

液体火箭发动机增材制造技术研究进展*

张武昆^{1,2}, 谭永华^{1,3,4}, 高玉闪², 杨欢庆^{4,5}, 赵剑^{1,2}

- (1. 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100;
2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100;
3. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100;
4. 国防科技工业航天特种构件增材制造技术创新中心, 陕西 西安 710100;
5. 西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 针对增材制造技术在国内外液体火箭发动机领域的应用成果和研究现状, 分别综述了增材制造在发动机的制造技术和流程、制造工艺标准以及在发动机推力室、涡轮泵、阀门、总装及其他组件和整机中的应用研究, 并展望了增材制造技术在液体发动机中的发展方向, 指出在液体发动机领域, 增材制造应该在应用广度和深度、结合增材制造特点的发动机结构设计方法、制造技术和工艺标准、新材料和材料性能数据库的构建等方面进行更加全面系统的研究, 以应对未来航天领域的重大挑战。

关键词: 液体火箭发动机; 增材制造; 制造技术; 制造工艺; 金属材料; 综述

中图分类号: V434 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 05-210235-16

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.210235

Research Progress of Additive Manufacturing Technology in Liquid Rocket Engine

ZHANG Wu-kun^{1,2}, TAN Yong-hua^{1,3,4}, GAO Yu-shan², YANG Huan-qing^{4,5}, ZHAO Jian^{1,2}

- (1. National Key Laboratory of Science and Technology on Liquid Rocket Engines, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China; 2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;
3. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China;
4. NDSTI Innovation Center of Aerospace Non-Traditional Component Additive Manufacturing, Xi'an 710100, China;
5. Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

Abstract: According to domestic and foreign research progress of additive manufacturing (AM) technology in liquid rocket engine, rocket engine manufacturing process, methods, process standards and materials were summarized, as well as application of AM in liquid rocket engine, such as thrust chamber, turbine pumps, valves, general assembly components and the whole machine. Meanwhile, the development direction of AM technology in the field of liquid rocket engine was also predicted. It is pointed out that in the field of liquid rocket engine, AM should be carried out more comprehensive and systematic research on application level, engine structure design methods combined with AM characteristics, new manufacturing technology, manufacturing process standards, new materials and construction of material performance database, so as to meet major challenges in future aerospace field.

* 收稿日期: 2021-04-19; 修订日期: 2021-06-22。

基金项目: 航天先进制造技术研究联合基金 (U1737205); 财政部军工稳定性科研院所支持项目 (2019KGW.YY4007Tm)。

作者简介: 张武昆, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机结构设计。

通讯作者: 谭永华, 博士, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机技术。

引用格式: 张武昆, 谭永华, 高玉闪, 等. 液体火箭发动机增材制造技术研究进展[J]. 推进技术, 2022, 43(5):210235. (ZHANG Wu-kun, TAN Yong-hua, GAO Yu-shan, et al. Research Progress of Additive Manufacturing Technology in Liquid Rocket Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5):210235.)

Key words: Liquid rocket engines; Additive manufacturing; Machining technology; Fabrication process; Metal material; Review

1 引言

液体火箭发动机是运载火箭发展的重点和核心,其先进程度直接决定运载火箭的先进性,先进的液体动力技术是航天强国的重要标志之一^[1]。近年来,世界各航天大国纷纷提出载人登月^[2]、卫星星座^[3]、深空探测^[4]等重大航天活动,这些任务对液体火箭发动机提出了大推力、高可靠、高性能、低成本、短周期、可重复使用等目标要求^[5-6]。液体火箭发动机的研制也面临着新的挑战,一是液体火箭发动机的高比冲、高推质比等高性能指标要求更高的燃烧室压力和更轻的结构质量,带来更严酷的工作环境和热负荷,从而对发动机的设计提出更高的要求;二是当前传统的减材制造模式生产周期长且原材料应用率低,生产成本高。因此,必须创新和发展发动机的设计技术,变革制造模式。

增材制造^[7](Additive Manufacturing),简称AM,是指从3D模型数据,通过软件与控制系统将材料逐层堆积,最终制造出实体结构的过程,涉及计算机辅助设计、材料加工与成型、控制等多项技术。自从1986年开始使用光固化成型(SLA)制造技术^[8],经过多年的发展,又形成了PBF(Powder Bed Fusion,粉末床熔融)、DED(Directed Energy Deposition,直接能量沉积)等制造技术^[9]。增材制造在高精度复杂几何体、定制产品的制造等方面具有优势,已经逐渐应用于航空航天、船舶^[10]等多个领域,也成为先进制造和智能制造^[11]的重要发展方向。液体火箭发动机的结构具有柔性加工、小批量、薄壁、复杂拓扑、高成本等特点,采用增材制造技术,可以突破传统减材制造的工艺局限性,减少由于复杂装配操作、复杂内部特征和高性能装配集成而产生的制造技术难题,同时减少复杂的焊接等连接操作和零部件数量;在发动机设计层面,可以充分利用增材制造技术在数字化和快速灵活设计的优势,进行轻质化结构设计、材料-结构-功能一体化融合集成设计、复杂拓扑构型设计等,实现“方案完善-加工-试验”的多轮优化迭代制造过程,减小发动机的质量、降低制造成本和缩短生产周期,提高发动机的推质比和可靠性。

在过去的十多年间,增材制造在液体火箭发动机中的应用实现了爆发式发展,本文对增材制造在液体火箭发动机领域的应用研究进行了梳理。首先

讨论了增材制造技术在发动机中的制造方法、工艺标准和材料,然后介绍了增材制造技术在国内外液体火箭发动机各部件的应用研究成果,最后分析了增材制造在液体火箭发动机领域的发展方向。

2 液体火箭发动机增材制造方法

2.1 发动机增材制造技术

在经过多种增材制造技术的探索 and 比较后,目前液体发动机中使用的增材制造技术主要是PBF和DED技术^[12]。发动机的增材制造技术分类如图1,主要包括Selective Laser Melting(SLM,激光选区融化)、Electron Beam Melting(EBM,电子束融化)、Blown Powder Deposition(BPD或称BP-DED,送粉定向能量沉积)、Arc-Based Deposition(电弧沉积)、Laser Wire Deposition(LWD,激光金属丝沉积)、Electron Beam Deposition(EBD,电子束沉积)等。其中,红框线标注表示应用广泛的技术。

PBF技术通过将金属粉末铺到基板上,然后用高能激光熔融成型。在发动机中应用的主要技术是SLM和EBM,这些技术原理类似。PBF技术首先将3D模型切片成约0.02mm的薄层,将粉末撒在整个区域,根据要固化的特征部分,定义激光扫描的路径,进行熔融烧结^[13-14]。在一层固化完成后,撒上新的粉末,并烧结新的构建层,使用激光将层与层之间连接起来,之后不断重复直到整个零件制造出来,制造过程原理如图2所示。这种方法可以最大程度地减少残余应力,成型精度较高,可以用来制造复杂构型。但是,SLM技术也存在问题:制造尺寸有限,目前成熟的制造中仅限于直径800mm以下的零件^[15];小尺寸结构在制造完成后的残留粉末难以去除;结构的某些小特征尺寸难以实现。后续还应研究液体发动机制造的SLM技术,重点开展大尺寸、高效率制造方向的研究,以满足未来发动机的研制任务需求。

DED技术^[16]将能量直接聚焦在基材(金属丝或粉末)并进行熔化,熔化后的金属沉积到基材进行冷却凝固。相比于SLM技术,可以进行更大尺寸结构和多材料的制造^[17-18],制造速度更快,但层厚更大,表面粗糙度和制造精度差^[19]。根据能量来源不同,形成了激光金属丝沉积、吹粉沉积、电弧沉积及电子束金属丝沉积等一系列新技术。

激光金属丝沉积(LWD)、电子束金属丝沉积

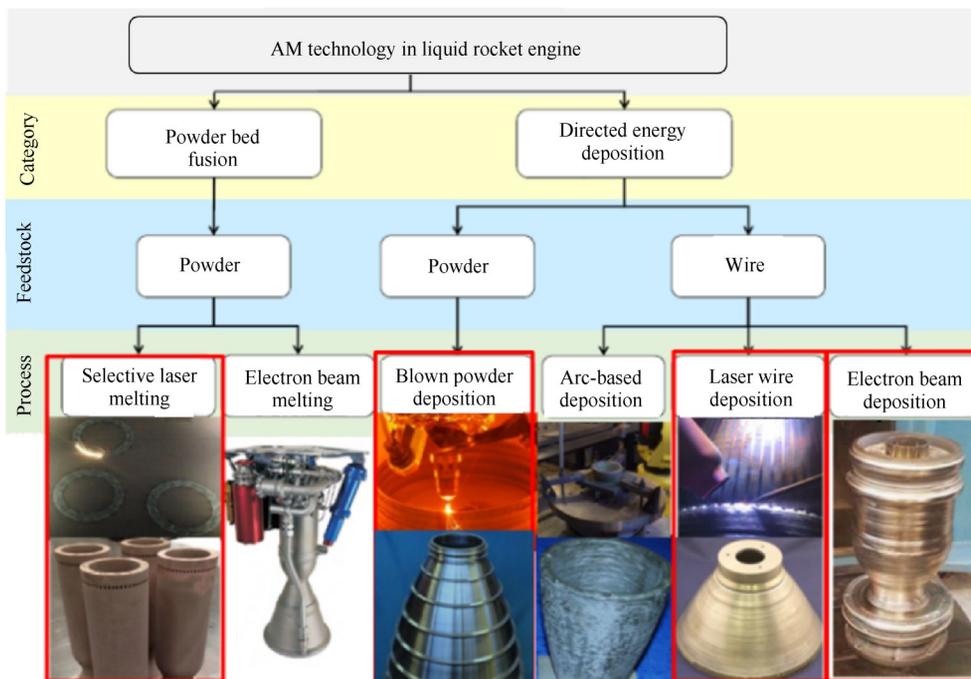


Fig. 1 Category of AM technology in liquid rocket engine

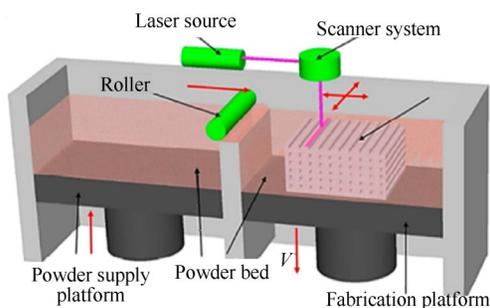


Fig. 2 Powder bed fusion process^[8]

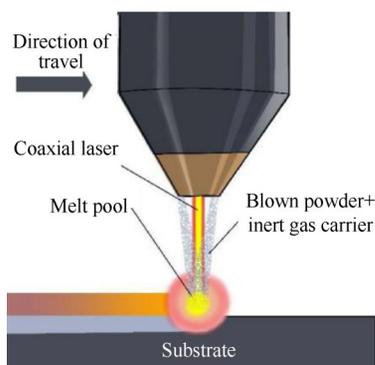


Fig. 3 Blown powder directed energy deposition process^[20]

(EBD)和电弧沉积类似,能量来源分别是激光、电子束和电弧,其熔化基材是金属丝。LWD技术被用来制造喷嘴的冷却通道等组件,成形过程热流密度低,激光束小,因此可以进行各种类型尺寸的制造,并减小整体变形。EBD技术用来制造燃烧室的衬层,成形过程热流密度最高,类似的电子束自由成型(EBF³)技术也采用电子束作为热源,利用金属丝建造零件,用来制造发动机燃烧室。电弧沉积技术主要是电弧增材制造(WAAM),适应于大型零件制造,沉积速率高,但成形精度较低,残余应力较大。

吹粉沉积技术(BPD)的能量来源是激光,其熔化基材是粉末,采用惰性气体将粉末加速吹到熔池,以减少高温氧化,其原理如图3所示。BPD技术应用较广泛,该技术常用来制造喷管集成件,也是后续将大力发展的技术,类似的采用激光热源和粉末沉积方案还有激光金属沉积技术(LMD)、激光静成型技术

(LENS)等。
2.2 发动机增材制造流程

NASA提出的AMDE计划研究了基于增材制造技术的发动机研发流程,由分析-制造-测试的串行模式变成分析-制造/测试的并行模式^[21]。传统的制造流程是原材料-切割粗加工-钣金/旋压/锻造-热处理-机加-质量检测,采用增材制造后简化为粉末/金属丝-打印-热等静压处理(HIP)-微机加-质量检测,通过增材制造,零部件的制造周期是原来的1/6,制造成本是原来的1/5,对于发动机整个设计、制造研发流程,制造周期和成本分别是传统制造的1/2和1/10^[22]。NASA还研究了SLM技术制造发动机燃烧室和DED技术制造发动机喷管的流程。西安航天发动机有限公司也提出了SLM技术制造喷注器的研发流程,如图4所示。

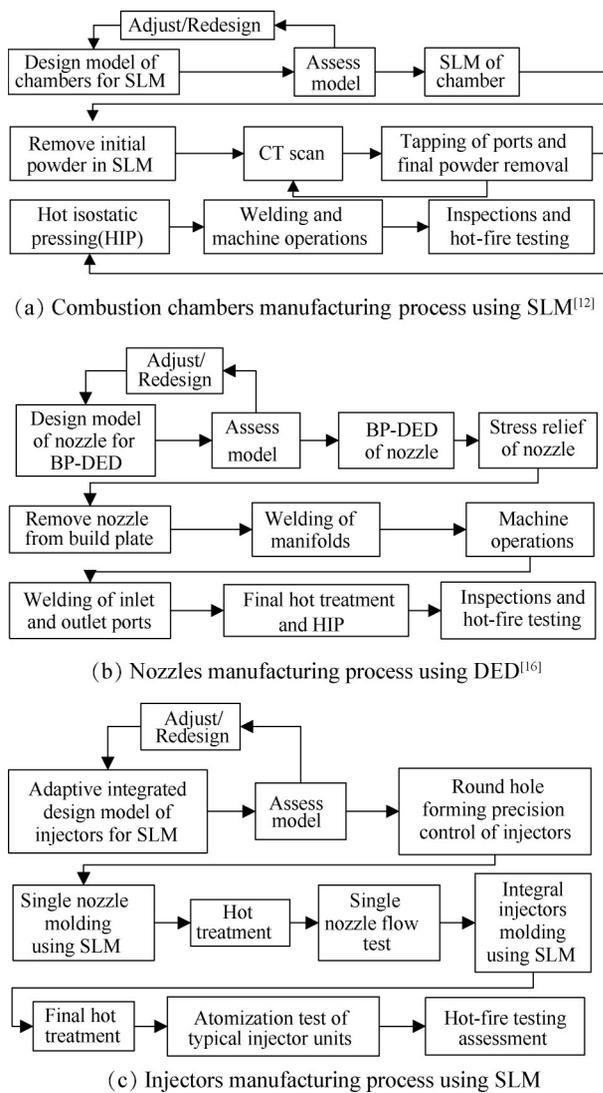


Fig. 4 Engine components manufacturing process fabricated by AM technology

3 液体火箭发动机增材制造工艺标准

PBF和DED是液体火箭发动机常用的增材制造技术。针对发动机增材制造的标准,目前已有一些研究,包括这两种技术的通用和发动机专业领域的标准,通用标准对发动机的研制也有一定的借鉴意义,以下是发动机增材制造工艺标准研究情况。

国际标准化组织ISO和美国材料试验协会ASTM在2015年发布了ISO/ASTM52900-15^[23],定义了增材制造技术中的专用术语,美国制造和标准化协会AM-SC在2018年针对增材制造发布了一份标准化路线图^[24],指导增材制造行业标准的发展方向。关于L-PBF(Laser-PBF,激光粉末床融合)制造技术,SAE发布了AMS7000^[25]和AMS7003^[26],ASTM发布了设备指南的标准ASTM F3434-20^[27]。关于DED制造技术,

SAE发布了AMS7004^[28]和AMS7005^[29],ASTM发布了ASTMF3187-16^[30]。在材料方面,ASTM发布了金属粉末特性的标准ASTM F3049-14^[31],美国焊接协会AWS发布了金属组件的增材制造规范AWS D20.1/D20.1M:2019^[32],对整个增材制造过程给出了系列规范。在增材制造零件的设计方面,ISO和ASTM国际组织一直在积极合作制定新标准,2017年发布了AM的通用设计指南ISO/ASTM 52910:2018^[33],并发布了基于金属材料的L-PBF技术的设计指南ISO/ASTM 52911-1:2019^[34],基于DED技术的设计指南ASTM F3413-2019^[35]。Holger Krueger^[36]对航空航天相关的增材制造标准进行了研究。国内在2020年也发布了PBF和DED技术的工艺规范、热处理、测试方法和数据处理等8项增材制造通用标准。

在液体火箭发动机领域,美国NASA发布了用于制造发动机的L-PBF技术的标准,规定了冶金工艺、零件设计要求、零件制造、设备控制等质量体系。其中,冶金工艺包括材料质量、微观结构、机械性能、粉末控制、熔合参数等;零件制造包括热处理和表面处理等,该标准已被多家航天制造商采纳^[37-38]。

航天推进技术研究院一直重视增材制造技术在液体火箭发动机装备研发和制造中的工程化应用,目前已经掌握了增材制造热处理工艺,处理后力学性能与锻件相当;增材制造流道结构表面磨粒流光整;600mm×600mm超大幅面精密构件增材制造控制等系列关键技术。此外,还建立了液体发动机复杂结构的成形、后处理、评价技术体系,先后参与并制定增材制造技术相关的国家标准9项(3项已发布)、航天行业标准1项、集团公司标准3项。

表面粗糙度较差一直是发动机增材制造技术面向应用的挑战之一,该方面的研究较少。NASA联合REM公司,开发了新的基于化学方法的表面粗糙度处理技术,包括化学抛光(CP)技术、化学机械抛光(CMP)技术、化学铣削组合处理(OFT)技术。针对Ti-6Al-4V,采用CP技术进行了后处理^[39],提高了结构抗疲劳性能,材料或结构的表面粗糙度处理结果比较如表1所示,对LLAMA发动机燃烧室的处理比较如图5所示。此外,还使用化学-机械加工方法开展了SLM技术的GRCop-84等材料的表面粗糙度研究^[40]。表面粗糙度的后续研究将向多材料适应性、复杂组件和大尺寸的方向发展。

Table 1 Research on surface roughness,REM^[41]

Material/Program	Method	Initial Ra/ μm	Final Ra/ μm
Inconel 625	OFT	7	<0.5
Inconel 718	CP	~8	1.8~3.5
Inconel 718	CMP	8	<0.1
Inconel 718	OFT	7	<0.05
HR-1	OFT	>15	0.25~0.5
LLAMA	CMP	>14	<0.75

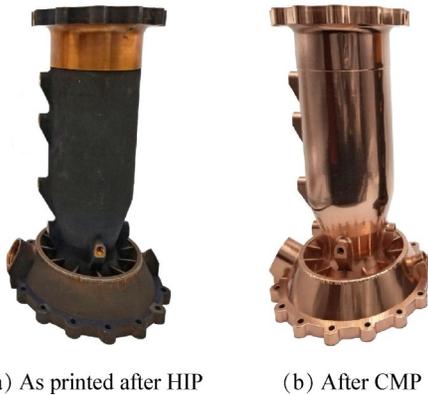


Fig. 5 Comparison of LLAMA combustion chambers before and after CMP

增材制造零部件的可靠性来源于材料性能、结构设计、制造过程工艺控制、制造后处理及产品检测评估环节的共同作用,这些部分均会对发动机的最终性能产生重要影响。对于材料性能,有增材制造材料粉末的制备和选择、试件材料的打印质量和性

能测试;对于结构设计,不是传统结构设计原位替代,而要结合增材制造技术要求,如打印角度限制、打印产品结构的力学性能等,同时发挥增材制造灵活的优势,进行结构功能融合一体化设计、轻量化设计等;对于制造过程工艺控制,有进料速度控制、打印方向及支撑、激光等能量的过程控制等;对于制造后处理及产品检测,则是热等静压处理、结构健康检测、发动机部件的冷热试车等。因此,对这些增材制造的环节均需要进行标准化的研究,建立液体火箭发动机增材制造标准化体系,以满足型号的正常生产和服役要求。液体火箭发动机增材制造标准化体系如图6所示。

4 液体火箭发动机增材制造材料

液体发动机使用的材料大多是耐高温、高比强度和高比刚度等特性的金属材料,如铜合金、镍合金、钛合金等,其中,铜合金和镍合金是研究热点。这些材料大多比较昂贵,采用传统的减材制造方法成品率低,制造成本高,制造周期长。

4.1 铜合金

铜合金以其良好的导热性能而广泛应用于液体火箭发动机的燃烧室和喷管的夹层结构。但是,铜合金在红外光谱中具有高度反射性,使得许多激光器无法操作;铜合金良好的导热性使得注入粉末层的能量无法集中。因此,铜合金的激光增材制造技

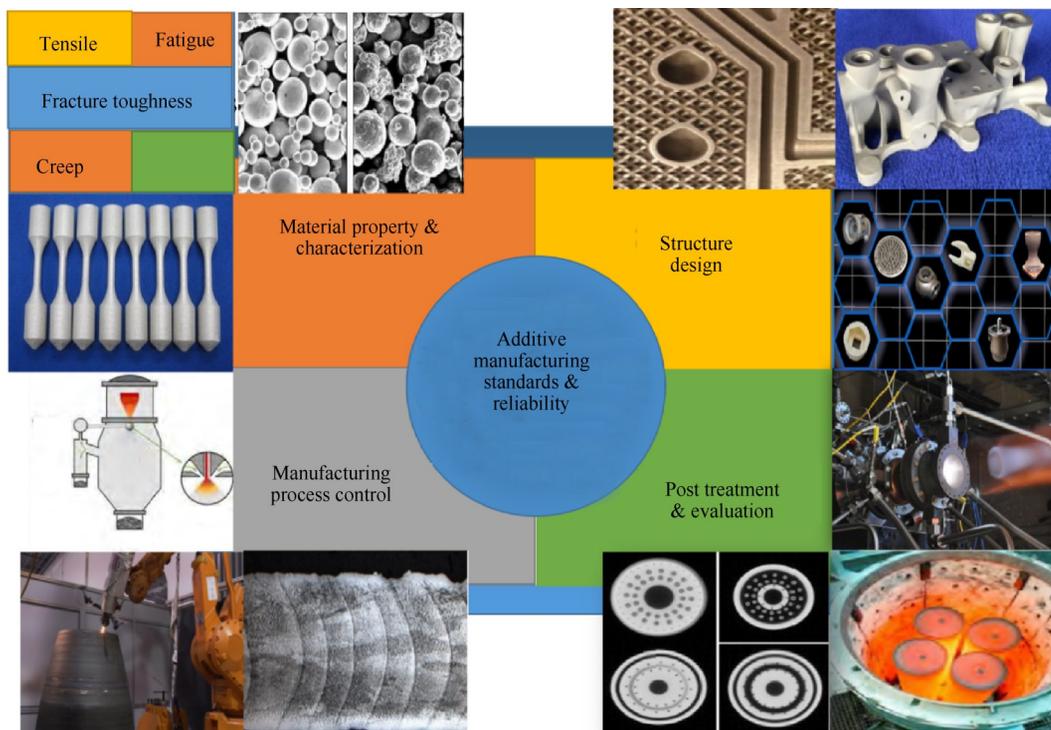


Fig. 6 Standardization system construction for AM in liquid rocket engine

术一直是国内外研究的难点和热点。NASA的LCUSP项目研发了一系列发动机增材制造中使用的铜合金材料,如GRCop系、C18XXX系、Glidcop铜合金等。其中,GRCop系铜合金应用在发动机燃烧室、喷嘴和喷管的再生冷却流道,这是一种弥散强化材料,具有良好的高温机械性能和抗氧化性,在750°C热试车下机械性能仍能达到发动机强度裕度,可用来替代传统制造中的NARloy-Z和C-18150铜合金^[42]。GRCop-84与传统铜合金相比,应变和疲劳性能提高,同时,具有更好的能量吸收能力,激光反射率随着温度的升高迅速下降,解决了铜合金增材制造的工艺难题^[43-44],Seltzman等^[45]研究了SLM制造中熔融环境下GRCop-84的材料性能。

目前GRCop-84的SLM制造工艺已经成熟,并实现了商业化供应链。基于GRCop-84新开发的GRCop-42^[46-47]材料具有更好的导热性和延展性,且打印的粉末易获取,成本更低,但强度和疲劳性能有些许下降。RAMPT计划目前正在对其力学性能和工艺参数开展研究。Gradl等^[48]详细比较了两种合金的机械性能等参数。表2为室温下经过HIP处理后的GRCop-84,C-18150和GRCop-42的力学性能比较。国内发动机增材制造的铜合金牌号主要是QCr0.8。

Table 2 Mechanical properties of copper alloys

Material	Source/ Machine	Tensile strength/ MPa	Yield strength/ MPa	Elongation/ %
GRCop-84	SLM	390	208	30
GRCop-84	Extruded	368	197	27
GRCop-42	SLM	359	173	32.2
GRCop-42	Extruded	354	200	30
C-18150	SLM	275.8	179.27	27

4.2 镍合金

欧洲空客公司开展了铬镍合金Inconel 718的研究,NASA开展了使用DED技术的Inconel 625的制造研究,这种材料具有优异的焊接性能和双材料间相容性,在高温中仍能保持足够的强度。Fullen等^[49]对Inconel 625的热处理和材料表征进行了详细的描述,Gradl等^[50]比较了JBK-75和Inconel 625的性能和在发动机喷管中应用的试车情况。HR-1^[51]是一种高强度和高韧性的耐高温铁镍合金材料,是NASA从A-286,JBK-75等铁基高温合金的基础上研发的新材料,具有良好的抗氢腐蚀、抗氧化性、高导热性和良好的低循环疲劳性能,以及在高热通量环境下的

高延伸率和强度。RAMPT计划对使用DED和L-PBF技术的HR-1材料进行研究,并进行了热处理开发、金相、化学评估、机械测试、热物理性能等材料表征和氢氧发动机的喷嘴、喷管等制造工作。国内发动机增材制造使用的镍合金主要是K4202^[52],GH4169,GH4202和GH3536等,其中GH4169的性能与国外Inconel 718相似。

4.3 钛合金

钛合金是目前增材制造中研究较多且成熟使用的材料,具有高比强度、高比刚度、抗腐蚀及良好的高低温性能等,广泛应用于飞机、导弹、火箭等飞行器的结构件中。钛及钛合金共有5种系列, α 型、近 α 型、 $\alpha+\beta$ 型、 β 型和钛基金属间化合物^[53],在液体发动机中应用广泛的是 $\alpha+\beta$ 型合金,如国外的Ti-6Al-4V,国内的TC4(与Ti-6Al-4V性能相似)和TC11等。NASA使用Ti-6Al-4V材料3D打印了发动机的常平环^[54]等总装结构件和喷管^[55],还测试了其在发动机工作温度下的拉伸、疲劳、断裂等力学性能,图7为常平环制造中关键步骤的材料性能表征。国内也研究了钛合金在喷注器壳体、总装结构等的增材制造技术。

4.4 其他材料

NASA将铌合金应用到发动机中。C103是一种高温固溶强化铌合金材料,使用传统的减材制造方法难以加工,采用L-PBF制造技术大大减少了原材料的消耗,并形成较高的打印精度和低表面粗糙度,可用于薄壁结构,如发动机喉道或小型推进系统等,NASA研究了C103^[56]的材料性能和加工工艺。此外,还研究了其他增材制造金属材料,如高强度合金钢JBK-75^[57],SS347,316L^[58],钴合金CoCr,铝合金Al-Si10Mg,6061,A205等。国内增材制造的合金钢方面的研究主要集中在304,316L,17-4PH,S-04/08/130等,铝合金主要是AlSi10Mg和2024等。

5 液体火箭发动机增材制造应用

增材制造技术在国内外液体发动机中的应用呈现出越来越广泛的趋势,从单一部件到多个零部件组合,从单一材料到双材料制造,从一种制造技术到多种技术相结合。美国NASA、洛克达因公司、SpaceX,欧洲空客公司,我国西安航天发动机有限公司、首都航天机械有限公司及许多商业航天公司等航天企业纷纷针对火箭发动机各部件的增材制造技术,进行了一系列的应用研究。

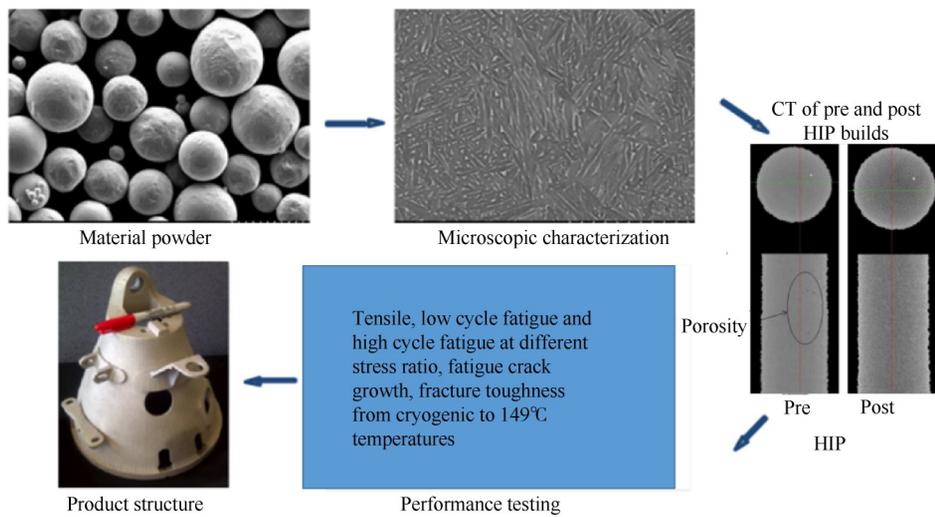


Fig. 7 Characterization of Ti-6Al-4V in the process of manufacturing gimbal ring

5.1 推力室

推力室是液体火箭发动机中最复杂、制造难度最大、制造周期最长的部件,因此,增材制造技术在推力室中的研究最深入,主要集中在喷注器、再生冷却喷管、燃烧室和点火器等组件。

5.1.1 喷注器

喷注器要承受高温高压、高流速冲击等一系列恶劣工况,需要满足复杂流路的尺寸精度及表面粗糙度等设计要求,也是发动机制造难度最大的零部件之一。喷注器的制造水平直接影响着发动机推进剂的雾化、混合和燃烧,决定着燃烧稳定性的水平和发动机的性能。传统方式制造的喷注器有数十乃至成百上千个独立零件,然后通过机械连接或焊接等方式集成在一起,制造成本极高,生产周期很长。因此,世界各航天制造商针对喷注器的增材制造技术开展了大量研究工作。

美国洛克达因公司在 2009 年开始采用 SLM 技术制造 F-1 发动机喷注器^[59],随后又采用 SLM 技术制造 AR-1 发动机喷注器^[60],热试车室压超过 13.79MPa。仅在喷注器方面,增材制造就使零件交付周期缩短 9 个月,成本降低 70%。此外还进行了 RS-25, RL-10 等发动机喷注器的增材制造技术研究。

NASA 不仅研究了 SLM 技术相关的材料、工艺和制造方法等,还根据部分具体型号要求和增材制造技术特点,提出新的喷注器设计方案。在对 Nano Launch 的同轴式喷注器的制造中,将传统的环状流道燃料管路方案改变为多个独立的围绕液氧管路的孔状流道,解决了使用 SLM 技术制造方案出现的管壁受压后的破坏问题;充分利用增材制造在复杂几何体制造方面的优势,重新设计了管路拓

扑,解决燃料和液氧管路距离过近而引发的串腔风险;将传统复杂的燃料冷却管路集成为一个独立部件等,喷注器如图 8(a)所示^[61]。NASA 还比较了传统和增材制造两种方式下某推力 90kN 液氢/液氧发动机的喷注器性能,增材制造的喷注器的特征速



Fig. 8 Injectors fabricated by AM technology developed at NASA^[61]

度效率为98%~99%,并有着稳定的燃烧特性,还大大减少了零件数量。目前,NASA已经完成了不同推进剂组合(液氢/液氧、液氧/甲烷和液氧/丙烷)、不同喷注方式(同轴式、离心式和撞击式)、不同推

力(几百牛到几十万牛)、不同直径(28~190mm)的系列发动机喷注器的增材制造和热试车^[62],经过试车的部分发动机喷注器项目如表3所示,部分喷注器如图8所示。

Table 3 Injector programs fabricated by AM technology developed at NASA^[61]

Injector programs	Year	Propellant	Material	Type	Number	Diameter/mm	p_c /MPa
Nano launch (Thrust 445N)	2012	LOX/Propane	Inconel 625	Swirl Coaxial	6	28.57	0.90
PC020B,C (Thrust 5338N)	2012	LOX/GH ₂	Inconel 625	Shear Coaxial	32	57.15	4.96
PF057,PG040,PF086 (Thrust 155688N)	2015	LOX/GH ₂	Inconel 625	Swirl Coaxial	62	190.50	9.65
PH127 (MET1)	2017	LOX/GCH ₄	Inconel 625	Swirl Coaxial	32	76.20	2.41
PG056	2017	LOX/GCH ₄	Inconel 718	FOF(Fuel- Oxidizer-Fuel, Triplet impinging-jet)	20	45.72	8.27

国内在喷注器的增材制造研究方面,2016年西安航天发动机有限公司进行了国内首次液氧/甲烷发动机3D打印喷注器研究,随后又攻克了液氧/煤油发动机的离心式、直流式、同轴剪切式喷注器的SLM技术成形,并进行了多次热试车,喷注器和液流试验如图9所示。其中,对某型号喷注器采用3D打印后,零件数量由原来的142个减少至2个,制造周期缩短70%,成本下降80%。首都航天机械有限公司也开展了多型液氢/液氧发动机喷注器的直流喷嘴单元和离心喷注单元的3D打印研究。星际荣耀公司在2018年进行了15吨级液氧/甲烷发动机燃气发生器试车,其喷注器采用3D打印成型。



(a) Injector shape (b) Injector flow test

Fig. 9 Injectors fabricated by AM technology developed at Xi'an Space Engine Company Limited

5.1.2 喷管及燃烧室

发动机的再生冷却喷管是发动机推力室的重要组件,也是一种典型的薄壁结构,传统的制造方法^[63]是采用锻造/钣金/旋压,然后机加工、铣槽和热处理,最后通过钎焊等方法连接,由于低温和流动对壁面的设计要求,还需进行表面加工和制造公差等后处

理工作^[64],采用增材制造方法则大大简化了制造过程。

NASA从2013年开始研究增材制造再生冷却喷管,开展了低成本上面级推进项目(LCUSP),使用SLM技术制造了直径400mm的大型冷却环集成喷管,随后进行了CT扫描和热试车。由于SLM的制造尺寸限制,NASA还研究了使用DED技术制造大型冷却喷管^[65]。2017年NASA采用LWDC(Laser Wire Direct Closeout,原理与LWD技术相同)技术^[66],使用SS347不锈钢和Inconel 625铬镍铁合金分别制造了冷却喷管,相比SS347材料,Inconel 625可以实现更高的液氧液氢混合比试验,同时,热试车时间更长,点火次数更多^[67]。NASA研究的部分增材制造喷管项目如表4所示,部分喷管如图10所示。



(a) Nozzle manufactured by SLM technology (b) Nozzle manufactured by LWDC technology

Fig. 10 Nozzles fabricated by AM technology developed at NASA by SLM technology

针对发动机燃烧室的增材制造,NASA研究了液氢/液氧和液氧/甲烷发动机燃烧室的铜合金和镍合金的双材料复合制造,主要采用SLM技术^[68-70]。在推力7.8kN液氢/液氧发动机的燃烧室的双材料增材制

造中,首先采用 L-PBF 技术制造 GRCo-84 铜合金燃烧室夹层,再利用 EBF³ 技术和 Inconel 625 镍合金制造外壁^[66,71],最后针对表面粗糙度要求,对制造工艺参数进行了优化改进。NASA 增材制造部分发动机燃烧室如图 11 所示,部分增材制造发动机燃烧室项目如表 5 所示,采用增材制造可以使燃烧室节省超过 50% 的制造周期和 25% 的成本,随着技术的成熟,还可进一步减少。

LCUSP 计划之后,为了解决增材制造后的残余应力问题,进一步减重和优化工艺,实现更大推力和更复杂环境的发动机的增材制造,NASA 正在开展 RAMPT 计划^[72],已经采用增材制造技术研究了液氧/煤油、液氧/液氢、液氧/甲烷等系列发动机的制造。对某发动机采用 L-PBF 技术制造 GRCo-42 铜合金燃烧室,然后采用 BP-DED 技术和 HR-1 材料制造喷管并与燃烧室连接,随后在外壁缠绕碳纤维复合材料,复合材料的引入可以在满足结构强度设计要求下减重 30%,并进行了热试车^[73],整个过程如图 12 所

示。后续将全面开发再生冷却喷管的 DED 制造技术^[74],并扩大该技术的使用规模。

西安航天发动机有限公司和欧洲的航天公司^[75-77]也进行了增材制造燃烧室和喷管等部件的研究,西安航天发动机有限公司还开展了发动机夹层冷却结构的铜/钢双材料增材制造技术的研究,采用 LMD 技术,在铜合金基底上成形出 S-06 钢,获得了力学性能优良、无裂纹孔洞等缺陷的铜钢异种材料结合面,如图 13 所示。目前正在研究铜合金与 GH4169 镍合金结合的界面开裂问题。

首都航天机械有限公司采用增材制造技术一体化制造的排气锥、筛孔涡流器、均流集气器、推力室等发动机部件,减少了零件数量,大大缩短了生产周期,并提高了系统可靠性。国内空天引擎公司在 2019 年对 21.5kN 发动机的全尺寸 3D 打印推力室进行了热试车,累计试车时间 200s,创造了国内民营航天推力室单次热试车时长记录。深蓝航天在 2019 年热试的推力室主体结构全部采用 3D 打印,将研制周

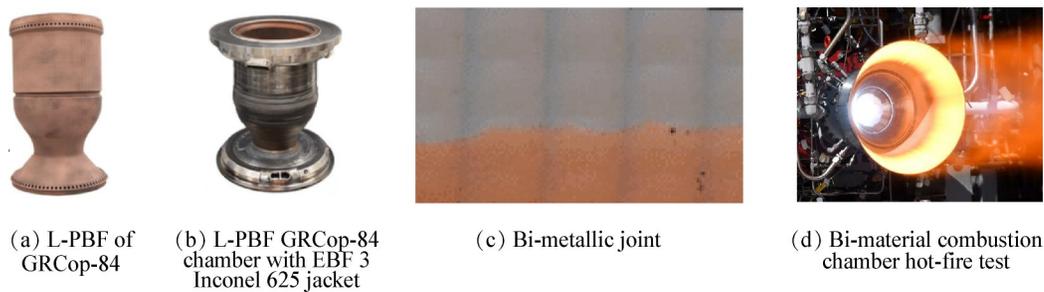


Fig. 11 Combustion chambers fabricated by AM technology in LCUSP

Table 4 Nozzle programs fabricated by AM technology developed at NASA^[66]

Nozzle programs	Propellant	Process	Material	Starts	Time/s
1.2k LWDC regen nozzle, PH034(Thrust 5338N)	LOX/GH ₂	LWDC	SS347	4	160
1.4k LWDC regen nozzle, PH034(Thrust 6227.5N)	LOX/GH ₂	LWDC	Inconel 625	9	880
PF086	LOX/GH ₂	SLM	Inconel 625	12	147
1.2k DED regen nozzle, PH034(Thrust 5338N)	LOX/GH ₂	DED	Inconel 625	1	15
800 radiatively-cooled nozzle, PD020C(Thrust 3558.5N)	LOX/GH ₂	SLM	Inconel 718	1	30
PI084-2	LOX/RP-1	DED	Inconel 625	28	1072
PJ038	LOX/GH ₂	DED	JBK-75	114	4170

Table 5 Combustion chamber programs fabricated by AM technology developed at NASA^[71]

Chamber components	Propellant	Process	Material	Starts	Time/s
1k SLM chamber PD061(Thrust 4448N)	LOX/GH ₂	SLM	Inconel 625	3	17
4k LOX-methane regen thruster, PF037-1(Thrust 17793N)	LOX/LCH ₄	SLM	Inconel 718	5	16
1.2k slip jacket liner cyclic SLM chamber, PG034(Thrust 5338N)	LOX/GH ₂	SLM	GRCo-84	25	2365
C-18150 slip jacket 1.2k liner, PH171(Thrust 5338N)	LOX/GH ₂	SLM	C-18150	10	1443
LCUSP 35k, PF08 6(Thrust 155688N)	LOX/GH ₂	SLM/DED	GRCo-84/Inconel 625	12	147
META4 4k #2, PH135(Thrust 17793N)	LOX/LCH ₄	SLM	GRCo-84	17	141

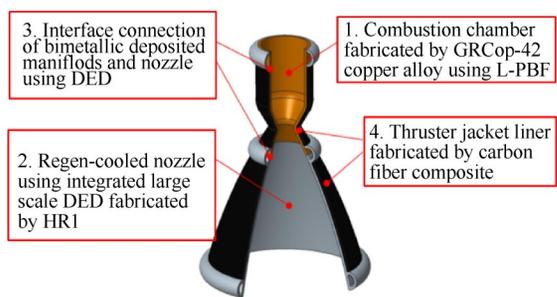


Fig. 12 Rocket engine in RAMPT plan^[71]

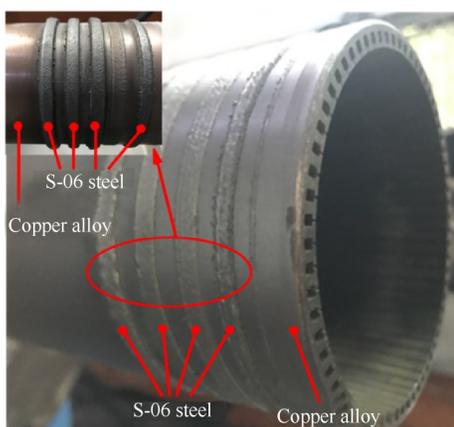


Fig. 13 Copper/Steel bimetallic channel wall fabricated using LMD

Table 6 ASI programs fabricated by AM technology developed at NASA

ASI programs	Propellant	Process	Material	Starts
Baseline ASI, AR-B-2	LOX/LH ₂	SLM	Inco 625	21
Hybrid, bi-metallic ASI	LOX/LH ₂	Hybrid	Inco 625/C18150	33

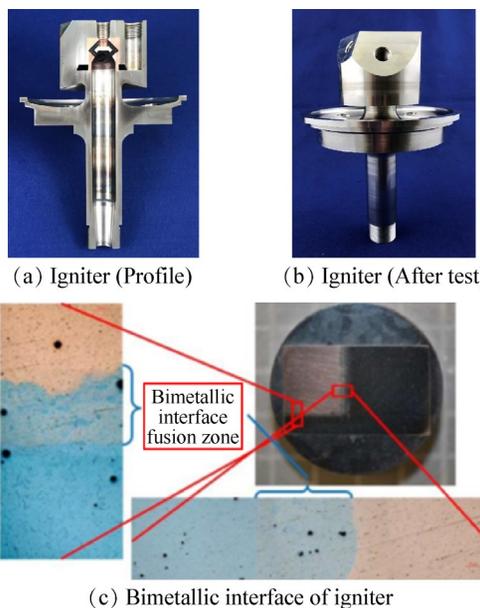


Fig. 14 Engine igniter using AM technology

期缩短80%以上。

5.1.3 点火器

点火器是发动机燃烧室的核心组件, NASA使用增材制造方法研发了增强型火花点火器 ASI, 用于重型载人航天系统 SLS 的核心级发动机。发动机点火器是一种铜和铬镍铁合金的双材料结构, 但使用 SLM 方法无法满足设计要求的混合比, 且无法实现双材料制造, 故 NASA 提出基于 DED 技术和多轴计算机数控技术 (CNC) 结合的增减材混合制造方案^[61], 这种制造技术相比 SLM 的优势在于不局限于单一的建造方向和一种材料, 制造尺寸更大, 同时突破了制造位置和几何形状等制造要求限制。

NASA 对混合制造的点火器进行了测试, 混合制造将制造周期由传统的几周缩短到几天, 且满足点火器的设计要求。表 6 为已完成的发动机点火器项目, 图 14(a) 和 (b) 为混合制造的发动机点火器, 图 14(c) 为使用 DED 和 CNC 技术混合制造的双材料微观界面, 在 Inconel 625 界面周围的显微镜图像中可以看到气孔, 平均直径为 50~90 μm , 产生原因可能是粉末原料内的气体或沉积过程中合金元素的汽化。关于混合增材制造方法, 还需进一步研究。

5.2 涡轮泵及阀门

在涡轮泵方面, 2013 年洛克达因公司使用 SLM 技术制造了 J-2X 火箭发动机涡轮泵排气孔盖^[78]。NASA 在 2015 年采用增材制造技术制造了上面级氢泵, 服役温度 -240 $^{\circ}\text{C}$, 转速为 $5 \times 10^4 \sim 9.2 \times 10^4 \text{r/min}$, 单件产品累计试车 250s^[79]。2016 年测试了增材制造的甲烷涡轮泵, 零件数量减少 45%, 服役温度 -159 $^{\circ}\text{C}$, 转速 $3.6 \times 10^4 \text{r/min}$, 进行了 6 次试车^[80], 并采用直接金属激光烧结 (DMLS) 技术对 J-2X 发动机燃料泵的入口管进行了研究^[81]。

西安航天发动机有限公司突破了某推力 180kN 和 1200kN 液氧/煤油发动机涡轮泵部件的 SLM 制造技术, 部分产品直接应用在型号中并完成飞行任务^[82]。在某涡轮泵 Y/R 叶轮 (Y 指氧化剂、R 指燃料) 中, 采用增材制造替代传统的“机加工+钎焊”工艺, 产品结构的受拉强度和加工效率均提高一倍, 如图 15(a) 所示; 在某涡轮泵的两器出口管中, 使用增材制造代替传统的精密铸造技术, 产品合格率由不足 10% 提高至 100%, 并应用于 CZ-5 Y1 飞行任务, 如图 15 (b) 所示。首都航天机械有限公司 3D 打印一体成型的带叶片结构的涡轮薄壁壳体, 减少了原零件制造中的旋压、电火花、锻造和焊接等加工工序, 提高了加工效率, 降低了生产成本, 同时提高了产品一致

性,如图15(c)所示;在某发动机的泵壳体中,含有大量加强筋,壁厚悬殊较大,内部含有叶片流道,结构形状复杂,传统工艺采用分体铸造+焊接方案,采用3D打印一体成型后,焊缝和内部缺陷大大减少,尺寸精度提升,并可在5~60MPa的低温环境下工作,如图15(d)所示。



(a) Y/R turbine impeller



(b) Two outlet pipes



(c) Turbine shells



(d) Pump shells

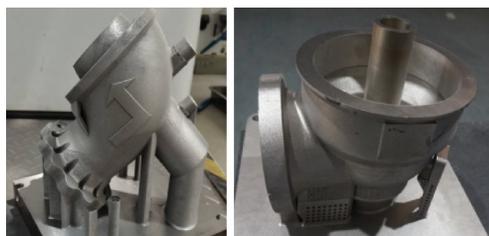
Fig. 15 Turbo pump using AM technology

在阀门方面,Space X采用SLM技术制造了梅林1D发动机主氧化剂阀门(MOV)^[82],阀门在低温和高振动的高压液氧环境下工作,与传统制造相比新阀体具有更高的强度、延展性和断裂韧性,材料变形更小,制造周期从数月缩短至不到2天,并于2014年发射成功。随后在推力300t全流量分级燃烧循环猛禽发动机中也采用了3D打印的阀门。

西安航天发动机有限公司使用增材制造的燃料阀,替代原有的铸造成型工艺,研制周期由3个月缩短为7天,并成功通过热试车,如图16(a)所示。首都航天机械有限公司3D打印的低温阀门壳体,最高工作压力可达40MPa,提高了带内部支撑结构的多层复杂高温合金壳体的产品合格率,如图16(b)所示。

5.3 总装及其他元件

西安航天发动机有限公司针对总装及其他元件的增材制造技术进行了系列研究。在主承力结构中,某常平环采用拓扑优化并使用SLM技术制造后,



(a) Fuel valves

(b) Valve shells

Fig. 16 Valves using AM technology

减重40%,加工周期缩短70%,如图17所示。某常平梁采用增材制造替代原有的“锻造+焊接”方案,结构强度由1200MPa提升到1650MPa,大大提升可靠性,并通过热试车考核,如图18所示。



Fig. 17 Gimbal ring after topology optimization using AM technology



Fig. 18 Gimbal ring/beam after hot-fire test using AM technology

NASA对RS-25发动机的升级提出了AMDE计划,两种制造方式完成后的Pogo-Z弹簧隔板、涡轮泵诱导轮、柔性X推进剂连接管路对比见表7。

5.4 发动机整机

美国洛克达因公司研究了MPS-120, MPS-110, MPS-130, MPS-120XW, MPS-120XL及MPS-160等系列微推进系统的整机增材制造。全增材制造的液氧煤油Baby Bantam发动机^[83],推力2.3t,并通过试车考核,整台发动机仅3个零件,研制成本减少65%。新西兰Rocket Lab公司采用EBM技术制造的Rutherford发动机整机在2017年首飞,截至2021年已经成

Table 7 Comparisons of engine components fabricated by traditional and AM technology in the AMDE plan

Program		Traditional manufacturing	Additive manufacturing
Pogo-Z spring plate	Cost/%	1	0.36
	Time/%	1	0.25
Turbopump induction wheel	Cost/%	1	0.5
	Time/%	1	0.2
Flexible X connection line	Part numbers	45	17
	Welding numbers	70	26

功将30多颗小卫星送入轨道。Space X采用直接金属激光烧结技术(DMLS)制造了Super Draco发动机整机,单台最大推力6.8t,推力可在20%~100%内调节,并可多次启动,其腔体采用具有高强度和高韧性的镍合金,发动机如图19所示。国内星河动力公司也对3D打印整体成型的700N姿控发动机进行了试车。整机采用增材制造技术的部分发动机如表8所示。

**Fig. 19 Space X's Super Draco engine****Table 8 Programs of the whole engine fabricated by AM technology**

Enterprise	Engine	Thrust/kN	Propellant	Process
Space X	Super Draco	71	MMH	DMLS
Rocket lab	Rutherford	24	RP-1	EBM
Laucher	E-1	2.2	RP-1	DMLS
ARC	Nemesis	2	RP-1	DMLS
Relativity space	Aeon 1	86.8	CH ₄	SLS

6 总结与展望

增材制造技术在液体火箭发动机的应用和研究表现出相互融合、共同促进并发展的趋势。具体表现在发动机各组件中的应用越来越广泛,而通过发动机的研发,也进一步推进了增材制造技术的发展。当前,国外在发动机的增材制造方面已经有了很多的研究,国内也有相应的研究成果,其中,增材制造

的构件已经先后成功参与了天问一号、实践卫星、北斗卫星导航系统等50余次发射和飞行任务,但相比国外的研究还尚显不足。基于液体火箭发动机的研发要求和当前的研究现状,增材制造技术在液体发动机领域还应在以下方面重点发展:

(1)加大增材制造技术在液体发动机中的应用广度和深度。目前关于发动机的增材制造应用研究仍以关键零部件的制造为主,如喷管、喷注器等。针对整机的增材制造则局限于简单的小型发动机,制造产品也大多停留在试验阶段,距离在实际火箭型号的大规模应用还有一定差距。后期针对小推力发动机,应尽快实现批量化的整体3D打印;针对工作环境严酷复杂的大推力发动机,则应继续开展部件级和整机的增材制造技术研究,解决部件在高转速、高温高压、高振动和噪声等环境中工作的技术难题。

(2)加强结合增材制造特点的发动机结构设计研究。增材制造技术具有复杂构件成形和首件研制快等特点,非常契合液体发动机生产研制对设计灵活性、加工柔性及低成本、高可靠性、短周期快速研制的的需求。目前,增材制造的发动机产品大多是对原设计方案的原位替代制造,并没有充分体现增材制造在结构设计中的优势。应该开展发动机的创新设计方法研究,如基于点阵结构和拓扑优化的轻量化结构设计方法,复合材料、功能梯度材料、发动机部件集成融合等材料结构功能一体化设计方法,材料利用率最大化设计、产品修复和重复使用等的低成本设计制造方法,快速迭代优化的设计方法等。

(3)加快基于发动机的新型增材制造技术方法研究。发动机的许多部件都是多材料夹层复合结构,如喷管、点火器等。目前增材制造技术在多材料复合制造方面尚不成熟,亟需攻克相关的技术难题,如材料性能梯度引发的界面缺陷,多材料送料及成型控制,多材料结构整体的力学性能表征等。当前制造以PBF,DED技术为主,各种方法均有一定的局限性,如尺寸限制、表面粗糙度差、制造粉末难去除、制造零件强度和刚度不足、制造精度差、制造速度慢等,应针对这些局限性,开展组合制造技术或新制造技术等研究。

(4)继续完善统一的液体火箭发动机增材制造工艺标准。对于制造过程中的工艺,增材制造是一种新技术,其相关工艺的积累较少,后续应研究增材制造的过程表征参数与零件失效模式的关系;对

于后处理工艺,表面粗糙度、不均匀晶粒结构等都会对零件耐热度、强度和疲劳等性能产生影响,应该加大增材制造后处理工艺与零件可靠性研究。推进液体发动机增材制造标准化体系的建立,同时,加快增材制造的发动机典型通用零部件设计标准的构建。

(5)加快增材制造技术新材料的研发和材料性能数据库的构建,这是当前增材制造领域中亟待解决的问题。一方面要加快对现有材料性能数据库的构建,以便开展增材制造产品的结构完整性和裕度研究;另一方面,根据新的应用需求应该加快相关新材料的研发,特别是低成本优性能等替代材料的研发。目前,增材制造材料所用的粉末或金属丝多是通过将棒材等成型产品通过物理化学法或机械法制备,制造成本高,周期长,对于从原材料直接制造增材制造基材的方法,还应进一步研究。

致谢:感谢航天先进制造技术研究联合基金和财政部军工稳定性科研院所支持项目的资助,感谢西安航天发动机有限公司和北京航天动力研究所提供的相关资料支持。

参考文献

- [1] 谭永华. 大推力液体火箭发动机研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(10): 1303-1308.
- [2] Madhu Thangavelu, Aliyah Arunasalam, Jeffrey Asher, et al. USC ARTEMIS Project: Maximum Impact (MAX-IM) Moon Mission Tribute to Apollo[C]. *Dubai: 71st International Astronautical Congress*, 2020.
- [3] Lee H W, Shimizu S, Yoshikawa S, et al. Satellite Constellation Pattern Optimization for Complex Regional Coverage[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020, 57(6): 1309-1327.
- [4] 刘辉, 牛翔, 李鑫, 等. 碘工质电推进技术研究综述[J]. 推进技术, 2019, 40(1): 12-25. (LIU Hui, NIU Xiang, LI Xin, et al. Reviews on Electrical Propulsion Technology Using Iodine Alternatives [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(1): 12-25.)
- [5] 戴耀松. 未来航天技术中的化学推进系统[J]. 推进技术, 1986, 7(1): 94-95. (DAI Yao-song. Chemical Propulsion System in Future Space Technology[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1986, 7(1): 94-95.)
- [6] 谭永华, 杜飞平, 陈建华, 等. 液氧煤油高压补燃循环发动机深度变推力系统方案研究[J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1201-1209. (TAN Yong-hua, DU Fei-ping, CHEN Jian-hua, et al. Study on Deep Variable Thrust System of LOX/Kerosene High Pressure Staged Combustion Engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(6): 1201-1209.)
- [7] Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies[M]. *German: Springer*, 2015.
- [8] TUAN D N, Alireza K, Gabriele I, et al. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
- [9] Kumaravelan, Gandhi R Sathish, Ramesh V C S. Applications in Various Field of Engineering and Technology [J]. *International Journal of Mechanical*, 2014, 8: 108-112.
- [10] 闻雪友, 任兰学, 祁龙, 等. 舰船燃气轮机发展现状、方向及关键技术[J]. 推进技术, 2020, 41(11): 8-14. (WEN Xue-you, REN Lan-xue, QI Long, et al. Development and Key Technologies in Marine Gas Turbine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(11): 8-14.)
- [11] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
- [12] Gradl P R, Protz C, Greene S, et al. Development and Hot-Fire Testing of Additively Manufactured Copper Combustion Chambers for Liquid Rocket Engine Applications[R]. *AIAA 2017-4670*.
- [13] Joel C Najmon, Sajjad Raeisi, Andres Tovar, et al. Review of Additive Manufacturing Technologies and Applications in the Aerospace Industry, Additive Manufacturing for the Aerospace Industry[M]. *US: Elsevier*, 2019.
- [14] Bremen S, Meiners W, Diatlov A. Selective Laser Melting[J]. *Laser Technik Journal*, 2012, 9(2).
- [15] Dongdong Gu, Xinyu Shi, Reinhart Poprawe, et al. Material-Structure-Performance Integrated Laser Metal Additive Manufacturing[J]. *Science*, 2021: 372(6545).
- [16] Gradl P R, Greene S E, Brandsmeier W, et al. Channel Wall Nozzle Manufacturing and Hot-Fire Testing Using a Laser Wire Direct Closeout Technique for Liquid Rocket Engines[R]. *AIAA 2018-4860*.
- [17] Anderson R, Terrell J, Schneider J, et al. Characteristics of Bi-Metallic Interfaces Formed During Direct Energy Deposition Additive Manufacturing Processing [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50: 1921-1930.
- [18] Bandyopadhyay A, Heer B. Additive Manufacturing of Multi-Material Structures[J]. *Materials Science & Engineering*, 2018, 129: 1-16.

- [19] Debroy T, Wei H, Zuback J, et al. Additive Manufacturing of Metallic Components—Process, Structure and Properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2018, 92: 112–224.
- [20] Paul R Gradl, Chris Protz, Kevin Zagorski. Additive Manufacturing and Hot-Fire Testing of Bimetallic GRCop-84 and C-18150 Channel-Cooled Combustion Chambers Using Powder Bed Fusion and Inconel 625 Hybrid Directed Energy Deposition[R]. *AIAA* 2019-4390.
- [21] Clinton R G. NASA's in Space Manufacturing Initiative and Additive Manufacturing Development and Quality Standards Approach for Rocket Engine Space Flight Hardware [R]. *Irvine: National Academy of Sciences*, 2016.
- [22] Jones C P, Robertson, Elizabeth H. Additive Manufacturing a Liquid Hydrogen Rocket Engine [R]. *NASA M16-5225*, 2016.
- [23] ISO/ASTM52900-2015, Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology[S].
- [24] ANSI Version 2.0, Standardization Roadmap for Additive Manufacturing[S].
- [25] SAE.AMS7000, Laser-Powder Bed Fusion (L-PBF) Produced Parts, Nickel Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, 62Ni-21.5Cr-9.0Mo-3.65Nb Stress Relieved, Hot Isostatic Pressed and Solution Annealed[S].
- [26] SAE.AMS7003, Laser Powder Bed Fusion Process[S].
- [27] ASTM F3434-20, Guide for Additive Manufacturing—Installation/Operation and Performance Qualification (IQ/OQ/PQ) of Laser-Beam Powder Bed Fusion Equipment for Production Manufacturing[S].
- [28] SAE.AMS7004, Titanium Alloy Preforms from Plasma Arc Directed Energy Deposition Additive Manufacturing on Substrate Ti-6Al-4V Stress Relieved[S].
- [29] SAE.AMS7005, Wire Fed Plasma Arc Directed Energy Deposition Additive Manufacturing Process[S].
- [30] Anon. Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals[R]. *ASTM.F3187-16*, 2016.
- [31] Anon. Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes [R]. *ASTM.F3049-14*, 2020.
- [32] ANSI.AWS D20.1/D20.1M: 2019, Specification for Fabrication of Metal Components Using Additive Manufacturing[S].
- [33] ISO/ASTM 52910:2018, Additive Manufacturing—Design—Requirements, Guidelines and Recommendations[S].
- [34] ISO/ASTM 52911-1: 2019, Additive Manufacturing—Design—Part: Laser-Based Powder Bed Fusion of Metals [S].
- [35] ASTM.F3413-2019, Guide for Additive Manufacturing—Design—Directed Energy Deposition[S].
- [36] Holger Krueger. Standardization for Additive Manufacturing in Aerospace[J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 585.
- [37] George C. Standard for Additive Manufactured Space Flight Hardware by L-PBF in Metals[R]. *NASA MSFC-STD-3716*, 2017.
- [38] George C. Specification for Control and Qualification of Laser Powder Bed Fusion Metallurgical Processes [R]. *NASA MSFC-SPEC-3717*, 2017.
- [39] Witkin David, Patel Dhruv, Helvajian, et al. Surface Treatment of Powder-Bed Fusion Additive Manufactured Metals for Improved Fatigue Life[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 28(7): 1-12.
- [40] Seltzman A H. Wukitch S J. Surface Roughness and Finishing Techniques in Selective Laser Melted Grcop-84 Copper for an Additive Manufactured Lower Hybrid Current Drive Launcher [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 160(11).
- [41] Justin Michaud. Advancing Rocket Propulsion Through Additive Manufacturing, Novel Surface Finishing Technologies and Public-Private Partnerships[J]. *Metal Additive Manufacturing*, 2020, 6(3): 1-13.
- [42] Pells G P, Shiga M. The Optical Properties of Copper and Gold as a Function of Temperature [J]. *Journal of Physics C Solid State Physics*, 1969, 2(10).
- [43] Ellis D L. GRCop-84: A High-Temperature Copper Alloy for High-Heat-Flux Applications [R]. *NASA/TM. 2005-213566*.
- [44] Henry C, Ellis D L, Loewenthal W S. Comparison of GRCop-84 to Other Cu Alloys with High Thermal Conductivities[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(4): 594-606.
- [45] Seltzman A H, Wukitch S J. Nuclear Response of Additive Manufactured Grcop-84 Copper for use in Lower Hybrid Launchers in a Fusion Environment[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 159(11).
- [46] Paul R Gradl, Chris Protz, Ken Cooper. GRCop-42 Development and Hot-Fire Testing Using Additive Manufacturing Powder Bed Fusion for Channel-Cooled Combustion Chambers[R]. *AIAA* 2019-4228.
- [47] David S Scannapieco, John J Lewandowski, Richard B Rogers. In-Situ Alloying of GRCop-42 via Additive Manufacturing Precipitate Analysis [R]. *NASA/TM 2020-5003857*.
- [48] Paul R Gradl, Christopher S Protz, David L Ellis. Prog-

- ress in Additively Manufactured Copper-Alloy GRCop-84, GRCop-42, and Bimetallic Combustion Chambers for Liquid Rocket Engines [C]. *Washington D C: 70th International Astronautical Congress*, 2019.
- [49] Fullen M D, Schneider J A. Effects of Varying Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of Blown Powder Inconel 625 [J]. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2019, 71(3).
- [50] Gradl P R, Protz C, Wammen T. Additive Manufacturing Development and Hot-Fire Testing of Liquid Rocket Channel Wall Nozzles Using Blown Powder Directed Energy Deposition Inconel 625 and JBK-75 Alloys [R]. *AIAA 2019-4362*.
- [51] Colton Katsarelis, Po Chen, Paul Gradl. Additive Manufacturing of NASA HR-1 Material for Liquid Rocket Engine Component Applications [R]. *NASA 2020-0001007*.
- [52] 左蔚, 张权明, 吴文杰, 等. K4202高温合金激光选区熔化成形微观组织研究 [J]. *火箭推进*, 2017, 43(1): 55-59.
- [53] Williams J C, Boyer R R. Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components [J]. *Metals*, 2020, 10(6).
- [54] Carter R, Draper S, Locci I, et al. Material Characterization of Additively Manufactured Components for Rocket Propulsion [R]. *NASA, GRC-E-DAA-TN27023*, 2015.
- [55] Taminger K M, Domack C S. Challenges in Metal Additive Manufacturing for Large-Scale Aerospace Applications [M]. *German: Springer*, 2020.
- [56] Omar R Mireles, Omar Rodriguez, You-ping Gao. Additive Manufacture of Refractory Alloy C103 for Propulsion Applications [R]. *AIAA 2020-3500*.
- [57] Paul R Gradl, Christopher S Protz. Channel Wall Nozzle Manufacturing Technology Advancements for Liquid Rocket Engines [C]. *Washington D C: 70th International Astronautical Congress*, 2019.
- [58] Soller S, Beyer S, Dahlhaus A, et al. Development of Liquid Rocket Engine Injectors Using Additive Manufacturing [C]. *Krakow: 6th European Conference for Aerospace Sciences*, 2015.
- [59] Haynes J. Additive Manufacturing Development Methodology for Liquid Rocket Engines [C]. *Cape Canaveral: Proceedings of Quality in the Space and Defense Industry Forum*, 2017.
- [60] Butler A. Aerojet Rocketdyne Embracing 3-D Printing for AR1 [J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2015, 252(5).
- [61] Gradl P R, Greene S E, Protz C, et al. Additive Manufacturing of Liquid Rocket Engine Combustion Devices: A Summary of Process Developments and Hot-Fire Testing Results [C]. *Cincinnati: 2018 Joint Propulsion Conference*, 2018.
- [62] Barnett G L, Bullard D B. Summary of Liquid Oxygen/Hydrogen, Direct Metal Laser Sintering Injector Testing and Evaluation Effort at Marshall Space Flight Center [C]. *Nashville: 7th Spacecraft Propulsion Subcommittee*, 2015.
- [63] Gradl P R. Rapid Fabrication Techniques for Liquid Rocket Channel Wall Nozzles [C]. *Salt Lake City: 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016.
- [64] Fint J, Kuck F, Sciorelli F. Development of Channel Wall Nozzles for Use on Liquid Propellant Rocket Engine [C]. *Arizona: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.
- [65] Gradl P R, Chris Protz, Kevin Zagorski. Additive Manufacturing and Hot-Fire Testing of Bimetallic GRCop-84 and C-18150 Channel-Cooled Combustion Chambers Using Powder Bed Fusion and Inconel 625 Hybrid Directed Energy Deposition [R]. *AIAA 2019-4390*.
- [66] Gradl P R, Greene S, Wammen T. Bimetallic Channel Wall Nozzle Development and Hot-fire Testing Using Additively Manufactured Laser Wire Direct Closeout Technology [R]. *AIAA 2019-4361*.
- [67] Gradl P R, Greene S E, Brandsmeier W, et al. Hot-Fire Testing and Large-Scale Deposition Manufacturing Development Supporting Liquid Rocket Engine Channel Wall Nozzle Fabrication [C]. *Long Beach: 65th JANNAF Propulsion Meeting/10th Liquid Propulsion Subcommittee*, 2018.
- [68] Barnett G, Bullard D B. Summary of Liquid Oxygen/Hydrogen, Direct Metal Laser Sintering Injector Testing and Evaluation Effort at Marshall Space Flight Center [C]. *Nashville: 7th Spacecraft Propulsion Subcommittee*, 2015.
- [69] Gradl P R, Valentine P E. Carbon-Carbon Nozzle Extension Development in Support of In-Space and Upper-Stage Liquid Rocket Engines [C]. *Atlanta: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2017.
- [70] Elam S K, Holmes R, McKechnie T. VPS GRCop-84 Chamber Liner Development Efforts [C]. *Las Vegas: 1st Liquid Propulsion Subcommittee*, 2004.
- [71] Gradl P R, Protz C, Fikes J, et al. Lightweight Thrust Chamber Assemblies Using Multi-Alloy Additive Manufacturing and Composite Overwrap [R]. *NASA WBS 228556.04.22.62*, 2020.
- [72] Fikes J, Vickers J, Gradl P, et al. Rapid Analysis and Manufacturing Propulsion Technology (RAMPT) [R].

- NASA FS-2018.
- [73] Garcia C P, Gradl P R. Characterizing Performance of Additively Manufacturing Regenerative Cooled Combustion Chambers Through Hot Fire Testing [C]. *Long Beach: 65th JANNAF Propulsion Meeting/10th Liquid Propulsion Subcommittee*, 2018.
- [74] Soller S, Behr R, Beyer S, et al. Design and Testing of Liquid Propellant Injectors for Additive Manufacturing [C]. *Milan: 7th European Conference on Aerospace Sciences*, 2017.
- [75] Honoré M. Structural Strengthening of Rocket Nozzle Extension by Means of Laser Metal Deposition [J]. *Proc-Spie*, 2012, 8239(2).
- [76] Sebastian Soller, Alexandre Barata, Steffen Beyer. Selective Laser Melting(SLM) of Inconel 718 and Stainless Steel Injectors for Liquid Rocket Engines [C]. *Krakow: 6th European Conference for Aerospace Sciences*, 2015.
- [77] Brox L, Wir M, Almqvist M, et al. Status Report SWAN Sandwich Nozzle Program for Ariane 6 [C]. *Washington DC: 70th International Astronautical Congress*, 2019.
- [78] 李晓红, 祁 萌, 朱洪武, 等. 先进制造技术助力“太空发射系统”研制[J]. *国防制造技术*, 2013(4): 5-9.
- [79] Protz C, Bowman R, Cooper K, et al. Additive Manufacturing of Low Cost Upper Stage Propulsion Components [R]. *NASA M14-3815*, 2014.
- [80] McMahan T. NASA Tests 3D Printed Rocket Fuel Pump and Paves Way for 3D-Printed Demonstrator Engine [J]. *Designfax*, 2015, 11(34).
- [81] Erin Betts, David Eddleman, Andy Hardin, et al. Using Innovative Technologies for Manufacturing Rocket Engine Hardware [C]. *Huntsville: JANNAF 6th Liquid Propulsion Conference*, 2011.
- [82] 左 蔚, 宋梦华, 杨欢庆, 等. 增材制造技术在液体火箭发动机应用述评[J]. *火箭推进*, 2018, 44(2): 55-65.
- [83] Timothy Kokan, Daniel J H L, Matthew R L, et al. Low Cost Small LOX/HC Launch Vehicle Enabled by Affordable Propulsion [R]. *AIAA 2014-4342*.

(编辑:梅 瑛)