

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.006

加载电阻膜超表面的低频宽带微波吸收复合材料的设计与性能

李学山¹, 李勇峰², 鹿海军¹

(1. 中国航空制造技术研究院复合材料技术中心, 北京 101300; 2. 空军工程大学基础部, 西安 710051)

摘要: 为实现双组分分层结构微波吸收复合材料在 1~18 GHz 范围内的低频宽带微波吸收效果, 拓展有效吸收带宽(EAB), 分别设计了以环氧树脂(5224A)与芳纶机织物(100C170)复合的层合功能层作为阻抗匹配层(P1), 内含磁性吸收剂的层合功能层作为损耗层(P2), 利用低介电与低磁导率特性的 P1 功能层提升 4~18 GHz 高频吸收, 利用强电磁损耗特性的 P2 功能层实现 1~4 GHz 低频谐振吸收, 引入电阻膜超表面进一步改善阻抗匹配, 拓展高频 EAB。结果显示, P1 功能层具有良好阻抗匹配效果, 与 P2 功能层复合设计成双组分分层合结构微波吸收复合材料, 在拓展高频 EAB 的同时不影响低频谐振吸收效果; 电阻膜超表面的引入能够进一步改善阻抗匹配、提升电磁谐振损耗、拓展高频 EAB、实现低频宽带吸收效果; 设计的加载超表面的复合材料在 TM 极化模式下具备宽角域吸收特性, 在 60°入射角下仍具有优异低频宽带吸收效果; 厚度为 7.4 mm 的复合材料在 1~18 GHz 范围内的实测 EAB 由 4.49 GHz 拓展到 10.07 GHz, 且实测反射率变化趋势与设计结果具有一致性; 加载电阻膜超表面后复合材料的弯曲性能呈现轻微提升趋势。该工作表明传统磁性材料的低频谐振损耗协同作用结合电阻膜超表面的阻抗匹配改善与谐振损耗增强作用可以实现低频宽带微波吸收效果, 可为后续设计薄层轻质低频宽带强吸收复合材料提供一定的设计参考。

关键词: 微波吸收复合材料; 电阻膜超表面; 低频宽带; 有效吸收带宽; 反射率

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0039-10

Design and properties of low-frequency broadband microwave-absorbing composites loading resistive film metasurface

LI Xueshan¹, LI Yongfeng², LU Haijun¹

(1. AVIC MTI Composite Technology Center, Beijing 101300, China;

2. Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract : In order to achieve low-frequency broadband absorption of two-component laminated structural microwave-absorbing composites in the range of 1-18 GHz and to broaden effective absorption bandgap (EAB), the laminated functional layer of epoxy resin (5224A) composite with aramid woven fabric (100C170) was designed as the impedance matching layer (P1) and the laminated functional layer containing magnetic absorber was designed as the loss layer (P2), respectively, to enhance the 4-18 GHz high-frequency absorption by using P1 functional layer with the characteristics of low permittivity and low permeability, and to realize 1-4 GHz low-frequency resonance absorption by using P2 functional layer with strong electromagnetic loss characteristics, and the introduction of the resistive film metasurface was used to further improve impedance matching and expand high-frequency EAB. The results show that P1 functional layer possesses good impedance matching, and its composite with P2 functional layer is designed as the two-component laminated structural microwave-absorbing composite, which broadens the high-frequency EAB without affecting the low-frequency resonance absorption; the introduction of the resistive film metasurface is able to further improve impedance matching, enhances the electromagnetic resonance loss, expands the high-frequency EAB, and achieves the low-frequency broadband absorption; and the designed composite with loaded metasurface has wide-angle domain absorption in the TM

通信作者: 鹿海军, 博士, 正高级工程师, 研究方向为结构功能一体化复合材料

收稿日期: 2025-05-22

引用格式: 李学山, 李勇峰, 鹿海军. 加载电阻膜超表面的低频宽带微波吸收复合材料的设计与性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 39-48.

LI Xueshan, LI Yongfeng, LU Haijun. Design and properties of low-frequency broadband microwave-absorbing composites loading resistive film metasurface[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 39-48.

polarization mode, with excellent low-frequency broadband absorption at an incidence angle of 60° ; and the measured EAB of the composite with a thickness of 7.4 mm in the range from 1 to 18 GHz expands from 4.49 GHz to 10.07 GHz, and the trend of the measured reflection is consistent with the designed result; and the bending properties of the composite loaded with the resistive film metasurface show a slight improvement trend. This work shows that the low-frequency resonant loss effect of traditional magnetic materials and the impedance matching improvement and resonant loss enhancement of the resistive film metasurface can synergistically achieve the low-frequency broadband microwave absorption effect, which provides certain design references for the subsequent design of thin-layered, lightweight, low frequency and broadband strongly absorbing composites.

Keywords : microwave-absorbing composite ; resistive film metasurface ; low frequency and broadband ; effective absorption bandgap ; reflection

微波吸收材料可以将入射电磁波转化为热能损耗掉,避免电磁波反射、干扰及污染。随着通信设备工作频段的拓宽及微波元器件的智能化、小型化发展,对微波吸收材料的要求是厚度薄、质量轻、吸收频带宽、吸收强度大。传统微波吸收材料通常由微波吸收剂与黏合剂组成,经过特定的匹配与衰减设计,往往能获得一定的吸收效果。相对于介电型微波吸收材料,磁性微波吸收材料具有磁导率高、低频吸收性能较佳等特点。然而受限于材料固有本征参数及物理规律限制^[1-3],较难在较轻的质量下实现薄层宽频强吸收效果。

相对于传统微波吸收材料,电磁微波吸收超材料具有不受 $1/4$ 波长限制、吸收强度大、吸收调控灵活等优点,通过对超材料基本单元的排列方式、种类、形状、周期等进行优化,以目标电磁特性调控为手段,可有效实现微波强吸收效果。喻卫军等^[4]设计了一种基于金属超表面的三频带吸波器,该吸波器可在 5.16, 7.27 GHz 和 8.32 GHz 实现完美吸收;通过 3D 打印超表面导电阵列单元,Zolfaghary 等^[5]设计了在 7.1~13.8 GHz 范围内具有吸收率不低于 90% 的强吸收效果的宽频微波吸收超表面。Saadeldin 等^[6]设计了一种加载集总电阻的电磁微波吸收超表面,该超表面在 14.35~29.18 GHz 的吸收率大于 90%。相比于金属单元超材料,以电阻膜单元设计的超材料的阻抗随频率变化往往比较平缓,经过特定匹配设计,往往能够获得相对较宽的吸收带宽^[7-11]。通过将电阻膜进行结构优化,Zhang 等^[12]设计了一款在 8.3~17.4 GHz 具有 90% 吸收率的超材料。Chen 等^[13]基于面外多层电阻膜叠加方式设计了一款在 4.73~39.04 GHz 范围吸收率不低于 90% 的超材料。上述结果显示,仅依靠多谐振单元匹配吸收的超材料受限于电磁特性限制,其作用频段往往仅体现在较高频段(4~40 GHz),在低频段尤其是

1~2 GHz 难以产生有效吸收效果,且往往结构复杂,制备较难,不利于实际应用与低频宽带(1~18 GHz)吸收效果的实现。

近年来,通过电阻膜超表面与传统微波吸收材料进行复合以提升宽频吸收效果的研究见诸报道^[14-16]。李冬萌^[17]通过将双层电阻膜与磁性吸收材料复合,增加了阻抗匹配频点,有效改善了宽频范围内的吸收带宽,在厚度为 5.5 mm 时的有效吸收带宽(EAB)为 12.1 GHz;孔祥林等^[18]通过结合磁性吸收材料与阻性超表面的损耗特性协同设计,利用四层电阻膜实现在厚度为 24.2 mm 时的 EAB 覆盖 0.33~18 GHz,实现了低频宽带吸收效果。一方面,传统微波吸收复合材料可以提供有效的低频(1~4 GHz)谐振吸收作用;另一方面,电阻膜超表面的引入往往可以改善高频(4~18 GHz)范围的阻抗匹配,提升损耗效果,二者综合作用可实现低频宽带吸收效果。但上述报道的复合结构往往包含多层电阻膜超表面,结构制备复杂,不利于实际应用。为实现 1~18 GHz 范围内的低频宽带强吸收,同时兼顾结构简单与易于制备效果,笔者通过结合磁性材料的低频强吸收作用与电阻膜超表面的高频谐振强吸收效果,以芳纶纤维、环氧树脂、铁磁性吸收剂为原材料,并引入单层电阻膜超表面设计了在 5.4~7.4 mm 厚度范围内具有低频宽带(1~18 GHz)强吸收效果的层合结构微波吸收复合材料,并对特定厚度下的复合材料电磁性能与力学性能进行了分析。

1 实验部分

1.1 主要原材料

芳纶织物:100C170,四经缎纹,内蒙古航天河西科技有限公司;

环氧树脂:5224A,采用 4,4'-二氨基二苯砒作为固化剂,北京中航复合材料有限责任公司;

铁磁性吸收剂:SH,安徽璜峪电磁技术有限

公司;

FR-4环氧板:厚度为0.1 mm,介电常数(ϵ_r)为4.5、介电损耗角正切($\tan\delta$)为0.025,弯曲强度为540 MPa,咸阳华新电子材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

矢量网络分析仪:N5234B,10 MHz~43.5 GHz,美国安捷伦科技有限公司;

电子万能试验机:Zwick Z010,ZwickRoell(德国)集团。

1.3 电阻膜超表面的制备

电阻膜超表面采用丝网印刷的制备工艺,其中超表面衬底采用FR-4环氧板材料,采用导电碳浆制备电阻膜单元,电阻膜单元方阻值为50 $\Omega/\square$,将导电碳浆印刷在厚度为0.1 mm的FR-4衬底上,经固化后得到电阻膜超表面,固化工艺参数为120 $^{\circ}\text{C}$ 下保温80 min。

1.4 芳纶纤维增强环氧树脂基复合材料的制备

利用热熔预浸料经热压罐固化制备复合材料。将树脂5224A与吸收剂SH按照设计好的比例混合,涂膜制备成热熔胶膜,后通过胶膜与芳纶纤维布100C170复合制备预浸料,其中P1型功能层预浸料中的树脂与芳纶纤维布的质量比为50:50,P2型功能层预浸料中的树脂、芳纶纤维布与吸收剂的质量比为20:20:60;制备含有电阻膜超表面的复合材料时,按照铺叠顺序依次铺叠P1型功能层预浸料、电阻膜单元、P1型功能层预浸料、P2型功能层预浸料,后经过热压罐成型固化,复合材料热压罐成型固化工艺参数为:真空度 ≤ -0.095 MPa,室温升至130 $^{\circ}\text{C}$,恒温30 min,加压至0.6 MPa;升温至180 $^{\circ}\text{C}$,恒温3 h。固化后根据测试需求进一步剪裁得到所需尺寸的芳纶纤维增强环氧树脂基复合材料,制备工艺流程图如图1所示。

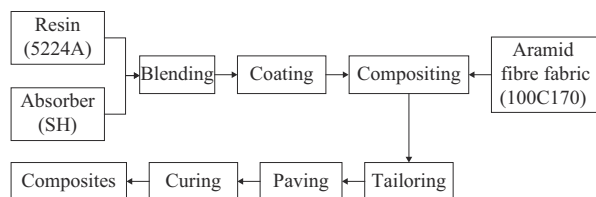


图1 芳纶纤维增强环氧树脂基复合材料的制备工艺流程图

Fig. 1 Preparation process flow diagram of aramid fiber reinforced epoxy resin matrix composites

1.5 测试与表征

(1)电磁参数测试。根据电子行业标准《微波大损耗固体材料复介电常数和复磁导率测试方法》

(SJ 20512-1995)中矩形波导传输线测试方法进行测试,使用矢量网络分析仪测试复合材料在1~18 GHz的电磁参数。

(2)反射率测试。根据军用标准《雷达吸波材料反射率测试方法》(GJB 2038A-2011),采用弓形法完成测试,发射天线入射角、接收天线反射角均为8 $^{\circ}$ 。

(3)弯曲性能测试。按照标准ASTM D 790-2017,跨厚比16:1,测试过程中的横梁移动速率(R)计算公式见式(1)。

$$R=0.01L^2/6d \quad (1)$$

式中: R 为横梁移动速率;0.01为外层层纤维的应变率; L 为复合材料跨距; d 为复合材料厚度,性能测试结果取5个有效试样计算平均值。

(4)层间剪切性能测试。按照ASTM D 2344-2022测试,横梁移动速率为1 mm/min,跨厚比4:1,性能测试结果取5个有效试样计算平均值。

(5)反射率、散射参数及场分布仿真。采用ANSYS HFSS专业电磁仿真软件完成。

2 结果与讨论

2.1 层合吸波功能层及其复合材料的设计与表征

层合结构微波吸收复合材料的设计遵循阻抗匹配原则,采用电磁参数与结构参数调节的阻抗梯度渐变设计可以实现微波吸收复合材料的阻抗匹配,使得更多的电磁波进入材料内部从而被损耗掉。鉴于此,分别设计了以环氧树脂5224A与芳纶机织物100C170复合的层合功能层作为阻抗匹配功能层(P1),内含磁性吸收剂SH的层合功能层做为损耗功能层(P2),进行层合结构的性能设计。两种功能层的电磁特性如图2所示,图2a和图2b显示P1与P2的介电常数实部(ϵ')分别为3.5~3.8与29~33,虚部(ϵ'')分别为0.04~0.07与1.21~1.86,P2的介电常数远高于P1;对于介电损耗角正切($\tan\delta$),P2(0.04~0.06)高于P1(0.01~0.02);P2的磁导率实部(μ')、虚部(μ'')、磁损耗角正切($\tan\mu$)均呈现一定的磁损耗特征,表明P2功能层兼具电损耗与磁损耗特性。特征阻抗曲线表明P1的特征阻抗模值($|Z_0|$)在1~18 GHz范围内接近于自由空间阻抗($|Z_0|=1$),从而有利于与自由空间的阻抗匹配。

单独P2功能层随厚度变化的反射率仿真曲线如图3a所示,厚度从1.32 mm增加到4.08 mm时,谐振损耗峰向低频移动,由7.95 GHz移到1.90 GHz;且吸收峰强度呈现增加趋势,峰值由-9.05 dB增加

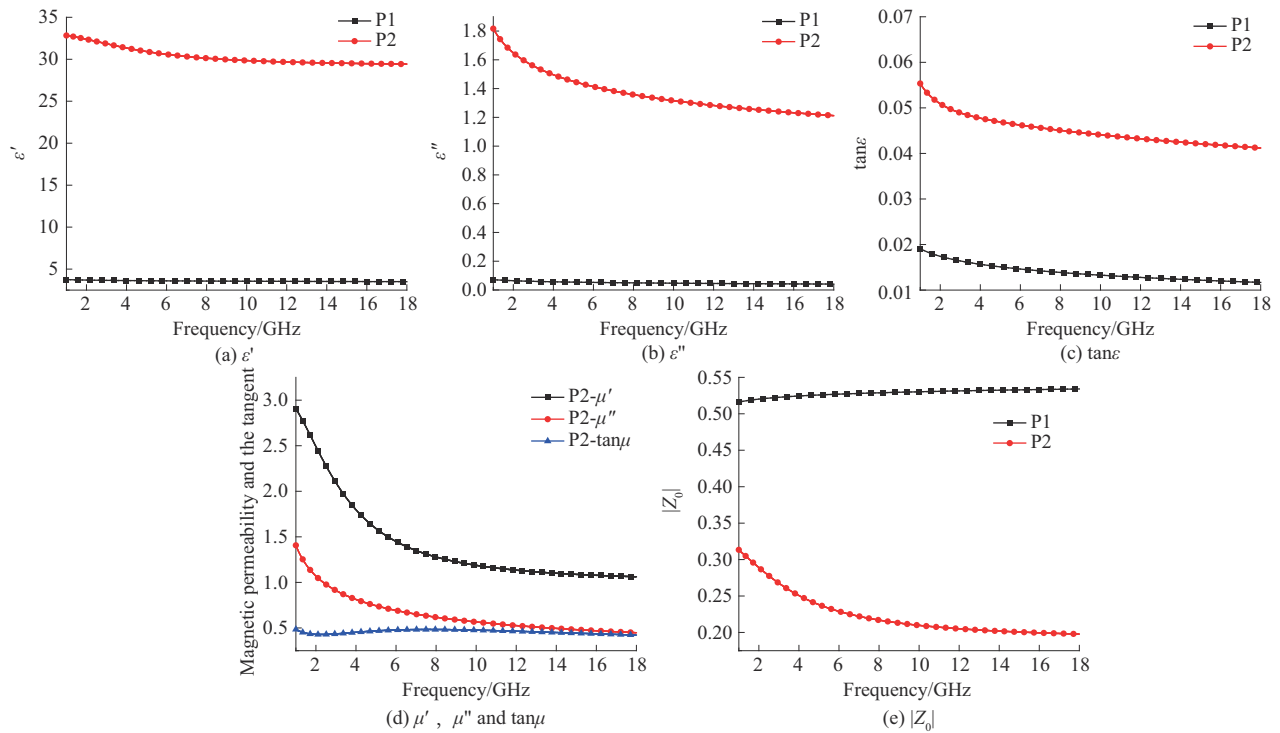


图2 电磁参数、损耗角正切与特征阻抗随频率变化曲线

Fig. 2 Change curves of electromagnetic parameters, loss tangent and characteristic impedance with frequency

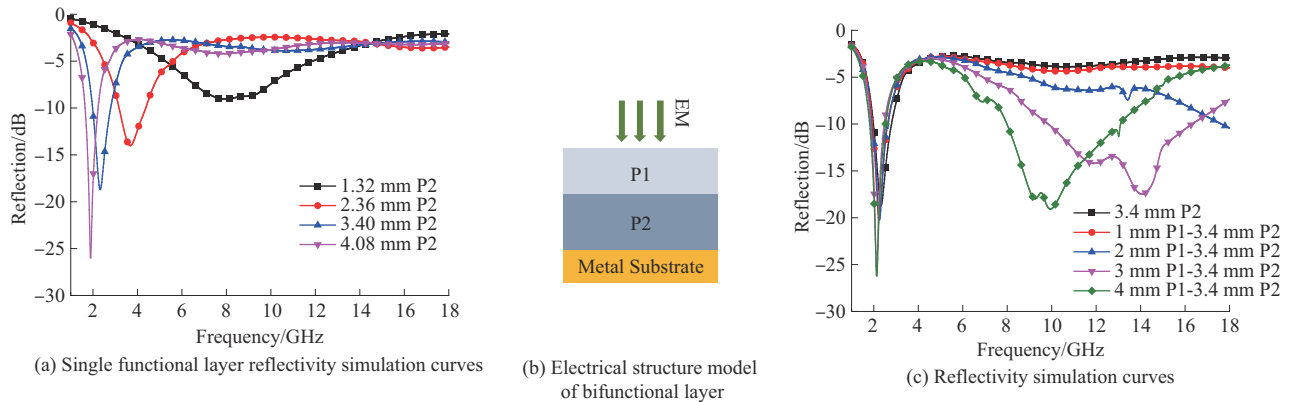


图3 单功能层反射率仿真曲线、双功能层电结构模型及其反射率仿真曲线

Fig. 3 Reflectivity simulation curve of single functional layer, electrical structure model of double functional layer and its reflectivity

到-25.97 dB;吸收峰宽度随厚度的增加而逐渐降低。可以看到,单一P2功能层受限于电磁特性限制,往往仅在低频范围内具有谐振吸收效果,较难在低厚度范围内同时兼顾强吸收与宽EAB。为提升阻抗匹配,改善材料4~18 GHz范围内的EAB (EAB_H),拟利用低介电与低磁导率特性的P1功能层作为阻抗匹配层,兼具电磁损耗特性的P2功能层作为损耗层,进行双组分层合结构微波吸收复合材料的设计,双组分层合结构的电结构模型如图3b所示,固定P2功能层厚度为3.4 mm时,改变P1功能层厚度的反射率仿真曲线如图3c所示,不同厚度组合

的(单)双组分复合材料的吸收性能统计见表1,可见相比单一P2功能层反射率,加入P1阻抗匹配功能层能够有效改善微波吸收复合材料的高频吸收效

表1 不同厚度组合的(单)双组分复合材料的吸收性能统计

Tab. 1 Statistics on the absorption characteristic of (single) two-component composites with combinations of different thicknesses

Types of composites	EAB_L /GHz	EAB_H /GHz	Total EAB/GHz
3.4 mm P2	0.81		0.81
1 mm P1-3.4 mm P2	0.69		0.69
2 mm P1-3.4 mm P2	0.75	0.37	1.12
3 mm P1-3.4 mm P2	0.61	6.48	7.09
4 mm P1-3.4 mm P2	0.72	5.11	5.83

Notes: EAB_L is EAB of 1~4 GHz, EAB_H is EAB of 4~18 GHz.

果,高频范围内的吸收强度呈现明显增加趋势,随着P1功能层厚度增加,高频谐振吸收峰逐渐出现且强度呈现增加趋势,当P1厚度分别为2,3 mm与4 mm时,材料在高频段(4~18 GHz)范围内的 EAB_H 分别为0.37,6.48,5.11 GHz,同时基本未影响1~4 GHz范围内的低频EAB(EAB_L)与谐振吸收效果。

2.2 含电阻膜超材料单元复合材料的结构设计及关联参数分析

由上文所述可知,阻抗匹配功能层的加入能够提升层合结构微波吸收复合材料在4~18 GHz范围的吸收强度,拓展高频EAB,但提升效果有限,特别是当引入的透波匹配功能层厚度较低(2 mm)时,吸收强度的提升幅度不能达到EAB拓宽的效果。因此,为进一步提升双功能层复合材料的吸收效果,拟引入电阻膜超表面,以期改善阻抗匹配,增强损耗效果,同时与P2电磁损耗功能层共同发挥协同作用,达到多机制多频带协同损耗,获得具有低频宽带吸收效果的微波吸收复合材料。

拟引入的电阻膜超表面为方形单元周期结构,固定电阻膜单元的方阻值为 $50 \Omega/\square$,拟通过改变方形单元结构的周期(p)、单元边长(s)及其在透波功能层P1中的插入深度(t)来优化双组分功能层层合结构的微波吸收性能,超表面、层合结构及其复合示意图如图4所示。

以最大 EAB_H 为优化目标,通过在电磁仿真软件中建立相应等效物理模型并求解,固定P2层厚度

为3.4 mm,P1层厚度分别为2,3 mm与4 mm,复合材料的最终优化后的结构参数见表2,优化后的反射率曲线如图5所示。可以看出,相比于不含电阻膜单元的层合结构复合材料,加载电阻膜单元后的复合材料在基本未影响1~4 GHz范围吸收的情况下,在4~18 GHz范围的整体吸收效果得到巨大提升, EAB_H 得到了明显拓宽,对于厚度为5.4 mm的复合材料,4~18 GHz范围内的 EAB_H 由0.37 GHz拓宽到7.43 GHz,厚度为6.4 mm与7.4 mm复合材料的 EAB_H 分别由6.48 GHz与5.11 GHz拓展到9.74 GHz与10.6 GHz,上述结果表明电阻膜超表面单元的引入可以显著提升层合结构微波吸收复合材料在高频范围内的吸收效果,同时基本未影响低频吸收性能。

表2 加载超表面复合材料的结构参数信息统计表

Tab. 2 Structural parameter information sheet of composites

loading metasurfaces			
Thickness/mm	p /mm	s /mm	t /mm
5.4	8.00	3.20	2.00
6.4	14.0	5.60	3.00
7.4	10.0	5.00	2.25

Notes: p is the period of metasurface, s is the edge length of metasurface, and t is the inserted thickness of metasurface.

超表面结构单元的周期、尺寸及电阻膜方阻值会对复合材料整体吸收强度、吸收范围产生一定影响,在复合材料P1与P2功能层厚度固定的情况下,进一步对上述影响超表面单元复合材料吸收性能的单元周期(p)、电阻膜边长(s)及电阻膜方阻(R_s)进行了变参分析。如图6a所示,当超表面单元周期由6 mm逐渐增加时,8~18 GHz范围内的吸收曲线整体下降,周期增加到10 mm时在8~12 GHz与12~18 GHz范围内各出现一个谐振吸收峰,周期进一步增加,两个谐振峰融合为1个,峰值强度进一步增加,对应频点移向低频,在周期为10 mm时产生最大的 EAB_H 。位于8~12 GHz范围内的吸收峰强度逐渐增加,8~18 GHz范围内的EAB逐渐增加,当单元周期增加到10 mm时,在8~12 GHz范围的吸收峰强度进一步增加,同时在12~18 GHz出现一个损耗吸收峰,此时 EAB_H 达到10.60 GHz,随单元周期进一步增加至12mm,两个吸收峰融合为一个在12~18 GHz范围的吸收峰,周期增加到14 mm,吸收峰移到8~12 GHz范围,吸收峰强度进一步增加。图6b显示在单元周期与方阻值固定的情况下,随电阻膜边长由3 mm增加到5 mm,8~12 GHz频段吸收峰强度逐渐降低,吸收峰位置移向低频,12~18 GHz频

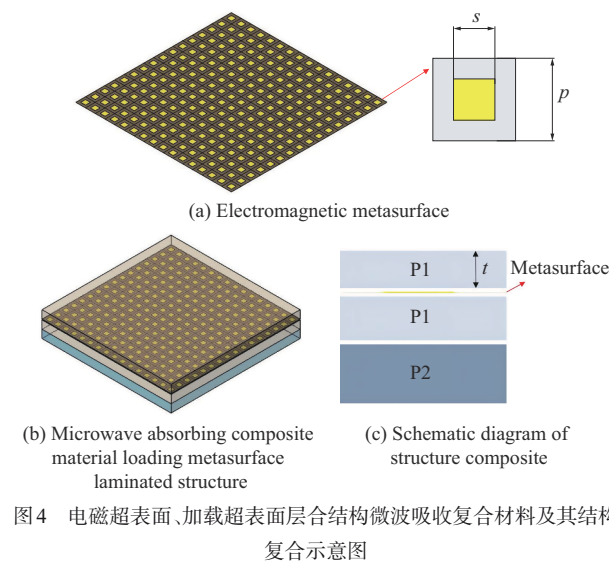


图4 电磁超表面、加载超表面层合结构微波吸收复合材料及其结构复合示意图

Fig. 4 Electromagnetic metasurface, microwave absorbing composite material loading metasurface laminated structure and structure composite schematic diagram

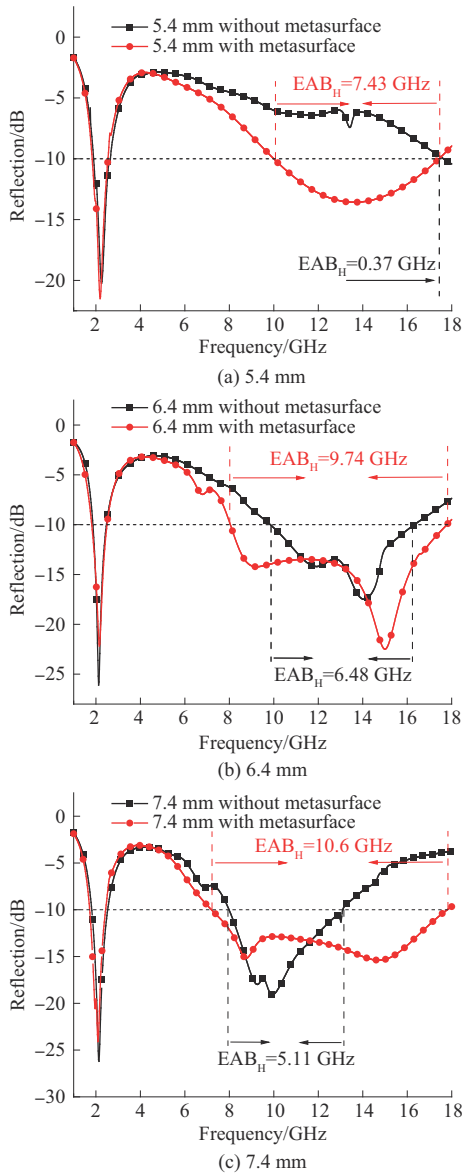


图5 不同厚度复合材料在加载超表面前后的反射率仿真曲线

Fig. 5 Reflectivity simulation curves of composites with different thicknesses before and after loading metasurfaces

段吸收峰强度逐渐增大,在边长为5 mm时出现较明显的吸收峰;进一步增加电阻膜边长,8~12 GHz频段吸收峰消失,12~18 GHz频段吸收峰进一步移向高频,吸收强度整体降低,在边长为5 mm时得到最大 EAB_H 。如图6c所示,随电阻膜方阻值由10 $\Omega/\square$ 逐渐增大到90 $\Omega/\square$,高频8~18 GHz范围的吸收峰强度呈现先降低后增加的趋势,8~12 GHz频段吸收峰移向高频,12~18 GHz频段吸收峰移向低频,方阻值增大到90 $\Omega/\square$ 时两个高频吸收峰逐渐融合成一个宽频吸收峰,从而导致 EAB_H 先增大后降低,在方阻值为50 $\Omega/\square$ 时有最大 EAB_H 。上述结果表明,电阻膜超表面的引入对复合材料的低频吸收效果

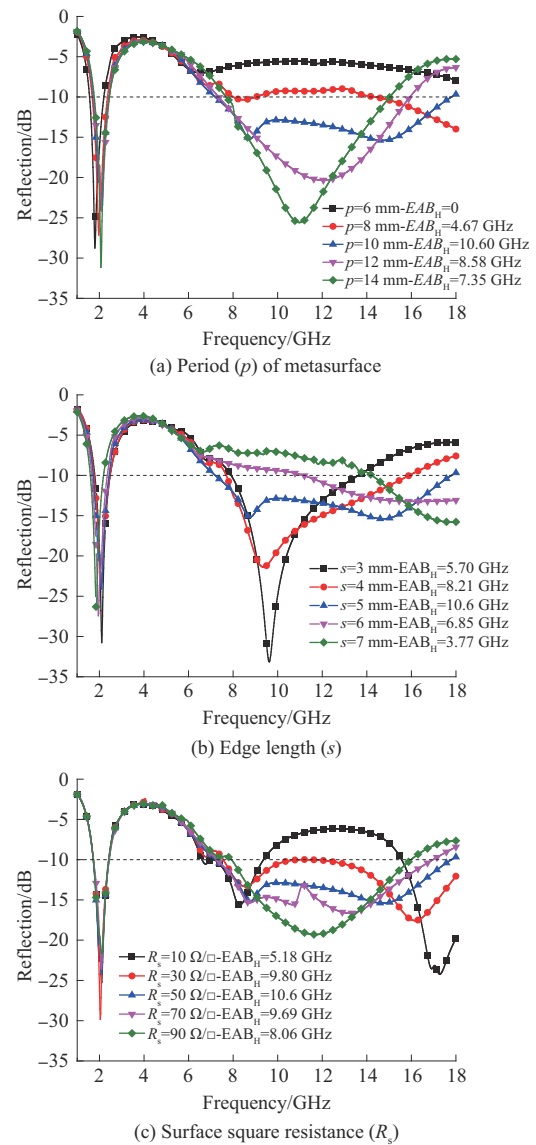


图6 超表面单元周期(p)、电阻膜边长(s)及电阻膜方阻(R_s)分别改变时的反射率仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of reflection with the respectively change of period (p), edge length (s) of resistive film and square resistance (R_s) of resistive film

影响较小,单元周期、电阻膜边长与电阻膜方阻共同影响复合材料在高频范围的吸收峰强度、位置、数量,从而决定 EAB_H 的拓宽程度。

2.3 含电阻膜超材料单元复合材料阻抗匹配及微波损耗机制分析

以厚度为7.4 mm的微波吸收复合材料为例,从微波传输线角度解释带宽拓展机理,加载超表面复合材料的等效电路模型如图7a所示,其中电阻膜超表面等效为RLC电路,且与底层P1功能层、中间层P1层与顶层P1层呈并联关系, d_1, d_2 与 d_3 分别为顶层P1功能层、中间层P1功能层及底层P2功能层的

厚度, Z_0 为对应功能层的特征阻抗, R, L, C 分别代表电阻膜超表面的等效电阻、等效电感、等效电容。以等效均质理论为原则, 采用反演法^[19], 利用仿真得到的散射参数 S_{11} 与 S_{21} 推导微波吸收复合材料的输入阻抗(Z_{in})计算公式见式(2)。

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2)$$

引入超表面前后复合材料的归一化输入阻抗实部 [$\text{Re}(Z_{in})$] 与虚部 [$\text{Im}(Z_{in})$] 随频率变化曲线分别如图 7b 与图 7c 所示, 可见未加载电阻膜单元复合材料其 $\text{Re}(Z_{in})$ 随频率变化出现较大波动, 加载电阻膜超表面单元后, 在 4~18 GHz 整体范围内曲线呈现平缓趋势且均接近自由空间阻抗实部 [$\text{Re}(Z_{in})=1$]; 加载超表面单元复合材料的 $\text{Im}(Z_{in})$ 在高频范围内虚部波动趋势变小, 且整体更加趋近于自由空间阻抗虚部 [$\text{Im}(Z_{in})=0$]。综上所述, 超表面的引入在几乎未影响 1~4 GHz 阻抗情况下, 极大改善了复合材料在 4~18 GHz 与自由空间的阻抗匹配, 从而有效拓宽了 EAB_H。

为了阐明电阻膜超材料单元的引入对吸收效果提升的机理, 利用电磁仿真软件模拟对比层合结构微波吸收复合材料在加载电阻膜超表面单元前后的电场、磁场、表面电流及其功率损耗密度分布。根据高低频范围内的反射损耗峰值, 选择 2.17 GHz 与 9.77 GHz 作为未加载超表面复合材料的研究频点, 选择 2.09 GHz 与 14.72 GHz 作为复合超表面后的研究频点。如图 8a 所示, 未加载超表面复合材料在 2.17 GHz 与 9.77 GHz 点处的整体电场强度较低, 沿厚度方向由底层向顶层呈现渐变增加趋势; 图 8b 显示加载超表面后的复合材料在 2.09 GHz 与 14.72 GHz 频点下的电场强度整体提升, 且电场强度最大位置均出现在超表面单元对侧附近, 表明超表面的引入提升了整体结构的电场强度, 并引起了电场的大量集中。

对比损耗峰处的磁场(图 8c 与图 8d), 低频损耗峰处的磁场强度在复合超表面前后变化较小, 且磁场强度最大值均在 P2 层下表面位置处, 未加载超表面材料的高频损耗峰对应的磁场强度最大值均出现在 P2 与 P1 层界面处, 加载超表面后的高频损耗峰对应的磁场强度整体提升, 且最大值出现在超表面单元对侧附近, 表明超表面的引入提升了高频损耗峰位置处的磁场强度, 且使得磁场聚集在超表面

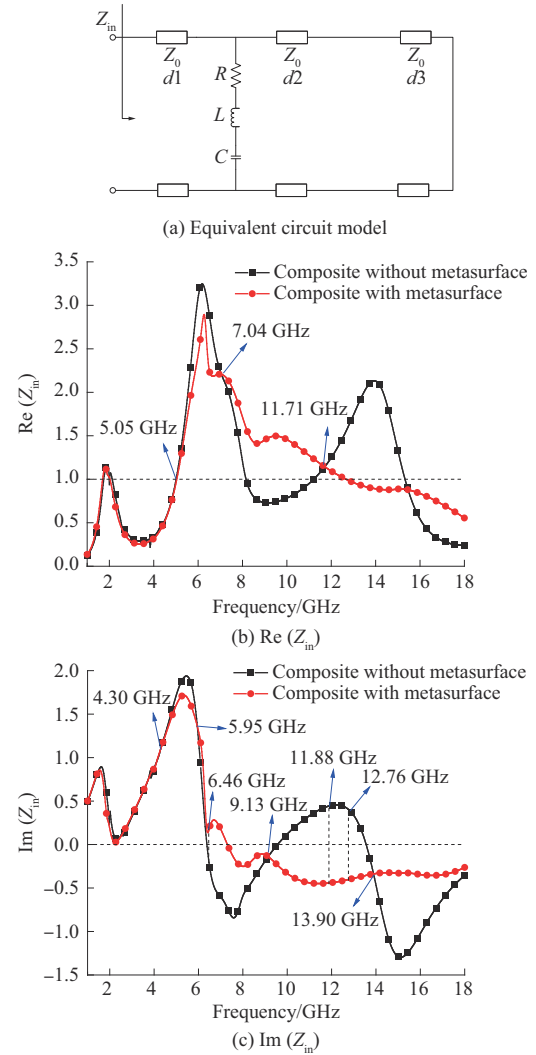


图7 加载超表面复合材料的等效电路模型及其复合材料在加载超表面单元前后的阻抗

Fig. 7 Equivalent circuit model of composite with metasurface and impedance of composites before and after loading metasurface

单元附近。

对比表面电流分布可知, 图 8e 显示未加载超表面复合材料的损耗峰对应的表面电流均主要分布在底层附近; 加载超表面后(图 8f), 低频损耗峰对应的表面电流最大值仍出现在底层附近, 表面电流强度未发生明显变化, 高频损耗峰对应的表面电流的最大值出现在超表面单元对侧, 且电流强度得到了明显提高, 其方向与底层表面电流方向一致, 有利于产生额外电谐振。

功率损耗分布(图 8g 与图 8h)表明低频损耗峰对应的功率损耗密度在加载超表面前后变化较小, 且最大值均出现在底层, 高频损耗峰对应的功率损耗密度在加载超表面后得到了提升, 且功率损耗密度的最大值出现在 P1 与 P2 界面处。

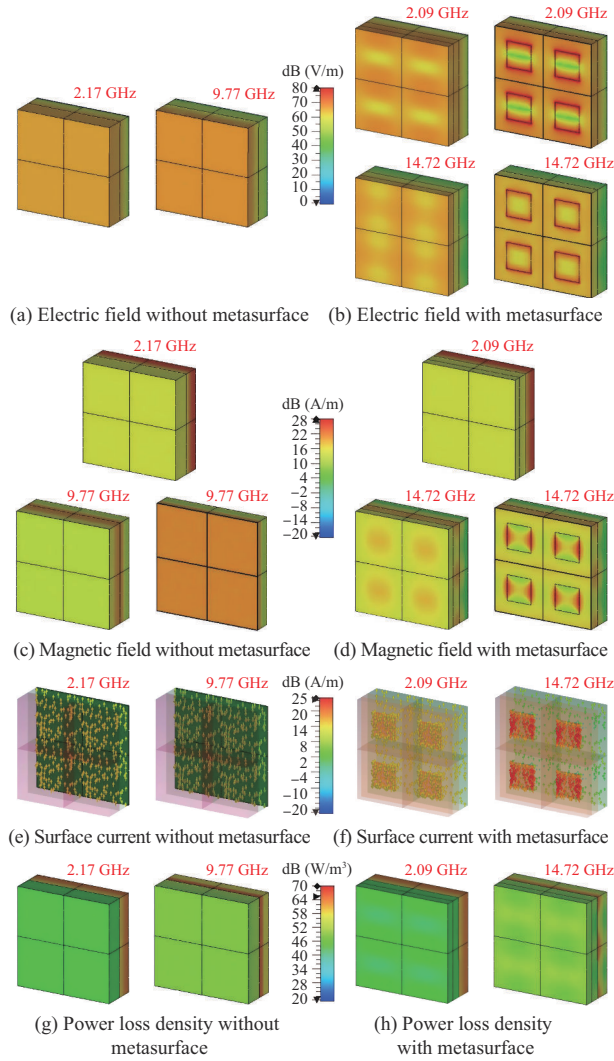


图8 厚度为7.4 mm复合材料在低频与高频峰值频段处加载超表面前后的电磁特性分布示意图

Fig. 8 Electromagnetic effect property distribution of composite with a thickness of 7.4 mm before and after loading metasurface at low-frequency and high-frequency peak frequency points

2.4 斜入射及极化特性分析

微波吸收复合材料在实际应用过程中,电磁波会以斜入射及不同极化方式入射,因此有必要对微波吸收复合材料的斜入射及极化响应特性进行分析。仿真了TE极化(入射波电场矢量与入射面垂直)与TM极化(入射波电场矢量与入射面平行)方式下不同入射角度下的吸收曲线,如图9a所示,TE极化模式下,随入射角增大,吸收曲线整体上移,吸收效果整体下降,入射角增加到60°时其 EAB_H 变为0。TM极化模式下,当入射角逐渐增大到45°时,4~18 GHz范围内的吸收曲线整体下移,吸收强度整体增加, EAB_H 逐渐增大;当继续增加到60°,高频范围内的 EAB_H 继续增大,7~18 GHz范围内的吸收强度下降;

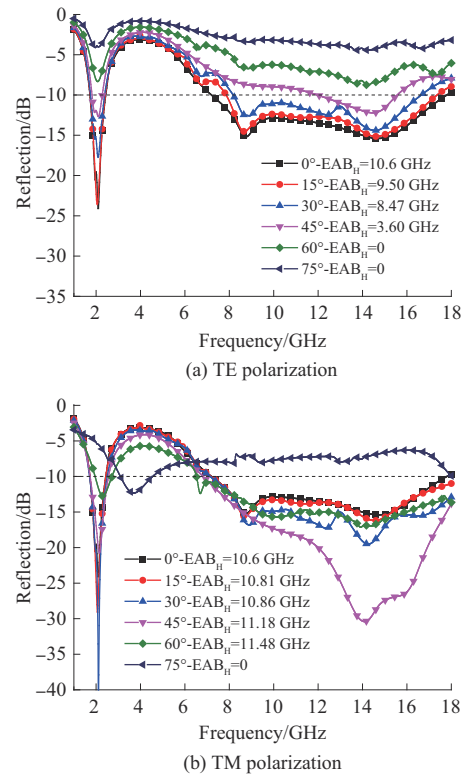


图9 加载超表面复合材料在不同极化电磁波随入射角度变化的反射率仿真曲线

Fig. 9 Simulation curves of reflection for composite with metasurface under electromagnetic wave incidence varying with incident angle with different polarization

继续增大到75°时,6~18 GHz范围的吸收强度进一步降低, EAB_H 消失。TE与TM极化模式下的吸收性能随入射角变化的差异来自阻抗匹配的差异,斜入射下TE极化与TM极化模式下的自由空间阻抗^[20-21]分别见式(3)和式(4)。

$$Z_{TE} = Z_0 / \cos\theta \quad (3)$$

$$Z_{TM} = Z_0 \times \cos\theta \quad (4)$$

式中: Z_{TE} 与 Z_{TM} 分别为TE极化与TM极化模式下的自由空间阻抗; θ 为入射角。

复合材料的特征阻抗模值 $|Z_0|$ 往往小于1,因此,当 θ 增加时, $\cos\theta$ 降低, Z_{TE} 增大,其与复合材料的阻抗匹配性逐渐变差,从而进一步突出和复合材料的阻抗失配,导致微波吸收性能降低; θ 增加导致 Z_{TM} 逐渐降低,因此在一定入射角范围内与复合材料的阻抗匹配性变优,超过一定入射角后 Z_{TM} 进一步降低,阻抗匹配性逐渐变差,因此其微波吸收性能呈现先增加后降低的趋势。整体而言,该微波吸收复合材料在TM极化下具有良好的斜入射吸收性能,其在60°大角度入射时仍具有优异的吸收特性。

2.5 微波吸收复合材料的吸收性能验证

为了验证上述设计结果的有效性,基于优化的结构参数,对加载电阻膜超表面前后的厚度为7.4 mm的复合材料进行了实测反射率验证,制备的电阻膜及其复合材料如图10所示,参照GJB 2038A-2011标准,采用弓形法对制备的复合材料进行了反射率测试,测试结果如图11所示,可见对于加载超表面前后的复合材料,实测EAB_{ii}由4.03 GHz拓展到9.57 GHz,1~18 GHz范围内的实测EAB由4.49 GHz拓展到10.07 GHz,实测曲线与设计曲线在部分频段呈现良好的一致性,两者的不一致可能来源于电阻膜超表面的加工误差、功能层的制备误差、电磁参数测试误差及边缘绕射误差。

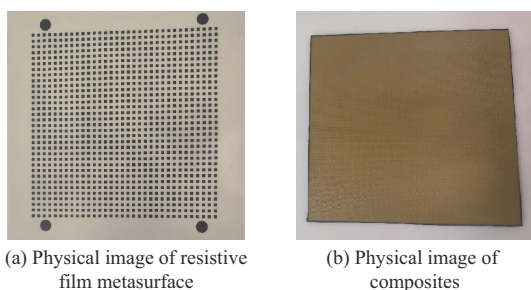
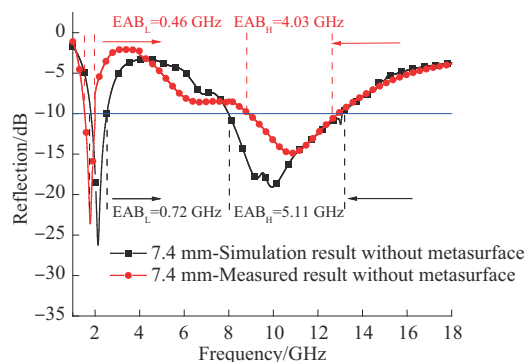
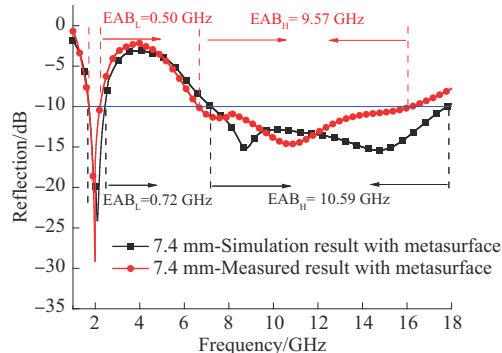


图10 电阻膜超表面与复合材料实物图

Fig. 10 Physical images of resistive film metasurface and composites



(a) Reflectivity curves of composites before loading metasurface



(b) Reflectivity curves of composites after loading metasurface

图11 加载超表面前后的实测与仿真反射率曲线

Fig. 11 Curves of designed and measured reflection before and after loading metasurface

2.6 微波吸收复合材料的力学性能表征

为探究电阻膜加载对复合材料力学性能的影响,对厚度为7.4 mm的复合材料在加载超表面前后的力学性能进行了表征与分析,分别测试了两种材料的弯曲与层间剪切性能。测试结果见表3,加载电阻膜超表面前后的弯曲强度分别为387 MPa与400 MPa,加载电阻膜前后弯曲的最大破坏载荷($F_{\max}$)分别为1 599 N与1 717 N;层间剪切强度在加载电阻膜超表面前后相当,分别为40 MPa与38.9 MPa,加载电阻膜超表面前后的层间剪切 $F_{\max}$ 相当,分别为6 225 N与6 218 N。上述力学性能测试结果表明设计的微波吸收复合材料在加载电阻膜超表面后弯曲性能得到轻微提升,这是由于应用的FR-4面板自身弯曲强度为540 MPa,高于设计的微波吸收复合材料的弯曲强度(387 MPa),且环氧玻璃板的弯曲刚度高于芳纶纤维复合材料^[22-23],当将其放置于设计的芳纶纤维增强复合材料中间时,坚硬的FR-4能够承受较大的拉伸应力,限制材料的变形,能够为下方的芳纶层提供更好的支撑和约束,提高复合材料抵抗压缩微屈曲和剪切破坏的能力。因此当厚度为0.1 mm的FR-4放置于功能层之间时,整体复合材料的弯曲性能得到了轻微提升。

表3 微波吸收复合材料力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of microwave-absorbing composites

Test items	Composite without metasurface	Composite with metasurface
Bending strength/MPa	387	400
Bending $F_{\max}$ /N	1 599	1 717
Interlaminar shear strength/MPa	40	38.9
Interlaminar shear $F_{\max}$ /N	6 225	6 218

Note: $F_{\max}$ is maximum destructive force.

3 结论

(1)以芳纶纤维织物100C170为增强相,环氧树脂5224A为基体,金属微粉SH为吸收剂,设计并制备了芳纶纤维增强环氧树脂基功能层,P1功能层具有良好的阻抗匹配特性,P2功能层具有强电磁损耗特性。

(2)以P1功能层与P2功能层分别作为阻抗匹配层与损耗层,设计了双组分层合结构微波吸收复合材料,相对于单独P2功能层,这种双组分层合结构改善了4~18 GHz高频范围内的阻抗匹配,提升了EAB_{ii}。

(3)二维电阻膜超表面的引入可以进一步提升双组分层合结构微波吸收复合材料在4~18 GHz范围内的阻抗匹配效果,有效拓宽EAB_{ii},厚度分别为

5.4, 6.4 mm 与 7.4 mm 复合材料的仿真 EAB_H 分别由 0.37, 6.48 GHz 与 5.11 GHz 拓展到 7.43, 9.74 GHz 与 10.6 GHz, 同时基本未影响低频谐振损耗效果。电阻膜超表面的单元周期、边长及其方阻值共同影响复合材料的吸波效果; 加载电阻膜超表面复合材料在 TM 极化模式下具备宽角域吸收特性, 在 60° 入射角下仍具有优异低频宽带吸收特性; 厚度为 7.4 mm 复合材料的实测反射率与仿真反射率具有较强的 consistency, 实测 EAB_H 由 4.03 GHz 拓展到 9.57 GHz, 1~18 GHz 范围内的实测 EAB 由 4.49 GHz 拓展到 10.07 GHz。

(4) 力学性能测试结果显示微波吸收复合材料在加载电阻膜超表面后层间剪切性能相当, 弯曲性能得到轻微提升。

上述结果表明, 利用电阻膜超表面在高频段范围内的阻抗匹配改善作用与磁性微波吸收复合材料的低频损耗作用, 将这两者协同结合设计的微波吸收复合材料在 1~18 GHz 低频宽带范围内可实现优异吸波效果, 这为后续设计薄层轻质低频宽带强吸收微波吸收复合材料提供一定的参考。

参考文献

- [1] ACHER O, ADENOT A L. Bounds on the dynamic properties of magnetic materials[J]. *Physical Review B*, 2000, 62(17): 11 324–11 327.
- [2] ACHER O, DUBOURG S. Generalization of Snoek's law to ferromagnetic films and composites[J]. *Physical Review B*, 2008, 77(10). DOI:10.1103/PhysRevB.77.104440.
- [3] SNOEK J L. Gyromagnetic resonance in ferrites[J]. *Nature*, 1947, 160. DOI:10.1038/160090a0.
- [4] 喻卫军, 盛子腾, 张易成, 等. 基于超表面的三频带吸波器[J]. *光电子·激光*, 2024, 35(12): 1 233–1 239.
YU Weijun, SHENG Ziteng, ZHANG Yicheng, et al. Tri-band absorber based on metasurface[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2024, 35(12): 1 233–1 239.
- [5] ZOLFAGHARY POUR S, CHEGINI E, MIGHANI M. Design of wideband metamaterial absorber using circuit theory for X-band applications[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2023, 17(4): 292–300.
- [6] SAADELDIN A S, SAYED A M, AMR A M, et al. Broadband polarization insensitive metamaterial absorber[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, 55(7). DOI: 10.1007/s11082-023-04881-y.
- [7] 黄栩静, 万国宾. 一种新型宽带电阻膜吸波体设计[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(2): 78–83.
HUANG Xujing, WAN Guobin. Design of novel broadband absorber based on resistive film[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(2): 78–83.
- [8] 张鑫, 戴银所, 房建国, 等. 基于电阻膜的双层宽频电磁超材料吸波器仿真及分析[J]. *电子技术与软件工程*, 2021(21): 59–63.
ZHANG Xin, DAI Yinsuo, FANG Jianguo, et al. Simulation and analysis of double-layer broadband electromagnetic metamaterial absorber based on resistive film[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2021(21): 59–63.
- [9] 王超, 李绣峰, 张生俊, 等. 基于遗传算法的宽带渐变电阻膜超材料吸波器设计[J]. *物理学报*, 2024, 73(7): 117–127.
WANG Chao, LI Xiufeng, ZHANG Shengjun, et al. Design of broadband gradient resistive film metamaterial absorber based on genetic algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(7): 117–127.
- [10] 孔祥林, 马洪宇, 陈鹏, 等. 基于电阻膜的超宽带超材料吸波体设计[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(6): 947–952.
KONG Xianglin, MA Hongyu, CHEN Peng, et al. Design of ultra-wideband metamaterial absorber based on resistance films[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(6): 947–952.
- [11] 杨佳蓬, 逯景桐, 张帅, 等. 基于电阻膜的宽带超材料吸波体设计[J]. *电子元件与材料*, 2024, 43(2): 176–181.
YANG Jiapeng, LU Jingtong, ZHANG Shuai, et al. Design of wideband metamaterial absorber based on resistive film[J]. *Electronic Components and Materials*, 2024, 43(2): 176–181.
- [12] ZHANG C, CHENG Q, YANG J, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(14). DOI:10.1063/1.4979543.
- [13] CHEN P, KONG X L, HAN J F, et al. Wide-angle ultra-broadband metamaterial absorber with polarization-insensitive characteristics[J]. *Chinese Physics Letters*, 2021, 38(2). DOI: 10.1088/0256-307X/38/2/027801.
- [14] 郭飞, 杜红亮, 屈绍波, 等. 基于磁/电介质混合型基体的宽带超材料吸波体的设计与制备[J]. *物理学报*, 2015, 64(7): 354–359.
GUO Fei, DU Hongliang, QU Shaobo, et al. Design and fabrication of a broadband metamaterial absorber based on a dielectric and magnetic hybrid substrate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(7): 354–359.
- [15] 李泽, 孙海涛, 程兆刚, 等. 基于双磁介质层复合的超材料低频吸波体研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(1): 398–402.
LI Ze, SUN Haitao, CHENG Zhaogang, et al. Research on low frequency metamaterial absorber based on double magnetic dielectric layer composite[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(1): 398–402.
- [16] 李泽, 赵芳, 王建江, 等. 基于超材料设计的羰基铁低频复合吸波涂层研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(11): 3 628–3 633.
LI Ze, ZHAO Fang, WANG Jianjiang, et al. Carbonyl iron composite microwave absorbing coating based on metamaterial design[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(11): 3 628–3 633.
- [17] 李冬萌. 阻抗匹配调控与宽带复合吸波材料研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
LI Dongmeng. Impedance matching regulation and research on broadband composite absorbing materials[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.