

引文格式:陈龙, 于浩文, 卢立成, 等. 增材制造在飞行器宽频吸波领域的应用及展望[J]. 航空制造技术, 2026, 69(17): 26010030.

CHEN Long, YU Haowen, LU Licheng, et al. Applications and prospects of additive manufacturing in broadband wave absorption for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(17): 26010030.

增材制造在飞行器宽频吸波领域的应用及展望

陈 龙¹, 于浩文¹, 卢立成¹, 刘战强¹, 吴 琼², 吴 霄³, 贾 珍³

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

3. 航空工业济南特种结构研究所, 济南 250031)

[摘要] 随着现代雷达探测系统向多频段、超宽带及多基站协同探测模式的演进, 传统依赖表面涂覆的单一隐身技术已难以满足未来飞行器对宽频、轻量化及多功能集成的严苛要求。增材制造技术凭借其极高的几何设计自由度和多材料成形能力, 为突破传统吸波结构的物理极限提供了革命性的解决方案, 推动隐身技术向“结构-功能一体化”范式转变。本文系统综述了增材制造技术在飞行器宽频吸波领域的最新研究进展, 深入评述了适用于增材制造的吸波材料体系, 以及主流增材制造工艺的原理与特性, 并进一步论述了通过宏微观跨尺度设计实现“承载-隐身-防热”多功能协同的工程应用实例, 最后总结了当前面临的挑战, 以及未来宽频吸波领域发展的核心方向。

关键词: 增材制造; 宽频吸波; 结构-功能一体化; 超材料; 智能隐身

中图分类号: V261.8

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.26010030



陈 龙

副教授, 博士生导师, 主要从事功能复合材料结构设计、功能一体化涂层设计、陶瓷基复合材料制备及飞机防/除冰等研究。

在现代高科技战争与电子对抗的背景下, 先进的地面及空对空雷达探测平台, 使得飞行器隐身技术的需求急剧增加, 低可探测性已成为未来飞行器战场生存能力的核心决定因素^[1-4]。先进的反隐身雷达系统正迅速向多频段、超宽带及多基站协同探测模式演进, 已演变为一个覆盖陆、海、空, 工作频段从 VHF 扩展至 L、S、C、X 波段, 乃至 Ka 波段的多维、多频段协同探测体系, 使得传统窄带隐身技术面临严峻挑战^[5]。基于增材制造的超材料吸波结构是突破传统材料带宽限制, 实现宽频与广角隐身的重要途径^[6]。

早期隐身飞行器, 依赖于外形设计及吸波涂层, 比如磁性铁氧体和导

电聚合物涂层, 但此类材料难以在保持薄厚度的情况下实现低频段的宽带吸收^[7]。例如, 早期的隐身飞行器 F-117A, 主要依赖独特的多面体外形设计, 以及表面喷涂厚重的铁氧体涂层实现隐身^[8]。对于追求气动性能及长航程的飞行器而言, 铁氧体等传统磁性吸波剂因其固有的高密度、耐腐蚀性差等特性, 降低了有效载荷, 且在高速气流冲刷、热冲击及高过载机动下极易发生脱层与失效, 严重限制了航空隐身装备的一体化及轻量化要求^[9]。为了突破上述物理与工程瓶颈, 将吸波功能与结构承载功能深度融合的“结构-功能一体化”隐身技术研究范式应运而生, 进一步实现了超宽带吸收^[10]、显著的轻量化和可

收稿日期: 2026-03-03; 退修日期: 2026-03-26; 录用日期: 2026-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(52475268); 广东省基础与应用基础研究基金(2025A1515011782); 先进纺织复合材料教育部重点实验室开放课题(MATC 2025-Z03)

定制的多功能性,在新一代作战平台中成为主流技术,实现了隐身与承载的双重功能。20世纪80年代末,美国启动B-2隐形轰炸机项目,机身和机翼使用碳纤维、玻璃纤维、凯夫拉纤维^[11-13]组成的多层碳纤维蜂窝夹层结构和层间混合结构,显著减轻了飞机重量,提升了其隐身性能,使之成为最早使用电磁吸波结构的飞行器之一^[8]。随后,美国第五代战机在此基础上,将纤维增强吸波结构深度集成于机身及机翼蒙皮,并进一步延伸至翼梁与垂尾梁等主承力骨架^[14]。目前,第五代战斗机集成了超材料薄膜等先进吸波技术,通过将频率选择表面(Frequency selective surface, FSS)或人工微结构深度嵌入复合材料蒙皮内部,实现了全机结构性隐身^[15]。图1展示了隐身飞行器的时间与技术演进。

综上所述,先进隐身设备正进入结构-功能一体化发展的关键阶段,既要在微观上设计晶格单元以匹配

阻抗特性,又需在宏观上构建承载实体以适应气动环境^[16]。这种材料与结构的协同设计要求,对制造工艺的自由度与精度提出了前所未有的挑战,暴露出传统制造技术的局限性。

在面对宽频吸波结构对于结构-功能一体化的需求时,传统工艺的固有缺陷成为制约其发展的内在瓶颈。热压罐/层压固化工艺目前是制备多层复合吸波结构的主流工艺,但由于各层材料热膨胀系数不匹配,在飞行器经历高低温交叉变化或高速气流冲击时,极易发生界面裂纹并扩展至分层失效,严重影响飞行器的气动外形与隐身性^[17]。

增材制造(Additive manufacturing, AM)作为一种基于离散-堆积原理的数字化制造技术,为上述问题提供了解决方案^[5]。AM技术的优势在于其极高的几何设计自由度,通过逐层累加材料的方式构建三维实体。不再受制于模具和刀具的物理约束,使得设计者能够从微观晶格到宏观

构件跨尺度地定义材料与结构,完美契合吸波功能对于复杂几何实体的要求^[18]。该技术使得基于拓扑优化、仿生设计、梯度阻抗匹配等先进理论的复杂结构得以从概念走向现实,通过逐层调节打印参数,构建功能梯度结构,精确调控阻抗匹配^[19]。因此,AM技术对于飞行器宽频吸波领域的意义,不仅是一种新的加工方法,更是对于结构-功能一体化这一新兴研究范式的核心突破,为解决传统吸波结构面临的厚重、窄带、功能单一等问题提供了革命性的途径^[20]。然而,要将之转化为实际的工程应用,仍需系统地解决从工艺适配、材料改性到结构协同设计的跨学科难题。

鉴于增材制造技术在飞行器宽频吸波领域展现出的巨大潜力与迅猛发展态势,本文对该交叉学科的最新研究进展进行系统性的梳理与评述,探讨宽频吸波增材制造材料,对适用于增材制造的碳基、铁磁基及陶瓷基复合材料进行深入分析,并聚焦于增材制造工艺特性,重点分析熔融沉积成型、光固化及直写成型等主流技术在制备吸波结构时的工艺原理、优势及挑战^[21],论述结构-功能一体化设计与应用,结合超材料结构设计探讨如何通过结构设计实现多功能协同,最后针对当前面临的大尺寸制造一致性、性能协同及环境适应性等挑战,展望基于4D打印与人工智能辅助设计的未来发展方向。

1 宽频吸波增材制造材料

适用于增材制造的材料不仅要具备优异的电磁损耗特性,还必须满足特定工艺对材料形态和物理化学性质的要求,即“可打印性”,且要满足增材制造工艺对材料流变学、热力学及机械性能的严苛要求,包含足够的损耗介质并表现出适合特定打印工艺(如熔融沉积成型、光固化)的流变行为^[21]。例如,对于熔融沉积

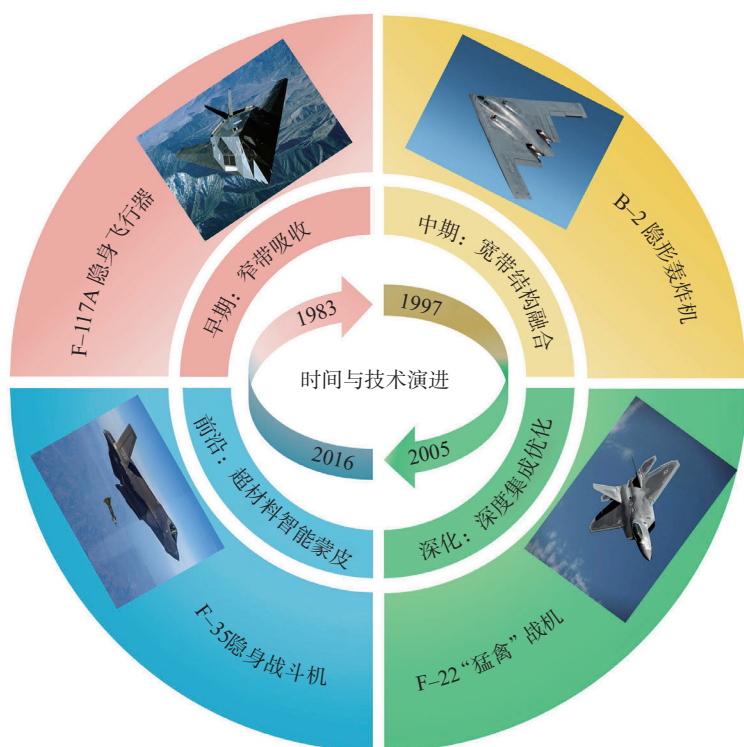


图1 隐身飞行器的时间与技术演进

Fig.1 Time and technological evolution of stealth aircraft

成型工艺,专用线材需要在熔融状态下具有适宜的黏度以保证流畅挤出^[22]。因此,本节重点探讨不同的材料体系如何在保证可打印性的前提下,保证流变性、可打印性与吸波性能的融合。

1.1 介电损耗材料

飞行器机翼前缘、进气道外沿及无人机大面积蒙皮等部位具有典型的复杂三维曲面特征,且极易受到敌方陆基或空基预警雷达的宽角度连续照射。介电损耗型材料主要通过电偶极子极化、界面极化弛豫以及电导损耗将射频电磁能转化为热能进而耗散。利用熔融沉积成型工艺在挤出过程中的剪切取向效应或直写成型工艺的浆料流变调控,能够在微观尺度上构建具有梯度阻抗与各向异性的导电网络,从而突破传统均质涂层材料的吸波带宽极限,满足复杂曲面处的宽频、宽入射角隐身需求。

1.1.1 碳基纳米复合材料

碳基复合材料具有轻质、耐腐蚀、化学稳定性高及来源广泛等优势,成为增材制造雷达隐身蒙皮中应用较为成熟的材料体系。它主要通过介电损耗机制来吸收电磁波^[23]。根据碳填料的几何维度和复合形态,碳基材料可细分为碳纤维增强材料和纳米碳复合材料。

(1) 碳纤维(Carbon fiber, CF)作为一种典型的主承力增强相,它与聚合物基体的复合实现了飞行器构件“承载-隐身”的双重功能。Gao等^[24]开发了一种具有周期性结构的碳纤维织物(Carbon fiber fabric, CFF)/环氧树脂(Epoxy resin, EP)复合材料以获得电磁性能和机械强度的提高,证明了在微波吸收材料中,CF增强3D打印技术具有巨大的研究和应用潜力。碳纤维增强聚合物(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)兼具承载能力与吸波功能,添加了碳纤维的打印件,其拉伸强度

和模量能够得到显著提升^[25]。例如,Tang等^[26]制备了轻质锆改性碳-碳复合材料以提高抗氧化性,其反射损耗最小能够达到-61.1 dB。锆的掺入可使复合材料表现出更好的微波吸收性能。

研究表明,CFRP在增材制造过程中,连续纤维的打印铺层角度与短切纤维的长度分布或者复合材料铺层方式对微波响应与雷达散射截面缩减具有显著影响。通过增材制造技术精确调控打印路径与铺层角度,可使单向CFRP层合板从传统的良导体转化为具备高电磁波吸收率的损耗性介电材料。例如,Breiss等^[27]在低频段隐身设计中,使用长度为12 mm且质量分数仅为0.5%的短切碳纤维,可在基体内部形成逾渗网络,表现出极高的介电损耗能力;Zhou等^[28]研究了复合材料铺层结构对碳纤维增强复合材料微波吸收的影响,如图2所示,当铺层角度从0°变为90°时,单向CFRP层合板从良导体转变为损耗性介电材料。纤维取向对多向CFRP层合板的微波响应有显著影响。

(2) 纳米碳材料,包括碳纳米管(Carbon nanotubes, CNTs)、石墨烯(Graphene)和炭黑(Carbon black, CB),凭借极高的长径比和比表面积,能够以极低的逾渗阈值构建有效的导电逾渗网络^[29]。将多壁碳纳米管(Multi-

walled carbon nanotubes, MWCNTs)或石墨烯微片(Graphene nanoplatelets, GNPs)复合到聚合物基体中,能够具有更高的吸收强度和更宽的有效吸收带宽^[30-31]。

Ling等^[32]研究CB对聚合物微波吸收的影响,结果表明,当CB添加量为7%时,反射损耗(Reflection loss, RL)最大。如图3(a)所示^[33],将原位生长于碳纤维上的分级碳纳米管(CNTCF)嵌入环氧树脂基体中,合成纳米复合材料,即可在极薄剖面(2.5 mm)下实现优异的自由空间阻抗匹配与X波段微波吸收(图3(b));这归功于更佳的阻抗匹配和更高的介电损耗,如图3(c)、(d)所示。Baskey等^[34]在X波段频率范围内使用自由空间系统测量基于碳纤维和炭黑粉末的宽带介质吸收体的反射损耗,在10.3 GHz频率下该吸收体实现了29 dB的反射损耗,如图3(e)所示。而且吸收体密度小、厚度薄,成为隐身应用的潜在候选材料。

此外,填料形态、颗粒尺寸及多层结构对微波吸收性能均有影响。石墨、炭黑、碳纤维、碳纳米管及石墨烯等不同形态的碳基填料,因其微观结构、长径比与比表面积差异,呈现出迥异的介电损耗特性。具体而言,一维碳纳米管凭借高长径比,能够在极低填料含量下构筑导电逾渗网络;二维石墨烯纳米片则依靠丰富的界

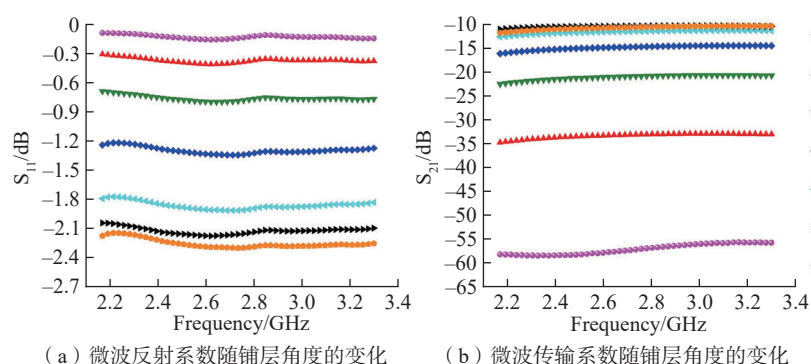


图2 两种样品不同铺层角度的单向CFRP层合板的S参数^[28]

Fig.2 S-parameters of unidirectional CFRP laminates with different layup angles for two samples^[28]

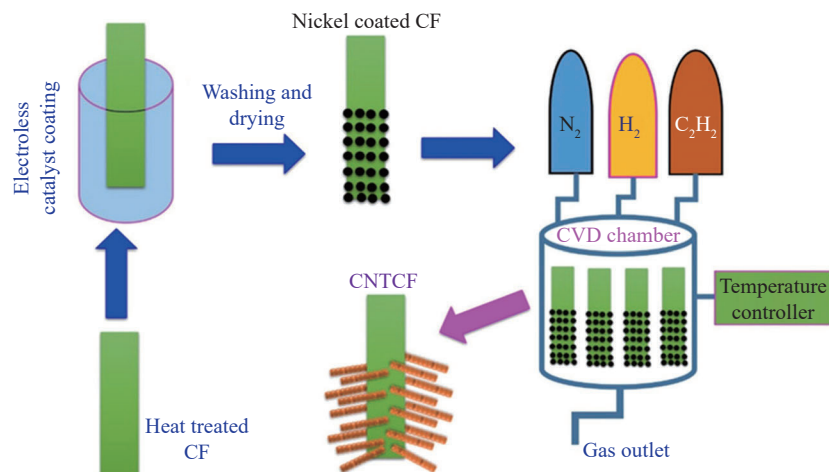
面极化与多重散射实现高效电磁衰减;而零维炭黑因粒径小、易于分散,可在基体中形成均匀的导电网络^[35]。刘韩韩等^[36]发现炭黑的引入可有效改善增材制造聚醚醚酮(Polyether ether ketone, PEEK)的吸波性能,炭黑质量分数10%的CB/PEEK材料的反射损耗最小值由纯PEEK的-1.50 dB提升到-13.84 dB。对于增材制造SCF/PEEK材料,其反射损耗最小值为-54.26 dB。

1.1.2 过渡金属碳化物/氮化物

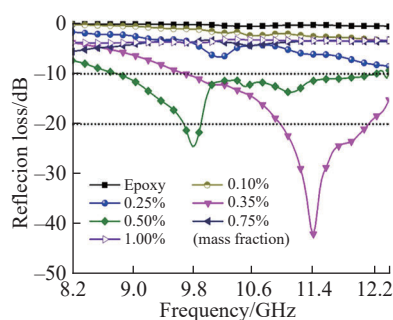
(MXene)

以 $Ti_3C_2T_x$ 和 $Mo_4/3CT_x$ 为代表的MXene,因具备类金属的高电导率及表面丰富的极性官能团,在交变电磁场下展现出极强的偶极子极化与界面极化损耗能力。面对飞行器内部高功率电子设备舱的电磁干扰(Electromagnetic interference, EMI)屏蔽与外部雷达隐身双重需求,利用直写成型技术制造的MXene/聚合物三维气凝胶展现了无可比拟的工程潜力^[37-39]。Yun等^[40]研究了二维 $Ti_3C_2T_x$ 组装薄膜在不同厚度下的EMI屏蔽性能,发现单层组装薄膜对电磁波的屏蔽率约为20%,而厚度约为55 nm的24层薄膜具有极高的绝对屏蔽效能。Han等^[41]系统研究了16种不同MXene的EMI屏蔽性能,结果显示所有MXene材料在微米级厚度的薄膜中均实现了有效的电磁干扰屏蔽。

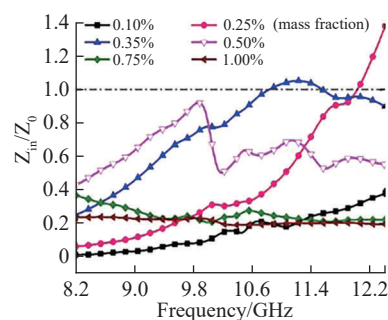
由于缺陷、官能团以及异质界面处相应偶极子和界面极化的存在而产生的介电弛豫是损耗机制的主要贡献者。Tang等^[42]通过化学蚀刻方法和冷冻干燥方法制备了CS/HAc@MXene气凝胶,结果显示,在4.20 mm的厚度下实现了-46.66 dB的反射损耗,对应于1.88 GHz的有效吸收带宽(Effective absorption bandwidth, EAB);将厚度减小至3.80 mm后,阻抗匹配向更高频率的转变,导致EAB展宽至2.39 GHz。Shamshirgar等^[43]开发



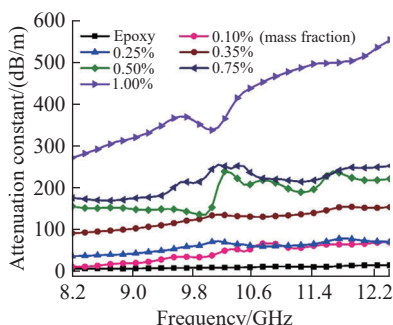
(a) 轻质纳米复合材料的合成^[33]



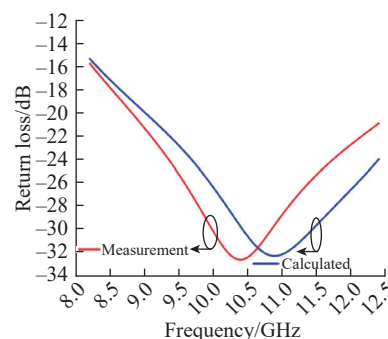
(b) 不同浓度CNTCF基环氧树脂纳米复合材料吸收性能^[33]



(c) 不同浓度CNTCF基环氧树脂纳米复合材料阻抗匹配^[33]



(d) 不同浓度CNTCF基环氧树脂纳米复合材料介电损耗^[33]



(e) 基于碳纤维和炭黑粉末的宽带介质吸收体的反射损耗^[34]

图3 纳米复合材料的合成与吸波性能

Fig.3 Synthesis and microwave absorption properties of nanocomposites

出了一种新型轻质高孔隙混合气凝胶,由 $Mo_4/3CT_x$ 、石墨烯增强氧化铝纳米纤维和聚乙烯醇组成,通过双向冷冻干燥方法生产;结果表明,该混合气凝胶表现出先进的微波吸收能力,不仅实现了微波在多级孔隙结构中的多重散射与高效衰减,其超轻多孔骨架结构还大幅降低了材料的宏观密度,完美契合了航空航天装备对极致轻量化与结构效率的严苛要求。

1.2 磁损耗材料

针对目前防空体系中广泛部署的L波段、S波段乃至VHF/UHF频段的低频反隐身预警雷达,纯介电损耗材料往往需要大幅增加结构厚度才能满足1/4波长匹配条件。这与现代飞行器追求极致气动外形、低阻力及薄型化蒙皮的工程约束产生了根本性矛盾。磁损耗材料通过自然共振、畴壁共振及涡流损耗机制^[44],能

够在较低频段及更薄的结构厚度下通过 3D 打印产生的结构各向异性,实现高效的电磁能量衰减,是目前解决飞行器在低频段隐身的关键^[16]。

1.2.1 羰基铁粉和金属磁性合金

羰基铁粉(Carbonyl iron powder, CIP)具有优异的磁化效应与聚合物的良好相互作用,广泛应用于吸附复合材料。CIP 具备极高的饱和磁化强度与磁导率,但其高密度特性极易引发飞行器系统有效载荷的断崖式下降。增材制造技术为解决这一问题提供了新路径,通过熔融沉积成型工艺制造热塑性聚氨酯(Thermoplastic polyurethane, TPU)/CIP 复合材料,利用打印喷嘴在熔融挤出过程中的强剪切力,可诱导片状 CIP 颗粒沿打印路径定向排列。这种结构诱导的各向异性可在特定极化方向上人为增强有效磁导率,从而在显著降低 CIP 整体质量分数的前提下,维持甚至提升材料的雷达波吸收率^[45-47]。

而将高密度、高硬度的 CIP 填充到软质 TPU 中并实现 3D 打印,面临着极大挑战。Badin 等^[48]制备不同 CIP 含量的 TPU/CIP 复合材料,用于熔融沉积成型;测量表明,TPU 矩阵中 CIP 浓度的增加会导致相应的电磁参数增加。Lai 等^[21]通过熔融共混法制备了 TPU/CIP 复合材料,结果表明,随着 CIP 含量增加,电磁波吸收性能逐渐提高。Li 等^[49]采用如图 4 所示的工艺制备了 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/(\text{SiO}_2)_x\text{-SO}_3\text{H/PPy}$ 微球复合材料,它展现了较基于 PPy 的复合材料更为卓越的微波吸收特性。这意味着微波吸收特性不仅可以通过改变导电聚合物的厚度来控制,还可以通过控制壳层来满足需求。

1.2.2 铁氧体软磁材料

尖晶石型铁氧体(如 $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$, $\text{MnZnFe}_2\text{O}_4$)和六角晶系铁氧体(如 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$)具有高电阻率和优异的化学稳定性,有利于电磁波

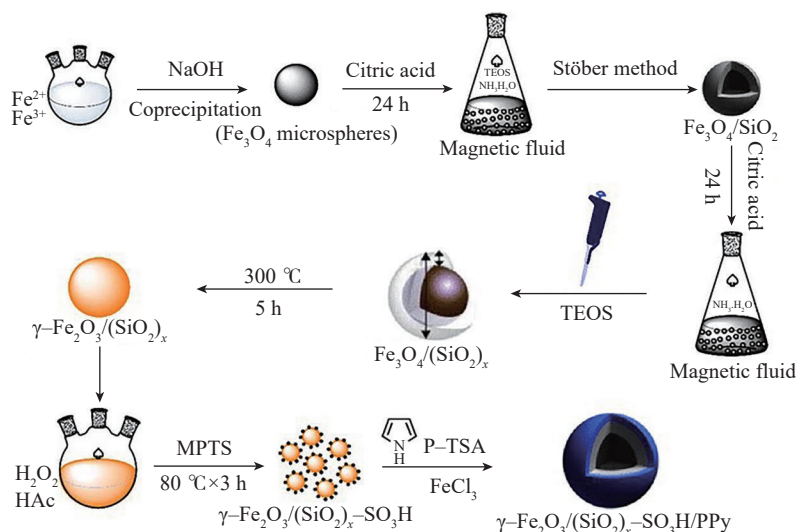


图 4 制备金属磁性合金结构示意图^[49]

Fig.4 Schematic diagram of metallic magnetic alloy structure fabrication^[49]

渗入材料内部,在宽频吸波领域有理想前景。然而,将铁氧体应用于增材制造工艺中,面临着物理化学层面的巨大挑战。

立体光固化技术依赖于紫外光引发液态树脂的光聚合反应,而铁氧体颗粒通常呈现深色甚至黑色,且具有极高的折射率。这种巨大的折射率失配会导致入射紫外光在颗粒表面发生强烈的散射和反射,同时铁氧体本身对紫外光具有极强的吸收作用,导致光穿透深度急剧下降,树脂层无法被从底部彻底固化,使得打印件分层、缺陷甚至失败。针对上述难题, Yang 等^[50]针对陶瓷及磁性粉末的光固化浆料进行了系统的流变学优化,研究发现,引入适量的磷酸酯类或高分子分散剂显著降低光固化浆料的粘度。

此外,传统的纯铁氧体颗粒不仅密度大,而且介电损耗较低。为了解决这一问题并适配打印需求,开发具有核壳结构或异质界面的复合填料成为了新趋势。Zhang 等^[51]采用新型水热方法制备了 CoFe_2O_4 /煤气化细渣残余碳的残余碳复合材料,与纯残留碳材料相比,该复合材料涉及各种微波吸收机制,包括传导损耗、自然共振、界面偶极极化和磁通量损

耗,具有优异的微波吸收能力。

光固化成型工艺的高精度特性使得制造多层、梯度阻抗吸波体成为可能。通过在打印过程中更换不同填料浓度的树脂槽,可以构建出“阻抗渐变”结构。这种设计能够最大限度地让电磁波进入材料内部并被逐层吸收,解决高反射问题。

1.2.3 高熵合金与 MOF 衍生物

随着对吸波材料耐环境性、轻量化及多功能化要求的提升,传统的单一组分金属或氧化物面临瓶颈。高熵合金(High entropy alloys, HEAs)和金属有机框架(Metal-organic frameworks, MOFs)衍生物作为新兴材料体系进入宽频吸波领域。

HEAs 因其独特的多主元组成而成为一类新型微波吸收材料,图 5(a)^[51]为其合成方法。这些合金形成单相固溶体,产生 4 种基本效应:晶格畸变、高构型熵、缓慢扩散及协同“鸡尾酒”效应^[51-54]。通过诱导晶格畸变可以改善阻抗匹配和电磁损耗机制,从而调控吸收性能^[55-56]。此外,HEAs 还展现出卓越的机械耐久性。因此,HEAs 在极端环境应用中具有极高价值^[57]。

HEAs 普遍存在因高电导率导致的阻抗失配问题。通过微观结构

调控能够优化其电磁特性,如 Qiu 等^[58]提出了一种基于晶格畸变工程的改性策略(图 5(b));通过在 FeCoNiCu 合金中进行碳掺杂并结合退火处理,改善了阻抗匹配,还引入了大量偶极子以增强极化损耗。通过组分工程精确调节 HEA 的元素配比也是优化电磁参数的有效途径。Hassan 等^[59]采用气相合成法制备了一系列碳包覆的 CoNiFeCuCr_x HEA 纳米颗粒;研究发现,通过调节 Cr 元素的含量,可以有效调控材料的介电常数与磁导率,从而实现优异的电磁阻抗匹配。对于长期服役于海洋高盐雾、高湿度环境下的舰载隐身飞行器而言,基于 HEAs 的增材制造吸波结构展现出了突出的环境适应性与工程应用价值。

MOFs 是由金属节点与有机配体组装而成的多孔晶体材料。构建多级孔隙结构是优化阻抗匹配和增强电磁波衰减的关键策略。Gao 等^[60]合成了一系列具有可调直径和高比表面积的 MOFs 衍生磁性多孔碳微球,如图 5(c)所示;在低填料负载量下即可展现出优异的微波吸收性能。MOF 前驱体的化学结构直接决定了衍生碳材料的微观结构和电磁特性。Yan 等^[61]制备了两种基于镍基 MOF 的 Ni@C 复合材料并进行系统对比,如图 5(d)所示;结果表明, Ni-ZIF 衍生的 Ni@C 性能更佳。含氮配体引入的 N 掺杂赋予了其优异的微波吸收性能, Ni 和 C 之间的阻抗匹配、多重反射和界面极化能够增强微波衰减。Lu 等^[62]以钴基 MOF

为例,成功制备了多孔 Co/C 复合纳米材料,验证了该合成策略的可行性。MOF 前驱体热分解的气氛和温度是多孔 Co/C 复合材料中铁磁性金属纳米颗粒和碳基体形成的关键因素。

1.3 高温陶瓷材料

随着现代航空航天工业的飞速发展,飞行器与精确制导武器的作战环境日益极端化。当高超声速飞行器以 *Ma* 5 以上速度巡航时,其表面可产生超过 1000 °C 的高温。传统磁性吸收剂在高温下会发生居里点失效,失去结构承载能力与吸波功能。因此,开发兼具耐高温、抗氧化、宽频带吸收及结构承载能力的“结构-功能一体化”陶瓷吸波材料,已成为目前微波吸收领域的战略制高点^[63]。

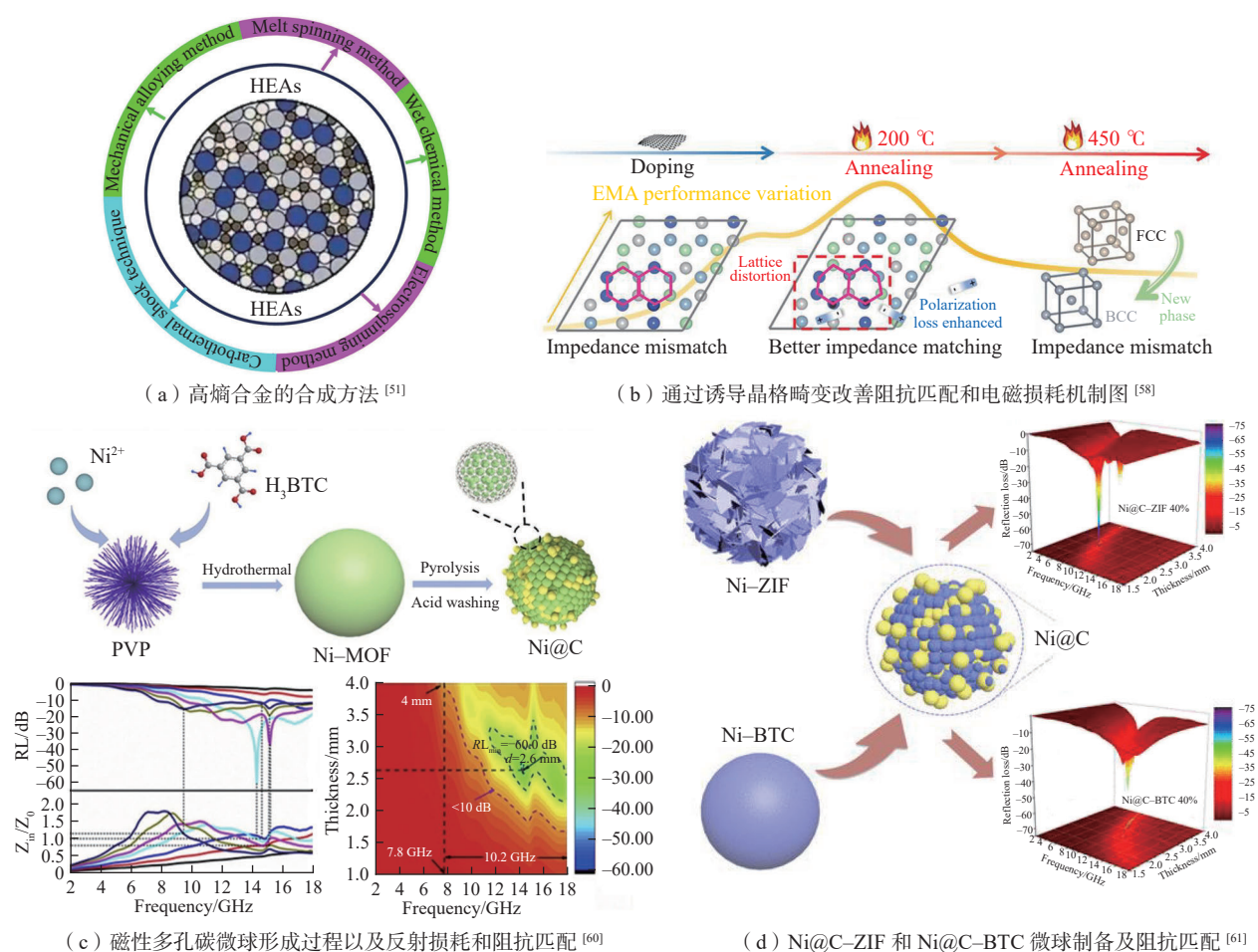


图 5 高熵合金与 MOF 衍生物材料体系示意图
Fig.5 Schematic diagram of high-entropy alloy and MOF-derived material systems

陶瓷材料因其固有的高熔点、优异的化学稳定性及可调节的介电性能,成为高温隐身材料的首选^[64]。然而,传统纯陶瓷材料或纯聚合物转化陶瓷(Polymer-derived ceramics, PDCs)尽管具备耐高温特性,但断裂韧性极低,属于典型的脆性材料。在飞行器经历剧烈热震、高声噪振动或强烈气动结构应力时,纯陶瓷构件极易发生断裂失效,无法作为能可靠服役的飞行器主/次承力结构件^[65-66]。

因此,连续纤维增强陶瓷基复合材料(Continuous fiber reinforced ceramic matrix composites, CFRCMCs)应运而生,并成为目前最具潜力的高温热结构与隐身材料。AM技术为高温吸波陶瓷的制造带来了革命性的突破^[67-68],为CFRCMCs复杂构件的快速、定制化成型提供了革命性途径,通过光固化^[69-70]或直写成型技术^[71-72],克服了周期长、成本高以及难以制造异形曲面的缺点^[73]。

通过AM构筑的梯度多孔陶瓷骨架,能够自适应调节材料在高温环境下的电导率激增行为。众所周知,半导体型陶瓷材料在高温下的介电常数虚部会急剧上升,导致表面阻抗失配。而AM的三维多孔结构不仅降低了等效介电常数,还能引导电磁波在复杂孔隙通道内发生多次散射。Wang等^[74]制备了高固含量的SiC水基浆料,通过添加少量的聚合物黏结剂,成功打印了大尺寸的SiC蜂窝超结构;所得SiC蜂窝

超结构在室温下入射角为60°时,在4.85~39.49 GHz(34.64 GHz)范围内表现出-10.00 dB有效带宽的宽带电磁性能;此外,所制备的SiC蜂窝结构在入射角为60°时,即使经过原位1000℃和异位1600℃的空气腐蚀处理,仍具有超过35 GHz的稳定宽带-10.00 dB有效带宽。单一的宏观孔隙往往不足以实现完美的阻抗匹配。为了引入微观孔隙,Wu等^[75]在SiC浆料中引入发泡剂,在打印过程中或打印后诱导气泡生成,构建了“宏观孔隙-微观气孔”的分级多孔结构;随着烧结温度的升高,多孔SiC烧结陶瓷的孔隙率降低,而抗压强度增加;RL为-48.90 dB,有效吸收带宽为3.7 GHz。

为了更系统和直观地指导航空隐身装备的工程设计与选材,有必要对当前主流的增材制造吸波材料体系进行多维度的横向对比。表1深度融合了飞行器的实际服役场景,涵盖了从微观电磁吸收性能、物理密度,到宏观的耐高温极限、力学承载能力以及特定增材制造工艺的适配性等多个评价指标。

2 宽频吸波增材制造技术

2.1 材料挤出技术

材料挤出(Material extrusion, MEX)技术,凭借独特的“离散堆积”成型原理,为复杂雷达吸收结构(Radar absorbing structures, RAS)的制造提供了前所未有的自由度。

MEX技术不仅能够精确调控微观孔隙,更能实现宏观层面的多材料梯度分布,从而在物理上打破了传统层压或模压工艺的限制。本文将聚焦于MEX技术中的两大核心分支——熔融沉积成型(Fused deposition modeling, FDM)与直写成型(Direct ink writing, DIW),深入剖析两者在飞行器宽频吸波领域的工艺特性、材料体系演进、结构设计策略及未来发展趋势^[76]。

2.1.1 熔融沉积成型

FDM技术利用热塑性聚合物的流变特性,将线材加热至熔融态后挤出,通过热熔合实现层间黏结。在吸波领域,FDM的优势在于其高度的工艺稳定性和多材料切换能力。FDM通过送丝机构控制挤出量,成型精度受喷嘴直径和层厚限制。在打印吸波复合材料时,高含量的导电/磁性填料会显著增加熔体黏度,易导致喷嘴堵塞或丝材脆断,这对填料的分散技术和流变改性提出了极高要求^[17]。FDM打印路径会导致各向异性,在电磁设计中一方面可能降低Z轴方向的力学强度和击穿电压;另一方面,利用打印路径的取向性可以设计各向异性电磁响应,用于调控极化波的吸收特性^[77]。

FDM技术当前研究重点集中在功能化丝材的开发与宏观超材料结构的设计。FDM丝材的改性主要通过共混导电剂和磁性剂实现。CNTs、Graphene和CB因其低密度和高介

表1 增材制造吸波材料体系多维度横向对比

Table 1 Multi-dimensional horizontal comparison of additive manufacturing microwave absorbing material systems

材料体系分类	核心代表材料	隐身性能	密度评价	结构耐温极限	力学性能	主流适配增材制造工艺	飞行器典型服役场景牵引
介电损耗	CF, CNTs, MXene, RGO	在高频宽带吸收上表现优异	密度极低	较低	高	熔融沉积, 直写成型, 光固化	亚音速飞行器雷达罩外沿
磁损耗	CIP, 铁氧体, HEA	在低频探测波段下表现优异	整体密度较高	中等	中	粉末床熔融, 熔融沉积/直写成型	飞行器重点散射源部位
高温陶瓷	SiC	宽温区内电磁性能极其稳定	远低于高温合金	中等	极高	高固含陶瓷浆料光固化成形/数字光处理	高超声速飞行器端头、前缘

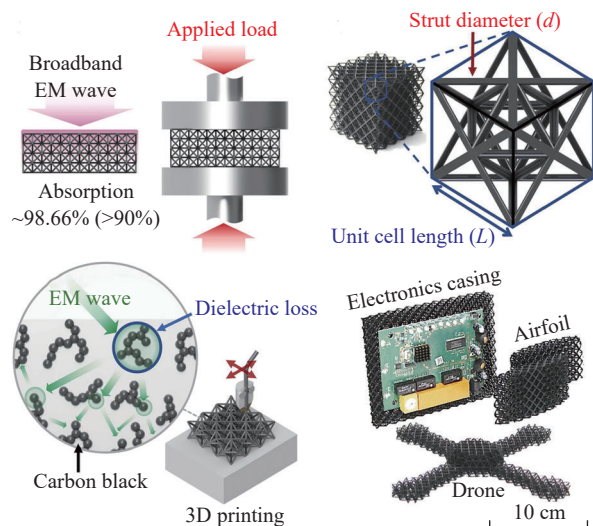
电损耗特性被广泛应用。然而,过高的电导率会导致表面阻抗失配,引发强反射。通过控制聚乳酸(Polylactic acid, PLA)基体中 RGO 的含量,可以制备出不同电磁参数的丝材,进而构建多层梯度结构。

FDM 技术的自由成型能力使得“结构隐身”成为可能,通过宏观几何形态的设计,可以将电磁波的能量耗散机制从单纯的材料损耗扩展到结构谐振,满足先进吸波体功能-结构一体化的范式要求。Lim 等^[78]利用碳黑增强 PLA 打印了如图 6(a)所示的八面体桁架(Octet-truss)结构,该轻质点阵具有高比强度,还在 5.8~18 GHz 频段内实现了超过 90% 的

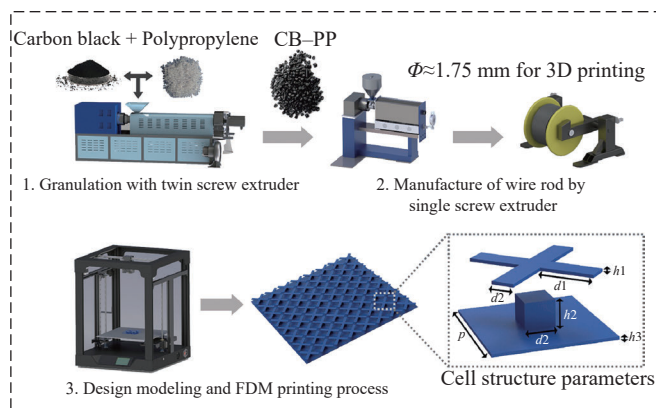
吸收。如图 6(b)所示, Tan 等^[79]采 FDM 技术一步打印出螺旋桨状的超材料吸波体(Metamaterial absorber, MMA),在 3.1~10.8 GHz 频段实现了 80% 以上的吸收率;这种螺旋桨状 MMA 得益于多种共振模式和定制的损耗材料表现出低剖面、宽带和宽角度吸收。结合 FDM 打印的介质基底与导电墨水/丝材构建的 FSS 层,可以实现带通或带阻滤波功能。Kronberger 等^[80]提出一种平面周期性频率选择表面,并针对 10 GHz 频率进行开发和优化,3D 打印后进行测量,结果表明性能良好(图 6(c))。Priyanka 等^[81]设计的 FSS 层,其单元结构中心为一个封闭的质心蜂窝

结构,周围环绕着 4 个环形六边形环,并被 4 个 L 形元件包裹;制造之后,在自由空间和消声室中进行了测量;结果表明,该吸收体的仿真和试验性能吻合良好,如图 6(d)所示。

尽管 FDM 技术在复杂宏观吸波拓扑结构的制造及梯度阻抗多材料切换中,展现出极大的工艺灵活性,但应用于现代飞行器蒙皮等主承力隐身构件时,仍面临极为严峻的物理与流变学挑战。FDM 的离散切片与逐层热熔堆积原理,决定了成型件在微观组织上存在无法消除的各向异性。由于热塑性基体在挤出后的快速冷却以及层间大分子链扩散与缠结的不充分,导致结构件沿垂直堆



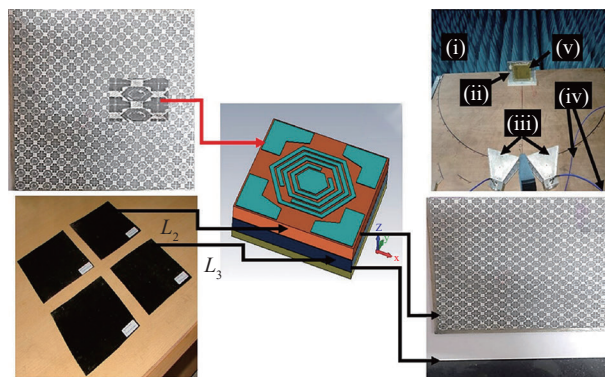
(a) 结合了电磁波吸收和八面体桁架结构的宽带机械超材料吸收器 (BMMA)^[78]



(b) MMA 的制备过程^[79]



(c) 用于 30 GHz 吸收器的印刷立方体结构, 右侧为 10 GHz FSS 吸收器的尺寸^[80]



(d) 玻璃纤维织物上光刻图案^[81]

图 6 FDM 技术的工艺过程
Fig.6 Preparation process using FDM technology

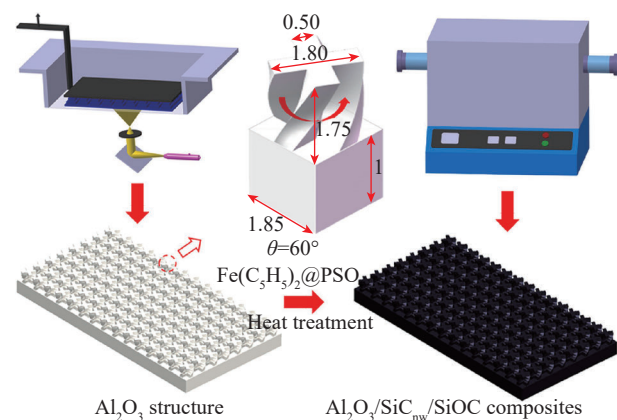
积方向的拉伸强度和层间剪切模量通常远低于面内方向。当隐身飞行器执行高过载机动或承受强烈的气动交变激振时,蒙皮结构在此类层间薄弱界面处极易萌生微裂纹并引发宏观分层失效^[82]。

2.1.2 直写成型

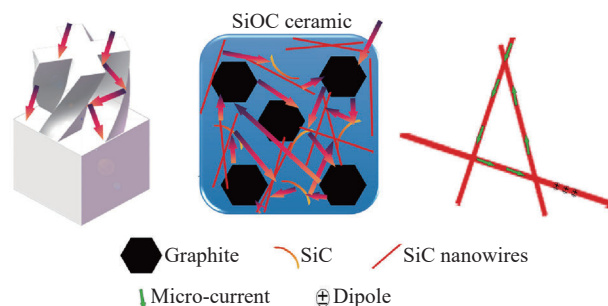
DIW 技术也称为机器人浇铸、直接书写制造或机器人辅助形状沉积,主要目标是通过挤出由主要材料和添加剂配制而成的浓缩悬浮液来制造零件,从而获得合适的黏弹性。DIW 工艺简单、响应迅速且成本低廉,适用于多种材料,是目前最通用的 3D 原型制作技术^[83-86]。DIW 工艺依赖于原料的流变行为来维持打印部件的形状,与 FDM 不同,DIW 制备的生坯通常需要经过复杂的后处理,如冷冻干燥、高温脱脂与烧结^[87]。

针对 FDM 在高温环境及材料多样性上的局限,DIW 技术凭借它对陶瓷、气凝胶及多材料体系的兼容性,成为解决高超声速飞行器热障与隐身兼容问题的核心技术^[87]。高马赫数飞行产生的气动加热要求吸波材料必须在数百甚至上千℃下保持稳定。DIW 结合聚合物转化陶瓷前驱体,是制造耐高温 SiC、SiCN 陶瓷吸波结构的主流路线^[76]。DIW 工艺允许在宏观点阵中引入微观孔隙,结合直接发泡法,可在挤出的陶瓷线条内部形成微米级闭孔^[77]。这种分级多孔结构不仅降低了介电常数,优化了阻抗匹配,还增强了电磁波的内部散射。Mei 等^[88]采用图 7(a)所示的工艺制备了具有梯度阻抗双层结构的 Al_2O_3 陶瓷器件,其吸收机制如图 7(b)所示;并通过改变处

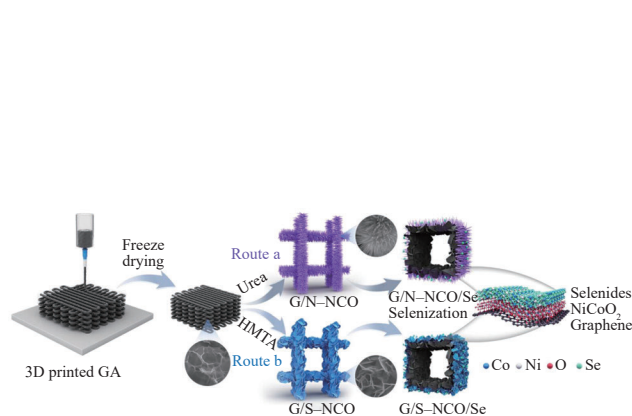
理时间,制备电磁吸收性能的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{SiOC}$ 复合材料;结果表明,具有双层梯度阻抗结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{SiOC}$ 复合材料能够有效吸收电磁波。为了追求极致轻量化,DIW 常用于制造气凝胶基吸波结构。Liu 等^[89]利用 DIW 打印 MXene/GO 水系墨水,工艺流程如图 7(c)所示,经冷冻干燥后获得气凝胶点阵;这种结构具有超高的孔隙率和极低的密度,气凝胶独特的层状结构提供了丰富的界面极化位点,是实现宽频吸波的理想选择。DIW 的多喷头系统非常适合构建成分连续变化的梯度吸波体。Li 等^[90]采用双梯度 DIW 结合原位分散技术,制备了一种含有羰基铁和石墨烯粉末的梯度结构功能梯度聚合物,打印过程如图 7(d)所示,显著提高了电磁波吸收性能。



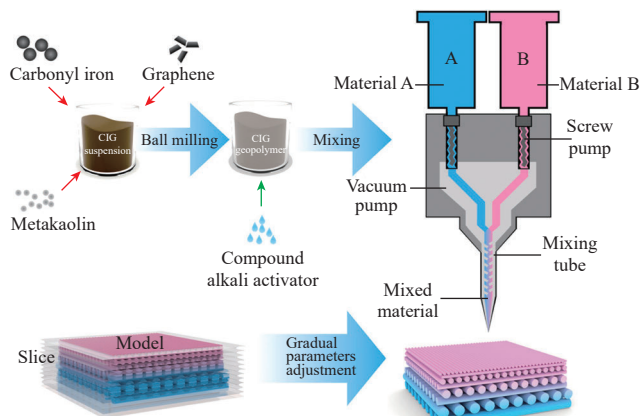
(a) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{SiOC}$ 复合材料双层梯度阻抗结构的制备过程^[88]



(b) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}_{\text{nw}}/\text{SiOC}$ 复合材料电磁波吸收机制^[88]



(c) 具有多级异质界面的 3D 打印石墨烯/ NiCoO_2 /硒化物^[89]



(d) 材料 A 向材料 B 梯度过渡的 CIG 基 FGM 双料筒 DIW 打印工艺^[90]

图 7 DIW 技术的工艺流程

Fig.7 Preparation process using DIW technology

2.2 光固化技术

光固化技术(Vat Photopolymerization, VPP)具有极高的成型精度、优异的表面质量,并拥有制备复杂各向异性微结构的能力,主要工艺包括立体光刻(Stereolithography, SLA)和数字光处理(Digital light processing, DLP)两类。VPP技术允许设计者在微小尺度上精确调控材料的电磁参数分布,从而实现诸如梯度折射率、超材料、分形结构等传统减材制造技术难以实现的复杂电磁拓扑^[91]。单纯的聚合物基体通常是透波的,因此在微波吸收领域必须引入介电损耗剂或磁损耗剂。然而,这些吸波剂的引入对VPP工艺本身提出了严峻挑战,主要体现在光穿透深度受限和浆料流变学特性的改变^[92]。

2.2.1 VPP 技术基础

VPP制备高性能吸波材料面临的物理瓶颈是吸波剂的加入会急剧降低光穿透深度,根据Beer-Lambert定律,光强在树脂中随深度指数衰减,导致固化层厚度不足,甚至无法成型^[93]。当碳纳米管质量分数超过0.1%时,传统的SLA工艺往往面临固化失败。为解决这一问题,研究者通常选用在固化过程中吸光度降低的引发剂,使光线能随着反应进行逐渐穿透深层^[93]。

田忠明等^[94]的电磁散射全波数值计算与试验研究指出,当构件表面粗糙度的均方根高度增加至特定阈值时,目标原本微弱的非主散射区雷达散射截面均值将发生急剧抬升。这种由工艺缺陷引发的高频漫反射与非相干散射,会直接撕裂隐身战机精心设计的外形隐身轮廓^[95]。VPP技术制造的隐身超材料表面极度平滑,有效抑制了高频段的寄生散射损耗,使之成为制造宽频、高频段电磁超材料与高精密微波器件的理想选择。对于陶瓷基吸波剂,其高折射率会导致强烈的光散射,扩宽光斑并降低分辨率。通过调整树脂配方,使其

折射率接近陶瓷粉末,可以显著减少散射,提高固化深度和打印精度^[96]。

在面向航空航天极端热环境的隐身需求方面,常规聚合物基材料的耐温极限被彻底突破,VPP技术结合PDCs前驱体展现出革命性的前景。Feng等^[97]引入二茂铁作为催化剂,在裂解过程中诱导生成碳纳米管和石墨化碳,并形成磁性金属硅化物纳米颗粒;不仅增强了电导损耗,还引入磁损耗和界面极化损耗,制备过程如图8(a)所示。Zhou等^[98]采用图8(b)所示的方法合成了一种新型紫外光固化聚硅氧烷前驱体,采用DLP制造具有复杂几何形状、无裂纹且无线性收缩的陶瓷部件,它在高温下也可实现在X波段低反射系数和宽有效吸收带宽,如图8(c)所示。Zhao等^[99]合成了一种具有高陶瓷产率和低收缩率的光敏树脂,工艺如图8(d)所示;利用DLP技术,制备了三维金刚石结构SiOC陶瓷和三维八面体结构SiOC陶瓷,结果表明样品在高温下都能均匀收缩。

然而,由前驱体热解生成的纯PDCs陶瓷结构虽然在介电性能上表现优异,但其固有的低断裂韧性与高脆性,使之难以直接作为飞机外部蒙皮或承力构件服役^[64]。为解决这一关键工程瓶颈,当前增材制造领域最具前景的解决路径是将材料向陶瓷基复合材料演进。

2.2.2 SLA 与 DLP 的技术特征

SLA和DLP同属光固化技术,但二者在隐身结构制造中的适用场景存在差异。SLA采用聚焦激光束在液面上进行点对点的扫描固化。优势在于成型尺寸较大,且由于激光能量密度高,对于高粘度或含有较高浓度填料的树脂具有较好的穿透能力。在制造大尺寸隐身部件时,SLA能够保证在大面积曲面上的高表面质量,这对于减少因表面粗糙度引起的高频雷达波散射至关重要^[100-102]。DLP将每一层的切片图像以面光源

的形式投影到树脂槽底,主要优势是成型速度快,且速度与层内几何复杂性无关。这使得DLP更适合制造具有极其复杂内部孔隙的周期性结构,如蜂窝吸波芯材、三周期极小曲面(Tripoly periodic surfaces, TPMS)结构和超材料阵列^[103-104]。

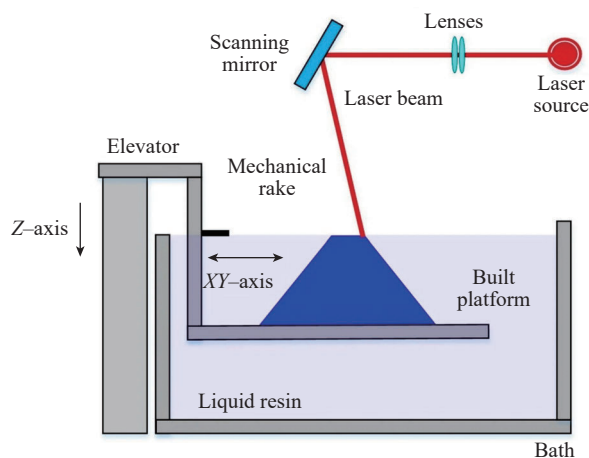
分裂环谐振器(Split ring resonator, SRR)是经典的超材料单元,表现为电感-电容(LC)谐振电路。利用微纳SLA或高精度DLP,可以在聚合物基体内部或表面制造微米级的金属化SRR阵列。单一尺寸的SRR通常是窄带吸波,但VPP允许将不同尺寸、不同谐振频率的SRR单元进行分形嵌套或多层堆叠,从而在多个波段产生连续的吸收峰,实现超宽带吸收^[105-107]。在太赫兹频段,结构尺寸缩小至微米量级。利用投影微立体光刻技术制造的垂直开口谐振环阵列,在0.8 THz处实现了接近完美的窄带吸收,证明了VPP技术在极高频率隐身器件制造中的精度优势^[108]。

2.3 粉末床熔融技术

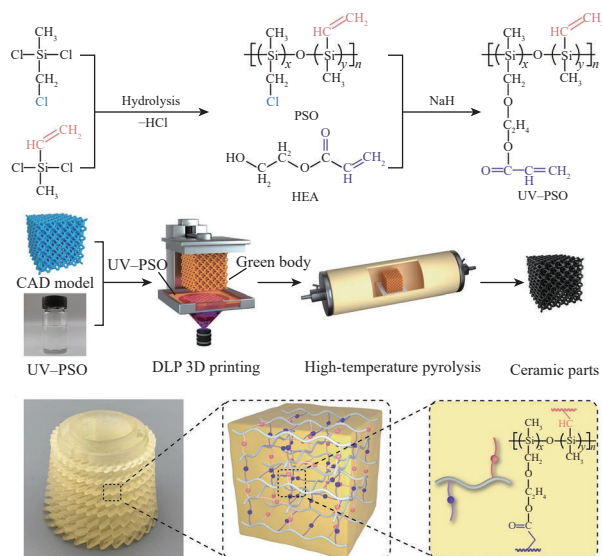
粉末床熔融技术(Powder bed fusion, PBF)以逐层堆叠、点阵控制的制造模式赋予了设计者在微观尺度调控材料分布、孔隙结构及宏观几何构型的能力,通过该技术,可以构建具有复杂拓扑结构的超材料、梯度折射率介质以及结构-功能一体化结构^[109]。PBF主要包括针对聚合物和陶瓷的选择性激光烧结(Selective laser sintering, SLS)和针对金属材料的选择性激光熔化(Selective laser melting, SLM)。

2.3.1 SLS 在介电吸波结构中的应用

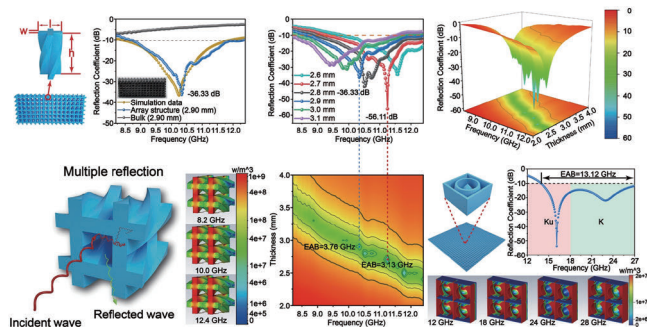
SLS主要应用于聚合物及其复合材料的成型^[110]。SLS及其变体,选择性微波烧结(Selective microwave sintering, SMS),具有独特的粉末堆积和局部熔融特性。在SLS/SMS加工前,通过对聚合物颗粒进行表面改性,可以将导电填料强制限制在聚合



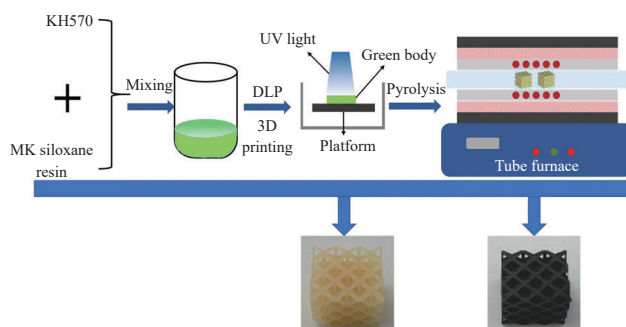
(a) SiCN(Fe) 陶瓷制备过程示意图 [97]



(b) 紫外光固化聚硅氧烷的合成路线、DLP 打印工艺, 以及 Si-O-C 陶瓷超材料的制备 [98]



(c) X 波段 Si-O-C 陶瓷超材料结构的设计与制备 [98]



(d) DLP 打印 SiOC 复合陶瓷的工艺流程图 [99]

图 8 VPP 技术的工艺过程

Fig.8 Preparation process using VPP technology

物颗粒的界面处,而非分散到颗粒内部。Xu 等^[110]提出一种基于 SMS 的清洁节能方法,如图 9(a)所示,制备具有显著增强的 EMI 屏蔽性能和力学性能的分层型聚合物/CNT 复合材料;CNT 或石墨烯纳米片均匀包覆在聚合物粉末表面,碳基填料优先转化热能,诱导聚合物颗粒仅在表面发生熔融,从而分子链发生扩散和缠结,形成导电网络。

根据有效介质理论,引入空气孔隙可以有效降低材料的介电常数实部,改善与自由空间的阻抗匹配。通过气相诱导相分离法结合 SLS 技术制备的 TPU/CNT 多孔复合材料,如图 9(b)^[111]所示,利用微孔结构优化阻抗匹配,在 1.6 mm 的厚度下

实现了 4.89 GHz 的有效吸收带宽。如图 9(c)所示, Rollo 等^[112]采用 MWCNTs 或 MWCNTs 与 Graphene 纳米颗粒的混合物对用于 SLS 的热塑性 TPU 粉末进行改性;结果表明,TPU/1wt%MWCNTs-Graphene 基多孔结构表现出优异的导电性和机械强度。Aghanejad 等^[113]提出一种多谐振三维表面结构,它利用导电聚合物复合材料实现宽带微波吸收,其入射能量效率超过相同体积的复合材料平板。

2.3.2 SLM 在金属隐身结构中的应用

FSS 是由周期性排列的金属贴片或孔径组成的二维阵列^[114],具有空间滤波特性。在飞行器雷达罩设

计中,FSS 仅允许己方雷达频率通过,同时强烈反射或吸收敌方探测雷达的带外信号,从而降低雷达舱内的强散射源的雷达散射截面(Radar cross section, RCS)^[115]。SLM 技术允许直接在复杂曲面上打印金属 FSS 阵列,消除了拼接缝隙带来的电磁散射^[116]。利用 SLM 制造的金属网格骨架,填充透波树脂或吸波泡沫后,可形成既能承受气动力载荷,又具备选频隐身功能的复合雷达罩^[117]。

SLM 技术使制造具有极高比强度的金属点阵结构成为可能。Liu 等^[118]制造了融合复合分级网格、优异机械性能和超宽带三维吸收超材料的新颖吸收结构,研究结果表明它具有高效的吸收性能和承载能力,制

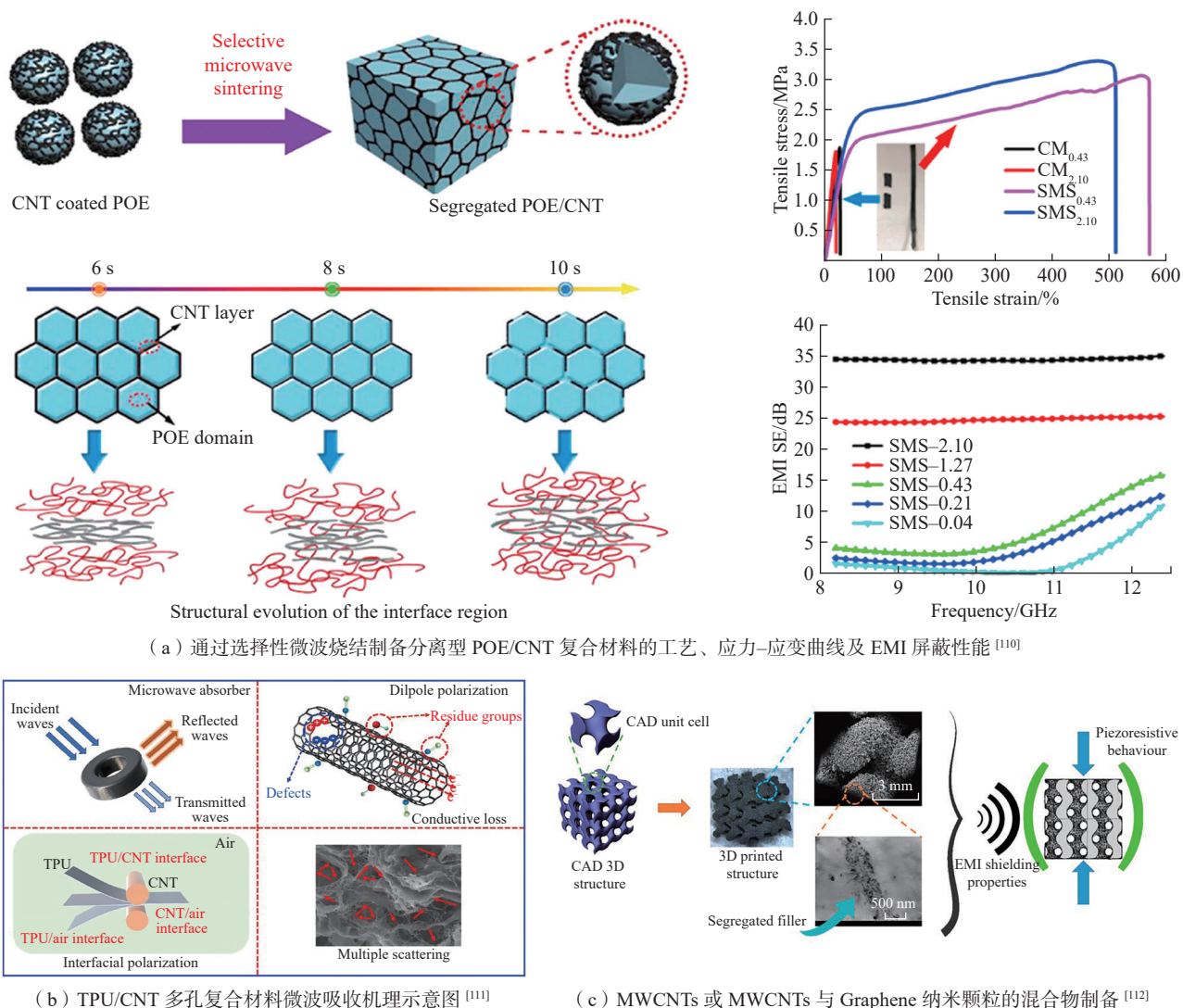


图9 SLS 技术的工艺过程

Fig.9 Preparation process using SLS technology

造工艺如图 10 所示。

SLM 成型过程中固有的台阶效应和粘粉现象会导致表面粗糙度较高,这对高频电磁波的散射特性产生显著影响。频率升高至 Ka 波段乃至太赫兹频段,表面粗糙度逐渐接近波长的 1/10 量级,此时必须考虑它对电磁散射的影响^[119],结果表明模型表面粗糙度对 RCS 预测的影响可忽略不计。

表 2 为主流增材制造工艺在飞行器服役约束下的综合评价与横向对比,融合了航空应用中不可忽视的特征尺寸、表面精度、力学承载形态以及多功能环境适应能力,为进行隐

身蒙皮、雷达罩及热端部件结构-功能一体化设计提供参考。

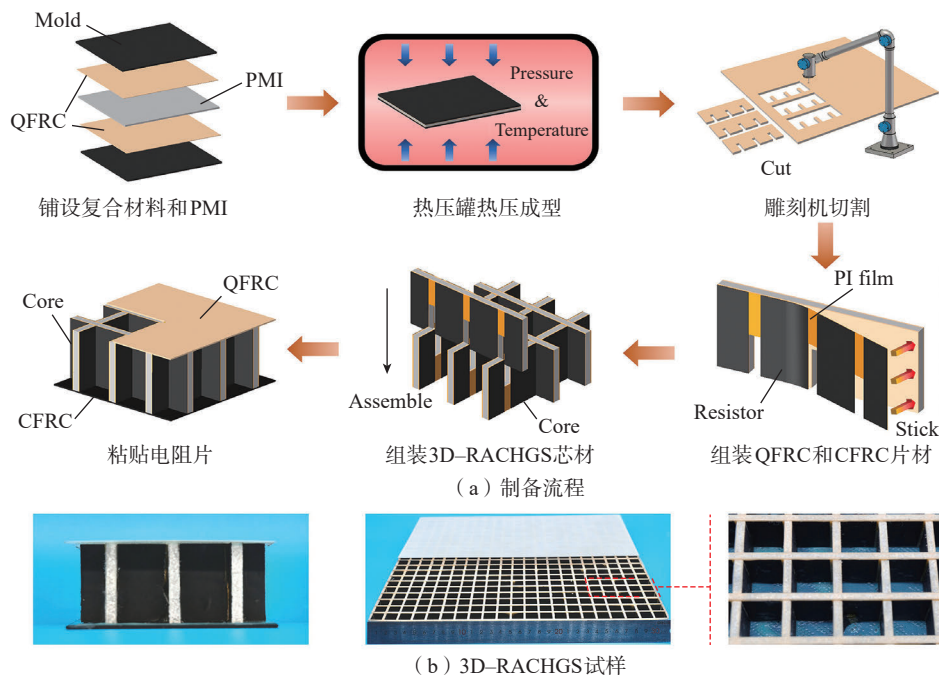
3 宽频吸波增材制造结构设计及功能一体化

3.1 超材料点阵结构设计

超材料是指借助人工设计的微结构单元陈列,获得常规材料所不具备的物理属性的一类人工结构化材料。随着飞行器隐身需求向全方位、宽频带与极端环境适应性演进,传统基于印刷电路板或光刻工艺制备的二维超表面在面临宽入射角连续探测以及三维复杂保形蒙皮的工程需求时,遭遇了难以逾越的物理与维度

瓶颈^[120-121]。增材制造技术的深度介入,能够独立调控等效介电常数和等效磁导率,实现对电磁波传播路径的折射、散射与耗散控制^[122-124]。

在面向航空航天“结构-功能一体化”设计范式中,空间点阵结构利用其高度可调的宏观孔隙率和微观拓扑构型,成为兼顾极致轻量化、高强韧性与超宽频电磁衰减的核心载体。当前研究与工程应用主要聚焦于以 Octet-truss 为代表的节点支柱类晶格,以及以 TPMS 为代表的连续曲面类晶格。这两种结构在应对飞行器复杂交变载荷与多频段雷达照射时,呈现出截然不同的物理力电



减^[130]。TPMS 连续平滑的介质过渡特性,不仅从物理形态上消除了高频雷达波的尖峰散射源,还能通过沿厚度方向设计渐变的相对密度,实现对大入射角度和复杂极化波完全不敏感的超宽带阻抗匹配与稳定吸收^[129]。

Octet-truss 结构是一种典型的拉伸主导型晶格,具有较高的比刚度和比强度,常用于航空航天承力构件^[131]。Yoon 等^[132]为了弥补单一吸波结构力学性能的不足,采用“Octet-truss (顶层)+简单立方(Simple cubic, SC)(底层)”的混合梯度设计。当 Octet-truss 作为顶层结构时,可显著改善空气-材料界面的阻抗匹配,能有效吸收电磁波。且 OT-SC-SC 结构与基准 OT-OT-OT 结构相比,提高了其面外方向的刚度。3 种主要点阵结构在宽频吸波与力学承载方面的特性对比,见表 3。

3.2 功能一体化集成设计

随着现代空战环境迅速向多维立体、全天候和多物理场交叠对抗演进,高超声速飞行器与隐身战机的外部蒙皮结构已无法被简单视为定义空气动力学边界的物理外壳。传统的“外表面涂覆单薄吸波剂+内部金属或复合材料承力骨架”的分层剥离式设计模式,存在严重的无效质量冗余,以及在经历剧烈高低温交叉与交变气动载荷时极易发生致命的层间剥离与龟裂失效,其发展已逼近工程力学的物理极限。雷达吸波结构 RAS 理念在增材制造极高空间设计自由度的全面赋能下,正以前所未有的广度与深度实现电磁能量衰减与宏观力学承载、防热防冰控制及红外多波段兼容的深层次材料升级,乃至跨尺度拓扑级别的功能集成。

3.2.1 宽频吸波-防除冰功能一体化

在寒冷高湿的对流层与临近空间高空冰点环境中执行全天候作战任务时,飞行器机翼前缘、进气道外沿及雷达罩极易发生严重积冰现象。

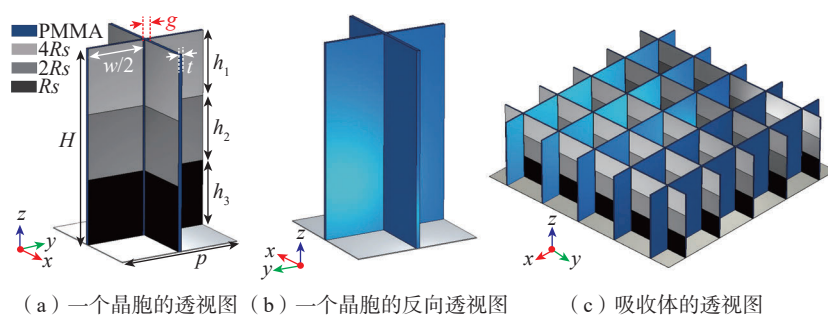


图 11 MMA 的几何结构^[127]

Fig.11 Geometric structure of MMA^[127]

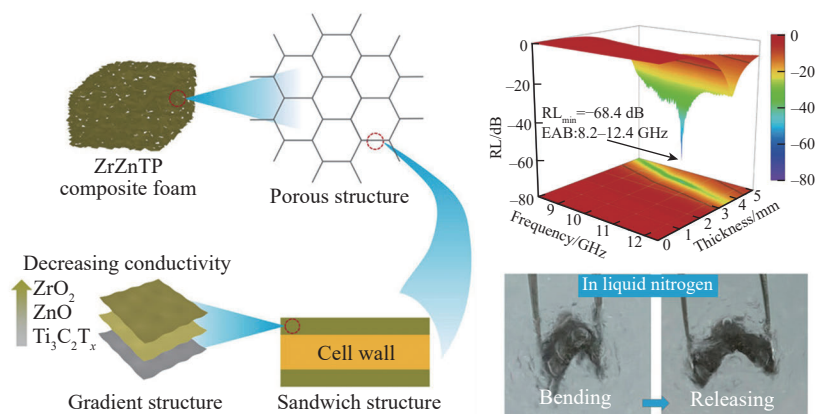


图 12 ZrZnTP 复合泡沫的制备及力学性能、微波吸收性能^[128]

Fig.12 Preparation, mechanical and microwave absorption properties of ZrZnTP composite foam^[128]

表 3 3 种主要晶格结构在宽带吸收及机械承载能力方面的特性比较

Table 3 Comparison of characteristics of three main lattice structures in terms of broadband absorption and mechanical load-bearing capacity

拓扑结构	阻抗匹配机制	吸波性能特点	力学主导模式	应用场景
梯度点阵	空间孔隙率渐变	超宽频(2~40 GHz), 低频衰减强	弯曲/拉伸混合	宽频雷达隐身蒙皮, 过渡层设计
TPMS	连续介质过渡	广角稳定性好, 极化不敏感	弯曲主导	抗撞击隐身结构
Octet-truss	高透波性表面层, 内部散射损耗	高频性能受节点散射影响	拉伸主导, 高比刚度, 高比强度	主承力隐身构件

厚重不均的积冰层出现不仅严重恶化飞行器的空气动力学外形,导致升力骤降与失速风险,从电磁学角度,更带来了灾难性的隐身失效:冰层本身与蒙皮基体之间形成的介电常数突变会彻底摧毁增材制造结构前期精心计算与打印的 1/4 波长阻抗渐变匹配层,使雷达波前向与侧向产生强烈的漫反射,导致飞行器的雷达反射截面瞬间暴露于敌方预警网

络之下。因此,宽频吸波-防除冰功能一体化的研究至关重要。增材制造技术为解决这类问题提供了方案,即电热-吸波一体化集成或光热-吸波一体化集成。

电热除冰是利用电流通过电阻体产生热量来融化冰层。CNT、氧化石墨烯(Graphene oxide, GO)和 CB 既是优异的介电损耗型吸波剂,又是良好的导体^[28]。通过 AM 技术将这

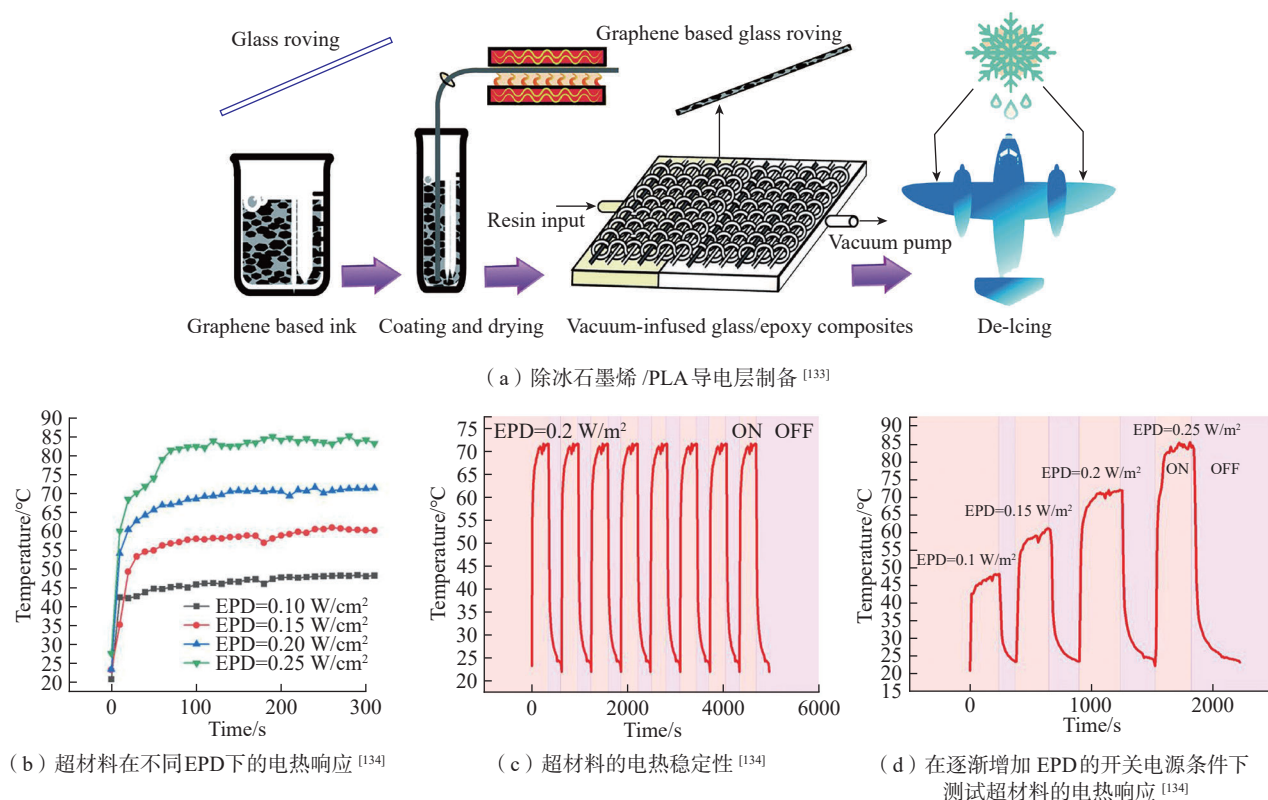


图 13 宽频吸波-防除冰功能一体化材料制备与性能

Fig.13 Preparation and performance of broadband microwave absorption-anti-icing integrated material

些纳米填料分散在聚合物基体中,可以构建出具有双重功能的复合材料,设计的关键在于控制填料浓度。如图 13 (a) 所示, Karim 等^[133] 利用 FDM 打印的 GO/PLA 导电层,作为吸波结构的最外层蒙皮;在施加低电压时,其表面温度可在 60 s 内迅速升至 50 °C 以上,足以在低温环境下完成除冰。Lu 等^[134] 开发了一种可扩展的混合超材料,由光热/电热驱动,适用于全天候防冰/除冰,在宽温度范围内取得了突破性进展;混合超材料经过电热性能测试,如图 13 (b)~(d) 所示,证明了性能与耐久性。这使得构建“光热-电热-吸波”三位一体的混合系统成为可能。

针对中小型无人机面临的防除冰系统质量冗余与高能耗挑战,研究人员提出了一种“电热-结构-耐久性”协同设计的创新策略^[135]。通过将增材制造的导电网络与玻璃纤维增强聚合物或碳纤维增强聚合物

相结合,并利用嵌入式热压共固化工艺,成功开发出一体化的无人机防除冰组件。该组件不仅彻底淘汰了沉重的外部除冰套件,还在多项关键量化指标上实现了对传统设计的全面超越。

冰风洞试验与多物理场仿真为该一体化结构提供了严苛的工程量化验证^[136]。在模拟高空结冰气象条件的测试中,传统防冰系统常因热流分布不均而产生严重的冰脊。而新型一体化组件通过精确的功率区带调制,在施加 7.5 kW/m² 的均匀热流密度下,成功实现了完全的防冰功能,使机翼前缘表面温度稳定在安全区间,彻底杜绝了二次结冰的隐患。

3.2.2 宽频吸波-红外隐身功能一体化

由于现代探测手段的快速发展,单频段隐身技术难以实现多频段兼容的隐身目标。因此,迫切需要开

发多频段兼容的隐身技术^[137]。目前,多功能兼容隐身技术主要包括雷达-红外兼容隐身、雷达-红外-激光兼容隐身和雷达-红外-可见光兼容隐身技术^[138-140]。雷达和红外技术是现代信息战场上主要的军事探测技术,实现雷达-红外兼容隐身具有重要意义^[141]。

雷达隐身与红外隐身之间存在根本矛盾^[142],两者隐身波段不同,但如果材料能够在雷达波段实现高吸收率,在红外波段实现低发射率,则可以满足雷达-红外兼容隐身的目标。增材制造技术结合跨尺度的微米级表面图案化设计,为打破这一经典物理矛盾提供了具有颠覆性意义的革命性路径。其核心解决策略是利用特定形貌的 FSS 或具有空间低通透射特性的高电导微纳结构作为隐身结构的最外层蒙皮。

氧化铟锡(Indium tin oxide, ITO)是一种简并半导体,在红外波段由于

等离子体频率的存在, ITO 表现出类金属性质, 具有高反射率。利用透明导电材料 ITO 结合增材制造微结构设计, 能够实现雷达-红外兼容隐身。Zhang 等^[143] 提出使用一种利用多层图案化石墨烯的超宽带柔性雷达吸收器, 如图 14 所示; 吸收器顶部的红外屏蔽层由图案化的 ITO 构成, 由于顶部 ITO 层的低通特性和高填充率, 整个结构的红外发射率得到有效降低, 而雷达吸收性能仅略受影响, 适用于雷达-红外双隐身应用。Liu 等^[144] 利用透明导电材料 ITO 和聚甲基丙烯酸酯亚胺设计了一种红外-雷达兼容的隐身超表面, 贴片式 ITO 频率选择表面为顶层, 中间层为四重旋转对称的 ITO 图案化结构, 底层为反射表面, 并由聚甲基丙烯酸酯亚胺隔开; 所设计的结构具有超宽带雷达吸收性能、低红外发射率和极化不敏感特性。

3.2.3 宽频吸波-散热功能一体化

在吸波材料的实际应用中, 散热管理是一个至关重要的问题。传统

的聚合物基吸波复合材料通常会导致热量积聚, 产生严重后果。开发兼具高导热和优异电磁损耗特性的 3D 打印线材或浆料是解决散热问题的关键。六方氮化硼因其高导热、电绝缘的特性, 成为解决吸波与导热矛盾的理想填料。Pezzana 等^[145] 采用氮化硼纳米颗粒来提高类聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 光固化基质的导热系数, 利用 DLP 技术构建复杂结构, 如图 15 (a) 所示; 结果显示氮化硼纳米颗粒具有显著的增强作用, 材料的导热性得到改善。Clark-Johnson^[146] 在 3D 打印的 CNT/ 环氧树脂复合材料中加入氮化硼纳米棒, 在保持 CNT 导电网络的同时, 利用氮化硼桥接 CNT 节点, 显著降低了界面热阻; 试验显示, 随着氮化硼含量的增加, 热导率呈现上升趋势, 且不破坏 EMI 屏蔽/吸波所需的导电通路。

增材制造复杂拓扑结构, 也为热管理提供了一种途径。例如, 利用 SLA 或 SLM 技术, 可以在吸波结构内部集成随形冷却通道。Chahid 等^[147]

优化了一种钻石光源光子吸收器的中间模型, 使之集成由 AM 制造的保形冷却通道, 结果显示最大温度下降了 11%。有学者提出一种创新的热管理策略, 将金属合金作为相变材料用于机载雷达系统, 在高负载运行期间储存热能; 当材料达到熔点并开始熔化时, 会吸收大量热能^[148]。目前, 一种利用水作为功能介质极为创新性的设计被提出。Li 等^[149] 研制出一种光学透明的水基雷达-红外兼容隐身结构, 可作为宽带微波切换吸收体/反射体, 同时具有低红外辐射特性; 通过合理设计顶部红外屏蔽层并利用水循环进行温度控制, 可以获得低红外辐射特性, 如图 15 (b) 所示。

3.2.4 宽频吸波-承载功能一体化

传统雷达吸波材料无法在机翼主蒙皮、承力隔框等大应力集中区域大规模应用。为了追求新型战机极致的减重收益与全机结构性隐身, 必须将承受外部气动载荷的主承力骨架本身直接转化为具备宽频耗散能

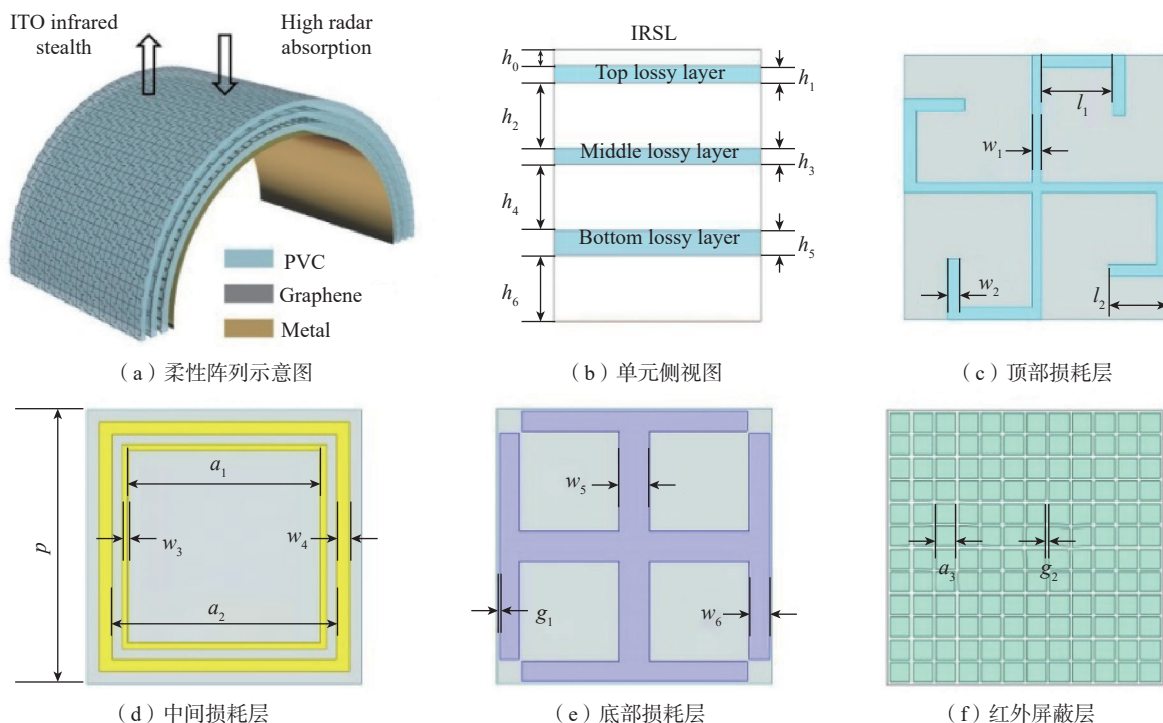


图 14 采用图案化 ITO 的吸收器几何结构^[143]

Fig.14 Geometric structure of the absorber with patterned ITO^[143]

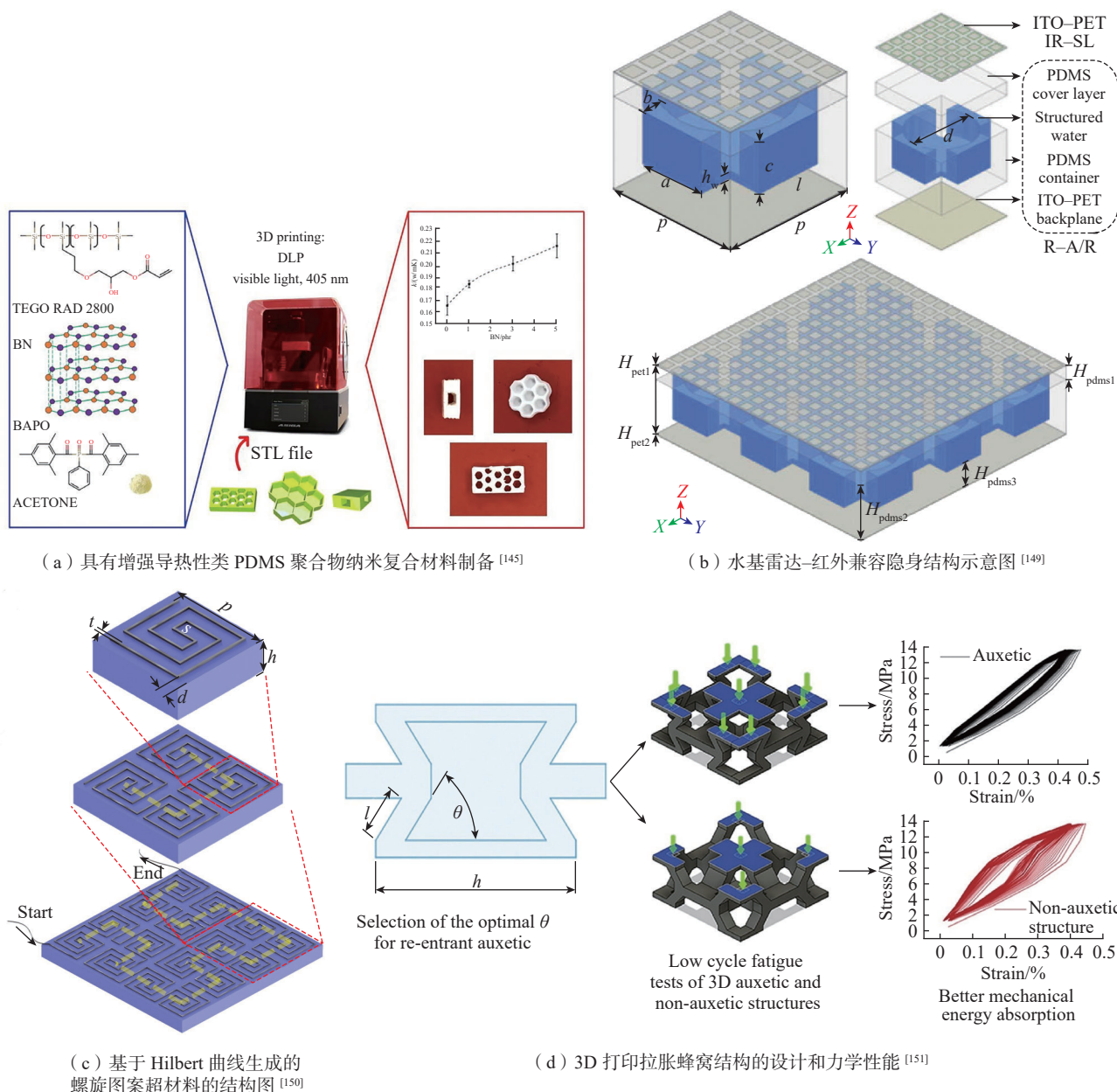


图 15 宽频吸波-散热功能一体化与吸波-承载功能一体化制备示意图

Fig.15 Schematic diagram of fabrication of integrated broadband absorption-heat dissipation and integrated absorption-load-bearing functions

力的吸波体。极端环境要求飞行器必须实现“承载-隐身”多功能一体化,因此多材料连续碳纤维增强超材料 3D 打印技术得以开发并成为一项解决方案。Zhang 等 [150] 制备了一种新型连续导电纤维基吸波超材料,结构如图 15 (c) 所示,利用连续纤维构建了特定的超材料图案,既充当承力骨架,又提供了欧姆损耗回路。对按照图 15 (d) [151] 所示 3D 打印

的内凹蜂窝结构进行低周疲劳测试,发现其耐疲劳寿命是传统非拉胀蜂窝的 1.75 倍。

自然界在亿万年进化中形成的生物装甲结构,为增材制造高强韧吸波体提供了无穷的仿生学灵感。Li 等 [152] 设计了融合“六边形蜂窝”优异面内刚度与“空心金字塔”阻抗渐变特性的复合超结构,并采用碳纳米管/聚乳酸复合材料通过 3D 打印

一次成型;该仿生蜂窝-空心金字塔夹层结构展现出了非凡的机电双效能:在电磁层面,不仅具备横跨 2.12~18 GHz 的超宽频段吸波能力,最小反射损耗深达 -49.75 dB,且在高达 60° 的斜入射角下仍能保持优秀的隐身效能;在机械承载层面,由于金字塔与蜂窝壳壁在受压时发生耦合支撑与渐进式的折叠塑性屈曲,随着金字塔单元厚度从 1 mm 逐步

增至 5 mm, 该结构的宏观抗压强度从 4.8 MPa 激增至 12.5 MPa。

4 宽频吸波增材制造发展方向

4.1 4D 打印与智能隐身技术

当前的吸波结构一旦制造完成, 其电磁性能便被固定, 是一种“静态”的无源器件。然而, 未来的电磁对抗环境是动态多变的, 4D 打印技术为主动适应环境变化的“动态”智能吸波结构研制提供了可能。

4D 打印的核心材料是形状记忆聚合物, 这类材料能够响应外部刺激发生可逆的大变形。利用 4D 打印技术能够在预先编程的结构实现基础上, 进一步创造出可重构的吸波体。利用 4D 打印多材料系统制备具有可定制和可配置几何形状、材料刚度、缓冲性能和隔振能力的机械超材料, 能够展示出超材料刚度的可重构性。

4D 打印技术将使电磁吸波结构从“静态无源”器件, 向“动态有源”的智能系统演进。未来的隐身平台或许能够根据探测雷达的频率, 主动调整自身蒙皮的吸收频段, 实现频率捷变和功能可切换的“智能隐身”或“认知电磁对抗”。这是未来电磁功能材料发展的终极目标之一。

4.2 人工智能与机器学习融合技术

传统的“正向设计”流程, 即“设计—仿真/试验—优化”的迭代循环, 在面对增材制造所开启的巨大设计空间时, 显得力不从心。未来的突破将依赖设计方法的革新, 而人工智能驱动的逆向设计展现出巨大的潜力。

面对增材制造带来的无限设计空间, 传统基于经验或试错的正向设计方法已难胜任, 参数组合呈爆炸式增长。人工智能与机器学习技术成为驾驭这一复杂度的必要工具。基于生成对抗网络的超材料吸收器模糊逆向设计方法, 包含了吸收器设计参数及其对应光谱响应的自建数据集, 并且对抗网络可以生成多个能够

满足特定吸收率和频带要求的方案。模拟退火算法与深度学习加速结合, 将之用于正向预测和反向设计, 可快速、精确地开发出太赫兹完美吸收体。此外, 吸收体的结构可以从期望的响应中高效精准推导, 能显著提高设计效率, 并且误差小、时间快。机器学习作为一种辅助手段, 在新型超材料的设计和发现领域正日益普及, 可以迎接从根本上探索超材料优化设计空间的挑战。

结合拓扑优化、遗传算法等传统优化工具, 人工智能驱动的逆向设计能够在人类直觉和经验难以触及的高维设计空间中高效探索, 发现全新的、性能超常的拓扑构型。这一范式将摆脱吸波结构设计依赖工程师经验和反复试错的“手工作坊”模式, 跨入一个高效、智能、自动化的“按需生成”新时代, 有望从根本上解决力学—电磁等多性能协同设计的难题。

4.3 混合制造与原位传感技术

AM 技术逐步成熟, 而它与传感技术、材料科学和传统制造工艺深度融合, 正在推动隐身技术向更高层次发展。单一的打印技术难以同时满足大型隐身构件对效率、精度和多材料集成的需求, 混合制造是必然趋势。

未来的隐身结构会利用增材制造在承载结构内部直接构建复杂的微流道网络。这些流道作为冷却通道, 可利用流体带走因吸收电磁波产生的巨大热量, 解决高功率微波对抗下的热管理问题, 同时还可以进一步优化结构的力学性能。未来隐身结构还将具备感知自身状态的能力, 通过多材料打印, 将共形天线阵列、微型传感器网络和吸波结构集成在同一块蒙皮上。该智能蒙皮既能在特定频段实现隐身, 又能在其他频段进行通信或环境感知, 实现“隐身”与“探测”的动态统一。

5 结论

面对现代雷达探测系统向多频

段、超宽带及多维协同演进的严峻挑战, 传统隐身涂层已达物理极限。本文系统论证了 AM 技术作为突破这一瓶颈的关键赋能手段, 正在推动飞行器隐身技术从单一的“材料改性”向“结构—功能一体化”的范式转变。

在材料与工艺层面, 通过 FDM、DIW 及 VPP 等工艺的适配性改进, 碳基、磁性及高温陶瓷前驱体材料已成功实现了从微观晶格到宏观构件的跨尺度制造。AM 技术独特的离散堆积原理, 使得通过组分调控和工艺参数优化构建梯度阻抗和各向异性导电网络成为可能, 从而有效解决了宽频吸波中的阻抗匹配难题。

在结构设计与功能集成层面, AM 技术增加了超材料设计的自由度。通过 TPMS、点阵及仿生结构的拓扑优化, 实现了电磁波能量的宽频耗散。更为关键的是, AM 技术打通了隐身功能与力学承载、防除冰、红外兼容及散热管理等多物理场协同的壁垒, 构建了以“承载—隐身—防热”为核心的一体化工程应用实例, 显著提升了飞行器的有效载荷与环境适应性。

尽管当前研究与应用仍面临大尺寸构件制造一致性及多场性能矛盾等工程挑战, 但随着 4D 打印智能变构、人工智能逆向设计及原位传感混合制造技术的引入, 下一代隐身结构将具备环境感知与频谱认知能力, 实现下一代战机的跨越式发展。

参考文献

- [1] SAHOO P, SAINI L, DIXIT A. Microwave-absorbing materials for stealth application: A holistic overview[J]. Oxford Open Materials Science, 2023, 3: itac012.
- [2] BALL P. New lessons for stealth technology[J]. Nature Materials, 2021, 20(1): 4.
- [3] ZHANG Y L, RUAN K P, ZHOU K, et al. Controlled distributed $Ti_3C_2T_x$ hollow microspheres on thermally conductive polyimide composite films for excellent electromagnetic interference shielding[J]. Advanced Materials,

2023, 35(16): 2211642.

[4] WU Y, TAN S J, ZHAO Y, et al. Broadband multispectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 135: 101088.

[5] FANG R X, ZHANG X R, SONG B, et al. 3D and 4D printing of electromagnetic metamaterials[J]. *Engineering*, 2025, 51: 171–194.

[6] DUAN Y B, LIANG Q X, YANG Z, et al. A wide-angle broadband electromagnetic absorbing metastructure using 3D printing technology[J]. *Materials & Design*, 2021, 208: 109900.

[7] ROZANOV K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(8): 1230–1234.

[8] GUAN C L, SU S H, WANG B, et al. Electromagnetic stealth technology: A review of wave-absorbing structures[J]. *Materials & Design*, 2025, 253: 113891.

[9] RUIZ-PEREZ F, LÓPEZ-ESTRADA S M, TOLENTINO-HERNÁNDEZ R V, et al. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review[J]. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, 7(3): 100454.

[10] MA W L, LIU X Y, YANG T Y, et al. Strong magnetic–dielectric synergistic gradient metamaterials for boosting superior multispectral ultra-broadband absorption with low-frequency compatibility[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(18): 2314046.

[11] WANG D, DONG L, GU G Y. 3D printed fractal metamaterials with tunable mechanical properties and shape reconfiguration[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33: 2208849.

[12] ZHAO Y. Recent development in the research and application of structural radar absorbent material[J]. *Materials Engineering*, 1989: 41–43.

[13] MO M F. Overview of the research and development of structural stealth materials abroad[J]. *Journal of Materials Engineering*, 1991, 5(5): 46–49.

[14] PETRESCU R V, PETRESCU F I. *The Aviation History: New Aircraft I—Color*[M]. Norderstedt: Books on Demand, 2013.

[15] JIN L, ZHAO Y M, CHEN C, et al. Application, development, and challenges of

stealth materials/structures in next-generation aviation equipment[J]. *Applied Surface Science Advances*, 2024, 19: 100575.

[16] LI Y X, HAN Y W, YAN L L, et al. Multifunctional design of radar absorbing structures based on material and structure synergistic effect[J]. *Nano Research*, 2025, 18(9): 94907643.

[17] PENG J P, WANG S M, LIANG B Y, et al. Review of micro and nano scale 3D printing of electromagnetic metamaterial absorbers: Mechanism, fabrication, and functionality[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2024, 19(1): e2378937.

[18] BEN SAID L, AYADI B, ALHARBI S, et al. Recent advances in additive manufacturing: A review of current developments and future directions[J]. *Machines*, 2025, 13(9): 813.

[19] LIU Z, WANG B, WEI S C, et al. 3D-printed polymer-based microwave absorption composites: Advances and challenges[J/OL]. *Nano Materials Science*, 2025. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589965125001072>

[20] NOH D, LIM H, LEE J, et al. Recent advances in electromagnetic wave absorbers fabricated via additive manufacturing[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2025, 12(5): 1559–1596.

[21] LAI W W, WANG Y, HE J K. Effects of carbonyl iron powder (CIP) content on the electromagnetic wave absorption and mechanical properties of CIP/ABS composites[J]. *Polymers*, 2020, 12(8): 1694.

[22] BEAN R H, RAU D A, WILLIAMS C B, et al. Rheology guiding the design and printability of aqueous colloidal composites for additive manufacturing[J]. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2023, 29(4): 607–616.

[23] SHARMA S, PARNE S R, PANDA S S S, et al. Progress in microwave absorbing materials: A critical review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2024, 327: 103143.

[24] GAO B S, YAN Y F, LIU Y H, et al. A design project of multifunctional broadband electromagnetic-wave-absorbing carbon fiber fabric composite by regulating periodic structure[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 508: 161031.

[25] LI N Y, LINK G, JELONNEK J, et al. Microwave additive manufacturing of continuous carbon fibers reinforced thermoplastic composites: Characterization, analysis, and properties[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 44: 102035.

[26] TANG W K, DONG S, CUI T Y, et al. Lightweight zirconium modified carbon-carbon composites with excellent microwave absorption and mechanical properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 180: 108102.

[27] BREISS H, EL ASSAL A, BENZERGA R, et al. Long carbon fibers for microwave absorption: Effect of fiber length on absorption frequency band[J]. *Micromachines*, 2020, 11(12): 1081.

[28] ZHOU J, LI Y G, ZHANG M C, et al. Effect of lay-up configuration on the microwave absorption properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 26: 101960.

[29] DU Y C. Advances in carbon-based microwave absorbing materials[J]. *Materials*, 2022, 15(4): 1359.

[30] CHE B D, NGUYEN B Q, NGUYEN L T, et al. The impact of different multi-walled carbon nanotubes on the X-band microwave absorption of their epoxy nanocomposites[J]. *Chemistry Central Journal*, 2015, 9(1): 10.

[31] TANG J, BI S, WANG X, et al. Excellent microwave absorption of carbon black/reduced graphene oxide composite with low loading[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(22): 13990–14001.

[32] LING Q C, SUN J Z, ZHAO Q, et al. Effects of carbon black content on microwave absorbing and mechanical properties of linear low density polyethylene/ethylene-octene copolymer/calcium carbonate composites[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2011, 50(1): 89–94.

[33] SINGH S K, AKHTAR M J, KAR K K. Hierarchical carbon nanotube-coated carbon fiber: Ultra lightweight, thin, and highly efficient microwave absorber[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(29): 24816–24828.

[34] BASKEY H B, AKHTAR M J, SHAMI T C. Investigation and performance

evaluation of carbon black- and carbon fibers-based wideband dielectric absorbers for X-band stealth applications[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2014, 28(14): 1703–1715.

[35] 李斌鹏, 王成国, 王雯. 碳基吸波材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2012, 26(7): 9–14.

LI Binpeng, WANG Chengguo, WANG Wen. Research progress on carbon-based wave-absorbing materials[J]. *Materials Review*, 2012, 26(7): 9–14.

[36] 刘韩韩, 宋文哲, 宋亚星, 等. 炭黑含量对增材制造聚醚醚酮及碳纤维增强聚醚醚酮复合材料吸波性能和力学性能的影响[J]. *材料导报*, 2025, 39(S1): 674–679.

LIU Hanhan, SONG Wenzhe, SONG Yaxing, et al. Effect of carbon black mass fractions on microwave absorption and mechanical properties of additively manufactured of polyetheretherketone and short carbon fiber reinforced polyetheretherketone[J]. *Materials Reports*, 2025, 39(S1): 674–679.

[37] CHEN L, MAI T, GUO Z H, et al. 3D-printed MXene-based gradient framework for enhanced anti-reflection performance and excellent electromagnetic interference shielding with multi-scene adaptability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 513: 162871.

[38] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(37): 4248–4253.

[39] CAO M S, CAI Y Z, HE P, et al. 2D MXenes: Electromagnetic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359: 1265–1302.

[40] YUN T, KIM H, IQBAL A, et al. Electromagnetic shielding of monolayer MXene assemblies[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(9): 1906769.

[41] HAN M K, EUGENE SHUCK C, RAKHMANOV R, et al. Beyond $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$: MXenes for electromagnetic interference shielding[J]. *ACS nano*, 2020, 14(4): 5008–5016.

[42] TANG J M, GUO F Q, NI M, et al. 3D-engineered MXene aerogels for lightweight microwave absorption and infrared stealth[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1046: 184891.

[43] SHAMSHIRGAR A S, QIN L Q,

ROJAS-HERNÁNDEZ R E, et al. Bidirectional $\text{Mo}_{4.5}\text{CT}_x$ MXene/graphene aerogels for tailored microwave absorption[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2025, 8(4): 1978–1990.

[44] WU H H, ZHOU Y M, et al. Enhanced microwave absorption through fused deposition modeling of CNT/PLA/TPU composites[J]. *Journal of Applied Physics*, 2025, 137(15): 155101.

[45] GUAN X N, XU X N, KUNIYOSHI R, et al. Electromagnetic and mechanical properties of carbonyl iron powders-PLA composites fabricated by fused deposition modeling[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(11): 115303.

[46] GUO X L, YAO Z J, LIN H Y, et al. Epoxy resin addition on the microstructure, thermal stability and microwave absorption properties of core-shell carbonyl iron@epoxy composites[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, 485: 244–250.

[47] JIANG W X, YANG Z O, CAO Z H, et al. 3D printing metamaterials with ultra-broadband microwave absorption[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2026, 158: 232–241.

[48] BADIN A V, KULESHOV G E, TOMILOV I M, et al. Electrophysical microwave properties of thermoplastic carbonyl-iron based composites for application in FDM 3D printing[J]. *Russian Physics Journal*, 2025, 68(8): 1117–1123.

[49] LI C P, ZHANG Y J, JI S N, et al. Microwave absorption properties of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/(\text{SiO}_2)_x\text{-SO}_3\text{H}$ /polypyrrole core/shell/shell microspheres[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53(7): 5270–5286.

[50] YANG M, PARUPELLI S K, XU Z G, et al. Three-dimensional-printed composite structures: The effect of LSCF slurry solid loading, binder, and direct-write process parameters[J]. *Materials*, 2024, 17(12): 2822.

[51] ZHANG Y C, GAO S T, ZHANG X Z, et al. Structural and microwave absorption properties of CoFe_2O_4 /residual carbon composites[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2025, 32(1): 221–232.

[52] GEORGE E P, RAABE D, RITCHIE R O. High-entropy alloys[J]. *Nature Reviews Materials*, 2019, 4(8): 515–534.

[53] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and

related concepts[J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448–511.

[54] JIN J W, ZHENG Y Q, HU J W, et al. Surface phosphating modification of FeCoNiMn high-entropy alloys for efficient electromagnetic-wave absorption performances[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1005: 175980.

[55] DIVILOV S, ECKERT H, HICKS D, et al. Disordered enthalpy-entropy descriptor for high-entropy ceramics discovery[J]. *Nature*, 2024, 625(7993): 66–73.

[56] LI C Y, LIU Y, LI B, et al. Enhanced energy storage in high-entropy ferroelectric polymers[J]. *Nature Materials*, 2025, 24(7): 1066–1073.

[57] SHOME S, RAY N. High-entropy alloys for next-generation electromagnetic shielding applications[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2025, 27(15): 2500361.

[58] QIU Z R, LIU X Y, YANG T Y, et al. Synergistic enhancement of electromagnetic wave absorption and corrosion resistance properties of high entropy alloy through lattice distortion engineering[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(33): 2400220.

[59] HASSAN S, ZAFAR S, HOU L Z, et al. Compositional engineering nanoparticles and microwave absorption tuning of C-coated high-entropy alloy nanoparticles via vapor-phase synthesis[J]. *Science China Materials*, 2025, 68(6): 2056–2070.

[60] GAO S, ZHANG G Z, WANG Y, et al. MOFs derived magnetic porous carbon microspheres constructed by core-shell Ni@C with high-performance microwave absorption[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 88: 56–65.

[61] YAN J, HUANG Y, YAN Y H, et al. High-performance electromagnetic wave absorbers based on two kinds of nickel-based MOF-derived Ni@C microspheres[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40781–40792.

[62] LÜ Y Y, WANG Y T, LI H L, et al. MOF-derived porous Co/C nanocomposites with excellent electromagnetic wave absorption properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(24): 13604–13611.

[63] SCHMIDT J, COLOMBO P. Digital light processing of ceramic components from polysiloxanes[J]. *Journal of the European*

Ceramic Society, 2018, 38(1): 57–66.

[64] REN B, JIA Y J, CHEN H, et al. SiCnws/CNTs/Cf–C/SiOC composites with multi-scale lossy phases for simultaneous electromagnetic wave absorption and thermal insulation[J]. *Journal of Materiomics*, 2025, 11(2): 100885.

[65] MANAPAT J Z, CHEN Q Y, YE P R, et al. 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2017, 302(9): 1600553.

[66] 张俊敏, 蔡飞燕, 靳喜海, 等. 连续纤维增强陶瓷基复合材料研究与应用进展[J]. *陶瓷学报*, 2023, 44(2): 195–207.

ZHANG Junmin, CAI Feiyan, JIN Xihai, et al. Progress in research and application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. *Journal of Ceramics*, 2023, 44(2): 195–207.

[67] 刘文广, 屈圣文, 杨利华, 等. 连续纤维增强陶瓷基复合材料增材制造研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2026, 47(1): 1–15.

LIU Wenguang, QU Shengwen, YANG Lihua, et al. A review on additive manufacturing of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. *Journal of Ceramics*, 2026, 47(1): 1–15.

[68] BALLA V K, BOSE S, BANDYOPADHYAY A. Processing of bulk alumina ceramics using laser engineered net shaping[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2008, 5(3): 234–242.

[69] BAE C J, HALLORAN J W. Influence of residual monomer on cracking in ceramics fabricated by stereolithography[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(6): 1289–1295.

[70] SANTOLIVUDDO O, COLOMBO P, ORTONA A. Additive Manufacturing of ceramic components by Digital Light Processing: A comparison between the “bottom-up” and the “top-down” approaches[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(6): 2140–2148.

[71] HUANG X L, DAI H L, HU Y F, et al. Development of a high solid loading β -TCP suspension with a low refractive index contrast for DLP-based ceramic stereolithography[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(6): 3743–3754.

[72] 王长顺, 吴思琪, 闫春泽, 等. SiC

陶瓷增材制造技术的研究及应用进展[J]. *科学通报*, 2022, 67(11): 1137–1154.

WANG Changshun, WU Siqi, YAN Chunze, et al. Research and applications of additive manufacturing technology of SiC ceramics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(11): 1137–1154.

[73] 李涤尘, 鲁中良, 田小永, 等. 增材制造—面向航空航天制造的变革性技术[J]. *航空学报*, 2022, 43(4): 22–38, 3.

LI Dichen, LU Zhongliang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing—Revolutionary technology for leading aerospace manufacturing[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(4): 22–38, 3.

[74] WANG W Q, LI Z C, GAO X, et al. Material extrusion 3D printing of large-scale SiC honeycomb metastructure for ultra-broadband and high temperature electromagnetic wave absorption[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 85: 104158.

[75] WU J Q, ZHANG L, WANG W Q, et al. Microstructures, mechanical properties and electromagnetic wave absorption performance of porous SiC ceramics by direct foaming combined with direct-ink-writing-based 3D printing[J]. *Materials*, 2023, 16(7): 2861.

[76] ZHOU L F, MILLER J, VEZZA J, et al. Additive manufacturing: A comprehensive review[J]. *Sensors*, 2024, 24(9): 2668.

[77] DIJKSHOORN A. 3D printed functional structures for flapping wing aerial robotics[D]. Enschede: University of Twente, 2024.

[78] LIM D D, PARK J, LEE J, et al. Broadband mechanical metamaterial absorber enabled by fused filament fabrication 3D printing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 55: 102856.

[79] TAN R Y, ZHOU F K, LIU Y J, et al. 3D printed propeller-like metamaterial for wide-angle and broadband microwave absorption[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 144: 45–53.

[80] KRONBERGER R, SOBOLL P. 3D-printed frequency selective surfaces for microwave absorbers[C]//*Proceedings of 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. Piscataway: IEEE, 2016: 178–179.

[81] PRIYANKA, MOHANTY S, ALEGAONKAR P S, et al. Design and

manufacturing of a hexapattern frequency selective surface absorber for aerospace stealth application[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(30): 37107–37115.

[82] ZOHDİ N, YANG R C. Material anisotropy in additively manufactured polymers and polymer composites: A review[J]. *Polymers*, 2021, 13(19): 3368.

[83] CESARANO J, SEGALMAN R, CALVERT P. Robocasting provides moldless fabrication from slurry deposition[J]. *Ceramic Industry*, 1998, 148(4): 94–102.

[84] SHEN A L, CALDWELL D, MA A W K, et al. Direct write fabrication of high-density parallel silver interconnects[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 22: 343–350.

[85] FU K, WANG Y B, YAN C Y, et al. Graphene oxide-based electrode inks for 3D-printed lithium-ion batteries[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(13): 2587–2594.

[86] FARAHANI R D, DUBÉ M, THERIAULT D. Three-dimensional printing of multifunctional nanocomposites: Manufacturing techniques and applications[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(28): 5794–5821.

[87] SOLÍS PINARGOTE N W, SMIRNOV A, PERETYAGIN N, et al. Direct ink writing technology (3D printing) of graphene-based ceramic nanocomposites: A review[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(7): 1300.

[88] MEI H, YANG D, YANG W Q, et al. 3D-printed impedance gradient Al_2O_3 ceramic with in-situ growing needle-like SiC nanowires for electromagnetic wave absorption[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(22): 31990–31999.

[89] LIU X Y, MA W L, YANG T Y, et al. Multilevel heterogeneous interfaces enhanced polarization loss of 3D-printed graphene/ NiCoO_2 /selenides aerogels for boosting electromagnetic energy dissipation[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(14): 10184–10195.

[90] LI Z, LI Y, SHI B, et al. Dual gradient direct ink writing of functional geopolymer-based carbonyl-iron/graphene composites for adjustable broadband microwave absorption[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(7): 9277–9285.

[91] SHAH M, ULLAH A, AZHER K, et al. Vat photopolymerization-based 3D printing of polymer nanocomposites: Current trends and applications[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(2):

1456–1496.

[92] GAO X, CHEN J Y, CHEN X T, et al. How to improve the curing ability during the vat photopolymerization 3D printing of non-oxide ceramics: A review[J]. *Materials*, 2024, 17(11): 2626.

[93] SHAUKAT U, ROSSEGGER E, SCHLÖGL S. A review of multi-material 3D printing of functional materials via vat photopolymerization[J]. *Polymers*, 2022, 14(12): 2449.

[94] 田忠明, 郭琨毅, 盛新庆. 角反射器表面粗糙度对单站 RCS 的影响[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(10): 1227–1230.

TIAN Zhongming, GUO Kunyi, SHENG Xinqing. Effects of surface roughness on monostatic RCS of corner reflector[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(10): 1227–1230.

[95] SCANLAN K M, RUTISHAUSER A, SIMONSEN S B. Greenland Ice Sheet surface roughness from Ku- and Ka-band radar altimetry surface echo strengths[J]. *The Cryosphere*, 2025, 19(3): 1221–1239.

[96] WANG Z H, ZHANG Y Z, MIAO W J, et al. Vat photopolymerization-based additive manufacturing of Si_3N_4 ceramic structures: Printing optimization, debinding/sintering, and applications[J]. *Materials*, 2025, 18(7): 1556.

[97] FENG Y R, GUO X, ELSAYED H, et al. Enhanced electromagnetic microwave absorption properties of $\text{SiCN}(\text{Fe})$ ceramics produced by additive manufacturing via in-situ reaction of ferrocene[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(15): 25051–25062.

[98] ZHOU R, WANG Y S, LIU Z Y, et al. Digital light processing 3D-printed ceramic metamaterials for electromagnetic wave absorption[J]. *Nano-Micro Letters*, 2022, 14(1): 122.

[99] ZHAO X, LI J, LI N, et al. Polymer-derived SiOC ceramics by digital light processing-based additive manufacturing[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(6): 2921.

[100] PAGAC M, HAJNYS J, MA Q P, et al. A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3D printing[J]. *Polymers*, 2021, 13(4): 598.

[101] SCHMIDLEITHNER C, KALASKAR D M. *Stereolithography[M]/3D Printing*. London: IntechOpen Ltd., 2018.

[102] TORREGROSA-PENALVA G, GARCÍA-MARTÍNEZ H, ORTEGA-ARGÜELLO Á E, et al. Implementation of microwave circuits using stereolithography[J]. *Polymers*, 2022, 14(8): 1612.

[103] CHEKKARAMKODI D, JACOB L, MUHAMMED SHEBEEB C, et al. Review of vat photopolymerization 3D printing of photonic devices[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 86: 104189.

[104] TILVE-MARTINEZ D, POULIN P. Vat photopolymerization 3D printing of conductive nanocomposites[J]. *Accounts of Materials Research*, 2025, 6(5): 661–671.

[105] NAQUI J, DURÁN-SINDREU M, MARTÍN F. Novel sensors based on the symmetry properties of split ring resonators (SRRs)[J]. *Sensors*, 2011, 11(8): 7545–7553.

[106] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075–2084.

[107] BOLAND T J, NELSON C, ELBIDWEIHY H, et al. Additive manufacturing of complementary split ring resonator frequency selective surfaces[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2026, 32(4): 844–851.

[108] LI S N, ZHANG L Y, CHEN X F. 3D-printed terahertz metamaterial absorber based on vertical split-ring resonator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130(3): 034504.

[109] WANG C S, WU S Q, LI Z Q, et al. 3D printed porous biomass-derived SiCnw/SiC composite for structure-function integrated electromagnetic absorption[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, 17(3): 718–733.

[110] XU D W, CHEN W H, LIU P J. Enhanced electromagnetic interference shielding and mechanical properties of segregated polymer/carbon nanotube composite via selective microwave sintering[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 199: 108355.

[111] LI Y F, XU Y D, WEN G M, et al. Fabrication of 3D porous and flexible thermoplastic polyurethane/carbon nanotube composites towards high-performance microwave absorption[J]. *Molecules*, 2025, 30(17): 3610.

[112] ROLLO G, RONCA A, CERRUTI P, et al. On the synergistic effect of multi-walled

carbon nanotubes and graphene nanoplatelets to enhance the functional properties of SLS 3D-printed elastomeric structures[J]. *Polymers*, 2020, 12(8): 1841.

[113] AGHANEJAD I, KAMKAR M, ARJMAND M, et al. A surface structure for broadband microwave absorption using conductive polymer composites[C]//*Proceedings of 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*. Piscataway: IEEE, 2021.

[114] JAYAKRISHNAN V M, LIYA M L. A survey on frequency selective surfaces in EM field[C]//*Proceedings of 2020 Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*. Piscataway: IEEE, 2020: 671–675.

[115] LU G W, ZHANG J, YANG J Y, et al. Status and development of frequency selective surface radome[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(19): 198401.

[116] CHE Y X, WU S J, LI M, et al. Research progress on FSS stealth radome[J]. *Electronics*, 2025, 14(6): 1132.

[117] BAO G Y, LI P, SUN J, et al. A high-temperature-resistant stealth bandpass/bandstop-switchable frequency selective metasurface[J]. *Micromachines*, 2024, 15(8): 948.

[118] LIU Z X, WANG S J, SHAO J Z, et al. 3D radar stealth composite hierarchical grid structure with extremely broadband absorption performance and effective load bearing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 247: 110316.

[119] HUEBNER A J. Prediction of Ka-band radar cross section with THz scale models with varying surface roughness[D]. Dayton: Wright State University, 2023.

[120] 梁庆宣, 杨贞, 何锦, 等. 超材料结构增材制造技术及其应用研究进展[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(1): 30–37.

LIANG Qingxuan, YANG Zhen, HE Jin, et al. Research progress of additive manufacturing technology and its applications for metamaterial structure[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(1): 30–37.

[121] 张磊, 卓林蓉, 汤桂平, 等. 增材制造超材料及其隐身功能调控的研究进展[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(3): 10–19.

ZHANG Lei, ZHUO Linrong, TANG Guiping, et al. Additive manufacture of

metamaterials: A review[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(3): 10–19.

[122] CUMMER S A, CHRISTENSEN J, ALÙ A. Controlling sound with acoustic metamaterials[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1: 16001.

[123] MA G C, SHENG P. Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons[J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1501595.

[124] YU P, BESTEIRO L V, HUANG Y J, et al. Broadband metamaterial absorbers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(3): 1800995.

[125] VELLUCCI S, MONTI A, BARBUTO M, et al. Progress and perspective on advanced cloaking metasurfaces: From invisibility to intelligent antennas[J]. *EPJ Applied Metamaterials*, 2021, 8: 7.

[126] ZHENG L, CUI K, LI W H, et al. Nonlinear profile engineering of 3D-printed gradient impedance structures for broadband and strong microwave absorption[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 305: 112751.

[127] WU B, CHEN B, MA S, et al. An ultra-broadband and highly-efficient metamaterial absorber with stand-up gradient impedance graphene films[J]. *Materials*, 2023, 16(4): 1617.

[128] ZHANG Y J, PAN L, CAO X, et al. Boosting impedance matching by depositing gradiently conductive atomic layers on porous polyimide for lightweight, flexible, broadband, and strong microwave absorption[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(2): 3796–3805.

[129] AL HASSANIEH S, ALHANTOABI A, KHAN K A, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of additively manufactured lightweight novel re-entrant plate-based lattice structures[J]. *Polymers*, 2021, 13(22): 3882.

[130] TENG F, SUN Y G, GUO S, et al. Topological and mechanical properties of different lattice structures based on additive manufacturing[J]. *Micromachines*, 2022, 13(7): 1017.

[131] DESHPANDE V S, FLECK N A, ASHBY M F. Effective properties of the octet-truss lattice material[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, 49(8): 1747–1769.

[132] YOON H, LIM D D, GU G X, et al. Layered hybrid lattice architectures for broadband electromagnetic absorption and improved structural stiffness[J]. *Materials Horizons*, 2026, 13(4): 1952–1965.

[133] KARIM N, ZHANG M, AFROJ S, et al. Graphene-based surface heater for de-icing applications[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(30): 16815–16823.

[134] LU T H, LI X L, LU M Y, et al. Flexible and scalable photothermal/electro thermal anti-icing/de-icing metamaterials for effective large-scale preparation[J]. *iScience*, 2024, 27(11): 111086.

[135] CUI Y C, DAI N, HAN C. Structural-integrated electrothermal anti-icing components for UAVs: Interfacial mechanisms and performance enhancement[J]. *Aerospace*, 2025, 12(8): 719.

[136] ROY R, RAJ L P, JO J H, et al. Multiphysics anti-icing simulation of a CFRP composite wing structure embedded with thin etched-foil electrothermal heating films in glaze ice conditions[J]. *Composite Structures*, 2021, 276: 114441.

[137] LARCIPRETE M C, ALBERTONI A, BELARDINI A, et al. Infrared properties of randomly oriented silver nanowires[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(8): 083503.

[138] ZHANG J K, SHI J M, ZHAO D P, et al. Realization of compatible stealth material for infrared, laser and radar based on one-dimensional doping-structure photonic crystals[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 62–65.

[139] MENG Z, UNIVERSITY A F E, LIU D Q, et al. Multifunctional integrated metamaterials for radar-infrared-visible compatible multispectral stealth[J]. *Optics Express*, 2024, 32(10): 17869.

[140] ZHANG X L, GONG Y H, LI M, et al. Single-layer multifunctional metasurface for laser-infrared-microwave compatible stealth[J]. *Optics Express*, 2024, 32(5): 8069.

[141] HUANG Y F, CHEN G J, WANG X R, et al. Advances in radar/infrared compatible stealth materials[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2025, 36(4): 278.

[142] XIE X, LI X, PU M B, et al. Plasmonic metasurfaces for simultaneous thermal infrared invisibility and holographic

illusion[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(14): 1706673.

[143] ZHANG D, WU B, NING J, et al. Ultra-wideband flexible radar-infrared bi-stealth absorber based on a patterned graphene[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 1969.

[144] LIU L P, CHEN Z S, LI Z G, et al. Design of a low-infrared-emission and wideband-microwave-absorption lightweight metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(5): 399.

[145] PEZZANA L, RICCUCCI G, SPRIANO S, et al. 3D printing of PDMS-like polymer nanocomposites with enhanced thermal conductivity: Boron nitride based photocuring system[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(2): 373.

[146] CLARK-JOHNSON L P. Evaluation of boron nitride nanobarb as thermal conductivity enhancers to CNT composites[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2022.

[147] CHAHID Y, ATKINS C, HODBOD S, et al. Optimizing a photon absorber using conformal cooling channels and additive manufacturing in copper[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2025, 32(4): 884–898.

[148] HAGGSTROM M, LINDGREN S. Novel thermal management for airborne radar systems: An investigation on the feasibility to use metal alloys as phase change materials for electronics cooling[J]. Umeå: Umeå University, 2025.

[149] LI H Y, YUAN H, COSTA F, et al. Optically transparent water-based wideband switchable radar absorber/reflector with low infrared radiation characteristics[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 42863.

[150] ZHANG T T, LI D C, YANG Z, et al. A multi-materials 3D-printed continuous conductive fibre-based metamaterial for broadband microwave absorption[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2024, 19(1): e2285417.

[151] LVOV V A, SENATOV F S, KORSUNSKY A M, et al. Design and mechanical properties of 3D-printed auxetic honeycomb structure[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24: 101173.

[152] LI Q, WANG Z C, WANG X Y, et al. The 3D printing of novel honeycomb-hollow pyramid sandwich structures for microwave and mechanical energy absorption[J]. *Polymers*, 2023, 15(24): 4719.

Applications and Prospects of Additive Manufacturing in Broadband Wave Absorption for Aircraft

CHEN Long¹, YU Haowen¹, LU Licheng¹, LIU Zhanqiang¹, WU Qiong², WU Xiao³, JIA Zhen³

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites, Jinan 250031, China)

[ABSTRACT] As modern radar detection systems evolve towards multi-band, ultra-wideband, and multi-base station collaborative detection modes, traditional stealth technologies relying solely on surface coatings are no longer sufficient to meet the stringent requirements of future aircraft for broadband, lightweight, and multi-functional integration. Additive manufacturing technology, with its extremely high degree of geometric design freedom and multi-material forming capabilities, provides a revolutionary solution to overcome the physical limits of traditional radar-absorbing structures, driving the transformation of stealth technology towards a “structure–function integration” paradigm. This paper systematically reviews the latest research progress of additive manufacturing technology in the field of broadband radar absorption for aircraft, deeply reviews the radar-absorbing material systems suitable for additive manufacturing, the principles and characteristics of mainstream additive manufacturing processes and further discusses engineering application examples of achieving multi-functional synergy of “load-bearing, stealth and thermal protection” through macro-micro cross-scale design. Finally, it summarizes the current challenges and the core directions for future development in the field of broadband radar absorption.

Keywords: Additive manufacturing; Broadband absorption; Structure–function integration; Metamaterials; Intelligent stealth

(责编 逸飞)