

超材料复合吸波体的设计与研制

李希, 魏文政, 汪家辉

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研制一种比传统吸波材料雷达波衰减更强、合格频带更宽的新型吸波材料。**方法** 设计超材料谐振单元图案及其组合排列方式, 采用丝网印刷工艺在介质基板上制作超材料吸波体, 与传统吸波材料复合形成超材料复合吸波体。通过对比分析不同介质基板、谐振单元图案及组合方式、导电炭黑含量对复合吸波体的性能影响规律。**结果** 超材料复合吸波体能够实现比传统吸波材料, 在 12~17 GHz 峰值反射率最大降低 -20 dB; 在 2~18 GHz 反射率低于 -20 dB 的带宽拓展 17.7%。**结论** 新研制的超材料复合吸波体实现了峰值衰减更强与合格带宽拓宽的研究目的, 对未来吸波材料的发展极具研究价值与方向指引。

关键词: 超材料复合吸波体; 谐振单元; 雷达波反射率

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.011

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)08-0070-08

Design and Development of Metamaterial Composite Absorber

LI Xi, WEI Wen-zheng, WANG Jia-hui

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The paper aims to develop a kind of new absorbing material that is of stronger radar wave attenuation and wider qualified bandwidth compared with traditional material. The metamaterial patterns in resonance unit and its combinations were designed. A metamaterial absorber was manufactured on a dielectric substrate by silk-steel screen printing process, and the metamaterial absorber was formed on the dielectric substrate and then compounded with traditional absorber to form metamaterial composite absorber. Different dielectric substrates, resonance unit patterns and combinations, conductive carbon black content on the performance of the absorber were comparatively analyzed. The experiments showed that metamaterial absorber can achieve a maximum reduction of bandwidth expansion that was -20 dB in peak reflectivity at 12~17 GHz and 17.1% when reflectivity was lower than -20 dB at 2~18 GHz compared with traditional absorber. The newly developed metamaterial composite absorber accomplishes the research goals of stronger decline in peak and wider qualified bandwidth, and have research value and direction guidance in development of future absorbing materials.

KEY WORDS: metamaterial composite absorber; resonance unit; radar reflectivity

超材料是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料, 即通过人工微结构单元构成复合结构, 实现自然材料所不能实现的

特性或功能^[1]。人工超材料具有天然材料所不具备的物理属性, 如负折射率、负介电常数、负磁导率等^[2-3]。超材料的最大特点是通过结构的设计实现负介电常

收稿日期: 2020-01-25; 修订日期: 2020-03-31

Received: 2020-01-25; Revised: 2020-03-31

作者简介: 李希(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为隐身材料。

Biography: LI Xi (1984—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: stealth materials.

数与负磁导率^[4-5]。将超材料运用到雷达吸波领域，构建超材料吸波体。该超材料吸波体是由超材料结构和介质基板组成的，其相较传统吸波材料有很多性能突破，如在厚度较薄的条件下实现 L、S 等低频强吸收；实现宽频强吸收兼容、拓宽吸波频段等^[6-8]。

为了实现超材料吸波体“薄、轻、宽、强”的目标，目前对超材料的研究主要分为以下几类：单层超材料吸波体、多层超材料吸波体、传统吸波材料与超材料复合吸波体^[9-10]。为实现单层超材料吸波体的宽带强吸收，采取的途径通常有两类：一类是通过设计超材料单元图案对电磁波多频响应，实现多频点强吸收；另一类是通过调控超材料的材料电磁参数，实现吸收峰位动态移动。但单层超材料吸波体并未实现实质上的宽频强吸收，局限于在单频点或多频点实现完美吸收。

多层超材料吸波体，金字塔类是其典型代表，宽带强吸收是通过按梯度多层叠加实现的^[2,9]。为保证材料性能，单层方片的尺寸、厚度都有参数指标要求，因此在制作工艺上比较复杂，加工难度较大。

传统吸波材料与超材料复合吸波体是结合两者优势设计的吸波体，能实现单一传统吸波材料或超材料无法达到的性能，在目前看来是超材料运用最有前景的研究方向^[9]。本文的设计思路也是结合超材料与传统吸波材料，通过设计不同超材料单元图案、不同电磁参数的介质基体、不同的导电炭黑浓度，总结出能实现复合吸波体宽频强吸收的规律。

1 实验

1.1 主要原材料

FR-4 玻璃钢，上海同希橡塑公司生产；PVC 泡沫板，航天一院 15 所提供；聚氨酯吸波泡沫，型号 C6，西南技术工程研究所生产；水性粘合剂 3211，浙江传化股份有限公司生产；导电炭黑；增稠剂 2130；丝网，80 目，重庆汇新丝印生产。

1.2 制备工艺流程

超材料吸波体制备流程：超材料谐振单元与排列方式设计→制作丝网→配料→丝网印制→干燥。

复合吸波体制备流程：超材料吸波体与传统吸波材料粘结→干燥。

1.3 谐振单元与排列方式设计

共设计了 4 类 8 种超材料谐振单元，4 类谐振单元分别为：六边形类、开口田字格类、开口嵌套六边形类、正方形嵌圆类。每类图案通过设计不同的图案样式或调整尺寸大小又各包含 2 种，共设计 8 种谐振单元图案，见图 1—5。

六边形类超材料图案结构参数为：边长 10 mm/25 mm，线宽 4 mm/10 mm，单元图案之间间隔 2 mm。图案设计及排列方式见图 1，将图 1a 记为 1#，图 1b 记为 2#。

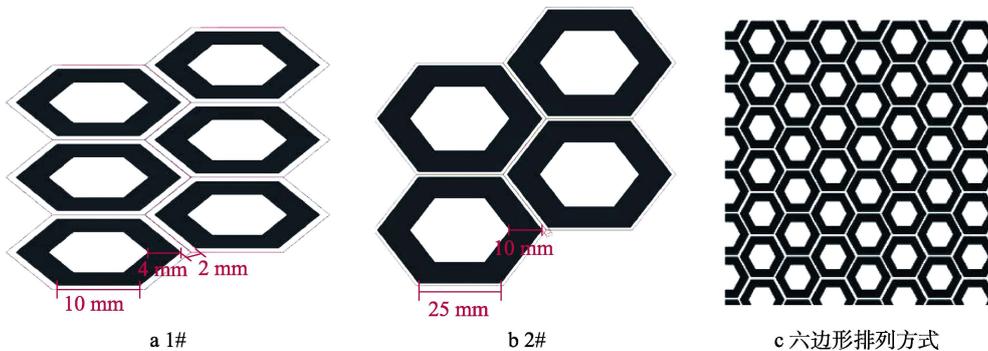


图 1 六边形类图案

Fig.1 Hexagon type pattern: a) 1#, b) 2#, c) the arrangement of hexagon

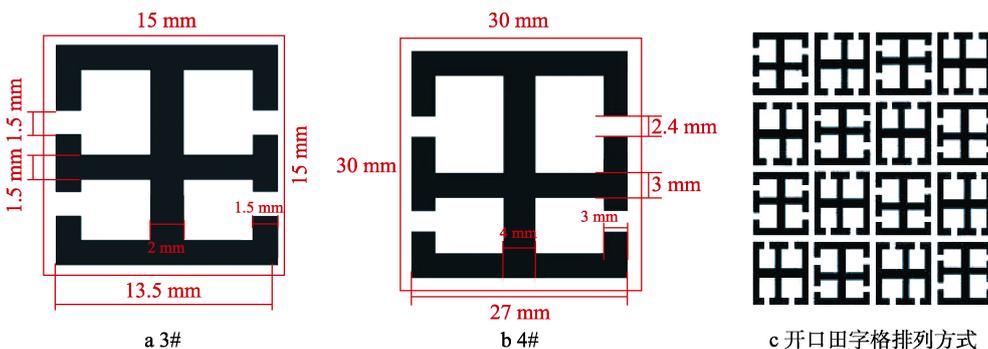


图 2 开口田字格类图案

Fig.2 Opening field-character shape type pattern: a) 3#, b) 4#, c) the arrangement of opening field-character shape

开口田字格类超材料图案结构参数为：边长 13.5 mm/27 mm，中间竖边线宽 2 mm/4 mm，其余线宽均为 1.5 mm/3 mm，开口处间隔 1.5 mm/2.4 mm，单元尺寸 15 mm×15 mm/30 mm×30 mm，单元图案之间按 90°旋转排列，具体见图 2。将图 2a 记为 3#，图 2b 记为 4#。

设计两层嵌套开口六边形。外层六边形边长 6.5 mm，内层六边形边长 4 mm，线宽 1 mm，开口间距 1.5 mm，单元图案尺寸 15 mm×15 mm，单元图案之间按 90°旋转排列，见图 3。将图 3a 记为 5#。

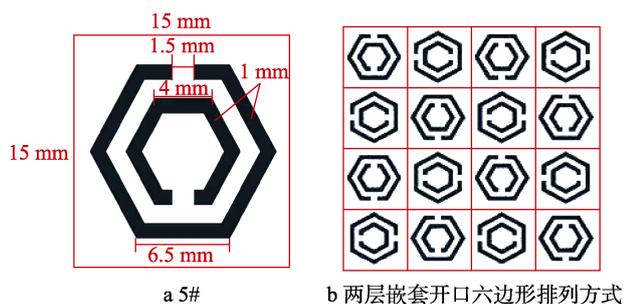


图 3 两层嵌套开口六边形类图案

Fig.3 Two-layer nested opening hexagon type pattern: a) 5#, b) the arrangement of two-layer nested opening hexagon

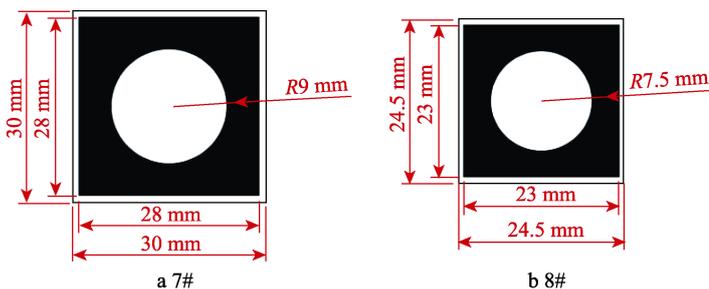


图 5 正方形嵌圆类图案

Fig.5 Square nested round type pattern: a) 7#, b) 8#, c) the arrangement of square nested round

1.4 复合吸波体的制备

将设计的超材料图案印制成 300 mm×300 mm 的丝网。配置不同导电碳黑含量梯度的涂料，称量水性粘合剂 3211、导电碳黑、增稠剂 2130，导电碳黑与水性粘合剂百分比例分别为 15%、30%、60%、80%。选取厚度为 0.5 mm 的 FR-4 ($\epsilon_r=3.8$)、厚度为 2.8 mm 的 PVC 泡沫 ($\epsilon_r=1.3$) 作为介质基，其尺寸为 300 mm×300 mm。将 4 种不同配比的涂料分别用丝网模板印制在介质基板上，印制图案厚度为 0.1 mm。将超材料吸波体与传统吸波材料相粘结，传统吸波材料采用自制的聚氨酯吸波泡沫，厚度为 10 mm，尺寸与超材料吸波体保持一致，为 300 mm×300 mm，复合吸波体结构见图 6 和图 7。

1.5 性能测试

复合吸波体的反射率性能测试采用弓形法进行。

设计三层嵌套开口六边形。外层六边形边长 14 mm，中层六边形边长 10 mm，内层六边形边长 6 mm，外两层线宽 2 mm，内层线宽 1.5 mm，开口间距 1.5 mm，单元图案尺寸 30 mm×30 mm，单元图案之间按 90°旋转排列，如图 4 所示。将图 4a 记为 6#。

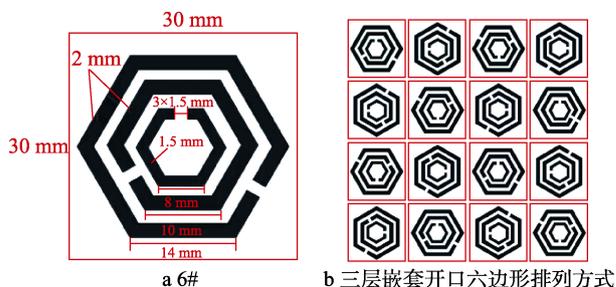


图 4 三层嵌套开口六边形类图案

Fig.4 Three-layer nested opening hexagon type pattern: a) 6#, b) the arrangement of three-layer nested opening hexagon

设计正方形边长 23 mm/28 mm，内圆半径 7.5 mm/9 mm，单元图案尺寸 24.5×24.5 mm/30×30 mm，图案设计及排列方式见图 5。将图 5a 记为 7#，图 5b 记为 8#。

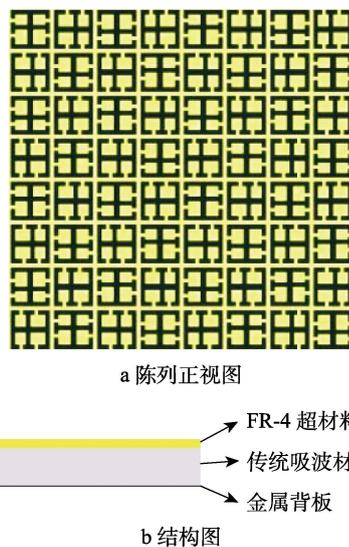


图 6 FR-4 介质基板复合吸波体结构示意图

Fig.6 Structure diagrams of composite absorber with FR-4 dielectric substrate: a) exhibition front view, b) structure chart

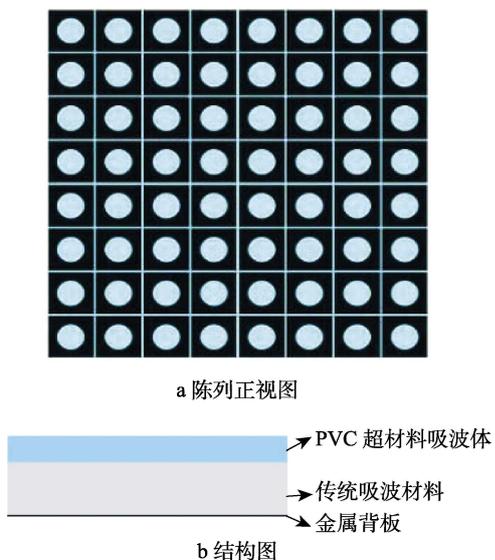


图 7 PVC 介质基板复合吸波体结构示意图

Fig.7 Structure diagrams of composite absorber with PVC dielectric substrate: a) exhibition front view, b) structure chart
 矢量网络分析仪是 Agilent 公司生产的 E8363B, 测试复合吸波体 2~18 GHz 范围内垂直入射状态下的吸收性能, 天线入射角为 3.5°, 见图 8。



图 8 弓形法测试设备
 Fig.8 Bow test equipment

2 结果与分析

2.1 相同配比、相同图案、不同介质基板

2.1.1 六边形类复合吸波体测试结果

将 1#、2#两种尺寸六边形图案按丝网印刷工艺分别印制在 PVC 泡沫、FR-4 两种基材上, 与传统吸波材料粘结, 制作出超材料复合吸波体, 其雷达波反射率曲线见图 9。由图 9a 可知, 两种基材上的吸波体反射率曲线上均出现了 3 个吸收峰值。介质基板为 FR-4 的复合吸波体的峰值分别为 -20.41、-15.32、-30.48 dB, 反射率低于 -15 dB 的带宽为 33.88%; 而介质基板为 PVC 的复合吸波体的峰值分别为 -38.12、-17.44、-12.18 dB, 反射率低于 -15 dB 的带宽为 19.53%。在 2~18 GHz 频率范围内, FR-4 复合吸波体相比 PVC 低频、中频峰值衰减减弱, 而在高频时吸波性能大幅增强, 全频范围内反射率低于 -15 dB 的带宽拓展了 14.35%。

图 9b 的吸波体均为多频带曲线, 介质基板为 FR-4 的复合吸波体的峰值分别为 -28.53、-18.17、-22.27 dB, 反射率低于 -15 dB 的带宽为 31.5%; 而介质基板为 PVC 的复合吸波体的峰值分别为 -34.32、-12.79、-10.47 dB, 反射率低于 -15 dB 的带宽为 4%。在 2~18 GHz 频率范围内, FR-4 复合吸波体低频雷达波吸收弱于 PVC 基板, 但在 9.64 GHz 后, 其雷达波吸收能力大幅增强, 全频段低于 -15 dB 的带宽拓宽了 27.5%。

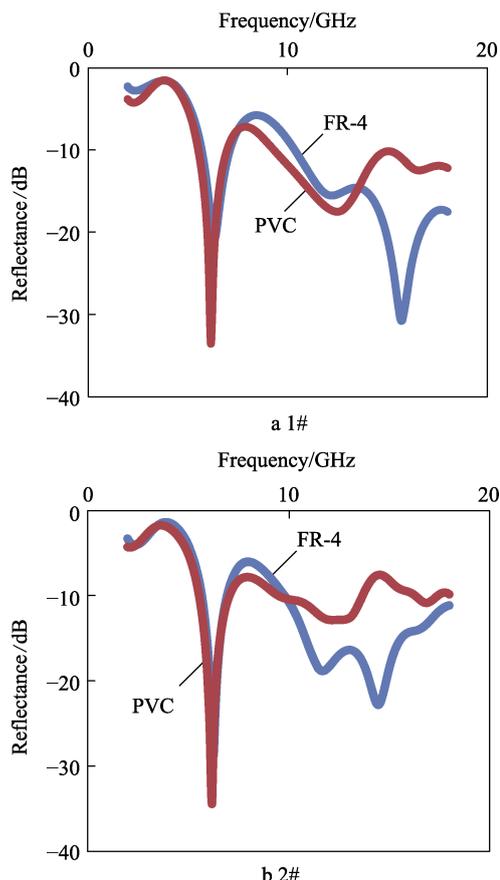


图 9 六边形类超材料复合吸波体雷达波反射率
 Fig.9 Radar reflectivity test curves of metamaterial composite absorbers with hexagon type

2.1.2 开口田字格类复合吸波体测试结果

将 3#、4#开口田字格类超材料单元图案, 按 90° 旋转排列、丝网印刷工艺印制在 PVC 泡沫、FR-4 两种介质基板上, 与传统吸波材料粘结, 制作的超材料复合吸波体, 雷达波反射率测试结果见图 10。由图 10a 可知, 两种基材的小尺寸田字格复合吸波体的反射率曲线均出现了 3 个吸收峰值, 介质基板为 FR-4 的复合吸波体峰值分别为 -34.65、-19.14、-38.42 dB, 反射率低于 -15 dB 的带宽为 40%; 而介质基板为 PVC 的峰值分别为 -39.73、-13.72、-11.10 dB, 反射率低于 -15 dB 的带宽为 4%。在 2~18 GHz 频率范围内, FR-4 复合吸波体低频雷达波吸收弱于 PVC 基板, 但在 9.48 GHz 后, 雷达波吸收能力大幅增强, 中高频

低于-15 dB 的带宽拓宽 36%。

图 10b 为大尺寸开口田字格雷达波反射率测试曲线,两种基材的吸波体反射率曲线均出现了 3 个吸收峰值。介质基板为 FR-4 的复合吸波体峰值分别为 -31.69、-14.47、-26.69 dB,反射率低于-15 dB 的带宽为 23.76%;而介质基板为 PVC 的峰值分别为 -42.01、-16.19、-11.57 dB,反射率低于-15 dB 的带宽为 17.65%。在 2~18 GHz 频率范围内,FR-4 复合吸波体低频、中频雷达波吸收弱于 PVC 基板,但在 13.6 GHz 之后,雷达波吸收能力大幅增强,全频段低于-15 dB 的带宽拓宽了 6.11%。

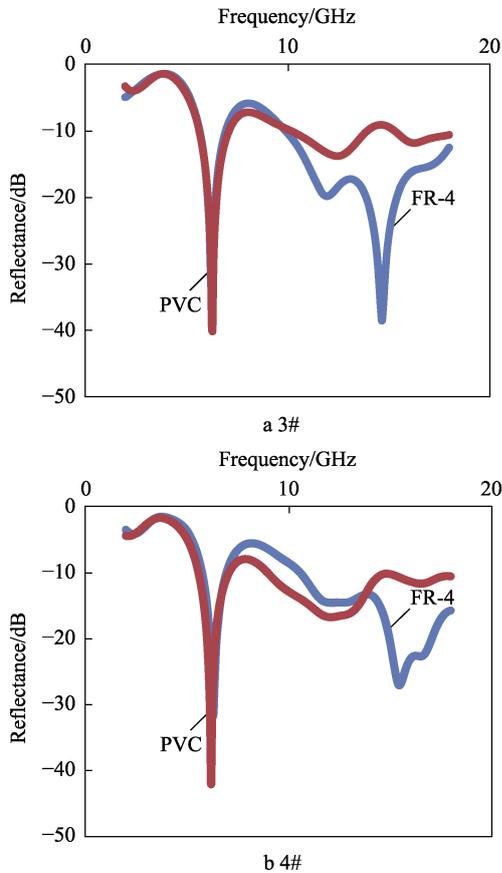


图 10 开口田字格类超材料复合吸波体雷达波反射率
Fig.10 Radar reflectivity test curves of metamaterial composite absorbers with opening field-character shape type

2.1.3 开口嵌套六边形类复合吸波体测试结果

将设计的 5#、6#开口嵌套六边形类超材料,采用丝网印刷工艺印制在 PVC 泡沫、FR-4 两种介质基板上,与传统吸波材料粘结,制作的超材料复合吸波体的雷达波反射率测试曲线见图 11。由图 11a 可知,两层嵌套开口六边形吸波体的雷达波反射率曲线均为多频带曲线。介质基板为 FR-4 的复合吸波体反射率曲线选取 3 个峰值分别为-31.44、-15.79、-40.49 dB,反射率低于-15 dB 的带宽为 32%;而介质基板为 PVC 的峰值分别为-27.75、-13.09、-12.98 dB,反射率低

于-15 dB 的带宽为 3.5%。在 2~18 GHz 频率范围内,FR-4 复合吸波体雷达波吸波均优于 PVC 基板,但全频段低于-15 dB 的带宽拓宽了 28.5%。

图 11b 三层嵌套开口六边形环超材料,吸波体雷达波反射率曲线均为多频带曲线。介质基板为 FR-4 的复合吸波体反射率曲线选取三个峰值分别为 -30.28、-14.55、-25.43 dB,反射率低于-15 dB 的带宽为 24%;而介质基板为 PVC 的峰值分别为-24.27、-15.46、-15.22 dB,反射率低于-15 dB 的带宽为 15.5%。在 2~18 GHz 频率范围内,FR-4 复合吸波体雷达波吸波仅在中频段吸波性能低于 PVC,其余频段均表现出更强的发射衰减,全频段低于-15 dB 的带宽拓宽了 8.5%。

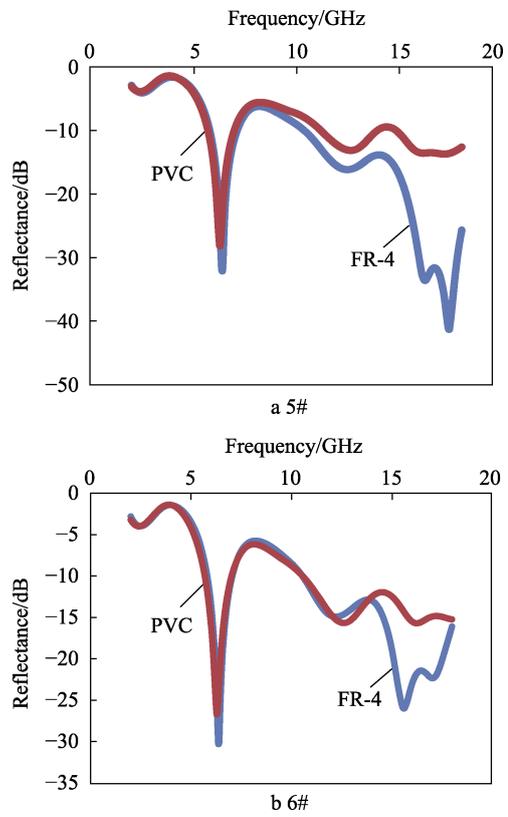


图 11 开口嵌套六边形类超材料复合吸波体雷达波反射率
Fig.11 Radar reflectivity test curves of metamaterial composite absorbers with nested opening hexagon type

2.1.4 正方形嵌圆类复合吸波体测试结果

7#、8#方块嵌圆类谐振单元,采用丝网印刷工艺印制在 PVC 泡沫、FR-4 两种介质基板上,与传统吸波材料粘结,制作的超材料复合吸波体的雷达波反射率测试曲线见图 12。大尺寸的方块嵌圆吸波体雷达波反射率曲线见图 12a,其均为多频带曲线。介质基板为 FR-4 的复合吸波体反射率曲线选取 3 个峰值分别为-25.46、-14.77、-26.12 dB,反射率低于-15 dB 的带宽为 26%;而介质基板为 PVC 的峰值分别为

-34.16、-17.80、-11.24 dB, 反射率低于-15 dB 的带宽为 21%。在 2~18 GHz 频率范围内, FR-4 复合吸波体低频、中频雷达波吸收弱于 PVC 基板, 但在 13.24 GHz 之后, 雷达波吸收能力大幅增强, 全频段低于-15 dB 的带宽拓宽了 5%。

图 12b 小尺寸吸波体雷达波反射率曲线均为多频带曲线。介质基板为 FR-4 的复合吸波体反射率曲线选取 3 个峰值分别为-27.98、-15.20、-29.29 dB, 反射率低于-15 dB 的带宽为 34%; 而介质基板为 PVC 的峰值分别为-44.80、-16.24、-10.44 dB, 反射率低于-15 dB 的带宽为 18%。在 2~18 GHz 频率范围内, FR-4 复合吸波体低频、中频雷达波吸收弱于 PVC 基板, 但在 11.84 GHz 之后, 雷达波吸收能力大幅增强, 全频段低于-15 dB 的带宽拓宽了 16%。

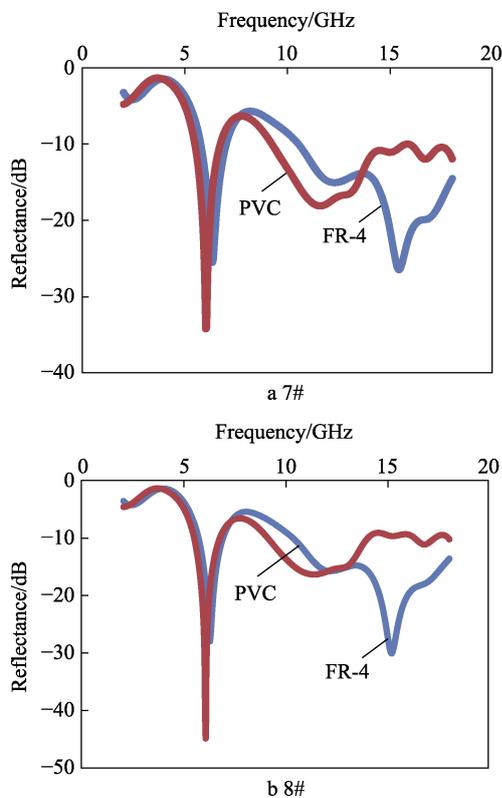


图 12 方块嵌圆类复合吸波体雷达反射率
Fig.12 Radar reflectivity test curves of composite absorbers with square nested round type

2.1.5 结果分析

除介质基板外, 2.1 小节中每类超材料复合吸波体均保持了其余条件参数一致。梳理每组测试结果, 可得出一些共性: 首先在 6 GHz 附近低频均出现了吸收峰值; 其次基于 FR-4 介质基板的复合吸波体 14~17 GHz 高频频段吸波性能均大幅优于 PVC 泡沫介质基板的, 合格频段拓宽。两种介质基板的复合吸波体, 区别在于介质基板的介电常数与厚度, FR-4 ($\epsilon_r=3.8$) 厚度为 0.5 mm、PVC 泡沫 ($\epsilon_r=1$) 厚度为 2.8 mm。

使用 3 种厚度相同、介电常数不同的 FR-4 材料

(厚度为 0.5 mm, 介电常数 ϵ_r 分别为 3.2、3.5、3.8,) 制作相同谐振单元的复合吸波材料。从图 13a 可见, 随着基板介电常数的增大, 吸收频带在 14~17 GHz 反射率高频部分峰值逐渐减小, 低频基本不变。

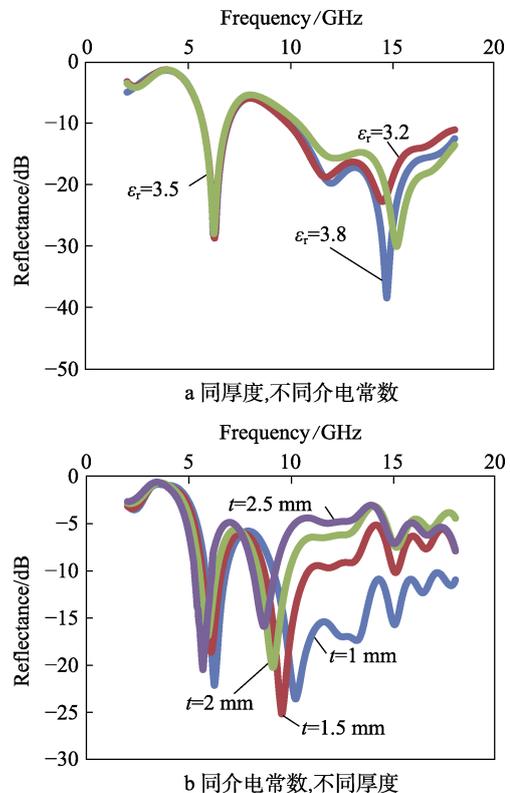


图 13 雷达波反射率测试曲线对比图
Fig.13 Comparison charts of radar reflectivity test curves

使用 4 种不同厚度, 介电常数 ϵ_r 均为 3.8 的 FR-4 材料 (厚度 t 分别为 1、1.5、2、2.5 mm) 制作相同谐振单元的复合吸波材料, 从图 13b 可见, 随着基板厚度的逐渐增大, 吸收频带的 8~18 GHz 中高频部分衰减逐渐减小, 低频部分变化不大; 并且随着厚度增加, 峰值向低频移动。

单独将传统吸波材料进行雷达波反射率测试, 见图 14。在 6.44 GHz 出现了-28.489 dB 的吸收峰值, 其余频段反射率均高于-12 dB, 曲线为窄带强吸收。复合超材料均在 6 GHz 附近出现了相同的强吸收峰, 而中高频反射率均大幅好于传统吸波材料。说明复合吸波体对雷达波的损耗机理来源于介质损耗与欧姆损耗, 传统吸波材料贡献在低频的窄带介质损耗, 超材料吸波体在中、高频贡献了很大的欧姆损耗。

2.2 相同配比、相同介质基体、不同谐振单元

将在 FR-4 介质基板上制作的 8 种谐振单元的复合吸波体, 进行雷达波反射率曲线对比, 见图 15, 选取低、中、高频峰值及合格带宽, 见表 1。制作的 4 类共 8 种复合吸波体, 保持了相同的材料结构、传

统吸波材料与介质基板相同的电磁参数及厚度等,其在吸波性能上的差别源于超材料谐振单元图案及其排列方式的不同。综合衰减强度与合格带宽,5#与3#谐振单元复合吸波体,在2~18 GHz具有更突出的吸波性能。5#与3#复合吸波体所设计的谐振单元尺寸、开口方向及大小、单元间的排列方式,使超材料结构与金属背板之间形成的电容电感电阻达到某一最佳值,因此电路谐振最强,吸收带宽最大。

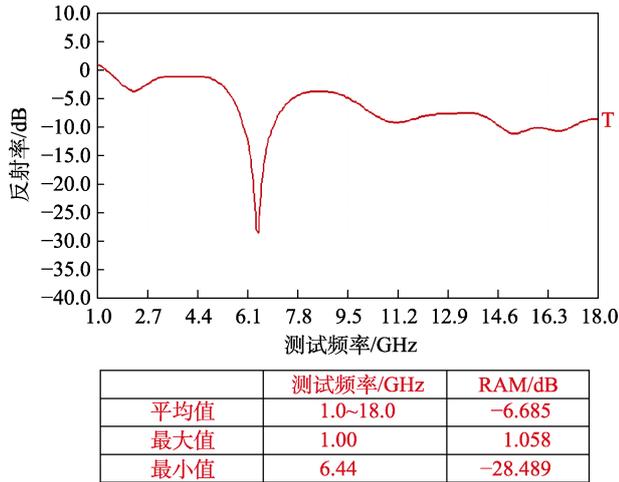


图 14 传统雷达吸波材料雷达波反射率测试
Fig.14 Radar reflectivity test curves of traditional radar absorbing materials

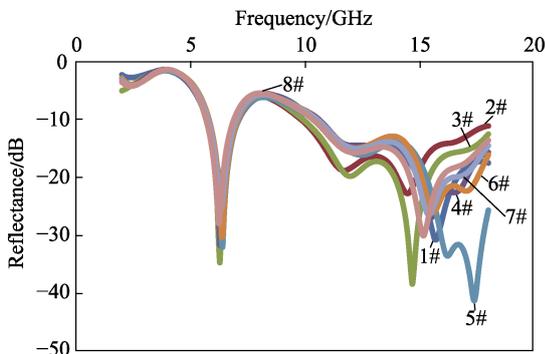


图 15 不同谐振单元复合吸波体测试曲线
Fig.15 Test curves of composite absorbers with different resonance units

表 1 复合吸波体反射率测试结果表

复合吸波体	频点/GHz, 峰值/dB			反射率低于-20 dB的带宽/%
	频点 1, 峰值 1	频点 2, 峰值 2	频点 3, 峰值 3	
1#	6.2, -19.81	12.08, -15.79	15.64, -30.48	11.97
2#	6.24, -28.53	11.56, -18.66	14.4, -22.66	7.48
3#	6.28, -34.65	11.8, -19.57	14.68, -38.42	11.72
4#	6.36, -31.44	12.04, -14.87	15.4, -26.53	14.96
5#	6.4, -32.0	12.44, -16.13	16.16, -33.4	19.2
6#	6.36, -30.28	12.08, -14.9	15.52, -25.75	17.46
7#	6.32, -27.31	12.08, -15.79	15.4, -26.53	11.72
8#	6.24, -27.98	12.08, -15.79	15.12, -29.83	10.72

2.3 相同图案、相同介质基体、不同涂料配比

分别配置含导电碳黑和树脂不同含量的涂料(导电碳黑的质量分数分别为15%、30%、60%、80%),选用3#与5#图案印制在FR-4介质基体上,各制作4种不同涂料配方的复合吸波体。从图16可见,4组不同配比的5#、3#谐振单元复合吸波体,雷达波反射率曲线均为多频带曲线,表2选取了反射率曲线中低、中、高频三个吸波峰值及雷达波衰减低于-20 dB的带宽。

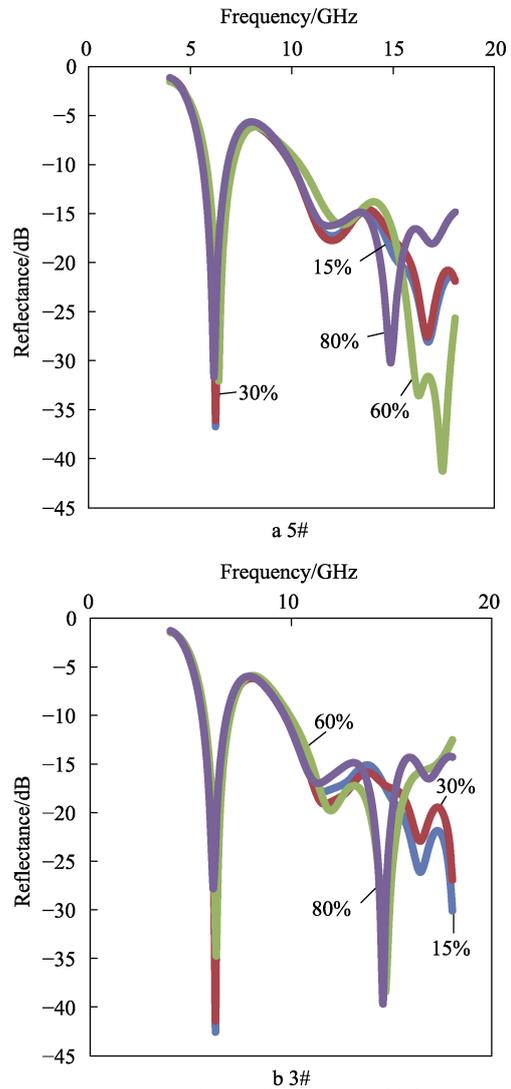


图 16 不同导电碳黑含量反射率测试
Fig.16 Reflectivity test curves of different contents of conductive carbon black

随着涂料配方中导电碳黑含量的增加,6 GHz附近低频吸收峰值有所下降,复合吸波体在低频对雷达波的衰减能力有所下降;但在高频14~17 GHz频段,随着导电碳黑含量增加,峰值向低频移动并且吸收峰值增加,材料对雷达波的吸收能力增强;但在碳黑含量增加到60%以上后,吸收性能已没有明显变化,并且带宽有所下降。

该吸波体对于电磁波的吸收主要源于谐振单元的表面电阻。测试谐振单元的表面电阻值, 15%的导电炭黑含量的谐振单元表面电阻值为 3000 Ω/sq , 30%

的为 300 Ω/sq , 60%的为 100 Ω/sq , 80%的为 50 Ω/sq 。可见复合吸波体有最佳方阻区间, 在达到最佳方阻值时, 电路谐振达到最强, 吸波峰值与带宽达到最大。

表 2 复合吸波体反射率测试结果表
Tab.2 Test results of reflectivity of composite absorbers

样品	导电炭黑 质量分数/%	频点/GHz, 峰值/dB			反射率低于 -20 dB 的带宽/%
		频点 1, 峰值 1	频点 2, 峰值 2	频点 3, 峰值 3	
5#谐振单元 复合吸波体	15	6.24, -36.73	11.8, -17.22	16.6, -27.87	32.17
	30	6.24, -36.09	11.8, -17.7	16.52, -27.09	28.68
	60	6.36, -31.44	12.12, -16.14	16.12, -33.1	31.67
	80	6.16, -31.66	11.44, -16.03	14.8, -29.96	21.2
3#谐振单元 复合吸波体	15	6.24, -42.52	11.48, -17.7	16.24, -25.44	30.67
	30	6.24, -41.33	11.6, -18.74	16.24, -22.46	24.44
	60	6.28, -34.65	11.8, -19.57	14.52, -38.11	24.19
	80	6.12, -27.78	11.12, -16.78	14.56, -39.62	20.45

3 结论

1) 超材料复合吸波体比传统吸波材料, 在 11~17 GHz 频段雷达波反射率降低了-5~-30 dB。

2) 复合超材料吸波体对电磁波的损耗来源于传统材料的介质损耗与超材料吸波体的欧姆损耗, 并且能将两种损耗在不同频段进行融合。

3) 介质基板的介电常数与厚度会影响材料吸波性能, 介电常数增加, 厚度降低, 14~17 GHz 吸收性能增强。超材料结构与金属背板之间形成的电容电感电阻达到某一最佳值, 电路谐振最强, 吸收带宽最大。导电炭黑含量有最佳区间, 表面电阻达到最佳匹配值, 吸波性能最强。

参考文献:

- [1] 朱元忠, 李玮祥, 马凤珍, 等. 低频“超材料”结构不同周期性排列方式特性分析[J]. 工矿自动化, 2015, 41(10): 27-31.
ZHU Yuan-zhong, LI Wei-xiang, MA Feng-zhen, et al. Characteristic Analysis of Different Periodic Arrangement Ways of Low-frequency Metamaterial Structure[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(10): 27-31.
- [2] 院伟. 磁性吸波材料低频带拓展研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
YUAN Wei. Extending the Low-frequency Absorption Bandwidth of Magnetic-based Composites[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [3] 王莹, 程用志, 聂彦, 等. 基于集总元件的低频宽带超材料吸波体设计与实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(7): 1-5.
WANG Ying, CHENG Yong-zhi, NIE Yan, et al. Design and Experiments of Low-frequency Broadband Metamaterial Absorber Based on Lumped Elements[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(7): 1-5.
- [4] 周卓辉, 刘晓来, 黄大庆, 等. 一种基于十字镂空结构的低频超材料吸波体的设计与制备[J]. 物理学报,

2014, 63(18): 1-8.

- ZHOU Zhuo-hui, LIU Xiao-lai, HUANG Da-qing, et al. Design and Preparation of a Low Frequency Absorber Based on Hollowed-out Cross-shaped Meta-material Structure[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(18): 1-8.
- [5] 张泽奎. 基于电阻膜与超材料的超薄宽频吸波体设计[J]. 功能材料, 2018, 49(4): 04213-04216.
ZHANG Ze-kui. Design of an Ultrathin and Wideband Absorber Based on Resistance Film and Metamaterial[J]. Functional Materials, 2018, 49(4): 04213-04216.
- [6] 张辉彬. 基于电磁谐振的宽频周期吸波结构设计[D]. 西安: 电子科技大学, 2013.
ZHANG Hui-bin. Design of Broadband Periodic Absorbing Structure Based on Electromagnetic Resonances[D]. Xian: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [7] 惠忆聪, 王春齐, 黄小忠. 基于电阻型频率选择表面的宽带雷达超材料吸波体设计[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 1-6.
HUI Yi-cong, WANG Chun-qi, HUANG Xiao-zhong. Design and Fabrication of Broadband Radar Metamaterial Absorber Based on the Resistor FSS[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(21): 1-6.
- [8] 程用志. 调控电磁特性超材料设计及其性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
CHENG Yong-zhi. The Study on Metamaterial Design and Performance for Manipulating Electromagnetic Properties[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015.
- [9] 杨进. 超材料的基体裁剪与吸波频段拓展研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
YANG Jin. Broadband Composite Metamaterial Absorbers by Tailoring Substrates[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [10] 董志涛, 王强, 王岩, 等. 超材料吸波体设计方法研究进展[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(9): 136-141.
DONG Zhi-tao, WANG Qiang, WANG Yan, et al. Review on Design Methods of Meta-material Absorbers[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(9): 136-141.