



3D 打印技术发展趋势及其在商业航天上的应用

田彩兰 南阳瑞

(江苏深蓝航天有限公司, 北京 100176)

摘要: 3D 打印技术具有对结构件复杂程度不敏感的特点, 可实现轻量化、一体化、个性化产品的快速制造, 已从原型制造逐渐向实际应用拓展, 涉及航空航天、医疗、交通、电子等领域。由于金属 3D 打印在航空航天领域有着先天的技术优势, 在商业航天等新兴领域的应用越来越广。本文综述了 3D 打印技术在不同领域的应用现状, 重点突出在商业航天领域的应用, 展望了 3D 打印技术在商业航天上的广阔前景。

关键词: 3D 打印技术; 发展趋势; 商业航天; 火箭制造

中图分类号: V460 **文献标识码:** A

Development Trend of 3D Printing Technology and Its Application in Commercial Aerospace

Tian Cailan Nan Yangrui

(Jiangsu Shenlan Aerospace Co., Ltd., Beijing 100176)

Abstract: 3D printing technology is not sensitive to the complexity of structural parts, and can realize the rapid manufacturing of lightweight, integrated and personalized products. It has gradually expanded from prototype manufacturing to practical application, involving aerospace, medical, transportation, electronics and other fields, with a pleasing development speed. Due to the inherent technical advantages of metal 3D printing in the field of aerospace, it is increasingly widely used in the emerging field of commercial aerospace. This paper summarizes the application status of 3D printing technology in different fields, focusing on the application in the field of commercial aerospace, and prospects the broad prospects of 3D printing technology in commercial aerospace.

Key words: 3D printing technology; development trend; commercial aerospace; rocket manufacturing

1 引言

3D 打印又称增材制造, 相对于传统的减材制造和等材制造而言, 增材制造是一种自上而下材料累加的制造工艺^[1]。3D 打印技术种类多, 可按打印的材料、能量源、成形尺寸等划分。按照打印材料可以分为金属、非金属、陶瓷、复合材料、生物材料甚至生命材料; 按照能量源可以分为激光、电子束、电弧以及上述组合; 按照成形尺寸可以从微纳米元器件到 10 m 以上大型航空结构件^[2]。这些 3D 打印技术的具体实现方

式各不相同, 又有不同的特点和优势, 适用于结构、功能、材料等复杂零件的一体化制造或复合制造, 同时能降低制造的综合成本。

随着 3D 打印技术逐步发展, 关键问题、瓶颈问题不断突破, 成形零件的性能大幅提高, 其应用范围越来越广泛, 在航空航天、生物医药、轨道交通、工程建设等领域展示了广阔的应用前景。在众多领域中, 金属 3D 打印技术在航空航天领域有着先天的应用优势。由于金属 3D 打印的原材料、耗材及设备价格高, 打印成本居高不下, 而其它领域对价格非常敏感, 导

致金属 3D 打印技术的应用范围受限。航空航天领域对单个零件的价格并不敏感,而重点关注零件的重量以及整体的成本和周期。3D 打印技术有利于实现复杂构件的轻量化、一体化制造,从而减轻零件的重量,简化中间流转环节,符合航空航天领域的需求。近年来随着商业航天的迅速发展,金属 3D 打印技术被越来越多地应用于商业航天产品的制造中。以液体火箭为例,3D 打印技术已应用到诸如发动机头部喷注器、发动机推力室、贮箱、涡轮泵、功能结构一体化支架等结构复杂件、压力容器件、高速转动零件等关键零部件的生产制造^[3]。

2 3D 打印技术应用现状及发展趋势

2.1 3D 打印技术应用现状

3D 打印技术集先进制造、智能制造、绿色制造等技术于一体,以其特有的技术优势迅速发展,面向航空航天、生物医疗、轨道交通、工程建设等领域展示了广阔的应用前景。

2.1.1 航空航天领域



a 超音速飞机 XB-1 b 喷气式飞机前起落架
图 1 3D 打印技术在航空航天领域上的应用

近年来,以金属粉末为原材料、以激光为热源的 3D 打印技术已成为增材制造技术领域最热门的研究方向之一,其在航空航天领域的应用范围已从零部件级逐渐发展至整机级,且正在迈向工业化和智能化^[4]。目前在航空航天领域应用 3D 打印技术最多的是基于金属材料的 SLM 激光选区熔化、LMD 激光熔化沉积、EBM 电子束选区熔化、WAAM 电弧熔丝增材制造 4 类技术。其中 SLM 技术最为成熟,应用的范围也最广。图 1a 为美国 Boom Supersonic 公司在 2020 年底推出的一款超音速飞机 XB-1。飞机上有 21 个钛合金零部件是通过 3D 打印制造的,这些零件全部用在飞机发动机和环境控制系统中。使用 3D 打印技术大大缩短了项目进程,降低了成本。图 1b 为法国赛峰集团和 SLM Solutions 合作为商务喷气式飞机 3D 打印的前起落架组件,尺寸达 455 mm×295 mm×805 mm。据报道该

产品为世界上首次采用 SLM 技术制造大尺寸的飞机部件。传统的起落架零件由 3 个锻件组装而成,一般由 5 轴加工中心制造。采用 3D 打印技术制造,通过一体化重新设计,重量减少了大约 15%。超大尺寸飞机前起落架的成功打印制造也验证了飞机零件增材制造的可行性。

2.1.2 生物医疗领域

随着精准化、个性化医疗需求的增长,3D 打印技术逐渐被应用到医疗领域。相比传统方式,3D 打印技术具有速度更快、成本更低、生物相容性更好和炎症反应更小等显著优势^[5]。目前,生物医疗领域应用研究主要包括^[6]:人体植入物(义齿、骨骼、支架、医疗器械等)、手术导向板、生物打印(人体细胞组织器官)、药物释放等,如图 2 所示。3D 打印技术虽然促进了生物医疗领域快速发展,但是依然存在诸多挑战。除了技术层面的制约外,还可能受到道德伦理和法律层面的制约。



图 2 3D 打印技术在生物医疗领域上的应用

2.1.3 轨道交通领域

随着列车不断提速,对于车辆各部分结构与材料的要求也不断提高,急需一种自动化、高效率的制造技术来满足关键零部件的制造、修复等需求。3D 打印技术为提高轨道交通关键零部件的服役性能和服役寿命提供了一条新途径^[7]。从受损零件的激光熔覆修复,到稀缺备件的低成本快速制造,再到关键结构件的优化设计,均可使用 3D 打印技术^[8]。在轨道交通领域,法国、西班牙、荷兰等国把增材制造技术作为一种常规的生产制造手段,主要目的是加快备件的制造速度,减少库存量,避免造成列车的长时间停运。目前 3D 打印的产品有扶手、把手、折叠架、仪表板框架、风管、保护外壳和电缆桥架等,如图 3a 所示为 3D 打印仪表板框架。法国国家铁路公司(SNCF)将 3D 打印技术

整合到日常的火车维护中,运营的列车有3万多个备件,其中有10.3%的备件用3D打印制造,交付周期缩短了85%。西班牙铁路运营公司 Renfe 的维修部门整合了3D打印技术,应用制造备件。如图3b所示,马德里建立的试验中心配备了3D扫描仪和3D打印机,通过逆向工程和3D打印结合的方式制作备件,节约时间和成本。



a 仪表板框架

b 马德里试验中心

图3 3D打印技术在交通运输上的应用

2.1.4 工程建筑领域

3D打印技术在工程建筑领域也得到广泛应用,其成形主要材料为混凝土,因此也被称为3D打印混凝土。与传统建筑不同的是,3D打印技术用的材料种类更多,不仅可以使黏土、砂浆、地质聚合物等材料,还可以使用钢渣、工业垃圾、建筑垃圾等材料,实现废物再利用^[9]。在工程建筑领域,3D打印技术作为一种新兴的节能、环保、高效的建筑方式,具有自动化程度高、生产效率高、材料利用率高、可建造复杂结构件等优势,应用将会越来越广泛^[10]。

2.2 3D打印技术的发展趋势

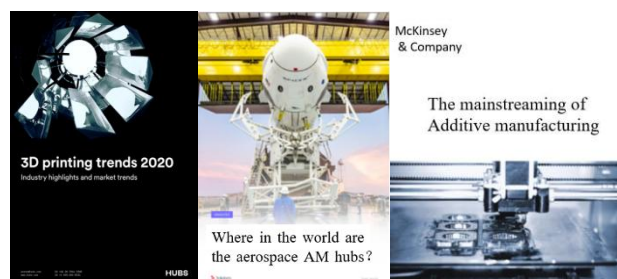
3D打印技术的应用范围与其自身的成熟度和成本有一定的相关性。随着3D打印技术日益成熟,产品的制造成本会逐年减低,市场竞争将变得更加激烈,同时应用领域也会进一步拓宽。不少国内外知名的数据分析机构都对3D打印机技术行业的发展进行了分析。

Hubs 作为世界级的网络云平台服务商,如图4a所示,2020年对3D打印行业的发展趋势分析认为,2019年是3D打印技术大力发展的一年,完成了3D打印技术从原型制造到终端制造的应用突破。与3年前

相比,从事3D打印的专职人员增长了3倍多,2019年有40%的在线3D打印产品实现了量产,其中75%的在线订单来自美国、英国和荷兰;2019年获得的投资额高达整个行业的35%。预计未来5年,3D打印的年平均增长率将达到24%。

3dpbm 是一家头部媒体公司,为增材行业提供深度观察、市场分析和B2B营销服务。2021年6月,3dpbm公司发表名为“增材助力高飞”的深度观察报告,如图4b所示,对“世界上哪里才是航空航天领域的增材中心”问题进行了分析。报告就26个来自北美、EMEA、亚太三个主要区域的153家航空航天公司应用AM技术的市场占有率进行了分析。其中,EMEA占比49%,北美占比40%,亚洲占比为11%,其中,亚洲市场占有率低主要与数据调查过程中从中国和日本等亚洲国家获取信息的难度大有关。包括欧洲、俄罗斯、中东在内的EMEA地区采用3D技术的航空航天企业数量最多,其中法国采用3D打印技术的航空航天企业数量最多,达到44个。这与法国著名的“航空航天谷”聚集的诸如空客、赛峰、特雷兹等著名大型航空航天企业有关。

McKinsey 公司2022年3月发表名为“增材制造主流化”的趋势分析报告,如图4c所示。报告从硬件、软件、材料和服务的角度进行分析,认为虽然有些公司采用了3D打印技术作为制造手段,但是其大规模应用仍然受限。



a Hubs

b 3dpbm

c McKinsey

图4 国外知名机构3D打印趋势分析报告

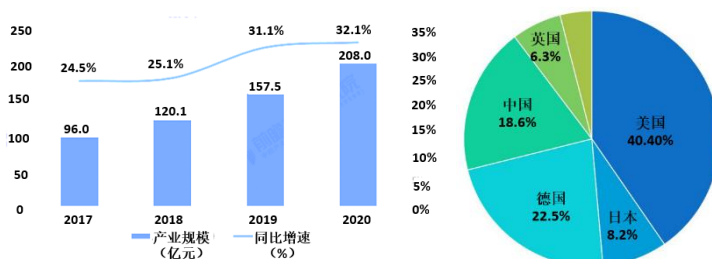


图5 国内前瞻产业研究院3D打印趋势分析数据

国内的前瞻产业研究院 2022 年发表了“中国 3D 打印行业发展现状及市场规模分析——2020 年 3D 打印市场依旧维持高增速”的报告。如图 5 所示, 报告指出在 2017~2020 年间, 我国 3D 打印的产业规模逐年增加, 增长速度比全球增速还快一些, 这也使得我国 3D 打印产业占全球的比重不断增加。2020 年我国 3D 打印市场规模超 200 亿元, 全球排名第三; 其中美国 3D 打印的产业规模占全球比重 40.4%, 德国仅次于美国。

通过以上资料分析, 认为 3D 打印为朝阳行业, 随着 3D 技术的日趋成熟, 其应用市场将迅速扩张; 就我国而言, 3D 打印行业的产值规模也位于世界前列, 行业前景光明。

3 3D 打印在商业航天上的应用

商业航天是一个新兴产业, 美国的 SpaceX、Planet 等商业航天企业发展迅速。从 2015 年开始, 我国的商业航天发展明显提速, 并陆续取得突破性进展。据科技咨询机构泰伯智库分析, 2022 年中国商业航天的市场规模突破 1.5 万亿元, 预计 2024 年将突破 2.3 万亿元, 2025 年市场规模将达 2.8 万亿元。虽然近几年中国商业航天产业获得了长足发展, 已经初步形成了商业航天新生态, 但是商业航天仍处于产业发展的初级阶段。我国商业航天产业链布局, 涉及火箭制造、卫星制造、卫星发射、卫星运营、卫星应用等子领域。随着商业航天的应用范围及场景不断扩展, 产业发展空间及潜力极大。本文重点介绍分析商业航天火箭制造领域的产品特点、技术种类、应用案例三方面内容。

3.1 商业航天产品特点

商业航天产品一般具有尺寸大、结构复杂、壁厚薄、多复杂内流道等结构特点, 如图 6 所示。产品服役环境恶劣, 常常受到高温、高压、腐蚀、大振动等条件的同时作用, 使材料面临极端性能的挑战。从表 1 航天产品制造角度看, 产品的批次数量小, 产品的预留加工周期短, 同时对产品的质量性能要求高。火箭发动机系统的零件大多采用高温合金材料, 机械加工难度大, 加工周期长; 同时零件结构复杂, 有大量的不规则曲面和内流道等。这些因素加大了发动机零件的制造难度, 给发动机的制造过程带来了工艺复杂、工序长、周转次数多等一系列问题。导致传统工艺批量制造的成本和周期优势在航天领域体现不显著, 同时也给 3D 打印技术提供了一些生存空间。



a 尺寸大、壁厚薄

b 结构复杂、多复杂流道

图 6 航天产品结构特点

表 1 商业航天产品制造特点

制造特点	传统工艺的挑战	3D 打印技术的优势
批次产品数量小	模具工装制造时间长, 成本高	制造柔性大, 无需模具工装
预留加工周期短	工序多, 流转周期长	一次成形缩短周转次数
对产品的质量性能要求高	连接可靠性	一体化制造
材料(高温合金、钛合金)	机械加工难度大	少量机械加工

3.2 商业航天技术种类

在商业航天领域应用最广泛的是基于激光的粉末床熔融技术(L-PBF), 又称激光选区熔化技术(SLM)。主要是由于 L-PBF 本身的技术特点与火箭发动机零件的制造需求能实现完美结合。具体来说 L-PBF 技术本身具有以下特点: a.零件的尺寸精度高、表面质量好, 经过简单后处理即可满足工程使用要求; b.材料的气孔、裂纹等缺陷少, 内部质量高, 断裂、屈服等力学性能指标接近甚至优于同牌号锻件标准水平, 可以满足工程应用需求; c.以三维模型为驱动, 无需模具, 适宜单件小批量产品快速制造, 且批次产品尺寸、性能一致性好; d.相比于传统的机加工技术, 对零件的结构复杂程度不敏感, 适用于结构复杂零件的快速制造; e.沉积效率低, 适用于薄壁结构件的快速制造, 尤其适用于薄壁复杂结构件的一体化快速制造。L-PBF 技术特别适用于薄壁内流道复杂产品的快速制造, 能解决火箭发动机零件的快速制造问题, 因而得到了一定程度的应用。

在商业航天得到应用的另一项技术是定向能量沉积技术(WA-DED), 又称电弧熔丝增材制造技术(WAAM)。WA-DED 技术的特点是制造柔性大、对设计更改响应速度快、无需模具、设备投资少; 同时设备运行稳定、运行成本低(能量转换率高, 达 85%以上)、成形效率高、材料利用率高、成形质量稳定、成形尺寸相对较大等优点。这项技术不仅可以避免传统机械加工造成的原材料浪费, 还可以大大缩短制造周期从而降低制造成本, 特别适用于大型贮箱结构的

制造。

3.3 商业航天应用案例

3D 打印技术在国内外的商业航天领域都有一定的应用,随着 3D 打印技术在火箭设计制造方面的应用逐渐增多,3D 打印技术带来的周期、成本优势越来越明显。

Orbex 公司采用 L-PBF 技术打印一体化推力室,如图 7 所示。Orbex 是一家英国航天公司,2019 年与 SLM Solutions 合作,采用 L-PBF 技术打印了一台镍基高温合金火箭发动机。该公司声称这款发动机采用 100%可再生燃料,可减少碳排放 90%。为了适配 L-PBF 技术,对产品的结构进行了优化设计,使之更有利于 L-PBF 制造。结构优化调整后重量减轻了 30%,效率比同类发动机提高了 20%。同时与传统数控加工技术相比,节省了 90%的周转时间和 50%的加工费。该发动机采用 SLM Solutions 的 SLM 800 设备打印,打印机的尺寸为 260 mm×500 mm×800 mm。另外,Orbex 公司为实现快速打印火箭发动机,与 EOS 旗下的 AMCM 公司合作,建造了欧洲最大的工业 3D 打印机,预计该打印机每年可以打印超过 35 个大型火箭发动机和主级涡轮泵系统。



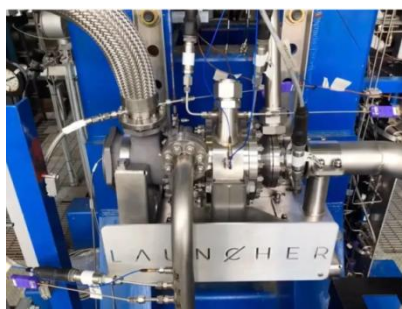
图 7 Orbex 公司 L-PBF 技术打印的一体化推力室

Launcher 是美国的一家小型火箭初创公司,利用 3D 打印技术不断升级火箭发动机的性能。公司的目标是制造高效、低成本火箭,把小型卫星送入太空。该公司成立于 2017 年,2019 年开始研发 3D 打印 E-2 发动机零部件。如图 8 所示,E-2 是一款封闭式循环的高

性能 3D 打印火箭发动机,其中主要的液氧涡轮泵、燃烧室等产品陆续由 3D 打印技术制造。燃烧室由 AMCM 公司制造的 M4K 设备打印,选用铜合金材料,集成复杂冷却流道结构,这种设计提高了发动机的冷却效率。据报道该燃烧室是同类产品最大的部件,高 860 mm,直径 410 mm。该款发动机于 2022 年 4 月 21 日在 NASA 的斯坦尼斯航天中心试车成功,如图 9 所示。试车时涡轮泵的转速达到了 30000 r/min,燃烧室试车后喉部的状态如图 9c 所示。Launcher 公司认为 3D 打印将发动机的性能发挥到了极致。此外,Launcher 公司 2021 年 4 月购买了一台 Velo3D 的蓝宝石打印机打印镍基高温合金材料,图 10 所示的贮箱就是由 Velo3D 打印机制造的产品;同年 9 月,又购买了一台同品牌打印机打印火箭的钛合金零件。

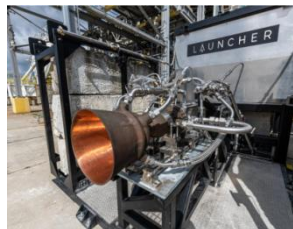


a E-2 发动机



b 涡轮泵组件

图 8 Launcher 公司 SLM 技术打印高性能液体火箭发动机



a 3D 打印燃烧室



b 试车现场



c 试车后喉部状态完美

图 9 Launcher 公司的 E-2 火箭发动机试车



a 贮箱



b Velo3D 的蓝宝石打印机

图 10 Launcher 公司 3D 打印产品及设备



图 11 Relativity Space 公司火箭工厂

Relativity Space 是美国一家液体火箭公司,是第一家应用 3D 打印技术整体打印火箭,并制造世界上最大金属 3D 打印机的公司,拥有超过 90000 m² 的超级未来工厂,如图 11 所示。该公司采用 L-PBF 和 WA-DED 技术制造火箭发动机、贮箱等零件。通过采用 3D 打印技术,大幅简化了产品的供应链,火箭的零件数量由十万多个减少到低于 1000 个;制造周期由 24 个月缩短为 2 个月;迭代周期由 48 个月减少到 6 个月。Relativity Space 采用 3D 打印技术的整体思路是减少零件数量,提高发射任务的可靠性。其中发动机 AEON 1、AEON R 和 AEON VAC 都由 3D 打印制造,通过减少燃烧室、点火器、涡轮泵、反应控制推进器和输送增压系统零部件的数量,提高发动机的可靠性。其中 AEON 系列发动机全部采用液氧甲烷燃料,已完成 500 多次测试。

以上应用案例表明,由于 3D 打印技术的应用缩短了产品的供应链,加速了火箭的研制速度,国外的商业火箭制造领域已经将 3D 打印技术应到了产品开发中。国内商业航天应用 3D 打印技术的企业也逐渐增多。

江苏深蓝航天有限公司是国内早期将 3D 打印技术作为发动机生产工艺的火箭研制公司,85% 以上的发动机零件由 3D 打印制造。2019 年 10 月深蓝航天完成了国内首个液氧煤油针栓推力室长程试车圆满成功,如图 12 所示。深蓝航天成为继 SpaceX 后世界第二个全面掌握液氧煤油针栓发动机技术的企业。



图 12 江苏深蓝航天有限公司推力室试车状态



a 发动机



b 燃气发生器地面热试车

图 13 星河动力航天公司液氧/煤油发动机

星河动力航天公司是一家成立于 2018 年的民营航天企业,从事低成本商业航天发射业务。在 3D 打印应用方面,制造了涡轮泵和液氧煤油主阀壳体等多款零件。图 13 为该公司苍穹液氧/煤油发动机和燃气发生器地面热试车。

除此之外,蓝箭空间科技股份有限公司为“朱雀二号”配备了二级游机天鹅 10 t 级液氧甲烷发动机,其燃气发生器身部和燃烧室均由 3D 打印制造,如图 14a 所示。北京星际荣耀空间科技股份有限公司的双曲线火箭 2 号、3 号火箭均有 3D 打印零件,图 14b 是采用 3D 打印技术为双曲线 2 号打印的栅格舵。



a 蓝箭空间科技股份有限公司的发动机



b 北京星际荣耀空间科技股份有限公司的栅格舵

图 14 3D 打印技术在国内商业航天上的应用

从国内外 3D 打印技术的应用案例分析可知,国外

