

石英纤维增强环氧树脂基复合材料的微波吸收设计

李学山¹, 礼嵩明¹, 李勇峰², 黄浩¹, 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: **目的** 实现石英纤维增强环氧树脂基复合材料在低厚度 (2~4 mm) 下的宽频微波吸收, 拓展有效吸收带宽 (Effective Absorption Bandgap, EAB)。**方法** 基于阻抗匹配与衰减特性设计出石英纤维增强环氧树脂基功能层及其微波吸收复合材料, 并利用超表面的电磁谐振增强作用进一步提升 EAB。**结果** F1 功能层具有良好的阻抗匹配特性与高频谐振特性, F2 功能层具有强损耗与低频谐振特性; 以 F1 与 F2 分别为阻抗匹配层与损耗层, 设计出的厚度为 2.04 mm 的微波吸收复合材料在 8.80~16.95 GHz 具有 ≤ -10 dB 的反射率 (Reflection, R), EAB 为 8.15 GHz, 厚度分别为 3.06 mm 与 4.08 mm 的微波吸收复合材料也具有良好的宽带吸收性能; 超表面的引入能够改善宽频范围内的阻抗匹配, 增强微波吸收复合材料的电磁谐振损耗, 从而拓展复合材料的 EAB, 厚度为 3.06 mm 的复合材料的实测 EAB 由 5.69 GHz 拓展到 10.34 GHz, 且实测反射率变化趋势与设计结果具有一致性, 加载超表面后复合材料的力学强度保持率 $>96\%$ 。**结论** 传统材料的微波吸收机制与超表面的阻抗匹配改善与谐振增强机制相结合可以进一步提升复合材料的微波吸收性能, 为后续复合材料的高效微波吸收设计提供一定的参考。

关键词: 微波吸收复合材料; 有效吸收带宽; 超表面; 反射率

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)23-0120-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.23.013

Design of Quartz Fiber Reinforced Epoxy Resin Matrix Composites for Microwave Absorption

LI Xueshan¹, LI Songming¹, LI Yongfeng², HUANG Hao¹, LU Haijun^{1*}

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

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

ABSTRACT: The work aims to achieve broadband microwave absorption in quartz fiber reinforced epoxy resin matrix composites at low thicknesses (2~4 mm), to extend the Effective Absorption Bandgap (EAB). Quartz fiber reinforced epoxy resin matrix functional layers and microwave absorbing composites were designed based on impedance matching and attenuation properties, and the electromagnetic resonance enhancement of the metasurface was used to further enhance EAB. The results showed that the F1 functional layer possessed good impedance matching and high-frequency resonance characteristics, and the F2 functional layer possessed strong loss and low-frequency resonance characteristics. With F1 and F2 as the impedance matching layer and lossy layer respectively, the designed microwave absorbing composite with the thickness of 2.04 mm had a R of no more than -10 dB at 8.80~16.95 GHz and an EAB of 8.15 GHz, and the microwave absorbing composites with thicknesses of 3.06 mm and 4.08 mm also exhibited favorable broadband absorbing properties; The introduction of the metasurface enhanced the electromagnetic resonance loss of the microwave absorbing composites, thus expanding the EAB of composites. The measured EAB for the composite with a thickness of

3.06 mm was expanded from 5.69 GHz to 10.34 GHz. The variation trend of measured R was consistent with the designed result, and the mechanical strength retention of the composite after loading metasurface was higher than 96%. The above results indicate that the microwave absorption mechanism of conventional materials combined with the impedance matching improvement and resonance enhancement mechanism of the metasurface can further enhance microwave absorption of composites, which provides some reference for the design of subsequent composites for highly efficient microwave absorption.

KEY WORDS: microwave absorbing composite; effective absorption bandgap; metasurface; reflection

以电磁波为信息载体的各种电子设备在给人类带来极大便利的同时,其产生的电磁辐射带来的电磁污染成为继水污染、大气污染和噪声污染之后的第四大污染,不仅影响电子信息系统的交互,造成电子设备损坏,甚至会威胁到人类的身心健康^[1-5],因此需对电磁辐射进行有效抑制。微波吸收材料是一种能够有效吸收电磁波,并通过各种电磁损耗方式将其有效损耗的功能材料,利用微波吸收材料对电磁辐射进行有效充分吸收,是解决电磁污染的有效手段^[6]。作为一种具有结构功能一体化特性的复合材料,结构微波吸收复合材料具有吸波承载有机结合、增重小与微波吸收频带宽等特点^[7-11],在抑制电磁辐射中具有重要应用价值。

电磁超材料作为由亚波长单元结构组成的人工复合材料,能够突破传统材料的限制,通过调节单元结构对电磁波的幅度、相位、极化与方位等进行灵活调控。其中,电磁超表面作为电磁超材料的二维结构形式,具有剖面低、共型简单、厚度薄,设计简单与易加工等特点^[12-14],在微波吸收领域得到了广泛研究与应用^[15-20]。在低密度薄层宽频微波吸收电磁超表面研究方面,喻卫军等^[21]设计了一种厚度为 1.32 mm 的三频带微波吸收超表面样件,该样件在 5.16、7.27、8.32 GHz 频点附近可实现 >10 dB 的有效吸收带宽 (Effective Absorption Bandgap, EAB); Luo 等^[22]设计了一种厚度为 4.5 mm 的非线性吸波超表面,该超表面样件在强光照射下的 EAB 接近 1 dB; Xu 等^[23]利用超表面加载集总元件改善阻抗匹配的方法,设计制备了厚度为 5.5 mm、EAB 为 1.2 GHz 的超表面吸波体; Ning 等^[24]设计了一种厚度为 10.3 mm 的可重构三模式超表面,其在微波吸收模式下的 EAB 接近 3 dB。可见,依靠电磁超表面自身的匹配与损耗或加载集总元件方式实现薄层宽频微波吸收的效果有限,一些加载集总元件的报道虽能有效提升超表面的微波吸收^[25-27],但集总元件的引入增加了设计与制备的复杂性,且超表面裸露于结构顶层,极易遭受外界干扰而使结构完整性遭受破坏,不利于实际工程化应用。

结构微波吸收复合材料在低厚度条件下往往受限于吸收剂的低含量与弱阻抗匹配,较难得到有效的宽频微波吸收效果。环氧树脂作为常见基体树脂,具

有较低的密度与固化温度,已被广泛用作复合材料的基体树脂^[28-29]。石英纤维作为结构复合材料用增强纤维,其 SiO_2 含量接近 100%,具有优异的耐高温性能、力学性能、低介电损耗与优异化学稳定性,常与环氧树脂、氰酸酯树脂等匹配制备成不同性能要求的复合材料,具有广阔的实际应用空间^[30-32]。为实现结构微波吸收复合材料在较低厚度 (2~4 mm) 条件下的宽频吸收性能,本文以石英纤维 (QW280) 为增强纤维,环氧树脂 (AC524) 为基体,金属微粉 XH 与 JH 为电磁波吸收剂,通过阻抗匹配与电磁损耗设计,制备了石英纤维增强环氧树脂基微波吸收复合材料,并进一步引入电磁超表面进行复合设计,以期将磁性材料的电磁损耗与超表面的谐振损耗相结合,进一步提升复合材料在微波频段的 EAB,并对复合电磁超表面前后的微波吸收性能进行验证。

1 实验部分

1.1 实验原材料

8 枚 3 飞缎纹石英纤维织物 (QW280), 湖北菲利华石英玻璃股份有限公司; 环氧树脂 (AC524)、铁磁性吸收剂 (XH, JH), 均为自制得到。

1.2 电磁超表面制备

电磁超表面采用印刷电路板 (PCB) 刻蚀工艺制备,其中超表面衬底采用厚度为 0.1 mm、介电常数 (ϵ_r) 为 4.3、介电损耗正切 ($\tan\epsilon$) 为 0.025 的 FR-4 环氧板材料,超表面单元采用厚度为 0.017 mm、电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 的金属铜。

1.3 复合材料制备

复合材料是利用热熔预浸料经热压罐固化而成。将树脂与吸收剂按照设计好的比例混合,涂膜制成热熔胶膜,后通过胶膜与石英纤维织物复合制备成热熔预浸料;按照设计的尺寸要求对预浸料进行裁剪、铺叠,其中加载电磁超表面的复合材料制备时按照结构形式依次铺叠预浸料、超表面与预浸料,经过热压罐成型固化,固化后根据测试需求进一步剪裁得到所需尺寸的石英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。

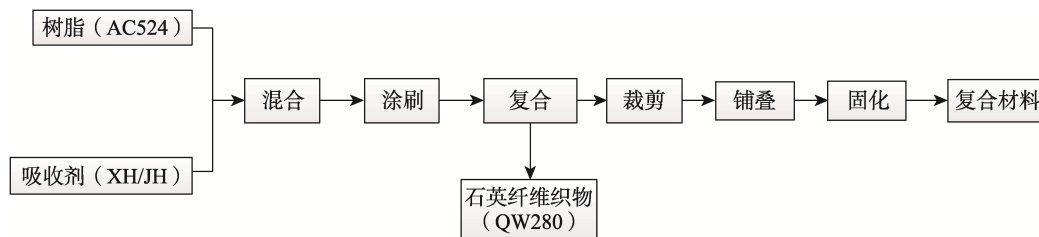


图1 复合材料制备工艺

Fig.1 Diagram for preparation of composites

1.4 测试与表征

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,使用型号为N5234F2的矢量网络分析仪测试复合材料在1~18 GHz的电磁参数。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。

复合材料的弯曲性能与层间剪切性能分别按照标准 ASTM D 790《未加强和加强塑料与电气绝缘材料的弯曲性能的标准试验方法》和 ASTM D 2344/D 2344M-16《聚合物基复合材料及其层压板短梁剪切强度标准试验方法》,利用型号为 INSTRON 5982 的电子万能试验机完成测试,取 5 个有效试样计算平均值。

2 结果与讨论

2.1 石英纤维增强环氧树脂基复合材料功能层的设计与表征

对于宽频微波吸收材料的设计,往往采用多功能层复合匹配,一方面能够增加电磁参数调控的自由度,提高阻抗匹配概率,使得尽可能多的电磁波进入材料内部;另一方面可利用不同功能层在不同频段的电磁损耗作用,使得在宽频范围内进入材料内部的电磁波尽可能衰减,从而达到性能优异的宽频设计结果。良好的宽频微波吸收复合材料往往需满足在较宽频段范围内具有优异匹配与损耗特性,相较于介电类微波吸收材料的带宽窄、宽频匹配性能不佳的特点,磁性微波吸收材料往往具有更大的带宽厚度比^[33],兼具电磁损耗,通过磁性吸收层的精确匹配设计,往往能够实现优异的宽带微波吸收特性。以铁磁共振吸收与涡流损耗为主要损耗机理的金属微粉类吸收剂具有电磁损耗强、吸波频带宽、最佳匹配厚度较小等优点^[34-35],自制了 2 种磁性金属微粉类吸收剂 XH 与 JH,利用 XH 与 JH 经过热压罐工艺分别制备了 F1 功能层与 F2 功能层,物理参数如表 1 所示,2 种功能层电磁参数及损耗正切随频率变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知,相较于 F1 功能层的电磁参数,F2 功能层的介电常数实部(ϵ')与虚部(ϵ''),磁导率实部(μ')与虚部(μ'')均在全频段 1~18 GHz 内相对更高,且

F2 的 $\tan\epsilon$ 与磁损耗正切($\tan\mu$)均高于 F1 的,表明 F2 具有相对更强的电磁损耗能力;F1 与 F2 的 $\tan\epsilon$ 分别在 0.014~0.033 与 0.10~0.42, $\tan\mu$ 分别在 0.05~0.20 与 0.40~0.72,表明 F1 微波损耗以磁损耗形式为主,兼具较小的介电损耗,F2 兼具相对较高的磁损耗与介电损耗。

表 1 功能层参数信息表

Tab.1 Parameter information sheet for functional layers

编号	树脂质量分数/%	吸收剂质量分数/%	单层压厚/mm
F1	20.7	48.3	0.34
F2	20.7	48.3	0.34

图 3a 为 2 种功能层的特征阻抗模值($|Z_0|$)随频率变化曲线,在整个频段内 2 种材料的 $|Z_0|$ 均小于自由空间($|Z_0|=1$),且 F1 的 $|Z_0|$ 大于 F2 的 $|Z_0|$,因此 F1 较 F2 更易实现与自由空间的阻抗匹配。微波吸收复合材料的电磁波吸收机理包括进入材料内部的电磁波损耗吸收与反射到自由空间电磁波的谐振吸收,2 种功能层材料的谐振吸收匹配厚度(H)随频率变化曲线如图 3b 所示,在 1~18 GHz 范围内,2 种功能层材料的 H 均随频率的增加而下降。 H 相同时,F1 较 F2 具有高匹配频率,表明 F1 易在高频实现谐振吸收,F2 易在低频实现谐振吸收。根据传播常数公式^[36]计算得到 2 种吸收层的损耗常数(α)随频率变化曲线如图 3c 所示,在 1~18 GHz 范围内,F2 比 F1 呈现相对较高的 α ,表明 F2 具有相对更强的微波损耗,这和上述呈现的 F2 的高损耗正切结果一致。合理的多层吸收结构能够实现优异的阻抗匹配^[37],通过俘获入射进材料内部的电磁波,使之在面层与底层之间产生多次反射与吸收,从而实现对电磁波的衰减。鉴于 F1 的阻抗在宽频带范围与自由空间相近,且具有高频谐振吸收特性,F2 具有较强的电磁损耗、较高的低频磁导率与低频谐振吸收特性,因此在本研究中,拟采用 F1 为阻抗匹配层、F2 为损耗层进行微波吸收复合材料电性能的设计优化。

2.2 石英纤维增强环氧树脂基微波吸收复合材料的宽带性能设计与表征

为得到低厚度条件下的宽带微波吸收复合材料,

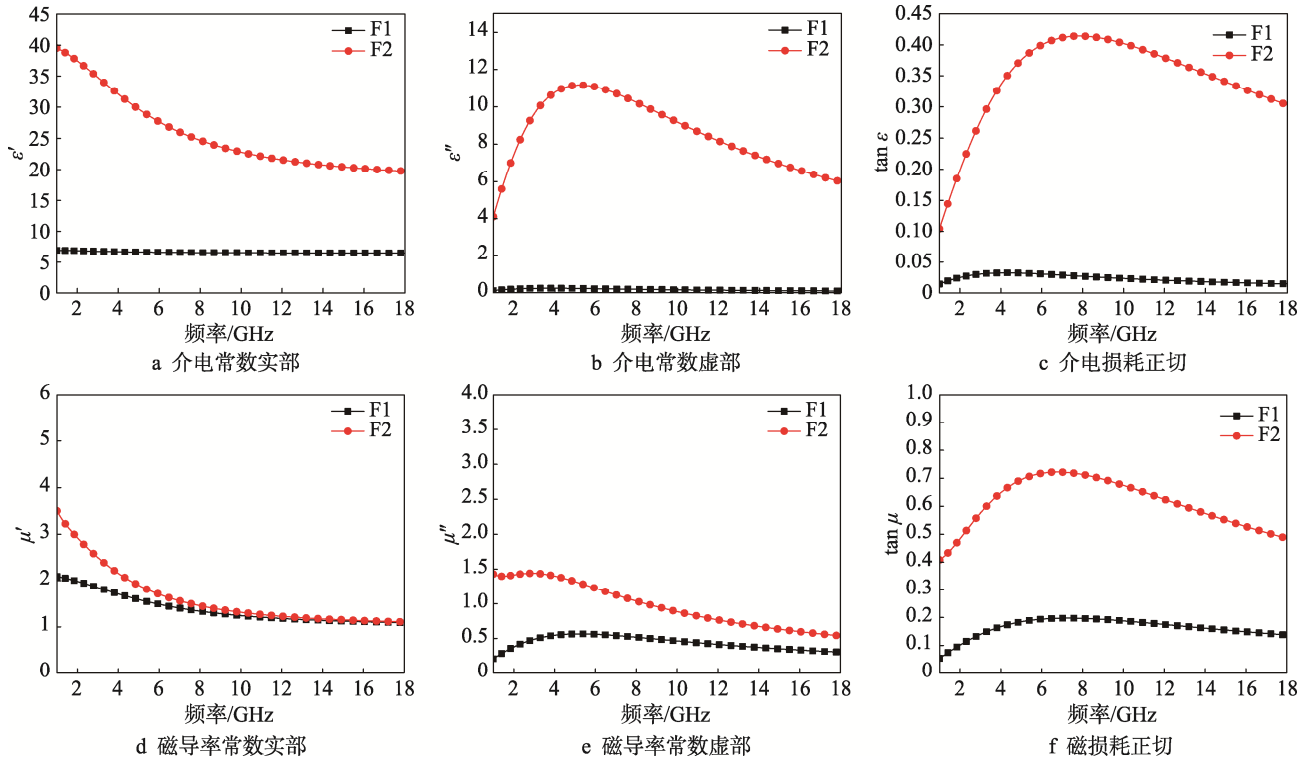


图 2 电磁参数与损耗正切随频率变化曲线

Fig.2 Curves of electromagnetic parameters and loss tangent with frequency

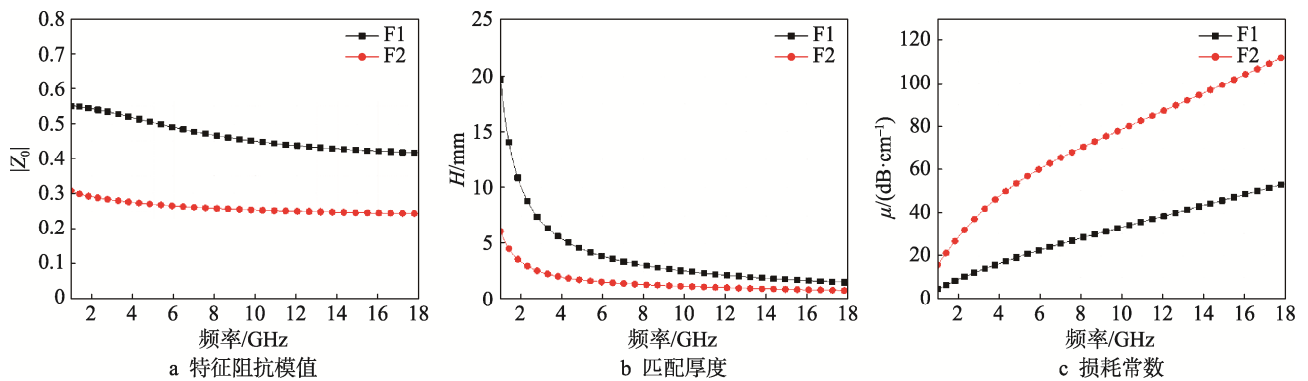


图 3 F1 和 F2 的特征阻抗模值、匹配厚度、损耗常数随频率变化曲线

Fig.3 Curves of characteristic impedance, matched thickness, loss factor with frequency for F1 and F2

以 F1 与 F2 分别为阻抗匹配层与损耗层, 建立微波吸收复合材料的电结构模型(如图 4a 所示), 利用 ANSYS HFSS 电磁仿真软件, 采用以有限元算法为核心的频域求解器进行计算, 通过调节 2 种功能层的厚度进行宽带微波吸收复合材料优化设计。

厚度为 2.04 mm 的微波吸收复合材料优化结果如图 4b 所示, 其中损耗层 F2 的厚度为 0.68 mm, 阻抗匹配层 F1 的厚度为 1.36 mm。该结构微波吸收性能整体覆盖 1~18 GHz 范围, 且在 13.1 GHz 出现谐振吸收峰, <-10 dB 的 EAB 为 8.15 GHz, 表明采用上述策略进行宽带电性能优化设计具有一定可行性。为了验证优化设计的准确性, 制备了与电结构模型具有相同结构参数的石英纤维增强环氧树脂基微波吸收复合材料, 结果显示该复合材料的实测反射率曲线与

模拟结果在整体趋势上具有较强一致性, 且实测 EAB 为 7.07 GHz, 产生的误差包括电磁参数测试误差与反射率测试误差以及仿真模拟算法误差。

为了探究微波吸收复合材料的电性能批次稳定性, 制备了 3 批次厚度为 2.04 mm 的复合材料, 反射率测试结果如图 4c 所示, 3 批次复合材料反射率测试结果基本一致, 表明该微波吸收复合材料具有优异的电性能批次稳定性, 设计结果具有一定的准确性。为了进一步阐明所设计复合材料的微波吸收机制, 同时获得不同功能层对电磁波吸收的贡献, 模拟仿真了复合材料在 13.1 GHz 谐振频率点下的功率损耗密度分布, 结果如图 4d 所示, 可见 13.1 GHz 的微波损耗来源于 F1 与 F2 的共同作用, 其中 F2 层的微波损耗大于 F1 层的微波损耗。

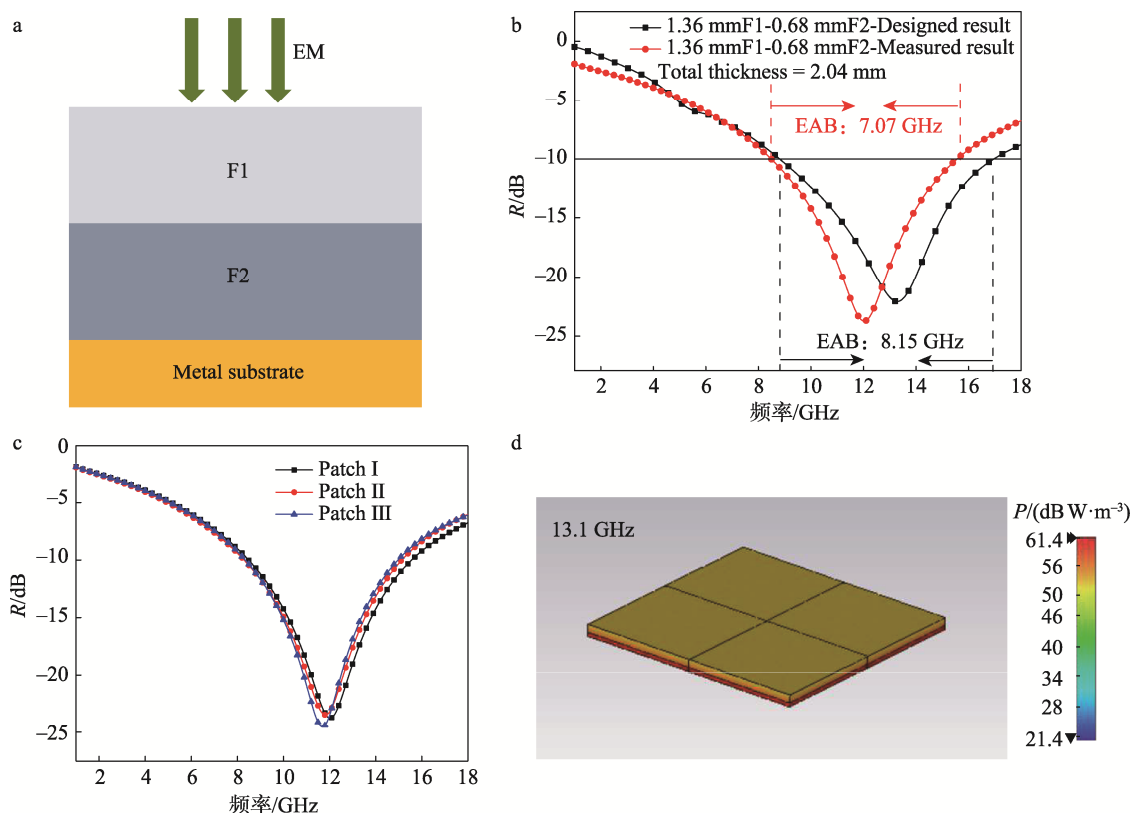


图4 (a)微波吸收复合材料电结构模型示意图;(b)设计与实测反射率曲线;
(c)三批次反射率测试曲线;(d)13.1 GHz下的功率损耗密度分布示意图
Fig.4 Electrical structure model of microwave absorbing composites (a), curves of
reflection for designed result and measured result (b), curves of
reflection for three patches (c), distribution of
power loss density at 13.1 GHz (d)

针对不同厚度的复合材料,分别设计优化电性能,优化结果如图5所示。对于厚度为3.06 mm的复合材料,当F1与F2厚度分别为1.02 mm与2.04 mm时,模拟与实测反射率曲线如图5a所示,设计与实测反射率的EAB分别为6.43 GHz与5.69 GHz;对于厚度为4.08 mm的复合材料,当F1层为1.70 mm、

F2层为2.38 mm时,设计EAB为11.38 GHz,实测EAB为9.97 GHz,设计与实测反射率曲线相吻合。综上,利用不同电磁特性的功能层复合设计能够实现不同对应厚度下的优异吸波性能,在微波吸收领域具有广阔的应用前景。3种不同厚度微波吸收复合材料的面密度见表2所示。

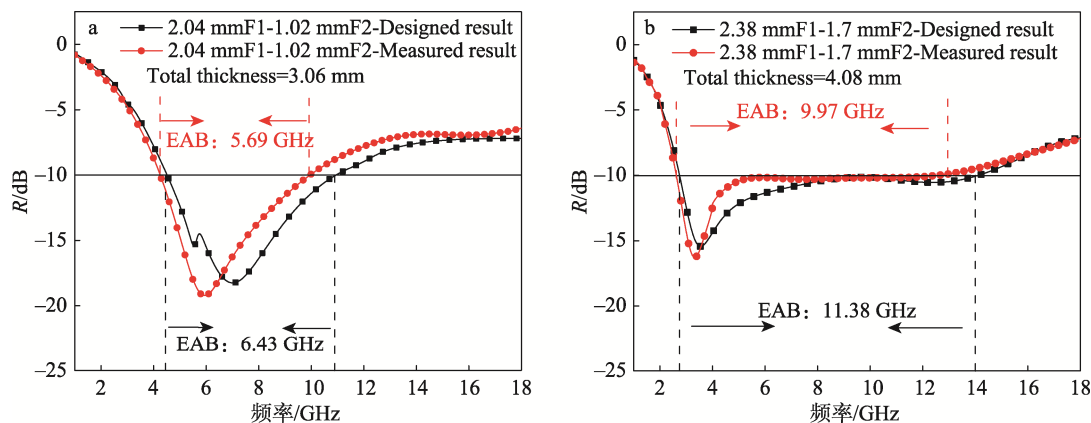


图5 厚度为(a)3.06 mm;(b)4.08 mm的微波吸收复合材料反射率设计与实测结果
Fig.5 Designed and measured reflection of microwave
absorbing composites for thickness of
3.06 mm (a) and 4.08 mm (b)

表 2 不同厚度微波吸收复合材料面密度 Tab.2 Surface density of microwave absorbing composite materials with different thicknesses	
厚度/mm	面密度/(kg·m ⁻²)
2.04	5.5
3.06	8.3
4.08	11.0

表 3 电磁超表面单元结构参数信息表 Tab.3 Structural parameter information sheet of metasurface			mm
复合材料厚度	单元周期	贴片直径	
2.04	7.00	2.80	
3.06	5.00	3.00	
4.08	15.00	6.00	

2.3 石英纤维增强环氧树脂基微波吸收复合材料的宽带拓展设计与验证

为了进一步提升石英纤维增强环氧树脂基复合材料的微波吸收性能,拟引入电磁超表面,利用其对电磁谐振的增强作用扩展 EAB。针对超表面对微波吸收材料的带宽扩展作用,已有诸多研究报道,然而研究结果往往表现出带宽拓展效果差^[38-41],或超表面单元裸露于微波吸收材料的顶层^[38-39,41],不利于实际工程化应用。针对上述现象,本文拟设计超表面位于功能层界面中间位置的结构微波吸收复合材料,如图 6 所示,电磁超表面单元采用圆形金属贴片单元结构,将其放置于 F1 与 F2 界面位置,通过调节超表面单元的周期(p)与圆形金属贴片单元的直径(d)来优化整体结构的微波吸收性能。

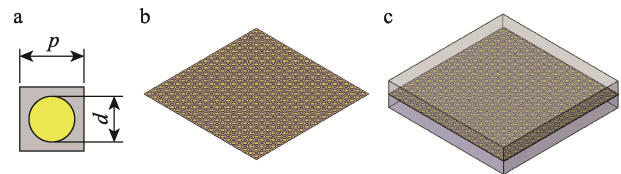


图 6 (a) 电磁超表面单元; (b) 电磁超表面; (c) 加载超表面后的微波吸收复合材料结构
Fig.6 Eletronmagnetic metasurface unit (a); eletronmagnetic metasurface (b); microwave absorbing composites with metasurface (c)

针对不同厚度的复合材料分别进行单元参数优化,优化后的超表面单元参数见表 3,对应优化后的微波吸收复合材料电性能如图 7 所示。由图 7 可知,加载超表面后的不同厚度微波吸收复合材料的 EAB 均得到有效拓展,其中厚度为 3.06 mm 的微波吸收复合材料的 EAB

提升最明显,由 6.43 GHz 拓展到 12.81 GHz。
利用等效媒质理论对微波吸收材料的阻抗匹配情况进行分析,加载超表面前后的输入阻抗(Z_{in})^[42]计算公式为:

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

式中: Z_{in} 为输入阻抗; S_{11} 为反射系数, S_{21} 为传输系数,均通过仿真计算得到。厚度为 3.06 mm 的微波吸收复合材料加载超表面前后的归一化输入阻抗实部($\text{Re}(Z_{in})$)与虚部($\text{Im}(Z_{in})$)分别如图 8a 与图 8b 所示,加载超表面之后, $\text{Re}(Z_{in})$ 在 6.53~10.26 GHz 偏离自由空间的本征阻抗实部($\text{Re}(Z_0)=1$),在其余频率范围均更加接近 1, $\text{Im}(Z_{in})$ 在 4.62~8.56 GHz、10.2~11.96 GHz 与 16.65~18 GHz 偏离自由空间本征阻抗虚部($\text{Im}(Z_0)=0$),在其余频率范围均更加接近 0,由传输线理论可得反射系数计算公式为:

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \tag{2}$$

由式(2)可知, Z_{in} 与 Z_0 越接近,反射系数 S_{11} 越小。整体而言,超表面的加载改善了微波吸收复合材料与自由空间的阻抗匹配,使其在 1~18 GHz 宽频范围内更加接近自由空间阻抗,从而有利于阻抗匹配与微波吸收性能的提升。

为了进一步阐明超表面对微波吸收的带宽拓展机制,模拟仿真了加载超表面前后的典型频点的电场、磁场、表面电流及功率损耗密度分布,其中厚度为 3.06 mm 的微波吸收复合材料在典型频点 14.2 GHz 下的相关分布示意图见图 9 所示。图 9a 显示,未加载超表面复合材料的电场主要分布在顶层,2 种功能

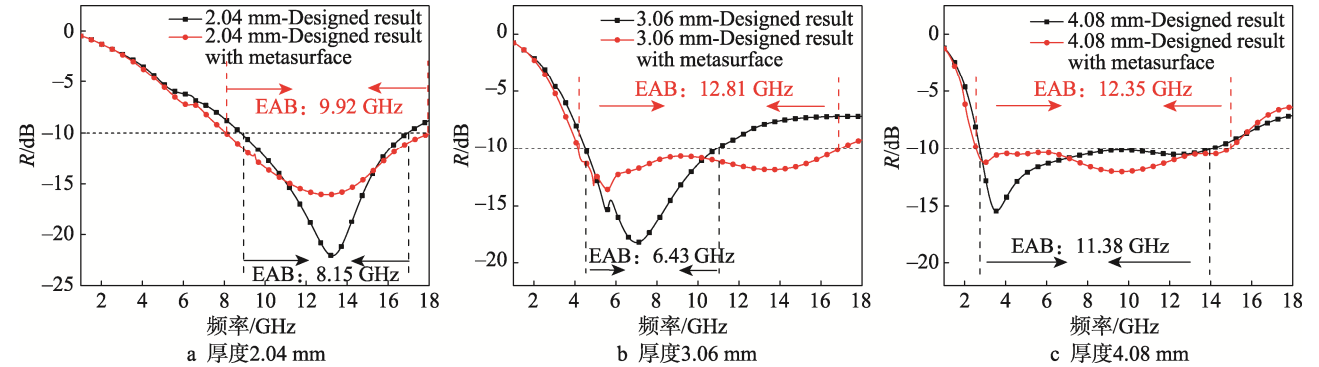


图 7 不同厚度复合材料加载超表面前后的反射率设计曲线
Fig.7 Designed reflection before and after loading metasurface for composites with different thicknesses

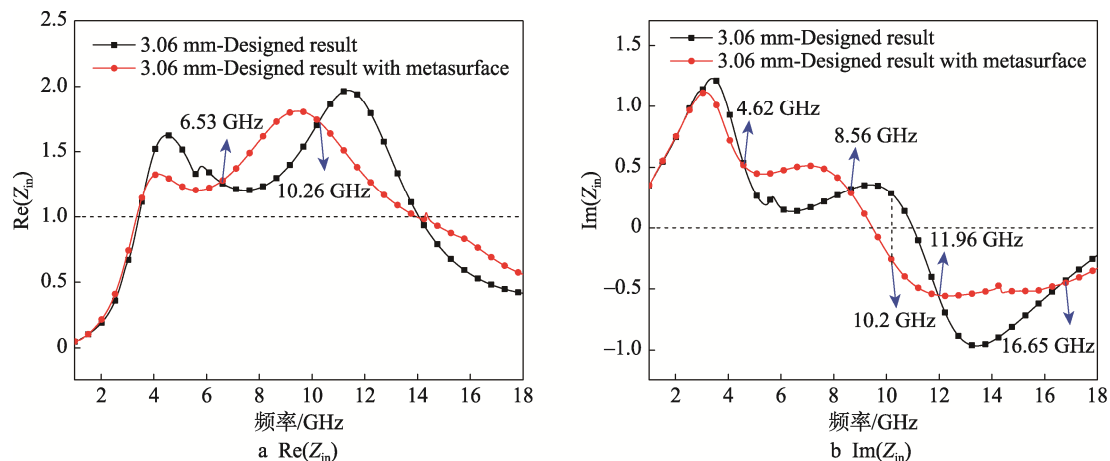


图 8 厚度为 3.06 mm 复合材料加载超表面前后的 $\text{Re}(Z_{in})$ 与 $\text{Im}(Z_{in})$ 曲线
Fig.8 Cueves of $\text{Re}(Z_{in})$ and $\text{Im}(Z_{in})$ before and after loading metasurface for composite with a thickness of 3.06 mm

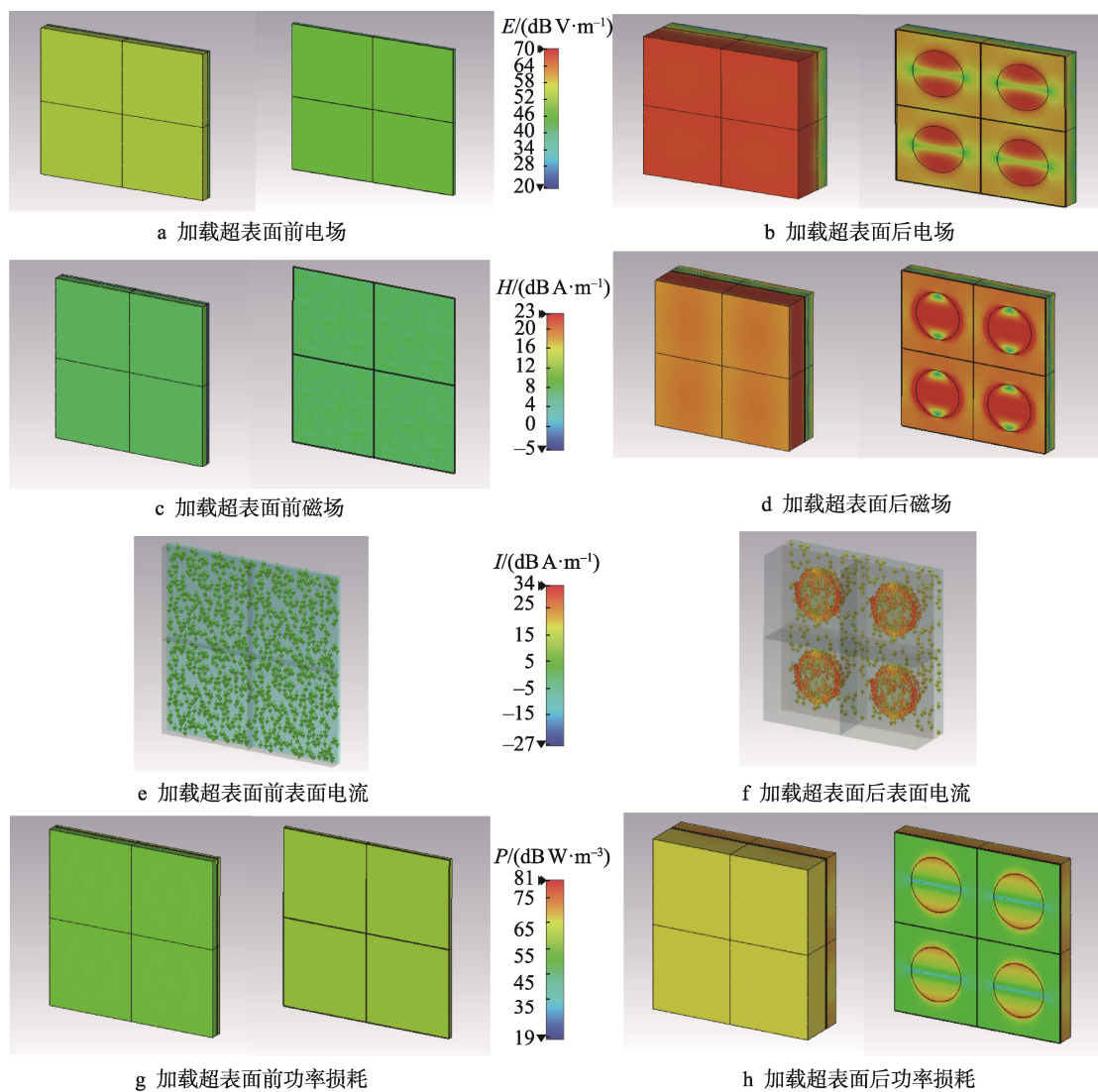


图 9 厚度为 3.06 mm 复合材料在 14.2 GHz 处加载超表面前后的相关分布示意图

Fig.9 Related distribution of composite with a thickness of 3.06 mm before and after loading metasurface at 14.2 GHz

层的界面电场强度较低;图 9b 表明加载超表面后,整体电场强度明显增加,电场强度最大值出现在超表面圆形金属单元部位,且呈现两端分布式,这种分布方式有利于产生较强的电谐振。图 9c 显示未加载超表面复合材料的磁场整体分布较均匀且在靠近底层下表面处磁场强度最高;加载超表面后,整体磁场强度得到明显增加(图 9d),且强度分布发生变化,最高磁场强度位置在超表面单元附近。图 9e 与图 9f 中表面电流分布显示加载超表面后的表面电流强度明显增大,最大位置由底层变为沿超表面单元呈现圆形分布,且单元处电流与底层电流分布呈现环流特征,环流出现会产生明显的磁谐振。由上述分析可知,加载超表面后,复合材料的电场、磁场及表面电流强度均得到明显提升,且聚集位置及分布状态发生明显变化,最大值均在超表面单元位置处出现,电磁谐振得到了明显增强,使得电磁波能量被束缚在复合材料内部,进而通过功能层与超表面的电磁损耗作用实现电磁能量耗散,从而促进了微波吸收性能的提升及带宽的增加。功率损耗分布显示,相比于未加载超表面复合材料的整体较均衡的功率损耗分布(图 9g),加载超表面后(图 9h)的损耗强度呈现数量级增加,且最大损耗出现在超表面单元附近,进一步证实了电磁谐振作用的增强效果。

为了验证上述超表面加载对带宽拓展设计的可靠性,对厚度为 3.06 mm 的复合材料加载超表面后的吸收性能进行实测验证,超表面及加载超表面的复合材料实物图分别如图 10a 与图 10b 所示,测试验证结果如图 10c 所示,实测 EAB 为 10.34 GHz,与设计在整体趋势上保持较强的一致性,从而证实了复合超表面单元拓展带宽的可行性。

2.4 石英纤维增强环氧树脂基微波吸收复合材料的力学性能

结构微波吸收复合材料由多种不同功能层按照设计制备而成,功能层之间、功能层与金属超表面之间均存在一定的界面,为探究界面存在对复合材料力学性能的影响,探究了加载超表面前后厚度为 3.06 mm 复合材料的弯曲与层间剪切性能,测试结果见表 4 所示。由表 4 可知,微波吸收复合材料加载超表面前后的弯曲强度分别为 652 MPa 与 645 MPa,层间剪切强度分别为 66 MPa 与 64 MPa,力学强度保持率高于 96%,加载超表面后复合材料弯曲与层间剪切的最大载荷($F_{\max}$)与未加载超表面复合材料的相当。上述结果表明,加载超表面的微波吸收复合材料力学性能保持率较高,性能没有明显降低。

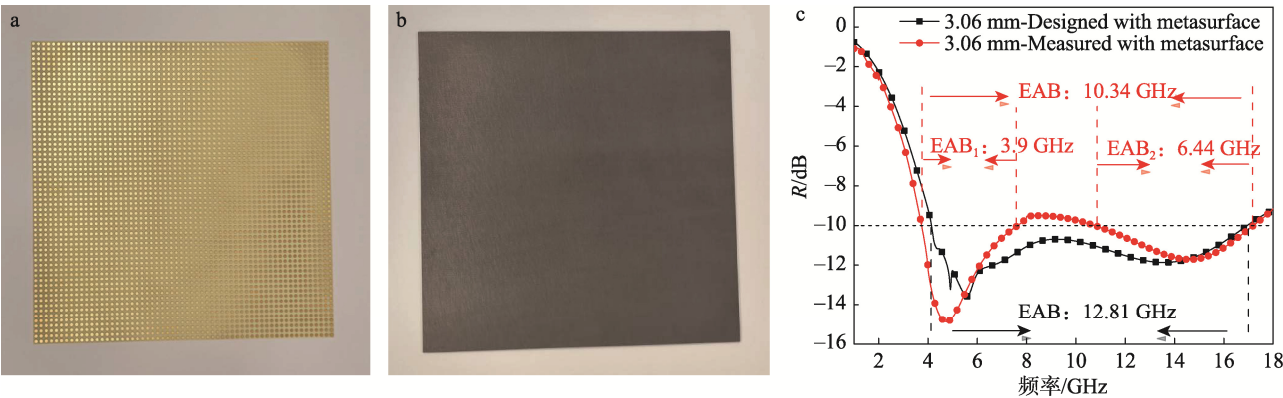


图 10 电磁超表面实物图 (a); 厚度为 3.06 mm 的加载超表面微波吸收复合材料实物图 (b); 对应的反射率设计与实测结果 (c)
Fig.10 Photograph of electromagnetic metasurface (a); photograph of the microwave absorbing composite loading metasurface with a thickness of 3.06 mm (b); corresponding results of designed and measured reflection (c)

表 4 加载超表面前后复合材料力学性能
Tab.4 Mechanical properties of composites before and after loading metasurface

测试项目	未加载超表面 复合材料	加载超表面 复合材料
弯曲强度/MPa	652	645
弯曲 $F_{\max}$ /N	451	446
层间剪切强度/MPa	66	64
层间剪切 $F_{\max}$ /N	1 616	1 581

3 结语

以石英纤维 QW280 为增强纤维,环氧树脂 AC524 为基体,金属微粉 XH 与 JH 为吸收剂,分别设计制备了 F1 与 F2 石英纤维增强环氧树脂基功能层,其中 F1 功能层具有良好的阻抗匹配与高频谐振特性,F2 功能层具有强损耗与低频谐振特性,将 F1 和 F2 分别作为阻抗匹配层与损耗层进行微波吸收复合材料的设计。利用 F1 与 F2 功能层复合设计出厚度

为 2.04 mm, 具有宽带微波吸收特性的石英纤维增强环氧树脂基复合材料, 其设计与实测 EAB 分别为 8.15 GHz 与 7.07 GHz, 且具有优异的电性能批次稳定性; 设计与制备的厚度分别为 3.06 mm 与 4.08 mm 的复合材料也具有良好宽带微波吸收性能, 实测 EAB 分别为 5.69 GHz 与 9.97 GHz。电磁超表面的引入可以改善复合材料在宽频范围内的阻抗匹配, 且其谐振增强作用可以进一步提升石英纤维增强环氧树脂复合材料的微波吸收性能, 其中厚度为 3.06 mm 的复合材料加载超表面后, 实测 EAB 由原来的 5.69 GHz 拓展到 10.34 GHz, 且实测反射率曲线变化趋势与设计结果具有一致性; 加载超表面后复合材料的力学强度保持率较高, 力学性能无明显降低。

上述结果表明, 将传统材料的微波吸收机制与电磁超表面的阻抗匹配改善和谐振增强作用机制相结合可以进一步提升传统材料的微波吸收作用, 并可在较低厚度下实现优异微波吸收效果与良好承载性能, 这为后续“薄、轻、宽、强”微波吸收材料的设计提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 胡晶, 谢国治, 顾家新, 等. 多元助剂改性羰基铁粉雷达波低频吸波性能研究[J]. 材料导报, 2018, 32(4): 520-524.
HU J, XIE G Z, GU J X, et al. Low Frequency Radar Wave Absorbing Performance of Carbonyl Iron Powder Modified by Compound Auxiliary Agents[J]. Materials Review, 2018, 32(4): 520-524.
- [2] 余寒. 电磁辐射及防护技术措施分析[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(2): 156-158.
YU H. Analysis of Electromagnetic Radiation and Protection Technology[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(2): 156-158.
- [3] 张明伟, 曲冠达, 庞梦瑶, 等. 电磁屏蔽机理及涂敷/结构型吸波复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(S1): 62-70.
ZHANG M W, QU G D, PANG M Y, et al. Research Progress of Electromagnetic Shielding Mechanism and Coated/Structural Absorbing Composite Materials[J]. Materials Review, 2021, 35(S1): 62-70.
- [4] 贾雪菲, 常乾, 曹雪芳, 等. 低频磁损耗型吸波材料研究进展[J]. 功能材料, 2022, 53(12): 12028-12032.
JIA X F, CHANG Q, CAO X F, et al. Research Progress of Low Frequency Magnetic Loss Absorbing Materials[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(12): 12028-12032.
- [5] 安振国, 刘冉, 张敬杰. 碳-磁性材料复合电磁波吸收剂研究进展[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2022, 14(6): 499-518.
AN Z G, LIU R, ZHANG J J. Research Progress of Carbon Based Magnetic Electromagnetic Wave Absorbers[J]. Journal of Engineering Studies, 2022, 14(6): 499-518.
- [6] 李天天, 夏龙, 黄小萧, 等. 介电损耗型微波吸收材料的研究进展[J]. 材料工程, 2021, 49(6): 1-13.
LI T T, XIA L, HUANG X X, et al. Progress in Dielectric Loss Microwave Absorbing Materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(6): 1-13.
- [7] 李俊燕, 陈平. 结构型吸波复合材料的研究进展[J]. 纤维复合材料, 2012, 29(2): 11-14.
LI J Y, CHEN P. Development in Structural Absorbing Composites[J]. Fiber Composites, 2012, 29(2): 11-14.
- [8] 文湘隆, 廖思凡, 陈凯, 等. 环氧树脂/玻璃纤维/石墨烯复合材料的电磁吸波性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(3): 126-131.
WEN X L, LIAO S F, CHEN K, et al. Electromagnetic Absorption Performance of Epoxy Resin/Glass Fiber/Graphene Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 126-131.
- [9] 王春齐, 符仲宇, 杜作娟, 等. 结构吸波复合材料透波层的研究[J]. 功能材料, 2015, 46(2): 2057-2059.
WANG C Q, FU Z Y, DU Z J, et al. Study on Wave-Transparent Layer of Structure Absorbing Composite Materials[J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(2): 2057-2059.
- [10] 贺榆波, 杨青真, 施永强, 等. 双层梯度蜂窝吸波结构优化设计[J]. 推进技术, 2022, 43(10): 427-435.
HE Y B, YANG Q Z, SHI Y Q, et al. Optimization Design of Double-Layer Grading Honeycomb Absorbing Structure[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(10): 427-435.
- [11] 胡婉欣, 尹洪峰, 袁蝴蝶, 等. 纤维增强树脂基吸波复合材料的研究进展[J]. 中国塑料, 2022, 36(10): 178-189.
HU W X, YIN H F, YUAN H D, et al. Research Progress in Fiber-Reinforced-Resin Matrix Microwave Absorbing Composites[J]. China Plastics, 2022, 36(10): 178-189.
- [12] 罗歆瑶, 王身云. 超材料隐身技术研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(9): 120-128.
LUO X Y, WANG S Y. Recent Progress on Metamaterial Cloaking[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(9): 120-128.
- [13] 陈天航, 何磊明, 袁宏皓, 等. 电磁超材料及智能超材料隐身技术发展现状及趋势[J]. 空军工程大学学

- 报, 2023, 24(3): 26-33.
- CHEN T H, HE L M, YUAN H H, et al. Current Development and Future of Electromagnetic Meta-Materials and Intelligent Cloaking Technology Based on Smart Meta-Materials[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 26-33.
- [14] 朱潜, 田翰闾, 蒋卫祥. 电磁超表面对辐射波的调控与应用[J]. 光电工程, 2023, 50(9): 18-33.
- ZHU Q, TIAN H W, JIANG W X. Manipulations and Applications of Radiating Waves Using Electromagnetic Metasurfaces[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(9): 18-33.
- [15] WENG Z, GUO Y S. Broadband Perfect Optical Absorption by Coupled Semiconductor Resonator-Based All-Dielectric Metasurface[J]. Materials, 2019, 12(8): 12081221.
- [16] ZHOU L, SHEN Z X. Absorptive Coding Metasurface with Ultrawideband Backscattering Reduction[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(7): 1201-1205.
- [17] CHENG Y Z, LI Z R, CHENG Z Z. Terahertz Perfect Absorber Based on InSb Metasurface for both Temperature and Refractive Index Sensing[J]. Optical Materials, 2021, 117: 111129.
- [18] 李孜涵, 陈名松, 田硕. 基于超表面的双频带极化不敏感吸波器[J]. 桂林电子科技大学学报, 2023, 43(6): 459-464.
- LI Z H, CHEN M S, TIAN S. Dual-Band Polarization Insensitive Wave Absorber Based on Metasurface[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2023, 43(6): 459-464.
- [19] 贺云, 刘鹏成, 付琴, 等. 电磁吸波与极化转换融合型超表面设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(3): 294-299.
- HE Y, LIU P C, FU Q, et al. Design of Metasurface Based on Combination of Electromagnetic Absorption and Polarization Conversion[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(3): 294-299.
- [20] 麻哲义培, 姜超, 刘妍琼, 等. 双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体[J]. 电子学报, 2024, 52(8): 2668-2678.
- MA Z Y P, JIANG C, LIU Y Q, et al. Ultrawideband and High Absorption Composite Absorber Enabled by Double Layers of Metasurface Complementary Enhancement Design[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(8): 2668-2678.
- [21] 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):1233-1239.
- YU W J, SHENG Z T, ZHANG Y C, et al. Three Band Absorber Based on Metasurface[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2024, 35(12):1233-1239.
- [22] LUO Z J, REN X Y, ZHOU L, et al. A High-Performance Nonlinear Metasurface for Spatial-Wave Absorption[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(16): 2109544.
- [23] XU W H, HE Y, KONG P, et al. An Ultra-Thin Broadband Active Frequency Selective Surface Absorber for Ultrahigh-Frequency Applications[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(18): 184903.
- [24] NING J, ZHENG Y L, WANG S J, et al. Reconfigurable Tri-Mode Metasurface for Broadband Low Observation, Wide-Range Tracing, and Backscatter Communication[J]. Advanced Science, 2024, 11(15): e2304879.
- [25] ZHAO J C, CHENG Y Z. Ultrabroadband Microwave Metamaterial Absorber Based on Electric SRR Loaded with Lumped Resistors[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(10): 5033-5039.
- [26] NGUYEN T T, LIM S. Angle- and Polarization-Insensitive Broadband Metamaterial Absorber Using Resistive Fan-Shaped Resonators[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(2): 021605.
- [27] NGUYEN T T, LIM S. Design of Metamaterial Absorber Using Eight-Resistive-Arm Cell for Simultaneous Broadband and Wide-Incidence-Angle Absorption[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 6633.
- [28] 邢丽英, 李亚锋, 陈祥宝. 先进复合材料在航空装备发展中的地位与作用[J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4179-4186.
- XING L Y, LI Y F, CHEN X B. Status and Role of the Advanced Composite Materials in the Development of Aviation Equipment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4179-4186.
- [29] 贾园, 师瑞峰, 蒋颢, 等. 环氧树脂的开发及其在电子电器材料中的应用研究进展[J]. 功能材料, 2020, 51(4): 4040-4045.
- JIA Y, SHI R F, JIANG X, et al. Development of Epoxy Resin and Its Application in Electrical and Electronic Materials[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(4): 4040-4045.
- [30] 王立尧, 王童, 陈轶嵩, 等. 石英纤维增强复合材料现状及未来发展趋势[J]. 汽车文摘, 2021(10): 17-19.
- WANG L Y, WANG T, CHEN Y S, et al. Status Quo and Future Development Trends of Quartz Fiber-Reinforced Composites[J]. Automotive Digest, 2021(10): 17-19.

- [31] 李鹏, 杜瑞奎, 刘亚青, 等. 环氧树脂/石英纤维透波复合材料制备[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2): 29-33.
LI P, DU R K, LIU Y Q, et al. Preparation of Epoxy Resin/Quartz Fiber Wave-Transparent Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2): 29-33.
- [32] 李青, 车永星, 赵靖, 等. 石英纤维增强氰酸酯树脂选频透波性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(12): 115-120.
LI Q, CHE Y X, ZHAO J, et al. Research on Frequency Selective and wave-Transparent Properties of Cyanate Ester Resin Reinforced by Quartz Fibre[J]. Composites Science and Engineering, 2020(12): 115-120.
- [33] ROZANOV K N. Ultimate Thickness to Bandwidth Ratio of Radar Absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(8): 1230-1234.
- [34] 周必成, 王东红, 贾琨, 等. 羰基铁吸波材料性能提升研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 2989-2996.
ZHOU B C, WANG D H, JIA K, et al. Research Progress in the Improvement of Properties of Carbonyl Iron Wave-Absorbing Materials[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(8): 2989-2996.
- [35] 王丽熙, 张其土. 微波吸收剂的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2005, 19(9): 26-29.
WANG L X, ZHANG Q T. Present Research State and Perspective of Wave-Absorbing Agents[J]. Materials Review, 2005, 19(9): 26-29.
- [36] LIU Z H, TAO R, LUO P, et al. Preparation and Microwave Absorbing Property of Carbon Fiber/Polyurethane Radar Absorbing Coating[J]. RSC Advances, 2017, 7(73): 46060-46068.
- [37] 何山, 李业华, 周淳. 一种多层胶板雷达吸波材料[J]. 航空材料学报, 2016, 36(4): 41-46.
HE S, LI Y H, ZHOU C. A Multilayer Rubber Board Radar Absorbing Material[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(4): 41-46.
- [38] ZHANG H B, LI W D, PEI H Z, et al. Low Frequency Needlepoint-Shape Metamaterial Absorber Based on Magnetic Medium[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(1): 509.
- [39] CHEN Q, BIE S W, YUAN W, et al. Low Frequency Absorption Properties of a Thin Metamaterial Absorber with Cross-Array on the Surface of a Magnetic Substrate[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(42): 425102.
- [40] 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.
- [41] 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 Z, SUN H T, CHENG Z G, 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.
- [42] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY T, et al. Electromagnetic Parameter Retrieval from Inhomogeneous Metamaterials[J]. Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2005, 71(3 Pt 2B): 036617.