

航天领域金属3D打印技术发展方向与产业化建议

明宪良¹, 汤洁¹, 党耀石¹, 唐晔¹, 谭华²

1. 北京遥感设备研究所 北京 100854

2. 西北工业大学 陕西西安 710072

摘要: 首先概述了金属3D打印工艺分类与技术特点, 详细分析了导弹、火箭、空间飞行器等新一代航天装备极端轻量化、高密度集成与极高性能的发展趋势, 阐明了航天新形态结构具有的异形复杂、宏-微跨尺度、功能-结构一体化等构造特征, 明晰了金属3D打印在新形态结构精准控型-控性制造方面的技术优势。然后, 对航天领域金属3D打印技术发展与应用现状进行了分析, 当前金属3D打印技术正由零件级制造逐渐发展为系统级、整机级制造。国外发达国家已经实现了整箭、整星、火箭发动机等系统级或整机级3D打印, 然而国内还停留在零部件级打印技术研究阶段, 与国外在技术水平和工程应用方面仍然存在较大差距。最后, 基于金属3D打印技术发展与应用现状, 分别从材料、工艺技术、装备与生产线等方面提出了技术方向与产业化发展建议。

关键词: 金属3D打印; 航天装备; 新形态结构; 技术发展方向与产业化

Technology development direction and industrialization suggestions of metal 3D printing in aerospace field

MING Xianliang¹, TANG Jie¹, DANG Yaoshi¹, TANG Ye¹, TAN Hua²

Institute of Beijing Remote Sensing Device, Beijing 100854, China

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China

Abstract: This paper firstly summarizes the classification and technical characteristics of metal 3D printing process, analyzes the development trend of extreme lightweight, highly integrated and extremely high performance of the new generation of aerospace equipment such as missiles, rockets and space vehicles in detail, and clarifies the structural characteristics of the novel structure such as special-shaped complexity, macro-micro cross-scale and function-structure integration. It clarifies the technical advantages of metal 3D printing in the precision control-controlled manufacturing of new shape structures. Then, the development and engineering application status of metal 3D printing technology in aerospace field is analyzed. The current metal 3D printing technology is gradually developing from parts-level manufacturing to system-level and whole-machine level manufacturing. Developed

基金项目: 国防基础科研计划项目 (JCKY2022204B005)。

通信作者: 明宪良, 博士, 高级工程师, 主要从事增材制造研究, E-mail: mingxianliang@126.com。

countries abroad have realized the whole arrow, the whole star, rocket engine and other system level or whole machine level 3D printing, but the domestic still stays in the parts-level printing technology research stage, and there is still a big gap with foreign countries in terms of technical level and engineering applications. Finally, based on the development and application status of metal 3D printing technology, this paper puts forward technical direction and industrialization development suggestions from the aspects of materials, process technology, equipment and production line.

Keywords: metal 3D printing technology; aerospace equipment; the novel structure; technology development direction and industrialization

1 序言

3D打印作为先进制造技术发展方向之一,其本质是数字化控制的增材制造技术。该技术融合了机械、材料科学、计算机技术、控制理论、光电技术及信息技术,其核心是通过精准调控逐层能量与材料输入,达到精确控制激光与材料相互作用过程,实现从离散元素到三维实体的累积构建,直接将数字化三维模型制造出实体零件,并可以精准控制产品构型与性能^[1, 2]。3D打印的显著优势在于能够快速制造异形复杂结构,涉及金属、非金属、复合材料等^[3, 4],与传统加工技术相比,3D打印具有短流程、高柔性、高材料利用率、低加工余量等特点,是一种兼顾成本、质量、效率的控形-控性精确控制的制造技术^[5]。

金属3D打印技术主要包括激光选区熔化成形(Selective Laser Melting, SLM)技术、激光熔化沉积(Laser Melting Deposition, LMD)技术、电子束选区熔化(Electron Beam Selective Melting, EBSM)技术和电弧增材制造(Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM)技术等^[6]。与传统减材、等材制造技术相比,金属3D打印具有轻量化、异形复杂零件快速近净成形的技术优势,目前该技术已在航天航空等高端装备制造领域实现广泛应用^[7, 8]。

本文将分析金属3D打印细分方向的技术特点,总结新一代航天装备形态演变规律,从而阐明金属3D打印在新形态航天装备制造方面的技术优势,通过梳理当前金属3D打印技术在航天领域的应用现状,给出未来金属3D打印在航天领域的技术方向与产业化发展建议,以加速航天重大装备的升级换代,同时助推我国先进制造能力的提升。

2 金属3D打印技术特点与制造优势分析

2.1 金属3D打印技术分类与工艺特点

(1) 激光选区熔化成形技术 激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术具备三维材料组分与构型精准可控制造的技术特点,是实现大型复杂、宏-微跨尺度等新形态结构精确制造的理想途径。与传统加工技术相比,其可实现高精度、高复杂度构件的直接制造,被认为是最具潜力的金属3D打印技术之一。目前,激光选区熔化技术已被广泛用于航天航空领域大型复杂、跨尺度超轻量化构件的高性能制造,SLM制造原理如图1所示^[9]。

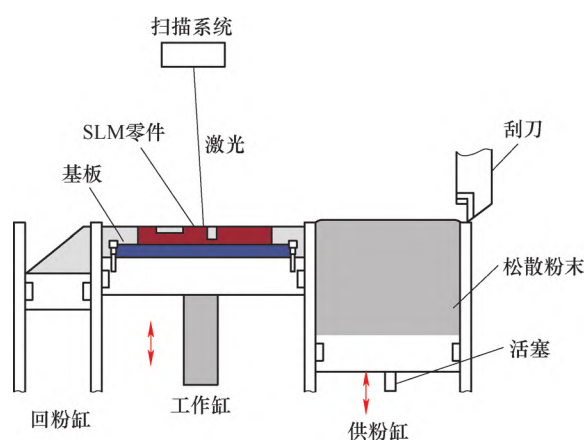


图1 SLM制造过程原理^[9]

(2) 激光熔化沉积技术 激光熔化沉积(Laser Melting Deposition, LMD)技术以高能激光作为热源,按照预定扫描策略,将同步送进的粉末或丝材逐层熔化沉积,实现金属零件的直接制造,其原理如图2所示^[10]。激光熔化沉积技术具有材料逐点、逐线、逐层堆积工艺特点,可实现大尺寸构件的高效率近净成形,与激光选区熔化成形技术相比,成形尺寸大、效率高,但在成形精度、构件复杂度方面

存在一定局限。

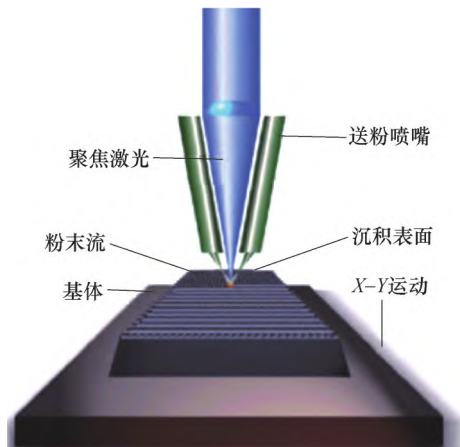


图2 LMD成形技术原理^[10]

(3) 电子束选区熔化技术 电子束选区熔化 (Electron Beam Selective Melting, EBSM) 技术以电子束为加工热源，按照金属零件切片轮廓对粉末进行逐层熔化凝固，最终形成完整的零件，其成形技术原理如图3所示^[11]。该技术具有能量利用率高、功率密度高、成形效率高、真空无污染及低应力等优点，特别适合难熔合金、脆性金属间化合物的直接成形，目前可制备复杂 Ti-6Al-4V零件、Ti-Al零件，在航天航空、汽车、模具等领域具有广阔的应用前景。

(4) 电弧增材制造技术 电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) 技术以电弧为加工热源，通过熔化丝材，并使其按照所规定的分层加工路径进行堆积，形成所需的大尺寸复杂零件，其成形原理如图4所示^[12]。WAAM 技术一般

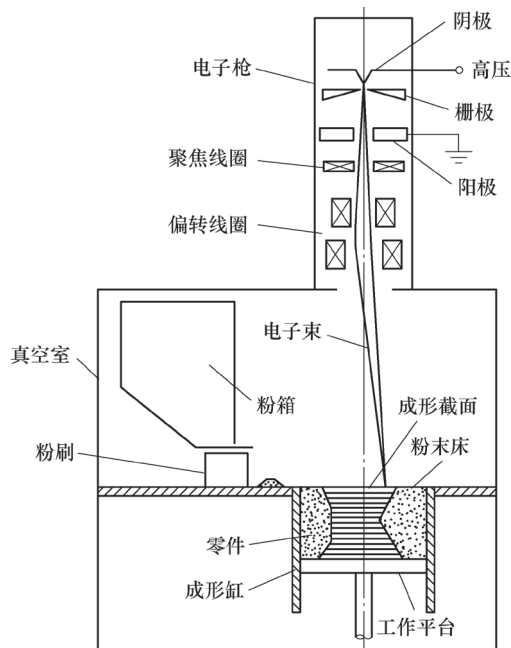


图3 EBSM成形技术原理^[11]

以高温合金、钛合金等金属丝材为原料，适用于大尺寸复杂构件低成本、高效快速近净成形^[13]，与激光、电子束增材制造技术相比，WAAM的成形尺寸大、材料利用率高、成形效率高，但存在成形精度和表面形貌较差、成形件微观组织粗大、二次机械加工等问题。因此，该技术是与激光、电子束增材制造技术优势互补的一种3D打印成形技术。

2.2 航天装备发展对制造技术提出的巨大挑战

(1) 航天装备技术发展趋势与形态演变 本节主要探讨金属3D打印技术对于航天装备性能或功能提升的显著支撑作用，首先对航天装备的发展趋势

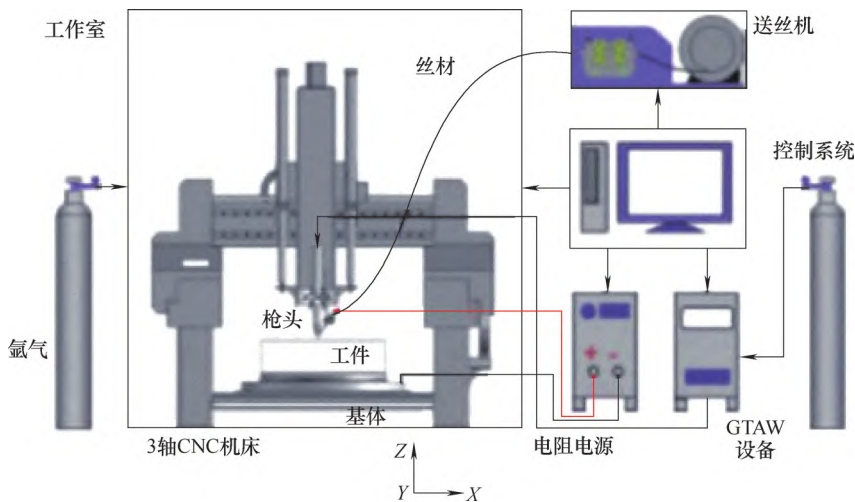


图4 WAAM成形技术原理^[12]

进行描述，牵引出对金属3D打印技术的发展需求。目前，新一代航天装备如导弹、空间飞行器、运载火箭等，总体发展趋势主要表现为超轻量化、复杂服役环境、高度集成化以及极高性能。超轻量化主要是为了满足长飞行距离、超远射程、高机动性，以及更大运载能力等需求，带来结构重量在装备中的占比越来越低，以导弹、空间飞行器为例，当前结构重量占比已经小于10%，这导致结构需要进行超轻量化设计，以实现结构减重超过50%。复杂服役环境主要是指极端力、热环境，导弹、运载火箭等跨域飞行航天装备，由于飞行速度越来越高、机动性越来越强，导致振动、冲击、过载及气动热等服役环境越来越苛刻。高度集成化主要体现为构型简单且功能密度极高，在空间、重量等资源的约束下，必须采用功能-结构一体化的设计方法，将力、热、电、磁、光、感知及控制等多学科功能进行高度集成化，最终装备或系统表现为构型极致简约、功能极度复杂，以SpaceX 第三代猛禽发动机为例，其形态演变过程如图5所示。极高性能在导弹装备上主要体现在打击精度、感知距离的数量级提升，在空间飞行器方面主要体现在更远距离、高马赫飞行、探测精度的提升等。运载火箭的性能主要是指运载能力、入轨精度、推力和比冲等，随着国家载人航天、行星探测任务要求越来越高，对于运载火箭的性能也提出了更高要求。

新一代航天装备超轻量化、复杂服役环境、高度集成化以及极高性能的发展趋势对于装备结构研制提出了巨大挑战，通过上面对于发展趋势的分析，可以梳理出在新形态装备研制过程主要存在结构轻量化与高度集成化、极高性能与复杂服役环境

等两对关键矛盾难题。传统航天结构构型简单、尺度单一，功能或性能提升存在一定局限性，已无法满足新一代航天装备的发展要求。因此，为解决以上难题，当前在新一代航天装备结构研制过程中大量采用了拓扑优化、力/热特性点阵微元、整体化的全新设计方法，促进新形态结构表现出异形复杂、宏-微跨尺度、功能-结构一体化等特征，如图6所示。

(2) 3D打印技术在新形态航天装备制造的优势分析 通过以上分析可知，为满足新一代航天装备的极端性能要求，解决结构轻量化与多功能集成、复杂服役环境与极高性能之间的矛盾难题，新形态结构采用全新的设计方法，具有异形复杂、宏-微跨尺度、整体化的典型结构特征。然而，这种新形态结构却给制造技术带来了很大困难，若采用传统的减材或等材技术手段进行制造，会造成制造难度、成本大幅提升以及效率、质量大幅下降的问题。为此，必须寻找一种可实现结构微元精确控形-控性的新制造手段，通过一次直接成形，大幅降低制造难度和成本，同时提升质量与效率。

金属3D打印技术基于数学微分-积分的独特成形原理，通过数字化手段，可进行“点、线、面、体”积分成形，从而达到对于结构微元精准可控制造的目标，是制造异形复杂、多尺度、整体化等新形态结构的理想技术途径。通过发展以上描述的多种金属3D打印技术，开展材料、工艺、装备、检测与评价方法技术体系研究，具备新一代航天装备新形态结构研制能力，助推新一代航天装备性能大幅提升，对国家重大航天工程提供有力支撑。当前，金属3D打印凭借其制造优势逐渐实现在航空航天、

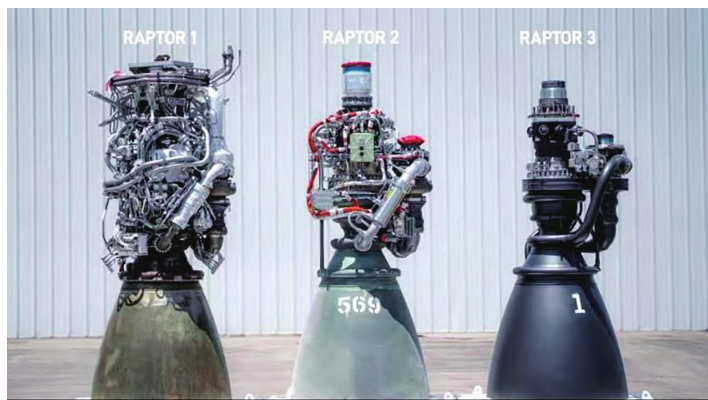


图5 猛禽发动机形态演变示意



图6 异形复杂/宏-微跨尺度/功能-结构一体化等典型结构

汽车、消费电子等领域对于传统制造技术的代替^[14, 15]，为此，后面将围绕金属3D打印技术在航天领域的工程应用情况进行介绍，揭示制约金属3D打印技术广泛应用的因素，从而带来产业化发展的相关思考和建议。

3 金属3D打印在航天领域技术发展与应用现状

随着金属3D打印技术研究的深入和成熟度提升，其在航天领域的应用范围不断扩大^[16, 17]。目前，国内外企业和科研机构利用金属3D打印制造出了导弹、火箭、卫星及空间飞行器等装备零部件，甚至是大型组件或整机产品，金属3D打印在制造成本、响应速度、性能精确控制等方面展现出的优势愈发明显，使其在航天高端装备制造领域也展现出了巨大应用前景，下面对国内外航天领域金属3D打印技术研究与应用进行简单介绍。

3.1 导弹领域

为解决狭小空间、高功率密度下的高效热管理难题，北京遥感设备研究所采用了在结构内部设计复杂随形内流道的创新设计思路，该方法兼顾了轻量化与高效控温的需求，最终利用金属3D打印实现了复杂内流道构件一体化高质量成形，为航天弹载超轻-高效控温热控功能结构研制提供了新思路，复杂内流道热控功能构件如图7所示。



图7 弹载复杂内流道高效控温构件

点阵作为一种超材料，具有密度、模量、阻尼可控设计的优势。通过将点阵超材料填充到结构体内部，一方面可实现轻量化设计，另一方面可大幅提升结构刚度与抑振功能。航天弹载领域典型代表构件为探测装置承载结构及空气舵，利用金属3D打印自由近净成形的技术优势，实现该类宏-微跨尺度构件的精准可控高性能，如图8所示。两种结构减重效果均大于30%，实现抑振、气动关键性能大幅提升，解决了型号研制难题。

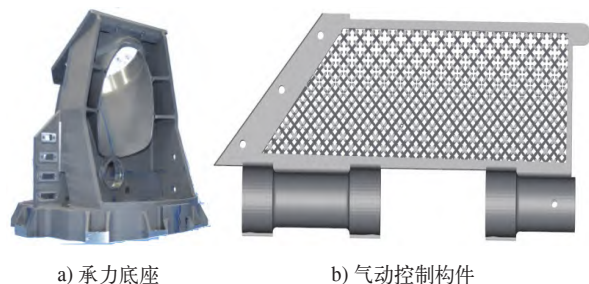


图8 弹载点阵超材料填充多尺度复杂构件

3.2 火箭领域

美国一直在引领多种3D打印技术在火箭领域的研究与应用，Relativity Space开发出了相比传统供应链之外新制造体系。2023年3月，全球首枚“全3D打印火箭”（见图9），首次向全世界展示了全3D打印的火箭可承受最恶劣的轨道发射服役环境。该公司发展了采用3D打印技术开发和制造火箭的新模式，通过大规模合并零件，可极大地简化火箭制造环节，缩短加工周期，实现火箭高效制造。通过这种模式，Relativity Space将零件数量从传统的100000个大幅减少到约1000个，最大限度地减少了潜在故障点，能够在60天内打印和组装一枚火箭，而传统火箭通常需要18个月。火箭发射成功，证明了3D打印大规模合并零件制造的安全可行性。



图9 Relativity Space人族1号全3D打印火箭

2024年8月, Space X首次展示了其第三代猛禽发动机(Raptor 3), 如图10所示。该发动机大量使用金属3D打印技术, 实现了大量零件整合、优化和轻量化。与上两代相比, Raptor 3极度简化, 通过大量集成化制造, 从根本上改变了发动机的核心架构。与Raptor 1相比, 单台重量减少555kg, 推力增加51%。在成本方面, 单台Raptor 3仅25万美元, 相比Raptor 1便宜了近90%。猛禽发动机自2016年推出以来, 不到10年时间实现三代更迭, 实现了成本的极致压缩和性能的极致提升, 这主要是3D打印技术在复杂结构制造、快速迭代制造方面的优势发挥了重要作用。



a) Raptor 1 b) Raptor 2 c) Raptor 3

图10 3D打印Raptor 发动机

国内中科宇航技术股份有限公司也开展了火箭发动机关键部组件3D打印技术研究, “玄鸢一号”发动机, 其采用先进的燃气发生器循环方式, 使用无毒无污染的液氧/煤油推进剂, 具备多次起动和大范围变工况的能力, 如图11所示。该款发动机的涡轮泵、推力室和气瓶等大量采用了3D打印技术, 大幅提升了生产效率, 降低了生产成本, 缩短了生产周期。“玄鸢一号”的成功试车, 不仅验证了3D打印技术在火箭发动机制造中的可行性, 也展示了其

在航天领域的广阔应用前景。



a) 涡轮泵

b) 推力室

图11 3D打印发动机关键部组件

3.3 空间飞行器领域

卫星重量的降低有助于提升有效载荷的比重, 提高整个航天器的机动性, 同时降低发射成本, 但传统制造工艺轻量化效果已达极限, 而3D打印技术为实现轻量化提供了全新途径。随着国内外卫星研制的深入和工程应用, 3D打印技术在实现复杂拓扑优化设计、点阵结构、一体化结构实现, 以及高附加值零件制造等方面发挥着独特优势。欧洲航天局(ESA)和瑞士SWISSTo12公司基于3D打印技术开发出了面向未来空间卫星设计的双反射面天线^[18], 如图12所示。通过采用3D打印技术进行制造, 不仅兼顾天线制造精度与成本, 还可缩短研制周期、大幅减轻零部件的重量, 并增加了天线设计的自由度, 具有优异的综合效果。

图12 卫星双反射面天线^[18]

中国空间技术研究院研制的“千乘一号”整星结构采用面向3D打印的轻量化三维点阵结构设计方法, 整星结构通过铝合金3D打印技术一体化制备。传统微小卫星结构重量占比约20%, 整星频率一般约为70Hz, “千乘一号”卫星的整体结构重量占比降低至15%以下, 整星频率提高至110Hz, 结构零部件数量缩减为5件, 研制周期缩短至1个月。3D打印全点阵整星结构如图13所示。

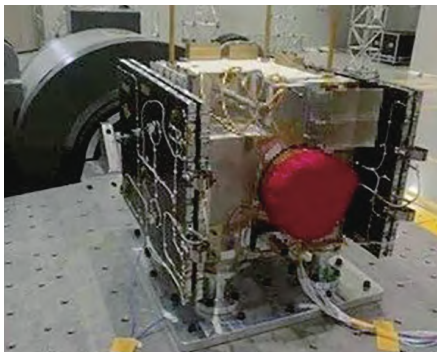


图13 3D打印全点阵整星结构

德国Fraunhofer研究所和德累斯顿工业大学合作研发了一种3D打印塞式喷管发动机，用于微型卫星发射器，有效载荷可达350kg。发动机中的燃油喷射器、燃烧室和喷管是采用粉末床激光熔化技术制造，如图14所示。这款发动机在轻量化和燃料节省方面具有明显优势，比传统发动机节省约30%的燃料，这主要得益于两个方面的原因，一方面是设计上的紧凑性，使整个发动机的重量减轻，这意味着所需的发射燃料减少和有效载荷的提高。



图14 3D打印塞式喷管

综合分析，金属3D打印技术具有复杂结构自由近净成形、拓展装备创新设计以及高效低成本高性能制造等技术优势，其带来了装备研制生产模式的革命性改变，对推动航天领域装备的升级换代起到了重要支撑作用。目前在航天领域，金属3D打印技术正由零件级制造逐渐发展为组件级、整机级制造，国外发达国家已经实现了整箭、整星、火箭发动机等系统级3D打印，然而国内目前还停留在零部件级打印技术研究阶段，与国外在技术水平和工程应用方面仍然存在较大差距。总之，金属3D打印技术在支撑装备制造方面的优势已愈加明显，故应大力发展金属3D打印材料、工艺、装备、检测与评价

等相关技术，助力我国航天技术的跨越式发展，并推动金属3D打印技术在航天领域形成产业规模，这对于推进我国制造业转型升级具有重要意义。

4 金属3D打印技术研究与产业化发展建议

当前，航天产品研制具有多品种、变批量、少批次等显著特点，采用金属3D打印技术一方面可以解决新形态高性能结构造不出、造不好的问题，另一方面在规模化生产方面可以实现降低成本、缩短研制周期、减少材料浪费。目前，我国正处于航天快速发展时期，新型导弹、火箭、卫星、空间站及深空探测器已被纳入国家战略性新兴产业进行重点扶持，因此3D打印技术将在我国航天制造领域获得巨大的发展空间。另外，当前金属3D打印技术也已经形成了一定的产业规模，产业链覆盖了核心元器件、打印设备、粉末原材料、支持配套及打印服务等环节，推动了传统产业的优化与升级^[19, 20]。为了进一步解决制约金属3D打印技术工程化应用和产业化发展的关键核心难题，支撑新一代航天重大装备的研制，加速构建完整的金属3D打印产业链，实现航天装备性能与3D打印产业的新飞跃，下面分别从材料、装备、工艺技术等方面给出金属3D打印技术研究与产业化发展建议。

4.1 材料研发

材料是决定结构功能与性能的关键因素之一，航天装备应满足轻量化、高刚度、高稳定等典型研制需求，因此材料应用以铝合金、钛合金、铝基复合材料等轻质、高强韧、高模量材料为主，同时为了实现力、热复杂服役环境下的高稳定，对低热膨胀系数、高导热/隔热、高阻尼等功能材料同样存在应用需求。但目前适用于3D打印的材料种类十分有限，需要进一步扩大材料体系，才能将3D打印技术制造优势发挥出来，以获得先进材料与先进制造综合应用的效果，最终支撑航天装备性能大幅提升。在轻质、高模量材料方面，建议发展铝锂合金、铝基碳化硅、陶瓷颗粒改性铝合金等，在高强韧材料方面，进一步发展稀土增强铝合金、7系变形铝合金、高强韧钛合金等，在轻质功能材料方面，建议发展低热膨胀合金、高阻尼合金、点阵超材料、石墨烯/金刚石导热增强铝合金、高熵合金等材料。基于性能与工艺适应性综合约束，开展上述轻质、高模

量、高强韧功能材料的设计研发,丰富金属3D打印材料体系。

4.2 工艺技术

目前,金属3D打印技术研究主要围绕在粉末床熔融、定向能量沉积,并且以材料熔化状态为主。为了满足未来航天装备超轻量化、极端高性能、极端集成化等研制需求,充分发挥金属3D打印技术的潜力,需进一步扩大金属3D打印工艺技术种类的研究范围。通过发展新场3D打印技术,如固相沉积增材,包括超声波增材、搅拌摩擦增材、冷喷涂增材等,进一步提升沉积效率,降低制造成本^[21, 22]。另外,能场辅助增材制造可以结合不同能量场的固有优势来克服增材制造技术的局限性,可以用来调整沉积材料的微观组织与力学性能、减少残余应力、改善耐疲劳性能等^[23-25],因此建议进一步发展磁场、电场、声学、机械及热场等典型能场辅助增材制造技术。为了应对微纳功能构型、电功能系统、智能化构型的制造需求,建议进一步发展精密微纳增材、喷墨打印、三维结构-电路一体化增材等技术。

4.3 装备与高柔性生产线

近几年,随着金属3D打印技术成熟度的提高和应用范围的扩大,航天领域的已有金属3D打印热控类功能结构、承载类抑振结构、发动机阀体类、气动类舵翼等产品进入批量化规模生产应用阶段,但由于新材料、新工艺等因素影响,当前在规模化生产阶段仍然存在成形效率低、成本高、周期长和批次稳定性差等问题,难以满足航天装备多品种、变批量、快速响应的研制模式。为适应航天装备多品种、变批量、少批次的研制特点,解决当前金属3D打印规模化生产过程存在的成本高、效率低、稳定性难以控制等问题,建议发展面向规模化增材制造的高柔性分布式生产线,拓展智能装备技术方向,具体可以包括规模化生产快速工艺开发、高效低成本增材制造装备、高柔性分布式智能生产网络等方向。在快速制造工艺开发方面,可以通过在线监测设备、工艺参数等多种参数量,建立参数量与成形质量之间的数据库,从而实现复杂构件的快速制造工艺开发。在装备研发方面,可以打破传统高斯激光光束的局限性,发展平顶光等新型激光模式,或利用高斯光与平顶光的快速切换,达到制造效率与

精度兼顾的效果。总之,通过发展面向规模化增材制造的高柔性分布式生产线与智能装备技术,可以进一步降低生产成本,提升效率和质量,最终通过建立工艺-装备-生产模式全流程技术体系,并形成应用示范效果,实现航天装备金属3D打印构件低成本规模化快速响应与高质量一致性制造目标。

5 结束语

本文详细介绍了金属3D打印工艺分类与技术特点,结合新一代航天装备发展规律与技术特性分析,阐明了金属3D打印技术在实现新形态航天装备研制方面精准控型-控性制造优势,并分析了当前航天领域金属3D打印技术发展与应用现状,给出了未来金属3D打印技术研究与产业化发展建议,形成结论如下。

1) 新一代航天装备表现出超轻量化、复杂服役环境、高度集成化以及极高性能的技术特性,对于装备结构研制提出了巨大挑战。为突破新形态装备结构研制过程存在的轻量化与功能高度集成化、极高性能与复杂服役环境等矛盾难题,新形态结构大量采用了拓扑优化、力/热特性点阵微元、整体化的创新设计方法,表现出了异形复杂、宏-微跨尺度、功能-结构一体化等特征。

2) 金属3D打印技术具有“点、线、面、体”积分成形的技术特点,可实现结构功能微元精准可控制造,是实现航天领域异形复杂、多尺度、整体化等新形态结构精确制造的理想技术途径。通过发展金属3D打印技术,建立材料、工艺、装备、检测与评价方法技术体系,形成新形态结构研制能力,对支撑新一代航天装备研制具有重大意义。

3) 当前航天领域金属3D打印技术正由零件级制造逐渐发展为系统级、整机级制造。国外发达国家已经实现了整箭、整星、火箭发动机等系统级或整机级3D打印,然而国内还停留在零部件级打印技术研究阶段,与国外在技术水平和工程应用方面仍然存在较大差距。

4) 基于金属3D打印技术发展与应用现状,本文分别从材料、工艺技术、装备与生产线等方面提出了技术研究方向与产业化发展建议。材料方面,建议基于性能与工艺适应性综合约束,开展轻质、高模量、高强韧功能材料的设计研发,丰富金属

3D打印材料体系。工艺技术方面,大力发展新质能场、多能场复合等3D打印技术以及精密微纳打印、3D打印喷墨、三维结构-电路一体化打印等技术。装备与生产线方面,发展面向规模化增材制造的高柔性分布式生产线,拓展智能装备技术方向,具体可以包括规模化生产快速工艺开发、高效低成本增材制造装备,以及高柔性分布式智能生产网络等方向。

参考文献:

- [1] 许世娇, 权纯逸, 杨堃, 等. 金属增材制造技术在航空领域的应用现状及前景展望[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32 (3) : 9-17.
- [2] 赵剑峰, 马智勇, 谢德巧, 等. 金属增材制造技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46 (5) : 675-683.
- [3] 赵高升, 刘秀军, 张志明, 等. 金属零件3D打印技术研究进展[J]. 化工新型材料, 2018, 46 (8) : 42-50.
- [4] 蒲以松, 王宝奇, 张连贵. 金属3D打印技术的研究[J]. 表面技术, 2018, 47 (3) : 78-84.
- [5] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47 (5) : 32-55.
- [6] 陈理燃. 金属增材制造技术在航空零部件应用与发展研究[J]. 冶金与材料, 2024, 44 (5) : 82-84.
- [7] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学:信息科学, 2015, 45 (9) : 1111-1126.
- [8] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战[J]. 中国激光, 2009, 36 (12) : 3204-3209.
- [9] 马剑雄, 夏张文, 周伟民. 金属增材制造技术的发展与展望[J]. 金属加工 (热加工), 2022 (3) : 22-27.
- [10] 杨扬, 张澳, 李瑶, 等. 金属增材制造工艺、材料及成形机理的研究与应用[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (3) : 33-45.
- [11] 李宏新, 梁啸宇, 张磊, 等. 电子束粉末床熔融技术发展综述[J]. 大型铸锻件, 2022 (5) : 19-26.
- [12] LIN Z, SONG K, YU X. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70 (3) : 24-45.
- [13] 任忠鸣, 韩东宇, 玄伟东, 等. 燃气轮机叶片制备技术研究进展[J]. 上海大学学报 (自然科学版), 2022, 28 (5) : 722-747.
- [14] LEU M C, GUO N. Additive manufacturing: technology, applications and research needs[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2013, 8 (3) : 215-243.
- [15] IVANOVA O, WILLIAMS C, CAMPBELL T. Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges[J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 19 (5) : 353-364.
- [16] 贾平, 李辉, 孙棕檀. 国外3D打印技术在航天领域的应用分析[J]. 国际太空, 2015 (4) : 31-34.
- [17] 陈济轮, 董鹏, 张昆, 等. 金属材料增材制造技术在航天领域的应用前景分析[J]. 电加工与模具, 2014 (1) : 66-69.
- [18] 谭立忠, 方芳. 3D打印技术及其在航空航天领域的应用[J]. 战术导弹技术, 2016 (4) : 1-7.
- [19] LEE J Y, AN J, CHUA C K. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials[J]. Applied Materials Today, 2017, 7 (7) : 120-133.
- [20] 郭日阳. 3D打印技术及产业前景[J]. 自动化仪表, 2015, 36 (3) : 5-8.
- [21] 王子健, 孙舒蕾, 肖寒, 等. 搅拌摩擦固相沉积增材制造研究现状[J]. 材料导报, 2024, 38 (9) : 166-181.
- [22] 沈一洲, 周泽星, 吕万程, 等. 固相搅拌摩擦沉积增材制造技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56 (1) : 1-16.
- [23] 于文泽, 刘宇珂, 王福斌, 等. 外场辅助定向能量沉积钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34 (8) : 2641-2660.
- [24] 李毅, 王振忠, 肖宇航, 等. 金属激光增材+X复合制造技术综述[J]. 航空学报, 2024, 45 (13) : 139-161.
- [25] 熊晓晨, 秦训鹏, 华林, 等. 复合式增材制造技术研究现状及发展[J]. 中国机械工程, 2022, 33 (17) : 2087-2097.

(收稿日期: 20250116)