

基于双磁介质层复合的超材料低频吸波体研究

李 泽¹, 孙海涛², 程兆刚², 闫 晶¹

(1. 北京特种工程设计研究院, 北京 100028)

(2. 陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄 050003)

摘要: 本研究将磁性吸波涂层融入至超材料的结构设计中, 得到了一种新型低频复合超材料吸波体, 吸波体由环形电阻膜、双层磁性吸波涂层和金属背板组成。采用 CST 仿真软件计算了超材料吸波体的吸收性能, 研究了吸波体各个结构参数对吸收性能的影响。仿真结果表明, 设计的超材料吸波体厚度为 2.5 mm 时, 在 1.9 和 4 GHz 处存在 2 个吸收峰, 在 1.59~6.59 GHz 频率范围内反射损耗低于 -8 dB, 吸收带宽达到 5 GHz。通过吸波体电磁场分布对吸波机理进行了讨论。结果表明, 吸波体低频吸收带宽的增加是由于表面的电阻膜图案改变了超材料吸波体的电场分布和磁场分布, 促进了磁介质层的损耗。最后制备了吸波体样品并进行了反射率测试, 实物测试结果与仿真结果基本一致, 说明设计制备的吸波体具有优异的低频吸波性能, 吸波带宽相比磁性吸波涂层大幅提高。

关键词: 超材料吸波体; 磁性材料; 低频吸波; 结构设计

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)01-0398-05

随着雷达探测技术的发展, 利用低频电磁波进行目标搜索与识别已经成为未来战场的重要手段, 因此研究低频吸波材料对于提升武器装备在战场中的生存能力具有重要意义。超材料 (metamaterial, MMA)^[1-3] 是进入 21 世纪后一种新兴的人工复合结构材料, 由底层反射层、中间介质层和表面导电层组成, 其能够通过微结构设计以及组成周期阵列, 实现对电磁波的特殊响应, 从而获得一系列独特的电磁特性^[4]。超材料可通过微结构间的耦合作用控制电磁波的传输进而实现对电磁波吸收频段的调节, 为解决低频吸波问题提供了新的方向。与传统吸波材料相比, 超材料具有厚度薄, 质量轻, 吸收强的特点, 但其谐振吸收的特性也使得吸收频带往往较窄。随着对超材料研究的深入, 使用磁性吸波材料作为介质层能够实现一定程度的宽带吸波^[5-7], 这一结论进一步拓展了超材料的设计思路。目前已有一些研究人员开展这方面的工作, Hui 等^[8]将磁性吸波涂层作为超材料介质层进行了整体设计, 结构依次由针形图案层、磁介质层与金属背板组成。研究发现, 相较于单一磁性吸波涂层, 复合结构的低频吸收效果显著提升。Zhang 等^[9]采用金属结构的十字箭头单元, 以 FeCo 合金粉的橡胶贴片为磁介质层设计的超材料吸波体能够对 C 波段实现低于 -8 dB 吸收。Cheng 等^[10]将 FeCo 橡胶层叠加于金属十字超材料表面, 在 2.5~5 GHz 频率范围内反射率均低于

-10 dB。郭飞等^[11]设计了一种磁电混合介质的超材料吸波体, 在 2.5 mm 厚度时能够对 10 GHz 宽频范围内电磁波有效吸收。

将磁性吸波材料作为介质层设计超材料吸波结构在拓展低频吸波带宽方面取得了一定的成果, 然而单一磁介质层的超材料吸波体其吸波性能受介质层电磁参数的影响, 能够拓展的吸波带宽有限。若使用双磁介质层进行超材料的结构设计, 在水平谐振单元设计的基础上又引入垂直方向的厚度设计, 可以丰富设计手段, 进一步提高吸波体的阻抗特性, 实现低频吸波带宽的大幅提升。

本研究选用经过片化处理的羰基铁粉 (CIP) 与 FeSiAl 合金粉组成双磁介质层, 并在此基础上加入电阻膜结构组成超材料, 将传统吸波材料的电磁损耗与超材料的谐振损耗相结合, 设计并制备了一种环形图案电阻膜的低频超材料吸波体, 分析了超材料结构参数对吸波体吸波性能的影响, 研究了超材料吸波体的吸波机理。通过样品制备与吸波性能测试表明, 设计的超材料吸波体具有厚度小, 吸收频带宽, 且结构简单易制备等优点。

1 吸波体的结构与制备

1.1 实验材料

超材料吸波体表面电阻膜材料选用导电银浆 (方阻值为 0.01 Ω/\square), 金属背板为薄不锈钢板。两磁介质

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 装备预研重点实验室基金 (9140C870401140C87366)

作者简介: 李 泽, 男, 1990 年生, 博士, 助理研究员, 北京特种工程设计研究院, 北京 100028, 电话: 010-66365965, E-mail: lzlz2011@163.com

层材料分别为球磨 6 h 后的羰基铁粉和球磨 4 h 后的 FeSiAl 合金粉, 电磁参数如图 1 所示, 图中 ϵ' 、 ϵ'' 、 μ' 、 μ'' 分别代表材料介电常数实部、虚部与磁导率实部、虚部。可见片状 FeSiAl 合金磁导率和介电常数虚部在低频范围均显著高于羰基铁, 对低频电磁波的损耗能力更强, 低频吸波性能更优异。而羰基铁的磁导率虚部在高频率范围更高, 且介电常数与磁导率差值更小, 高频吸波性能及阻抗匹配性能更好^[12]。

1.2 吸波体的结构设计

本研究设计的双磁介质层超材料结构由上至下依次为圆环电阻膜, 片状羰基铁介质层, 片状 FeSiAl 合金层以及金属背板, 单元结构如图 2 所示。使用 CST 频域求解器对吸波体进行数值仿真分析, 限定 x 、 y 方向为超材料结构单元的周期边界, 电场沿 y 轴方向, 磁场沿 x 轴方向, 电磁波沿 z 轴负方向垂直入射。

超材料吸波体的结构参数为: 单元周期长度 $P=22.5$ mm, 双磁性吸波涂层总厚度 $h=2.5$ mm, 两磁介质层厚度 h_1 、 h_2 以及圆环半径 R , 宽度 W 作为变量讨论。在仿真过程中, 为了使仿真结果贴近于实际, 一般把电阻膜厚度设为 0, 另外由于 GHz 频段电磁波的趋肤深度极小, 采用的金属背板厚度远大于趋肤深度, 故不对金属背板厚度进行研究。

1.3 超材料样品的制备与测试

超材料吸波体的制备主要包含磁介质层的涂刷制备与表面电阻膜的丝网印刷制备。首先, 使用不同标号砂纸打磨金属背板; 其次制备磁介质层, 按照质量比 5:1:3:20 分别称取环氧树脂、固化剂、稀释剂和

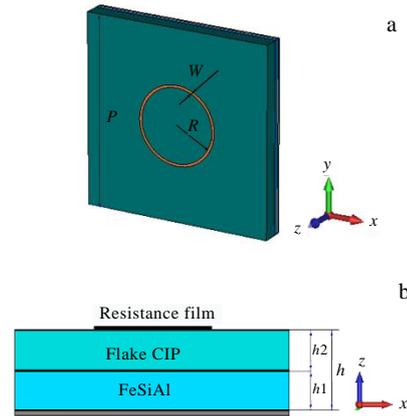


图 2 双磁介质层超材料

Fig.2 Metamaterial with two magnetic dielectric layers: (a) structural unit and (b) section view

片状 FeSiAl 合金, 充分混合并搅拌均匀, 将配置好的涂料涂刷在金属背板表面, 涂刷完成后放置于真空干燥箱中 60 °C 固化 2 h, 反复多次涂刷后测量涂层厚度确保其与设计厚度一致。与 FeSiAl 介质层制备方法相同, 按照质量比 5:1:1:20 依次添加环氧树脂、固化剂、稀释剂和片状羰基铁并均匀混合, 按照厚度需求进行多次涂刷制备; 最后通过半自动丝网印刷机, 在双磁介质层表面印刷圆环导电银浆图案。

采用弓形反射法测试超材料吸波体样品的反射率, 选择能够发射与接收 0.5~8 GHz 电磁波的雷达天线与矢量网络分析仪相连接, 通过分析雷达天线数据得到样品的吸波性能。

2 分析与讨论

双磁介质层超材料的反射率曲线如图 3 所示, 图中 RL 为材料的电磁波反射率。可以看到, 在同等厚度下, 无论是片状羰基铁还是 FeSiAl 合金, 单一磁介质层的吸波带宽均小于两者组合的双磁介质层。而组成超材料后, 吸波带宽进一步提升。双磁介质层超材料由双吸收峰提供宽频吸波性能, 两吸收峰频率分别为 $f_1=1.9$ GHz, $f_2=4$ GHz, 低于 -8 dB 吸波频带为 1.59~6.59 GHz, 能够对 5 GHz 带宽范围内电磁波实现 84% 衰减, 对比双磁介质层 -8 dB 反射率的吸波频带 2.1~6.15 GHz, 有效吸收频率同时向低频和高频范围拓展约 1 GHz。

2.1 吸波特性分析

在双磁介质层超材料结构中, 不仅电阻膜结构尺寸会影响超材料的电磁谐振, 双磁介质层厚度同样也会造成超材料阻抗的改变, 因此下面分别对电阻膜尺寸参数以及双磁介质层厚度与吸波性能间的关系进行

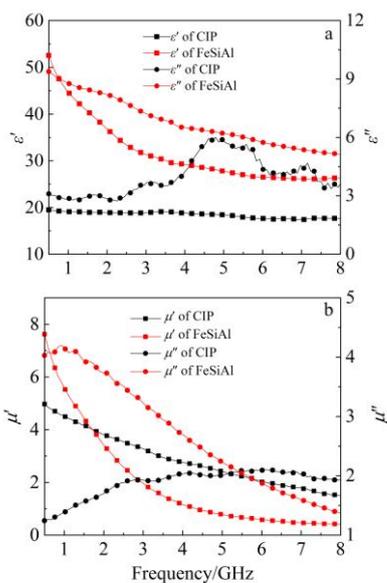


图 1 片状羰基铁粉与片状 FeSiAl 合金的电磁参数

Fig.1 Electromagnetic parameters of flake CIP and flake FeSiAl alloy: (a) permittivity and (b) permeability

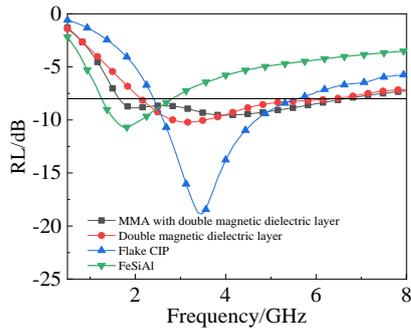


图 3 双磁介质层超材料的反射率曲线

Fig.3 Reflection curves of metamaterial with two magnetic dielectric layers

研究。首先计算了圆环电阻膜半径 R 取 3, 3.5, 4, 4.5 mm 时超材料的反射率, 如图 4 所示。可以看出, 随着圆环半径增大, 低频吸收峰强度逐渐减弱, 吸收峰频率降低, 而高频吸收峰保持恒定, 双吸收峰逐渐分离, 通过两吸收峰叠加, 在圆环半径为 4 mm 时, 有最大的吸波带宽。这是因为, 受等效电容的影响, 半径增大相邻两圆环电阻膜组成的等效电容就越大, 超材料在低频的容性越强, 从而与介质层的匹配频率越低, 因此导致低频吸收峰向更低频率移动^[13]。

图 5 为双磁介质层超材料不同圆环线宽度 ($W=0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ mm) 的反射率曲线。圆环宽度对双磁介质层超材料的吸波性能影响较小, 随着圆环宽度逐渐增大, 两吸收峰频率基本保持不变, 而低频吸收峰与高频吸收峰的吸收强度均有小幅降低, 组成的吸波带宽减小。可以看出, 对于磁介质超材料电阻膜面积越小越有助于吸波带宽的提升。这是因为, 较小的圆环电阻膜宽度, 不仅能提升谐振效果, 还可更大程度地降低电阻膜对电磁波的反射, 促进低频电磁波吸收。受丝网印刷工艺的限制, 确定圆环电阻膜线宽 $W=0.2$ mm。

最后, 研究双磁介质层厚度对超材料吸波体反射率的影响, 固定电阻膜结构参数与总厚度 2.5 mm 不

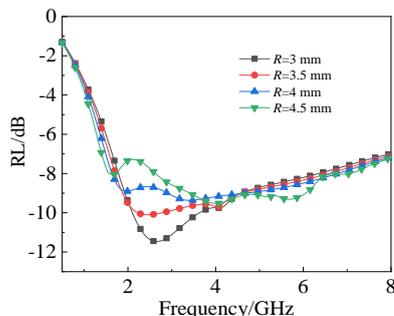


图 4 不同圆环半径双磁介质层超材料的反射率曲线

Fig.4 Reflection curves of metamaterial with different ring radii

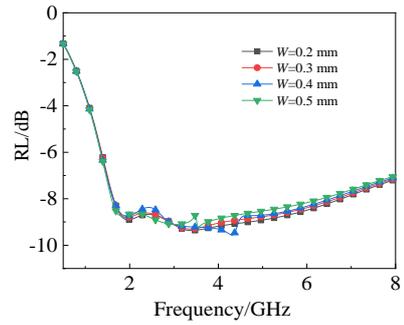


图 5 不同线宽双磁介质层超材料的反射率曲线

Fig.5 Reflection curves of metamaterial with different widths

变, 依次计算不同 FeSiAl 介质层厚度 $h_1=1, 1.25, 1.5, 1.75, 2$ mm 时超材料的反射率, 与此同时片状羰基铁介质层厚度相对应为 $h_2=1.5, 1.25, 1, 0.75, 0.5$ mm, 如图 6 所示。可以看出, 双磁介质层各自厚度对吸波体的吸波性能影响很大, 随着 FeSiAl 介质层厚度增加, 低频吸收峰频率略向低频移动, 吸收强度基本保持不变, 而高频吸收峰逐渐向高频移动, 吸收强度逐渐减弱, 吸波带宽先增加后减小, 当 h_1 大于 1.25 mm 时, 由于两吸收峰间距过大, 带宽反而减小。因此当两磁性介质层厚度均为 1.25 mm 时有最大吸波带宽。

2.2 吸波机理分析

为分析圆环电阻膜与双磁介质层对超材料吸波性能的影响, 下面将选择 2 个吸收峰频率作为观察点分别研究电磁场及能量损耗分布情况。图 7 所示为双磁介质层超材料在两吸收峰频率处的电场分布图。电场主要分布在超材料的电阻膜附近与片状羰基铁介质层中, 沿 x 轴和 y 轴对称分布, 在电阻膜平面内, 距离圆环电阻膜越远, 电场强度越低。沿厚度方向, 片状羰基铁介质层中电场强度远大于 FeSiAl 介质层, 且距离电阻膜越远电场强度逐渐降低。此外, 在低频吸收峰处的电场强度整体高于高频吸收峰。图 8 为双磁介

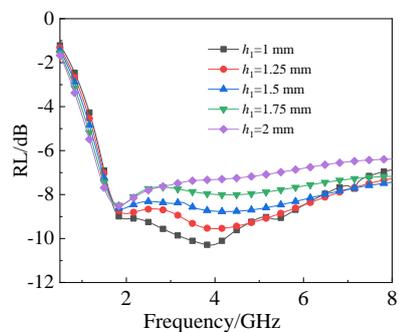


图 6 双磁介质层不同厚度超材料的反射率曲线

Fig.6 Reflection curves of metamaterial with different thickness of two magnetic dielectric layers

质层超材料在两吸收峰频率处的磁场分布, 在超材料结构中磁场主要集中在圆环电阻膜周围, 且沿 x 轴向两侧发散, 磁场强度逐渐减弱, 不同于电场分布, 在 FeSiAl 介质层中也分布较强的磁场。沿厚度方向, 距离电阻膜越远介质层中的磁场强度越小。低频吸收峰处介质层中的磁场强度大于高频吸收峰。

电谐振与磁谐振分别由聚集的电场与磁偶极子激发产生, 同时磁偶极子受磁场大小控制^[14]。通过对双磁介质层超材料的电场与磁场分布研究, 在 1.9 GHz 电磁波激励下, 吸波体产生的电磁谐振作用更强。

图 9 所示为双磁介质层超材料中两吸收峰频率处的能量损耗密度分布。可见, 能量损耗分布于整个吸波体, 主要集中在电阻膜单元附近, 沿电阻膜平面双磁介质层内能量损耗密度均匀分布。在 1.9 GHz 频点处, FeSiAl 介质层中的能量损耗密度高于片状羰基铁介质层。而在 4 GHz 频点处, 片状羰基铁介质层中的能量损耗密度显著增大, 高于 FeSiAl 介质层, 表明了 FeSiAl 介质层对低频吸收峰的影响更大, 而片状羰基铁介质层主要作用于高频范围。

2.3 实验验证

根据仿真优化计算得到的双磁介质层超材料最佳结构参数, 制备了超材料吸波体样品, 如图 10 所示。圆环电阻膜图案清晰, 尺寸精确, 双磁介质层样品表

面平整起伏较小, 没有明显的孔洞与杂质。可见本研究使用的 2 种制备工艺较好的完成了双磁介质层超材料的制备, 能够满足设计要求。

图 11 是超材料吸波体样品的反射率实测曲线。从图中可以看出, 与仿真结果相比, 测试反射率吸收强度略低于仿真结果, 低频吸收峰与仿真结果匹配良好, 而高频吸收峰消失, 整体吸波频带与仿真结果相当, 略向高频移动, 低于 -8 dB 吸波频带为 1.71~7 GHz, 带宽达 5.29 GHz。出现上述差异一是样品的结构尺寸与仿真模型存在一定误差; 二是样品表面具有一定的粗糙度, 促进了电磁波的散射; 三是磁介质层涂刷过程中吸波剂的沉降作用, 造成介质层电磁参数的改变。

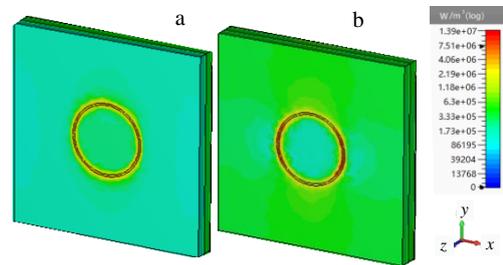


图 9 双磁介质层超材料的能量损耗密度分布

Fig.9 Power loss density distribution of metamaterials with two magnetic dielectric layers: (a) $f=1.9$ GHz and (b) $f=4$ GHz

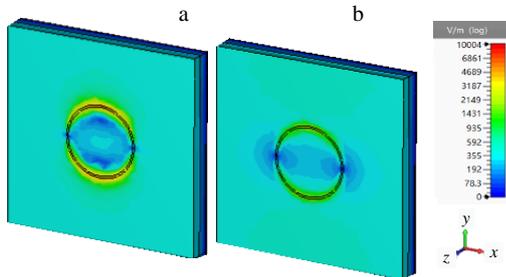


图 7 双磁介质层超材料的电场分布

Fig.7 Electric field distribution of metamaterial with two magnetic dielectric layers: (a) $f=1.9$ GHz and (b) $f=4$ GHz

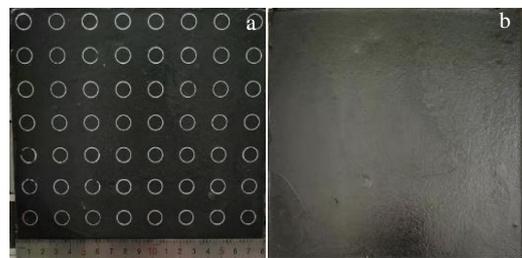


图 10 双磁介质层超材料样品和双磁介质层

Fig.10 Metamaterial sample with double magnetic dielectric layers (a) and double magnetic dielectric layer (b)

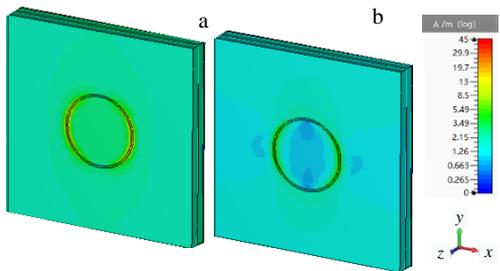


图 8 双磁介质层超材料的磁场分布

Fig.8 Magnetic field distribution of metamaterials with two magnetic dielectric layers: (a) $f=1.9$ GHz and (b) $f=4$ GHz

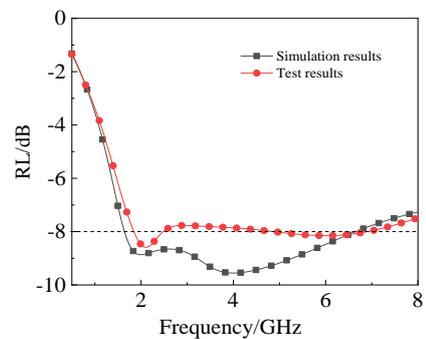


图 11 双磁介质层超材料测试结果

Fig.11 Test results of double magnetic layers metamaterial

3 结 论

1) 本研究将传统磁性吸波材料与超材料设计理念进行了有机结合, 设计并制备了一种具有双磁性介质层的低频超材料吸波体, 吸收频率相比磁性吸波涂层分别向低频与高频方向拓展, 吸波带宽大幅提高。在厚度为 2.5 mm 时, 吸波体低于 -8 dB 的频带达 1.59~6.59 GHz。

2) 超材料吸波体吸收性能的增加主要是由于引入电阻膜结构后, 通过电磁谐振作用改变了双磁介质的电磁场分布, 分别促进了 FeSiAl 合金对低频电磁波与羰基铁对高频电磁波的损耗。

3) 采用双磁介质层设计超材料结构, 不仅能够显著提升吸波带宽, 而且结构相对简单, 便于加工和制备, 是一种有效提升低频与宽频吸波性能的手段, 在国防领域具有较高的应用价值。

参考文献 References

- [1] Shen Yang(沈 杨), Wang Jiafu(王甲富), Zhang Jieqiu(张介秋) *et al.* *Journal of Air Force Engineering University(空军工程大学学报)*[J], 2018, 19(6): 39
- [2] Costa F, Monorchio A, Manara G. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*[J], 2010, 58(5): 1551
- [3] Gao H T, Wang J J, Xu B C *et al.* *Materials Research Express*[J], 2019, 6(4): 45 803
- [4] Zhang Zheng(张 琤). *Thesis for Doctorate(博士论文)*[D]. Nanjing: Southeast University, 2019
- [5] Zhou Zhuohui(周卓辉), Liu Xiaolai(刘晓来), Huang Daqing(黄大庆) *et al.* *Acta Physica Sinica(物理学报)*[J], 2014, 63(18): 198
- [6] Zuo W Q, Yang Y, He X X *et al.* *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*[J], 2017, 16: 329
- [7] Li Ze(李 泽), Zhao Fang(赵 芳), Wang Jianjiang(王建江) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2019, 48(11): 3628
- [8] Hui B Z, Li W D, Pei H Z *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2013, 113(1): 13 903
- [9] Zhang L B, Zhou P H, Chen H Y *et al.* *Applied Physics A*[J], 2015, 121(1): 233
- [10] Cheng Y Z, Bo H, Zhao J C *et al.* *Journal of Electronic Materials*[J], 2017, 46(2): 1293
- [11] Guo Fei(郭 飞), Du Hongliang(杜红亮), Qu Shaobo(屈绍波) *et al.* *Acta Physica Sinica(物理学报)*[J], 2015, 64(7): 77 801
- [12] Lu Mingming(卢明明), Liu Jia(刘 甲), Gong Yuanxun(宫元勋) *et al.* *Surface Technology(表面技术)*[J], 2020, 49(2): 95
- [13] Huang Y J, Luo J, Pu M B *et al.* *Advanced Science*[J], 2019, 6(7): 1 801 691
- [14] Fan Y, Wang J F, Li Y F *et al.* *Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2018, 51(21): 215 001

Research on Low Frequency Metamaterial Absorber Based on Double Magnetic Dielectric Layer Composite

Li Ze¹, Sun Haitao², Cheng Zhaogang², Yan Jing¹

(1. Beijing Special Engineering Design and Research Institute, Beijing 100028, China)

(2. Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In this study, the magnetic absorbing coating was integrated into the structural design of metamaterials, and a new low-frequency composite metamaterial absorber was obtained. The absorber was composed of annular resistance film, double-layer magnetic absorbing coating and metal back plate. The absorption properties of the metamaterial absorber were calculated by CST simulation software, and the effects of various structural parameters of the absorber on the absorption properties were studied. The simulation results show that when the thickness of the designed metamaterial absorber is 2.5 mm, there are two absorption peaks at 1.9 and 4 GHz. The reflection loss is less than -8 dB and the absorption bandwidth is 5 GHz in the frequency range of 1.59~6.59 GHz. The absorbing mechanism was discussed through the electromagnetic field distribution of the absorber. The results show that the increase of the absorption bandwidth of the absorber is due to the change of the electromagnetic field distribution of the metamaterial absorber and the loss of the magnetic dielectric layer. Finally, the absorber samples were prepared and tested. The physical test results are basically consistent with the simulation results, which shows that the designed and prepared absorber has excellent low-frequency absorbing performance, and the absorbing bandwidth is greatly improved compared with the magnetic absorbing coating.

Key words: metamaterial absorber; magnetic material; low frequency absorption; structural design

Corresponding author: Sun Haitao, Ph. D., Professor, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, P. R. China, E-mail: 18192278@qq.com