

文章编号: 2095-4980(2023)04-0555-08

3D 打印在空间微波部件的应用展望

万雪曼¹, 崔万照^{*1}, 张晓萌²

(1. 中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室, 陕西 西安 710000; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100081)

摘要: 3D 打印通过流体材料或粉体材料的层片叠加, 将 CAD 设计转化为三维实体零件, 无需模具或机加工, 凭借极大的设计自由度和生产效率, 近年来逐渐用于工业产品的直接制造, 在配件减重、模型验证、复杂结构一体化成型、零部件受损修复方面具有极大的优势。本文介绍了 3D 打印技术及其分类, 举例分析该技术在航天器微波部件的应用情况, 探讨其对射频器件制备的影响。最后, 对 3D 打印在空间部件制造的关键问题和发展进行了展望。

关键词: 3D 打印; 航天应用; 空间微波部件; 在轨增材制造

中图分类号: TN10

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022360

Research progress and prospect of space 3D printing microwave devices

WAN Xueman¹, CUI Wanzhao^{*1}, ZHANG Xiaomeng²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710000, China; 2. China Academy of Space Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Additive manufacturing, known as 3D printing, is gaining more attention in component weight reduction, model verification, complex structure integration forming, and damage repairing process. 3D printing technique is based on liquid and powder materials stack layer by layer, transforming CAD data to three-dimensional solids without molding or machining. In this work, a comprehensive introduction of 3D printing application in aerospace microwave devices has been accomplished. The basic concept and comparison of 3D printing is summarized. With the understanding of the research progress in 3D printing microwave devices, the development of space 3D printing technology is prospected.

Keywords: 3D printing; aerospace applications; microwave devices; on-orbit manufacturing

3D 打印又称增材制造技术, 由美国工程师 Charles Hull 发明的立体光固化成型技术(Stereolithography, SLA)演变而来。SLA 是光敏聚合物在 UV 紫外线作用下, 在点、线、面 3 个维度凝固收缩, 逐层堆叠完成样品的立体成型。1986 年, Hull 成立了首家 3D 打印技术公司—3D system, 推出了第一台打印装备 SLA-250, 打开了 3D 打印产业发展空间。3D 打印凭借产品个性化定制、产品形状不受限制、生产轻量化制造、材料多样性等优势, 在近几十年内迅速发展, 拉开了工业 4.0 的序幕。近年来, 航天五院在空间站建设、火星探测器、运载火箭的成型制备中逐步应用 3D 打印技术作为关键技术支撑, 航天器产品减重 40%~60%, 研制周期缩短一半以上。

3D 打印技术在航天产业主要用于外形验证、复杂结构一体化成型、精密熔模铸造和零部件受损修复。3D 打印的一体化成型技术, 避免了传统制造中材料浪费现象, 降低了铸造、锻造、焊接需求, 缩短装备组装过程, 实现一体化功能集成, 目前已成为学者的研究热点。本文将介绍几种主流的 3D 打印工艺, 分析 3D 打印在微波部件中的应用, 展望 3D 打印在航天领域面临的机遇与挑战。

1 3D 打印技术分类与发展

3D 打印按材料属性分为金属 3D 打印和非金属 3D 打印。金属 3D 打印根据载能束来源分为: a) 激光束成型:

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-04-09

基金项目: 空间微波技术重点实验室基金资助项目(6142411112205)

*通信作者: 崔万照 email:cuiwanzhao@126.com

如激光选区烧结(Selective Laser Sintering, SLS)、选择性激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)、激光立体成型(Laser Solid Forming, LSF)^[1]。LSF 也称为激光近净成型(Laser Engineered Net Shaping, LENS), 或金属直接沉积制造(Directed Energy Deposition, DED)技术; b) 电子束成型: 如电子束熔融(Electron Beam Melting, EBM)、电子束选区熔融(Electron Beam Selective Melting, EBSM)、电子束自由成型(Electron Beam Freeform Fabrication, EBF); c) 等离子弧成型: 如等离子弧熔覆(Plasma Arc Weld, PAW)、电弧送丝熔覆(Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM); d) 激光-电弧复合成型: 如激光电弧复合熔覆^[2-5]。

激光增材制造是当今金属 3D 打印主流技术之一。以 LSF 为代表的同步送粉熔覆技术, 适合于大尺寸复杂构件的制备, 其机械性能优于传统铸件水平, 打印外形尺寸不受限制, 可生产梯度复合材料等跨尺度材料。类似地, WAAM 基于丝材送给成型技术, 成型件尺寸无限制, 沉积效率比 LSF 更高, 但牺牲了成型精确度, 需进行表面处理去除表面杂质和附着物。由于 WAAM 是由钨极氩弧焊和熔化极气体保护电弧焊等焊接技术演变而来, 适用的材料范围更广, 是一种低成本高效率的成型手段。以 SLS 和 SLM 为主的粉末床熔覆成型, 构件的表面精确度更高, 材料的致密度接近 100%, 适合于复杂结构件生产, 但其沉积效率比 LSF 低 1~2 个数量级^[1], 商用化装备成型尺寸一般在 400~500 mm。EBM 也属于粉末床熔覆成型, 粉末粒径为 45~150 μm , 比 SLM 的粉末粒径更大(15~53 μm), 熔池冷却速度比 SLM 慢, 成型件外形精确度和力学性能都略低于 SLM。

非金属 3D 打印的材料主要为高分子聚合物(如丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚丙交酯(PLA)、聚碳酸酯(PC)), 光敏树脂材料(如环氧树脂)和无机非金属材料(如 SiC, Al₂O₃)。成型方式包括: a) 光固化成型, 如立体光固化成型法(Stereo Lithography Appearance, SLA)、数字光处理技术(Digital Light Processing, DLP); b) 热熔成型, 如熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling, FDM); c) 激光成型, 如 SLS、分层实体制造技术(Laminated Object Manufacturing, LOM); d) 喷射成型, 如直写技术(Direct Ink Writing, DIW)、三维打印黏结技术(Three Dimensional Printing, 3DP)、喷墨打印技术(Inkjet Printing, IJP)、聚合物喷射(Poly Jet)。其中应用较为广泛的技术是 SLA、FDM 和 SLS。SLA 的原理是光敏树脂的光聚反应, 打印件表面光滑, 尺寸精确度 0.025~0.05 mm, 成型效率良好, 但因其加工成本较高, 难以走入大众市场。FDM 属于桌面打印技术, 常用材料包括 ABS、PC、聚酰胺(PA)等工程塑料, FDM 设备成本低廉, 占据了大部分 3D 打印市场, 但成型件表面精确度差强人意。SLS 以激光载能束进行粉末熔覆成型, 沉积效率低于 SLA, 生产成本低, 优点是材料适用范围广, 如陶瓷、金属、高分子等粉末材料。按照材料属性、材料熔覆方式或能量来源, 可按照表 1、表 2 划分现有的 3D 打印技术。

表1 金属3D打印技术
Table1 Metal 3D printing techniques

heat sources	process	materials	process properties
laser beam	SLS	metal powder especially Ni and Ti alloy	limited accuracy; high density
	LSF		large internal stress
	LENS		a large range of materials
electron beam	EBM	metal powder	high accuracy; high density
	EBF	metal wire	low internal stress
	EBSM		high printing speed
plasma arcs	PAW	metal wire	limited accuracy; low cost
	WAAM		twider range of materials than lasers or electron beams high accuracy
hybrid heat sources	LAHAM	metal wire	hybrid laser heat sources higher printing speed than plasma arcs

表2 非金属3D打印技术
Table2 Nonmetal 3D printing techniques

heat sources	process	materials	process properties
photopolymerization	SLA	UV liquid curable resin	high accuracy; high printing speed
	DLP		high cost
	LCD		good accuracy; low printing speed
hot melting	FDM	thermoplastics polymer filament	low cost; the most common 3D printing process
laser beam	SLS	ceramic powder	limited accuracy; low printing speed
	LOM	thermoplastics powder	high cost; high mechanical properties
	DIW		high accuracy;
extrusion-based printing	3DP	ink with rheological properties	high printing speed; low cost
	IJP		for wearable devices

2013 年，麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)学者 Skylar Tibbits 首次提出了 4D 打印理念。3D 打印的样品通过外界激励产生动态变化，设置温度、湿度、磁场、pH 值、光照等激励，试件的外形和特性会随时间或空间变化，具备自组装、自适应、自修复等智能行为。4D 打印的出现，优化了材料的编程和制备，实现了设计—生产—结构—功能一体化的智能制造。如图 1 所示，4D 打印的 Ni-Ti 支架在室温压缩变形 50% 后，通过 100 °C 加热，形变回复 99%，具有良好的形状记忆效应^[6]。因此，形状记忆合金的智能材料可设计为易运输存储结构，通过激励达成预设形状形变，如大型网状天线的空间运输等应用。4D 打印是在 3D 打印理论的基础上，要求材料根据环境进行形状、物理性能或化学性能的变化。4D 打印非金属材料以刺激响应型聚合物及其复合材料为主，如热响应形状记忆聚合物、液晶弹性体、聚乙二醇水凝胶等，采用 DIW、FDM、DLP、SLS 技术成型。4D 打印金属材料主要以形状记忆合金为代表，着重其形状记忆效应和超弹性功能，如 Ni-Ti 形状记忆合金、Ni-Mn 磁性记忆合金，成型技术为 SLM、LENS、EBSM、WAAM。表 3 总结了当下 4D 打印的材料与工艺。

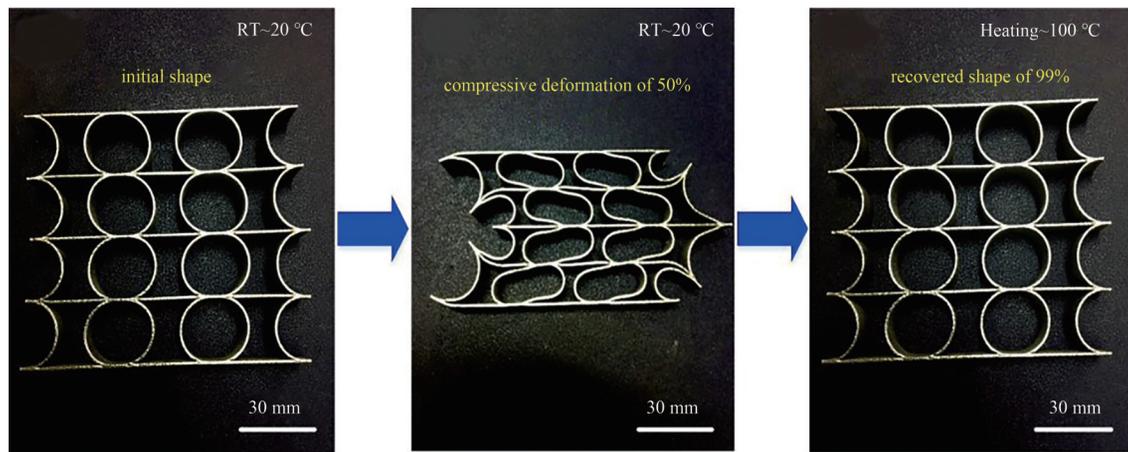


Fig.1 Shape memory effect for 4D printing Ni-Ti alloy
图 1 4D 打印 Ni-Ti 支架的形状记忆效应

表 3 4D 打印技术
Table3 4D printing techniques

printing techniques	excitation	process	materials
metal 4D printing	thermo-responsive	SLM	Ni-Ti based shape memory alloy
		LENS	Cu-based shape memory alloy
		LSF	Fe-based shape memory alloy
	magnetism field	EBSM	Ni-Mn based magnetic shape memory alloy
		WAAM	Co-Ni based magnetic shape memory alloy
nonmetal 4D printing	thermo-responsive	FDM	thermally responsive shape memory polymers
		SLA	liquid crystal elastomer
		DLP	thermal response gel
	moisture	SLS	hydrogels with anisotropic swelling performance
		DIW	
	light	PolyJet	light-responsive polymers
magnetism field		magnetism-responsive polymers	

2 3D 打印在空间微波部件的应用

微波无源器件的主流加工方式包括计算机数控(Computerized Numerical Control, CNC)加工技术、光微刻加工技术、SU-8 光刻胶技术。其中 CNC 技术发展成熟，适用于加工特定形状金属材料，但在制备 W 波段以上的高频微波器件时，器件外形尺度缩小，加工精确度提高，导致加工成本高。SU-8 规避了加工刀具对产品外形尺寸的限制，一定程度上提高了加工精确度，但光刻胶的热导率比金属热导率低 4 个数量级，使得 SU-8 制备的微波器件在高温工作时面临散热差、热应力形变等问题。3D 打印的空间微波部件的应用不受材料或工艺限制，可用于天线罩、共形天线、波导、透镜天线等复杂结构轻量化、小型化制备。

2.1 3D 打印电镀波导

微波无源器件制备以良导体、低损耗材料为主,包括金属(如铜、铝)、有机高聚物材料、陶瓷材料等。金属微波器件质量大,不适用于轻量化的射频器件。替代方案是利用非金属 3D 打印技术得到器件构型,然后在电磁波接触面进行金属化电镀工艺。该技术制备的微波器件工作频带从 10 GHz 到 300 GHz,传输模式和射频特性与金属器件基本持平。但 3D 打印塑料波导的镀层尺寸误差会恶化器件射频性能,工作于 W 及以上波段的器件较难接受^[7],因此该技术主要用于制备 W 波段以下的腔体滤波器。

郭诚团队^[8]利用 SLA 技术制备的 4 阶交叉耦合带通滤波器,中心频率 28 GHz,通带内回波损耗优于 20 dB,插入损耗 0.16 dB,结构如图 2(a)所示。该滤波器使用陶瓷-光敏树脂浆料为原材料,优化了器件的高温工作性能。另一方面,滤波器的表面开槽设计,有利于电镀液进入内表面,精简了金属化工艺。E Lopez-oliver 等^[9]提出工作在 Ku 波段(中心频率 14.125 GHz),相对带宽 5.3%,通带内平均插入损耗 0.6 dB 的高选择性 Al_2O_3 介质陶瓷滤波器。图 2(b)~(c)为该介质滤波器的照片和几何构型^[9],介质腔采用了六角形设计代替传统的圆柱形介质腔,降低了打印时的制造公差。传统的微波介质陶瓷制备采用干压法与 CNC 铣削技术,生产中难以避免尺寸误差带来的中心频率偏移等问题,而 3D 打印陶瓷滤波器,无需压制成型就能实现高精度度复杂结构的一体化制造,成型件性能稳定,利于产品快速开发。

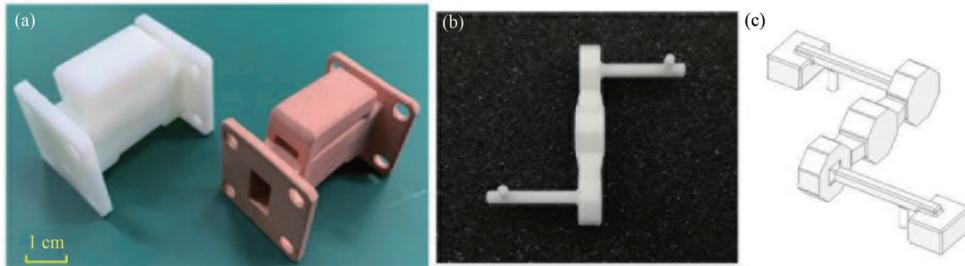


Fig.2 (a) SLA Printed bandpass filter with two DGSs^[8]; (b)~(c) 3D printed Al_2O_3 ceramic filter
图 2 (a) SLA 打印 4 阶带通滤波器^[8]; (b)~(c) 3D 打印 Al_2O_3 介质陶瓷滤波器

传统 THz 器件的生产成本高,加工难度大,近年来通过 3D 打印技术已成功制备直波导、弯曲波导、U 形波导等复杂形状的 THz 波导。T Skaik 等^[10]利用选择性激光熔融技术(Metal Laser Sintering, MLS)制备出工作于 220~330 GHz 的带通滤波器,中心频率 300 GHz,通带内回波损耗优于 10 dB。图 3(a)~(c)为 TM_{101} 模 H 波段五阶带通滤波器的构型^[10],两端的过渡圆角用于降低沉积态样品的残余应力。该实验选取 316L 不锈钢粉末,粉末颗粒半径 $< 5 \mu\text{m}$,制备出的试件机械精确度高,力学性能好。表面粗糙度对 THz 波的传输损耗有影响,因此 MLS 打印的波导要求电解抛光后处理,降低表面粗糙度。但该工艺会暴露出少量微裂纹和微孔,这些缺陷对插入损耗的增加小于 0.02 dB。为提高材料的电性能,后续使用化学镀镍加电镀金的工艺。对比镀金前后的通带响应可知,不锈钢滤波器 S_{21} 通带插损 4.7 dB,而镀金滤波器的通带插损 1.1 dB,说明镀金后,材料的导电性提升,优化了 3D 打印 THz 波导的传输特性。

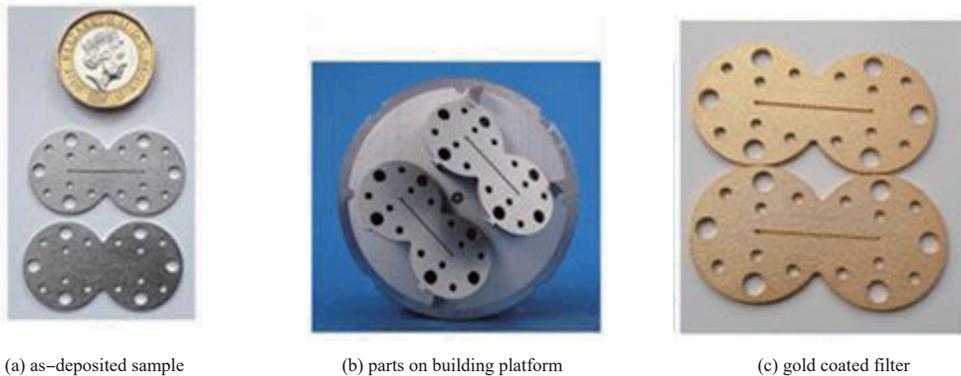


Fig.3 H band SLA printed filter
图 3 H 波段五阶带通滤波器几何构型

表 4 总结了近年来 3D 打印滤波器的射频性能,大多数研究的工作频带不超过 W 波段,主要是因为频率越高,尺寸误差和后处理工艺质量对通带响应的影响越难以控制。但低频段及 THz 波导的研究充分说明 3D 打印微波器件在小型化、轻量化制造的应用潜力。

表4 3D打印滤波器的性能比较
Table4 Comparison of 3D printing filter

process	f_0 /GHz	FBW/%	IR/dB	f_0 offset	materials	ref.
SLA	8.20	5.85	1.20	0.18	MgTiO ₃ ceramic slurry	[11]
SLA	10.00	2.50	0.47	NG	NG	[12]
FDM	10.24	6.80	1.05	2.4%	PC	[13]
FDM	11.00	8.60	0.50	10%	PLA	[14]
SLM	12.80	1.94	0.20	<0.2	Al alloy	[15]
SLA	28.00	7.00	0.16	NG	ceramic-photosensitive resin	[8]
SLM	31.00	2.84	1.35	1.1	AlSi ₁₀ Mg	[16]
SLA	87.50	11.50	0.50	2.78%	Photosensitive resin	[17]
MLS	88.34	12.10	1.94	1.84	(17-4PH)	[18]
MLS	89.10	11.10	1.00	1	(17-4PH)	[18]
MLS	132/153.5	4/4	1.31/1.37	0.92%/1.1%	316L	[19]
MLS	300.00	10.50	1.10	0.22	316L	[10]

NG: not given

2.2 3D 打印天线

3D 打印技术对制备非涅尔透镜天线、伊顿透镜、频率扫描透镜等中空结构的一体化成型有显著优势。3D 打印天线根据材料属性也可分为两类：a) 以激光或电子束为能量来源的金属打印技术，常用成型工艺为 SLM、SLS、EBM；b) 非金属打印结合金属电镀或表面喷墨后处理，相比于金属 3D 打印，其生产成本更低，更善于复杂精密结构的制造，有助于高增益、大带宽天线的生产。

王诗言等利用 SLM 技术^[20]，提出一款双腔结构的 X 波段宽带圆极化天线，3 dB 轴比带宽 1.25 GHz(9.05~10.3 GHz)，圆极化增益 9.2 dBi。相比于传统的单腔结构天线，SLM 打印的双腔天线实现一体化集成制造，减小了装配误差，天线的轴比带宽更大，辐射性能提高。B Zhang 等通过 SLM 技术^[21]，制备出工作于 E 波段的锥形喇叭天线，带内增益大于 20 dBi，进一步提升了毫米波领域 3D 打印天线的生产应用。该喇叭天线使用小于 20 μm 的极细粉末，提高试样的力学性能和致密度。但 SLM 工艺的沉积态样品表面光洁度差，平均表面粗糙度为 6 μm rms，需采用微机械打磨等抛光工艺提高天线表面打印质量。机械抛光时，需采用合适的后处理工艺，避免出现微孔或微裂纹等沉积缺陷，损伤器件的辐射特性。太赫兹天线的工作频率高，对尺寸误差、装配误差非常敏感，3D 打印技术在这方面起步较晚。李瑜华等选择 TC4 钛合金材料^[22]，内腔采用蜂窝结构设计，打印了工作在 93.9 GHz 的极小尺寸反射面天线，印证了 3D 打印技术在太赫兹器件的应用前景，有效提升高精度微波器件的生产效率。

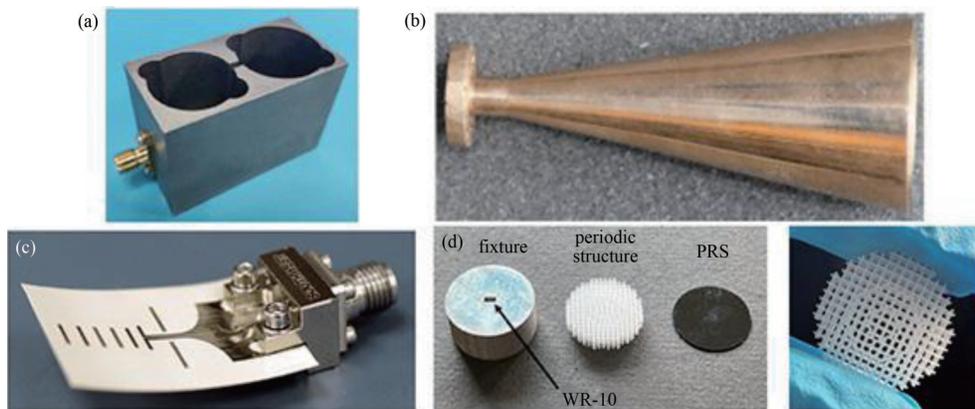


Fig.4 (a) SLM printed CP antenna; (b) SLM printed horn antenna; (c) Inkjet printed Yagi-Uda antenna; (d) SLA printed resonator antenna
图4 (a) SLM 宽带圆极化天线;(b) SLM 喇叭天线;(c) Inkjet 八木天线;(d) SLA 谐振腔天线

有机高聚物材料、陶瓷、介质材料的非金属 3D 打印技术，机械精确度更高，表面粗糙度更好，不需要电解抛光、等离子喷涂、喷砂、微机械打磨等表面处理工序，适合扭曲腔体或异形腔体成型。B K Tehrani 等^[23]通过喷墨打印技术在柔性介质基板上打印八木天线，工作频率 24.5 GHz 时，增益 8 dBi。喷墨打印技术可以在不同的介质基材上沉积纳米金属浆料，沉积态样品电导率均匀，适合于蜂窝状贴片天线、网状天线、可穿戴柔性天线的制备，如图 4(c)所示。SLA 的打印分辨力为 25~50 μm，比其他非金属 3D 打印技术的成型精确度更高，表面粗糙度更好，适用于低频段到高频段微波器件的制备。D Betancourt 等使用 SLA 技术结合金属电镀工艺得到双脊波导天线阵列^[24]，8~21 GHz 的工作频带内最大增益为 17.5 dBi。为进一步提高 3D 打印天线的工作频率，Y L Li 等

通过 3D 打印提出一款周期结构加载的谐振腔天线^[25], 如图 4(d)所示。该天线在 100 GHz 频段实测 3 dB 带宽 13% (93~106 GHz), 峰值增益 16.8 dBi, 具有低成本、易加工、紧凑化、轻量化的优势。表 5 总结了当前 3D 打印天线的辐射性能, 主流技术是非金属打印结合金属电镀工艺, 用于 W 波段以下的器件制备。

表 5 3D 打印天线的性能比较

Table 5 Comparison of 3D printing antenna

process	f/GHz	peak gain/dBi	materials	types	Ref.
SLA	8/21	17.5	resin	double-ridged waveguide antenna array	[24]
Inkjet	8.5/9.5	12.9	nanometer sliver	helical antenna with integrated lens	[26]
SLM	9.05/10.3	9.1	316L	metallic CP antenna	[20]
SLA	12/18	19.1	MgTiO ₃ ceramic	Luneburg lens	[27]
Inkjet	21/27	8.0	nanometer sliver	Yagi-Uda antenna	[23]
FDM	25/40	20.0	ABS	horn antenna	[28]
SLM	60/90	23.0	Cu-15Sn	horn antenna	[21]
SLA	93/106	16.8	resin	open resonator antenna	[25]
SLM	130/157	15.4	316L	horn antenna	[29]
SLA	215/240	18.0	ABS	integrated planar antenna	[30]

2.3 在轨 3D 打印微波部件

空间在轨 3D 打印是飞行器在轨运行的过程中, 实现成型件的原位生产。在轨制造由于空间环境特殊性, 对设备运行、材料特性、成型工艺都有影响。微重力条件下($10^{-5}\sim 10^{-6}$ g), 非重力因素在液体平衡和流动中起主导作用, 熔融态表面张力梯度分布不均, 不仅影响对流和扩散过程, 还会造成合金凝固的两相分离等问题。粉末和流体熔覆技术不适用于在轨增材制造, 一般基于丝状材料为主要形态, 非金属材料选用 FDM 技术, 金属材料以 EBF 和激光束熔化(Laser Beam Melting, LBM)技术为主。

航天器微波部件处于高真空的强辐射环境, 存在微放电风险和辐射损伤问题^[31]。微波部件一旦出现电击穿效应, 器件则会永久性失效, 恶化空间部件的工作性能。另一方面, 传统的地面制造+空间运输方案, 对大型桁架结构、超大面积天线、反射镜等大型航天器设备的运载成本高, 运载火箭体积受限制。低成本的在轨制造, 不仅能保障失效设备的紧急维修, 还解决了大规模复杂构件的运输瓶颈。

2014 年, NASA 和 Made In Space(MIS)公司在国际空间站搭建了首台 FDM 打印机, 使用 ABS 丝材执行了首次在轨增材制造。另外, 由 NASA 支持研发的“蜘蛛制造”项目, 其核心是组建太空制造系统。如图 5(a)所示, 使用碳纤维丝材在空间“编织”天线等大型航天器部件, 并在卫星上集成装配, 该项目计划于 2024 年进行空间实验。2020 年, 航天科技集团利用我国自主研发的“复合材料空间 3D 打印系统”, 得到连续碳纤维增强复合材料样品, 为空间构件的原位生产制造创造契机。2022 年, 日本三菱电机开发了能在太阳紫外线线下固化的光敏树脂新材料, 搭建了卫星天线的在轨制造系统, 实现高增益、大带宽、轻量化天线的制备, 如图 5(b)所示。该材料制备的小型天线盘可承受 400 °C 的高温, 满足地球轨道探测器的运行条件。

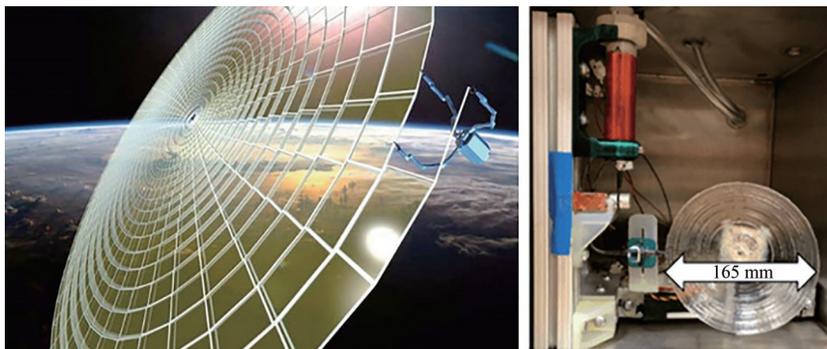


Fig.5 (a) Satellite mesh antenna of SpiderFab; (b) photo of the 3D printer
图 5 (a) 蜘蛛制造大型网状天线; (b) 日本三菱电机开发的新型树脂 3D 打印机

3 问题与展望

本文简要介绍了 3D 打印的技术分类和发展, 对 3D 打印空间微波器件的应用进行了综述。3D 打印制备的波导滤波器、天线等无源器件一般工作频带在 X 波段到 W 波段, 前沿研究已拓展至 THz 频段(0.1~10 THz)。传统的加工方式采用法兰盘拼接方式, 加工误差会降低装配精确度, 影响通带响应, 阻碍了微波无源器件的小型化、

精密化、集成化制备。3D打印微波部件的材料种类不受限,电镀工艺与金属器件相比,减少80%质量,不仅保证了机械精确度,还极大程度上节省了制备成本,缩短制造周期。3D打印技术的发展需要建立材料—工艺—制备—结构—功能理论体系,部分关键问题值得深入研究。

1) 多材料跨尺度的混合制造。材料的选择是3D打印技术核心和主要限制。目前,钛合金、不锈钢、MgAl合金等传统材料的3D打印研究较为成熟,以静态结构设计为主,关注材料的力学性能。高熵合金、形状记忆合金、陶瓷材料等功能或结构材料的3D打印仍处于起步阶段,成型工艺亟待进一步提升,重点在于多材料跨尺度功能设计。另一方面,功能梯度材料、智能超材料等新型复合材料,其组成和结构可根据不同使用场景,具备自定义刚度等级或阶梯热力学性能。功能性复合材料的研发进一步拓宽了3D打印技术的应用:体现在耦合承载、散热、吸波、通信等多功能领域。

2) 缺陷调控。裂纹、微孔、翘曲、残余应力等缺陷水平是成型件质量控制的关键因素,尤其是微波无源器件对打印精确度十分敏感,微小的误差可能会造成射频性能的恶化。调控成型工艺是提高产品质量最灵活的方式,如适当的激光功率和光斑大小有利于材料熔融,抑制球化等未融缺陷,改善成型件的微观形貌。另外,原材料的质量对成型件性能有巨大影响。金属3D打印以粉体材料为主,粉末孔洞和成型件内部气孔形态有一定对应关系,表明粉末的表面状态会影响试样的孔隙率。粉末的纯度与成型件的材料组分有关,C、O等杂质元素会影响样品的强度和疲劳性能。

3) 高精度度、低成本的在轨制造。在轨增材制造所面临的挑战包括:空间微重力和高真空环境对材料熔融、凝固过程的影响;材料表面张力等物理性能的变化;确定打印压力、扫描速率等工艺参数。利用3D打印技术,进行航天器部件的高精度度、轻量化制造,不仅可以按需制造生活物资或工具替换件,减少备件库存,精简物资供给,还可以解决大规模复杂构件的运输难题。另外,在行星表面就地取材,建设可持续太空探索地外站点也指日可待。

参考文献:

- [1] 林鑫,黄卫东. 应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J]. 中国材料进展, 2015,34(9):684-688,658. (LIN Xin,HUANG Weidong. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field[J]. Materials China, 2015,34(9): 684-688,658.)
- [2] CALIGNANO F,MANFREDI D,AMBROSIO E P,et al. Overview on additive manufacturing technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2017,105(4):593-612.
- [3] ABDULHAMEED O,AL-AHMARI A,AMEEN W,et al. Additive manufacturing:challenges,trends,and applications[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019,11(2):1-27.
- [4] MATHUR R. 3D printing in architecture[J]. International Journal of Innovative Science,Engineering & Technology, 2016,3(7): 583-591.
- [5] HERZOG D,SEYDA V,WYCISK E,et al. Additive manufacturing of metals[J]. Acta Materialia, 2016(117):371-392.
- [6] XIONG Z,LI Z,SUN Z,et al. Selective laser melting of NiTi alloy with superior tensile property and shape memory effect[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019,35(10):2238-2242.
- [7] 郭诚. 基于3D打印技术和微加工的微波和THz波导器件研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (GUO Cheng. Study on novel microwave and terahertz waveguide components based on 3D printing and micromachining[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [8] HUANG T,LIU H,GUO C,et al. 3D printed mm-wave filter using increased-height DGS resonator for spurious suppression[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs, 2022,69(11):4293-4297.
- [9] LOPEZ-OLIVER E,TOMASSONI C,CACCIAMANI F,et al. Bandpass filter based on 3D-printed ceramic resonators[C]// 2022 24th International Microwave and Radar Conference(MIKON). [S.l.]:IEEE, 2022:1-5.
- [10] SKAIK T,WANG Y,SALEK M,et al. A 3D printed 300 GHz waveguide cavity filter by micro laser sintering[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2022,12(3):274-281.
- [11] LOU Y,WANG F,LI Z,et al. Fabrication of high-performance MgTiO₃-CaTiO₃ microwave ceramics through a stereolithography-based 3D printing[J]. Ceramics International, 2020,46(10):16979-16986.
- [12] LOPEZ-OLIVER E,TOMASSONI C. 3D-printed dual-mode filter using an ellipsoidal cavity with asymmetric responses[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021,31(6):670-673.
- [13] DAHLE R,LAFORGE P,KUHLING J. 3D printed customizable inserts for waveguide filter design at X-band[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017,27(12):1080-1082.

- [14] MIEK D, SIMMICH S, KAMRATH F, et al. Additive manufacturing of E-plane cut dual-mode X-band waveguide filters with mixed topologies[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020,68(6):2097–2107.
- [15] BOOTH P, LLUCH E V. Enhancing the performance of waveguide filters using additive manufacturing[J]. Proceedings of the IEEE, 2016,105(4):613–619.
- [16] ZHANG F, GUO C, ZHANG Y, et al. A 3D printed bandpass filter using TM₂₁₁-mode slotted spherical resonators with enhanced spurious suppression[J]. IEEE Access, 2020(8):213215–213223.
- [17] SHANG X, PENCHEV P, GUO C, et al. W-band waveguide filters fabricated by laser micromachining and 3D printing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016,64(8):2572–2580.
- [18] SALEK M, SHANG X, ROBERTS R C, et al. W-band waveguide bandpass filters fabricated by micro laser sintering[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs, 2018,66(1):61–65.
- [19] YU Y, WANG Y, SKAIK T, et al. D-band waveguide diplexer fabricated using micro laser sintering[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022,12(9):1446–1457.
- [20] WANG S, GE W, ZHANG G, et al. 3D printed metallic CP antenna with dual-cavity structure and enhanced axial ratio bandwidth[C]// 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference(APMC). Hongkong, China:IEEE, 2020:236–238.
- [21] ZHANG B, ZIRATH H. A metallic 3D printed E-band radio front end[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016,26(5):331–333.
- [22] 李瑜华, 景莉莉, 成克伟, 等. 一种基于3D打印技术的太赫兹天线设计[J]. 空间电子技术, 2019,16(3):1–6. (LI Yuhua, JING Lili, CHENG Kewei, et al. A design of terahertz antenna based on 3D printing technology[J]. Space Electronic Technology, 2019, 16(3):1–6.)
- [23] TEHRANI B K, COOK B S, TENTZERIS M M. Inkjet printing of multilayer millimeter-wave Yagi-Uda antennas on flexible substrates[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015,15(1):143–146.
- [24] BETANCOURT D, GALVIS-SALZBURG C, WEINMANN F. Development and characterization of a plastic 3D-printed only external-layer metal-coated waveguide antenna array[C]// 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Dusseldorf, Germany:IEEE, 2021:1–5.
- [25] LI Y L, LUK K M. A low-cost 3D printed THz open resonator antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022,22(1):84–88.
- [26] FAROOQUI M F, SHAMIM A. 3D inkjet-printed helical antenna with integrated lens[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(16):800–803.
- [27] LOU Y H, ZHU Y X, FAN G F, et al. Design of Ku-band flat Luneburg lens using ceramic 3D printing[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020,20(2):234–238.
- [28] YAO H, SHARMA S, HENDERSON R, et al. Ka band 3D printed horn antennas[C]// 2017 Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems(WMCS). Waco, TX, USA:IEEE, 2017:110–113.
- [29] MA C, MA S, DAI L, et al. Wideband and high-gain D-band antennas for next-generation short-distance wireless communication chips[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020,69(7):3700–3708.
- [30] LACOMBE E, GIANESELO F, BISOGNIN A, et al. Low-cost 3D-printed 240 GHz plastic lens fed by integrated antenna in organic substrate targeting sub-THz high data rate wireless links[C]// 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego, CA, USA:IEEE, 2017:5–6.
- [31] 崔万照, 张娜, 封国宝, 等. 二次电子发射研究进展及其空间应用[J]. 空间电子技术, 2022,19(4):1–9. (CUI Wanzhao, ZHANG Na, FENG Guobao, et al. Research progress of secondary electron emission research and its space application[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(4):1–9.)

作者简介:

万雪曼(1995–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为空间微波新技术. email: xm.w999@outlook.com.

崔万照(1975–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为空间大功率微波技术.

张晓萌(1980–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星载荷新技术.