

电磁防护超材料在国防领域中的应用与前景展望

李宝毅^{1,2}, 赵亚娟^{1,2}, 王 蓬^{1,2}, 周必成^{1,2}, 张泽奎^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原 030006; 2. 电磁防护材料及技术山西省重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 电磁防护超材料以人工微结构为基础, 实现了对介电常数和磁导率的自由设计, 可突破传统电磁防护材料在信息装备一体化发展过程中遭遇的各种物理极限, 在隐身材料、微波器件、军用天线等国防领域具有巨大的应用前景。本文阐述了电磁防护超材料的原理和特点, 总结了其在军事领域的重大应用价值, 综述了近年来在国防领域的最新成果, 分析了当前研究存在的问题和未来发展趋势, 为电磁防护超材料的进一步实际应用提供有效、可靠的理论依据及实验基础。

关键词: 超材料; 电磁防护; 综述; 隐身; 天线

doi: 10.14106/j.cnki.1001-2028.2019.05.001

中图分类号: TN929.56; TQ050.4⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2028(2019)05-0001-05

The application and prospects of metamaterials for electromagnetic protection in defense fields

LI Baoyi^{1,2}, ZHAO Yajuan^{1,2}, WANG Peng^{1,2}, ZHOU Bicheng^{1,2}, ZHANG Zekui^{1,2}

(1. No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan 030006, China;

2. Electromagnetic Protection Materials and Technology Key Laboratory of Shanxi Province, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Based on their artificial structures, metamaterial make it easy to design the dielectric constant and magnetic permeability, which can break through the various physical limits of the traditional electromagnetic protection materials during the equipment integration. As a result, metamaterial based electromagnetic protection have significant application prospects in stealth materials, microwave devices, military antennas, and so on. The latest achievements of metamaterial based electromagnetic protection in national defense are firstly introduced. The existing problems, prospects and the development trends are then discussed, which could provide effective and reliable basis for the future theoretical and experimental practice of metamaterial based electromagnetic protection.

Key words: metamaterials; electromagnetic protection; review; stealth; antenna

电磁防护材料通过电、磁、光、热等物理反应来消除或减弱系统、设备、组件的复杂电磁环境效应, 是构成现代化电子信息装备的基本功能单元。随着电子信息装备向小型化、高集成、高效率、低功耗、低可探测性的方向进一步发展, 基于铁氧体、金属微粉、导电聚合物的传统电磁防护材料在质量、体积、功能复合等方面已经遭遇各种物理极限, 如衍射极限、曲面构型、吸收带宽和厚度极限等, 逐渐不能适应信息系统对电磁防护材料的新需求。

作为先进电磁防护材料的重要发展方向, 电磁防护超材料以人工微结构为基础, 突破了自然界物

质属性对电磁特性的局限, 可对材料介电常数和磁导率进行自由设计, 实现对电磁波能量、频率、方位的静态和动态调控, 并已在隐身材料、微波器件、军用天线等方面取得了突破性进展。如利用超材料与吸波材料复合降低传统材料厚度并拓展带宽, 实现电磁与光学、热学、力学的多功能复合, 设计小型化、低功耗微波器件和军用天线等^[1-3]。电磁防护超材料技术的突破可能使飞机、舰艇、无线电和卫星等的电磁防护设计产生重大变革, 进而影响到以上武器平台的设计, 在国防领域具有重要的应用前景。本文总结了近年来电磁防护超材料在

收稿日期: 2019-02-21

通讯作者: 李宝毅

作者简介: 李宝毅(1983-), 男, 山东临沂人, 高级工程师, 博士, 主要从事电磁防护材料的研究。

国防领域中的先进研究成果, 并对电磁防护超材料当前研究存在的问题进行了总结, 展望了其发展前景, 为超材料的进一步实际应用提供可靠的理论依据及实验基础。

1 电磁防护超材料的原理和特点

超材料的核心是其电磁性质主要取决于其单元结构, 而不是取决于材料的本征属性。超材料一般由特征尺寸远小于工作波长的基本谐振单元组成, 即磁谐振器和电谐振器, 通过金属分割线、金属连续线、开口环结构等单元结构对入射电磁波的电场分量产生电谐振响应, 获得等效介电常数, 利用渔网结构等单元结构对入射电磁波的磁场分量产生磁谐振响应, 获得等效磁导率, 从而构造出具有特殊电磁特性的人工电磁结构。通过控制超材料单元结构的几何参数可获得任意介电常数与磁导率分布, 实现电磁波的汇聚、捕获、弯曲、增强等, 从而控制电磁波的传播, 实现超材料完美吸波体、隐身天线罩、新型雷达天线等电磁功能材料与器件^[4-5]。

电磁防护超材料的基础是具有新型电磁功能的超材料功能结构, 核心是通过复杂的人造微结构设计及加工, 实现人造“原子”、“分子”对电磁波的响应。与常规电磁防护材料相比, 电磁防护超材料实现了以下三个方面的突破:

(1) 材料设计模式的改变。超材料研究采用从功能到结构的“自上而下”的逆向设计方法, 可按功能实现基本特征微结构单元的设计及其排布的精确剪裁, 突破了传统以化学成分设计调控材料性能的设计模式, 转而从材料结构设计角度出发。由此可以设计出任意需求的新型材料, 满足装备系统的个性化需求, 打破了传统电磁防护材料对武器装备设计性能的制约。

(2) 作用范围和设计对象的拓展。超材料可以针对不同的波长设计出相应的结构, 单元的尺度及形状由工作波段的波长决定, 如对光波段起作用的单元在纳米和微米量级, 对微波起作用的单元特征尺度在微米到厘米量级。设计对象可以是金属材料、非金属材料, 也可以是复合材料, 大大放宽了材料设计的自由度, 并可通过合适的选材实现多功能兼容和耐极端环境。

(3) 作用效果的大幅提升。电磁防护超材料强化和扩展了材料功能, 带来信息装备的性能提升和设计自由度的放宽, 可催生全波段天线、智能隐身结构、超远距离探测雷达等一批具有颠覆效果的新装备, 必

将给装备发展和作战模式产生革命性的变革。

2 电磁防护超材料在国防领域中的应用

电磁防护超材料研究的重大科学价值及其在国防领域呈现出的革命性应用前景, 得到了美国、欧盟、俄罗斯、日本等政府以及波音、雷神等机构的强力关注, 已是国际上最热门、最受瞩目的前沿高技术之一。随着研究的不断深入, 电磁防护超材料的作用频段已从微波发展到太赫兹以及光波段, 并在隐身材料、小型化微波器件、高效平面天线等领域不断得到应用。总体看, 目前超材料尚处于基础研究及应用研究阶段, 未来最有可能在以下方向得到突破。

2.1 设计新型隐身材料, 实现轻薄化、全频段、智能化隐身

隐身是近年来出镜率最高的超材料应用, 也是电磁防护超材料研究最为集中的方向^[6], 美国的 F-35 战斗机与 DDG1000 大型驱逐舰均应用了超材料隐身技术。首个高效超薄吸波超材料是由波士顿大学的 Padilla 等提出并实现的, 该吸收器采用双层结构, 厚度仅为 $\lambda/2$, 吸收率可以高达 99.997%, 但不具有良好的角度吸收特性, 80% 吸收带宽只有 $\pm 5^\circ$ 左右。随后, Tao 和 Padilla 等将吸波超材料的概念拓展到毫米波、太赫兹、红外、可见光等波段, 展现出吸波超材料厚度小、吸收强和高度可设计性的特点^[7], 并通过各种方法实现了全角度、多极化响应^[8-9]。浙江大学利用渐变多层膜结构将微波段吸收带宽拓展到 50% 以上, 厚度为 5 mm 时 90% 吸收覆盖频带为 8.3 ~ 12 GHz^[10]。Long 等将大小金字塔做棋盘型排列, 获得宽带超材料吸波体, 在 4.36 mm 时实现了 7~18 GHz 内 90% 以上的吸收^[11]。本课题组利用面内多共振单元组合设计的方法, 将“L”型和“十”型单元相复合, 在厚度为 2 mm 时在 8~17.5 GHz 内实现了反射率小于 -10 dB。

鉴于拓展隐身超材料带宽方面存在的困难, 研究人员提出了吸波频率智能可调的超材料, 先后提出了利用电、磁、光及机械等不同的调控手段实现超材料电磁性能的可调控^[12-14]。2013 年美国波士顿大学 Padilla 等利用液晶材料设计实现了一种电控可调人工电磁结构吸收器。武汉理工大学提出了一种基于磁场调控的超薄超宽可调吸波超材料, 调节范围从工频到 X 波段, 吸收率在 90% 以上, 但其需要施加的磁场如何实现还未明确^[15]。本课题组利用 PIN 二极管模拟超材料单元, 通过改变二极管的偏

置电压实现了对吸波频率从 9 GHz 到 16 GHz 的连续调控。雷神公司在金属微结构频率选择表面嵌入可变电容,通过控制加载在可变电容上的偏置电压,可改变频率选择表面的电磁参数,从而实现材料透波特性的自动控制,可应用于各种先进雷达系统和下一代隐身战机的智能隐身蒙皮。

电磁防护超材料实现隐身的另一种途径是构建隐身斗篷,使入射的电磁波或声波绕过被隐藏的物体,实现真正意义上的隐身^[16-17]。2012 年美国东北大学采用掺杂钕的 M 类型钡铁氧体薄片与铜线组合,设计和制备了可在 36~44 GHz 内实现可调负折射率的超材料结构。2014 年,美国佛罗里达大学研制出一种可实现可见光隐身的多层三维超材料,关键是利用纳米转移印刷技术改变超材料的周围折射率,使光从其周围绕过而实现隐身。2015 年,加州理工大学提出了利用绝缘超表面实现新的隐身地毯方案,基本单元为一层亚波长尺度的特氟龙和陶瓷,通过设计地毯的形状与陶瓷圆柱的高度,克服了传统超材料隐身斗篷损耗强和尺寸大的缺陷。

2.2 与传统电磁防护材料复合,突破材料在厚度、体积、频段等方面的极限

基于传统电磁防护材料的限制和电磁防护超材料的特点,将两种材料的优势结合有望发展出新型宽频高性能电磁防护材料。在太赫兹范围,研究人员将超材料与不同的传统材料结合实现了多频段、可调吸收;在微波频段,邢丽英、Zou 等提出利用超材料来拓展传统吸波材料的带宽、增强低频吸收性能的设计方法,并取得较好的效果。穆武第等在碳纤维布/CIP/环氧树脂结构吸波材料的基础上,复合金属短线网格结构的超材料,通过调节金属线间距和距表面的距离,将反射率低于-10 dB 的带宽由 3 GHz 拓宽至 12.4 GHz^[18]。Li 等通过将立式超材料结构与磁性吸波涂层相复合,结合了超材料的低频吸收和磁性材料的高频吸收优势,实现了在 4~18 GHz 内 10 dB 以上的吸收^[19]。本课题组将磁性吸波材料的匹配层设计为特殊的方块型超材料结构,将吸波材料(厚度为 6 mm)有效吸收带宽从 6~18 GHz 拓展到 2.03~18 GHz,其中 14~18 GHz 频段内的反射率降低到-15 dB 以下。

2.3 实现电磁防护与电、热、力等功能的复合,满足装备在复杂电磁和严苛使用环境下的多功能需求

基于基体相与功能相复合的功能复合材料存在功能相与基体相理化特性差异、结构性与功能性互

相矛盾等缺陷,不能满足复杂电磁环境和严苛使用环境对电磁防护材料的多样化需求,如耐高温多频谱隐身、宽频带透波等。电磁防护复合超材料从物理微观尺度出发,运用一体化的结构、功能多维度联合设计,实现结构、电磁与其他功能的一体化复合,可赋予电磁防护超材料耐高温、抗腐蚀、高强度等其他功能。

石江波等将耐热材料融入到超材料吸波结构,发现常温、高温下复合材料的热、力学性能变化不超过 5%,并在 X 和 Ku 波段具有较好的隐身效果^[20]。周必成等在 ITO 透明导电薄膜上制备十字形超材料吸波结构,实现了光学透明和双波段吸波,透光率大于 70%,吸波频段为 8.5~11 GHz 和 14.5~16.5 GHz,克服了传统电磁防护材料吸波与透光不能兼容的问题^[21]。本课题组将超材料的设计方法引入到防弹材料设计中,将防弹材料作为超材料的介质层进行整体考虑,实现了防弹、吸波功能的融合设计,复合材料具备抗钢芯弹功能的同时在 8~18 GHz 反射率小于-10 dB。

2.4 构建新型天线和天线罩,解决现有信息装备存在的效能不高、复用性差、可重构性差等缺点

超材料在天线与天线罩领域的应用是近年来的研究热点之一,具体体现在超材料结构天线本身设计以及对天线波束的再设计。众多研究表明^[22-24],将超材料应用到导弹、雷达、航天器等天线及天线罩上,可大大降低天线能耗,提高增益,拓展工作带宽,有效增强天线的聚焦性和方向性。

雷达天线罩方面,采用传统透波材料制成的雷达罩往往会因为热损耗和反射损耗等使天线的辐射方向图变差,降低雷达性能。如果在天线罩中引入超材料覆层,无需特别设计天线罩外形,就可使电磁波只能在雷达罩垂直面附近的小角度内传播,增强天线的聚焦性和方向性,并实现雷达隐身。美国雷神公司研制了基于超材料的导弹天线罩,可以使穿过导弹天线罩的电磁波不产生有效折射,有效提高导弹打击精度。近期,美国 Nano Sonic, Inc. 和 Sensor MetriX 在美国海军的项目支持下,成功研发出天线罩用超材料智能结构,解决了传统天线罩图像畸变的问题,同时具有重量轻、后期改装和维护方便的特点,极大地提高了 E2 “鹰眼”预警机的整体性能。

天线方面,雷神公司研发了超材料双频段小型化 GPS 天线,通过精确的人工微结构设计,可提升天线单元间的隔离度,减少天线元件间的耦合,大

幅拓展天线的带宽,可应用于对天线尺寸要求苛刻的飞机平台与个人便携式战术导航终端。英国 BAE 系统公司开发出一种可用于无人机通信的超材料平面天线,可使电磁波在透过平面天线后进行聚焦,并保留平面天线的宽带性能,克服了传统抛物面天线变为平面天线所带来的带宽损失、增益低等问题,同时可实现一个天线替换多个天线,减少天线的数量。这一技术突破可能使飞机、舰艇、卫星等天线的设计产生划时代的变革。

采用超材料构建新型天线和天线罩最重要的应用是实现射频前端与天线的一体化集成。采用超材料结构,从系统整体设计出发,可将射频前端的微波器件集成到天线系统。如在天线前端添加一个具备吸波/透波功能一体化的超材料结构,则天线自身将具备滤波功能,有利于减小射频前端的体积。同样地,通过设计具有特殊电磁特性的超材料结构可将射频前端的功分器、移相器、合路器等集成到天线,使天线和射频前端实现一体化设计^[25-26]。基于超材料人为可控的电磁属性,可构建智能、宽带、可重构、一体化、可共形的射频天线系统,实现射频天线系统整体性能的跨越式发展。

3 电磁防护超材料研究存在的问题

电磁防护超材料在国防领域具有广阔的应用前景,但目前并未实现大规模工程应用,尚有许多技术难点有待解决,需要在以下方面进行深入研究。

3.1 进一步认识电磁防护超材料的电磁调控理论及其作用机制

超材料在亚波长尺度下与电磁波相互作用,传统的波动方程及调控方法不能完全适用,急需对麦克斯韦方程进行再认识,包括超材料特殊电磁现象的产生机理,作用机制,应用原理,物理极限,亚波长尺寸下电磁现象的研究方法和评价标准等。通过对各种超材料电磁性能进行分析,探讨其优势特性应用于电磁防护领域的可行性及方法。

3.2 强化电磁防护超材料的性能,克服其在带宽等方面的不足

现有电磁防护超材料研究一般局限于某一个波段范围^[27-28],发展具备可见光、红外、雷达波等多个频段隐身的蒙皮或多个发射频段的超材料天线,对于武器装备意义重大。受设计和生产的难度所限,现有超材料的研究一般局限在二维结构,只能让超材料在某一个固定的角度对波起作用,但未来武器装备必然要求超材料制成的“隐身斗篷”具备

全向隐身功能,要求电磁防护超材料必须是各向同性的三维结构。

3.3 加强电磁防护超材料与工程应用领域的结合

电磁防护超材料在国防领域应用前景广阔,但目前其使用场合具有局限性。应用于电磁隐身时,材料的大角度响应特性、极化响应特性、曲面成型能力、维护成本等是制约其应用的关键技术;与天线配合使用时,超材料因对天线类型、加工方式有较多的要求也限制了其应用。并且,电磁防护超材料是针对具体需求开展的针对性设计,通用性不足也是制约其应用的关键。

3.4 发展电磁防护超材料低成本、短流程、跨尺度制造技术

超材料单元的微结构尺度在微米、纳米级(可见光和红外波段),而超材料功能体则是由数百万计微单元组成的宏观体,因此,电磁防护超材料制造的难点在于大规模微结构的制造和小尺度加工精度控制。目前超材料加工手段主要包括激光直写、电子束曝光、离子束曝光、紫外曝光等微纳米加工技术,在实现跨尺度制造和个性化定制方面还存在费效比不高、流程复杂等问题。近年微尺度增材制造(3D 打印)技术快速发展,加工精度已可达 50 nm,有望解决这一难题。

4 展望

目前,电磁防护超材料的基础理论研究向多学科高度交叉融合方向发展,实验研究向宽频带、低损耗、高频(太赫兹、红外和可见光)和低频(MHz)、各向同性、功能集成等方向发展。未来电磁防护超材料技术将向更宽频谱、数字化、智能化等方向发展,发展趋势主要有:

(1) 电磁防护超材料模型库。以材料数据库系统为基础,以数字化模拟技术为工具,通过材料的微结构单元组成预测材料的性能,并将材料设计、产品设计和生产制造融为一体,加速电磁防护超材料的“发现—开发—应用”进程。

(2) 多功能复合一体化设计。利用多尺度建模和多物理场仿真设计,将材料的光、电、热、磁、力等功能集合于同种材料上,实现电磁防护超材料的多功能一体化和智能响应。

(3) 全寿命周期管理。针对复杂电磁环境和极端服役环境的使用需求,电磁防护超材料在设计之初即应考虑材料微观层次使役行为演化规律和损伤修复技术,借助计算机辅助设计与仿真,实现材料

的全寿命周期管理。

(4) 低成本制造技术。制造成本是限制电磁防护超材料大量使用的重要原因, 利用高效率高精度的自动化设备进行生产制造, 大力发展 3D 打印等新兴精密制造技术, 提高电磁防护超材料稳定性、可靠性。

参考文献:

- [1] Cao T, Wei C W, Re S, et al. Broadband polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial at visible frequencies [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(2): 3955.
- [2] Wen Q Y, Xie Y S, Zhang H W. Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20256-20265.
- [3] Tamagnone M, Gomez-Diaz J S, Mosig J R, et al. Analysis and design of terahertz antennas based on plasmonic resonant grapheme sheets [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(11): 114915-114919.
- [4] Schuig D, Mock J J, Justuce B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [5] Yin L X, Jonathan D F, Tian X Y, et al. Design and characterization of radar absorbing structure based on gradient-refractive-index metamaterials [J]. *Composites Part B*, 2018, 132: 178-187.
- [6] 冯一军, 朱博, 徐培华, 等. 电磁超材料在微波吸波材料中的应用探索 [J]. *中国材料进展*, 2013, 32(8): 473-479.
- [7] He X J, Yan S T, Ma Q X, et al. Broadband and polarization-insensitive terahertz absorber based on multilayer metamaterials [J]. *Optics Communications*, 2015, 340: 44-49.
- [8] 韩栩, 高喜. 多频复合结构超材料吸波器的设计 [J]. *桂林电子科技大学学报*, 2015, 35(1): 1-5.
- [9] Liu D J, Xiao Z Y, Ma X L, et al. Broadband asymmetric transmission and multi-band 90° polarization rotator of linearly polarized wave based on multi-layered metamaterial [J]. *Optics Communications*, 2015, 354: 272-276.
- [10] Ding F Y, Cui Y X, Ge X X, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(10): 103506.
- [11] Long C, Yin S, Wang W, et al. Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorbers by transverse magnetic harmonics of 210 mode [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21431.
- [12] 司黎明, 侯吉旋, 刘涌, 等. 基于集总元件和负微分元件的有源可调谐超材料传输线 [J]. *物理学报*, 2014, 63(2): 027802.
- [13] 于相龙, 周济. 智能超材料研究与进展 [J]. *材料工程*, 2016, 44(7): 119-128.
- [14] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 基于电磁谐振分离的宽带低雷达截面超材料吸波体 [J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 214101.
- [15] Li W, Wei J, Wang W, et al. Ferrite-based metamaterial microwave absorber with absorption frequency magnetically tunable in a wide range [J]. *Material & Design*, 2016, 110: 27-34.
- [16] Li Y H, Thomas L, Boubacar K. Extremely thin dielectric metasurface for carpet cloaking [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2015, 152: 33-40.
- [17] 王轩, 郝璐, 黄兴军, 等. 国外超材料及隐身斗篷技术发展研究 [J]. *飞航导弹*, 2017, 5: 50-54.
- [18] 穆武第, 王凤春, 黄克明, 等. 吸波材料与超材料复合结构吸波性能研究 [J]. *材料保护*, 2013(S1): 85-88.
- [19] Li W, Wu T, Wang W, et al. Broadband patterned magnetic microwave absorber [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(4): 044110.
- [20] 石江波, 黄祺, 王金仿. 防热材料和亚波长结构复合的隐身技术研究 [C] // 先进电磁隐身材料工程技术应用与展望研讨会论文集. 武汉: [出版者不详], 2017: 161-168.
- [21] 周必成, 王东红, 贾巍, 等. 光学透明和双波段吸波超材料的设计与性能 [J]. *微波学报*, 2016, 32(3): 46-50.
- [22] Liang J, Yang H D. Microstrip patch antennas on tunable electromagnetic band-gap substrates [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(6): 1612-1617.
- [23] Chen H D, Kuo S H, Sim C Y D, et al. Coupling-feed circularly polarized RFID tag antenna mountable on metallic surface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(5): 2166-2174.
- [24] 贾丹, 何应然, 韩国栋. 一种宽带吸波的隐身天线罩设计 [J]. *现代雷达*, 2017, 39(3): 62-65.
- [25] He P, Gao J, Marinis C T, et al. A microstrip tunable negative refractive index metamaterial and phase shifter [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(19): 193505-193508.
- [26] Tennant A, Chambers B. A single-layer tunable microwave absorber using an active FSS [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, 14(1): 46-47.
- [27] 赵碧辉, 文岐业, 谢云松, 等. 电磁超材料吸收器的研究进展 [J]. *电子元件与材料*, 2011, 30(11): 82-86.
- [28] Landy N L, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402-207405.