价比且自动化的制备方案，且结构自适应变形机理（利用材料弹性性能实现结构形状改变）可有效增强旋翼飞行器的飞行性能。可见，连续碳纤维复合材料 4D 增材制造技术（在传统增材制造技术 3D 空间维度的基础上附加 1 个时间维度，结构外形在时间维度上可随外界条件刺激发生改变）将有效降低旋翼飞行器主承力结构的生产成本，同时大幅提升飞行性能。

旋翼系统是旋翼飞行器的升力面和操纵面，也是旋翼飞行器振动和噪声的主要来源。Bari 等[9]基于增材制造的蜘蛛网状点阵结构，开发了一种航空飞行器减振阻尼器，这种阻尼器利用蜘蛛网状点阵结构内的晶格结构吸收无刷电机高速旋转期间的最大振动。因此，为了实现旋翼飞行器减振降噪区域结构功能一体化的目标，需要发展面向增材制造的多孔结构设计方法，同时，并采用有限元分析中的自适应网格技术，对多孔结构进行拓扑优化，以在满足力学承载及减振功能等多重约束条件下，实现微孔结构横截面的最优化设计。这将有助于达成旋翼飞行器减振降噪承载一体化结构件的轻量化设计与制备目标。将增材制造技术应用于 e-VTOL 等旋翼飞行器新兴领域产品快速原型机的制备，能够高效地验证产品轻量化需求，同时加速产品设计方案的迭代过程，从而实现设计规划和方案的快速验证与迭代。

1.2 旋翼飞行器结构增材制造技术应用历程

目前，在增材制造技术领域投入较大的旋翼飞行器主流研制生产单位包括 Bell、Airbus 和 Boeing。上述三家公司均在其内部组织架构内设立了专门的增材制造技术研发与应用部门，投入了大量资金购置增材制造设备，并与增材制造技术优势研发单位开展了大量合作[10]。西科斯基（Sikorsky）和莱昂纳多（Leonardo）直升机公司，则选择了与增材制造技术的优势研发单位合作，共同开展增材制造技术研发与应用的技术路径[11]。

Bell 作为最早一批应用增材制造技术的旋翼飞行器研发单位，20 世纪 90 年代初就已经将选区激光烧结（selective laser sintering，SLS）技术应用于结构工装和实验验证原型件制备。随着增材制造材料及工艺的技术进步和成熟度提升，Bell 开始逐步拓展增材制造材料及工艺的应用范围。2006 年，Bell 与 Stratasys 合作，以 Bell 429 直升机除雾喷嘴（部件属于环控系统，具有复杂的几何内部结构和外形）为增材制造技术的应用对象。在制造工艺上，双方采用了选区激光熔融（selective laser melting，SLM）技术，并选用了粉末状尼龙（nylon）作为原材料。通过严格控制工艺参数等措施，成功实现了除雾喷嘴部件的尺寸精准性、产品性能的高质量以及高可靠性。经评估，采用增材制造技术制备的部件相比传统制造技术，实现了减重 13% 和交付周期缩短 75%。历经 8 年验证，自 2014 年起，SLM 技术已批量应用于 Bell 直升机环控系统相关部件的生产。2019 年，Bell 与 Thermowood 公司合作，实现了新研热塑复合材料大尺寸增材制造技术（large-scale additive manufacturing，LSAM）在新一代倾转旋翼机 V280 桨叶工装上的应用。2023 年，Bell 成立了快速原型机研制实验室，致力于进一步发挥 SLS、FDM、DED 等增材制造在轻量化、低成本和快速交付方面的独特优势，实现未来旋翼飞行器结构件设计和制备技术的变革。

2021 年，Airbus 在高速低成本旋翼飞行器（rapid and cost effective rotorcraft，RACER）后机身结构件中大量应用增材制造技术，如图 1（a）所示[12]。垂尾方向舵连接件为 Airbus 首次采用增材制造技术制备的旋翼飞行器主承力结构单元，采用 Ti6Al4V 钛合金 PBF/SLM 工艺制备，如图 1（b）所示。后机身尾梁和平尾的部分支架、整流罩和维护口盖等次/非承力结构件大量应用 Scalmalloy 铝合金和 ULTEM™ 9085 热塑树脂增材制造，如图 1（c）所示。其中，Scalmalloy 铝合金是一种高性能金属粉末合金，由铝、镁及稀土元素钪构成，由 Airbus 下属的 APWORKS 公司基于 LPBF 工艺需求研发，该材料具有较高的冷却速率及快速凝固能力，使其增材制造制件具有均匀精细的微观结构，从而达到了与 7075 高强铝合金同等的力学性能，成功解决了上一代铝合金 $AlSi_7Mg_{0.6}$ 在增材制造技术应用中力学性能不足的问题，实现了在航空航天领域的大量应用[13-14]。2023 年，Airbus 宣布在德国巴伐利亚州成立新的增材制造技术中心，目前拥有 3 台钛合金部件增材制造设备、4 台热塑树脂部件增材制造设备及 1 台铝合金部件增材制造设备，用于新一代 eVTOL（City Airbus NextGen）和 RACER 结构件的试制和后续批量化生产。

2023 年，Boeing 交付了 15 架份的 CH-47F“支奴干”直升机的搜索灯支架，采用连续碳纤维增强热塑复合材料（continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites，CCFRTP）SLS 工艺制备。这些搜索灯支架在相对严苛的自然环境和高疲劳力学载荷

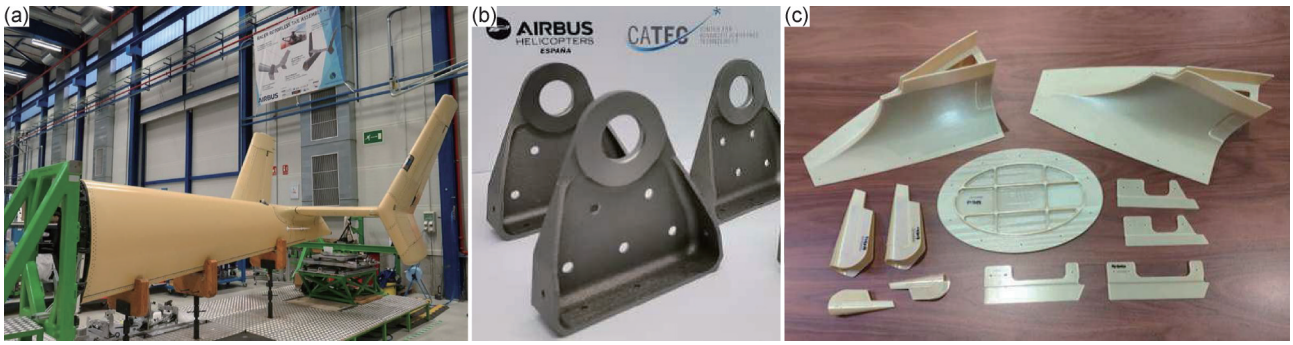


图 1　RACER 后机身增材制造技术应用[12]

(a)RACER 后机身;(b)钛合金 PBF/SLM 工艺制备垂尾方向舵连接件;(c)ULTEM™ 9085 增材制造件

Fig.1　AM technologies application in RACER rear fuselage[12]

(a)RACER rear fuselage;(b)AM titanium vertical fin rudder fittings PBF/SLM;(c)ULTEM™ 9085 AM pieces

环境中服役,其高强度和高可靠性的表现标志着 Boeing 公司在增材制造技术领域的最新进展。2023 年 10 月,Boeing 与 AETRO America 公司合作,宣布将采用金属增材制造技术替代原有的传统锻压制备工艺开展 AH-64“阿帕奇”主旋翼拉杆部件制备,以大幅缩短外场服役机型的备件交货周期,目前正开展钛合金增材制造的“阿帕奇”主旋翼拉杆全尺寸疲劳测试。

Sikorsky 在金属增材制造技术上选择与 Sintavia 公司合作,在非金属增材制造技术上选择与 Stratasys 公司合作。Leonardo 直升机公司在其承担的洁净天空 2 期(Clean Sky 2)下一代民用倾转旋翼机(next generation civil tilt rotor, NGCTR)项目中与 Aidro 公司合作,于 2024 年完成了倾转旋翼系统缩比模型的增材制造,采用的增材制造有 LPBF、SLS 及金属黏合剂喷射(metal binder jetting, MBJ)等,所选用的材料有 AlSi10Mg 铝合金、316L 及 17-4PH 钢合金和 PA12 塑料等。

综上所述,旋翼飞行器结构增材制造技术的应用历程,从最初的结构件工装和实验验证原型件制备,逐步拓展到非承力功能件,再到次承力结构件,进而发展到机体主承力结构件,最终延伸至旋翼关键结构件,呈现出不断深化和拓展的趋势,具体如图 2 所示。

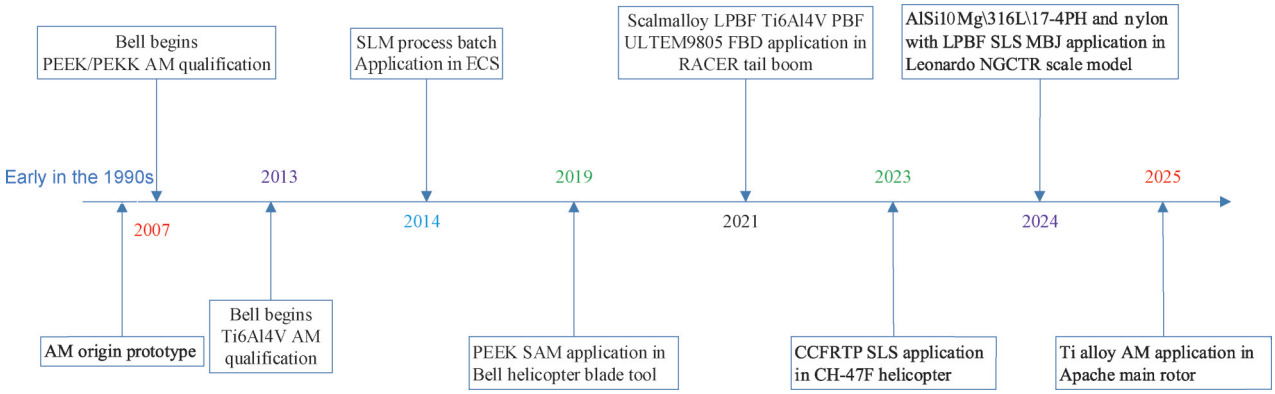


图 2　旋翼飞行器结构增材制造技术应用历程

Fig.2　Development timeline of AM applicated in rotorcraft structures

2　旋翼飞行器结构增材制造技术应用挑战

由图 2 可知,增材制造技术在旋翼飞行器结构中的应用至今已有数十年,但在以旋翼拉杆为代表的旋翼关键结构上的应用尚处于研发实验过程中,对于旋翼飞行器研发企业而言,仍属于新工艺新技术范畴。究其原因,主要是增材制造技术在旋翼飞行器结构上的应用面临着如下挑战:如增材制造技术的新工艺和新材料不断涌现并快速迭代,难以实现技术的固化和标准化;虽然增材制造技术理论上可以制备所有结构件,但在实际应用中,并非所有结构件都适合采用增材制造技术;现有的基于铸造、锻压和机加等传统制备工艺的旋翼飞行器结构设计、制备与验证/认证方法,并非增材制造技术在旋翼飞行器结构工程应用中

的最佳选择。

2.1 增材制造技术快速迭代发展引发的应用挑战

近年来,增材制造技术一直处于高速发展和持续变化中,新工艺、新材料、新设备等层出不穷、快速迭代。但在旋翼飞行器结构等为代表的航空飞行器结构应用领域,更关注的是增材制造技术装机应用技术成熟固化所需的标准化和规范化。具体体现如下:增材制造技术的快速迭代发展,使得当前针对增材制造技术的研发与应用工作面临着技术迅速过时的风险。随着新工艺和新材料的不断涌现,现有的研发成果可能会迅速被取代。此外,由于大多数增材制造设备是针对特定的工艺和材料体系定制的,目前尚未实现设备、设备软件及零部件之间的标准化和通用化。这意味着,现有的大部分增材制造技术可能无法适应未来购置的新设备或新发展的工艺及材料。这不仅可能导致现有增材制造研发应用工作所投入的时间和成本成为无效投入,还会严重影响旋翼飞行器结构研制生产单位推进增材制造技术研发和应用的信心。因此,许多单位对增材制造技术的应用持“观望态度”,这正是导致旋翼飞行器结构增材制造技术工业化应用案例有限的主要原因之一。因此,如何破解增材制造技术快速迭代发展与旋翼飞行器结构应用所需的技术成熟固化、标准化和规范化之间的周期匹配问题,避免技术应用即落后是旋翼飞行器结构增材制造技术研发急需克服的首要挑战。

2.2 增材制造技术工程应用难点引发的应用挑战

增材制造技术在旋翼飞行器结构中的工程应用难点主要有:缺乏在增材制造技术与传统制造方法之间进行选择的合理可行的量化判定准则;在应用增材制造技术进行结构制备时,面临设计经验匮乏、尺寸限制、材料选用范围有限及高成本、设备专用性较强等问题;设计性能指标难以通过一次性制备完全实现,往往需要后续处理;质量稳定性和检测方法面临挑战等。上述工程应用难点均应发展相应的技术解决措施,以充分发挥旋翼飞行器结构增材制造技术的应用优势。

现有技术水平下,对于旋翼飞行器结构件是否选择增材制造技术的定量理解和判定,仍面临着相当大的困难。发展旋翼飞行器结构增材制造技术应用的评估量化准则,明确区分哪些旋翼飞行器结构件适合采用增材制造技术,哪些更适合传统制造方法。这将助力旋翼飞行器结构研制生产单位实现增材制造技术在何时、何部位以及何种应用方式上的精准应用。

旋翼飞行器结构增材制造技术应用更为细致和具体的工程实施层面所面临的挑战为:(1)尺寸限制,制备大尺寸部件是目前航空工业中增材制造技术应用的最大挑战,相比传统制造方法,增材制造技术在制备飞行器较大结构件时,出现性能降低等现象。(2)材料选用范围有限及高成本,目前通过适航符合性认证的增材制造技术用聚合物和金属粉末范围较小,且材料成本高昂(如 7050 板材市场价大致为 70 ¥/kg,增材制造技术用同等性能 Scalmalloy 铝合金市场价大致为 300~400 €/kg[13]),大大降低了增材制造技术应用于航空飞行器结构件的竞争力。(3)设备专用性,当前技术条件下,大部分增材制造设备仅适用于单一材料体系,如 Airbus 制造中心的增材制造设备,4 台专用于钛合金部件、3 台专用于聚合物部件,1 台专用于铝合金部件,增材制造设备受限的多材料打印制备能力限制了增材制造技术的竞争力和应用,发展多种材料体系和部件打印能力,提升增材制造技术的灵活性,才能有效实现增材制造技术在旋翼飞行器结构应用的蓬勃发展。(4)设计性能指标难以通过一次性制备完全实现,需要后续处理,大部分增材制造技术供应商给出的产品宣传口号为“增材制造技术可实现按需生产,即装机结构件的直接生产”,这也是航空飞行器研发单位对增材制造技术产生关注的原始出发点。但是,增材制造部件的表面质量和力学性能并不具备直接装机的技术条件,特别是对于旋翼飞行器,旋翼飞行器结构件在低/高周复杂疲劳载荷环境下服役,对于部件表面(具有内部结构的部件包括其内表面)光滑度等质量性能都有极高要求。因此,旋翼飞行器结构增材制造部件必须采用热等静压、机加等后处理方式,避免因表面过高粗糙度诱发应力集中而引发安全风险。(5)质量稳定性和检测方法,诸如原材料粉末供应商的更换、工艺参数的调整以及制造设备的更新(无论是硬件还是软件),这些操作都可能引发增材制造部件技术状态的变化,对质量连续性和稳定性提出了挑战,必须重新开展验证工作。如何完整表征增材制造部件与设计需求的一致性,特别是增材制造部件通常具有拓扑优化点阵格栅结构形式,对增材制造部件缺陷定位的质量检测工艺而言极具挑战。

2.3 增材制造技术普适性适航认证方法缺失引发的应用挑战

采用增材制造的航空飞行器结构件实现装机应用必须开展适航符合性认证,增材制造技术在旋翼飞行器结构件上装机应用所面临的适航符合性认证挑战主要为:(1)缺乏增材制造技术适航符合性通用认证标准;(2)现有认证方法均仅对单个部件开展认证。在缺乏旋翼飞行器结构件增材制造适航符合性通用认证标准的情况下,以美国联邦航空局(Federal Avia-

tion Administration，FAA）为代表的适航认证当局，主要依赖旋翼飞行器结构研制生产单位提供的增材制造部件数据来构建标准。然而，现有的旋翼飞行器结构件增材制造技术应用案例有限，且相关研发数据大多为专利专属数据，难以公开共享。这使得这些数据难以支撑构建旋翼飞行器结构件增材制造的通用适航性认证方法及其标准，现有旋翼飞行器结构增材制造部件均以零部件的形式开展适航符合性认证，独立的零部件认证也就意味着通过适航符合性认证后该部件的材料、工艺及设备都不能有任何变化，材料、工艺及设备发生了任何变化的情况下，部件都必须重新开展认证程序[14-17]。增材制造部件结构与材料同步成型，且部件在X、Y、Z三个方向上的力学性能往往并不一致。这就要求对部件的每种状态和每个方向的力学性能都必须独立进行实验测试和评估。与现有的采用均质各向同性铺层的航空复合材料设计和制备所采用的“积木式”认证方法相比，这一过程显得更为复杂。因此，获取增材制造部件所需的设计性能数据的认证周期漫长且认证成本极高[18-21]。综上，缺乏增材制造技术旋翼飞行器结构应用的普适性适航认证方法，采用针对单个部件开展零部件独立认证的认证方法，需耗费极大时间和经济成本，结合增材制造技术快速迭代发展的行业特征，认证周期及经济成本过高与增材制造技术高速发展之间的矛盾是旋翼飞行器结构研发单位难以决策应用增材制造技术的主要原因。

3　旋翼飞行器结构增材制造技术应用发展趋势

为克服旋翼飞行器结构增材制造技术应用所面临的上述诸多技术挑战，国外在旋翼飞行器结构增材制造技术应用量化评估、增材制造高性能材料和新型制备工艺、面向增材制造的结构优化设计、增材制造过程ISM及工艺参数智能调控技术、增材制造结构件高质量后处理工艺及增材制造普适性高效适航等技术领域投入了大量资源开展了卓有成效的研究工作，以有效解决增材制造技术在旋翼飞行器结构应用所面临的设计工程经验缺乏、材料和工艺的快速迭代与高昂的应用验证认证成本之间的矛盾冲突等问题。

3.1　增材制造技术应用量化评估技术

构建旋翼飞行器结构增材制造技术部件应用量化评估准则是实现旋翼飞行器结构增材制造技术高效工程应用的关键先决条件。增材制造技术与锻压、机加等传统制造方法不同，对于旋翼飞行器结构研制生产单位而言是一种相对较新的制备技术。由于缺乏对增材制造技术的知识储备和经验积累，且因增材制造部件不同属性之间的关系复杂多样，如部件的增材制造方向与力学性能之间的关系，因此适合应用增材制造技术的部件筛选存在较多的不确定性，选择适合应用增材制造技术的旋翼飞行器结构件是一个相对复杂的过程。因此，需要提出一种简单快捷且可观的量化评估方法，有效筛选出适合增材制造技术应用的最具潜力的旋翼飞行器结构件，使得旋翼飞行器结构工程师能够专注于其自身的设计工作。

2015年，德国帕德博恩大学的Kruse等在欧洲航天局（European Space Agency，ESA）支撑的项目“新结构”（New Structure）中，构建了一套适合航空航天工业增材制造技术应用的“权衡方法论”（trade off methodology，TOM）的零部件筛选流程工具，该方法依据结构轻量化或功能集成等优化潜力，从现有零部件中筛选出具有采用增材制造技术制备优势的部件[22]。

针对“New Structure”项目中基于TOM方法构建的零部件筛选流程工具，其数值分数评估因依赖语言性描述而存在较大的解读空间，导致客观性不足的问题，2017年，Kruse等在德国教育部支持的“产品研制流程中的增材制造用多目标优化和连续自动化产品研发”（multi-target-optimized and continuously automated product development for additive manufacturing in the product development process，OptiAMix）项目中进一步完善，通过建立完整的数值量化权重评估矩阵，消除基于TOM方法的零部件筛选流程工具存在的主观性，充分提升了航空航天工业零部件增材制造技术应用评估准则的客观性[23]。

2020年，Bell公司的Brendon为进一步消除增材制造技术应用评估上可能存在的主观偏差，尽可能地实现客观评估，构建了基于商业成功为基础的分值统计分析的民用旋翼飞行器结构件增材制造技术量化评估准则，分值统计分析由增材制造技术应用的5个关键部分构成：DFAM、制备成本、制备周期、制备性能及产业供应链，具体详见式（1）。

$$\mathrm{TOTAL_{score}}=\mathrm{DFAM_{score}}\times W_1+\mathrm{COST_{score}}\times W_2+\mathrm{CYCLETIME_{score}}\times W_3+\mathrm{PERFORMANCE_{score}}\times W_4+\mathrm{SUPPLE_{score}}\times W_5 \tag{1}$$

式中：$\mathrm{TOTAL_{score}}$为总分值；W_1、W_2、W_3、W_4及W_5分别为DFAM分值（$\mathrm{DFAM_{score}}$）、制备成本分值（$\mathrm{COST_{score}}$）、制备周期分值（$\mathrm{CYCLETIME_{score}}$）、制备性能分值（$\mathrm{PERFORMANCE_{score}}$）及产业供应链分值（$\mathrm{SUPPLE_{score}}$）的权重系数。5个关键部分的权重系数目前具有同等的重要性。

DFAM分值进一步分解为如下4个部分:材料技术成熟度、材料浪费率、制件减重效益及后处理技术。制备性能分值进一步分解为如下两个部分:拓扑优化及部件整体成型。产业供应链分值进一步分解为如下4个部分:运输、存储、采购、生产[24]。

从2021年起,德国柏林工业大学Nadja等在维尔纳-冯-西门子工业与科学技术中心的研究框架下,在“WvSC-HTA2.0:高温应用2.0”欧洲地区研发资金项目资助下,开发了一套基于可制造性、经济性及生态环保等综合系数量化评估的增材制造部件选用软件,软件中的部件AM选用权重系数判定界面如图3所示。由图3可知,现有增材制造部件选用软件中,部件选用评估过程仍需要人工介入,将带来一定的主观性[25]。因此,为减少现有增材制造部件选用软件所存在的主观性,将持续开展可实现整个增材制造部件选用评估流程自动化的软件优化研究工作。

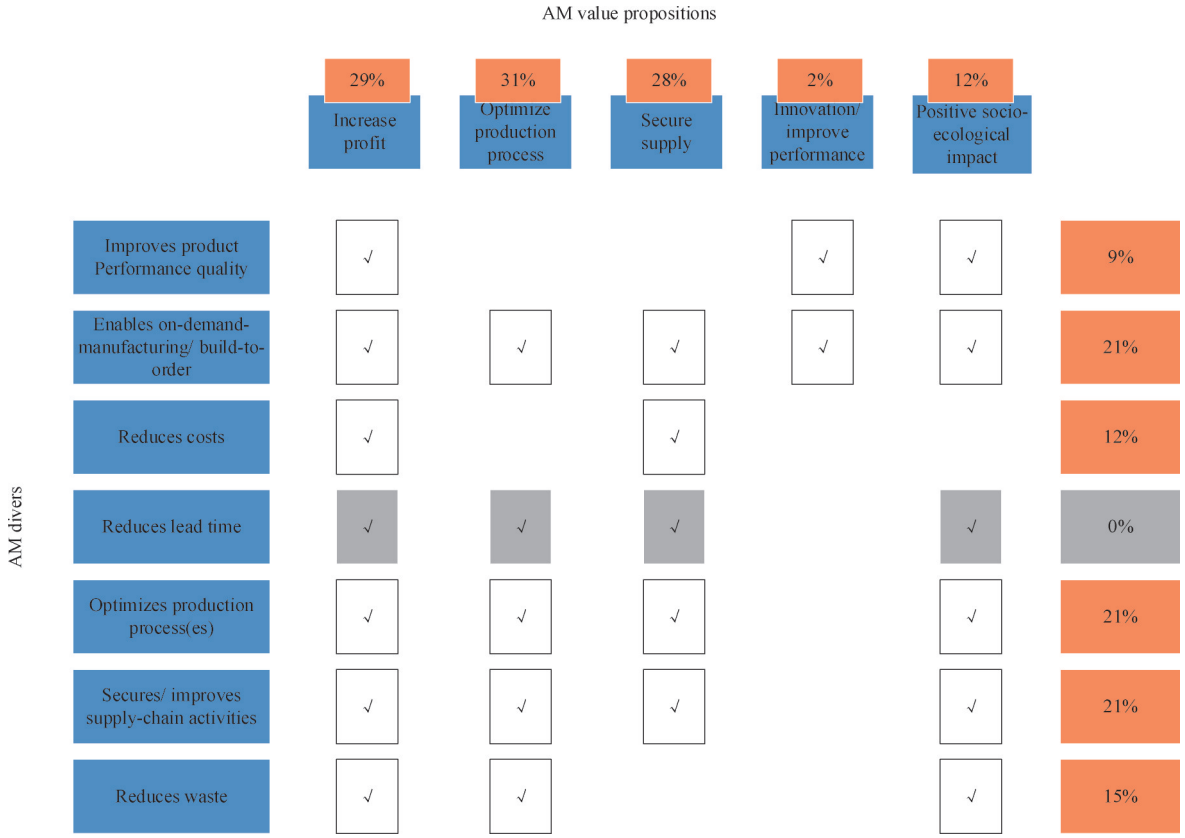


图3 部件AM工艺选用权重系数判定软件界面[25]

Fig.3 Software interface for determining weighing coefficients of AM process applicated in components[25]

综上,为消除关键部分同等权重系数所存在的局限性以及减少人工加入所引发的主观性,随着后续旋翼飞行器结构研发单位关于增材制造技术在旋翼飞行器结构件上应用案例增加和知识工程积累,应进一步优化关键部分权重系数及开发基于量化系数评估的增材制造部件自动化选用软件工具,实现量化评估准则的精准度提升和增材制造部件选用的客观性。

3.2 面向增材制造的结构优化设计技术

DFAM在旋翼飞行器研发单位已经应用多年,被公认为是通过优化部件的传统制备工艺及装配流程以实现成本降低目标的最有效方法[26]。DFAM的应用为同一原理,应用于从传统制备工艺转换至增材制造技术时降低增材制造技术的应用成本。针对适合于应用增材制造技术的旋翼飞行器结构件,只有在采用DFAM技术时,方可全面实现增材制造技术的应用优势。然而,在现有技术水平下,旋翼飞行器结构增材制造技术的应用案例有限,导致DFAM技术积累不足。目前缺乏成熟的DFAM设计文件和标准规范,这使得工业部门难以充分发挥增材制造技术在旋翼飞行器结构应用中的全部优势。对DFAM工具和技术相关知识的缺乏,已成为制约旋翼飞行器结构增材制造技术进一步应用和拓展的关键瓶颈之一。

与传统机械加工、制造等制造工艺技术不同,增材制造技术是一种数字化制造工艺,其工作流如图4所示。由图4可知,增材制造技术工作流为反馈循环,某一阶段发生变化,如建模方式和工艺参数的变更,

均需从结构拓扑优化设计重新开始，所消耗的时间将大大减弱增材制造技术快速迭代的主要优势。同时，针对军用旋翼飞行器结构件以轻量化最佳设计为目标的拓扑优化设计所输出的复杂仿生异型结构，应能够在较短周期内（数小时内，而非数天内）完成增材制造技术工作流中的增材制造设备可读文件转换及打印路径处理，DFAM的发展应用旨在全面实现增材制造产品设计优势和降低增材制造技术工作流的复杂度。因此，为有效实现增材制造技术结构优化（创新性几何外形）和高效自动化（快速自动迭代循环）的全部潜在优势，旋翼飞行器主流研发单位应大力发展DFAM等增材制造专用先进工程设计工具。

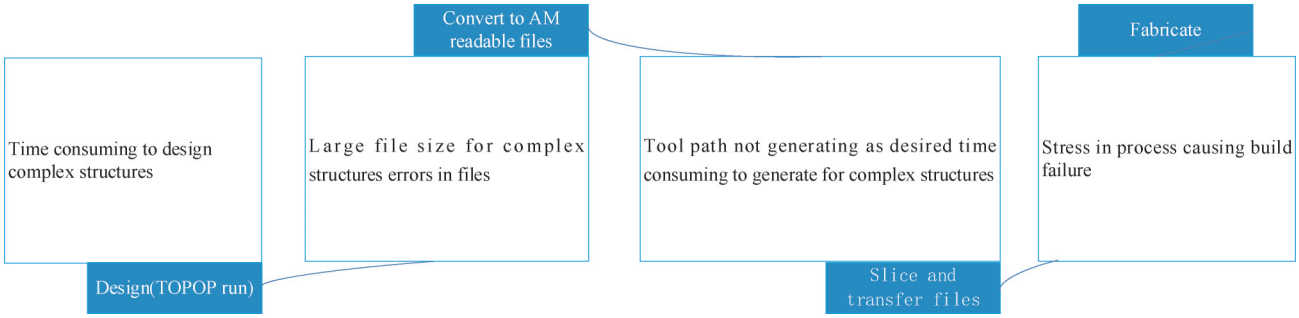


图4　旋翼飞行器结构件增材制造技术应用工作流

Fig.4　Workflow of AM technology application in rotorcraft structural components

现有旋翼飞行器结构增材制造部件可用的DFAM工具存在的主要问题如下：（1）市面上相对成熟的增材制造设计软件一般基于计算机辅助设计（computer-aided design，CAD）开展建模工作，基于CAD的增材制造设计软件具有设计编辑功能相对简单及可针对多个部件开展多次迭代等优势，结合增材制造技术的快速制备，结构件的设计构思、虚拟创建和打印制备可在一天内完成。但是当设计相对复杂时，特别是针对具有不同内部结构的复杂部件或者拓扑优化设计输出的仿生异型复杂结构，采用CAD建模仅能获取简单的3D特征，如需对结构表面进行充分定义并创建后续增材制造可用的几何形状特征，该过程需要处理大量数据，不仅极其耗时，还极易导致软件运行滞后甚至崩溃，导致基于CAD的增材制造设计准备无法开展。（2）现有DFAM工具主要应用于结构拓扑优化等结构生成式设计、建模及仿真，部分增材制造特定需求如工艺仿真因计算成本等因素并没有纳入现有可用的增材制造设计优化软件工具。同时，DFAM工具的发展缺乏总体系统性思维，并没有基于增材制造技术的完整价值链进行开发，导致DFAM的不同功能模块一般分布于不同的独立设计软件包，由不同的软件供应商依据不同的标准开发，不同独立设计软件包之间的文件交换极易出现数据信息丢失问题。如何将现有DFAM分布式软件包部署集成至现有旋翼飞行器研发单位已有的工程生产系统平台，解决上述不同软件包之间关联交互所需的时间和产生的误差问题，将是一个极其繁琐的过程。

对基于CAD的增材制造设计软件在处理具有复杂内部结构及仿生异型复杂结构时的局限性，近年来，约翰霍普金斯大学应用物理实验室的Carter等提出了基于隐性函数开展增材制造结构件建模的研究思路，以实现在计算能力不够的情况下开展复杂内部结构及仿生异型复杂结构的设计，充分释放增材制造复杂胞元结构的潜在优势，提升结构件的力学、热或声学性能[27]。nTOPOLOGY与德国光电系统公司（Electro Optical Systems，EOS）联合开发了一套基于隐式函数建模的增材制造结构工程设计软件，该工程设计软件具备“隐式互操作能力”，能够实现隐式几何形状在结构拓扑设计、增材制造准备软件以及工程生产系统平台之间，包括已有的CAD、计算机辅助工程（computer-aided engineering，CAE）、产品生命周期管理（product lifecycle management，PLM）及可视化软件等不同独立设计软件工具之间的直接传递，不会造成结构几何形状精度及设计内容的丢失，并与Siemens Energy合作，采用基于隐式函数建模的增材制造结构工程设计软件开展了热交换器的增材制造，结果表明，基于CAD的增材制造结构工程设计软件制备周期为2～7天、设计文件大小为150～200 GB，基于隐式函数建模的增材制造结构工程设计软件制备周期低于5 min、设计文件大小低于1 MB。

针对DFAM工具没有覆盖增材制造技术完整价值链及缺乏总体系统发展考虑的问题，2020年，荷兰特温特大学的Vaneker等提出了将DFAM工具纳入增材制造技术完整工艺链的发展思路，并设计了关联DFAM完整工艺链的不同阶段（增材制造适用性评

估、基于增材制造目标的产品设计及增材制造产品实现链优化设计)的行为和目标的设计框图[28]。2022年,美国海军在中小企业创新研究计划(small business innovation research, SBIR)中启动了“增材制造风险评估工具软件-数字化工程”(digital engineering- design for additive manufacturing risk toolset)项目,旨在解决DFAM不同功能模块分布在不同的软件且部分增材制造特有需求(如风险分析)功能模块缺失以及部分输入性数据(数据包)无法及时更新的问题,开发可在用户集成界面访问的DFAM组合工具软件包,组合工具软件包由3个独立软件模块构成:(1)结构件性能建模与仿真软件模块;(2)基于增材制造的结构设计优化模块;(3)风险分析模块(增材制造驱动的风险分析)。要求3个软件模块既可独立运行,也能相互交换各自计算结果并能跨模块运行。

国内航空工业沈阳所针对增材工艺过程高温与冷热剧烈循环导致的大残余应力等制造约束条件,提出了大型复杂增材制件设计制造一体化方法,即宏观离散、去除残余应力、增材成型连接,实现了向三维承载整体框/梁结构跨越[29]。大连理工大学刘书田团队长期致力于考虑各项约束下的增材制造结构拓扑优化设计研究[30-31]。南京航空航天大学、上海交通大学等高校研究人员相继开展了增材制造设计下的晶格结构研究[32-33]。从现有开源文献分析,国内关于DFAM的研究团队大多致力于具体的结构优化及增材制造技术的研发和改进,对于DFAM设计软件的开发研究比较欠缺,相关工具手段一般采用Ansys、nTop、3-matic、Fusion360及Siemens等国外软件,存在较大的受制于人风险。

综上,为实现旋翼飞行器轻量化结构DFAM关键工业软件的自主保障和良好运行,未来应从旋翼飞行器增材制造技术完整价值链及总体系统发展角度出发,大力培育国内自主的基于隐式函数建模的增材制造结构工程设计软件,实现国内旋翼飞行器增材制造复杂内部结构及仿生异型复杂结构的高效设计。

3.3 增材制造高性能材料和新型制备工艺

增材制造高性能材料和工艺技术是旋翼飞行器结构增材制造技术工程应用实施的物质基础。根据对相关开源情报的综合分析,美国机动车工程师学会(Society of Automotive Engineers, SAE)2015年启动了“航空工业用增材制造标准研发”(Additive Manufacturing Standards Development for the Aerospace Industry)计划[34],截至目前,已累计开展了近百项航空飞行器增材制造技术完整产业链上的标准制修订工作。在增材制造高性能材料和工艺分类标准中:金属材料主要集中于高温合金、钛合金、铝合金和钢等材料,工艺涵盖PBF、DED、BJAM及Cold Spray,如ASTM F2924-14、ASTM F3056-14等;非金属材料和工艺规范已经相对成熟的有基于Stratasys公司的ULTEM材料体系和其相应的熔融长丝制造(fused filament fabrication,FFF)工艺及基于聚合物粉末的SLS工艺,如ASTM D1238、ASTM D6779等;正在制定和发展基于连续纤维增强聚合物材料的FFF工艺体系标准[35]。

增材制造技术中所选用的大部分合金,最初应用场景均为传统冶金方法(铸造或锻造)加工,在增材制造中存在不同的微观结构和性能,对增材制造合金必须开发适用于增材制造技术的新材料组分及适应增材制造特定微观结构的后续热处理工艺。集成计算材料工程(Integrated Computational Materials Engineering, ICME®)采用系统设计方法,利用基于物理的力学模型等技术手段,实现关键工艺-微观结构-力学性能之间的有效关联,在理解、评估和设计增材制造技术特定工艺需求条件下的材料微观结构和热处理方面发挥关键作用。相比现有基于经验的材料研制迭代试错方法,可以实现增材制造技术领域新材料的高效低成本研制,因此将其应用于增材制造技术领域新材料组分的开发是近年来的研究热点。

自2014年起,QuesTek Innovation应用其开发的基于ICME®的材料设计技术(Materials by Design® methodologies)软件等工具,从以下3种技术途径出发进行材料设计:(1)对现有合金组分进行改进调整以适应增材制造技术特点;(2)基于增材制造技术开发新型合金;(3)基于化学组分、工艺参数和后处理热工艺等输入,预测微观结构和部件性能,开发了数百种适用于不同增材制造应用场景下的多种合金系统。在旋翼飞行器结构领域,QuesTek Innovation与Lockheed Martin及Sciaky合作,设计研发了一种新型钛合金“QuesTalloy™ Ti-6-4 Mod”,与电子束(electron beam,EB)工艺相结合,对比基于EB工艺的Ti_6Al_4V合金,在相同延展性下,其拉伸强度性能提升了20%[36];QuesTek Innovation与Bell及Harvest合作,针对直升机传动系统齿轮箱壳体,开展了基于SLS工艺的新型铝合金研制及应用[37]。

镁合金因其低密度(密度为1.74 g/cm³)、较高比强度、与铝合金同等水平的比模量、耐冲击及强导热等性能,一直是垂直升力飞行器传动系统壳体的优先选用材料,但是镁合金现有铸造和锻压等工艺技术存在加工时易着火风险及复杂形状难以制备实现等限制。增材制造通过极大提升设计自由度,有效突破了

复杂形状难以制备的限制。同时，借助拓扑优化技术，在不牺牲结构性能的前提下，进一步提升了减重效益。如镁合金结合LPBF 工艺，通过拓扑优化内部润滑和/或冷却管道等技术，与铸造产品相比可以实现额外减重。针对镁合金低沸点及其与氧的高反应活性等LPBF 工艺中需要解决的挑战，荷兰航空研究院（Netherland Aerospace Centre，NLR）与 Boeing 合作，以未来垂直升力计划中的某型机传动系统壳体为应用背景，选用具有LPBF 工艺所需延展性的金属粉末（WE43 镁合金粉末），采用德国SLM Solution 公司的SLM® 280^{HL} LPBF 设备，通过工艺参数优化等技术措施，实现了未来垂直升力计划中的传动系统壳体几何外形复杂演示验证部件（精细均匀微观结构）的成功生产，具体如图5所示[38]。

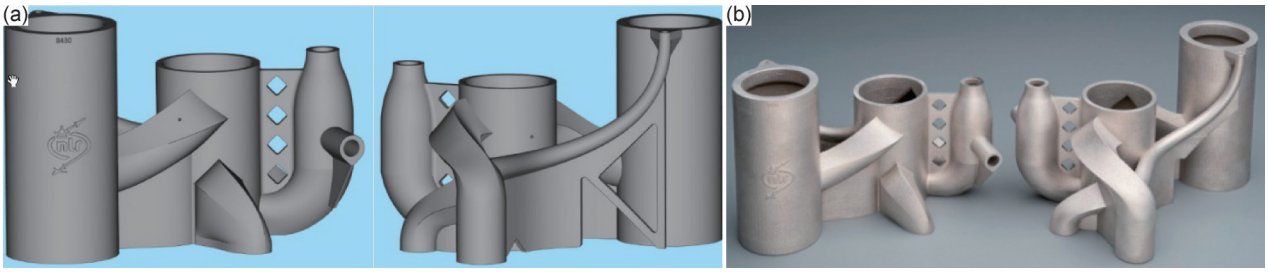


图5　未来垂直升力传动系统壳体镁合金部件LPBF 增材制造验证件[38]
（a）部件基准设计；（b）验证件前后视图
Fig.5　Magnesium LPBF AM demonstrators for future vertical lift transmission casings[38]
(a)benchmark part design; (b)overview of demonstrators seen from the front and the back

非金属材料增材制造产品力学性能相对较低，如目前由Stratasys 推出的取代ULTEM 材料体系的Antero 840CN03 树脂，其FFF 工艺制备产品的拉伸屈服强度在95 MPa 左右，远远不能满足旋翼飞行器结构领域应用的高强度需求。对于热塑复合材料而言，采用短切纤维增强虽相比纯塑料强度显著提升，但仍不能与传统纤维增强复合材料性能相匹配。因此，开发FFF 工艺用连续纤维增强热塑复合材料丝束，通过在丝束中采用持续未破坏的碳纤维达到传统纤维增强复合材料的力学性能，是近年来的研究热点[39-40]。特别是对以旋翼飞行器为代表的航空应用领域，CCFRTP 增材制造技术可以提供如下优势：包括实现超轻质结构、高比强度和比刚度、复杂几何外形的精准制造、按需定制生产以及减少二次装配需求等。更为关键的是，CCFRTP 增材制造技术能够实现智能结构的制备，例如将传感器和能量采集器集成嵌入结构中，从而赋予结构实时监测、自修复和自适应等先进功能。目前，国内外众多研究机构均在这一领域持续投入，致力于推动相关技术的进一步发展[41-42]。

在航空飞行器结构领域，CCFRTP 增材制造的应用面临着诸多技术难题，包括纤维体积含量的精确控制、连续纤维的精准铺放，以及有效消除孔隙缺陷和基体与纤维之间的不良界面等问题。为克服上述技术限制，CCFRTP 增材制造工业界开展了大量卓有成效的研究，典型代表有美国 Continuous Composites Corporation 研发的CF3D®技术和瑞典9T Labs AG 研发的RED SERIES™技术[43-44]。CF3D®技术通过采用静压浸渍单元、高精度激光追踪器和扫描器、高精确度数字控制器，取代了传统的机器控制器，并结合拓扑优化软件驱动的分析新方法等技术措施，实现了纤维体积含量的按需精准稳定控制。同时，该技术能够依据最大载荷方向，使纤维在特定方向上精准取向分布，从而充分利用高性能纤维的强度优势。目前正在以低成本可消耗飞机（low cost attributable aircraft，LCAA）机翼为应用背景，与Lockheed Martin 开展机翼大梁的CCFRTP 增材制造技术研究[43]。同时，CF3D®技术具备在结构丝束主路径上嵌入替代性纤维的能力，可实现，复合材料结构的多功能，如图6（a）所示。Continuous Composites Corporation 公司基于该技术制备了光纤、NiCr 和Copper 导电金属纤维嵌入的桨叶演示验证结构，实现原位固化和结构健康监测及桨叶前缘轻质高性价比的防/除冰及防雷击等功能，如图6（b）所示。RED SERIES™技术通过将3D 打印技术与传统熔融成型工艺相结合，实现了高效且精准的复合材料制造。在这一技术中，打印单元负责纤维的铺层和预制件的生产，而熔融单元则承担预制件的固化以及最终部件成型的压挤功能。这种创新的结合方式不仅提高了生产效率，还确保了部件的高质量和高性能，将制件孔隙率从10% 降低至1% 以下，目前正在与Solvay 合作开展CCFRTP 增材制造技术应用验证研究[44]。

在LSAM 技术方面，英国全球工程公司（Guest，

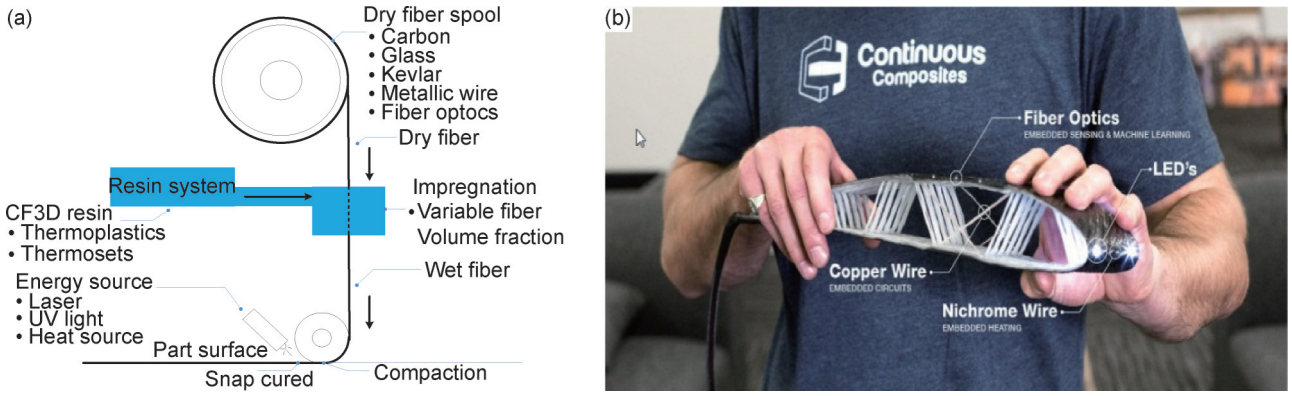


图6 基于CF3D®技术的多功能结构制备[43-44]

(a)制备原理;(b)演示验证件

Fig.6 Multifunction structures fabricated based on CF3D® technology[43-44]

(a)fabrication principle;(b)demonstration part

Keen and Nettlefolds, GKN)面向航空飞行器结构领域应用需求,目前正在进行基于DED工艺的2 m以上超大尺寸钛和镍合金部件的制备技术研究[45],荷兰国家航空航天实验室(Netherlands Aerospace Center, NLR)面向航空飞行器热固性复合材料大尺寸复杂结构精密固化对高性能模具的需求,正在开展基于熔融颗粒制造(fused granulate fabrication, FGF)工艺的热塑复合材料模具制备技术研究[46]。

3.4 增材制造过程ISM与工艺参数智能调控技术

增材制造过程中的智能传感与监控(ISM)以及工艺参数的智能控制技术,是确保旋翼飞行器结构增材制造技术在工程应用中高效实施的关键保障手段。增材制造制件的组织结构和缺陷特征相比传统制件,呈非均匀性和各向异性等显著特征,且航空飞行器领域的增材制造制件一般为点阵或拓扑优化结构、几何外形复杂,传统无损检测方法将出现可达性差、检测盲区大等问题,同时无损检测为事后检测,结果具有滞后性,对于制件质量只能被动接受,无法及时主动调整[47-48],因此,增材制造制件的质量检测与控制正朝着工艺制备过程中的智能传感与监控(ISM)以及工艺参数的智能控制方向发展。这将实现增材制造制件成形质量的实时监测,并在监测到缺陷产生时,同步调整工艺参数以及时修复缺陷,从而确保制件的高质量和高可靠性[49-51]。

ISM及参数控制技术在增材制造中的应用分为如下3种场景[52]:(1)可监测缺陷的类型及状态,通过基于不同类型传感器和检测工具的ISM技术评估缺陷类型及状态,具体如表1所示。由表1可知,为了有效监测和采集增材制造特征值的异常情况,当前的智能传感与监控(ISM)技术正朝着多传感器集成的方向发展,并与机器学习(machine learning, ML)深度融合,以实现对信号深层特征的挖掘,进而达成智能监测的目标。多传感源的信息融合能够实现传感器之间的信息共享与互补,从而显著提升缺陷表征和质量监测的能力。结合机器学习的智能监测技术,不仅可以实现监测过程中缺陷的自动分类,还能进行精准识

表1 ISM技术中传感器与检测工具对增材制造缺陷的可检测性分析[52]

Table 1 Detectability analysis of AM process defects by sensor and inspection tool in ISM technology [52]

AM defect caused by different process abnormalities	Process monitoring			Equipment monitoring
	Radiographic NDI	Thermal imaging (infrared)	Optical imaging(vision)	System sensor
Flaw due to poor powder calibration	Medium detectability	Good detectability	Detection not possible	Medium detectability
Flaw due to local melt anomaly (hot spot)	Medium detectability	Good detectability	Detection not possible	Detection not possible
Flaw due to contact of part and recoater	Medium detectability	Detection not possible	Good detectability	Poor detectability
Flaw due to increase in residual oxygen	Medium detectability	Detection not possible	Detection not possible	Good detectability
Flaw due to powder contamination	Poor detectability	Poor detectability	Detection not possible	Detection not possible

Notes:1)According to the detectability of defects, they can be divided into good detectability and medium detectability and poor detectability and detection not possible.2)Multi-sensor data sources fusion in ISM technology provides complementary quality assurance means for defect detection information, which will effectively ensure the safety of AM components.

别，极大地提高了监测效率和准确性。(2)监测数据与缺陷状态及工艺参数偏离的关联，增材制造过程是一种复杂的强非平衡过程，涉及高能热源与材料的交互作用，以及加热与冷却的快速循环交替下的组织演化，体现了多物理场的耦合特性[53]，过程中的熔池、温度场、声波特征等特征值为ISM传感器监测采集数据[54]，特征值的异常状态由工艺参数偏离引发，并与缺陷形成密切关联。通过施加不同工艺参数偏离组合(如不良的工艺参数组合或工艺副产物再沉积等)引发特征值异常及导致缺陷产生，对上述离散庞大数据集(工艺参数偏离组合、特征值异常实时监测数据、缺陷类型及状态图像数据等)采用高可信度ML工具软件学习处理，构建一个稳定可靠的映射关系，从工艺参数的偏离，到监测数据特征值的异常，再到缺陷的类型与状态，奠定通过工艺参数实时调整消除缺陷策略的理论基础。(3)实时监测与工艺参数闭环控制的实现，针对增材制造多变量、非线性、复杂强耦合的过程特征，基于工艺参数偏离到监测数据到缺陷类型与状态的映射，开发基于模糊控制、预测控制以及迭代学习控制等自适应非线性控制机制的多工艺参数高效智能调控方案，以实现对复杂制造过程的精准优化与动态调整，实时纠正增材制造制件潜在的成型质量问题[55-56]，为增材制造高制备速率下实现首次制备即达到准确的无缺陷结构创建必要条件。

欧盟地平线2020计划下的金属增材制造中试线研发(additive manufacturing using metal pilot line，MANUELA)项目中，针对ISM及参数控制技术在增材制造中的应用场景，以高温单向合金镍基Hastealloy X材料的LPBF工艺为应用对象，开发和集成最先进的ISM传感器和检工具，如采用系统传感器保证设备的平台加热、激光源、温度和大气以及来料组分稳定，避免或降低增材制造部件被氧化物或者氮化物的二次污染，并对粉末床监测确保逐层均匀完整喷涂；采用视觉和红外传感实时监测整个工艺过程，最大限度降低不可预测的微观结构缺陷等，最终构建了LPBF工艺实时质量监控系统[57]。同时，发展了可扩展、低延迟和高通量数据驱动的LPBF工艺参数实时反馈闭环调控系统，通过ML等大数据挖掘技术进行从工艺参数到监测数据到缺陷类型的因果关系聚类表征，建立了基于工艺参数自动调整与优化的反馈闭环控制机制，以实现对缺陷的有效减缓[58-61]。截至目前，仅实现了在LPBF工艺中针对无冶金裂纹的Hastealloy X单向合金内部微观缺陷的在线质量监控和调控手段，达到了可工程化应用的水平，但是，适合于其他合金及不同增材制造和因设计诱发缺陷的ISM及参数控制技术仍需开展进一步研究。

为有效消除聚合物复合材料LPBF工艺制备过程中易出现的褶皱缺陷，Klamert等发展了一种创新的ISM及参数控制方法[62]，首次实现了工业级的激光轮廓仪和热红外相机这两类传感器在聚合物复合材料LPBF工艺中的部署应用，两类传感器的安装位置均可以有效监控粉末床的整体表面，通过激光轮廓仪绘制增材制造制件的三维结构，并利用热红外相机获取增材制造的温度场。此外，验证了两种传感器数据的融合，实现了粉末床表面的几何重构以及增材制造温度场的实时监测，解决了增材制造过程中粉末床的整体表面获取和温度场实时监测和数据获取的挑战。通过对增材制造结构件的高度图像上两种不同传感器独立输出数据的直接对比和叠加对比，建立了热分布与粉末层质量、褶皱尺寸及熔池深度等指标的关联关系，基于所建立的关联关系，通过热分布图以及所描述的温度范围，能够实现褶皱故障的可视化检测，后续研究目标为在此基础上结合ML机理和自适应非线性控制机理实现工艺参数实时优化控制。

Lu等[63]针对连续碳纤维增强聚合物复合材料增材制造，提出了一种基于深度学习(deep learning，DL)辅助的实时缺陷检测与工艺参数闭环调整系统，研发重点在于基于自动化控制的增材制造系统，该系统的核心是集成深度学习(DL)模型以实现实时缺陷监测与评估。评估了多种深度学习(DL)算法(包括Faster R-CNN、SSD和YOLOv4)在检测连续碳纤维增强聚合物复合材料中铺层错位等典型缺陷方面的性能。鉴于YOLOv4在检测精度和检测效率之间达到了最佳平衡，最终选择了YOLOv4算法。此外，缺陷的严重程度可以通过深度学习模型结合几何分析进行量化评估。为减缓或消除缺陷，系统发现实时图像中的缺陷标识时将自动调整层厚、丝束进给速度、打印速度及打印路径设计等工艺参数。

3.5　增材制造结构件高质量后处理工艺

增材制造结构件高质量后处理工艺是旋翼飞行器结构增材制造制件实现高性能制备的必需步骤。增材制造作为一种直接从CAD模型层-层累积叠加方式制备部件的制造技术，逐层制备过程中的阶梯效应不可避免，导致增材制造部件相比传统制备工艺生产部件，表面质量较差、表面粗糙度较高。在粗糙表面上，众多微孔所在位置的应力集中现象，将成为潜在裂纹起始的隐患点，从而导致增材制造制件较差的抗疲劳性能。旋翼飞行器因其所特有的旋翼及传动等动部件，动力响应产生复杂的高周疲劳环境，同时在地空地循环效应诱发下存在低周疲劳环境，对旋翼飞

行器结构提出了极高的抗疲劳特性需求[64]。增材制造技术采用过程ISM及工艺参数智能调控技术可有效实现工艺参数优化从而减缓表面粗糙度等缺陷产生，但因增材制造技术多达100种左右的工艺参数都将影响制件微观结构和疲劳性能，基于工艺过程ISM及工艺参数智能调控技术的参数优化并不能完全消除影响增材制造制件疲劳性能的表面粗糙度等缺陷，因此，为确保旋翼飞行器结构领域增材制造制件的疲劳性能，发展增材制造结构件高质量后处理工艺势在必行。

从航空飞行器结构金属材料增材制造出发，金属材料选用要求轻质高强耐高温，在追求轻质高强耐高温的同时往往导致较低的塑性和较高的热裂纹敏感性，也就意味着所选材料的可焊性较差，而航空飞行器结构件金属材料增材制造从本质上来说属于焊接工艺，因此，航空飞行器结构追求的金属材料性能先进性与增材制造选材的工艺性要求是相互矛盾的。基于此，航空飞行器结构金属材料增材制造制件呈如下典型结构：微观组织结构呈明显方向性，内部存在孔隙、热裂纹及未熔合等缺陷及表面粗糙度较大（一般在4～5 μm左右）。针对上述典型特征可采取不同的处理措施，为提升设备和工艺的稳定性，提出了过程智能传感与监控（ISM）及工艺参数智能控制技术的需求，以实现能量的非均匀按需分布以及缺陷的实时纠正等目标，但上述措施并不能完全解决金属增材制造制件存在的高孔隙率、较差表面质量及拉伸残余应力这三个主要问题。后处理工艺通过热处理、表面精加工及抛光等措施可有效降低孔隙率、改善表面质量及消除残余应力，因此，提升航空飞行器结构金属增材制造制件表面质量的最有效方式是将工艺参数优化措施与后处理工艺相结合，国内外开展了众多关于提升增材制造部件疲劳性能的后处理工艺技术研究[65-70]。

表2[65-71]对现有各种后处理工艺在解决金属增材制造结构件高孔隙率、较差表面质量和拉伸残余应力问题方面的效果进行了汇总与分析。由表2可知，高压空化水射流喷丸强化（Cavitation S Peening®，CSP®）是解决目前航空飞行器金属增材制造结构件（一般基于轻量化采用拓扑优化设计，具有复杂几何外形）表面质量较差和拉伸残余应力问题的最有效后处理工艺方法。2017年，波音公司与日本东北大学合作，针对其钛合金EBM工艺技术制备部件存在的高表面粗糙度问题（由金属颗粒未熔融引发）及其导致的疲劳强度极低的弱点，开展了CSP®后处理工艺应

表2 金属增材制造技术用后处理工艺汇总

Table 2 Summary of the post-treatment processes for metal additive manufacturing

Post-treatment process	Material	Application effect	Reference
Heat treatment	Ti alloys Steel alloy Mg alloys	Can effectively reduce or even eliminate tensile residual stress, but cannot eliminate porosity	[65]
HIP (hot isostatic pressure)	High-tem alloys Ti alloys Steel alloy	Can reduce porosity while releasing tensile residual stress, but dents caused by plastic deformation during HIP will increase surface roughness	[67]
Laser polishing	Ti alloys Steel alloy Al alloys	Can reduce porosity and improve surface integrity, but metal re-solidification will cause harmful tensile stresses	[69]
Finishing, machining, chemical/electrochemical polishing	Ti alloys Steel alloy Al alloys	Can reduce surface roughness and improve surface integrity but have no effect on residual stresses and porosity	[70]
Shot peening and laser peening	Ti alloys Steel alloy Al alloys	Can transform residual stress from tension to compression, but the effect on surface roughness is reduced	[68]
Ultrasonic nanocrystal surface modification	Ti alloys Steel alloy Al alloys	A surface strengthening technique based on laser shot peening that converts residual stresses from tension to compression and reduces porosity in the near-surface region, but is not suitable for curved complex surfaces	[66]
CSP®	Ti alloys Al alloys	Transforms residual stresses from tension to compression, while achieving smooth surfaces with abrasive impact and is suitable for curved complex surfaces	[71]

用研究。结果表明钛合金EBM制件表面粗糙度大大降低，且疲劳强度极限提升了1.6[71]。

针对聚合物材料的增材制造制件，目前在航空飞行器领域成熟应用的一般为热塑树脂（PEI、PEEK等）FFF工艺制品。由于这些材料的力学性能相对较低，它们一般被用于非承力结构。对于这些制件的后处理，通常侧重于降低表面粗糙度和对尺寸进行微调等表面质量提升和外形修整工作，一般选用后机械加工、磨料射流精加工及激光精加工等技术[72]，其中，后机械加工技术虽然可以有效降低结构件表面粗糙度，但其切削深度必须精细控制控制以避免结构件表面产生过切现象，但是其灵活性不如磨料射流精加工技术和激光精加工技术[73]；磨料射流精加工技术可实现表面粗糙度的精度达到500 nm，但是无法用于复杂的自由形状表面[74]；激光精加工技术虽可将表面粗糙度降低至1～2 μm，但是其无法用于复杂内部腔体结构，且必须对能量密度进行严格控制防止聚合物产生降解或燃烧现象[75]。

在航空飞行器领域新兴的CCFRTP增材制造技术领域，目前影响CCFRTP增材制造结构件性能的主要缺陷为高孔隙率及纤维与树脂基材之间以及层与层之间的弱胶接界面，上述缺陷将对CCFRTP增材制造结构件的压缩和层间剪切等力学性能有着显著的负面影响，主要受纤维表面粗糙度、纤维与树脂界面润湿匹配性及低压制备工艺等因素引发，因此，可以通过纤维表面改性、上浆剂应用、树脂与纤维界面改性、预浸渍技术、后-加压方法以及退火处理等技术措施消除CCFRTP增材制造结构件的主要缺陷[76]。上述技术措施中，属于后处理工艺的有后-加压方法及退化热处理，其中，热等静压等后加压方法已应用于碳纤维增强PEEK复合材料增材制造结构件[77]，退火热处理已应用碳纤维增强PLA及ABS复合材料增材制造结构件[78]。同时，CCFRTP增材制造后处理设备的研发聚焦于与增材制造设备的集成，以实现更高效、更协同的生产流程。如RED SERIES™将熔融加压单元与打印单元进行集成，同步实施打印和后处理工艺，实现孔隙率的显著降低，从10%降低至1%以下。

后处理工艺虽能有效提升航空飞行器增材制造结构件的性能和质量，但同时也可能在一定程度上抵消增材制造所带来的快速交付周期优势。后处理工艺的自动化可有效提升生产效率，但是目前仅有少量的特定解决方案可以帮助实现后处理的自动化，且这些解决方案主要集中于聚合物材料的增材制造部件，如Rosler metal finishing USA，LCC与Stratasys联合研发的Powder Ease T1等。在金属材料增材制造部件方面，截至目前，后处理技术仍主要依赖于传统制造工艺。尽管部分公司已经开始探索自动化解决方案，但由于市场需求有限，这一领域的创新进展相对缓慢。展望未来，随着增材制造行业的不断发展，先进的金属增材制造部件自动化后处理方案有望得到进一步发展和推广[79]。

3.6　增材制造普适性高效适航认证技术

增材制造普适性高效适航认证技术是旋翼飞行器结构增材制造技术工程化应用的加速器。增材制造的显著特征为材料形成的同时，结构件的几何外形、尺寸以及功能性能得以同步成型，与连续纤维增强聚合物复合材料部件制备工艺存在相似之处。不同的是连续纤维增强聚合物复合材料航空飞行器结构领域的应用认证已有以《复合材料手册》（Composite Materials Handbook-17，CMH-17）及AC20-107B《复合材料飞行结构》（Composite Aircraft Structure）等为代表的成熟指导性文件。以铸造、锻压及机加等为代表的金属部件传统制备方法均假定材料性能在成型过程或者加工工艺中保持不变，并以此假定为基础发展了《金属材料性能发展和标准化手册》（Metallic Materials Properties Development and Standardization，MMPDS-17）作为金属部件传统制备方法在航空飞行器结构上应用认证的指导性文件。基于金属增材制造的显著特征，这一假定对于金属增材制造来说是不成立的。为确保航空飞行器金属增材制造结构件的几何外形、尺寸和功能性能达到预期目标，必须保证增材制造全生命周期内众多步骤及大量工艺参数的准确实施。由于存在众多影响最终部件质量的变量，航空飞行器金属增材制造结构件的应用认证需耗费大量的一次性工程经济成本和漫长的时间周期。采用以年为时间单位对以小时为单位完成设计和制备的增材制造进行应用认证，将极大地抵消增材制造在航空航天等国防领域所具有的快速制备及多品种小批量按需生产等全部优势。因此，对航空飞行器金属结构增材制造技术快速工程化应用的普适性高效适航认证技术提出了迫切需求。

自2016年起，FAA和欧洲航空局（European Aviation Safety Agency，EASA）每年召开一次关于航空飞行器结构领域增材制造技术应用适航符合性认证的双边会议，重点聚焦于以Boeing、Airbus、Eaton等为代表的航空飞行器原始设备制造商（Original Equipment Manufacturer，OEM），以Stratasys、EOS、Siemens等为代表的增材制造材料、工艺、硬件设备和软件研制单位及以美国国家航空实验室（National Insti-

tute for Aviation Research，NIAR）、FAA、EASA 等为代表的认证技术研究单位提出的最新增材制造技术应用适航符合性认证技术。NIAR 于 2024 年提出发展基于性能的增材制造技术应用普适性适航符合性认证方法，旨在解决以往由 FAA 技术咨询报告等发布的认证方法仅适用于单个应用部件和单个增材制造，且过度依赖对输入参数（如打印设备、工艺参数及原材料成分）的精确控制等问题。

基于性能的增材制造技术应用认证方法，借鉴连续纤维增强树脂基复合材料在航空飞行器结构领域应用认证的“积木式”验证方法：首先，以增材制造技术研制单位提供的原材料规范、工艺规范和工艺控制文件为“积木式”验证的基础，可称之为“初始材料鉴定”和“工艺鉴定”阶段；其次，进入“设备安装鉴定”和“运行鉴定”阶段，实现增材制造设备的鉴定及增材制造设备与原材料的组合运行，并依据材料规范开展材料鉴定实验，验证与材料规范的符合性；随后，进入“性能鉴定-基于部件设计特征的性能评估”阶段，在设备和原材料的组合运行下，开展基于部件设计特征的试件（高度方向试件、疲劳试件、薄壁试件、后处理工艺试件及几何特征试件）设计、制备和实验，验证相关特定性能与设计要求的符合性；然后，进入“性能鉴定-首件鉴定”，对确定的设备、材料、工艺及设计组合的生产流程开展验证，验证新的生产流程可以生产出 100% 满足性能功能设计要求的部件；最后，在部件批量化生产阶段，开展随炉试样的批次抽样检测，确保批产部件性能可满足设计要求。基于性能的增材制造技术应用认证“积木式”验证流程具体如图 7 所示。

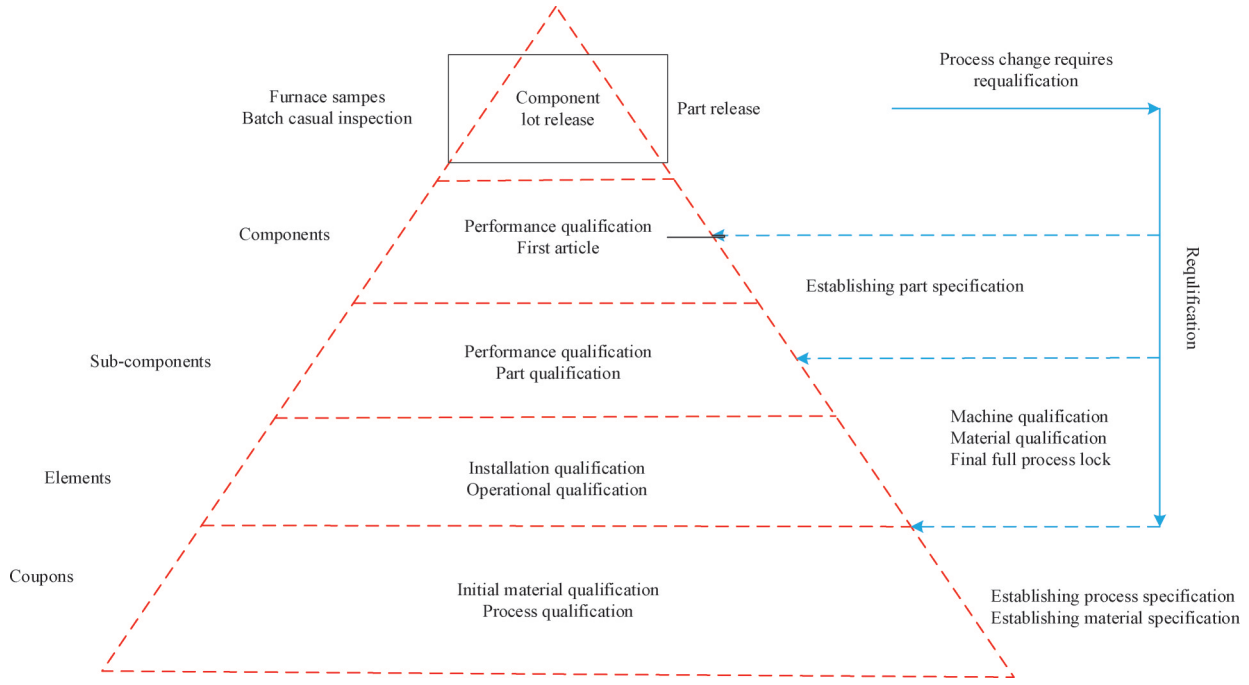


图 7 基于性能的增材制造技术应用认证“积木式”验证

Fig.7 “Building Block” verification of performance-based AM technology certification

基于性能的增材制造技术应用认证“积木式”验证流程虽然具有较强的普适性，但是随着验证层级的逐步增加，覆盖从原材料、工艺到部件的设计与制备的完整谱系下的潜在变量将呈指数级别增长，所耗费的经济和时间成本都将是一项巨大的挑战。为提升该流程的验证认证效率，航空飞行器结构增材制造技术的研制及应用全产业链，正围绕着以下研究领域持续开展相关工作：构建开放式共享材料性能数据库，开发基于 ICME 的多尺度多物理场性能分析预测工具，以及在此基础上引入集成数据驱动的人工智能（artificial intelligence，AI）、机器学习（ML）及深度学习（DL）等大数据处理方法，形成基于混合模型（物理模型与数据模型相结合）的高效认证方法。

在开放式共享材料性能数据库创建方面，NIAR 主要通过国家先进材料性能中心（National Center for Advanced Materials Performance，NCAMP），与 FAA、美国国防部（Department of Defense，DOD）及众多航空工业合作伙伴和增材制造工业界单位，对航空飞行器结构增材制造材料及工艺和设备组合体系进行鉴定，并在 NCAMP 开放式共享材料数据库中发布了众多聚合物纯树脂与短切纤维增强聚合物复合材料结合特定增材制造设备和工艺组合下的性能数据报

告[80]，FAA 与 Boeing 及 BEEHIVE 等正在联合开展统一金属增材制造数据库定义（Joint Metal Additive Date base Definition，JMADD）等项目，旨在构建一个具有统计意义的金属材料 LPBF 工艺材料数据库的开发框架，并将该框架拓展至其他增材制造设备类型、重复使用的原材料粉末以及制造工艺中的其他变化，最终产生可在 MMPDS 发布的许用值和规范。

在基于 ICME 的多尺度多物理场性能分析预测工具开发方面，美国空军、美国海军、美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）及美国制造（American Makes）开展了众多项目研究，以 V-22 旋翼飞行器增材制造动部件结构件等为代表的航空飞行器增材制造结构件为应用对象，发展基于多尺度多物理场的精准高效的性能预测分析工具，实现不同时间和长度尺度的模型（微观、介观及宏观）之间的高效关联并与 ICME 有效集成，降低基于 ICME 的增材制造优化成本以及复杂几何外形结构件高质量一次性准确制备所需的周期，以实现航空飞行器增材制造结构件的快速认证。

在基于混合模型（物理模型与数据模型相结合）的高效认证方法研究方面，DoD 制造数字中心（Manufacturing x Digital，MxD）发布了 AI/ML 和 DL 应用于增材制造部件认证的路线图，采用三步走的技术策略：首先，采用先进分析方法标识出待使用的增材制造材料、设备和工艺等全产业链流程最重要的参数；其次，发展基于混合模型的数据增强方法，在有效降低物理实验数量的同时达到基于物理试验方法同一水平的可信度；最后，发展基于 ICME、AI/ML 及工艺在线监测的普适性（适合任何外形、任何材料、任何工艺、任何设备组合）高效认证方法，构建增材制造全流程的材料-工艺-结构-属性-性能及寿命（material-process-structure-property-performance and life，MPSPPL）之间的映射关系，形成增材制造结构件“从摇篮到墓地”的基于可视化数字孪生（digital twin，DT，众多不同尺度且经试验验证可对不确定性进行量化的计算模型和仿真及设计工具软件的组合）的全新认证模式，实现增材制造结构件“制备即已认证”的技术愿景。

综上，为尽可能缩短旋翼飞行器结构增材制造技术研制应用试错迭代周期，提升旋翼飞行器结构件增材制造技术应用效率，降低旋翼飞行器结构件增材制造技术工程应用研发成本，欧美旋翼飞行器主流研制单位联合增材制造工业界单位，在政府及军方等相关渠道资源的大力支持下，在以下增材制造新兴技术领域持续发力：基于数值分析的旋翼飞行器结构件增材制造技术应用客观量化评估技术，以 DFAM 等为代表的面向增材制造的结构优化设计技术，以 Materials by Design® 等为代表的增材制造高性能材料和新型制备工艺，以多传感器数据源融合及反馈处理闭环系统等为代表的增材制造过程 ISM 及工艺参数智能调控技术，以 CSP® 等为代表的增材制造结构件高质量后处理工艺方法，以基于多尺度多物理场 ICME®（有效建立 MPSPPL 映射关系）的数字化认证技术等为代表的增材制造普适高效适航认证技术。

4　国内旋翼飞行器结构增材制造技术应用发展建议

借鉴欧美主流旋翼飞行器结构研制单位在解决增材制造技术应用瓶颈问题上的技术发展路径，这些瓶颈包括设计工程经验的缺乏、材料和工艺的快速迭代发展，以及高昂的应用验证认证成本。从实现国内旋翼飞行器结构增材制造技术高效应用的角度出发，在产业组织发展和工程应用实施两个维度，制定合理可行的国内旋翼飞行器结构增材制造技术应用的近期和中长期发展路线，如表 3 所示。

在产业组织发展维度，针对国内旋翼飞行器研制为一所（中航工业直升机所）两厂（中航工业昌飞、中航工业哈飞）的产业布局现状，在国内旋翼飞行器研制主机厂所协同大环境下创建增材制造技术研发与应用专属的多学科协同团队，建立与增材制造技术研发优势单位及适航当局的合作，构建一个涵盖旋翼飞行器结构增材制造应用的全产业链生态系统，从原材料、设备、实验验证到分析手段，实现全方位覆盖，明确近期和中长期的应用目标分别为低价值部件（技术风险和外形复杂度低）及高价值部件（飞行关键结构），同时聚焦于追踪增材制造技术行业和适航认证规章方法的发展变化，对相应发展在增材制造技术发展路线上进行及时响应。在国内旋翼飞行器产业发展层级，联合增材制造技术相关研发单位，将增材制造技术材料供应商和设备分销商集成至国内旋翼飞行器产业现有供应链，并实现增材制造技术生产流程与国内旋翼飞行器主机厂所现有生产体系的相容集成。构建以 DFAM 技术培训为代表的设计和工程人员增材制造技术培训体系，形成国内旋翼飞行器结构增材制造技术应用发展的知识传递工程网络。

在工程应用实施维度，研究内容包括增材制造设计技术及其规范的开发，高性能增材制造原材料及新型制备工艺的研发与鉴定，增材制造过程诸多变量 ISM 监测及工艺参数智能调控，增材制造结构件高质量后处理工艺，增材制造结构实验验证技术、增材制

表3 国内旋翼飞行器结构增材制造技术应用发展路线建议

Table 3 Development route suggestions on AM technologies applicated in domestic rotorcraft structure

Dimension	Short term	Medium and long term
Industrial organization and development	Establish a professional team for AM technology R&D Centralized management of AM database Apply for national projects Track the development of AM technology industry Track the regulations and methods for airworthiness certification of AM technology Guarantee continuous R&D investment Specify that the application target is low-value parts Establish an AM technology training system such as DFAM Establish supply chain such as suppliers/vendors network Establish close cooperation with airworthiness authorities and AM technical superior units Integrated AM process flow compatible with existing production system	Build certification plan Establish a network security plan Purchase of AM machine and equipment Construction of intellectual property/patent work plan for AM technology Expand the application target to high-value parts Planning the future supply chain
Implementation of engineering application	Development of material qualification documents/templates Collect/create data Plan sample level test matrix Build AM structural design/topology optimization specifications Establish quantitative criteria for compliance analysis of application parts Create AM process flow Test verification of secondary load-bearing structural parts Screen material/equipment suppliers	Develop quality inspection schemes/tools Formulate the application technical scheme for main load-bearing structure components Establish design allowable value R&D of new materials, processes and equipment

造技术应用标准体系构建及增材制造结构件普适性高效适航认证等，并在此基础上形成次承力结构件应用的工程最佳案例，坚持旋翼飞行器结构增材制造技术研制应用一体化理念，按照“积木式”验证思路，打通设计、分析、材料、工艺、质量监测及验证/认证等增材制造技术应用全链路优化迭代，并最终搭建国内旋翼飞行器结构增材制造技术研发应用的技术体系。

针对表3中明确的旋翼飞行器结构增材制造技术应用的两种不同价值部件：低价值部件和高价值部件，增材制造技术工程应用总体实施路线是一致的，均由增材制造技术应用部件筛选判定、结构拓扑优化及DFAM工程设计、新材料新工艺新设备研发、结构件增材制造和后处理等工艺研发活动、工艺过程ISM监测及无损监测等质量保证和实验验证/认证等具体工程应用活动构成，具体如图8所示。

为确保图8中明确的里程碑节点，如材料/工艺/供应商选定等能够快速实现，首先应构建基于结构轻量化设计、成本降低效益、交货周期缩短及DFAM适用性等方面的旋翼飞行器结构件增材制造技术应用的量化评估准则，针对确定的增材制造技术应用的旋翼飞行器结构件，联合国内增材制造技术工业界，通过联合申报国家项目等手段，争取政府和军方等相关资源支持，聚焦于突破如下技术瓶颈：开发覆盖增材制造完整价值链及总体系统发展的面向制造和装配的设计（DFAM）工具软件；研制基于集成计算材料工程（ICME）方法的旋翼飞行器结构增材制造材料和工艺的定制化研发技术，以及CSP®后处理工艺，以大幅提升增材制造结构件的性能；发展多传感器数据源融合技术、自主核心算法和控制率，以及与之相匹配的软硬件系统，实现增材制造结构件质量一致性的工艺过程实时监测和参数智能控制；开发基于可视化数字孪生（DT）的旋翼飞行器结构增材制造应用普适性高效认证技术，以缩短结构应用验证的经费和时间成本。

5 结束语

为有效实现国内旋翼飞行器结构增材制造制件高性能制备的工程应用目标，大幅缩短旋翼飞行器结构增材制造技术从设计到应用的验证认证周期，发挥

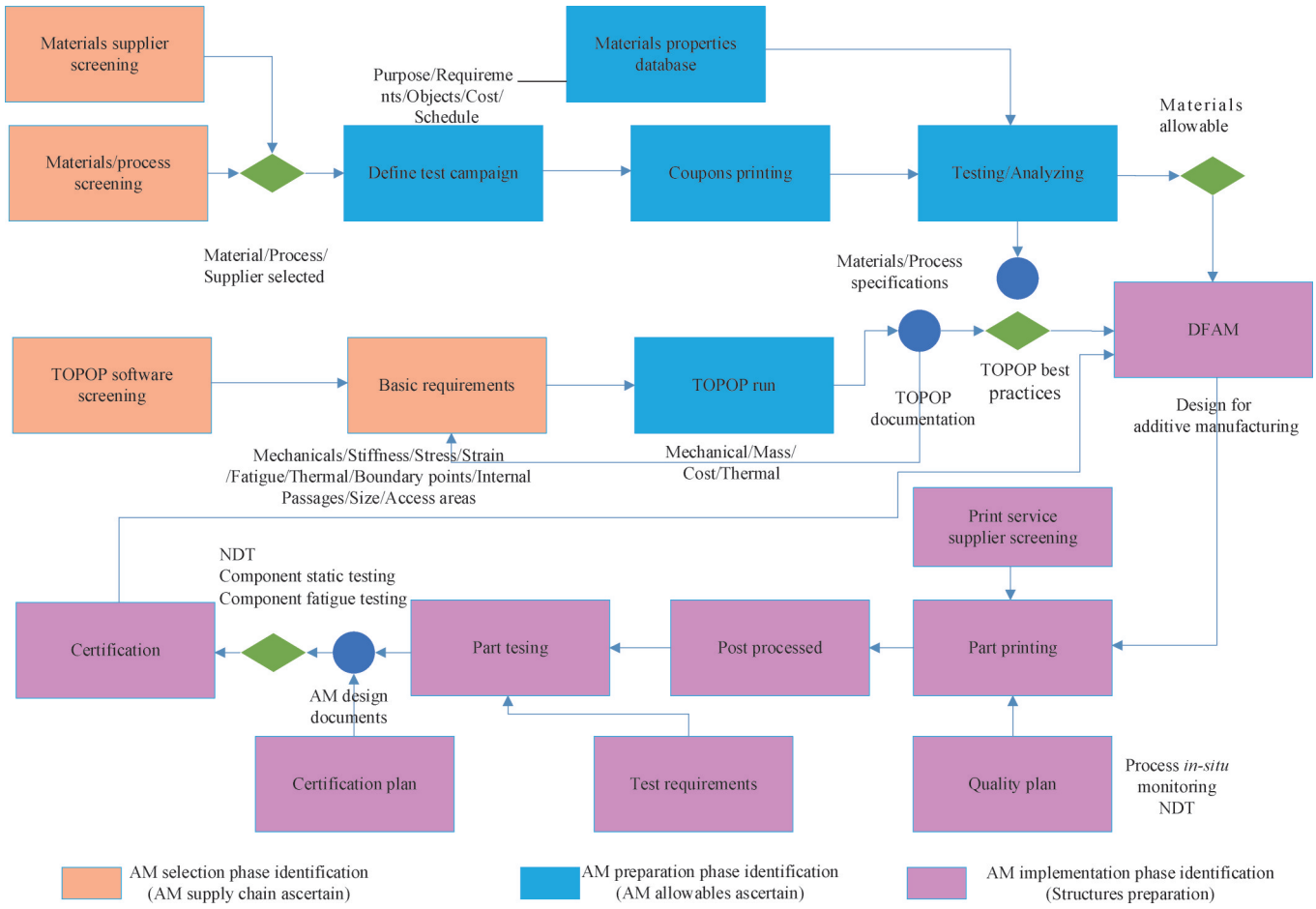


图 8　国内旋翼飞行器结构增材制造技术工程应用总体实施路线建议

Fig.8　Overall implementation roadmap suggestions on engineering applications of AM technologies in domestic rotorcraft structures

增材制造技术高效制备的全部优势，本文总结了欧美旋翼飞行器研发单位的成功经验并结合国内旋翼飞行器研发单位的产业布局现状，对国内旋翼飞行器结构件增材制造技术研制应用领域的发展提出如下建议：

（1）围绕旋翼飞行器结构增材制造技术工程应用从原材料、设计、制备、分析、成本到实验的型号研制地图，构建国内旋翼飞行器主机厂所增材制造技术研发与应用的多专业协同团队，联合国内相关优势单位建立覆盖旋翼飞行器结构增材制造应用的全产业链生态系统，涵盖从原材料、设备、实验验证到分析手段的各个环节，实现旋翼飞行器结构增材制造技术应用在制度、人力、经费及技术等方面的全面资源保障。

（2）建立基于军用效益优先兼顾商业成功的多目标权衡优化的旋翼飞行器结构件增材制造技术应用的自动化量化分析判定软件工具，发展基于结构轻量化设计效益、成本降低、交货周期缩短及 DFAM 适用性等方面的旋翼飞行器结构件增材制造技术应用的客观数值评分系统，并基于不断积累的增材制造技术应用案例，实现上述不同数值评分部分权重系数的客观合理性。

（3）加大对 DFAM 工具和技术的研发投入，面向整个增材制造价值链，以增材制造生态系统总体思维方式发展 DFAM 工具，并结合隐式函数、计算与知识工程等新型计算机理，研发计算成本可接受的国内自主保障的增材制造准备和增材制造仿真软件，实现增材制造技术工作流的全数字链。同时 DFAM 工具软件的研发必须考虑在现有旋翼飞行器研发单位已有的工程生产系统平台上的部署安装，以及进行数据等信息交换的可行性。

（4）大力发展以镁合金 LPBF 工艺为代表的轻质合金增材制造技术、以 CCFRTP 增材制造为代表的连续纤维增强聚合物复合材料增材制造技术及大尺寸增材制造部件制备技术，拓展增材制造材料和工艺选用范围、实现增材制造多功能结构应用并降低增材制造部件全生命周期成本，探索基于模型的系统工程（model based system engineering，MBSE）需求驱动和基于 ICME® 方法技术推动的旋翼飞行器结构增材制造材料和工艺的定制化研发应用，实现材料研制生产侧和应用需求侧合理有序衔接和协同发展。

(5)尽速研发增材制造过程ISM及参数智能控制技术。一方面,为克服单一传感器难以满足检测参数众多引发的复杂化和多元化需求,发展多传感器数据源融合技术,并针对具体应用场景定制化研究专用检测方法和制定技术标准;另一方面,从工艺参数偏离到监测数据特征值异常到缺陷类型状态等数据之间的映射关联需要海量的大数据分析能力,研发自主核心算法和控制率及与算法和控制率相匹配的软件硬件系统将是工艺参数智能调控技术实现的重要突破点。从上述两个方面开展研究,以期构建旋翼飞行器结构增材制造技术应用所需的实时质量监测及工艺参数智能调控系统。

(6)加大对增材制造结构件高质量后处理工艺的应用研究,以及相关设备的技术改造和研发投入。发展专门用于降低或消除缺陷的后处理工艺技术和标准体系,如可降低金属材料增材制造制件表面粗糙度和可将拉伸残余应力转为压缩应力的CSP®工艺及减少CFRTP增材制造制件孔隙和提升CFRTP增材制造制件界面胶接强度的联合工艺技术,以确保制件表面完整性、内部低孔隙和无不良胶接及高疲劳力学性能,同时应重点投入增材制造制件后处理工艺的自动化研究,通过ML或DL等技术及仿真工具实现后处理工艺生产效率的提升,有效确保增材制造的快速交付周期优势。

(7)加快构建由旋翼飞行器研发单位、增材制造技术研发单位、高校、科研院所及以适航当局、军事装备质量管理部门等为代表的航空飞行器结构适航性认证单位组成的科研创新协同团队,创建开放式共享材料性能数据库,发展基于ICME的多尺度多物理场性能分析预测工具,构建增材制造全流程的MPSPPL映射关系,形成增材制造结构件可视化DT驱动的全新认证模式,最终实现增材制造结构件“制备即已认证”的技术愿景。

参考文献

[1] ALEKSANDER B, RANDOSLAW W, TOMAS G, et al. Process of implementation and certification of the first parts manufactured in selective laser sintering technology on the example of PZL Mielec: a Lockheed Martin Company[C]// Vertical Flight Society's 79th Annual Forum & Technology Display. West Palm Beach, FL:AFTD, 2023:1-5.

[2] VANEKER T. Material extrusion of continuous fiber reinforced plastics using commingled yarn[J]. Procedia CIRP, 2017, 66: 317-322.

[3] ALOGLA A A, ALZAHRANI A, ALGHAMDI A. The role of additive manufacturing in reducing demand volatility in aerospace: a conceptual framework[J]. Aerospace, 2023, 10(4): 381.

[4] PRATAP A, SARDANA N, UTOMO S, et al. A synergic approach of deep learning towards digital additive manufacturing: a review[J]. Algorithms, 2022, 15(12): 466.

[5] CHEN L, YAO X, TAN C, et al. *In-situ* crack and keyhole pore detection in laser directed energy deposition through acoustic signal and deep learning[J]. Additive Manufacturing, 2023, 69: 103547.

[6] 王明志, 胡嘉南, 辛社伟, 等. 电子束熔丝增材制造Ti-6Al-4V钛合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(10): 912-923.
WANG M Z, HU J N, XIN S W, et al. Research progress in wire-feed electron beam additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy [J]. Materials China, 2024, 43(10): 912-923.

[7] BALAJI D, RANGA J, BHUVANESWARI V, et al. Additive manufacturing for aerospace from inception to certification[J]. Journal of Nanomaterials, 2022, 2022: 7226852.

[8] SCIENCE S, JALALAHMADI B, APL J H U, et al. In-process defect monitoring and correction in additive manufacturing of aluminum alloys[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 75th Annual Forum. The Vertical Flight Society, 2019: 1-14.

[9] BARI K, BOLLENBACH L. Spiderweb cellular structures manufactured *via* additive layer manufacturing for aerospace application [J]. Journal of Composites Science, 2022, 6(5): 133.

[10] WANG L D, MOSHER R, DUETT P. Additive manufacturing in the aerospace industry[J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2024, 17(3): 116-125.

[11] KAREN T. Ferrium® steels and other high performance materials for next generation rotorcraft transmissions and applications [C]// Presented at 45th European Rotorcraft Forum: Warsaw, Poland: ERF, 2019.

[12] JIMENEZ G, JUAN M. Disruptive and efficient rear fuselage for dual use high speed rotorcrafts[C]//Aerospace Europe Conference. Lausanne, Switzerland: 10th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS) and the 9th conference of the Council of European Aerospace Societies (CEAS), 2023.

[13] BLACHOWICZ T, EHRMANN G, EHRMANN A. Metal additive manufacturing for satellites and rockets[J]. Applied Sciences, 2021, 11(24): 12036.

[14] JOHN M, JOHN E B. Scalmalloy is too expensive and design optimization only makes sense in aerospace- true or false [J]. Metal Additive Manufacturing, 2019: 5(1): 127-135.

[15] CHEN Z, HAN C J, GAO M, et al. A review on qualification and certification for metal additive manufacturing [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2022, 17(2): 382-405.

[16] RÜMMLER C, NEUMANN G R H, GROH W, et al. Study of the influence of additive manufacturing applicable surface treatment methods on mechanical part properties for use in aerospace applications [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2024, 15(2): 481-495.

[17] LIMBASIYA N, JAIN A, SONI H, et al. A comprehensive review on the effect of process parameters and post-process treatments on microstructure and mechanical properties of selective laser melting of AlSi10Mg[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 1141-1176.

[18] NEUMANN G, SCHWARZ H, GROH W, et al. A data-based

certification approach for additively manufactured metal aircraft components[J].Progress in Additive Manufacturing,2025,10(6):4061-4071.

[19] TAMER S. The certification steps for the additively manufactured aviation-grade parts[J]. The European Journal of Research and Development, 2022, 2(4):33-42.

[20] TAYLOR R M, MANZO J, FLANSBURG L. Certification strategy for additively manufactured structural fittings[C]// Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium . Austin, Texas :ISFFS, 2016:89745.

[21] SARACYAKUPOGLU T. The qualification of the additively manufactured parts in the aviation industry[J].American Journal of Aerospace Engineering,2019,6(1):1.

[22] T REIHER, KOCH R. Product Optimization with and for Additive Manufacturing[C]// 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas : ISFFS, 2016, 179:2236-2249.

[23] KRUSE A, T REIHER, KOCH R. Integrating AM into existing companies selection of existing parts for increase of acceptance [C]// 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, Texas :2017,28:2575-2584.

[24] CHIU B W. Additive manufacturing applications and implementation in aerospace[D]. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 2020.

[25] SILLER N, WERNER S, MOLINA V, et al. Method for potential assessment and adaptation for additive manufacturing of conventionally manufactured components[J]. Research in Engineering Design, 2024, 35(1): 73-96.

[26] MARSDEN C, FEWS R, OLDROYD P, et al. Design for manufacturing-one-piece, fibre-placed composite helicopter tailboom[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2011, 26: 012016.

[27] CARTER R H, SEKER D P, STORCK S M, et al. Computational engineering and design tools for additive manufacturing[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest,2023, 36(4):422-430.

[28] VANEKER T, BERNARD A, MORONI G, et al. Design for additive manufacturing: framework and methodology[J]. CIRP Annals, 2020, 69(2): 578-599.

[29] 王向明 . 飞机新概念结构设计与工程应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4): 1-7.
WANG X M. New concept structure design and engineering application of aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(4): 1-7.

[30] 王利山,胡靖宇,刘书田 . 考虑表面层厚度和载荷不确定性的结构稳健性拓扑优化方法[J/OL]. 应用力学学报 . https://link.cnki.net/urlid/61.1112.O3.20240412.1412.006.
WANG L S, HU J Y, LIU S T. A robust topology optimization method considering surface layer thickness and load uncertainty[J/OL]. Chinese Journal of Applied Mechanics. https://link.cnki.net/urlid/61.1112.O3.20240412.1412.006.

[31] 李帅, 张永存, 刘书田 . 考虑瞬态温度和应力约束的承载隔热多功能结构拓扑优化[J]. 力学学报, 2023, 55(6): 1288-1307.
LI S, ZHANG Y C, LIU S T. Topology optimization method for integrated thermal protection structure considering transient temperature and stress constraints[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(6): 1288-1307.

[32] 邓锦涛, 吴一, 高振洋, 等 . 晶格结构可打印性研究现状[J]. 铸造技术, 2024, 45(9): 822-837.
DENG J T, WU Y, GAO Z Y, et al. Research status of lattice structure printability[J]. Foundry Technology, 2024, 45(9): 822-837.

[33] 雷鹏福 . 点阵结构的航空构件轻量化设计及优化技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
LEI P F. Research on lightweight design and optimization technology of aeronautical components with lattice structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

[34] RAJAT K, HARRSH K D, SATISH P L, et al. A review of advancements in standardization for additive manufacturing[J]. Materials Today: Proceedings.2022, (50):1983-1990.

[35] RUSSELL R, PARK A, WELLS D, et al. NASA's certification and qualification strategies for additively manufactured hardware[C]//4th International Conference on Generation Ⅳ and Small Reactors (G4SR-4). Toronto:G4SR,2022.

[36] LLC Q I, GRABOWSKI J, KOZMEL T. New high-performance materials tailored specifically for additive manufacturing processes[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 74th Annual Forum. Phoenix: The Vertical Flight Society, 2018: 1-5.

[37] CHAVEZ A, BAKER T, FETTY J. Future advanced rotorcraft drive system (FARDS) full scale gearbox demonstration[C]// American Helicopter Society 73rd Annual Forum Proceedings. Fort Worth, Texas :2017: 2325-2335.

[38] SMIT M J, Montero S. Development of Magnesium Laser Powder Bed Fusion to manufacture light-weight components for vertical lift applications[R]. NLR-TP-2021-313. Netherlands Aerospace Centre.

[39] 刘小龙, 王文宇, 赵阳, 等 . 增材制造连续纤维增强树脂基复合材料研究进展[J]. 中国表面工程, 2025, 38(3): 1-18.
LIU X L, WANG W Y, ZHAO Y, et al. Advances in additive manufacturing of continuous fiber-reinforced resin-based composites[J]. China Surface Engineering, 2025, 38(3): 1-18.

[40] 葛增如, 刘建光, 彭俊阳, 等 . 连续纤维增强热塑性复合材料增材制造现状及应用前瞻[J]. 航空制造技术, 2024, 67(20): 148-161.
GE Z R, LIU J G, PENG J Y, et al. Current situation and application prospect of additive manufacturing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(20): 148-161.

[41] COMPANY S A L M, DUNN E. Additively manufactured composite ply placement templates[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 74th Annual Forum. Phoenix: The Vertical Flight Society, 2018: 1-5.

[42] JOHN T, RACHAEL A, ROYAL L, et al. Qualification of additively manufactured material extrusion thermoplastic and lessons learned[R]. DOT/FAA/TC-24/17. Wichita state university. 2024

[43] BOB K,NATHAN S.Development and application of continuous fiber 3D printing process for aerospace[C]//SAMPE neXus 2021.

NA SAMPE, DOI:10.33599/nasampe/s.21.0598.
[44] KHAN N, ACANFORA V, RICCIO A. Non-conventional wing structure design with lattice infilled through design for additive manufacturing[J]. Materials, 2024, 17(7): 1470.
[45] TRAXEL K D, BANDYOPADHYAY A. Designing high-temperature oxidation-resistant titanium matrix composites *via* directed energy deposition-based additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2021, 212: 110205.
[46] WANG F F, FATHIZADAN S, JU F, et al. Print surface thermal modeling and layer time control for large-scale additive manufacturing[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 18(1): 244-254.
[47] 颜江涛,郑雪鹏,石张平,等.金属增材制造检测技术与质量控制研究进展[J].无损检测,2024,46(9):90-100.
YAN J T, ZHENG X P, SHI Z P, et al. Research progress on detection technologies and quality control for metal additive manufacturing[J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(9): 90-100.
[48] 杨平华, 高祥熙, 梁菁, 等. 金属增材制造技术发展动向及无损检测研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 13-21.
YANG P H, GAO X X, LIANG J, et al. Development tread and NDT progress of metal additive manufacture technique[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 13-21.
[49] CHEN Y, JIANG L, PENG Y, et al. Ultra-fast laser ultrasonic imaging method for online inspection of metal additive manufacturing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 160: 107244.
[50] PANDIYAN V, MASINELLI G, CLAIRE N, et al. Deep learning-based monitoring of laser powder bed fusion process on variable time-scales using heterogeneous sensing and *operando* X-ray radiography guidance[J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103007.
[51] LI J, ZHANG X, ZHOU Q, et al. A feature-level multi-sensor fusion approach for *in situ* quality monitoring of selective laser melting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84: 913-926.
[52] OSAZEE E, KATAYOON T, EHSAN T. Optical tomography and machine learning for in-situ defects detection in laser powder bed fusion: a self-organizing map and U-Net based approach[J]. Additive Manufacturing. 2023, 78: 103894.
[53] PELLEGRINO J, MAKILA T, McQUEEN S, et al. Measurement science roadmap for polymer-based additive manufacturing [R]. NIST Advanced Manufacturing Series100-5.
[54] ASHEBIR D A, HENDLMEIER A, DUNN M, et al. Detecting multi-scale defects in material extrusion additive manufacturing of fiber-reinforced thermoplastic composites: a review of challenges and advanced non-destructive testing techniques[J]. Polymers, 2024, 16(21): 2986.
[55] FENG S, CHEN Z, BIRCHER B, et al. Predicting laser powder bed fusion defects through in-process monitoring data and machine learning[J]. Materials & Design, 2022, 222: 111115.
[56] GULISANO V, PAPATRIANTAFILOU M, CHEN Z, et al. Towards data-driven additive manufacturing processes[C]//Proceedings of the 23rd International Middleware Conference Industrial Track. Quebec City, Canada: ACM, 2022: 43-49.
[57] RAZA A, SCHWERZ C, PAUZON C, et al. Effect of layer thickness on spatters oxidation of Hastelloy X alloy during powder bed fusion-laser beam processing [J]. Powder Technology, 2023, 422: 118461.
[58] SCHWERZ C, NYBORG L. Linking *in situ* melt pool monitoring to melt pool size distributions and internal flaws in laser powder bed fusion[J]. Metals, 2021, 11(11): 1856.
[59] CLAUDIA S. *In-situ* monitoring of laser powder bed fusion applied to defect detection[D]. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 2023.
[60] LE ROUX L, LIU C, JI Z, et al. Automatised quality assessment in additive layer manufacturing using layer-by-layer surface measurements and deep learning[J]. Procedia CIRP, 2021, 99: 342-347.
[61] LIU C, LE ROUX L, JI Z, et al. Machine learning-enabled feedback loops for metal powder bed fusion additive manufacturing [J]. Procedia Computer Science, 2020, 176: 2586-2595.
[62] KLAMERT V, SCHIEFERMAIR L, BUBLIN M, et al. *In situ* analysis of curling defects in powder bed fusion of polyamide by simultaneous application of laser profilometry and thermal imaging[J]. Applied Sciences, 2023, 13(12): 7179.
[63] LU L, HOU J, YUAN S, et al. Deep learning-assisted real-time defect detection and closed-loop adjustment for additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 79: 102431.
[64] 谌广昌, 吴明忠, 陈普会. 高性能复合材料在直升机结构上的应用展望[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12): 83-90.
CHEN G C, WU M Z, CHEN P H. Application predication of higher-performance composites in rotorcraft structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(12): 83-90.
[65] RIEMER A, LEUDERS S, THÖNE M, et al. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 120: 15-25.
[66] KIM M S, OH W J, BAEK G Y, et al. Ultrasonic nanocrystal surface modification of high-speed tool steel (AISI M4) layered *via* direct energy deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116420.
[67] MOLAEI R, FATEMI A, PHAN N. Significance of hot isostatic pressing (HIP) on multiaxial deformation and fatigue behaviors of additive manufactured Ti-6Al-4V including build orientation and surface roughness effects[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 117: 352-370.
[68] LU J, LU H, XU X, et al. High-performance integrated additive manufacturing with laser shock peening-induced microstructural evolution and improvement in mechanical properties of Ti6Al4V alloy components[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 148: 103475.
[69] ROSA B, MOGNOL P, HASCOËT J Y. Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces[J]. Journal of Laser Applications, 2015, 27(Suppl 2): 29102.
[70] TYAGI P, GOULET T, RISO C, et al. Reducing the rough-

ness of internal surface of an additive manufacturing produced 316 steel component by chempolishing and electropolishing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 32-38.

[71] SOYAMA H, SANDERS D. Use of an abrasive water cavitating jet and peening process to improve the fatigue strength of titanium alloy 6Al-4V manufactured by the electron beam powder bed melting (EBPB) additive manufacturing method [J]. JOM, 2019, 71(12): 4311-4318.

[72] SYRLYBAYEV D, SEISEKULOVA A, TALAMONA D, et al. The post-processing of additive manufactured polymeric and metallic parts[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2022, 6(5): 116.

[73] BOSCHETTO A, BOTTINI L, VENIALI F. Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 41: 92-101.

[74] MALI H S, PRAJWAL B, GUPTA D, et al. Abrasive flow finishing of FDM printed parts using a sustainable media[J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24(3): 593-606.

[75] BRAUN K, WILLENBORG E, SCHLEIFENBAUM J H. Laser polishing as a new post process for 3D-printed polymer parts [J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 134-138.

[76] ADIL S, LAZOGLU I. A review on additive manufacturing of carbon fiber-reinforced polymers: current methods, materials, mechanical properties, applications and challenges[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(7): e53476.

[77] VAN DE WERKEN N, KOIRALA P, GHORBANI J, et al. Investigating the hot isostatic pressing of an additively manufactured continuous carbon fiber reinforced PEEK composite[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101634.

[78] NASSAR A, YOUNIS M, ELZAREEF M, et al. Effects of heat-treatment on tensile behavior and dimension stability of 3D printed carbon fiber reinforced composites[J]. Polymers, 2021, 13(24): 4305.

[79] PENG X, KONG L, FUH J Y H, et al. A review of post-processing technologies in additive manufacturing[J]. Manuf Mater Process, 2021, 5(2): 38.

[80] ROACH R A, BISHOP J E, JOHNSON K, et al. Using additive manufacturing as a pathway to change the qualification paradigm[R]. Sandia National Lab.SNL-NM), Albuquerque, NM: Sandia National Lab.(SNL-CA), Livermore, CA, 2018.

收稿日期:2025-05-30;**录用日期**:2025-07-01

通讯作者:谌广昌(1983—),男,正高级工程师,博士,研究方向为航空飞行器材料应用与服役机理及旋翼飞行器创新技术,联系地址:江西省景德镇市珠山区航空路6-8号602所项目管理中心(333001),E-mail:chengc004@avic.com

(本文责编:解　宏)