

激光与光电子学进展

RGO/Fe₃O₄/PLA 复合吸波剂组合及分布方式
对角锥吸波性能的影响吴海华^{1*}, 张忍静¹, 杨增辉¹, 曹甜东², 邓开鑫¹, 李言¹¹三峡大学石墨增材制造技术与装备湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002;²三峡大学机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002

摘要 在获得石墨烯(RGO)/聚乳酸(PLA)、RGO/四氧化三铁(Fe₃O₄)/PLA 多种复合吸波线材的基础上,利用熔融沉积成形技术打印了三层角锥吸波体。利用 CST 仿真与实验研究了吸波剂组合和分布方式(水平梯度分布和立体梯度分布)对角锥吸波性能的影响,并揭示了吸波机理。研究表明,对于均质吸波体,双组元吸波剂吸收性能更佳,且吸波性能随石墨烯的含量增加而改善;对于吸波剂梯度分布吸波体(此时锥体高度为 16 mm,底面尺寸为 10 mm×10 mm),立体梯度分布时(加入质量分数分别为 3%、5%、7% 的三层吸波剂石墨烯)可获得最强吸波效果:在 6.1~18.0 GHz 范围内的反射损耗低于 -10 dB,有效吸波带宽可达 11.9 GHz 以上,在 17.2 GHz 处达到最高吸收强度为 -45.8 dB;相对吸波剂组合,分布方式对角锥吸波能力具有更大影响,立体分布方式的吸波体一方面改善阻抗匹配特性,保证有效吸波带宽,另一方面增大多重散射、反射与球状衍射损耗,提高吸波强度。

关键词 材料; 三层角锥吸波体; 石墨烯复合吸波剂; 分布方式; 熔融沉积成形; 吸波性能; 吸波机理

中图分类号

文献标志码

DOI: 10.3788/LOP221792

Influence of Combination and Distribution of RGO/Fe₃O₄/PLA Composite
Absorber on Absorption Performance of PyramidWu Haihua^{1*}, Zhang Renjing¹, Yang Zenghui¹, Cao Tiandong², Deng Kaixin¹, Li Yan¹¹Hubei Engineering Research Center for Graphite Additive Manufacturing Technology and Equipment, China

Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

²School of Machinery and Power, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China

Abstract Based on graphene (RGO)/polylactic acid (PLA) and RGO/Fe₃O₄/PLA composite absorbent wires, a three-layer pyramid absorbing body was printed using fused deposition forming technology. Through CST simulations and experiments, the influence of combining and distributing the absorbing agents (horizontal and stereo gradient distributions) on the absorption performance of the pyramid was investigated, and the absorbing mechanism was revealed. The results show that, for the homogeneous absorber, the absorption performance of the two-component absorber is better and improves with increasing graphene content. For the gradient distribution absorber (the pyramid height is 16 mm and the bottom dimension is 10 mm × 10 mm), when the stereo gradient distribution is adopted (the three-layer wave absorber graphene is added in amounts of 3%, 5%, and 7% in mass fraction), the strongest wave absorption effect can be achieved. Reflection losses of 6.1~18 GHz are lower than -10 dB, and the effective wave absorption bandwidth can exceed 11.9 GHz. The maximum absorption intensity is -45.8 dB at 17.2 GHz. Compared with the combination of absorbing agents, the distribution mode has a more significant impact on the absorbing ability of the pyramid. The wave absorber with stereo gradient distribution, on the one hand, improves impedance matching characteristics to ensure effective absorption bandwidth; on the other hand, increases multiple scattering, reflection, and spherical diffraction losses to improve absorption intensity.

Key words materials; three-layer pyramid absorber; graphene composite absorber; distribution mode; fused deposition forming; absorbing performance; absorbing mechanism

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-08-06; 录用日期: 2022-08-29; 网络首发日期: 2022-09-09

通信作者: *wuhaihua@ctgu.edu.cn

1 引言

吸波剂是一种可吸收入射电磁波或者使其大量衰减的材料,因其特殊的物理特性,在超透镜、雷达隐身、天线、生物化学传感器、新型成像系统和通信系统中均具有重要的应用^[1-2]。随着对吸波剂研究的不断深入,单一吸波剂的性能提升已经达到上限,研究人员通常将不同材料进行复合以提升吸波剂的吸波性能。近年来对吸波剂的研究主要集中在导电聚合物^[3-4]、铁氧化物^[5-6]、石墨^[7-8]、石墨烯及其衍生物^[9-11]、磁性金属微粉(铁、钴、镍)^[12-13]等。其中磁性金属及其合金与氧化物磁导率和电导率极高,可通过涡流损耗、磁滞损耗和电导损耗等方式衰减电磁波,但由于其密度大、吸收频带窄、高频吸收弱等问题,单独使用的性能并不能满足吸波剂“宽、轻、薄、强”的要求,为此研究者们尝试通过将其与聚合物和碳材料复合的方式对传统吸波材料进行改性。石墨烯(RGO)作为一种新型吸波剂,具有质量轻、机械性能优异、热传导好、介电常数高等特点,其与磁性材料复合提供多重吸波机制,有助于电磁波的吸收^[14]。刘姗姗等^[15]将石墨烯与金属材料复合对超材料进行电磁诱导调制。叶喜葱等^[16]以聚乳酸(PLA)作为基体材料,将磁性材料羰基铁粉(CIP)与RGO进行复合,制备RGO-CIP/PLA复合材料,当RGO质量分数为4%、CIP质量分数为20%时,RGO-CIP/PLA复合材料吸波性能最优;吸收厚度为3 mm时,达到了最大的反射损耗值-27.25 dB。

在限定吸波体尺寸的情况下,采用多种材料复合的方法很难进一步改善吸波体的吸收效果,这对吸波体提出了新要求^[17-20]。通过将多种材料分层设计以及梯度分布的方式可改善吸波体阻抗不匹配的问题,实现宽带高强吸收。如李彬等^[21]使用模塑的制备方法制备的炭黑/水泥基角锥吸波体,研究了填料种类及分布方式(非均匀分布)对角锥吸波体吸波性能的影响。结果显示,炭黑掺量为1.5%时,实现了99%的吸收(<-20 dB)电磁波的频带(3.1~18.0 GHz)扩展到S波段(2~4 GHz)。户瑞珍等^[22]设计了一种方形对称型三层超材料吸波器,这种吸波器由金属-介质-金属结构组成,底层为金属薄膜,中间层为聚碳酸酯介质基板,顶层为方形对称的金属谐振结构。结果表明,5个较为明显的谐振吸收峰的吸收率分别可以达到98.56%、99%、99.64%、99%及90.39%,实现了多频高吸收率的特性。

目前3D打印的种类主要包括喷墨沉积(Ployjet)、选择性激光烧结(SLS)、光固化成型(SLA)、三位粉末粘接(3DP)和熔融沉积快速成型(FDM)^[23-26]。面向复合超材料的增材制造技术,根据成型状态可分为:丝材基、液态基、粉末基和液-粉混合基技术。其中FDM主要使用的基体材料为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和PLA等丝材基,可以实现在不加支撑的条件

下打印微小空腔的复杂结构,且可通过换线材实现吸波剂的可控分布。为多层吸波剂非均匀分布设计提供了制造条件。在吸波体制备方面,需要根据材料的结构和特性选择合适的工艺^[27]。角锥作为微波暗室中应用最广泛的吸波结构,优势在于其特殊的几何形状与空气的匹配程度高,有利于电磁波在锥体之间多次反射,获得较佳的吸波性能^[28]。对于角锥结构的吸波体,研究者们多研究尺寸参数对吸波性能的影响,而材料的非均匀分布设计鲜有涉及。

本文采用两步法制备了RGO/PLA、RGO/Fe₃O₄/PLA复合线材,并通过FDM技术打印了三层角锥吸波体。测试上述复合吸波剂的电磁参数,计算了阻抗匹配值,为吸波剂梯度分布提供了参考。通过CST仿真对比了吸波剂组成、组合和分布方式(水平分布和立体分布)对角锥吸波性能的影响。通过分析吸波体能量损耗分布与电场、磁场分布,揭示其吸波机理。提出的吸波剂梯度分布方式为充分发挥吸波体的宽带高强吸收作用提供了新思路。

2 实验方法

2.1 原材料

材料:PLA,由东莞市盈盛塑胶化工有限公司生产,平均粒径为75 μm,纯度为99.9%;RGO,用Hummers方法自制,比表面积为609 m²/g,质量分数为99.18%;Fe₃O₄磁性纳米微球由阿拉丁提供,粒径:100~200 nm。

2.2 复合线材制备

将PLA粉末置于真空烘箱(型号BPG-43BG,广州比郎仪器有限公司)中60℃干燥12 h后,采用卧式行星球磨机(型号QM-WX4,南京南大仪器有限公司)将RGO、Fe₃O₄和PLA粉末与二氧化锆球等质量混合,球磨3.5 h,得到不同含量的RGO/PLA、RGO/Fe₃O₄/PLA粉末,复合线材配方如表1所示。将球磨后的RGO/Fe₃O₄/PLA复合粉末加入SHSJ-25型单螺杆挤出机,在进料温度为160℃、熔融温度为170℃、模口温度为190℃、螺杆转速为10 r/min、牵引速度为8 r/min、冷却槽温度为40℃的条件下,制备了直径为1.75 mm±0.5 mm的3D打印线材。实物如图1(a)所示。

表1 复合吸波剂配方组成

Table 1 Composition of composite absorber

Number	Sample	Mass fraction / %		
		RGO	Fe ₃ O ₄	PLA
1	Pure PLA	0	0	100
2	3%RGO/PLA	3	0	97
3	5%RGO/PLA	5	0	95
4	7%RGO/PLA	7	0	93
5	3%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA	3	15	82
6	5%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA	5	15	80

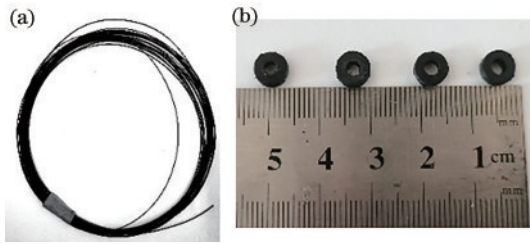


图 1 电磁参数测试样品。(a) 石墨烯复合线材; (b) 同轴环
Fig. 1 Electromagnetic parameter test sample. (a) Graphene composite wire; (b) coaxial ring

2.3 电磁参数测试

采用 Allcct Tank 型(武汉奥尔科特有限公司) 3D 打印机制备内径为 3 mm、外径为 7 mm、厚度为 2.5 mm 的同轴环,如图 1(b)所示,采用矢量网络分析仪(8720ES)测试其电磁参数。单从吸波剂吸收能力角度考虑,复合材料的电磁参数越大越好,但实际应用过程中,仍需考虑吸波剂阻抗匹配的问题。

2.4 阻抗匹配计算

阻抗匹配是确定吸波剂对电磁波吸收特性的重要参考因素。通过阻抗匹配的计算,可对吸波剂的匹配程度有个初步的判断,为吸波剂梯度分布方式打下基础。阻抗匹配 M_z 的计算公式为

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tan h \left(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right), \quad (1)$$

$$M_z = \frac{2Z'_{in}}{|Z_{in}|^2 + 1}, \quad (2)$$

式中: Z_0 为自由空间的波阻抗; Z_{in} 为输入阻抗; Z'_{in} 为归一化输入阻抗的实部; c 为电磁波在自由空间中的传播速度; f 为电磁波频率; d 为试样厚度; j 为虚数单位; ϵ_r 和 μ_r 分别表示复介电常数和复磁导率。阻抗匹配结果 M_z 越接近 1, 说明该吸波剂与空气的阻抗匹配程度越高, 能使更多的电磁波进入到吸波体内部。

2.5 吸波体设计与建模

结构的合理设计可提高吸波体的阻抗匹配特性。角锥在宏观结构上可改变入射电磁波的路径, 令电磁波在锥体之间多次反射, 增加其传输路程, 使吸收剂对其进行多次吸收, 也使其在传输路径中出现干涉相消现象。使用 CST 微波工作室 (CST Microwave Studio) 对角锥结构吸波体进行模拟仿真。空间背景设为真空, 电磁波入射端口为 Z 轴正向, 以平面波方式垂直入射, 如图 2(a) 所示, X 轴方向和 Y 轴方向边界条件设置为周期性边界, 如图 2(b) 所示, 选用频域求解器, 模拟频率为 2~18 GHz。

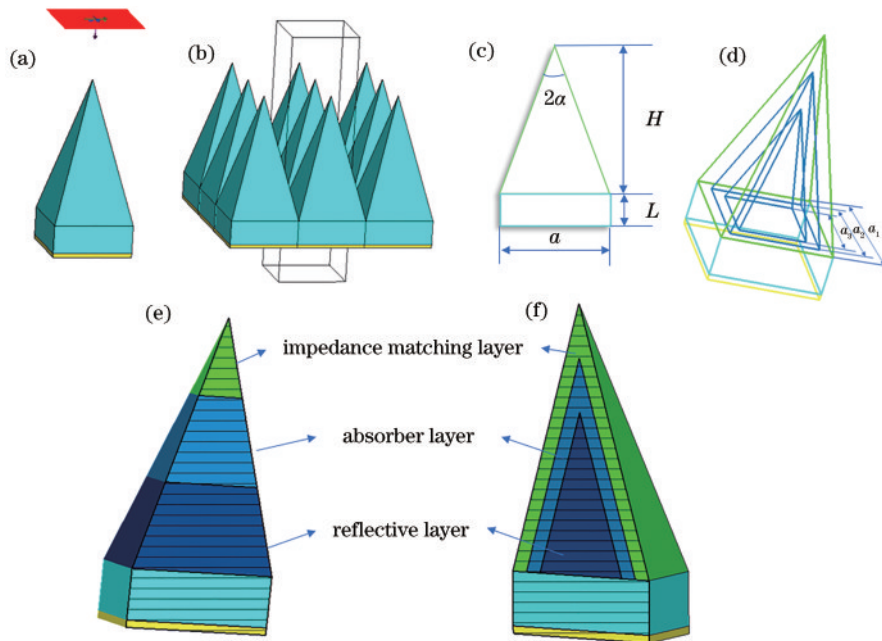


图 2 角锥结构示意图。(a) 电磁波入射方向; (b) 周期排布方式; (c) 单元体截面尺寸; (d) 水平梯度分布; (e) 立体梯度分布; (f) 立体梯度分布线框图

Fig. 2 Schematic diagram of pyramid structure. (a) Incident direction of electromagnetic waves; (b) periodic arrangement; (c) unit cross-sectional size; (d) horizontal gradient distribution; (e) stereo gradient distribution; (f) stereo gradient distribution wireframe

角锥单元体的形状尺寸设计时, 为使整个结构的重心位于底座内, 增强稳定度与粘接强度, 一般取底座高度为整个高度的 1/4~1/3, 顶角 α 的大小和电磁波从锥顶方向垂直入射后反射次数密切相关, 范围应控制在 15°~25°。经过参数扫描优化, 本文实验中选用

单元体尺寸如图 2(c) 所示, 底座高度 L 为 4 mm, 顶角角度 α 为 16°, 底面正方形边长 a 为 10 mm, 锥体高度 H 随着底面边长和顶角角度的变化而变化。吸波剂梯度分布时, 第一层为阻抗匹配层, 第二层为吸收层, 第三层为反射层。如图 2(d)、2(e) 所示, 其中图 2(d) 为水

平梯度分布,图 2(e)为立体梯度分布。图 2(d)中水平分布的阻抗匹配层、吸收层和反射层的高度均为 6 mm,图 2(f)中立体梯度分布的阻抗匹配层、吸收层和反射层的底面边长 a_1 、 a_2 、 a_3 分别为 10、8、6 mm,各层顶角 α 均为 16° ,角锥结构的外形尺寸固定不变。

表 2 角锥吸波体吸波剂分布设计方案

Table 2 Design scheme of absorbing agent distribution of pyramid absorber

Sample	Distribution	Impedance matching layer	Absorber layer	Reflective layer
C1	Homogeneous		3%RGO/PLA	
C2	Homogeneous		5%RGO/PLA	
C3	Homogeneous		7%RGO/PLA	
C4	Homogeneous		3%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA	
C5	Homogeneous		5%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA	
C6	Horizontal	3%RGO/PLA	5%RGO/PLA	7%RGO/PLA
C7	Horizontal	3%RGO/PLA	3%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA	7%RGO/PLA
C8	Horizontal	3%RGO/PLA	5%RGO/PLA	5%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA
C9	Horizontal	3%RGO/PLA	3%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA	5%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA
C10	Stereo	3%RGO/PLA	5%RGO/PLA	7%RGO/PLA
C11	Stereo	3%RGO/PLA	3%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA	7%RGO/PLA
C12	Stereo	3%RGO/PLA	5%RGO/PLA	5%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA
C13	Stereo	3%RGO/PLA	3%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA	5%RGO/15%Fe ₃ O ₄ /PLA

2.7 吸波体 FDM 制备

使用设备为双喷头的 FDM 打印机(Allcct Tank),打印分层厚度为 0.15 mm,填充率为 100%。将 C10 吸波体的三层分别打印,经过机械按压粘合为整体的角锥吸波体,如图 3 所示。底面尺寸为 180 mm × 180 mm,采用矢量网络分析仪(E8363B 型,罗德与施瓦茨公司)和弓形装置组成的测试系统,2~18 GHz 频段内测试其反射损耗。

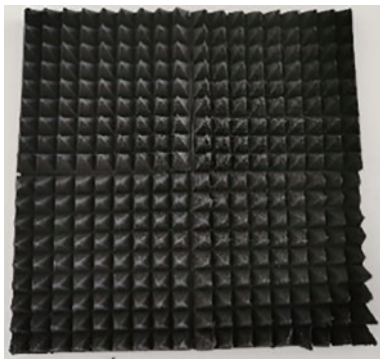


图 3 C10 角锥吸波体打印样品实物图

Fig. 3 Physical picture of C10 pyramid absorber printed sample

3 实验结果

3.1 电磁参数

石墨烯是电介质材料,具有良好的导电性,但没有磁性,应用于吸波剂时磁性损耗可忽略,其复磁导率的

2.6 吸波剂分布设计

为探究吸波剂组合及分布方式对角锥吸波体的吸波性能影响,设计了以下几种吸波体,内部吸波剂组合及分布方式如表 2 所示,运用 CST 模拟以下角锥吸波体的反射损耗。

实部和虚部可分别按 1 和 0 处理,不在图中显示。测试上述五种复合吸波剂的电磁参数,结果如图 4 所示。对于 RGO/PLA 单组元吸波剂,复介电常数与石墨烯含量的加入量呈正相关,石墨烯加入量越多,其复介电常数越大,复合吸波剂的储存电荷能力与损耗电荷的能力越强,这是由于石墨烯粉末在吸波剂中逐步形成三维导电网络,可将电磁波转化为热能,对电磁波的衰减能力随之增强。只加入石墨烯,吸波剂对电磁波的消耗能力有限,吸波机制单一。铁氧体是双复介质材料,其介电特性的吸波机制主要是极化效应,磁性吸波机制是自然共振,考虑加入铁氧体。对于 RGO/Fe₃O₄/PLA 双组元复合吸波剂,由于 Fe₃O₄ 的加入,使吸波剂在具有导电性的基础上,又具备导磁性,吸波体通过磁滞损耗、涡流损耗等机制吸收电磁波^[29-31],因此,RGO/Fe₃O₄/PLA 双组元复合吸波剂的复介电常数和复磁导率值都比单组元 RGO/PLA 吸波剂表现优异。

3.2 阻抗匹配

如图 5 所示,所制备的前四种吸波剂的阻抗匹配值随频率增加逐渐增高,说明其与空气的匹配特性逐渐增强,由此可以预计其在高频时吸收效果较强。而 5%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 吸波剂的阻抗匹配值在低频时波动较为明显,在高频时略有下降,由此可以预计其在高频时吸收效果较弱。五种吸波剂中,RGO 的质量分数为 3% 时,复合吸波剂的阻抗匹配最接近 1,说明其与空气的阻抗匹配程度最高,可最大限度地减少

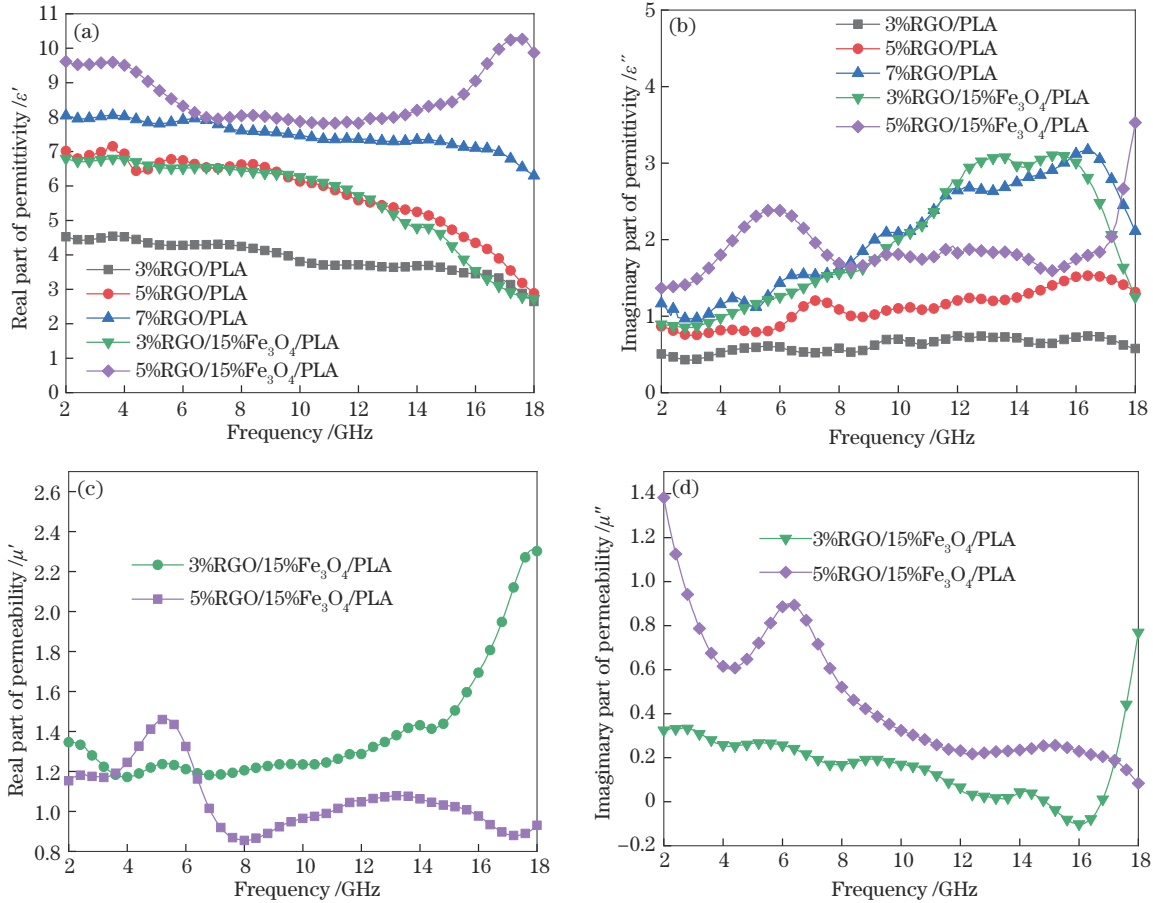


图 4 复合线材电磁参数。(a)复介电常数的实部 ϵ' ; (b)复介电常数的虚部 ϵ'' ; (c)复磁导率的实部 μ' ; (d)复磁导率的虚部 μ''

Fig. 4 Electromagnetic parameters of composite wire. (a) Real part of complex permittivity ϵ' ; (b) imaginary part of complex permittivity ϵ'' ; (c) real part of complex permeability μ' ; (d) imaginary part complex permeability μ''

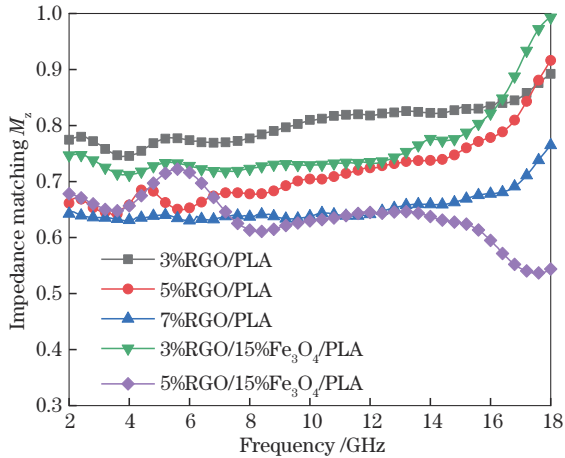


图 5 吸波剂阻抗匹配特性

Fig. 5 Impedance matching characteristics of absorber

电磁波在吸波体表面的反射。根据电磁波传输理论和多层阻抗匹配原理^[32-33], 选用 3%RGO/PLA 作为阻抗匹配层的吸波剂。7%RGO/PLA 与 5%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 的阻抗匹配特性不佳, 但由上文电磁参数可知, 其对电磁波的消耗能力强, 因此选用此两种吸波剂作为反射层的吸波剂。另外两种吸波剂 5%RGO/PLA 与 3%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 可作为吸收层。由此, 吸波

体整体的吸波剂分布可实现阻抗渐变。

3.3 复合吸波剂组成对均质角锥吸波体性能的影响

图 6 为 C1~C5 角锥吸波体反射损耗曲线图, 与之对应的反射损耗表, 见表 3。C1 在 17 GHz 处出现最大吸收峰 -8.8 dB, C2 在 18 GHz 处出现最大吸收峰 -35.0 dB, 其有效吸波带宽为 4.8 GHz, C3 在 15.5 GHz

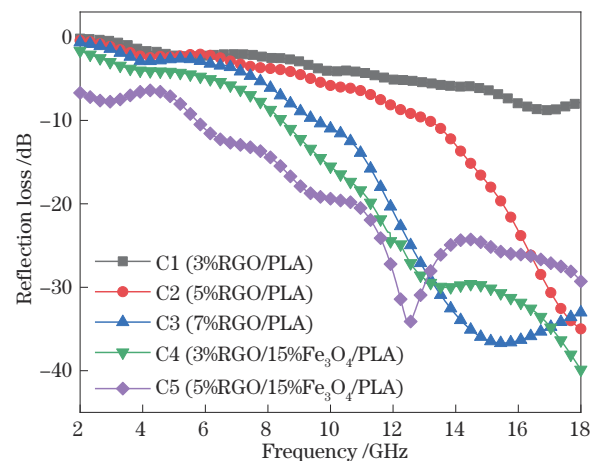


图 6 吸波体 C1~C5 的反射损耗曲线图

Fig. 6 Curves of reflection losses of absorbers C1~C5

表 3 吸波体 C1~C5 的反射损耗
Table 3 Reflection losses of absorbers C1-C5

Sample number	Bandwidth range /GHz	Absorption bandwidth /GHz	Absorption peak /dB	Resonant frequency /GHz
C1	—	0	-8.8	17.0
C2	13.2-18.0	4.8	-35.0	18.0
C3	9.5-18.0	8.5	-36.7	15.5
C4	8.4-18.0	9.6	-39.9	18.0
C5	5.7-18.0	12.3	-34.3	12.5

处出现最大吸收峰 -36.7 dB, 其有效吸波带宽达到 8.5 GHz, 可见, 对于均质角锥吸波体, 提高复合吸波剂中石墨烯的含量, 可明显拓展吸波带宽、增强吸收强度。

对比 C1 与 C4 的反射损耗的带宽和最强吸收峰可知, Fe_3O_4 的加入会明显增加吸波体的吸收强度、拓展吸波带宽, 这是因为 Fe_3O_4 使吸波体同时具备磁损耗能力和电损耗能力, 令角锥吸波体的吸收性能大幅增加。对比 C2 与 C5 可知, Fe_3O_4 的加入会明显增加吸波体的吸收带宽, 且吸收峰向低频移动, 但吸收峰强度没有得到改善, 这是因为 RGO 的含量较大时, Fe_3O_4 与 RGO 微粒之间发生团聚, 使电磁波在吸波体的传播路径发生改变, 未充分发挥两者的吸收作用。

对比五种吸波剂的角锥吸波体反射损耗可知, 吸波剂的含量变化对角锥吸波体的影响显著, 在一定范围内, 石墨烯含量的增加会增强其吸波能力。 Fe_3O_4 的加入增加吸波体的消耗机制, 增加吸波带宽, 双组元吸波剂吸收效果比单组元吸波剂吸收效果优异。五个吸波体中, C5 在保持一定吸收强度的前提下, 吸收带宽最宽, 充分发挥了双组元吸波剂对电磁波的损耗作用。

3.4 吸波剂组合方式对三层角锥吸波体吸波性能的影响

图 7 为不同吸波剂组合吸波体的反射损耗曲线图, 复合吸波剂 C6~C9 采取水平分布方式, 复合吸波剂 C10~C13 采取立体分布方式, 反射损耗结果如表 4 所示。

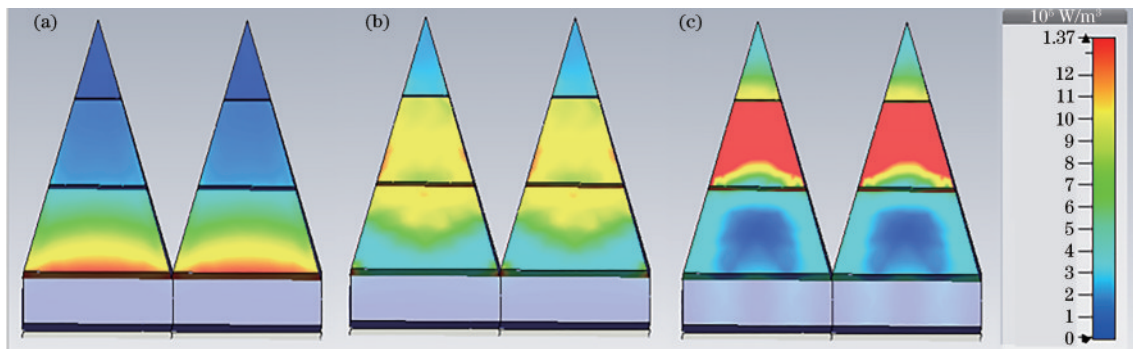


图 7 水平分布吸波体不同频率处能量损耗分布图。(a) 2 GHz; (b) 10 GHz; (c) 18 GHz

Fig. 7 Energy loss distribution of horizontally distributed absorber at different frequencies. (a) 2 GHz; (b) 10 GHz; (c) 18 GHz

表 4 吸波体 C6~C13 的反射损耗
Table 4 Reflection losses of absorbers C6-C13

Sample number	Bandwidth range /GHz	Absorption bandwidth /GHz	Absorption peak /dB	Resonant frequency /GHz
C6	10.2-18.0	7.8	-34.5, -26.6	12.6, 15.9
C7	9.5-18.0	8.5	-36.5, -28.4	12.4, 15.8
C8	8.3-18.0	9.7	-28.1, -25.7	12.1, 16.0
C9	7.9-18.0	10.1	-31.5, -39.0	11.9, 16.0
C10	8.7-18.0	9.3	-51.4	17.4
C11	8.4-18.0	9.6	-41.9	16.2
C12	8.4-18.0	9.6	-38.6	18.0
C13	8.2-18.0	9.8	-40.0	18.0

如图 8 所示, 采用上述几种吸波剂组合, 吸波剂水平梯度分布时, 吸波体的反射损耗曲线整体走势相同, 均有双吸收峰, 且吸收峰频率相似。吸波剂立体梯度分布时, 吸波体的反射损耗曲线整体走势相同, 均在高

频处出现单吸收峰。说明改变上述吸波剂的组合方式不会改变吸波体反射损耗曲线的走势, 只会小幅改善吸波体的吸波带宽和吸收强度, 即吸波剂的组合对吸波体的影响不大。

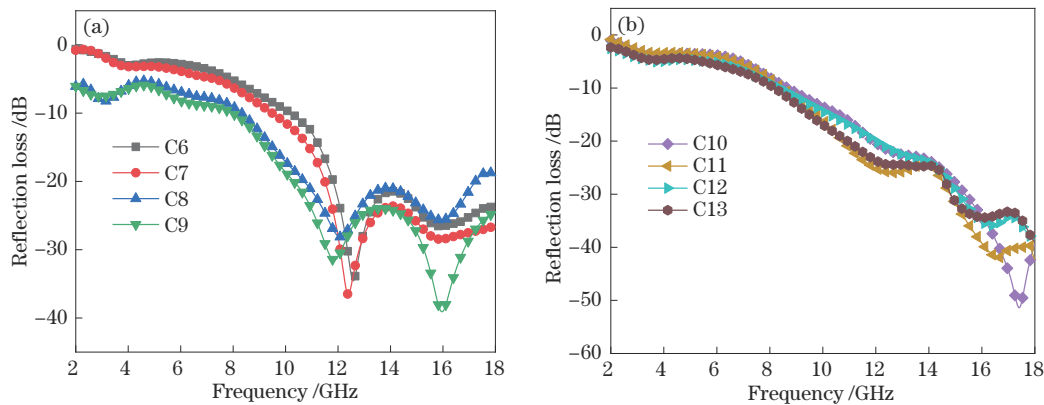


图 8 不同吸波剂组合吸波体反射损耗曲线图。(a) C6~C9 (水平分布);(b) C10~C13(立体分布)

Fig. 8 Reflection loss curves of different absorber combinations. (a) C6~C9 (horizontal distribution); (b) C10~C13 (three-dimensional distribution)

对比 C6 与 C7, C7 的有效吸波带宽略宽,且吸收强度略高,这是因为吸收层选用的吸波剂不同,与阻抗匹配层和反射层的阻抗匹配度不同,电磁参数不同,对电磁波的消耗能力不同,电磁波在三层角锥吸波体间的传输路径随之改变。由阻抗匹配值可知,3%RGO/15%Fe₃O₄阻抗匹配值与阻抗匹配层吸波剂 3%RGO/PLA 更接近,且更接近于 1,满足多层吸波体的设计原则,使表层与空气的阻抗相接近,吸波剂沿着电磁波的传输路径有效分布,所以 C7 有效吸波带宽更宽。由电磁参数可知,在复介电常数实部相似的基础上,3%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 复介电常数虚部明显更高,因此 C7 的吸收能力更强。综上说明,3%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 比 5%RGO/PLA 吸波剂更适合作为吸收层。对比 C8 与 C9 也有此结论。

对比 C6 与 C8, C8 的带宽略宽,但 12~18 GHz 范围内吸收强度略低,这是因为反射层选用的吸波剂不同。由阻抗匹配值可知,在低频段,反射层 5%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 与吸收层 5%RGO/PLA 的吸波剂阻抗匹配值更接近,且更接近于 1,由图 7 可知,吸收层与反射层对电磁波的吸收作用主要在低频段,因此反射层选用 5%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 时,吸波体的带宽更宽。综上说明,5%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 比 7%RGO/PLA 吸波剂更适合作为反射层。对比 C7 与 C9 也有此结论。所以,吸波剂水平分布时,阻抗匹配层、吸收层和反射层分别采用 3%RGO/PLA、3%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 和 5%RGO/15%Fe₃O₄/PLA 三种吸波剂时,吸波体的带宽最宽,吸收强度最高,整体的吸收性能最好。

分析 C10~C13 可知,立体分布时,吸波体的阻抗匹配层、吸收层和反射层分别采用 3%RGO/PLA、5%RGO/PLA 和 7%RGO/PLA 三种吸波剂时,吸波体在带宽相似条件下,吸收强度达到最高,整体的吸收性能最好。对于不同分布方式的吸波体,最佳的吸波剂组合不同,吸波剂的分布方式与吸波剂组合相协同,

才能达到最佳的吸收效果。此实验中,对比 C6~C13 可知,C10 在保证带宽的基础上,吸波强度达到最强,是吸波效果最佳的吸波体。

3.5 吸波剂分布方式对角锥吸波体吸波性能的影响

图 9 为吸波剂不同分布方式下吸波体反射损耗图。如图 9(a)所示,其中 C6 的吸收带宽为 7.8 GHz (10.2~18 GHz),在 12 GHz 附近处出现明显的吸波峰,且在该处达到 -34.5 dB 的最强吸收效果;C10 的带宽为 9.4 GHz (8.6~18 GHz),吸收效果大体随频率增强,但在 17 GHz 附近处出现吸波峰,达到 -51.4 dB 的最强吸收效果。对比 C6 与 C10 可知,立体分布的吸波体带宽更宽,且能在高频达到更高的吸收强度,而水平分布的吸波体最强吸收峰往低频移动,在 12 GHz 附近,吸收效果比立体分布的优异。如图 9(b)所示,对比 C7 与 C11 有同样的结论。可以发现,吸波剂立体分布时,吸波体的反射损耗曲线波动较小,在高频处只出现一个吸收峰,且可达到更高的吸收强度;水平分布时,吸波体的反射损耗曲线波动较大,一般出现两个吸收峰,但在 12 GHz 附近出现吸收峰,使得吸波体在此处吸收强度更高。对比其他几组吸波体,均出现同样的现象。综合分析可知,吸波剂立体分布的吸波体在保证吸波带宽的基础上,在高频处可达到更高的吸收强度,且整体吸收效果波动小。在实际应用时,可通过调节吸波剂分布方式拓展带宽,调整吸收强度,且可根据不同频段的吸收效果,合理选取适合的吸波剂分布方式。

如图 10 所示,分析 C6 和 C10 谐振频率处的能量损耗。水平分布时,谐振频率处,角锥吸波体的前两层对电磁波起到主要消耗作用,而前两层所用吸波剂对电磁波的消耗作用较弱,处于反射层的吸波剂对电磁波消耗作用较强,但利用率低。这是因为入射到阻抗匹配层的电磁波进入到吸波体内部,只能由阻抗匹配层和吸收层的吸波剂吸收,未能传输到消耗能力最强的反射层;入射到吸收层和反射层的电磁波,因为接触

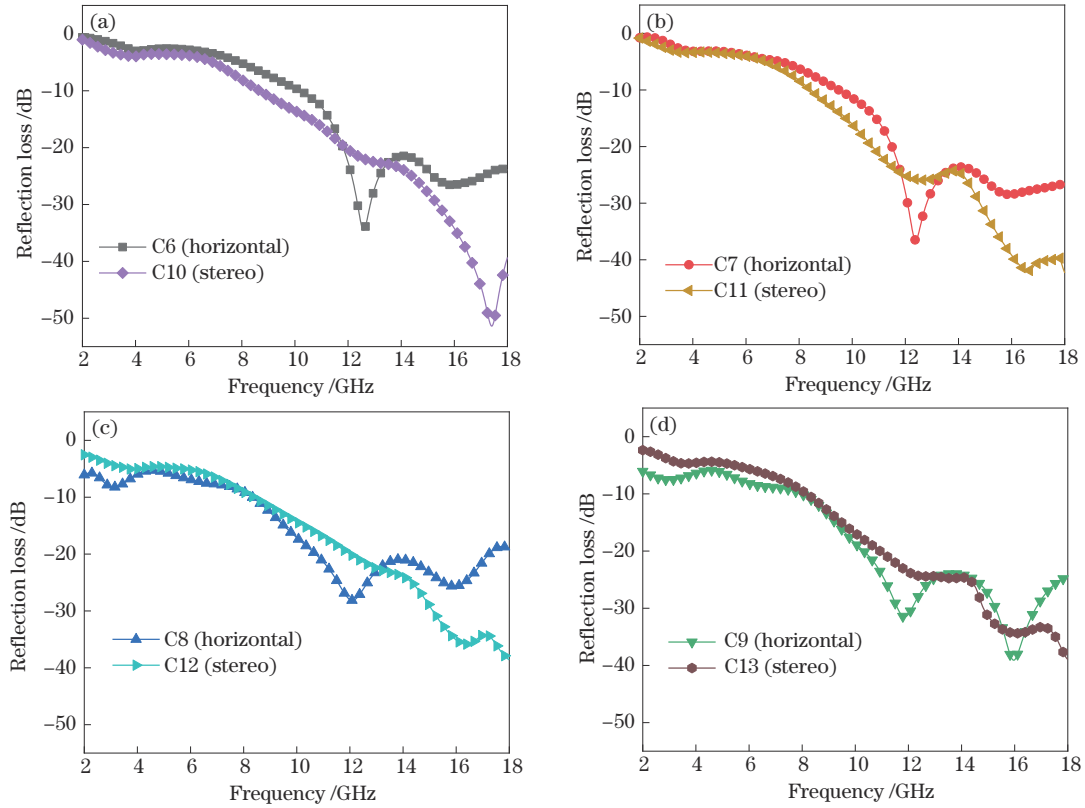


图9 吸波剂不同分布方式下吸波体反射损耗

Fig. 9 Reflection loss of absorber under different distribution modes of absorber

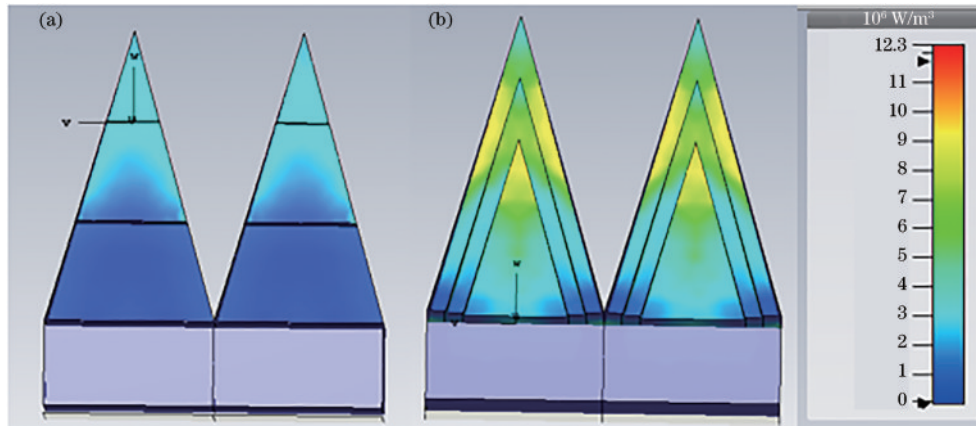


图10 不同分布方式吸波体谐振频率处能量损耗。(a)水平分布 12.6 GHz; (b)立体分布 17.4 GHz

Fig. 10 Energy loss at resonance frequency of absorber with different distribution modes. (a) Horizontal distribution 12.6 GHz; (b) stereo distribution 17.4 GHz

到阻抗匹配较低的吸波剂,大部分被反射到空气中,在垂直方向上电磁波进入吸波体内部的通道被堵塞。立体分布时,电磁波无论从哪个方向入射,都会首先经过阻抗匹配层,保证尽可能多的电磁波进入到吸波体内部,并逐步被吸收层和反射层消耗吸收。由内到外的三层材料对电磁波都起到了消耗作用,吸波剂利用率高。对比可知,立体分布时吸波体形成了更好的阻抗匹配特性,吸波剂的利用率更高,因此吸波体可达到宽频吸收效果,且高频处吸收能力更强。

为进一步研究吸波机理,分析了吸波剂立体分布

时吸收峰处的电场分布和磁场分布,如图 11 所示,吸波体是周期性角锥结构,俯视截面图是周期性矩形。外加电场仅为 30.7 V/m,在相邻的两个单元体之间出现了增强的电场,幅值达到了 67.9 V/m,由此判断,两个单元体之间出现了电耦合效应^[26]。如图 11(a)所示,单元体内部出现电场变化,即电损耗,这是由于受到外加电场的影响作用,单元体内出现了感应电荷,从而在单元体内出现方向相反的耦合电场,两电场之间作用产生电损耗;如图 11(b)所示,单元体之间出现电场变化,这是因为感应电荷存在,两个单元体之间

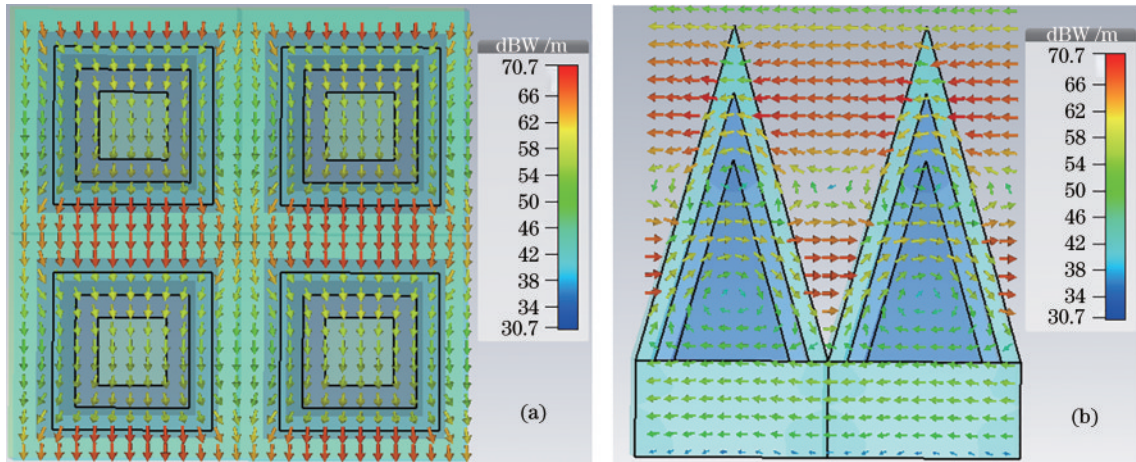


图 11 谐振频率处(17.4 GHz)的电场分布图。(a)俯视截面电场图;(b)正视截面电场图

Fig. 11 Electric field distribution diagram at resonant frequency (17.4 GHz). (a) Electric field diagram of top section; (b) electric field diagram of front section

也会产生一个耦合电场,与单元体之间可等效为一个平板电容结构,使得单元体之间的电场出现明显增强现象。

立体三层角锥结构从构造来说,具有其独特的优势。如图 12(a)所示,在单元体的边缘出现磁场明显的不均匀分布,这是因为入射波在单元体的棱边出现衍射,改变了入射波的传播路径,在单元体边缘分布的电磁场也发生偏转,这种电磁波的偏折作用会导致多

重散射效应,增加电磁波在吸波体中的传播距离^[28]。如图 12(b)所示,角锥的顶点处出现球状磁场,这是因为,当电磁波入射到角锥的顶角时,会发生球状衍射,被激发的无数个衍射波,形成中心在角锥顶点的球,从而产生球状磁场。如图 13 所示,入射电磁波可以在角锥层间进行多次反射和折射,因此可以在锥体之间得到充分吸收。另外,不同的入射电磁波在传输途中会发生干涉现象,也会额外增加对电磁波的消耗。

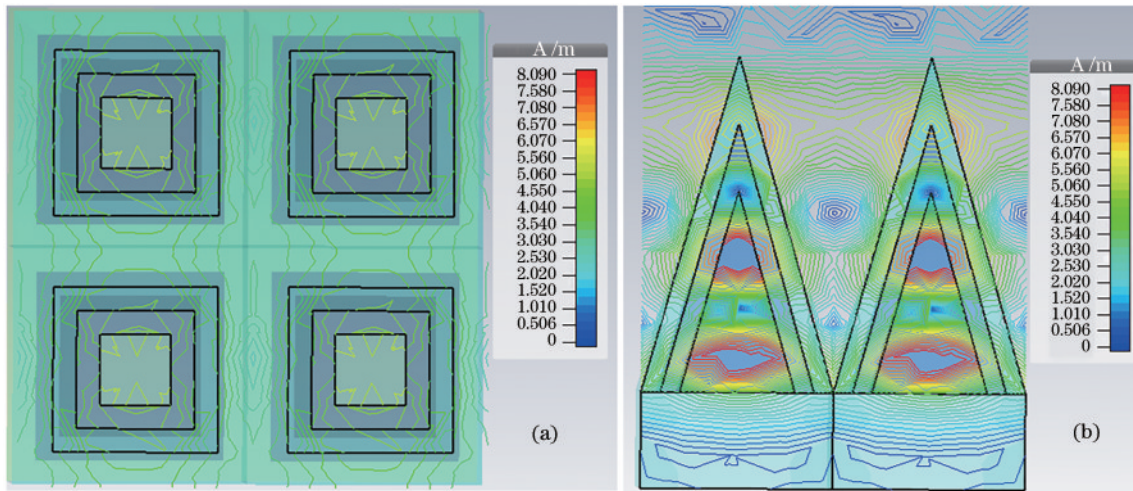


图 12 谐振频率处(17.4 GHz)的磁场分布图。(a)俯视截面磁场图;(b)正视截面磁场图

Fig. 12 Magnetic field distribution diagram at resonant frequency (17.4 GHz). (a) Magnetic field diagram of top section; (b) magnetic field diagram of front section

3.6 三层角锥吸波体吸波性能测试

对三层角锥吸波体 C10 进行吸波性能测试,并与 CST 仿真结果进行对比,结果如图 14 所示。根据实测结果,C10 吸波体在 6.1~18 GHz 有小于 -10 dB 的反射损耗,在 17.2 GHz 处达到了 -45.8 dB 的高强吸收。由图 14 可知,两条曲线整体的变化趋势大体相同,基本验证了仿真结果的可靠性。出现实测与仿真结果有偏差的原因主要有:1)打印精度不高。FDM 技术制备

的吸波体表面粗糙、打印过程中吸波体内部形成的微观孔洞以及打印出的角锥斜面出现台阶效应^[34],额外增加了吸波体对电磁波的消耗作用,因此实测的结果带宽略宽。出料不均匀造成角锥尖顶处缺陷,球形衍射引起的对电磁波的消耗作用也减少,因此在高频段测试吸波强度略低;2)测试的电磁参数有误差;3)数据拟合误差;4)反射损耗的测试误差。

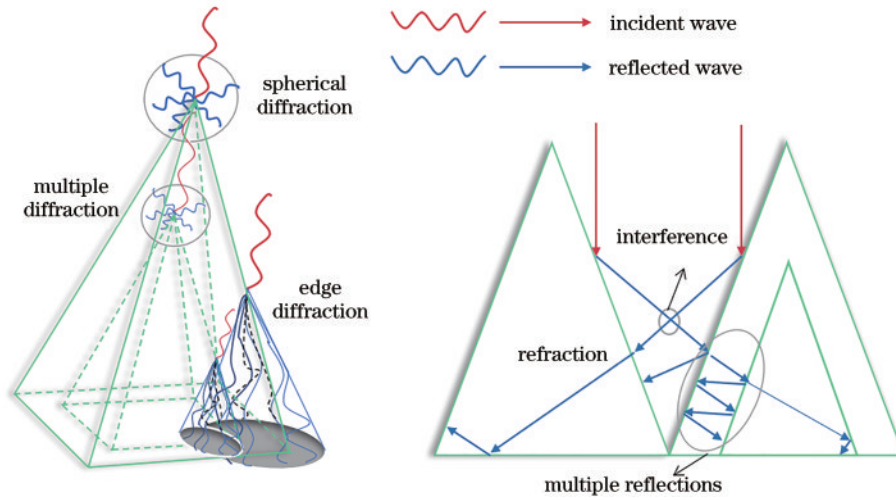


图 13 电磁波的传播

Fig. 13 Propagation of electromagnetic waves

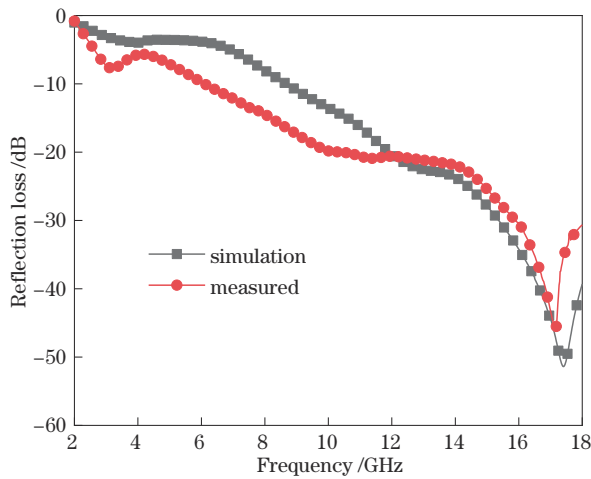


图 14 吸波体反射损耗模拟结果与实测结果对比曲线图

Fig. 14 Comparison curves between simulation and measured results of reflection loss of absorber

4 结 论

本文主要结论如下:

1) 吸波剂均质分布时,研究 RGO/Fe₃O₄/PLA 复合吸波剂组成对角锥吸波体性能的影响发现,RGO 含量的增加会增强其吸波能力,双组元吸波剂吸波性能优于单组元吸波剂。

2) 不同分布方式的吸波体,最佳的吸波剂组合不一致,吸波剂组合与分布方式相协同,才能达到最佳的吸收效果。吸波剂梯度分布的三层角锥吸波体,立体梯度分布时(三层吸波剂 RGO 加入的质量分数分别为 3%、5%、7%)可获得最强吸波效果:在 6.1~18 GHz 范围内的反射损耗低于 -10 dB,有效吸波带宽可达 11.9 GHz 以上,在 17.2 GHz 处达到最高吸收强度 -45.8 dB。实现了在不改变角锥外形尺寸条件下,对吸波体吸波性能的改善。

3) 吸波剂组合方式对吸波性能影响较小,分布方

式影响较大。立体分布的吸波体更适合高频吸收,在保证吸波带宽的基础上,可达到更高的吸收强度,且整体吸收效果波动小。这是因为,立体分布方式的吸波体一方面改善了阻抗匹配特性,保证有效吸波带宽;另一方面增加了多重散射、反射和球状衍射损耗,改变了电磁波的传输路径,提高了吸波强度。在实际应用时,可根据需求合理选取适合的吸波剂分布方式。

参 考 文 献

- [1] Zeng Z H, Wu T T, Han D X, et al. Ultralight, flexible, and biomimetic nanocellulose/silver nanowire aerogels for electromagnetic interference shielding[J]. ACS Nano, 2020, 14(3): 2927-2938.
- [2] Chang Y K, Mu C P, Yang B C, et al. Microwave absorbing properties of two dimensional materials GeP₅ enhanced after annealing treatment[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(1): 013103.
- [3] Zhang K L, Zhang J Y, Hou Z L, et al. Multifunctional broadband microwave absorption of flexible graphene composites[J]. Carbon, 2019, 141: 608-617.
- [4] Liu P B, Zhang Y Q, Yan J, et al. Synthesis of lightweight N-doped graphene foams with open reticular structure for high-efficiency electromagnetic wave absorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 368: 285-298.
- [5] Cheng Y, Li Z Y, Li Y, et al. Rationally regulating complex dielectric parameters of mesoporous carbon hollow spheres to carry out efficient microwave absorption [J]. Carbon, 2018, 127: 643-652.
- [6] Wang P, Cheng L F, Zhang L T. One-dimensional carbon/SiC nanocomposites with tunable dielectric and broadband electromagnetic wave absorption properties[J]. Carbon, 2017, 125: 207-220.
- [7] Xie A M, Wu F, Jiang W C, et al. Chiral induced synthesis of helical polypyrrole (PPy) nano-structures: a lightweight and high-performance material against electromagnetic pollution[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(8): 2175-2181.

- [8] Xu W, Pan Y F, Wei W, et al. Nanocomposites of oriented nickel chains with tunable magnetic properties for high-performance broadband microwave absorption[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2018, 1(3): 1116-1123.
- [9] Wang G S, Deng Y, Xiang Y, et al. Fabrication of radial ZnO nanowire clusters and radial ZnO/PVDF composites with enhanced dielectric properties[J]. *Advanced Functional Materials*, 2008, 18(17): 2584-2592.
- [10] Luo J H, Zhang K, Cheng M L, et al. MoS₂ spheres decorated on hollow porous ZnO microspheres with strong wideband microwave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 380: 122625.
- [11] Lü H L, Zhang H Q, Ji G B, et al. Interface strategy to achieve tunable high frequency attenuation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(10): 6529-6538.
- [12] Liu J W, Che R C, Chen H J, et al. Microwave absorption enhancement of multifunctional composite microspheres with spinel Fe₃O₄ cores and anatase TiO₂ shells[J]. *Small*, 2012, 8(8): 1214-1221.
- [13] Liu P B, Gao S, Wang Y, et al. Carbon nanocages with N-doped carbon inner shell and Co/N-doped carbon outer shell as electromagnetic wave absorption materials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 381: 122653.
- [14] 邢垒. 石墨烯 3D 打印复合线材制备及其吸波性能研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
- Xing L. Preparation of graphene 3D printed composite wire and study on its absorbing properties[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020.
- [15] 刘姗姗, 李泉, 杨子榆, 等. 基于石墨烯-金属复合超材料结构的电磁诱导透明非线性调制[J]. *中国激光*, 2021, 48(19): 1918006.
- Liu S S, Li Q, Yang Z Y, et al. Nonlinear modulation of electromagnetically induced transparency based on graphene-metal hybrid metamaterial structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(19): 1918006.
- [16] 叶喜葱, 欧阳宾, 杨超, 等. 石墨烯-羰基铁粉线材的制备及其吸波性能分析[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(7): 3292-3302.
- Ye X C, Ouyang B, Yang C, et al. Preparation of graphene-carbonyl iron powder wire and analysis of its wave absorption performance[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7): 3292-3302.
- [17] Li L, Xi R, Liu H X, et al. Broadband polarization-independent and low-profile optically transparent metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(5): 052001.
- [18] Xiao H D, Qu Z P, Lü M Y, et al. Optically transparent broadband and polarization insensitive microwave metamaterial absorber[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(13): 135107.
- [19] Yin Z P, Lu Y J, Gao S, et al. Optically transparent and single-band metamaterial absorber based on indium-tin-oxide[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, 29(2): e21536.
- [20] Yu B Y, Zhao Y J, Chen J Q, et al. Broadband transparent metamaterial absorber in wireless communication band based on indium tin oxide film[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2019, 29(12): e21955.
- [21] 李彬, 李仁林, 冀志江, 等. 角锥结构炭黑/水泥基复合材料的吸波性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(6): 1-5, 18.
- Li B, Li R L, Ji Z J, et al. Electromagnetic wave absorbing properties of carbon black/cement-based materials with pyramidal structures[J]. *New Building Materials*, 2020, 47(6): 1-5, 18.
- [22] 户瑞珍, 王建扬, 吴倩楠. 一种基于方形对称型的超材料太赫兹多频吸波器[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 0516001.
- Hu R Z, Wang J Y, Wu Q N. A metamaterial terahertz multi-frequency absorber based on square symmetry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0516001.
- [23] 礼嵩明, 吴思保, 王甲富, 等. 含超材料的新型蜂窝夹层结构吸波复合材料[J]. *航空材料学报*, 2019, 39(3): 94-99.
- Li S M, Wu S B, Wang J F, et al. Novel honeycomb sandwich structure wave-absorbing composites with metamaterials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(3): 94-99.
- [24] 迟百宏, 吴逸民, 洪元, 等. 基于微滴喷射成形的多层超材料吸波体设计与制造[J]. *电子元件与材料*, 2020, 39(10): 47-51.
- Chi B H, Wu Y M, Hong Y, et al. Design and fabrication of multilayer wideband metamaterial absorbers with micro droplets jetting printing[J]. *Electronic Components and Materials*, 2020, 39(10): 47-51.
- [25] 迟百宏. 聚合物熔体微分 3D 打印成形机理与实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- Chi B H. Forming mechanism and experimental study of polymer melt differential 3D printing[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [26] 熊益军, 王岩, 王强, 等. 一种基于 3D 打印技术的结构型宽频吸波超材料[J]. *物理学报*, 2018, 67(8): 084202.
- Xiong Y J, Wang Y, Wang Q, et al. Structural broadband absorbing metamaterial based on three-dimensional printing technology[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(8): 084202.
- [27] 张志, 宋波, 王晓波, 等. 吸能的力学超材料设计与增材制造研究现状及趋势[J]. *中国激光*, 2022, 49(14): 1402301.
- Zhang Z, Song B, Wang X B, et al. Research status and trend of design and additive manufacturing for mechanical metamaterials with energy absorption[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(14): 1402301.
- [28] 吕述平, 刘顺华. 微波暗室用角锥吸波材料外形的设计和分析[J]. *材料科学与工艺*, 2007, 15(4): 572-574, 578.
- Lü S P, Liu S H. Design and analyze of the figure of pyramid absorber used in microwave Chambers[J]. *Materials Science and Technology*, 2007, 15(4): 572-574, 578.
- [29] 周晨晖. 磁性金属/介电复合材料的制备及电磁波吸收性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Zhou C H. Synthesis and electromagnetic wave absorbing

- performance of magnetic metal/dielectric composites[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [30] 吴正晨. 吸波材料的微结构设计[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- Wu Z C. Microstructure design of microwave absorption materials[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [31] 郭晓琴. 磁性纳米粒子负载石墨烯的结构调控及吸波机理研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- Guo X Q. Structure regulation and microwave absorption mechanism of graphene loaded magnetic nanoparticles [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [32] 许志远, 李维, 马国庆, 等. 不同电磁特性吸收剂的多层宽带吸波材料设计[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(2): 199-204.
- Xu Z Y, Li W, Ma G Q, et al. Design of broadband absorbers by multiple layers containing absorbents with different magnetic properties[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2021, 39(2): 199-204.
- [33] 陈鹏. 基于电磁超材料的宽带吸波体设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- Chen P. Broadband absorber design based on electromagnetic metamaterials[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [34] 朱政红, 王珩. 熔融沉积快速成型工艺参数优化分析研究[J]. 机械设计与制造, 2021(6): 130-133, 138.
- Zhu Z H, Wang H. Research on optimizing technological parameters of fused deposition rapid prototyping[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6): 130-133, 138.