

超材料吸波体研究现状及展望

曹俊倡^{1,2,4}, 赵业浩², 王梓尧^{2,5}, 张子栋^{1,2,3}

1. 山东大学 国家卓越工程师学院, 山东 济南; 2. 山东省超材料与电磁调控技术重点实验室, 山东 济南; 3. 山东大学 材料科学与工程学院, 山东 济南; 4. 山东工业陶瓷研究设计院有限公司, 山东 淄博; 5. 山东大学 管理学院, 山东 济南

摘要 | 超材料吸波体能够通过结构设计实现对电磁波的定向吸收, 凭借其性能可控可设计的独特优势, 在低/宽频吸收、雷达散射截面缩减及表面行波抑制等方面具有重要应用价值, 目前已成为新一代高性能吸波材料及电磁功能结构研发的关键技术途径, 受到国内外政府、各类研究机构及相关应用单位的重视。本文首先对超材料吸波体的基本概念与原理进行了系统性的阐述, 同时对领域内国内外相关研究现状进行了归纳总结及评述, 并介绍了超材料吸波体领域内目前所面临的主要难点问题, 最后对超材料吸波体未来的发展趋势进行了展望。

关键词 | 超材料; 吸波; 电磁波; 雷达隐身; 进展

Copyright © 2026 by the author(s).

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



引言

吸波材料能够有效吸收雷达探测信号, 缩减目标的雷达散射截面, 从而降低武器装备被敌方雷达发现的概率, 有效提升装备的战场生存能力, 是雷达隐身技术的关键基础材料^[1]。以羰基铁、钡铁氧体等为典型代表的传统吸波材料, 能够实现较宽的吸收带宽和低频吸收效果, 但也存在质量重、吸波特性受环境温度影响大等问题^[2]。近年来, 一种利用超材料技术所开发的新型吸波材料——超材料吸波体受到了国内外研究机构及应用单位的广泛关注。超材料吸波体是一种新型吸波材料, 其吸波机理与传统吸波材料具有较大的区别, 主要是通过结构设计诱导谐振, 进而实现对电磁波的可控吸收。相较于

传统吸波材料, 超材料吸波体具有吸收强度高、质量轻等优势, 在新型宽频高效吸波材料/结构研发过程中发挥着重要作用。本文首先对超材料吸波体的定义及吸波机理进行了论述。在此基础上, 系统检索了从 2008 年至今, 以中国知网 (CNKI)、Web of Science 及 Scopus 数据库为代表的主流数据库中相关文献, 主要采用领域内的高被引文献及近五年内发表的最新研究成果, 文献内容涵盖不同技术路线 (复杂图案、多层堆叠、集总元件/高阻抗表面) 的代表性工作, 同时兼顾理论设计、仿真分析与实验验证类文献, 对宽频超材料吸波体的分类及研究现状进行了系统性归纳总结及评述。最后, 针对超材料吸波体研究领域内目前存在的难点问题, 提出了未来的研究趋势与重点方向, 以期为读者提供该领域研究脉络与关键技术路线的整体图景。

基金项目: 山东省重点研发计划 (2026CXPT135); 国家自然科学基金 (52272117, 52572135)

作者简介: 张子栋, 山东大学材料科学与工程学院教授, 主要从事电磁超材料方向研究。

文章引用: 曹俊倡, 赵业浩, 王梓尧, 张子栋. 超材料吸波体研究现状与展望[J]. 应用科技研究, 2026, 1 (4): 176-184.

<https://doi.org/10.68070/g0746y34>

1 超材料吸波体的定义

超材料吸波体 (Metamaterial Absorber, MMA) 通常是指一类人工设计的电磁功能结构, 其中周期或非周期排列的亚波长单元结构, 能够对特定频率的入射电磁波产生谐振响应, 并将能量以焦耳热 (或其它损耗机制) 的形式高效耗散, 从而实现对特定

频段电磁波的近完美吸收。相比于传统吸波材料, 超材料吸波体可以通过改变阵列单元的几何参数、排列方式等手段, 实现对电磁波的可调高效吸收, 并可通过多层堆叠、添加集总元件以及图案化电阻膜等方式实现宽频化, 已成为吸波材料实现“薄、轻、宽、强”的重要技术途径。

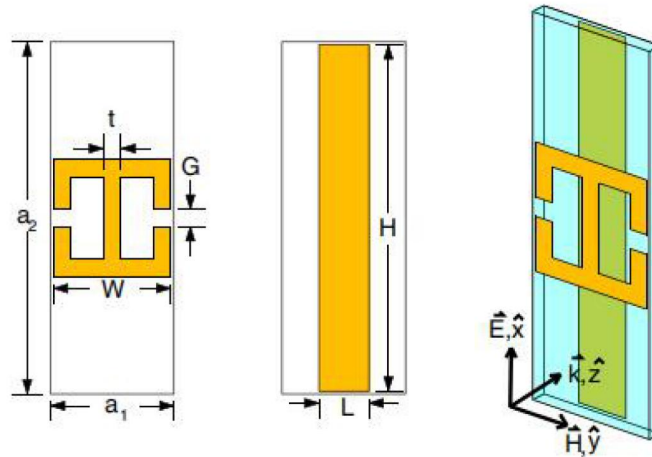


图 1 完美超材料吸波体结构示意图^[3]

Fig. 1. Schematic diagram of perfect metamaterial absorber structure^[3]

Landy 等人于 2008 年设计了首个超材料吸波体^[3], 其结构如图 1 所示。吸波体包含三层结构: 顶层的开口谐振环阵列、中间的电介质层以及底层金属线, 其吸波机理可概括为: 结构中的顶层开口谐振环提供电响应, 并在磁场分量的诱导下, 与底层金属线形成反向电流产生磁谐振, 中间介质层主要承担支撑与损耗的功能, 利用结构中的谐振特性实现了在 11.5 GHz 的完美吸收, 并且可以通过改变单元尺寸大小, 上下层间距等参数对吸收频点进行调控。相较于传统吸波材料, 超材料吸波体的性能取决于人工结构而非材料本征性质, 因此具有设计自由度大、频段可调等优势。但是同时也存在对电磁波的偏振模式、入射角敏感, 以及吸收带宽较窄等不足之处等问题, 例如该吸波体顶层谐振环的开口方向必须与入射电磁波的电场分量方向保持垂直,

才能够实现有效吸收, 极大限制了超材料吸波体的实际应用。因此, 如何拓展超材料吸波体的吸收带宽, 兼顾角度与极化模式稳定特性, 一直以来都是超材料吸波体研究领域的重点方向。

2 宽频超材料吸波体的分类及研究现状

目前, 超材料吸波体实现宽频化的主要技术途径可分为三种: (1) 复杂图案, 嵌套多种不同尺寸图形; (2) 多层堆叠; (3) 加载集总元件或使用高阻抗表面。其中复杂图案和多层堆叠的主要机理是将相邻的不同特征尺寸所对应的谐振吸收峰叠加, 从而实现多频吸收; 加载集总元件或高阻抗表面则主要是通过提高材料本征损耗来拓展吸收带宽。表 1 为三种技术途径特点对比。

表 1 超材料吸波体宽频化技术途径对比

Tab. 1. Comparison of Broadband Techniques for Metamaterial Absorbers

技术途径	吸收带宽	厚度	角度稳定性	优点	局限
复杂图案	多点吸收	较薄	一般	设计自由度高, 多频点可调	加工精度要求高, 低频结构尺寸偏大
多层堆叠	多频段吸收	较厚	较好	带宽拓展明显, 设计灵活	厚度较大, 加工难度高

续表 1 超材料吸波体宽频化技术途径对比

Tab. 1.(Continued) Comparison of Broadband Techniques for Metamaterial Absorbers

技术途径	吸收带宽	厚度	角度稳定性	优点	局限
集总/高阻抗表面	宽频吸收	较薄	较好	阻抗匹配优良, 可动态调控	高频性能受限, 材料成本高, 加工困难

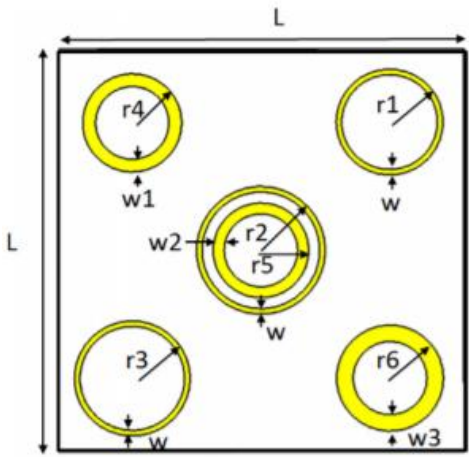
2.1 复杂图案型宽频吸波体

超材料吸波体中, 由电磁谐振引起的吸收峰频率通常与结构单元的几何尺寸密切相关, 而单一尺寸的结构单元往往仅能在特定频点实现较窄的吸收峰。为解决这一问题, 部分研究者提出采用复杂多尺寸结构单元设计, 以拓展超材料吸波体的有效吸收带宽^[4-6]。Li 等人将简单图案按一定比例因子进行缩放, 并将不同尺寸的缩放结构单元在区域内进行特定排列, 利用不同尺寸结构单元所引发的多频点谐振特性实现了多频段吸收; 研究还发现, 特定的排列方式能够在一定程度上削弱相邻单元之间的耦合作用^[6]。Hema O. Ali 等人则利用单元间的耦合作用, 通过整体设计尺寸不同的谐振环, 实现了六个频点的高角度稳定完美吸收^[7]。

尽管采用不同尺寸的谐振单元能够有效实现多频带吸收, 但在实际工程化应用过程中, 不同尺寸结构单元的几何参数及单元间距等往往对加工精度提出较高要求; 同时, 对于低频段而言, 波长较长,

相应地要求单元结构尺寸也较大。因此, 如何降低加工难度并缩减低频单元尺寸, 成为亟待解决的关键问题。分形结构作为一种多级复合结构, 与简单图形相比, 具有多尺度特性、自相似性、多尺度对称性以及较高的空间利用率等优势。将其用作谐振单元, 有望通过调节分形结构的级数、支数等参数, 在单一图案中激发出多个谐振频点; 若这些频点的共振频率较为接近且具有一定带宽, 便可构建连续吸收带, 同时还能有效缩减低频谐振单元的尺寸, 减少加工过程中所需考虑的精度基准数量。因此, 分形结构在设计宽频超材料吸波体方面具有很大的潜力。Huang 等人将树形分形结构与磁性材料相结合, 使材料吸波带宽拓展了 1.7 GHz, 吸收带拓宽了 88%, 同时减少了底层介质厚度^[8]。Fang 等人设计了两种具有稳定吸波性能的分形结构, 利用分形结构诱导产生多级 LC 谐振, 在阻抗匹配和多重谐振的共同作用下, 该分形结构超材料吸波体在以 6.87 GHz、11.85 GHz 和 13.29 GHz 三个频点为中心频率的范围内表现出优异的吸波性能^[9]。

(a)



(b)

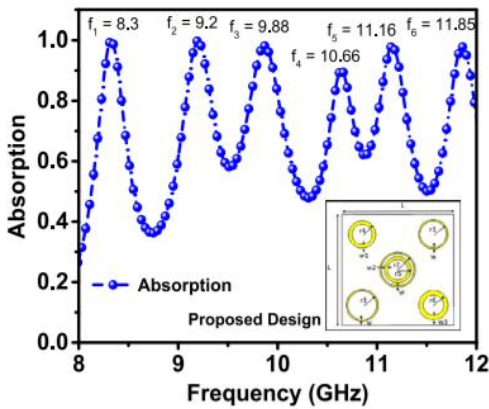


图 2 多谐振单元超材料吸波体 (a)超材料单元结构; (b)仿真吸收率曲线^[7]

Fig. 2. Multi-resonant metamaterial absorber (a) metamaterial unit structure; (b) Simulation absorption curve^[7]

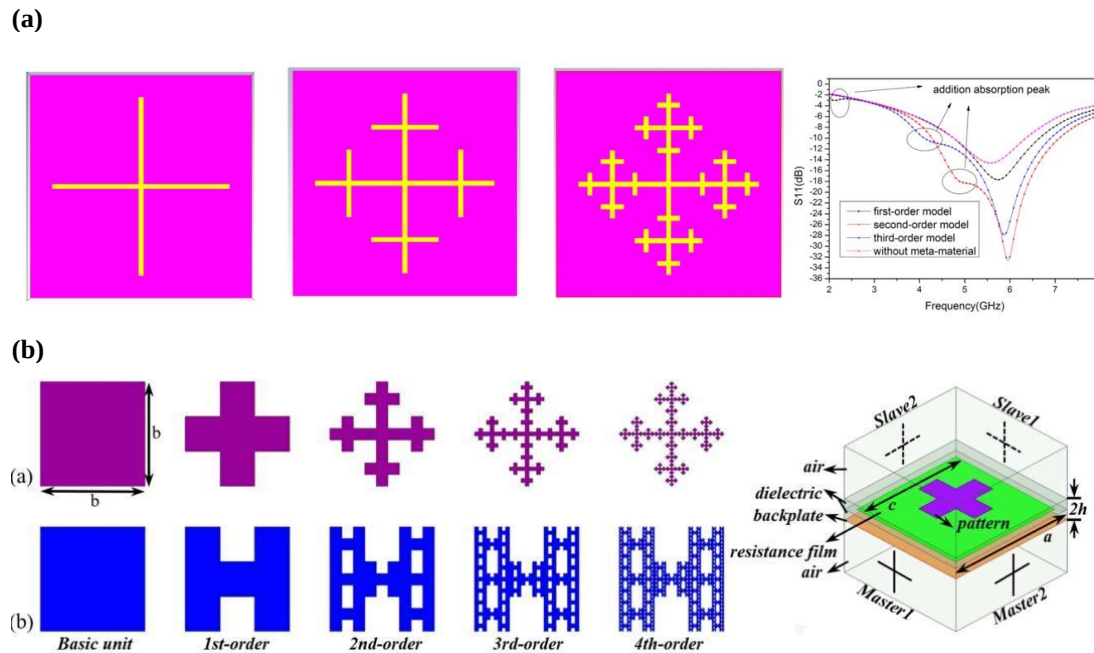


图 3 (a)分形结构及其反射系数^[8]; (b)高阶分型结构^[9]
Fig. 3. (a) Fractal structure and its reflection coefficient^[8]; (b) High-order parting structure^[9]

综合来看, 复杂图案型宽频吸波体通过多尺寸谐振单元的协同作用, 能够在相对较薄的厚度下实现多频带或宽带吸收, 其设计灵活度高, 但存在以下局限: 其一, 多尺寸单元对加工精度要求较高, 尤其是低频段所需的大尺寸单元进一步增加了加工难度; 其二, 单元间耦合效应对排列方式敏感, 设计不当可能导致吸收峰简并或带宽缩减。分形结构的引入在一定程度上缓解了单元尺寸与低频谐振之间的矛盾, 但分形级数与支数的优化仍需大量参数扫描, 设计效率有待提升。

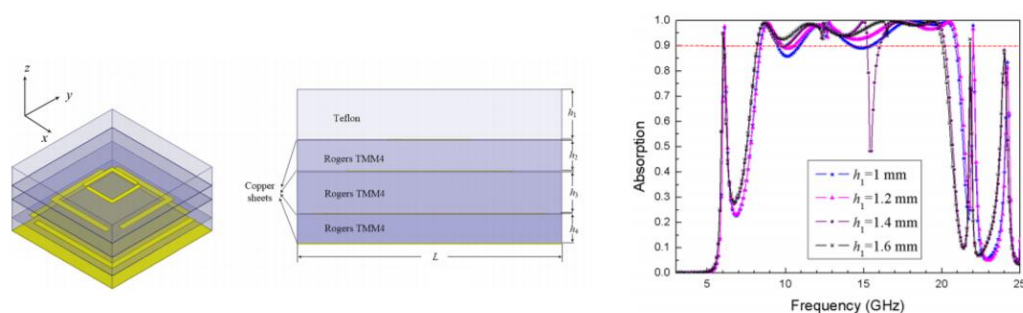
2.2 多层堆叠型超材料吸波体

在超材料吸波体设计中, 可通过多层堆叠的方式获得宽带吸收特性。该方案实现吸收频带展宽的原理是, 通过不同层的差异化谐振频率, 或是优化阻抗匹配条件产生耦合效应, 最终实现宽带吸收^[10-13]。Zhou 等人选择尼龙作为基体、羰基铁粉作为吸波剂, 采用选择性激光烧结方法制备了多层宽带吸波超材料。在所设计的多层超材料吸波体结构中, 表层阻抗为 150Ω , 中间层阻抗为 290Ω , 表层与中间层提供了较好的阻抗匹配条件; 底层为损耗层, 阻抗为 360Ω , 与空气阻抗更为接近; 该吸波体整体厚度仅 2.89 mm , 可实现 $8-18 \text{ GHz}$ 频段内电磁波的高效宽频吸收^[14]。Wen 等人设计了三层结构的多层吸波超材料, 每层结构均由刻蚀在损耗层上的环形、圆形结构单元组成, 单个层可产生两个

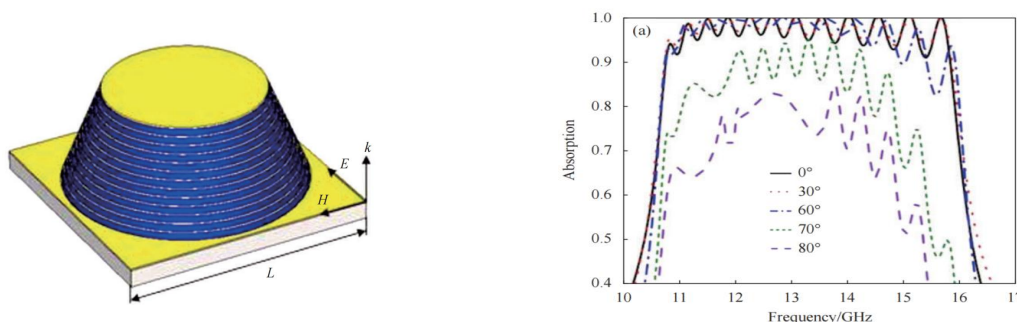
谐振频点; 不同层中结构单元的半径分别对应不同的谐振频率, 通过三层堆叠形成了宽频吸收带。该超材料吸波体在 $8.8-10.8 \text{ GHz}$ 频段内吸收率超过 80% , 吸收峰的半高宽为 2.3 GHz ^[15]。

除了调整多层结构中谐振单元的几何尺寸之外, 还可以采用梯度折射率的方式实现宽频吸波: 即在中层堆叠结构中, 不同层采用折射率不同的介质材料, 利用折射率的非线性变化改变入射电磁波的传播路径, 使电磁波在较宽频率范围内发生相互干涉, 最终实现宽带吸收。Sun 等人采用多层开口谐振环进行结构设计, 在结构中构建出特殊的折射率色散分布, 进而获得了宽频带连续减反特性^[13]。Xiong 等人则提出了一种金属环结合介质层的多层结构, 通过调整金属环的几何尺寸和每一层的高度, 可实现高梯度折射率分布, 诱导入射波与反射波之间产生相干相消, 并使邻近的吸收峰发生简并, 实现宽带吸收。测试结果表明, 该结构厚度为 3.65 mm 时, 可在 $8.37-21 \text{ GHz}$ 的宽带范围内吸收 90% 的电磁波^[16]。Nguyen 等人采用多层堆叠结合尺寸渐变的方式形成折射率梯度, 开发了一种具有较宽吸收带宽并且具有高角度稳定性的超材料吸波体^[17]。Yin 等人基于电磁黑洞设计理论, 采用立体光刻机制作了具有梯度折射率的多层超材料吸波体, 该结构可弯曲入射电磁波的传播路径, 测试显示其在 $12-18 \text{ GHz}$ 范围内反射损耗小于 -10 dB , 表现出较好的宽带吸收性能^[18]。

(a)



(b)

图 4 多层堆叠型超材料吸波体^[16, 17]Fig. 4. Multilayer stacked metamaterial absorber^[16, 17]

需要指出的是, 尽管通过采用多层堆叠的方式能够有效拓宽超材料吸波体的有效吸收频带宽度, 但是这种结构往往厚度较大, 限制了在一些对于厚度、重量等有严格要求的特定应用场景下的应用。同时, 多层堆叠结构的复杂性也大大增加了加工难度, 提高了制造成本。与复杂图案型方案相比, 多层堆叠在带宽拓展能力方面通常更具优势。因此, 在实际设计中需要在带宽与厚度之间进行权衡, 或通过将多层堆叠与复杂图案、电阻膜等方法结合使用, 以在有限厚度内实现更优的综合性能。

2.3 加载集总元件/高阻抗表面型宽频吸波体

近年来, 在超材料吸波体中加载集总元件已成为拓展吸波带宽的重要技术途径。集总元件主要包括电阻和电容: 电阻可将电磁波能量转化为热能消耗, 电容则可储存电磁波能量。通过加载集总元件, 能够有效改善超材料吸波体的阻抗匹配特性并增强损耗, 从而实现宽频吸收^[19-22]。S. Kalraiya 等人设计并制造了一种加载集总电阻的柔性宽频吸波体, 整体结构分为三层: 顶层为加载集总电阻的十字形谐振单元, 中间层为柔性泡沫, 底层为铜金属膜。仿真结果表明, 该结构能够对 3.25-13.6 GHz 频段范围内的电磁波实现有效吸收^[23]。Xu 等人在谐振单元中引入有源器件二极管以调节超材料吸波体的性能, 通过控制电路调节二极管的通断, 进而改变超材料吸波体的电磁特性。研究表明, 该超材料吸波体在

共振频率处展现出完美吸收特性, 而在共振频率范围之外则表现出高反射, 同时具备动态可调能力^[24]。

除了添加集总元件之外, 采用高阻抗特性的电阻膜也是拓展吸收带宽的有效技术手段。对电阻膜吸波材料的研究最早可追溯至 1988 年的 Salisbury 屏, 其由金属基底、中间层介质和上层电阻膜组成。然而, 其吸波性能主要取决于层厚: 当厚度为四分之一波长时, 金属基底处反射电场强度最高, 电阻膜层具有损耗能力, 电磁波能量大量损耗, 从而实现较好的电磁波吸收。但此类吸波体的吸波性能源于电磁谐振, 吸波带宽较窄; 同时, 其厚度与电磁波波长相关, 在吸收低频电磁波时需要较厚的结构, 因此在实际应用中受到较大限制^[25]。在 Salisbury 屏基础上开发的 Jauman 吸波体采用多层堆叠方式获得多个谐振频点, 从而拓展吸波频带, 但同样存在厚度问题。

针对电阻膜存在的上述问题, 国内外相关研究机构开展了大量研究, 并提出将电阻膜进行图案化设计的研究思路, 以期在不增加厚度的前提下实现宽频吸波。Zhang 等人设计并制作了一种基于电阻膜的具有光学透明性质的宽频超材料吸波体, 顶层图案采用氧化铟锡 (ITO), 结构单元形似风车, 介质层为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 衬底为聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET), 如图 5 所示。该吸波体主要以欧姆损耗的形式耗散电磁波能量, 在电磁

波垂直入射情况下会形成三个吸收带，中心频点分别位于 9.8 GHz、14.3 GHz 和 16.6 GHz^[26]。Chen 等人设计了一种基于八角形电阻贴片的宽带高阻抗表面超材料吸波体，有效吸收带宽高达 10.28

GHz（3.65-13.93 GHz）^[27]。Satya 等人采用图案化电阻膜开发了一种 Ku 波段单层超材料吸波体，结构整体厚度约 6.4 mm，可实现对 10.02-18.02 GHz 范围内电磁波 90%以上的吸收^[28]。

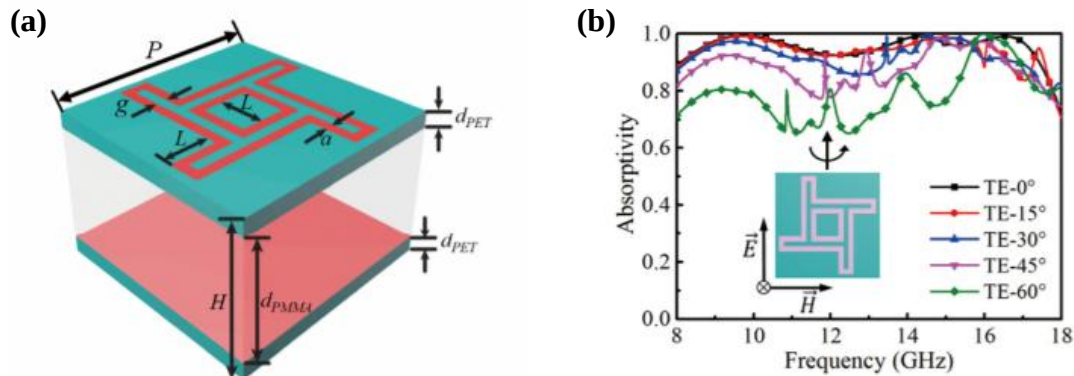


图 5 电阻膜型超材料吸波体 (a)超材料结构单元; (b)仿真吸收率曲线^[26]

Fig. 5. Resistive film type metamaterial absorber (a) metamaterial structural unit; (b) Simulation absorption curve^[26]

需要指出的是，通过采用上述方法都能实现吸收频带的拓宽，但在实际设计中一般会将这几种方法综合进行使用，比如在使用电阻膜图案的同时，采取多层堆叠设计进一步拓展带宽，实现更加优良的性能。Yakeen Tayde 等人基于该设计思路，开发了一款多层超材料吸波体，在结构总厚度为 12.3mm 时，有效吸收带宽覆盖了整个 S、C、X 和 Ku 波段，

相对带宽可达 160.97%^[29]。与复杂图案型和多层堆叠型方案相比，加载集总元件/高阻抗表面型吸波体在阻抗匹配调控方面更为灵活，且可通过有源器件实现动态可调，但其集总元件在高频段的寄生效应以及电阻膜方阻均匀性等问题仍需进一步解决。此外，该类吸波体的制备成本相对较高，在大尺寸批量制备方面面临一定挑战。

表 2 不同种类超材料吸波体性能对比^[30]

Tab. 2. Performance Comparison of Different Types of Metamaterial Absorbers

类别	结构形式	厚度	吸波频段范围	相对带宽	吸收率
平面排布	“三明治”结构	$0.041 \lambda_L$	30.6 至 37.5 THz	20.26%	$\geq 80\%$
	分形结构	$0.060 \lambda_L$	9.05-11.4 GHz	23.0%	$\geq 80\%$
多层堆叠	多层结构	$0.062 \lambda_L$	24.8/25.5 THz	—	$\geq 90\%$
	金字塔结构	$0.130 \lambda_L$	7.8-14.7 GHz	61.33%	$\geq 90\%$
电阻膜/ 集总元件	“三明治”结构	$0.093 \lambda_L$	7.0-27.5 GHz	118.8%	$\geq 90\%$
	多层结构	$0.082 \lambda_L$	2.0-18.5 GHz	160.97%	—
	单层结构	$0.077 \lambda_L$	5.3-11.2 GHz	70.70%	$\geq 90\%$
混合方式	多层结构	$0.075 \lambda_L$	4.5-25.4 GHz	139.6%	$\geq 80\%$

注：相对带宽指有效吸收带宽与中心频率的比值， λ_L 为最低工作频率所对应的电磁波波长

3 关键性难点问题与展望

超材料吸波体作为一类新型吸波材料，虽已展现出优异性能，但在工程化应用领域，仍存在不少问题制约其实际落地应用。

首先，需要解决的是“有效吸收带宽”与“结构厚度”之间的矛盾：基于电磁谐振原理的超材料吸波体，吸波带宽严格受结构尺寸限制，依靠单一尺寸谐振单元难以实现宽频吸收；通过多层堆叠或加载集总

元件虽可实现宽带化，但往往以增加厚度为代价，难以满足航空航天等对结构厚度有严格要求的应用场景。其次，需要解决的是“理论设计”与“实际加工”之间的矛盾：超材料吸波体的设计通常依托专业电磁仿真软件完成，设计过程中依据技术指标设置参数时，往往采用理想化的材料参数与边界条件；而使用真实材料加工制备的样件，受限于加工工艺，在材料本征参数、结构尺寸、阵列间距等方面与设计方案通常存在一定误差，最终导致实际样品的吸波性能与仿真结果相比，出现频偏或吸收率衰减。

此外,超材料吸波体在机械应力、热应力等多场耦合作用下的性能稳定性问题,也尚未得到系统性解决。当前,超材料吸波体领域正处于从“电磁功能设计及验证”向“工程化应用”过渡的关键阶段,为推动超材料吸波体从实验室走向实际应用,可重点围绕以下研究方向推进工作。

基于人工智能的超材料吸波体快速设计。传统超材料吸波体的设计需要设计人员依靠自身经验反复调整结构参数与材料参数,不仅设计周期漫长,在面临“有效吸收带宽”与“结构厚度”的矛盾时,也难以快速找到兼顾两类指标的最优方案;同时人工设计过程中,参数选择往往存在局限性,还会进一步放大后续加工误差带来的性能偏差。因此,在超材料吸波体设计中引入人工智能,依托深度学习、拓扑优化等技术手段,摆脱超材料吸波体设计对人工经验调参的依赖,通过对吸收带宽、结构厚度、吸收频段等关键参量的学习训练,实现对超材料吸波体参数空间的快速筛选及智能化设计,是超材料吸波体研究领域的重要发展方向。同时,在设计阶段预先纳入真实材料的参数取值范围、加工误差范围等实际约束条件,提前优化设计方案对加工误差的容忍度,提升设计方案的实际可行性,也是该领域需要重点关注的方向。

多物理场耦合作用下的一体化设计。目前超材料吸波体的设计过程中,通常仅考虑室温条件、无额外载荷作用下的吸波性能,针对实际应用场景中复杂多场条件对材料与结构的影响,虽已有少量相关研究,但并未开展系统化深入探索。例如在高超声速应用场景中,超材料吸波体需要长时间承受高温带来的热效应、高速气流带来的机械应力,进而引发结构形变、电磁参数温漂等问题,最终导致吸波性能偏移甚至完全失效;在柔性化、共形化应用场景中,超材料吸波体需要承受反复弯折产生的机械应力,同样会破坏结构谐振特性,造成吸波性能衰减。该问题的存在直接影响超材料吸波体的实际应用可行性,因此,转变传统单一电磁场下的设计思路,将实际应用场景中存在的高温、应力场等多场条件纳入设计流程,建立能够准确反映多场作用下超材料吸波性能变化的测试与仿真体系,形成多物理场耦合条件下超材料吸波体设计方法,从实际应用的核心需求出发开展超材料吸波体设计,是推动超材料吸波体走向工程化应用的关键研究方向之一。

复杂结构的低成本大规模制备。超材料吸波体往往具有精密的微纳结构,传统加工方法如光刻、电子束刻蚀等,虽可满足精度要求,但存在加工设备成本高昂、加工效率低下的问题,仅能满足实验室小样品制备需求,无法支撑工程化应用对大尺寸、大批量超材料吸波体的生产要求。因此,开发适配

超材料吸波体复杂结构、兼具加工精度与成本效益的批量制备技术,是超材料吸波体走向实际应用需要重点解决的关键问题。一方面,可针对超材料吸波体的加工要求,对现有成熟大规模制备工艺进行改造,例如将印刷电子技术、模压成型技术、3D 打印技术等与超材料吸波体的加工需求结合,在保证结构加工精度的前提下,大幅降低加工成本、提升加工效率,实现大尺寸超材料吸波体的批量化生产,满足航空航天、民用装备等领域对大尺寸吸波结构的需求;另一方面,需要大力提升制备工艺的稳定性,缩小加工过程中结构尺寸、材料参数的误差范围,提升批量加工成品的性能一致性,从而打通制约超材料吸波体工程化应用的最后一环,推动超材料吸波体真正从实验室样品转化为工程中可实际应用的产品。

参考文献

- [1] A. Dubey, T. Shami. Metamaterials in Electromagnetic Wave Absorbers[J]. Defence Science Journal, 2012, 62(4): 261-268.
- [2] 王一帆,朱琳,韩露,等.电磁吸波材料的研究现状与发展趋势[J].复合材料学报,2023,40(1): 1-12.
- [3] N. Landy, S. Sajuyigbe, J. Mock, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [4] Z. Zhang, L. Yang, W. Cai, et al. Topological Non-Trivial Möbius Unknot Metamaterials with Robust Electromagnetic Properties[J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20(5): e00525.
- [5] H. Xiong, F. Yang. Ultra-broadband and tunable saline water-based absorber in microwave regime[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5306-5316.
- [6] H. Li, L. Yuan, B. Zhou, et al. Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(1): 014909.
- [7] H. Ali, A. Al-Hindawi, Y. Abdulkarim, et al. New compact six-band metamaterial absorber based on Closed Circular Ring Resonator (CCRR) for Radar applications[J]. Optics Communications, 2022, 503(127457).
- [8] D. Huang, F. Kang, C. Dong, et al. A second-order cross fractal meta-material structure used in low-frequency microwave absorbing materials[J]. Applied Physics A, 2014, 115(2): 627-635.
- [9] S. Fang, L. Deng, P. Zhang, et al. Dual-band metamaterial absorber with stable absorption performance based on fractal structure[J]. Journal of Physics, D. Applied Physics, 2022, 55(9): 95003.

- [10] X. Liu, W. Cai, H. Tian, et al. Dorsiventrally Bicolored Leaf-Inspired Metamaterial Absorbers for Tailorable Electromagnetic Absorption[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(45):e73992.
- [11] Y. Cui, K. Fung, J. Xu, et al. Ultrabroadband Light Absorption by a Sawtooth Anisotropic Metamaterial Slab[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [12] Y. Shen, J. Zhang, Y. Pang, et al. Broadband reflectionless metamaterials with customizable absorption-transmission-integrated performance[J]. *Applied Physics A*, 2017, 123(8): 530.
- [13] J. Sun, L. Liu, G. Dong, et al. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21155-21162.
- [14] D. Zhou, X. Huang, Z. Du. Analysis and Design of Multilayered Broadband Radar Absorbing Metamaterial Using the 3-D Printing Technology-Based Method[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 133-136.
- [15] D. Wen, H. Yang, Q. Ye, et al. Broadband metamaterial absorber based on a multi-layer structure[J]. *Physica Scripta*, 2013, 88(1): 15402-15407.
- [16] H. Xiong, J. Hong, C. Luo, et al. An ultrathin and broadband metamaterial absorber using multi-layer structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(6): 064109.
- [17] T. Nguyen, P. Huu, P. Duy. Wide-angle and polarization-independent broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(5):1157-1161.
- [18] M. Yin, X. Tian, L. Wu, et al. A Broadband and omnidirectional electromagnetic wave concentrator with gradient woodpile structure[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 19082.
- [19] S. Liu, F. Ding, J. Wu, et al. A metamaterial absorber with centre-spin design and characteristic modes analysis[J]. *Physica Scripta*, 2022, 97(4): 045502.
- [20] H. Chen, Y. Huang, G. Li, et al. Design and experimental validation of a low-profile wideband metamaterial absorber by characteristic modes analysis[J]. *Results in Physics*, 2021, 28:104684.
- [21] J. Xu, Z. Zeng, C. Fan, et al. Enabling high-efficiency long-distance low frequency communication with a co-designed metamaterial transmitter and receiver[J]. *Science China Technological Sciences*, 2026, 69(9): 1920202.
- [22] D. Ye, Z. Wang, K. Xu, et al. Ultrawideband dispersion control of a metamaterial surface for perfectly-matched-layer-like absorption[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(18): 187402.
- [23] S. Kalraiya, R. K. Chaudhary, M. A. Abdalla. Resistor loaded wideband conformal metamaterial absorber for curved surfaces application[J]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2022, 143:154033.
- [24] W. Xu, S. Sonkusale. Microwave diode switchable metamaterial reflector/absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(3): OP98-OP120.
- [25] R. Fante, M. McCormack. Reflection properties of the Salisbury screen[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, 36(10): 1443-1454.
- [26] C. Zhang, Q. Cheng, J. Yang, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(14): 143511.
- [27] J. Chen, Z. Hu, G. Wang, et al. High-Impedance Surface-Based Broadband Absorbers With Interference Theory[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(10): 4367-4374.
- [28] S. Mishra, S. Maity. A resistive sheet based absorber for Ku band applications[C]. 2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON). IEEE, 2022: 352-356.
- [29] Y. Tayde, M. Saikia, K. V. Srivastava, et al. Polarization-Insensitive Broadband Multilayered Absorber Using Screen Printed Patterns of Resistive Ink[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(12): 2489-2493.
- [30] 王彦朝, 许河秀, 王朝辉, 等. 电磁超材料吸波体的研究进展[J]. *物理学报*, 2020, 69(13):33-45.

Research Progress and Prospect of Metamaterial Absorbers

Cao Junchang^{1,2,4}, Zhao Yehao², Wang Ziyao^{2,5}, Zhang Zidong^{1,2,3}

1. National Graduate School for Elite Engineers, Shandong University, Jinan Shandong; 2. Shandong Key Laboratory of Metamaterial and Electromagnetic Manipulation Technology, Jinan Shandong; 3. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong; 4. Shandong Industrial Ceramic Research & Design Institute Co., Ltd., Zibo; 5. School of Management, Shandong University, Jinan Shandong

Abstract: Metamaterial absorbers can achieve directional absorption of electromagnetic waves through structural design. With the unique advantage of controllable and designable performance, they have important application value in low/wide frequency absorption, radar cross section reduction, surface traveling wave suppression and other aspects. They have now become a key technical approach for the research and development of a new generation of high-performance wave-absorbing materials and electromagnetic functional structures, and have attracted attention from governments, various research institutions and relevant application units at home and abroad. This paper first systematically expounds the basic concept and principle of metamaterial absorbers, summarizes and reviews the relevant research status at home and abroad in this field, introduces the main current difficult problems in the field of metamaterial absorbers, and finally prospects the future development trend of metamaterial absorbers.

Keywords: Metamaterial; Wave Absorption; Electromagnetic Wave; Radar Stealth; Progress