

3D 打印电磁功能结构研究现状与挑战



李玥萱,张聘,白龙

航空工业济南特种结构研究所 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 山东 济南 250023

摘要:电磁功能结构(EFS)因其结构复杂性与种类多样性,导致传统制造工艺难以完全满足未来电磁功能结构的制造需求。为此,3D打印技术作为一种可适用于复杂镂空结构高精高效、低成本的先进数字化技术,受到了研究学者的广泛关注与探索。本文主要围绕3D打印电磁功能结构制造技术,开展了相关新技术、新材料、新结构以及新工艺等方面的系统性调研,总结了现有3D打印电磁功能结构研究面临的挑战。

关键词:电磁功能结构; 3D打印; 吸收率; 反射损耗

中图分类号:TH162

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.08.001

随着科学技术的高速发展,电磁波技术在军事领域以及民用领域中的应用都极为广泛^[1],其中电磁功能材料可作为降低设备辐射和噪声的一种有利手段,应用于民用电子通信领域^[2-3]。在军事领域,电磁功能材料常应用于装备表面涂层或零部件,以实现雷达探测技术的抵抗^[4]。

电磁功能材料作为隐身技术和电磁兼容技术的物质基础,在提升先进武器装备以及电子产品设备灵敏度方面占有十分重要的地位。电磁功能材料按材料成形工艺和承载能力可以分为涂层型和结构型,其中电磁功能结构是一类兼具承载性的三维功能结构,它能够利用材料与结构之间的关系来实现阻抗匹配、超宽带吸收、高强度等多功能性能,以拓宽相关应用领域。

为了能够实现高性能电磁功能结构,研究人员从高性能纤维增强复合材料^[5-7]、新结构等不同角度进行设计,如三维全介质超材料、频率选择表面(FSS)结构及其他复杂镂空结构等。这些结构往往通过传统工艺制造难以实现或者加工难度大且周期长,如热压罐成形、真空辅助成形、手糊成形、树脂传递模塑成形以及模压成形等。三维(3D)打印又称增材制造(AM)技术,通过利用3D打印高精高效、低成本,可直接实现复杂镂空结构快速制造等优势,对未来相关电磁功能结构产品制造提供了更多可能性,也带来了诸多潜在应用价值。

本文利用非金属复合材料的3D打印技术及其成形原理,通过对3D打印短切纤维增强、磁性材料以及连续纤维增强材料等技术,高性能纤维增强打印材料、高导电打印墨水等新材料以及基于FSS结构、超材料、蜂窝结构等新制造工艺进行调研,总结了现有3D打印电磁功能结构在打印材料、打印尺寸以及性能等方面存在的技术难点,并对相关3D打印电磁功能结构发展趋势进行了展望。

1 三维打印类型分类

3D打印基本原理是首先将3D模型进行切片处理,再以逐层累积方式实现三维结构样件的制造(见图1)。

根据美国材料与试验协会(ASTM)3D打印技术委员会

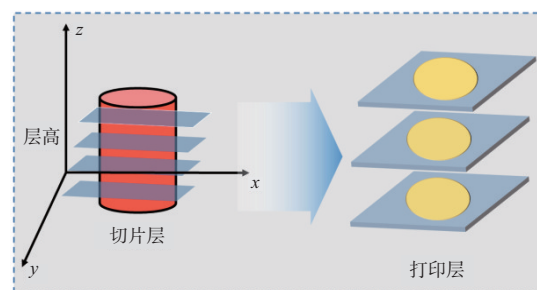


图1 3D打印离散-叠加原理

Fig.1 The principle of 3D printing discrete and superposition

收稿日期: 2023-04-24; 退修日期: 2023-06-06; 录用日期: 2023-07-05

引用格式: Li Yuexuan, Zhang Pin, Bai Long. Research status and challenges on the 3D printing electromagnetic functional structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(08): 1-10. 李玥萱,张聘,白龙. 3D打印电磁功能结构研究现状与挑战[J]. 航空科学技术, 2023, 34(08): 1-10.

标准,非金属复合材料3D打印技术主要分为熔融沉积成形(FDM)、选择性激光烧结成形(SLS)、立体光刻成形(SLA)、喷墨打印(IJP)以及挤出直写打印(EDW)等。

2020年5月5日,中国首次完成太空“3D打印”^[8](见图2),这是全球首次实现连续碳纤维增强复合材料的太空3D打印,标志着FDM成形技术已经进入了全新实际工程应用的研究阶段。



图2 国内太空FDM 3D打印设备^[8]

Fig.2 Space FDM 3D printing equipment in China^[8]

FDM成形技术优点是操作简单、低成本,耗材主要为热塑性树脂及其复合材料等丝材。设备工作原理是将丝质材料加热融化,通过带有一个微细喷嘴(直径通常为0.2~0.6mm)的喷头,利用控制模块将打印材料定向喷挤,实现层层堆积,最终获得试验样件,如纤维增强复合吸波结构、超材料等样件(见图3)。

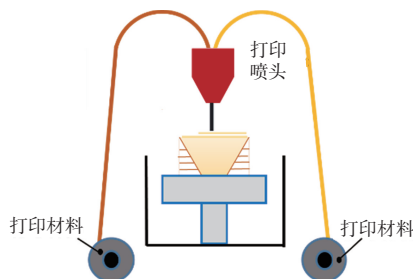


图3 FDM成形原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of FDM forming principle

文献[9]中提及美国W. H. Charls最早提出了SLA成形技术,主要应用于民用手办模型、汽车等领域。SLA成形材料多为液态光敏树脂,其成形原理是利用激光光束按所规定的扫描路径来实现各层表面特定区域内液态光敏树脂固化,从而获得最终三维结构样件,精度高达 $\pm 0.01\text{mm}$ (见图4)。现阶段,SLA成形技术主要用于三维全介质光子晶体。

IJP成形技术是一种无接触、无压力、无印版的全数字化技术,可实现在多种材料表面制备不同图案,其成形原理是利用热激发或压电效应,将打印墨水(沉积溶液)从喷头中挤压出来,精确喷射至设计区域,以层级构建后固化

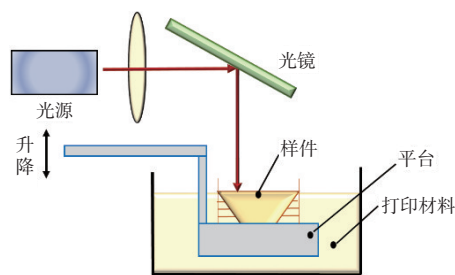


图4 SLA成形原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of SLA forming principle

的方式实现二维/三维结构的制造(打印精度可实现 $20\mu\text{m}$),如柔性吸波薄膜等(见图5)。此外,喷雾打印以及电流体打印等非接触打印技术能够实现更高精度的图案制备,喷嘴内径最小可至 100nm ,这类技术更适用于二维微纳图案制备。

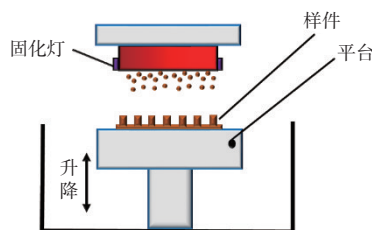


图5 IJP成形原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of IJP forming principle

EDW成形技术最早源于1998年美国圣地亚(sandia)国家重点实验室J. Cesarano等提出的自动注浆成形技术,起初主要是针对陶瓷基三维成形技术,随后衍生出柔性树脂基、纤维增强基三维结构成形。与FDM对比,EDW成形3D打印材料选择自由度高,可以是固体丝材、颗粒或是一类高黏度液体浆料。这种浆料储存于与喷头相连的料筒中,利用计算机系统完成三维运动,通过机械/气动压力实现浆料在打印平台上的预成形(见图6)。通过对喷嘴设计,EDW也可以实现高精微纳尺度三维结构制造,如柔性超材料、柔性吸波贴片以及镂空吸波结构样件等。

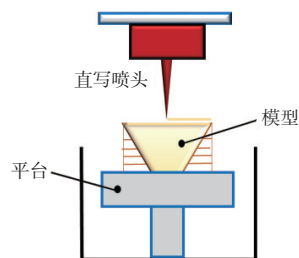


图6 EDW成形原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of EDW forming principle

2 3D 打印电磁功能结构研究进展

3D 打印电磁功能结构属于一类多学科交叉融合性的研究。近年来,国内外研究学者围绕3D打印电磁功能结构的新技术、新材料、新结构与新工艺等方面展开了深入研究,以进一步提高电磁功能结构的先进制造技术水平,提升其实际应用价值。

2.1 新技术

通常情况下,商业3D打印设备均配备专用打印材料,以保证打印结构样件的成形精度。近年来,由于复合材料在工程应用中的需求不断多元化,导致现阶段商用打印设备无法满足功能零部件的需求。因此,国外研究人员围绕现阶段问题展开了对基于非金属复合材料的3D打印设备开发工作,如美国 MarkOne 3D 打印机(见图7),一个喷嘴用于沉积尼龙(PA)材料^[10],另一个用于打印纤维增强材料^[11-14]。其中,沉积PA喷嘴对结构样件的完整性起到关键作用,通过对结构样件每层材料进行配比设计和对打印工艺进行调整来增加PA与纤维的浸润面积,从而提高整体打印样件的力学性能。

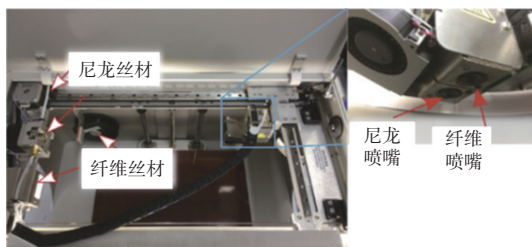


图7 基于PA/纤维增强复合材料的多喷头 MarkOne 3D 打印机

Fig.7 Multi-nozzle MarkOne 3D printer with fiber reinforced PA composite

美国哈佛大学工程与应用科学学院 R. R. Jordan 等^[15]提出一种“旋转3D打印喷头”,通过对喷嘴速度和旋转速率进行精确设计,从而实现了对聚合物基质中纤维排列进行编程(见图8)。经试验表明,旋转打印头比非旋转喷头有助于样件具有更优异的拉伸强度(见图9)。这项技术有望未来应用于高性能电磁镂空结构样件的制造。

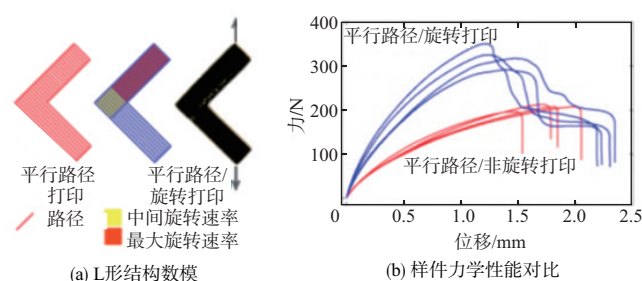
此外,美国 D.Kokkinis 等^[16]提出了一种基于四喷头磁驱动复合材料3D打印技术,利用磁极化方向调控复合材料中磁性纳米粒子的分布,从而实现各项异性磁性纳米粒子的定向排布,如图10所示。

常用的除了上述PA(ABS)/连续纤维增强复合材料以外,意大利米兰理工大学 M.Invernizzi 等^[17]利用紫外线(UV)辅助 FDM 成形技术实现了纤维增强机翼及船桨等零部件(见图

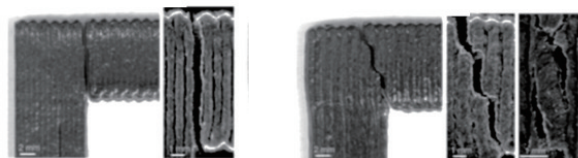


图8 哈佛大学“旋转3D打印”制造技术

Fig.8 “Rotational 3D printing” manufacturing technology by Harvard University



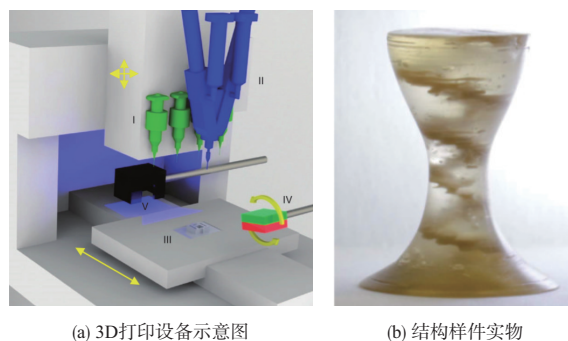
(a) L形结构数模 (b) 样件力学性能对比



(c) 平行打印缺陷 (d) 旋转打印缺陷

图9 L形数模及其打印样件力学性能对比

Fig.9 L-shaped model and comparison of mechanical properties of printing samples



(a) 3D打印设备示意图 (b) 结构样件实物

图10 磁驱动3D打印技术

Fig.10 Magnetic-field-induced 3D printing technology

11)。其中,图11(a)为机翼数模,图11(b)为船桨数模,图11(c)~图11(f)为相关玻璃/碳纤维增强结构机翼样件,图11(g)~图11(h)为相关玻璃/碳纤维增强结构船桨样件。

整个打印过程温度可控制到140℃,有效地实现了低温固化的快速制备工艺。

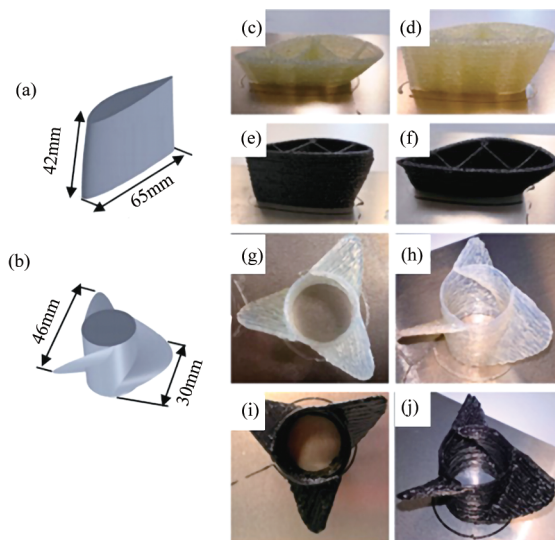


图11 纤维增强复合材料3D打印相关样件

Fig.11 Carbon reinforced composite 3D printing samples

国内方面,目前可用于制备电磁功能结构的商用3D打印设备供应商(包括上海复志、湖南华曙高科、陕西聚高科技、厦门威士坦等)大多限于短切纤维增强热塑性样件制备;基于3D打印连续纤维增强样件制备现阶段正处于研发阶段,如西安交通大学、西北工业大学、南京航空航天大学、北京理工大学、中南大学以及中科院等国内科研院所及相关高校。Tian等^[18]通过3D打印设备将连续纤维与热塑性树脂材料以共挤出成形方式,制备了高性能连续纤维增强热塑性复合材料(见图12)。

2.2 新材料

随着功能零部件需求的不断升级,聚醚醚酮(PEEK)^[19-24]、聚四氟乙烯(PTFE)^[25-26]等高分子材料因其优异的机械性能以及耐酸碱、耐温、透波性等,在航空航天领域也备受关注,如Impossible Objects公司发展了一种高性能碳纤维增强PEEK 3D打印制造技术。该技术得到的结构样件具有质轻(比传统铝制品减重约50%)、高强度(保持铝75%刚性)以及耐高温(可承受250℃以上)特性。2014年牛津性能材料(OPM)公司研制出一种3D打印材料OXFAB-N,并首次应用于航空航天领域^[27]。

此外,碳纤维增强复合材料不仅满足一定的承载能力,还具有较高导电性,属于电磁功能结构中最常见的一类。美国得克萨斯理工大学Ning等^[28]通过分析碳纤维含量对3D打印ABS/碳纤维复合材料的孔隙率以及力学性能的影响,结果发现结构样件的孔隙率随纤维含量的增加而增大;结构样件的拉伸强度随纤维含量的增加呈增长后下降趋势(见图13)。当纤维含量达到质量分数7%时,拉伸强度高

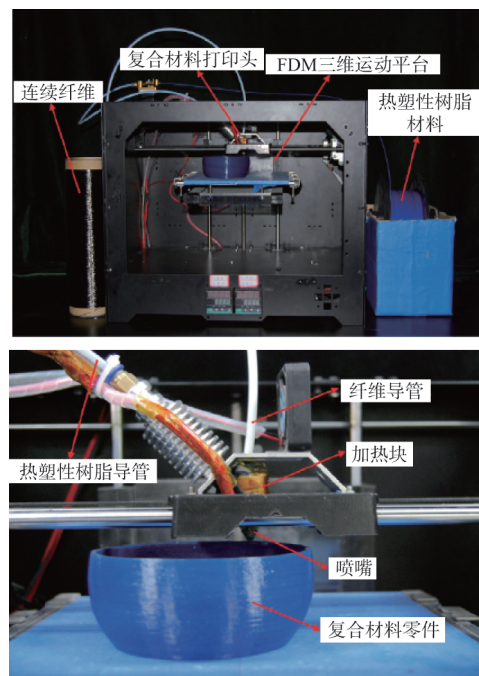


图12 连续纤维增强热塑复合材料3D打印平台

Fig.12 3D printer of continue fiber reinforced thermoplastic composites

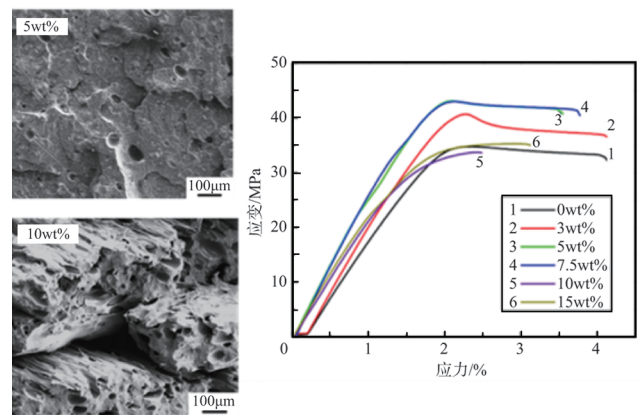


图13 碳纤维填料对ABS复合材料机械性能影响

Fig.13 The influence of carbon fiber filler on the mechanical properties of the ABS composite

达43MPa;当纤维含量为质量分数10%时,孔隙率达到最大值。

此外,K. Chizari等^[29]研制出了一种基于PLA/CNT的导电墨水(电导率可实现5000S/m)并利用直径200μm的3D打印喷嘴制备了具有电磁屏蔽性能的网栅结构(见图14)。

河北科技大学Ma等^[30]也利用EDW 3D打印技术制备了硅酸盐水泥/铜基平板结构(见图15)。经试验对比及性能测试结果可以看出,以质量分数25%铜屑与质量分数6%铜粉作为填料时,整体结构样件在1~18GHz内可实现

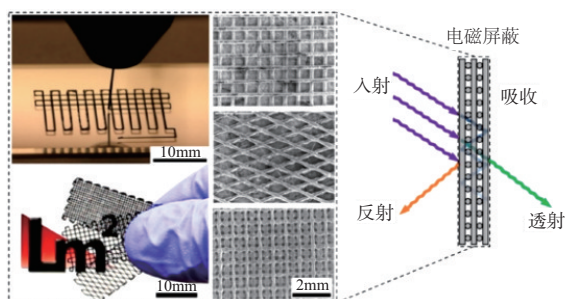


图 14 高精度 3D 打印网栅结构及其微观形貌结构

Fig.14 3D printing lattice structure with high accuracy and its micro-scale morphological structure

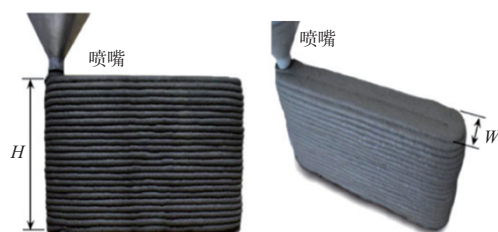


图 15 EDW 3D 打印硅酸盐/铜基平板结构制备

Fig.15 Fabrication of silicate copper based flat structure by EDW 3D printing technology

3.38GHz 带宽。

Meng 等^[31]通过对 3D 打印碳化硅(SiC)/石英陶瓷多孔吸波材料的研究,结果表明该材料的电性能随烧结温度增加而降低,当环境温度为 800℃时,结构样件仍可实现优异的电磁吸收效果。

2.3 新结构新工艺

近年来,电磁功能结构设计与制造也成为研究学者关注的热门话题,如 FSS 结构、超材料以及电磁蜂窝结构等。由于上述结构具有单元周期尺寸小、复杂镂空等特点,导致传统工艺加工难度大,而 3D 打印技术替代传统制造工艺或与传统工艺相结合,可实现复杂电磁功能结构样件的制备,如日本岗山大学 I. Atsushi 等^[32]利用 FDM 成形工艺结合选择性电镀工艺研制了一类基于银-聚乳酸(Ag/PLA)型环状 FSS 结构(见图 16)。其中,该试验利用 Sn^{2+} 与 Ag^+ 的氧化还原反应,实现了 PLA 材料表面电镀 35μm 银膜。经测试结果表明,当电磁波入射角度为 90°时,基于 Ag/PLA 基材的开口环状 FSS 结构可实现 4.0~7.0GHz 频段内 90% 以上透波率。

韩国中央大学 Lim 等^[33]利用 FDM 成形技术研制了一款基于 PLA/导电银浆的超薄、轻质十字阶梯型耶路撒冷 FSS 结构。其中,通过调控阶梯层数能够定向调控吸收频段以及吸收率,如图 17(a)所示。经模拟仿真与测试验证表明,基于三层十字阶梯型 FSS 结构在 5.18GHz 频点处能够

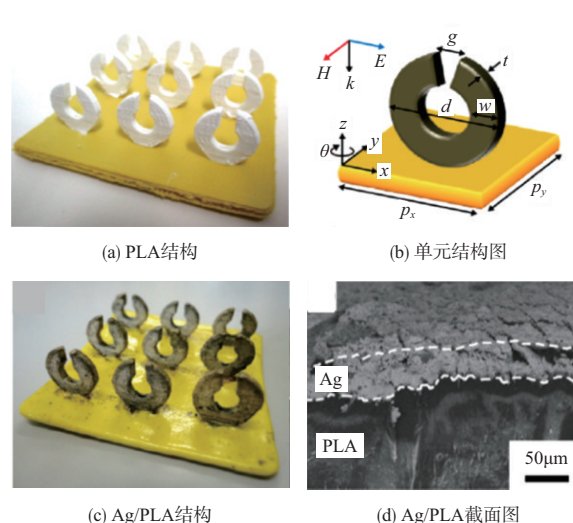


图 16 基于 FDM 成形/电镀工艺的开口环状 FSS 结构制备
Fig.16 Fabrication of open ring FSS structure based on FDM forming and electroplating process

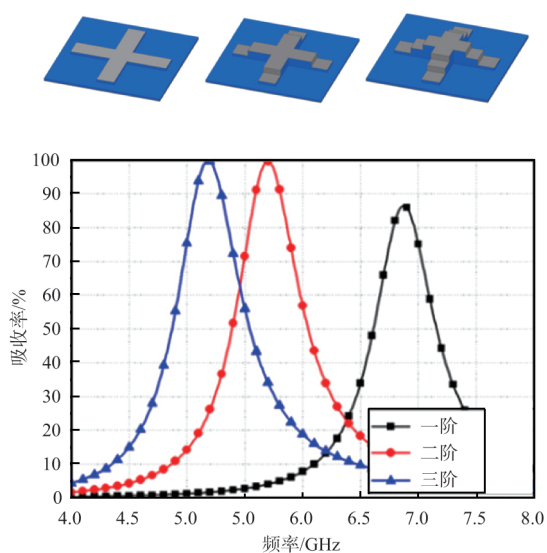
实现最大吸收率(99.8%),并且整体结构样件对入射波极化具有不敏感性,如图 17(b)所示。

除了 3D 打印 FSS 类电磁功能结构外, Lleshi 等^[34]将 FDM 成形 3D 打印技术应用于金属基电磁超材料制备,研制出一款铜基超材料,如图 18 所示。通过对该超材料工作频段进行调控设计,实现了该结构在 7.6~17.4GHz 频段内吸收率大于 90% 的吸收效果。但是由于 3D 打印成形工艺精度不理想,导致超材料外形缺陷较多。

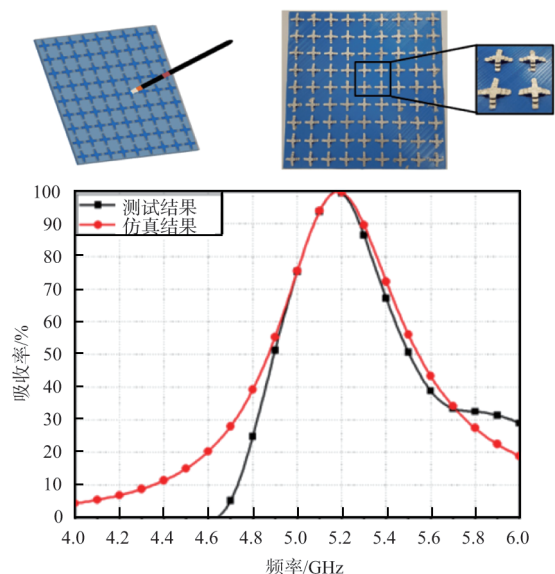
与平板吸波结构相比,电磁蜂窝结构因其轻质、高模量以及优异的电磁性能被看作最具有工程应用价值的一类电磁功能结构。3D 打印电磁蜂窝结构是一次全新的技术与材料革新,它解决了传统工艺中多流程浸渍过程,实现了电磁蜂窝结构的高效、低成本制造,但是目前 3D 打印吸波蜂窝的体密度仍较大。

Vincent 等^[35]通过以 PLA/炭黑作为基材,利用 FDM 成形工艺制备了多尺度吸波蜂窝结构(见图 19)。研究结果表明,FDM 成形工艺能够实现传统制造工艺难以制备的复杂高性能蜂窝拓扑结构设计,且这类吸波蜂窝结构能够在 12.5~18GHz 内比传统蜂窝结构具有更优异的电磁吸收效果。

目前,国内基于 3D 打印电磁功能结构的研究机构主要有北京航空航天大学、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、西安交通大学、空军工程大学、国防科技大学,以及其他相关科研机构,涉及的结构类型包括蜂窝芯结构、平板结构、光子晶体、FSS 结构等。空军工程大学



(a) 不同阶梯层数对吸收率影响



(b) 三层十字阶梯型结构吸收率实测与仿真对比

图 17 3D 打印十字阶梯型 FSS 结构

Fig.17 3D printing cross-shaped FSS structure

Jiang 等^[36]结合 FDM 成形技术与丝网印刷技术制备了轻质蜂窝结构,如图 20 所示。通过在 3D 打印 PLA 蜂窝壁上印刷碳层,实现了三维轻质蜂窝芯材结构(密度为 0.255g/cm^3)在 $3.53\sim 24\text{GHz}$ 频段内强吸收效果(吸收率 $> 90\%$),提高了 TM 极化条件下斜入射角($0\sim 70^\circ$)的吸波性能。西安电子科技大学 Huang 等^[37]建立在打印墨水研发基础上,优化了硅基纳米陶瓷基喷墨 3D 打印工艺,实现了低介电常数、低介电损耗型耐高温($< 400^\circ\text{C}$)陶瓷薄膜的制备(见图 21)。西安交通大学 Yin 等^[38]利用光固化 SLA 成形工艺首次制造了基于木堆积单元结构的 SLA 光子晶体,可实现 Ku 波段较好的电

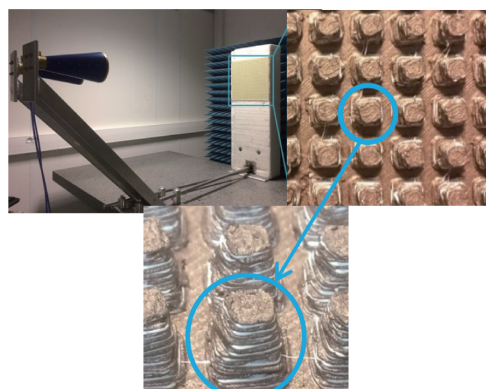


图 18 3D 打印铜基锥体多层超材料

Fig.18 3D printing copper-based cone multi-layer metamaterial

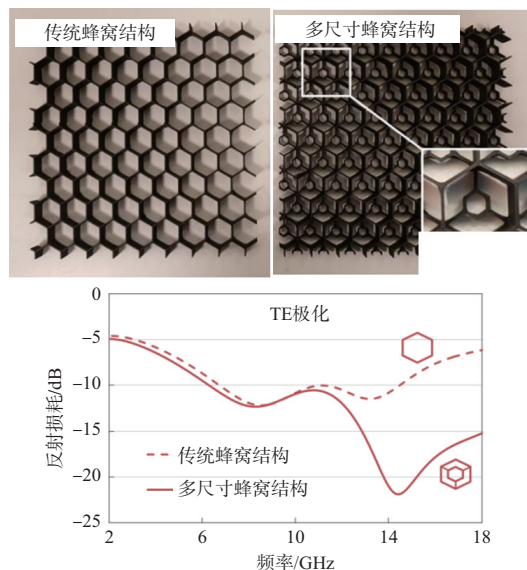


图 19 3D 打印蜂窝结构

Fig.19 3D printing honeycomb structure

磁吸收性能(见图 22)。

此外,Tian 等^[39]也利用相同单元堆积结构形式设计了一款雷达吸波体,通过 SLA 成形 3D 打印技术实现了超材料样件制备。经测试结果表明,该吸波体在 $12\sim 18\text{GHz}$ 内具有 90% 以上吸收率(见图 23)。

3 总结与展望

当前,3D 打印技术优势在于可实现复杂异型构件的高精高效、低成本快速制造,但是国内外针对 3D 打印电磁功能结构的研究仍处于前沿探索阶段,在以下几个方面仍存在共性技术难点,具体如下:

(1)电磁特性打印材料种类局限性。目前商用 3D 打印材料大多为 PA、PLA、ABS 以及 PEEK 及其短切碳纤/短切

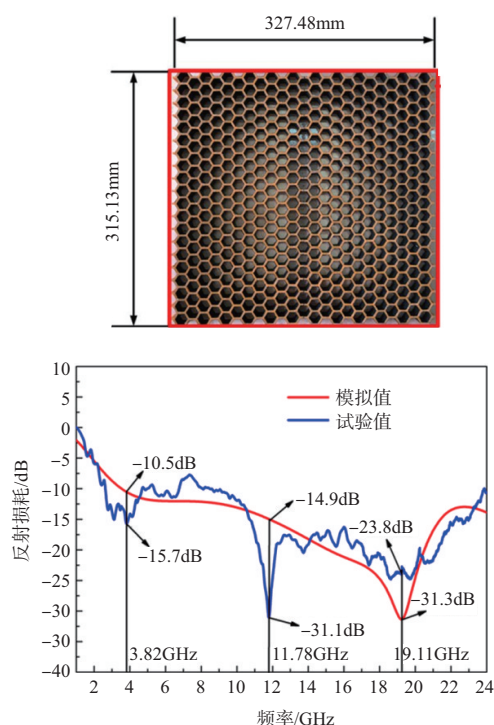


图20 基于SLA/丝网印刷成形的三维蜂窝结构

Fig.20 Three-dimensional honeycomb structure based on the SLA/screen printing molding method

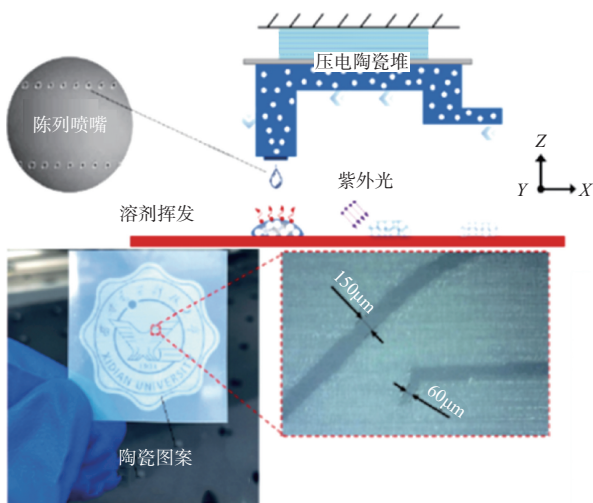


图21 硅基纳米陶瓷基喷墨打印技术

Fig.21 Si-based nano ceramic inkjet printing technology

玻纤等复合物, 这些材料大多表现为电磁吸收能力差且吸收带宽窄等特点, 难以直接满足轻质、宽频、强吸收及其他多功能要求。

(2) 大尺寸复杂电磁功能平面/曲面结构样件3D打印精度局限性。电磁功能结构因其材料的多样性, 导致单一PLA/ABS/PA/PEEK等材料难以满足需求。因此, 现有工业3D打印设备也难以直接实现基于多样性打印材料的结构样件高

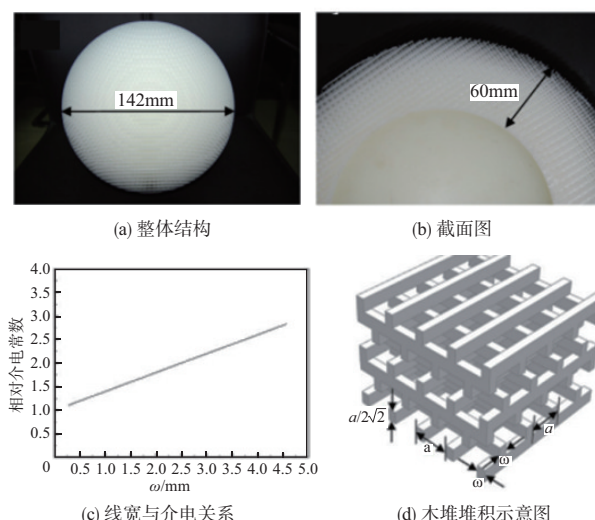


图22 3D打印光子晶体结构

Fig.22 3D printing photonic crystals structure

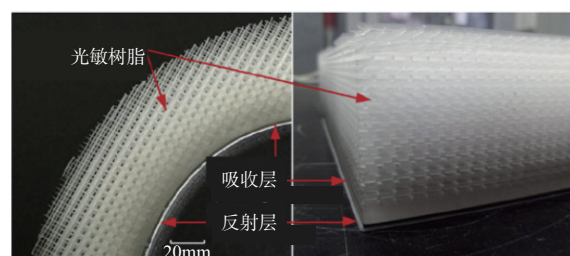


图23 3D打印光子晶体吸波结构截面图

Fig.23 Section graph of 3D printing photonic crystals absorber

精度加工, 通常需要设备与材料的个性化定制。此外, 针对复杂镂空结构的高精度3D打印制造也具有一定挑战性。

(3) 缺少试验样件的全面综合分析。当前3D打印电磁功能结构的研究主要集中于成形工艺与性能方面, 但对于材料的微观结构检测以及其他服役性方面探究较少, 不利于该类电磁功能结构在未来工程领域中的应用。

未来电磁功能结构3D打印技术将以功能需求为导向, 利用3D打印技术可实现复杂结构、非金属复合材料快速制造的优势, 通过对材料、结构以及工艺等方面进行优化, 促进高精高效、多功能电磁功能结构的制造。

AST

参考文献

- [1] 王文涛. 天线雷达散射截面分析与控制方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
Wang Wentao. Research on analysis and control method of antenna radar cross section[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)

- [2] Yi B, Liu P G, Yang C, et al. Analysis of absorptive and transmissive radome[C]. The 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and Electromagnetic Compatibility Technologies (MAPE 2015), 2015.
- [3] Guterman J, Moreira A A, Peixeiro C, et al. Wrapped microstrip antennas for laptop computers[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(4): 12-39.
- [4] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. Ruan Yingzhen. Radar cross section and stealth technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [5] 徐国跃, 钱洪, 方罡, 等. 多频段隐身材料的研究现状与进展[J]. 航空科学技术, 2022, 33(1): 1-9.
Xu Guoyue, Qian Qi, Fang Gang, et al. Research status and progress of multi frequency band stealth materials[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(1): 1-9. (in Chinese)
- [6] 刘伟, 韦国科, 姬广斌. Fe-MOF 衍生轻质高效雷达吸波材料的构筑及电磁性能研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(4): 65-72.
Liu Wei, Wei Guoke, Ji Guangbin. Research on the construction and electromagnetic properties of lightweight and highly efficient microwave absorption materials derived from Fe-MOF [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(4): 65-72. (in Chinese)
- [7] 杨志鸿. 片状 Sendust/MnO₂ 复合材料的制备及其微波吸波性能的研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(8): 66-72.
Yang Zhihong. Research on preparation of sheet-like sendust/MnO₂ composite and its microwave absorption properties[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(8): 66-72. (in Chinese)
- [8] 高彬彬. 中美首次太空 3D 打印对比[J]. 军民两用技术与产品, 2020(8): 28-32.
Gao Binbin. Comparison of the first space 3D printing between china and the united states[J]. Dual Use Technologies & Products, 2020(8): 28-32. (in Chinese)
- [9] 王广春, 赵国群. 快速成型与快速模具制造技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
Wang Guangchun, Zhao Guoqun. Rapid prototyping and rapid tooling manufacturing technology and its application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [10] 汪艳, 陈神星, 傅铁, 等. 一种用于 3D 打印的耐高温尼龙丝材及其制备方法和应用其进行 3D 打印的方法: CN 106433108A [P]. 2019-03-26.
Wang Yan, Chen Shenxing, Fu Tie, et al. A preparation method of 3D printing high-temperature resistant wire nylon materials, and applying method for 3D printing nylon: CN 106433108A [P]. 2019-03-26. (in Chinese)
- [11] Hao W, Liu Y, Zhou H, et al. Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites[J]. Polymer Testing, 2018, 65: 29-34.
- [12] Hao W, Liu Y, Wang T, et al. Failure analysis of 3D printed glass fiber/PA12 composite lattice structures using DIC[J]. Composite Structures, 2019, 225: 111192.
- [13] Hao W, Liu Y, Huang X, et al. A unit-cell model for predicting the elastic constants of 3D four directional cylindrical braided composite shafts[J]. Applied Composite Materials, 2018, 25 (3): 619-633.
- [14] 方鲲, 向正桐, 张戡, 等. 3D 打印碳纤维增强塑料及复合材料的增材制造与应用[J]. 新材料产业, 2017(1): 32-37.
Fang Kun, Xiang Zhengtong, Zhang Jian, et al. Additive manufacturing and application of 3D printed carbon fiber reinforced plastics and composite materials[J]. New Material Production, 2017(1): 32-37. (in Chinese)
- [15] Jordan R R, Brett G C, Jochen M, et al. Rotational 3D printing of damage-tolerant composites with programmable mechanics [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(6): 1198-1203.
- [16] Kokkinis D, Schaffner M, Studart A R. Multimaterial magnetically assisted 3D printing of composite materials[J]. Nat Commun, 2015, 10: 6.
- [17] Invernizzi M, Natale G, Levi M, et al. UV-Assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites[J]. Materials, 2016, 9(7): 583.
- [18] 田小永, 杨春成, 曹毅, 等. 一种连续长纤维增强复合材料 3D 打印机及其打印方法: CN104149339A [P]. 2014-11-19.
Tian Xiaoyong, Yang Chuncheng, Cao Yi, et al. A continuous long fiber reinforced composite material 3D printer and its printing method: CN104149339A [P]. 2014-11-19. (in Chinese)
- [19] 王新宇, 阮诗伦, 常保宁, 等. 聚醚醚酮材料改性、加工与应用 [J]. 精密成形工程, 2016, 8(1): 27-31.
Wang Xinyu, Ruan Shilun, Chang Baoning, et al. Modifica-

- tion, processing and application of poly(ether-ether-ketone) materials[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8 (1): 27-31. (in Chinese)
- [20] 刘川. 连续碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的制备及性能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2015.
- Liu Chuan. Research on preparation and properties of carbon fiber reinforced polyether ether ketone composites[D]. Jilin: Jilin University, 2015.(in Chinese)
- [21] 张辉, 方良超, 陈奇海, 等. 聚醚醚酮在航空航天领域的应用[J]. 新技术新工艺, 2018(10): 5-8.
- Zhang Hui, Fang Liangchao, Chen Qihai, et al. Application of poly(ether-ether-ketone) in the aerospace field[J]. New Technology & New Process, 2018(10): 5-8. (in Chinese)
- [22] 文怀兴, 刘杏, 陈威. 聚醚醚酮复合材料的改性研究及应用进展[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(1): 123-127.
- Wen Huaixing, Liu Xing, Chen Wei. Research and application progress on modification of poly(ether-ether-ketone) composite materials[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(1): 123-127. (in Chinese)
- [23] Wei T Y, Wang J, Yu X Z, et al. Mechanical and thermal properties and cytotoxicity of Al_2O_3 nano particle-reinforced poly(ether-ether-ketone) for bone implants[J]. Rsc Advances, 2019, 9(9): 34642-34651.
- [24] Marcomini A L, Rego B T, Bretas R E. Improvement of the short- and long-term mechanical properties of injection-molded poly(ether-ether-ketone) and hydroxyapatite nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(7): 44476-44490.
- [25] 谢苏江. 聚四氟乙烯的改性及应用[J]. 化工新型材料, 2002, 30(11): 26-30.
- Xie Sujiang. Modifying of poly (tetrafluoroethylene) and its application[J]. New Chemical Materials, 2002, 30(11): 26-30. (in Chinese)
- [26] 师延龄, 王文东. 碳纤维填充聚四氟乙烯的性能及应用[J]. 有机氟工业, 2005(3): 23-25.
- Shi Yanling, Wang Wendong. Properties and application of PTFE filled with carbon fiber[J]. Organo-Fluorine Industry, 2005(3): 23-25. (in Chinese)
- [27] Wang X, Jiang M, Zhou Z W, et al. 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A review and Prospective[J]. Composites Part B-Engineering, 2017, 110: 442-458.
- [28] Ning F, Cong W, Qiu J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. Composites Part B Engineering, 2015, 80: 369-378.
- [29] Chizari K, Arjmand M, Liu Z, et al. Three-dimensional printing of highly conductive polymer nanocomposites for EMI shielding applications[J]. Materials Today Communications, 2017(11): 112-118.
- [30] Ma G W, Sun J B, Wang L, et al. Electromagnetic and microwave absorbing properties of cementitious composite for 3D printing containing waste copper solids[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 94: 215-225.
- [31] Meng Z, Li R, Zheng M, et al. Fabrication and electromagnetic wave absorption performance of quartz ceramics containing inductive SiC screens[J]. Ceramics International, 2019, 45(10): 13561-13566.
- [32] Atsushi I, Taiki K, Nobuyuki T, et al. Selective electroless plating of 3D-printed plastic structures for three-dimensional microwave metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111 (18): 183102.
- [33] Lim D, Yu S, Lim S. Miniaturized metamaterial absorber using three-dimensional printed stair-like Jerusalem cross[J]. IEEE Access, 2018(6): 43654-43659.
- [34] Lleshi X, Grelot R, Hoang T, et al. Wideband metal-dielectric multilayer microwave absorber based on a single step FDM process[C]. 2019 49th European Microwave Conference (EuMC), 2019.
- [35] Vincent L, Azar M, Alexis C, et al. Study of 3D printed Honeycomb microwave absorbers[C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. IEEE, 2019.
- [36] Jiang W, Yan L L, Ma H, et al. Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a three-dimensional metamaterial absorber based on 3D printed honeycomb[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4817.
- [37] Liang C Y, Huang J, Wang J J, et al. Three-dimensional inkjet printing and low temperature sintering of silica-based ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(5): 2289-2294.
- [38] Yin M, Tian X Y, Wu L L, et al. A Broadband and

omnidirectional electromagnetic wave concentrator with gradient woodpile structure[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 19082-19090.

ization of radar absorbing structure based on gradient-refractive-index metamaterials[J]. Composites Part B, 2018, 132: 178-187.

[39] Yin L X, Jonathan D F, Tian X Y, et al. Design and character-

Research Status and Challenges on the 3D Printing Electromagnetic Functional Structure

Li Yuexuan, Zhang Pin, Bai Long

Aviation Key Lab of Science and Technology on High-Performance Electromagnetic Windows, AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite, Ji'nan 250023, China

Abstract: Due to the complexity and diversity of electromagnetic functional structures (EFS), traditional manufacturing has limited the requirement of the fabrication of the EFS. Thereby, 3D printing as the high-efficiency and cheap advanced digital method applied in the fabrication of the complex hollow /curved structure has received widespread attention and exploration from research scholars. This paper mainly focused on the manufacturing technology of EFS based on 3D printing and systematically investigated relevant new technologies, materials, structures, and manufacturing, and summarized the challenges in the existence of 3D printing EFS.

Key Words: EFS; 3D printing; absorptivity; reflection loss