电磁防护与隐身功能材料专题

电磁波吸收超材料的研究进展

吴金津¹, 戴忠晨¹, 方振卫¹, 鲁万彪¹, 侯洪波², 孟凡彬²*

(1.中车南京浦镇车辆有限公司,南京 210031; 2.西南交通大学,成都 610031)

摘要:目的 随着材料科学的飞速发展,各类超材料以其独特的物理和化学性质,在众多科技前沿领域 展现出巨大潜力。特别是具备电磁调控能力的超材料,在电磁吸波领域的应用尤为引人注目。文章旨在 从不同材料体系出发,深入探讨碳基、磁性、金属基、陶瓷基及水基等电磁吸波超材料的最新研究进展, 分析其独特的设计思路与应用特性。方法 首先,阐述碳基、磁性、金属基、陶瓷基及水基吸波超材料 的结构与特性。接着,归纳并总结这些材料在电磁吸波超材料设计中的具体应用实例,包括结构设计、 复合方式、性能优化等方面的方法与策略。通过对比分析了不同结构超材料在制备工艺和吸波性能方面 的差异。结论 总结了当前电磁吸波超材料在材料选择、设计原理及实际应用中面临的主要挑战与问题。 针对这些问题,提出了未来研究应重点关注的方向,包括新型吸波材料的开发、多材料复合与协同作用 机制的研究,以及高性能低成本制备技术的探索等。这些研究方向将为电磁吸波超材料的持续创新与发

关键词: 电磁吸波; 超材料; 结构设计; 吸波性能

中图分类号: TB34 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)23-0072-19 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.23.009

Research Progress of Electromagnetic Wave Absorbing Metamaterials

WU Jinjin¹, DAI Zhongchen¹, FANG Zhenwei¹, LU Wanbiao¹, HOU Hongbo², MENG Fanbin²*

(1. CRRC Nanjing Puzhen CO., Ltd., Nanjing 210031, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: With the rapid development of materials science, various metamaterials have demonstrated immense potential in numerous cutting-edge technological fields due to their unique physical and chemical properties. Notably, metamaterials with electromagnetic regulation capabilities have garnered significant attention for their applications in electromagnetic wave absorption. The work aims to discuss the latest research progress of carbon-based, magnetic, metal-based, ceramic-based and water-based electromagnetic wave absorbing metamaterials from different material systems, and analyze their unique design ideas and application characteristics. Firstly, the structure and properties of carbon-based, magnetic, metal-based, ceramic-based and water-based and water-based wave absorbing metamaterials were described. Subsequently, specific application examples of these materials in the design of electromagnetic wave absorption metamaterials were summarized, including methods and strategies for structural design, composite approaches, and performance optimization. By comparing, differences in preparation techniques and wave absorption properties among metamaterials with different structures were analyzed. The main challenges and issues faced in material selection, design principles, and practical applications of current electromagnetic wave absorption metamaterials are summarized. In response to these challenges, key research directions for future studies are proposed, including the development of novel

收稿日期: 2024-11-07

基金项目:国家自然科学基金(51903213,5217130190,5247022454,52403049);四川省科技计划(2023NSFSC1952,2022ZYD0028);中央高校基本科研业务费专项资金(2682021GF004,2682022CG005)

wave absorption materials, research on multi-material composites and synergistic mechanisms, and the exploration of high-performance, low-cost preparation technologies. These research directions will provide strong support for the continuous innovation and development of electromagnetic wave absorption metamaterials, promoting their wide application in areas such as wireless communication, and electromagnetic protection.

KEY WORDS: electromagnetic wave absorption; metamaterial; structural design; wave absorption performance

随着无线通信、雷达探测等领域的快速发展,电 磁波在人们的生活和工作中扮演着越来越重要的角 色。然而, 电磁波在传播过程中会产生反射、散射和 干扰等现象[1],这不仅影响了通信质量,还对人体健 康和设备安全造成潜在威胁^[2]。为解决这一问题,吸 波材料的研究应运而生。吸波材料能通过吸收电磁波 能量并将其转化为热能或其他形式的能量,有效减少 电磁波的反射和散射,从而降低电磁波的干扰^[3-4]。 这类材料的研究在提高通信质量、保护人体健康、增 强设备安全性等方面具有重要意义。此外,随着技术 的不断进步,吸波材料的研究和应用将持续深化,将 在未来的新型装备中发挥越来越重要的作用,隐身技 术逐渐成为研究热点。吸波材料作为隐身技术应用的 关键组成部分,其应用前景十分广阔。传统的吸波材 料虽能在一定程度上减少电磁波的反射和散射,但在 实现高效吸波的同时往往伴随厚度厚^[5]、重量大^[6]、 带宽窄^[7]等问题,而吸波超材料则在这些方面表现出 了明显的优势。随着科技的进步和研究的深入, 吸波 超材料有望在更多领域取代传统吸波材料,成为电磁 波吸收领域的主流材料。

吸波超材料是一种能吸收特定频率范围内电磁 波的材料,它通过调节材料的电磁特性,使电磁波进 入超材料后被吸收,而不是反射或透射出去^[8]。其在 设计和制备上具有很高的灵活性,可通过调整其结 构、尺寸和材料组成来优化其吸波性能^[9-10]。这使得 吸波超材料在多个领域具有良好的应用前景,包括电 磁辐射防护、通信设备以及微波暗室开发与安全使用 等。与传统的吸波材料相比,吸波超材料具有显著的 优势。例如,可通过人为设计使超结构单元尺寸远小 于工作波长,从而使超材料具有更高的吸波效率和更 宽的吸波频带。此外,吸波超材料还可通过设计实现 特定的吸波性能,如针对特定频率或特定方向的电磁 波进行高效吸收^[11]。

本文旨在系统综述电磁波吸波超材料的基本原 理、核心设计机制以及最新研究进展,为电磁学、材 料科学、隐身技术、无线通信及能量转换等多个交叉 领域的研究提供参考框架。通过对吸波超材料独特的 电磁响应特性、结构-性能关系、优化策略及制备技 术的详尽剖析,本文力求展现这一前沿领域的最新理 论成果与技术突破,同时探讨其面临的挑战与未来发 展方向,以期激发新的研究灵感与技术创新,推动吸 波超材料在民用通信、环境监测及能量管理等方面的 广泛应用与快速发展。

1 电磁波吸收超材料的基本原理

吸波超材料的吸波原理主要基于共振机制和阻抗匹配设计,以实现高效、宽带的波吸收。通过精心设计超材料结构,可控制电磁波或声波与材料之间的相互作用,从而在特定频段内产生强烈的共振,将入射波携带的能量有效地转换为热能或其他非原波形式的能量并耗散掉,以降低波的反射程度和穿透能力^[12]。

1.1 吸波率

吸波超材料的性能主要通过吸波率 $A(\omega)$ 来衡量, 通过优化相关参数和尺寸配置,可显著提升超材料的 吸收效率,并拓宽其吸波频带范围。吸波超材料的等 效介电常数和磁导率常被表达为复数形式,包含实部 与虚部,即 $\epsilon(\omega)=\epsilon'(\omega)+i\epsilon''(\omega)$ 和 $\mu(\omega)=\mu'(\omega)+i\mu''(\omega)$ 。 为实现电磁波无阻碍地穿透材料内部而几乎不产生 反射的效果,需对这 2 个参数进行特定的调控。吸波 超材料的性能要求其等效介电常数和磁导率之间必 须满足等式(1)和(2)^[13]。

$$\tilde{z}(\omega) = \sqrt{\frac{\tilde{\mu}(\omega)}{\tilde{\varepsilon}(\omega)}} \tag{1}$$

 $\tilde{n}(\omega) = \sqrt{\tilde{\mu}(\omega)\tilde{\varepsilon}(\omega)}$ (2)

特别地,当入射电磁波垂直作用到吸波器的表面,吸波率 *A*(ω)的具体计算公式满足等式(3)^[14]:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$$
(3)

式中: *R*(*ω*)表示吸波超材料的反射率; *T*(*ω*)表示 吸波超材料的透射率。这 2 个参数可通过 *S* 参数计算 得到,具体为:

$$R(\omega) = S_{11}^2 \tag{4}$$

$$T(\omega) = S_{21}^2 \tag{5}$$

式中: S_{11} 为反射系数; S_{21} 为透射系数; ω 为入射 波的角频率,其中 $\omega=2\pi f$, f 为入射电磁波的频率^[15]。 因此,吸波超材料的吸波率实际上是 1 减去反射率与 透射率之和的差值。这个公式揭示了吸波超材料的吸 波机制:为达到更高的吸波效率,应通过结构设计, 显著降低吸波超材料对入射波的反射率和透射率。

1.2 复介电常数和复磁导率

超材料吸波器的性能主要由其电磁参数决定,其 中最重要的是复介电常数 ε 和复磁导率 μ。这 2 个参 数都是复数,包含实部和虚部。实部表示材料在电磁 场作用下的电极化和磁极化程度,而虚部则与材料的 损耗特性密切相关^[16]。其中复介电常数 ε :其实部 ε' 表示材料的电容性质,虚部 ε'' 表示材料的电损耗。电损耗主要由材料中的电偶极矩重排引起,与 ε'' 的数值 大小成正比。复磁导率 μ :其实部 μ'' 表示材料的电感 性质,虚部 μ'' 表示材料的磁损耗。磁损耗主要由材料 中的磁偶极矩重排引起,与 μ'' 的数值大小成正比。此 外,可通过电损耗因子 tan δ_{ε} 和磁损耗因子 tan δ_{μ} ,进 一步解释材料的损耗特性。这 2 个因子分别由复介电 常数和复磁导率各自的虚部与实部之比得出,其计算 公式如下^[17].

$$\tan \delta_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{6}$$

$$\tan \delta_{\mu} = \frac{\mu''}{\mu'} \tag{7}$$

式中:电损耗因子 tan δ_{ϵ} 表示材料的电损耗能力, 当 ϵ "增大时,电损耗增强;磁损耗因子 tan δ_{μ} 表示材 料的磁损耗能力,当 μ "增大时,磁损耗增强。根据 tan δ_{ϵ} 和 tan δ_{μ} 的相对大小,可将材料分为磁损耗型材 料和电损耗型材料。

1.3 阻抗匹配

超材料的设计核心是通过人为调控其微小单元 尺寸小于入射电磁波的波长,使超材料具有良好阻抗 匹配。当电磁波碰到这种材料时,会与之产生交互, 导致反射、透射和吸收3种结果^[18]。为最大化超材料 对电磁波的吸收能力,关键在于最小化吸收体表面的 反射和透射现象。这意味着要调整和优化超材料的结 构,使其与电磁波实现更好的匹配,从而促使更多的 电磁波能量被材料内部吸收,而不是被反射或穿透过 去^[19]。其中,反射率与反射系数 *R* 息息相关,反射 系数 *R* 可以由式(8)以及式(9)^[20]表示:

$$R = \frac{Z_{\rm in} - Z_0}{Z_{\rm in} + Z_0}$$
(8)

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}, Z_{\rm in} = \sqrt{\frac{\mu_{\rm in}}{\varepsilon_{\rm in}}} \tag{9}$$

式中: Z_0 表示空气的阻抗; Z_{in} 表示材料的阻抗; ε_0 和 μ_0 分别为自由空间中的介电常数和磁导率; ε_{in} 和 μ_{in} 分别为吸波超材料的相对介电常数和相对磁导 率。这个公式描述了电磁波从自由空间入射到材料表 面时,材料的阻抗与空气的阻抗之间的关系如何影响 反射系数。为使反射电磁波减少到最小,需使反射系 数 R 趋于 0,这通常要求材料的阻抗或波阻抗与空气 的阻抗或波阻抗相匹配。在理想情况下,为获得更优 越的吸波性能,期望材料的相对磁导率与相对介电常 数在尽可能广泛的频率范围内保持高度的匹配或接近 相等,这样的设计能更有效地促进电磁波的吸收^[21]。 要使阻抗匹配,超材料结构的优化通常涉及调整其构 成单元的形状、尺寸、排列以及材料组成,以精确调 控其电磁参数(如介电常数和磁导率),使其与自由 空间的阻抗相匹配。这包括设计多层结构、引入梯度 折射率、采用周期性或非周期性的排列方式,以及选 用具有高损耗特性的材料等策略,旨在减少反射,增 强吸收,并优化电磁波在材料内部的传播路径,从而 实现对特定频率范围内电磁波的高效吸收。

1.4 共振吸波

除了阻抗匹配机制外,共振吸波也是超材料实现 高效电磁波吸收的重要手段。在超材料中,通过精心 设计的结构单元,可激发多种共振模式,如电共振、 磁共振等,这些共振模式能有效地捕获并吸收电磁波 能量。

共振吸波机制的核心在于,当入射电磁波的频率 与超材料中的超结构单元共振频率相匹配时,会引发 强烈的共振效应^[22]。此时,电磁波能量会在超材料内 部被迅速吸收并转化为其他形式的能量,如热能。由 于共振效应的存在,超材料能在较窄的频率范围内实 现极高的吸波效率。这种高度的频率选择性使得超材 料在特定应用场景中极具优势,比如电磁干扰屏蔽、 隐身技术,以及无线通信中的滤波器设计等。

在电磁干扰屏蔽方面,通过调整超材料的结构参数,可使其针对特定频段的电磁波产生强烈吸收,有效隔绝这些有害辐射,保护周围电子设备免受干扰。 对于隐身技术,超材料的共振吸波特性能实现对雷达 波的宽频带或窄频带吸收,显著降低目标的雷达散射 截面(RCS),使探测雷达难以发现,这对于目标的 隐蔽具有重要意义。此外,通过优化设计,超材料还 可在不同角度和极化状态下保持稳定的吸波性能,进 一步提升隐身效果。在无线通信领域,超材料作为滤 波器使用时,其精确的频率选择性能允许所需信号通 过的同时,有效抑制带外干扰信号,提高通信系统的 信噪比和整体性能。这种基于共振吸波机制的滤波器 相比传统滤波器,具有更高的集成度、更低的损耗和 更灵活的设计自由度。

与传统的吸波材料相比,超材料吸波器具有显 著的优势。传统吸波材料的电磁参数基本固定,无 法自由调控,限制了其在实际应用中的灵活性。而 吸波超材料则可通过调控模型结构形状和尺寸等参 数,实现对磁谐振和电谐振的有效调节,从而提升 吸波性能。

吸波超材料在调控电磁波的吸收方面具有极高 的灵活性和潜力。除了通过改变其结构来实现对电 磁波吸收的精确调控外,还可通过改变所使用的基 体材料来达到同样的目的。这种材料的选择和设计 为电磁波的吸收提供了更为自由的调控手段,使得 吸波超材料在隐身技术、电磁兼容、通信以及雷达 等领域具有广泛的应用前景。因此,电磁参数调控 和材料结构设计都是吸波超材料设计的关键^[23]。通 过选择合适的材料组成和掺杂剂,可实现对介电常 数和磁导率的精确调控,从而影响电磁波在材料中 的传播行为。这些参数的变化可改变电磁波在材料中

• 75 •

的相位和振幅,从而实现对电磁波的吸收和调控^[24]。 其次,微结构设计是吸波超材料实现高效吸波的关 键^[25]。吸波超材料通常通过设计具有特定形状、尺 寸和排列方式的微结构,实现对电磁波的有效吸收。 这些微结构能与电磁波产生强烈的相互作用,如共 振、散射和干涉等,将电磁波的能量转化为热能或 其他形式的能量并耗散掉^[26]。此外,吸波超材料还 常常采用多层结构或复合材料设计,以进一步提高 吸波性能。通过合理设计不同层次或材料之间的组 合方式,可实现对电磁波的多重吸收和衰减,从而 拓宽吸波频带和提高吸收效率^[27]。

为有效地提高吸波超材料的微波吸收效率,2008年,Landy等^[28]的研究开创性地将超材料理念融入吸 波体的设计中,通过运用开口谐振环结构,成功在微 波频段实现了完美的吸收效果。这一突破性的理念为 透明吸波体的设计开辟了新的思路与维度。在此之 后,不少吸波超材料被设计为具有特定的几何形状、 材料组成以及多层次结构^[29-31],以优化其吸波性能。 这些设计策略旨在实现更宽的吸波频段、更高的吸波 效率以及更好的环境适应性。超材料的结构单元可显 著放大电磁场和谐波产生^[32]。同时,它引起类似于透 射位错的异常反射和折射,能对电磁波起到很好的吸 收效果。如图1所示,研究者们将吸波超材料设计为 不同的几何形状,能从结构上解决吸波效率的问题。 综上所述,吸波超材料的基本设计原理深刻体现 了对材料电磁参数和结构的精细调控,旨在实现对特 定频率范围内电磁波的高效吸收。这一特性使得吸 波超材料在多个领域展现出广泛的应用前景,包括 但不限于隐身技术、电磁辐射防护以及高性能通信 设备的开发。通过吸波超材料的运用,不仅能有效 降低电磁干扰,保护敏感电子元件,还能提升系统 的隐身性能和安全性。因此,吸波超材料的研究与 发展对于推动相关领域的技术进步和实际应用具有 举足轻重的意义。

2 电磁波吸收超材料的研究进展

2.1 碳基吸波超材料

碳基吸波超材料是一种新型的电磁波吸收材料, 其主要成分包括碳纤维、碳纳米管和石墨烯等碳材 料。此类材料凭借其轻质、易于加工制造、卓越的化 学稳定性、出色的耐高温特性、高度可调的导电性能 等一系列显著优势,成为打造集轻量化、超薄化与高 性能高效吸波能力于一体的超材料的理想选择^[33-34]。 碳基吸波超材料的性能主要取决于其形态。依据吸波材 料的形态差异,碳材料大致可划分为紧实的薄膜形态、 多孔的泡沫结构以及碳与聚合物复合的混合材料^[35]。 特别地,由石墨烯、碳纳米管等先进材料构筑的碳薄



图 1 超材料结构^[29-31] Fig.1 Metamaterial structure^[29-31]

膜,凭借其紧密的结构布局与卓越的导电性能,展现 出对微波信号的高效反射与衰减能力,从而成为吸波 领域的佼佼者。此外,碳基吸波超材料还具有良好的 导电、导热性能,同时又具有较低的电阻率和介电常 数,能有效地吸收电磁波^[36]。这些特性使得碳基吸波 超材料在电磁波屏蔽、电磁波干扰抑制等领域具有广 泛的应用前景。

碳基吸波超材料的吸波特性主要体现在其轻质、 高衰减能力、大比表面积和优异的物理化学稳定性。 这类材料能通过多种机制吸收电磁波,包括界面极 化、多次反射和导电损耗以及磁极化衰减等。碳纤维 由于其质轻和吸收频带宽等优点,通过表面改性可进 一步提升其吸波能力。石墨烯因其高比表面改性可进 一步提升其吸波能力。石墨烯因其高比表面积、低密 度、可调的电导率和良好的化学稳定性,在微波吸收 方面显示出巨大潜力,其吸波机理涉及界面极化、多 次反射以及与磁性或介电材料的协同效应。碳纳米管 则因其独特的力学、电学和磁学性能,以及高比表面 积和表面悬挂键,导致界面极化和多重散射,从而展 现出良好的吸波性能。碳纳米管的吸波机理包括能带 的带间跃迁、呼吸振动模式的激发,以及宏观量子隧 道效应和量子尺寸效应导致的电子能级分裂,这些都 为电磁波的吸收提供了新的通道。

目前,有不少研究者对碳基吸波材料进行了研究,并取得了较为理想的吸波效果。Yan等^[37]基于电磁共振机制,设计了一种斜入射的宽带 CFs 双层 MMA。试样由单向 CFs 预浸料和 GFs 平纹预浸料制作,通过真空袋工艺固化形成,以改善 CFs 和 GFs 界面的力学性能。研究结果表明其在 55°~70°入射时,85%以上的连续吸收带可完全覆盖 X 和 Ku 微波波 段。同时,CFs 双层 MMA 在 6~7.5 GHz 时具有广角 吸收性能,并始终保证吸收率>85%。不仅如此,不少研究者还制备了层状周期性结构的超材料,Cheng

等^[38]基于分层波纹夹层结构(HCSS)的优良力学性 能,构建了一种新型碳纤维(CF)层间增强分层波 纹超材料吸收器(HCMMA)。该结构在 0~60°的入射 角下实现了对 4~12 GHz 电磁波的有效吸收(平 均>90%),这是通过电磁波的介电损耗和 SSPPs 结构 形成的局部强场来实现的。此外,为实现宽频吸收, 如图 2 所示, Du 等^[39]以碳基铁粉/碳纤维/树脂复合材 料为基础,设计并制备了一种新型的周期性方形挫折 超材料。通过添加碳基铁粉和碳纤维的含量确定了元 结构各组分的电磁参数,优化电磁结构参数的超材料 在 3.5~40 GHz 频带内实现了有效的电磁波吸收 (>90%)。不仅如此,如图 3 所示, Zhou 等^[40]采用 典型的球形 CIP 和 CF 增强的树脂基吸收复合材料作 为可调电磁参数的固有损耗材料,用于 GACM 设计。 设计了具有梯度电磁参数的周期性阶梯式结构,优化 了其吸收性能,并采用模板法制备了4层阶梯式超材 料吸收器,制备的样品实现了超宽带电磁波吸收,在 2.0~40 GHz 范围内实现了 L_{R.min} < -10 dB, 覆盖了整 个 S、C、X、Ku、K 和 Ka 频段。此外,实验表明 LR在11.2~21.4 GHz和28.5~40 GHz的频率范围内覆 盖了-15 dB 的吸收带宽。通过结合多层梯度结构和周 期阶梯结构,设计了吸收超材料的阻抗匹配,电磁波 的强衰减主要由多尺度结构引起的多种电磁波吸收 机制的协同效应产生。

碳纤维基吸波超材料是一种高性能、多功能的 新型材料,具有高强度、低密度、良好导电性以及 对电磁波的高效吸收能力等特点。该材料通过精密 设计,能在特定频段内显著降低电磁波的反射和散 射,实现吸波、隐身等功能,广泛应用于航空航天、 通信及电子设备等领域。同时,其良好的环境适应 性和稳定性,使得其在极端条件下也能保持稳定的 吸波性能。



图 2 超材料吸收剂及其制备工艺示意图^[39] Fig.2 Schematic diagram of metamaterial absorbers and its preparation process^[39]



图 3 梯度超材料示意图(a),梯度吸收超材料的制造工艺(b),具有不同 CIP 和 CF 含量的单层 CIP/CF/ER 复合材料的 L_R随厚度和频率的 3D 分布(c~f)^[40] Fig.3 Schematic of the proposed gradient metamaterial (a); fabrication process of the proposed gradient absorbing metamaterial (b); and 3D distribution map of L_R with thickness and frequency for the single layer CIP/CF/ER composites with different CIP and CF contents (c-f)^[40]

除了对碳纤维超材料有研究以外,不少研究者们 也对碳纳米管超材料进行了丰富的研究。如图 4 所 示,Xu 等^[41]设计了一种新的宽带吸收模型,融合了 周期性多孔结构,实现了在低频范围内的电磁共振损 耗能力和介质材料在高频范围内的介电损耗能力。基 于这个模型,通过冰模板方法使用碳纳米管(CNT) 和多孔纤维素纳米纤维(CNF)作为"积木"制备了一 个轻量级的 CNF/CNTs 泡沫组成的泡孔垂直多孔结构, 大孔直径为 30~90 µm 和纳米多孔结构为 1.7~50 nm。 研究结果表明,样品的有效吸收带宽(EAB)达到 29.7 GHz, 其特定微波吸收性能(SMAP)值>80 000 dB·cm⁻²·g⁻¹,此外,不少研究者还利用 CNTs 制备周 期性层状结构的吸波材料,取得了较为理想的吸波效 果,实现了宽频吸收。例如,Zhou 等^[42]设计了一种 新型周期性阶梯元结构分层介电性能与多壁碳纳米 管(MWCNTs)增强石膏,通过调节石膏中多壁碳纳

米管的含量来决定每一层的电磁参数,实现高效的电磁吸 收。优化后的 MWCNTs/石膏超材料厚度为 8.0 mm, 在 4~40 GHz 频段内平均吸收强度为--21.6 dB(>99.3 %)。不 仅如此, Rizzo 等^[43]使用极低负荷碳纳米管的环氧复 合材料作为导电元件,以重复模式排列,与介质片一 起构成超材料。Huang 等^[44]通过如图 5 所示的工艺, 基于多尺度设计原理进行宏观设计,制备了集成羰基 铁(CI)、多壁碳纳米管(MWCNT)和环氧树脂的 锥式电磁复合超材料 (ECM)。结构形状和大小对吸 收带宽和深度起着重要的作用。该 ECM 是材料组成 和结构设计的优势结合,通过阻抗匹配理论,采用了 纳米微制造和宏观结构设计。采用微波场散射和浓度 单位等不同尺寸的凸起块来降低微波能量反射。多尺 度空间超材料吸收器在 2~40 GHz 带宽内实现了-8 dB 的吸收,在30 GHz带宽内实现了-10 dB的吸收。其中, 当带宽为 14.8 GHz 时,最小反射率为-55 dB。



图 4 宽带微波吸收的 MAMs 示意图(a);周期性 CNF/CNT 泡沫的制备示意图(b); CNF/ CNTs-泡沫在不同频率范围内的 *L*_R 曲线,样品厚度为 20 mm(c~d);在 X 波段的 *C*_R和 *L*_R值 之间的比较(e);CNTs/CNF 泡沫材料的微波吸收机理示意图(f)^[41] Fig.4 Schematic illustration of MAMs for broad-band microwave absorption (a); schematic illustration for preparation of periodic CNF/CNT foam (b); *L*_R curves of CNF/CNTs-foam measured with arch method in different frequency range with sample thickness of 20 mm (c-d); comparison between *C*_R and *L*_R values in the X band (e); schematic of microwave absorption mechanism of CNTs/CNF foam (f)^[41]



图 5 MWCNT/CI/环氧树脂 ECM 的制造工艺(a); MWCNT/CI/环氧树脂复合材料的扫描电镜图像 (白色的圆圈标记出涂有环氧树脂的 MWCNT)(b); b图中心的环氧树脂涂层 MWCNT 的 细节扫描电镜图(c); 环氧树脂中 CI 颗粒的均匀分布(d); 用环氧树脂涂覆 CI 的 细节扫描电镜图(e); ECM 的实验和模拟反射率 比较,模拟单层涂层反射率(f)^[44]

Fig.5 Procedures of fabricating MWCNT/CI/epoxy resin ECM (a); SEM image of MWCNT/CI/epoxy resin composite (The white circles mark out the MWCNT coated with epoxy resin) (b); detail of epoxy resin-coated MWCNT in the center of (b) (c); uniform distribution of CI particles in the epoxy resin (d); detail of CI coated by epoxy resin (e); comparison of experimental and simulated reflectivity of ECM, simulated single-layered coating reflectivity with thickness of 2 mm and 3 mm (f)^[44]

碳纳米管基超材料是一种由碳纳米管作为主要 构建单元,通过精确设计其排列、尺寸和组合方式而 形成的高级复合材料。这种超材料具有出色的电磁性 能,能有效调控电磁波的传播、吸收和散射,从而在 隐身技术、能量转换与存储以及无线通信等多个领域 展现出巨大的应用潜力和独特的优势。

石墨烯,这种独特的二维碳材料,在电学、热学及力学领域均展现出非凡的性能。其电学特性尤为突出,表现为极高的电子迁移率。其独特的单层结构使得石墨烯具有极高的电子迁移率和导热性,同时也具备出色的机械强度和柔韧性^[45]。石墨烯吸波超材料是将石墨烯与其他材料(如金属氧化物、聚合物等)通过特定的制备工艺组合而成的一种新型超材料。其吸波原理主要是利用复合材料中各种材料的电磁性质和电磁波传播特性,通过调节材料的结构、厚度和掺杂等方式,实现对电磁波的高效吸收。Chen 等^[46]通过将氧化石墨烯溶解到蒸馏水中,使氧化石墨烯水溶液(GOAS)获得较高的介电损耗和衰减能力,并在5.2~18 GHz 范围内验证了其吸收带宽。此外,为拓宽

入射角, Yan 等^[47]基于圆方孔(RSH)型单层石墨烯 结构,设计了一种偏振不敏感、宽入射角的石墨烯辅助 宽带超材料微波吸收器。当石墨烯的化学势为 0.1 eV 时,该器件在超宽带(16~100 GHz)上的计算结果可 产生>90%的良好吸收。不仅如此,研究者们对石墨 烯-聚合物吸波超材料的研究也取得了不错的效果。 此外,为进一步提高吸收效率,如图 6 所示,Yang 等^[48]利用石墨烯(GR)/聚乳酸(PLA)复合材料制 备了一种阶梯式结构吸收体。吸收塔包含4层,底层 是具有周期性方形孔的板,上层是3个立方体的周期 性分布,厚度相等,侧面长度发生梯度变化。结果表 明,当单元格的边长为22.5 mm,板的厚度为1.5 mm, 立方体的厚度和边长差分别为 2.5 mm 和 4.0 mm 时, 该阶梯式结构的 L_{R,min} 为-36.01 dB, 有效吸收带宽 EAB 为 12.75 GHz。Liu 等^[49]提出了一种新型的超材 料宽带吸收器,同时具有金属和石墨烯的优点,其中 2个同心金属分裂环连同2个石墨烯环安排作为顶部 超表面层,而厚介电层作为间隔层。为增强吸收强度, 将石墨烯片插入介电间隔层。最后,用1层金属基板



图 6 阶梯式结构的制备过程 (a), 阶梯式结构中电磁波的传输机理 (b); 阶梯式结构的多尺度损失机理 (c)^[48] Fig.6 Preparation process of stepped structure (a); transmission mechanism of EMWs the stepped structure (b); multi-scale loss mechanism of the stepped structure (c)^[48]

来阻挡传输。仿真结果表明,在正交极化(TE)和水平极化(TM)的中心频率为 5.85 THz 时,吸收率>90%的带宽约为 3.26 THz,其平均吸收率高达 98.21%。此外,还可通过改变石墨烯的化学势来调整吸收带。

石墨烯基吸波超材料是一种利用石墨烯及其复 合结构的优异电磁性能,实现高效、宽频电磁波吸收 的新型材料,经过精密的结构设计与调控,能实现对 电磁波的高效吸收、宽频覆盖以及动态调控。这种材 料不仅能有效减少电磁波的反射与散射,实现目标的 隐身效果,还能在电磁兼容、雷达波吸收等领域展现 出卓越的性能。此外,石墨烯吸波超材料还具备轻质、 高强度、耐腐蚀等优良特性,使得其在航空航天、通 信设备以及电子产品的电磁防护与兼容性优化等方 面具有广泛的应用前景。

综上所述,碳基吸波超材料是一种极具创新性和

实用价值的材料。它巧妙地利用了碳材料的独特性 质,如轻质、高强度和良好的导电性等,通过特殊的 设计和制备工艺,实现了对电磁波的高效吸收和反射 减少。这种材料不仅具有出色的隐身性能,能显著降 低目标被雷达等电磁探测设备发现的概率,还在减少 电磁污染、提高通信质量等方面展现出巨大的潜力。 此外,碳基吸波超材料还具有良好的环境适应性和稳 定性,能在高温、高湿等恶劣环境下保持优异的性能, 这使得它在航空航天等高端领域具有广泛的应用前 景。同时,随着技术的不断进步和成本的降低,碳基 吸波超材料将在更多领域得到应用,为人们的生活和 工作带来更多便利。总的来说,碳基吸波超材料是一 种集隐身、抗电磁干扰、环境适应性强等优点于一身 的新型材料,它的出现和发展将推动相关领域的技术 进步和创新。

2.2 金属基吸波超材料

前面主要介绍了碳基吸波超材料,作为吸波材料,碳基材料具有优异的介电损耗。但由于其损耗较单一,在特殊环境下的吸波效果很难达到预期。为解决这个问题,接下来将介绍金属基吸波超材料。金属基吸波超材料作为一类融合了金属或其化合物(如金属合金与金属氧化物)与超材料设计理念的创新复合材料,通过其独特的电磁特性与微观结构设计,能实现对电磁波的高效吸收与调控^[50]。

金属基吸波超材料的吸波特性主要体现在其具 有宽频带吸收、高吸收率以及极化不敏感和宽角度吸 收特性等方面。这些材料通常由金属纳米粒子或金属 氧化物构成,它们通过高温热解金属有机框架 (MOFs)得到,这些金属及其合金,因其良好的磁性 能而在微波吸收领域得到广泛应用。吸波机理涉及电 磁谐振吸收和电路谐振吸收2种类型。电磁谐振吸收 主要源于超材料基本单元耦合结构对入射电磁波产 生强烈的局域电、磁谐振作用,从而诱导产生表面金 属膜的欧姆损耗和中间基板材料的介质损耗。而电路 谐振吸收特性则基于电阻型频率选择表面的电路谐 振机制,通过结构参数和方块电阻的设计实现吸波特 性的调节。此外,金属基超材料吸波体的设计还考虑了 阻抗匹配和损耗特性,以实现更有效的电磁波吸收。

不少研究者对金属基吸波超材料进行了研究,得 到了不错的效果。Shao 等^[51]设计了一种新的超材料 雷达吸收涂层(MRAC),其设计原理如图 7 所示, 采用大气等离子体喷涂技术进行制造。选择高温合金 NiCrAlY 作为超材料的基本单元。该涂层采用碳化钛 (TiC)和氧化铝陶瓷制备。通过优化结构,可很好 地解决电磁阻抗失配问题。同时,合金图案结构表面 会发生磁共振,极大地增强了局部场,并将其转化为 热。最终,在厚度为 0.96 mm 的 X 波段, <-10 dB 的 反射损耗带宽可达到 1.6 GHz。Guo 等^[52]通过设计全 尺寸微波吸收器来进一步扩大带宽,将 FeCo 基软磁 合金 Fe6.5Co3.5Ge0.4 的微观尺度和介观尺度调控与超 材料设计的宏观尺度调控相结合。仿真结果表明,当 总厚度仅为2 mm时,在6.8~60 GHz之间可实现超 宽带吸收。如图 8 所示, Yang 等^[53]提出了一种具有 多梯度结构的轻量级分层吸波元结构。同时,研究了 轻量级元结构的电磁特性,实现了在低、高频范围内 的高效吸收。然后,通过对银铜合金基吸波材料的三 维打印,制备了具有高介电常数和低频介电损耗的复 合材料。在此基础上,设计了体积密度为 0.5 g/cm³ 的吸波超结构,并在 2.5~40 GHz 范围内实现了高效 吸收。除此之外,一部分金属基吸波超材料具有良好 的磁性,由于磁性金属展现出了高饱和磁化强度和低 矫顽力的特性^[54],具备优异的磁响应能力,使得它们 成为制造高性能微波吸收材料的优选材料。这些材料 的复合磁导率的特性尤为突出,能有效地吸收和转化

微波能量。Feng 等^[55]采用超材料设计方法,对一种 基于铁硅合金的宽带电磁波吸收材料进行了优化设 计,研究了几何尺寸和阵列周期对硅超材料吸收性能的 影响。所设计的 FeSiAl 超材料在 4~8 GHz 和 10~15 GHz 范围内具有-10 dB的有效吸收,并且在大入射角下敏 感,但在 45°内不敏感。为制备一种超薄吸收器,如 图 9 所示, Cheng 等^[56]提出了一种基于磁性橡胶板 (MRP)和十字形结构(CSS)超材料的超薄低频宽 带微波吸收器 (MWA)。所设计的复合材料 MWA 由 MRP、CSS 谐振器、介电衬底和金属背景平面组成。 通过调整 CSS 超材料的几何参数和 MPR 的厚度,可很 容易地调整低频吸收。研究结果表明,总厚度约为2mm, 在 2.5~5 GHz 的宽带中实现了复合 MWA 的 10 dB 吸 收。Ning^[57]提出的吸收器利用电控变容二极管来实现 频率可调谐性,并利用磁性纳米材料作为介电板,在 低频下减少厚度和扩展带宽。通过调整变容二极管的 偏置电压,可动态调整吸收结构的谐振行为,覆盖 0.41~1.02 GHz 的连续可调吸收频带,反射至少减少 10 dB。这种吸收体的总厚度为 5 mm, 仅为最低频率 波长的 1/146 左右。此外, Li 等^[58]设计了一个可调谐 的 MMA, 通过调制外部磁场, 在 0.2~7.6 GHz 的频 率范围内具有接近完美的吸收峰位移。铁氧体作为调 谐介质,在外加磁场下可在宽频率范围内调节共振频 率,提供宽带可调性,而金属条排列的元结构抑制了 铁氧体带来的极化转换,增强了吸收。Zhou 等^[59]在 受复合材料系统效应的启发后,设计了一种结合超材 料吸收器和磁性材料吸收器特性的具有 C 带吸收效 应的宽带吸收器。与简单的 FR4 基质材料相比, FeSiAlp/环氧树脂复合材料的吸波性能显著提高,有 效带宽增加了 11.4 倍,吸收体具有明显的 C 带吸收 效应。优化吸收体尺寸后,厚度为 2.2 mm 的 FeSiAlp/ 环氧树脂复合吸波体在 7.20 GHz 和 15.40 GHz 同时达 到峰值,峰值反射率分别达到-11.51 dB 和-13.01 dB, 相应的吸收率分别达到 92.93%和 95.00%。有效带宽 达到 4.29 GHz。











图 9 提出的复合材料 MWA 的结构示意图(a)、 等效 L-C谐振电路模式(b)及 制作的样品(c)^[56] Fig.9 Structural schematic of proposed composite MWA (a), equivalent L-C resonance circuit mode (b), fabricated sample (c)^[56]

金属基吸波超材料在电磁波吸收领域展现出了独特的优势。其优点主要体现在2个方面:一是具有优异的吸波性能,能高效地吸收并衰减宽频带的电磁波;二是具有良好的耐高温性,能在较高温度的环境下保持稳定的吸波性能。然而,金属基吸波超材料也存在一些显著的缺点。首先,其制备工艺相对复杂,需采用精密的合成方法和先进的设备。其次,金属基吸波超材料易受氧化和腐蚀的影响,这会导致其吸波性能下降,甚至可能引发材料失效。此外,由于金属基材料的密度和质量相对较大,限制了其在某些领域的应用。

综上所述,金属基吸波超材料在电磁波吸收领域

具有独特的优势,但也面临着制备工艺复杂、成本高、 稳定性下降以及应用场合受限等挑战。未来的研究应 致力于开发更高效的制备方法,提高金属基吸波超材 料的稳定性和耐腐蚀性,探索新的轻质化设计策略, 以拓展金属基吸波超材料的应用领域。

2.3 陶瓷基吸波超材料

在吸波超材料中,陶瓷基吸波超材料也是一种具 有优良吸波性能的材料。陶瓷基吸波超材料主要包括 以碳化硅、氮化硅、氧化铝、硼硅酸铝等陶瓷材料为 基体的吸波材料。这些材料的特点在于它们不仅具有 优异的吸波性能,能有效吸收和衰减电磁波,而且具 备高耐腐蚀性、电绝缘性和优异的热稳定性,能在高 温、高压等恶劣条件下保持稳定。

陶瓷基吸波超材料以其低介电损耗、结构简单、 多场可调及环境适应性好等优势,在电磁波吸收领域 展现出重要应用潜力。这类材料的吸波特性主要体现 在其能通过调控陶瓷单元的损耗和结构来实现模态 耦合,从而获得在常规材料中难以实现的电磁参数, 如负介电常数和负磁导率。陶瓷基超材料的吸波机理 涉及介电损耗和磁损耗 2 种机制。介电损耗主要通过 介电材料在交变电磁场下的反复电子极化、离子极化 等过程,将电磁波能量转化为热能损耗。而磁损耗则 涉及磁性材料在交变电场中的动态磁化过程,包括涡 流损耗、磁滞损耗等。通过合理设计陶瓷基超材料的 结构,可优化其阻抗匹配和损耗特性,进而提高其吸 波效率。此外,陶瓷基超材料的制备策略,如前驱体 转化陶瓷技术与 3D 打印技术的结合,为实现"目标-设计-制造"陶瓷超材料提供了新颖有效的途径,使得 陶瓷超材料的吸波性能得以调谐和优化。

Liu 等^[60]从模拟预测出发,获得了整合结构和功 能的聚合物衍生陶瓷超材料。研究了 4 组 SiBCN 陶 瓷在惰性气氛中1100~1400℃热解,采用的低密度 陀螺三周期最小表面(TPMS)结构增加了宏观互穿 通道结构中电磁波(EMW)的多重反射损耗,产生 了表面特性(阶梯效应)结构界面极化,改善了微波 吸收特性。其中,在热解温度为1200℃下,厚度为 2.31 mm 的 DLP-SiBCN 陶瓷的 EAB 为 3.09 GHz, 覆 盖整个 X 波段的 74%, L_{R.min} 为-70.6 dB (10.55 GHz), 显示出较强的 EMW 吸收能力。Zhou 等[61]采用 3D 打 印技术制备了具有微通道的 PyC/Al₂O₃ 陶瓷,通过设 计具有不同微通道的元结构来定制陶瓷的介电常数, 实现了定制的微波吸收特性。PyC/Al₂O₃ 陶瓷的吸收 带宽得到了有效的扩展,在 6~18 GHz 频率范围内实 现了 90%的电磁波吸收, 表明有效吸收带为 12 GHz。 如图 10 所示, Liu 团队^[62]结合聚合物衍生陶瓷途径 和增材制造技术,开发了富缺陷碳纳米纤维 CNFs (CNFs-SiBCN)陶瓷基超材料,系统地研究了 CNFs-SiBCN 陶瓷基超材料的介电常数、介质损耗机制和电 磁吸收特性。当纤维含量为 6.0%, 退火温度为 1 200 ℃ 时,介电常数的实部和虚部可分别达到 17.0 和 7.0。 Cole-Cole 圆图揭示了 CNFs-SiBCN 陶瓷因其内部 CNFs 的丰富缺陷结构而具备了显著的极化效能。在1.8 mm的 厚度下,最小反射损耗达-20.0 dB。Liu等[63]利用 AM、 前驱体渗透和热解(PIP)和水热合成方法,开发了新型 二硫化钼和富缺陷 PyC 改性氧化铝(MoS₂/PyC-Al₂O₃) 的结构电磁超材料,其制备工艺如图 11 所示,通过纳米 结构工程建立多损耗机制,通过增材制造(AM)技术 制造元结构, 实现了 35 GHz 的超宽 EAB。Zhao 等^[64] 设计了一种具有强吸收性和薄厚度的高温超材料 MRAC, 如图 12 所示, 它是由氧化铝雷达吸收涂层和 1 层超材料组成的复合材料。超材料层用高温导电膏制 备, 改善了涂层的阻抗匹配, 调节了电磁共振, 实现了 更多的电磁波被吸收。因此,在相对较薄的厚度下,也

实现了良好的高温吸收。在 800 ℃时, <-5 dB 的 MRAC 反射损耗几乎覆盖了 10~18 GHz 的频率,而厚度只有 1.5 mm。Zhou 等^[65]开发了一种新型紫外线固化聚硅氧 烷前驱体,用于数字光处理(DLP)3D 打印制造无裂 纹、线性收缩的复杂几何形状陶瓷部件,设计了基于复 介电常数的交叉螺旋阵列超材料模型,通过 DLP 打印 和热解工艺制备出在 X 波段具有低反射系数和宽吸收 带宽的陶瓷超材料,为"目标-设计-制造"陶瓷超材料提 供了一种通用方法,并展示了其在电磁吸波材料和结构 中的广泛应用潜力。Luo 等^[66]为使超材料吸收器小型 化,通过引入电导率损失维度,利用渗碳过程在 Ba4Sm_{9.33}Ti₁₈O₅₄陶瓷中建立渗碳通道,显著提高了微波 吸光度并缩短了超材料的周期,实现了器件的小型化,有望打破器件尺寸和介电常数之间的限制关系。



图 10 基于 CNFs/SiBCN 的材料制备工艺示意图 (a)及热解前后元结构和光学图像(b, c)^[62] Fig.10 Schematic illustration for fabrication procedure of CNFs/SiBCN based matematerials (a), optical images of meta-structures before and after pyrolysis (b, c)^[62]



图 11 MoS₂/PyC-Al₂O₃超材料的示意图制造工艺和所提出的超材料的结构^[63] Fig.11 Schematic fabrication process of MoS₂/PyC-Al₂O₃ metamaterials and structure of proposed metamaterials^[63]



图 12 MRAC 的设计示意图 (a); MRAC、单涂层和金属板的远场三维 散射图 (b~d)及它们在 Phi=0°平面上的 RCS (e~g)^[64] Fig.12 Design schematic of proposed MRAC (a); far field three-dimensional scattering patterns of MRAC, single coating and metal plate (b-d); their RCS in planes of Phi=0°(e-g)^[64]

陶瓷基吸波超材料通过复合、改性或改变结构来 调整介电常数与磁导率,以实现对电磁波的高效吸收 和衰减。在较高频率范围内表现出优异的吸波效果, 并能在高温高压等极端环境下保持可靠的吸波能力。 此外,陶瓷基吸波超材料还表现出良好的机械性能, 如高强度和高韧性。陶瓷基吸波超材料在隐身技术、 电磁兼容以及雷达波吸收等领域具有广泛应用。

2.4 水基吸波超材料

水基吸波超材料是一种利用水作为基体,结合特殊结构设计,具有高效吸收和消散电磁波性能的新型

材料。其因宽频吸波性能、热稳定性、低成本和环境 友好性以及可调谐性等优势,在隐身、电磁兼容和电 磁能量收集等领域展现出广泛的应用潜力。

水基吸波超材料的吸波特性表现为宽带高吸收 率、广角入射、极化无关以及热稳定性。它们利用水 在微波波段的高介电常数和大色散特性,通过设计特 定的结构(如十字形水腔)实现电磁波的有效吸收, 其中大部分功率损耗发生在水层中。这些材料的吸波 机理涉及等效介质理论和阻抗匹配,通过模拟电场、 磁场和功率损耗密度分布来探究其吸波特性。水基超 材料吸波器在不同温度下表现出良好的吸收特性,即 使在 10~60 ℃的温度范围内,仍能保持>90 %的吸收 率。此外,它们还展现出对入射角度和极化角度变化 的不敏感性,使其在可变温度环境和不同极化状态下 均能有效吸收电磁能量。

Zhou 等^[67]通过 3D 打印技术设计制备了一种基 于夹心圆柱形水谐振器的柔性宽带电磁波超材料吸 收器 (MMA),优化后的 MMA 采用 TPU 容器 3D 打 印,在 5.74~19.7 GHz 和 25.2~40 GHz 频率范围内实 现>90%的吸收。如图 13 所示,Luo 等^[68]采用橡胶和 多层水结构设计了一种高性能吸收的超材料。仿真结 果表明,所提出的水基超材料在 11.17~25.16 GHz 的 频带内能实现 90%的吸收。特别是 Ku 波段的平均吸 收率高达 99.34%。为进一步提高吸收带宽,周彦飞^[69] 设计了一种"工"字型水基超材料宽带吸波体。通过仿 真和实验验证,这种吸波体在 7.9~21.7 GHz 的频率范 围内,对电磁波的吸收效率>90%。它具备多个优异 特性,包括宽角度工作能力、对电磁波极化状态的不 敏感,以及在不同温度下的稳定性。不仅如此,Pang 等^[70]选择了透明的氧化铟锡(ITO)和聚甲基丙烯酸 甲酯(PMMA)作为组成材料。水被封装在 ITO 背板 和 PMMA之间,作为微波损耗和光学透明材料。数值 模拟结果表明,其在 6.4~30 GHz 的频带内具有>90%的 宽带吸收效率,在可见光区域具有约 85%的高光学透 明度,并得到了很好的验证。Chen 等^[71]将超材料的 水微通道结构单元设计为如图 14 所示的类似于"田" 字结构,成功地将有效吸收频带从 18.4~67.1 GHz 拓



图 13 水基超材料吸收器单元的结构示意图^[68] Fig.13 Schematic diagram for structure of water-based metamaterial absorber unit^[68]



图 14 水微通道结构的组成单元(a)、该装置的侧视图(b)及超材料吸收器示意图(c)^[71] Fig.14 Unit of water microchannel structure (a), side view of the unit (b), schematic of metamaterial absorber (c)^[71]

宽到 9.6~98.9 GHz, 吸收率>90%, 相对带宽高达 165%。 并且, 这种非偏振吸收器可在宽入射角下工作, 并表 现出良好的热稳定性。该超材料吸收器具有超宽带吸 收、薄厚度、低成本、环保等优点, 可应用于电磁波 隐身和电磁辐射防护领域。

除了单纯的水基吸波材料外,复合型的水基吸波 超材料结合多种材料和结构,通过优化设计和制备工 艺,实现更宽频段的吸收和更高的吸收效率,能满足 在复杂环境下的应用。Chen 等[72]通过 3D 打印制造了 一个 5.2 mm 的水基半透明超表面,并通过改变水的电 导率,得到了具有良好吸收性能的超表面,半透明的水 基超表面的吸收率>90%, 频率范围为 5.85~23.1 GHz。 半透明水基超表面的带宽较宽,在入射角为 0~40°的 宽带内实现高吸收。Zhang 等^[73]提出了一种与传统的 "金属层-介质层-金属层"结构不同的水基超材料吸收 器。数值模拟结果表明,在7.84~74.16 GHz 的超宽工 作波段内,其对入射电磁波的吸收率>90%,其吸收 带宽可覆盖 X、Ku、K、Ka 和 U 波段 5 个波段。所 设计的吸收器具有偏振无关的吸收性能,可在大入射 角下工作。此外,吸收器具有良好的热稳定性,当温 度在 0~100 ℃内仍能保持稳定运行。而 Xue 等^[74]则 提出了一种具有可切换功能的光学透明宽带吸收体。 吸收器由具有周期性金字塔结构的透明 PMMA 层、 方环间隙形电阻膜和盐水组成。宽带吸收(8~50 GHz) 和带通传输(8~12 GHz)之间的2种工作条件可通过 注入和排放盐水来切换。此外,所提出的吸收体可在 不同偏振和入射角的入射波下实现稳定的微波吸收 能力。所提出的吸收器在多功能透明隐形窗中具有巨 大潜力。

水基吸波超材料以其独特的优势在电磁波吸收 领域显示出独特的优势,特别是在微波频段内,其高 效的电磁波吸收能力、宽广的频带适应性、对电磁波 极化方向和入射角度的不敏感性,以及相对较低的成 本,使得它在雷达隐身、电磁兼容、电磁防护等领域具 有广泛的应用前景。然而,尽管水基吸波超材料具有诸 多优点,但其在实际应用中仍面临一些挑战。由于水基 材料的特性,其稳定性容易受到环境因素的影响,如 温度、湿度等变化可能导致其性能波动。因此,为确 保水基吸波超材料的性能稳定并适应各种应用场景, 需对其进行精细的封装设计,这会导致制造的复杂性 和成本的增加。所以,在未来的研究中,需进一步优 化水基吸波超材料的结构和材料组合,以提高其稳定 性和降低成本,从而推动其在更广泛领域的应用。

3 结语

综述了电磁波吸收超材料的最新研究进展,探讨 了碳基、金属基、陶瓷基及水基等4大类电磁吸波超 材料的结构特性、设计思路及实际应用。研究发现, 各类电磁吸波超材料在拓宽吸波频段、增强吸波效果

方面均展现出显著优势。具体而言,碳基吸波超材料 凭借其轻质、高强度的特性,在吸波领域展现出巨大 潜力。通过优化结构设计,如采用分层波纹夹层结构、 周期性方形超材料等,实现了对电磁波的高效吸收。 此外,碳纳米管和石墨烯等新型碳材料的引入,进一 步提升了碳基吸波超材料的吸波性能和稳定性。金属 基吸波超材料是一种具备高效宽频带电磁波吸收能 力,兼具耐高温性,但制备工艺复杂、成本高且应用 受限的新型功能材料,尤其包含磁性成分时更显其吸 波性能优异。金属基吸波超材料以其独特的电磁波吸 收特性,在隐身、电磁兼容、通信优化、航空航天、 新能源开发以及环保等领域展现出巨大的应用潜力 和前景,有望推动相关技术的革新与发展。陶瓷基吸 波超材料以其高温稳定性、机械强度、化学稳定性、 耐腐蚀性和耐磨性等优势,在高温、恶劣环境下的电 磁波吸收领域展现出独特优势。通过设计具有特殊结 构的陶瓷基吸波超材料,如采用陀螺三周期最小表面 结构等,可实现对电磁波的多重反射损耗和表面特性 极化,从而改善微波吸收特性。水基吸波超材料作为 一种新型材料,以其宽频吸波性能、热稳定性、低成 本和环境友好性等特点,在隐身、电磁兼容和电磁能 量收集等领域具有广泛应用潜力。通过优化水基吸波 超材料的结构设计和材料组合,可实现对电磁波的高 效吸收和宽频段覆盖。

然而,当前电磁吸波超材料的研究仍面临一些挑 战,如性能优化与提升、制备工艺复杂性、成本控制 及环境稳定性等。为推动电磁吸波超材料的进一步发 展,需持续加强基础研究,探索新型材料体系和结构 设计,优化制备工艺,降低成本,提高材料的环境稳 定性。

随着科技的不断进步和需求的日益增长,电磁吸 波超材料的研究将不断深入。未来,电磁吸波超材料 将朝着高性能化、多功能化、智能化及环境友好化等 方向发展。一方面,将继续致力于提高电磁吸波超材 料的吸波性能,包括拓宽吸波频段、增强吸波效果、 提高吸波稳定性等。通过探索新型材料体系和结构设 计,如采用拓扑优化、机器学习等方法,实现对电磁 吸波超材料性能的精确调控和优化。另一方面,将注 重电磁吸波超材料的多功能化和智能化发展。通过引 入其他功能组分或结构,如光、热、力等响应性材料 或结构,实现电磁吸波超材料在多个领域的综合应 用。同时,利用智能材料和智能结构等技术,实现对 电磁吸波超材料性能的动态调控和自适应优化。此 外,还将关注电磁吸波超材料的环境友好性和可持续 发展。通过采用环保材料和绿色制备工艺,降低电磁 吸波超材料的环境污染和能耗。同时,加强对电磁吸 波超材料的回收和再利用研究,推动其在循环经济中 的广泛应用。

总之,电磁吸波超材料作为一种新型功能材料, 在电磁波吸收、隐身技术、电磁兼容以及电磁辐射防 护等领域展现出巨大应用潜力和研究价值。未来,随着研究的不断深入和技术的不断进步,电磁吸波超材 料将为实现更高效、更智能、更环保的电磁波管理提 供有力支持。

参考文献:

- 薛丽君. 基于探地雷达 B-scan 图像双曲线特征的目标 检测与定位研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021. XUE L J. Research on Target Detection and Location Based on Hyperbolic Features of Ground Penetrating Radar B-Scan Images[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [2] 徐佳. 对影响工业园区电磁辐射环境质量的主要污染 源及防治对策[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程 技术, 2016(4): 5.

XU J. Main Pollution Sources Affecting the Environmental Quality of Electromagnetic Radiation in Industrial Parks and Their Prevention and Control Countermeasures[J]. Chinese Sci-Tech Journal Database (Citation Version) - Engineering Technology, 2016(4): 5.

- [3] 袁迪. 石墨烯-四氧化三铁水泥基材料的基础特性及 吸波性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
 YUAN D. Study on Basic Characteristics and Microwave Absorbing Properties of Graphene-Ferroferric Oxide Cement-Based Materials[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [4] 朱莉莉,康帅,胡祖明,等. MXene 及其复合吸波材料组成与结构的研究进展[J].复合材料学报,2023,40(6):3167-3186.
 ZHU L L, KANG S, HU Z M, et al. Research Progress

in Composition and Structure of MXene and Its Composite Wave Absorbing Materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(6): 3167-3186.

- [5] QIAO Y, MENG Z H, WANG P P, et al. Research Progress of Bionic Adaptive Camouflage Materials[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 79.
- [6] HUANG S N, FAN Q, XU C L, et al. A Visible-Light-Transparent Camouflage-Compatible Flexible Metasurface for Infrared-Radar Stealth Applications[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2021, 54(1): 015001.
- [7] 师甜甜,杜立飞,张海锋,等.水基吸波超材料的研究进展[J].材料导报,2023,37(18):54-60.
 SHI T T, DU L F, ZHANG H F, et al. Research Progress on Water-Based Metamaterial Absorbers[J]. Materials Reports, 2023, 37(18): 54-60.
- [8] 周维,陈骏,李豪,等.太赫兹电磁超材料完美吸收

器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 96-108.

ZHOU W, CHEN J, LI H, et al. Progress of Electromagnetic Metamaterial Perfect Absorber Based on Terahertz Band[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 96-108.

- [9] 张泽奎,张晗,赵亚娟,等.一种单层宽频吸波超材 料设计及其性能分析[J]. 电子世界, 2019(9): 34-35. ZHANG Z K, ZHANG H, ZHAO Y J, et al. Design and Performance Analysis of a Single-Layer Broadband Absorbing Metamaterial[J]. Electronics World, 2019(9): 34-35.
- [10] PANWAR R, PUTHUCHERI S, AGARWALA V, et al. Fractal Frequency-Selective Surface Embedded Thin Broadband Microwave Absorber Coatings Using Heterogeneous Composites[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2015, 63(8): 2438-2448.
- [11] SUDARSAN H, MAHENDRAN K, RATHIKA S. Design of Microwave Metamaterial Absorber for Ku-, X-, and C-Band Applications[J]. Results in Optics, 2024, 15: 100653.
- [12] JADAV M, BHATNAGAR S P. The Complex Magnetic and Dielectric Properties of Bi-Dispersed Magnetic Fluids[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 590: 171614.
- [13] 张政军. 超材料吸波器拓展吸波频带机理研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
 ZHANG Z J. Study on the Mechanism of Expanding the Absorbing Frequency Band of Metamaterial Wave Absorber[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [14] WU J L, YAN X, YUAN X G, et al. A Dual-Tunable Ultra-Broadband Terahertz Absorber Based on Graphene and Strontium Titanate[J]. Results in Physics, 2021, 31: 105039.
- [15] 张勇. 基于柔性超材料的毫米波多频吸波器[D]. 太原:中北大学, 2017.
 ZHANG Y. Millimeter Wave Multi-Frequency Absorber Based on Flexible Metamaterials[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [16] 张帆. 吸波材料抑制电磁干扰的数值仿真及优化[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
 ZHANG F. Numerical Simulation and Optimization of Eelectromagnetic Interference Suppression by Absorbing Materials[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [17] 王鹏. 新型纳米吸波材料的制备、结构与性能研究[D]. 青岛:山东科技大学,2006.WANG P. Study on the Preparation, Structure and Prop-

erties of Novel Nano-Absorbing Materials[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006.

- [18] 肖荣.基于碳系导电膜的宽带和吸/透一体吸波超材料 设计、制备及性能研究[D].太原:中北大学, 2024 XIAO R. Design, Preparation and Properties of Broadband and Absorption/Penetration Integrated Wave Absorbing Metamaterial Based on Carbon Series Conductive Film[D]. Taiyuan: North University of China, 2024.
- [19] 乔健. 耐高温吸波超材料的制备及性能研究[D]. 南京:东南大学, 2023.
 QIAO J. Preparation and Properties of High Temperature Absorbing Matematerials[D]. Nariing: Southeast

ture Absorbing Metamaterials[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.

- [20] WANG Q Y, LIU J, LI Y D, et al. A Literature Review of MOF Derivatives of Electromagnetic Wave Absorbers Mainly Based on Pyrolysis[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(3): 446-473.
- [21] 何燕飞,龚荣洲,王鲜,等.蜂窝结构吸波材料等效 电磁参数和吸波特性研究[J].物理学报,2008,57(8): 5261-5266.
 HE Y F, GONG R Z, WANG X, et al. Study on Equivalent Electromagnetic Parameters and Absorbing Properties of Honeycomb-Structured Absorbing Materials[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5261-5266.
- [22] QU S C, SHENG P. Microwave and Acoustic Absorption Metamaterials[J]. Physical Review Applied, 2022, 17(4): 047001.
- [23] WATTS C M, LIU X L, PADILLA W J. Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers[J]. Advanced Materials, 2012, 24(23): 98-120.
- [24] QUAN B, LIANG X H, JI G B, et al. Dielectric Polarization in Electromagnetic Wave Absorption: Review and Perspective[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 728: 1065-1075.
- [25] DU J N, LI T, XU Z K, et al. Structure-Activity Relationship in Microstructure Design for Electromagnetic Wave Absorption Applications[J]. Small Structures, 2023, 4(11): 2300152.
- [26] 王天鹏. MXene/Co_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ 纳米复合材料的制备 及电磁性能研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019.
 WANG T P. Study on the Preparation and Electromagnetic Properties of MXene/Co_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ Nanocomposites[D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Science, 2019.
- [27] PENG Y P, WANG Q, XU Y C, et al. Optically Transparent and Mechanically Stretchable Fractal-Structured Wave-Absorbing Metamaterial in Low Frequency Range[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 961:

171100.

- [28] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [29] QIAO M K, LI X C, LIAO Z Q, et al. Multioctagonal Ring Metamaterial with Broadband Microwave Absorption at Elevated Temperature[J]. Physica Status Solidi (RRL) -Rapid Research Letters, 2023, 17(4): 1.
- [30] WANG G, LI D W, LIU T T, et al. Design and Manufacturing of Lightweight Modular Broadband Microwave Absorbing Metastructure[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 266: 111007.
- [31] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.
- [32] WEN J, SUN W, LIANG B Z, et al. Dynamically Switchable Broadband - Narrowband Terahertz Metamaterial Absorber Based on Vanadium Dioxide and Multilayered Structure[J]. Optics Communications, 2023, 545: 129710.
- [33] DOTERA T, BEKKU S, ZIHERL P. Bronze-Mean Hexagonal Quasicrystal[J]. Nature Materials, 2017, 16(10): 987-992.
- [34] 王莉红. 负载磁性 FeO_x 的碳基复合材料吸波性能研究[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
 WANG L H. Study on Wave Absorption Properties of Carbon Matrix Composites Loaded with Magnetic FeO_x[D]. Kunming: Yunnan University, 2021.
- [35] 孔静,高鸿,李岩,等. 电磁屏蔽机理及轻质宽频吸波 材料的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9055-9063.
 KONG J, GAO H, LI Y, et al. Research Progress of Electromagnetic Shielding Mechanism and Lightweight and Broadband Wave-Absorbing Materials[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9055-9063.
- [36] 刘丽萍. 碳基复合材料的制备及其微波吸收性能研究
 [D]. 沈阳:东北大学, 2020.
 LIU L P. Preparation and Microwave Absorption Properties of Carbon Matrix Composites[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [37] YAN L L, HE Z H, JIANG W, et al. Design of the Broadband Metamaterial Absorber Based on Dispersed Carbon Fibers in Oblique Incidence[J]. IEEE Access, 2020, 8: 214775-214780.
- [38] CHENG L H, HE Z H, DONG J C, et al. Multifunctional Design of Hierarchical Corrugated Metamaterial Absorber Realized by Carbon Fiber Stitching[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 148: 109104.
- [39] DU L F, SHI T T, ZHOU Q, et al. A Multi-Layer Square Frustum Metamaterial for Ultra-Broadband Electro-

magnetic Absorption Based on Carbonyl Iron Powder/Carbon Fiber Composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 950: 169917.

- [40] ZHOU Q, SHI T T, XUE B, et al. Gradient Carbonyl-Iron/Carbon-Fiber Reinforced Composite Metamaterial for Ultra-Broadband Electromagnetic Wave Absorption by Multi-Scale Integrated Design[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(6): 1198-1206.
- [41] XU H L, YIN X W, LI M H, et al. Ultralight Cellular Foam from Cellulose Nanofiber/Carbon Nanotube Self-Assemblies for Ultrabroad-Band Microwave Absorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(25): 22628-22636.
- [42] ZHOU Q, SHI T T, XUE B, et al. Multi-Scale Integrated Design and Fabrication of Ultra-Broadband Electromagnetic Absorption Utilizing Multi-Walled Carbon Nanotubes-Based Hierarchical Metamaterial[J]. Composites Science and Technology, 2023, 232: 109877.
- [43] RIZZO A, LUHRS C, EARP B, et al. CNT Conductive Epoxy Composite Metamaterials: Design, Fabrication, and Characterization[J]. Materials, 2020, 13(21): 4749.
- [44] HUANG Y X, SONG W L, WANG C X, et al. Multi-Scale Design of Electromagnetic Composite Metamaterials for Broadband Microwave Absorption[J]. Composites Science and Technology, 2018, 162: 206-214.
- [45] 吕伟. 石墨烯的宏量制备、可控组装及电化学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
 LYU W. Macro Preparation, Controlled Assembly and Electrochemical Properties of Graphene[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [46] CHEN X Q, WU Z, ZHANG Z L, et al. Graphene Oxide Aqueous Solution-Based Metamaterial for Broadband Absorption[J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2020, 120: 114017.
- [47] YAN D X, LI E P, FENG Q Y, et al. Design and Analysis of a Wideband Microwave Absorber Based on Graphene-Assisted Metamaterial[J]. Optik, 2022, 250: 168310.
- [48] YANG C, HE E Y, YANG P, et al. 3D-Printed Stepped Structure Based on Graphene-FeSiAl Composites for Broadband and Wide-Angle Electromagnetic Wave Absorption[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 270: 111135.
- [49] LIU W, TIAN J P, YANG R C, et al. Design of a Type of Broadband Metamaterial Absorber Based on Metal and Graphene[J]. Current Applied Physics, 2021, 31: 122-131.

- [50] 祁部雄. 基于全金属结构的超材料吸波器及其吸波和 传感特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
 QI B X. Study on Metamaterial Wave Absorber Based on All-Metal Structure and Its Absorbing and Sensing Characteristics[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [51] SHAO T Q, MA H, WANG J, et al. Ultra-Thin and High Temperature NiCrAlY Alloy Metamaterial Enhanced Radar Absorbing Coating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 832: 154945.
- [52] GUO M C, WANG Y, LIU S B. Research on Microwave Absorption Properties of FeCoGe Composites and Achieving Ultra-Broad Bandwidth via Metamaterial Design[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2024, 35(19): 1319.
- [53] YANG Z, LIANG Q X, DUAN Y B, et al. Electromagnetic Characteristics and 3D-Printing Realization of a Lightweight Hierarchical Wave-Absorbing Metastructure for Low-Frequency Broadband Absorption[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 949: 169894.
- [54] 周侃. 磁性薄膜微波吸收机理研究[D]. 南京: 南京大 学, 2013.
 ZHOU K. Study on Microwave Absorption Mechanism of Magnetic Thin Films[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [55] FENG L, LI W C, WANG Y. Broadband Electromagnetic Wave Absorbing Metamaterial Based on FeSiAl Alloy[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 541: 168510.
- [56] CHENG Y Z, HE B, ZHAO J C, et al. Ultra-Thin Low-Frequency Broadband Microwave Absorber Based on Magnetic Medium and Metamaterial[J]. Journal of Electronic Materials, 2017, 46(2): 1293-1299.
- [57] NING J, CHEN K, ZHAO W B, et al. An Ultrathin Tunable Metamaterial Absorber for Lower Microwave Band Based on Magnetic Nanomaterial[J]. Nanomaterials, 2022, 12(13): 2135.
- [58] LI W, WEI J, WANG W, et al. Ferrite-Based Metamaterial Microwave Absorber with Absorption Frequency Magnetically Tunable in a Wide Range[J]. Materials & Design, 2016, 110: 27-34.
- [59] ZHOU W, ZHU Z H, BAI R R. Broadband Incident Angle Independent Magnetic Composite Metamaterial Absorber with C-Band Absorption[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 153: 108031.
- [60] LIU C, GUO X, TONG Y C, et al. Vat Photopolymerization 3D Printing SiBCN Ceramic Metamaterials with Strong Electromagnetic Wave Absorption[J]. Additive Manufacturing, 2024, 87: 104239.

- [61] ZHOU Q, LIU H Q, GU Y, et al. 3D Printed PyC/Al₂O₃ Ceramic Metamaterials with Different Micro-Channels for Tunable Microwave Absorption[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, 44(1): 270-276.
- [62] LIU H Q, ZHANG Y B, LIU X M, et al. Additive Manufacturing of Nanocellulose/Polyborosilazane Derived CNFS-SiBCN Ceramic Metamaterials for Ultra-Broadband Electromagnetic Absorption[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 433: 133743.
- [63] LIU X M, LIU H Q, WU H J, et al. Structural Electromagnetic Absorber Based on MoS₂/PyC-Al₂O₃ Ceramic Metamaterials[J]. Small, 2023, 19(33): 2300664.
- [64] ZHAO S X, MA H, SHAO T Q, et al. High Temperature Metamaterial Enhanced Electromagnetic Absorbing Coating Prepared with Alumina Ceramic[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 874: 159822.
- [65] 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.
- [66] LUO W J, WANG X B, WANG S, et al. Miniaturization of Dielectric Ceramic-Based Metamaterial Perfect Absorber[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(1): 013502.
- [67] ZHOU Q, XUE B, GU S Y, et al. Ultra Broadband Electromagnetic Wave Absorbing and Scattering Properties of Flexible Sandwich Cylindrical Water-Based Metamaterials[J]. Results in Physics, 2022, 38: 105587.

- [68] LUO X B, CAO B H, ZHANG J, et al. High-Performance Water-Based Metamaterial Wave Absorber Based on Ku Band[J]. Plasmonics, 2024: 1-9.
- [69] 周彦飞. 水基超材料宽带吸波体的研究[D]. 武汉: 华 中师范大学, 2020.
 ZHOU Y F. Study on Water-Based Metamaterial Broadband Wave Absorber[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2020.
- [70] PANG Y Q, SHEN Y, LI Y F, et al. Water-Based Metamaterial Absorbers for Optical Transparency and Broadband Microwave Absorption[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(15): 155106.
- [71] CHEN Y, CHEN K J, ZHANG D J, et al. Ultrabroadband Microwave Absorber Based on 3D Water Microchannels[J]. Photonics Research, 2021, 9(7): 1391.
- [72] CHEN C B, CHEN T H, HUANG M, et al. An Ultra-Wideband and Translucent Metasurface Absorber Based on Water[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2023, 121: 117-125.
- [73] ZHANG X Q, YAN F P, DU X M, et al. Broadband Water-Based Metamaterial Absorber with Wide Angle and Thermal Stability[J]. AIP Advances, 2020, 10(5): 055211.
- [74] XUE H C, CONG H, FU Z P, et al. Function Switchable Broadband Saline Water-Based Metamaterial Absorber[C]//2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Qingdao, China: IEEE, 2023: 1-3.