

一种基于3D打印技术的结构型宽频吸波超材料

熊益军 王岩 王强 王春齐 黄小忠 张芬 周丁

Structural broadband absorbing metamaterial based on three-dimensional printing technology

Xiong Yi-Jun Wang Yan Wang Qiang Wang Chun-Qi Huang Xiao-Zhong Zhang Fen Zhou Ding

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 084202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172262

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172262>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于格林函数法的奇型 Mathieu-Gaussian 光束

Odd version Mathieu-Gaussian beam based on Green function

物理学报.2017, 66(20): 204201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204201>

随机电磁光束经像散透镜后磁场的频谱 Stokes 奇点

Magnetic spectral Stokes singularities of stochastic electromagnetic beams through an astigmatic lens

物理学报.2016, 65(23): 234201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234201>

一维反激光器完美相干吸收理论分析

Theoretical analysis of coherent perfect absorption in one-dimensional anti-laser

物理学报.2012, 61(16): 164204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164204>

双包层稀土掺杂光纤抽运吸收特性的分析

Analysis of absorption property for pumping laser with double cladding rare earth doped fiber

物理学报.2012, 61(16): 164203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.164203>

尘埃粒子电势对等离子体电导率的影响

Effect of dust particle potential on plasma conductivity

物理学报.2012, 61(15): 154202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.154202>

一种基于3D打印技术的结构型宽频吸波超材料*

熊益军¹⁾²⁾ 王岩^{1)2)†} 王强¹⁾²⁾ 王春齐¹⁾²⁾ 黄小忠^{1)2)‡} 张芬²⁾³⁾ 周丁²⁾

1)(中南大学航空航天学院, 长沙 410012)

2)(新型特种纤维及其复合材料湖南省重点实验室, 长沙 410012)

3)(中南大学物理与电子学院, 长沙 410012)

(2017年10月19日收到; 2017年12月29日收到修改稿)

设计了一种三层宽频吸波超材料, 其表层和中间层为单元尺寸不同的周期阵列结构, 底层为吸波平板结构, 优化后的总厚度仅为4.7 mm, 并采用三维(3D)打印技术成功制备了该吸波超材料. 吸波体反射率测试结果表明, 在电磁波垂直入射条件下, 宽频吸收峰分别出现在5.3和14.1 GHz, 两峰叠加使得其在4—18 GHz频率范围内反射损耗均小于-10 dB. 采用S参数反演法计算了每一层的等效电磁参数, 并利用多层结构反射率公式推导出该模型的理论反射率, 理论计算结果与实测结果基本一致. 通过研究能量损耗、电场分布和磁场分布揭示了吸波机理, 分析表明该吸波体的宽频吸收效果源于三层结构产生的吸收带宽叠加. 本文提出的吸波超材料具有良好的宽频吸收效果, 尤其在低频范围吸波性能较佳, 结合3D打印快速成型技术, 可获得结构精细的三层吸波超材料, 具有重要的实际应用价值和广阔的应用前景.

关键词: 吸波超材料, 三维打印技术, 宽频吸收**PACS:** 42.25.Bs, 04.30.Nk**DOI:** 10.7498/aps.67.20172262

1 引言

吸波材料是雷达波隐身技术的重要实现途径, 在应用上主要包括涂层隐身材料^[1-3]与结构隐身材料^[4-7]两类. 为提高吸波材料的性能, 研究人员通常采用多种材料复合、多层结构设计以及基于金属谐振周期结构的超材料吸波体设计等方法. 多种材料复合的方法常用于吸波涂层, 一般选择几种粉末或纤维材料(如铁氧体、炭黑、氧化锌晶须、羰基铁、碳纳米管以及玻璃微珠等)按照设计比例混合, 调节出合适的电磁参数, 实现良好吸收. Hossein等^[8]将纳米石墨片、锶铁氧体以及聚噻吩制备成核壳结构复合材料并研究其吸波性能, 结果表明当材料厚度为1.5 mm时在9.7和12 GHz处反射率分别达到-28和-39 dB, 在8—12 GHz范围可实

现良好的吸收效果. He等^[9]将Fe₃O₄制备成纳米管形状, 使得材料的比重减小, 吸收峰强度增大, 在7.45 GHz处达到-50.94 dB, -10 dB以下达到了2.75 GHz. 然而受材料本身性能和厚度带宽比^[10]的限制, 在限定厚度情况下采用多种材料复合的方式很难进一步扩展吸收频带, 尤其是低频段吸收. 通过多层结构设计的方法^[11,12]可实现宽频带阻抗匹配, 能够有效拓宽吸收频带, 如姚斌等^[13]利用圆形缝隙型活性碳毡电路屏、短切碳纤维以及玻璃纤维增强的环氧树脂制备的三层吸波材料, 其厚度为6 mm, 在6.17—17.5 GHz内反射率低于-10 dB.

近年来, 利用超材料吸波体设计来提高吸波材料性能的方法受到国内外学者的广泛研究. 有别于传统吸波材料主要依靠厚重的吸收剂, 超材料吸波体通常由金属谐振表面、介质层、导电底板组成^[14,15], 具有厚度薄、质量轻、吸收强、可调

* 湖南省科技计划(批准号: 2015TP1007)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangyan@csu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: huangxzh@csu.edu.cn

节等优点.超材料谐振吸收机理决定了其通常只实现窄带吸收,为了拓宽吸波超材料吸收带宽,研究者们采取了诸多方法,如设计多重谐振结构^[16]、超材料/磁性吸波材料复合吸波体^[17,18],以及加入集总元器件^[19,20]等.如Huang和Chen^[21]用三个不同尺寸的I-type结构组成吸波单元,然后通过调节结构尺寸使三个吸收峰叠加,最终产生了0.899—0.939 THz的宽频吸收效果.

超材料的出现将吸波材料的设计从挖掘吸收剂的电磁特性转变为从结构上设计新的人工电磁性能,而这种复杂的精细结构对于制造工艺的要求非常高.目前超材料产品的制造通常使用聚焦铁束粉、光刻以及电子束刻蚀^[22,23]等微纳加工技术,首先对单层结构进行加工,之后使用整合程序进行多层挤压.此外还可以采用激光刻蚀技术,即将光致抗蚀剂按照需要对设计的图案进行覆盖,由于光致抗蚀剂对激光波长是透明的,故可通过调节光强度来诱导多光子吸收形成聚合.该方法可以用来制造周期性以及非周期性的三维结构.总的来说,上述广泛采用的超材料的制备方法复杂而且周期长,尤其对于非周期或非平面结构的加工显得笨拙困难^[24].3D打印技术是一种通过材料逐层累加的方法制造实体零件的技术,自下而上、逐层累加的工艺特点使得其在成型复杂结构方面具备明显优势.将3D打印技术应用于超材料制造将有效克服结构复杂度引起的加工困难.

本文设计了一种三层结构宽频吸波超材料,分别对该超材料结构进行了建模、仿真和优化实验,并采用S参数反演法得到每一层的等效参数,提出了该超材料的等效模型.同时,采用3D打印技术成功制备了该超材料,并通过分析能量损耗仿真结果、电场分布图以及磁场分布图研究了其吸收机

理.该吸波超材料具有一定的实际应用价值,采用的3D打印技术为吸波材料的快速制造提供了有效的方法.

2 建模与仿真优化

本文以商业电磁场仿真软件CST为工具进行建模和仿真.空间背景材料为真空,电磁波入射端口为Z轴正向,电磁波以平面波形式垂直入射.在X轴和Y轴方向边界条件均设置为周期边界.整体模型设计成表层和中间层为不同边长方块的周期方阵阵列排布,底层为平板结构,最底层为金属反射层.一个周期单元的模型及其尺寸如图1所示.

图1中绿色部分使用材料为羰基铁粉和尼龙的粉末混合物(mixture of carbonyl iron and nylon,MCIN),其中羰基铁的体积占比为70%.该混合粉末材料可以直接熔融后制备成测试样品,利用同轴传输线方法测试得到其在2—18 GHz频率范围内电磁参数,具体的测试结果如图2所示.

依照实测数据设置材料参数,利用CST自带优化器,采用置信域法对 l_1, l_2, l_3, d_2, d_3 进行参数优化,得到最优超材料结构设计模型.该模型可以视为一种三层吸波结构,其中表层和中间层均由MCIN材料与空气混合而成.表层中MCIN含量较高而中间层MCIN含量较低,底层为MCIN均匀平板.假设表层和中间层为一种宏观匀质化材料,而其电磁参数由该宏观介质的等效电磁参数来表征^[25],如图3所示, ϵ_1, μ_1 分别为表层的等效介电常数与等效磁导率, ϵ_2, μ_2 分别为中间层的等效介电常数与等效磁导率.

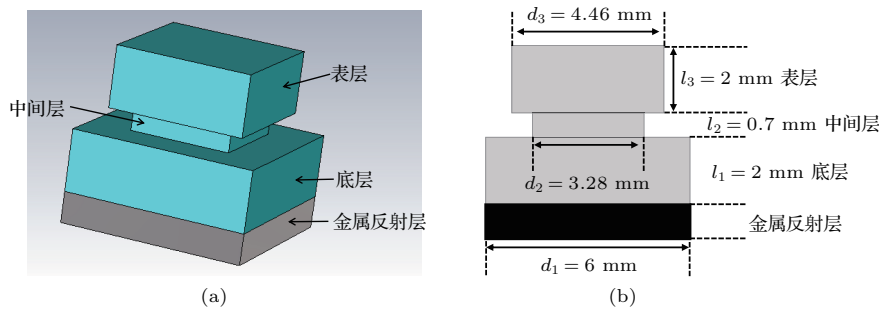


图1 三层方阵结构吸波超材料模型 (a) 周期单元模型; (b) 模型尺寸

Fig. 1. Model of absorbing metamaterial with three layer square structure: (a) Model of periodic unit; (b) model size.

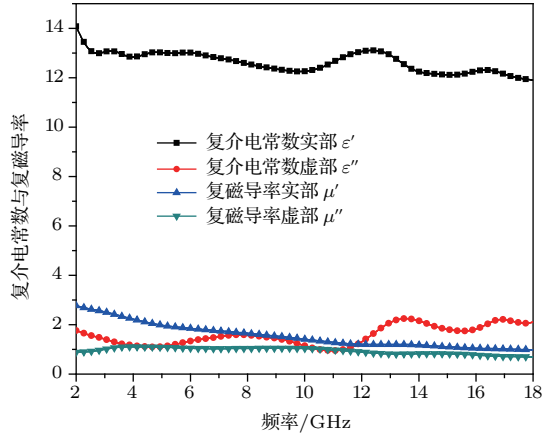


图2 MCIN的复介电常数与复磁导率

Fig. 2. Complex permittivity and complex permeability of MCIN.

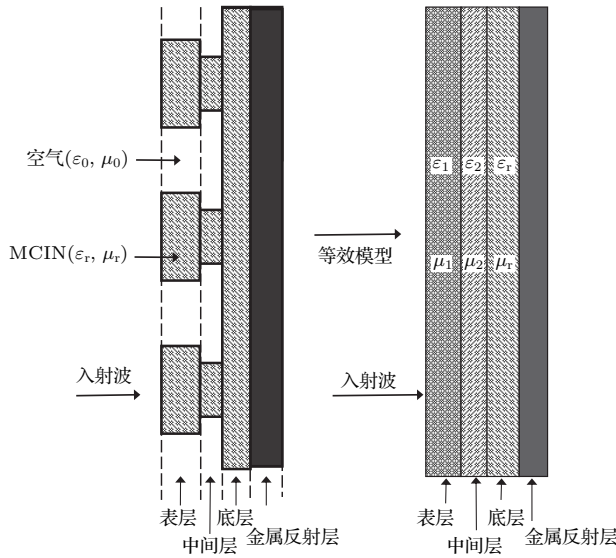


图3 三层方阵结构吸波超材料的等效化多层结构模型 (左图) 及等效模型 (右图)

Fig. 3. Equivalent multi-layer structure model (left) and effective model (right) of the wave absorbing metamaterials with three layer square matrix structure.

表层和中间层的等效电磁参数由 S 参数反演方法计算得到 [26]. 根据电磁波在介质中传播的基本原理, 单层介质的透射系数 S_{21} 与反射率系数 S_{11} 可以由介质的复数折射率 n 和复波阻抗 Z_r 来计算:

$$S_{11} = \frac{\frac{i}{2} \left(\frac{1}{Z_r} - Z_r \right) \sin(nk_0 p)}{\cos(nk_0 p) - \frac{i}{2} \left(\frac{1}{Z_r} + Z_r \right) \sin(nk_0 p)}, \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{1}{\cos(nk_0 p) - \frac{i}{2} \left(\frac{1}{Z_r} + Z_r \right) \sin(nk_0 p)}, \quad (2)$$

其中真空波矢量 $k_0 = w/c$, 复折射率 $n = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}}$, 复波阻抗 $Z_r = \sqrt{\mu_{\text{eff}} / \epsilon_{\text{eff}}}$, p 为介质的厚度, 其中下标 eff 表示等效参数. 由 (1) 式和 (2) 式反演推导分别得到 n 和 Z_r 的计算公式:

$$n = \frac{1}{k_0 p} \left\{ \arccos \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] + 2m\pi \right\}, m \in \mathbb{N}, \quad (3)$$

$$Z_r = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}. \quad (4)$$

由于 (3) 式中存在一个 arccos 函数, 会导致出现多值结果, 故研究者通常使用 Kramers-Kronig 关系来寻求 m 的真值 [27]. 根据材料本身的特性以及一个比较小的介质厚度, 计算得出本文中 m 取值为 0. 等效介质的等效介电常数 ϵ_{eff} 和等效磁导率 μ_{eff} 可表示为

$$\epsilon_{\text{eff}} = n / Z_r, \quad \mu_{\text{eff}} = n \cdot Z_r. \quad (5)$$

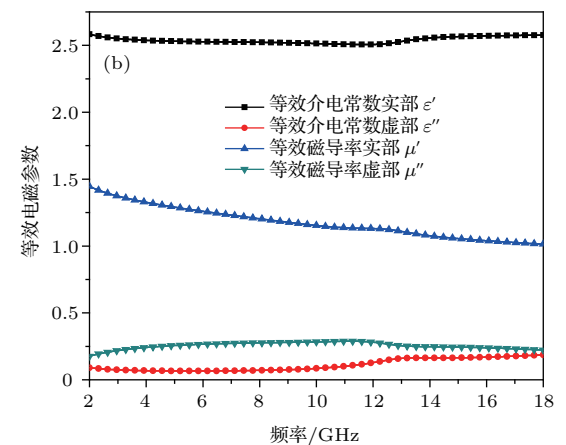
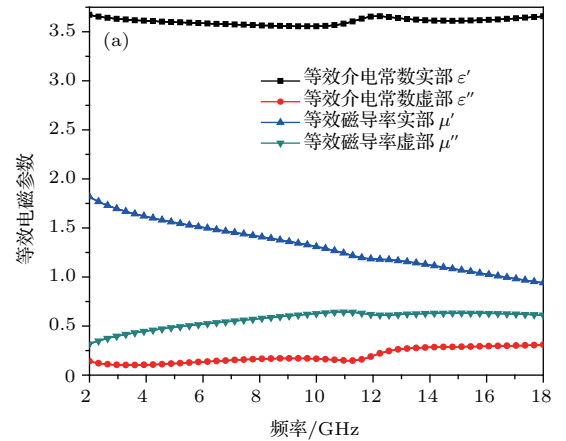


图4 S 参数反演法得到的等效电磁参数 (a) 表层等效电磁参数; (b) 中间层等效电磁参数

Fig. 4. Effective electromagnetic parameters extracted by S parameters inversion: (a) Effective electromagnetic parameters of the surface layer; (b) effective electromagnetic parameters of the intermediate layer.

将本文所述模型的表层方阵结构单独在CST中建模并且进行仿真,可分别得到其透射系数和反射系数 S_{21} , S_{11} , 然后根据上文所述的反演方法计算可以分别得到表层和中间层的等效电磁参数,结果如图4所示.

3 3D打印样品制备与分析

本文采用选择性激光烧结工艺方法(selective laser sintering, SLS) [28] 进行样品的3D打印制备,设备为湖南华曙高科技生产的FS402 P型SLS打印机,打印原料为MCIN, 尼龙的体积占比分别为40%, 30%和20%. 研究表明,当尼龙含量越高时,由于吸收剂含量较少,吸波效果较差;而当尼龙含量较低时,样品的强度较差,甚至难以固化成型. 综合考虑,最终选取尼龙体积分数为30%的MCIN材料制备样品. 图5为激光烧结工艺示意图.

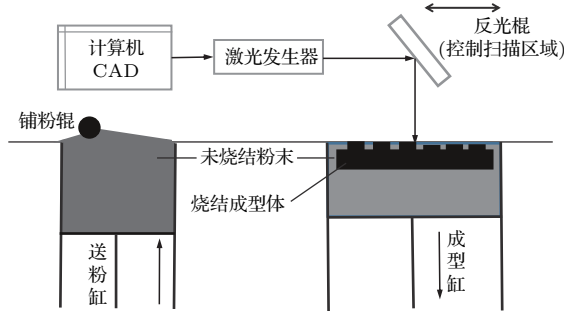


图5 SLS原理图

Fig. 5. Schematic diagram of SLS.

在制备过程中,由于使用的设备是工业级的3D打印机,排除了诸多干扰因素,故影响成品性能的主要工艺参数为:激光功率、扫描间距和铺粉层厚.

激光功率的大小直接影响到输入能量的大小. 研究表明,激光功率过大会导致尼龙粉末熔化过快,粉末之间出现较大空隙,甚至出现“飞溅”现象,严重影响烧结件精度;而激光功率过小会导致层与层之间烧结不透,尼龙粉末与羰基铁粉末结合不紧密,烧结件的力学性能太差. 经过多次实验,最终优化激光功率为45 W.

在本次烧结制备中,扫描间距太大会导致两烧结线之间存在未烧结区域,影响烧结件性能;扫描间距太小则会导致两烧结线重叠太多,重叠部分能量过大,可能出现翘曲或开裂等问题 [29]. 经过多次实验,最终优化的扫描间距为0.3 mm.

铺粉层厚的选择直接影响烧结件的力学性能,层厚越大,需要的能量越高,对激光器的要求也越高,因此在不考虑铺粉难度的情况下,只需要保证每一层的能量适合,层厚越小最后烧结件的力学性能就越好. 考虑到粉末粒径的影响以及铺粉时滚筒与粉末之间的黏结效应,为了保证每一层粉末的均匀以及孔隙率的减小,经过多次实验,最终优化的铺粉层厚为0.1 mm.

图6为利用尼龙含量为30%的MCIN材料和上述优化的3D打印参数制备的三层方阵结构超材料吸波体. 最终制备得到的超材料样品,整体结构精度较好,不过由于黏结剂尼龙的体积占比比较少,样品的表面比较粗糙,材料的孔隙较多,因而整体的力学性能不佳. 如何提高样品的力学性能是3D打印制备方法的重点,仍需要进一步的研究.

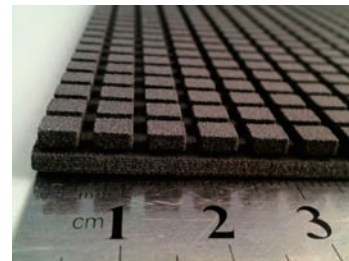


图6 SLS工艺制备的三层方阵结构吸波超材料样品

Fig. 6. Specimen of three layer square structure absorbing metamaterial fabricated by SLS.

样品的反射率测试采用弓形法,整个测试过程在微室中进行. 测试结果如图7所示.

4 分析与讨论

根据模型各个层的等效电磁参数,依据传输线理论,按照多层吸波材料的反射率计算公式来计算得到其整体的理论反射率. 多层吸波材料反射率计算公式为:

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_{in}^0 - 1}{Z_{in}^0 + 1} \right|, \quad (6)$$

$$Z_{in}^i = Z_i \frac{Z_{in}^{i+1} + Z_i \tanh(\gamma_i d_i)}{Z_i + Z_{in}^{i+1} \tanh(\gamma_i d_i)}, \quad (7)$$

其中 $Z_{in}^4 = 0$ (金属底层), $Z_i = \sqrt{\mu_{r,i}/\epsilon_{r,i}}$, $\gamma_i = j2\pi f \sqrt{\epsilon_{r,i}\mu_{r,i}}/c$, Z_i 为该层的特征阻抗, γ_i 为传播常数,这两个量均由该层的等效电磁参数决定; c 为光速. 将输入阻抗依次代入前一层,最后可以得到最表层反射率,即多层结构的反射率.

将本文中三层结构的等效电磁参数分别代入(6)式和(7)式,可以得到模型的理论反射率,并与前文中的仿真结果和实际测试结果对比,如图7所示,理论计算值、仿真计算值与实际测试值符合较好.对比模拟仿真结果和样品测试结果,发现实际测试值的吸收强度始终较小,造成的原因可能是实际样品为有限的单元结构,并非无限的单元结构,并且实际测试中以喇叭天线的远场球面波近似等效平面波,另外实际材料的电磁参数与仿真和计算使用的电磁参数并不完全一致.对比理论计算结果和模拟仿真结果,发现理论计算结果和模拟仿真结果尽管吸收峰的位置基本一致,但强度和吸收变化规律仍存在较大差异,这可能是由于等效多层模型忽略了边缘效应^[30]以及层间的结构化耦合导致的.假设表层的方阵结构与中间层的相对位置产生错位平移,这必然导致两层之间结构化耦合带来的反射率变化,而从等效电磁参数多层模型来看,理论计算的反射率是始终不变的.这说明等效多层模型具有其局限性,尤其是在结构化引起的层间耦合对反射率影响比较大的情况下.三条反射率曲线的整体趋势一致,峰值所在位置基本接近,这也验证了结果的正确性.

为了进一步研究吸波机理,我们分析了吸收峰处的能量损耗分布、电场分布与磁场分布.

图8给出了不同吸收峰下的能量损耗分布图,在5.3 GHz频率处电磁波能量主要分布在底层,而14.1 GHz频率的电磁波能量主要分布在表层和中间层.分析认为,低频的电磁波基本没有发生层间的反射,直接进入了最底层,然后被金属底板反射,其主峰对应的 $\lambda/4$ 谐振厚度为三层吸波材料的总

厚度;而高频的电磁波在底层和中间层的界面处发生了反射,大部分能量都没有进入底层,其对应的 $\lambda/4$ 谐振厚度为表层和中间层两层的厚度之和.

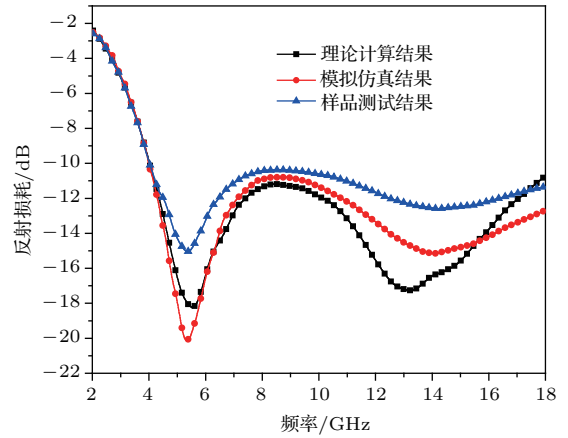


图7 理论推导、模拟仿真及实物样品测试的反射损耗对比
Fig. 7. Comparison of reflection loss between theoretical, simulated, and experimental results.

图9(a)和图9(b)分别为5.3和14.1 GHz处谐振区域的电场分布图,底层为均匀平板,因而电场分布均匀(图9(a));顶层为周期方块结构,在相邻方块之间出现了增强的电场(图9(b)),幅值达到6585 V/m,而外加电场的幅值仅1575 V/m,可以看出,在两个方块之间产生了强烈的电耦合效应.图9(c)给出了顶层的电耦合效应物理模型,受到外界电场 E_0 的影响,在方块的上下边界会产生感应电荷,使得在方块内产生一个方向相反的耦合电场 E_q ,从而产生电损耗;另外感应电荷的存在还会导致上下两个方块之间产生一个耦合电场 E_c ,等效形成了一个平板电容结构,使得该处的电场增大很多.

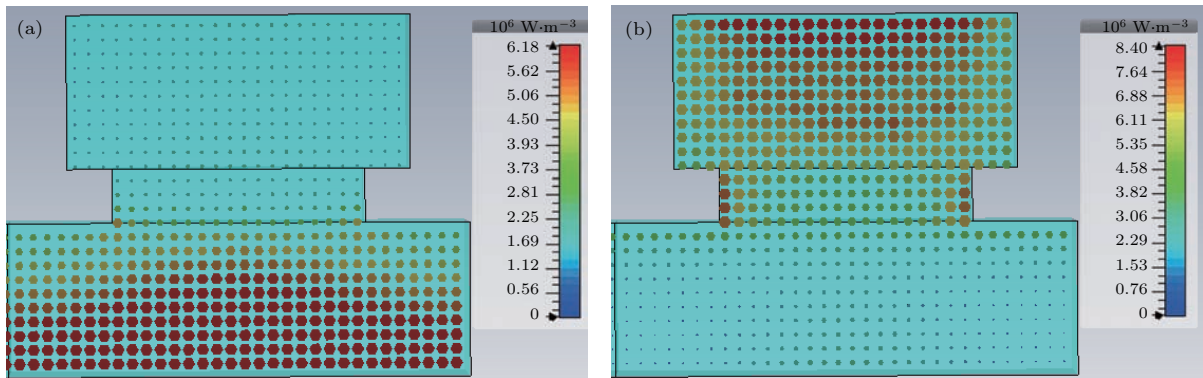


图8 谐振频率处的能量损耗密度分布图 (a) 5.3 GHz; (b) 14.1 GHz

Fig. 8. Power loss density distributions at the resonant frequency of (a) 5.3 GHz, (b) 14.1 GHz.

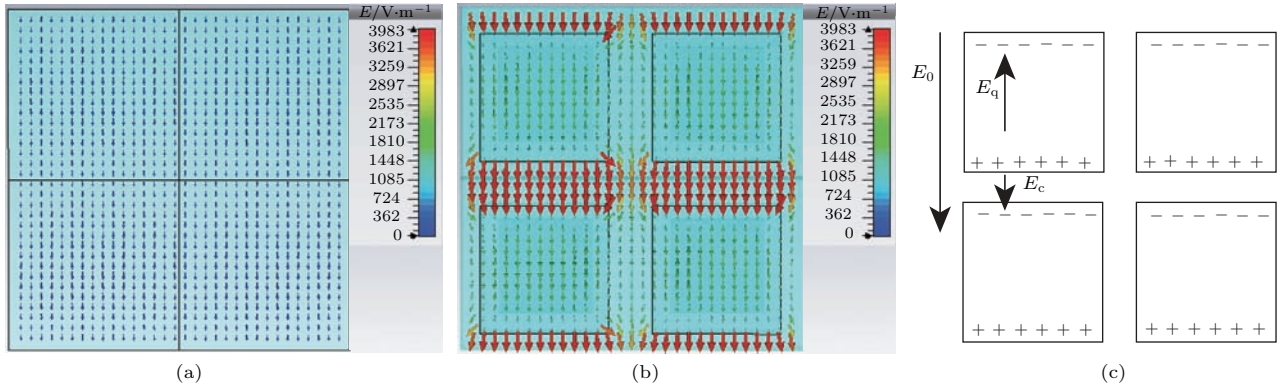


图9 谐振频率处的电场分布图 (a) 5.3 GHz, (b) 14.1 GHz; (c) 电耦合效应物理模型

Fig. 9. Electric field distributions at the resonant frequency of (a) 5.3 GHz, (b) 14.1 GHz as well as (c) physical model of electric coupling effect.

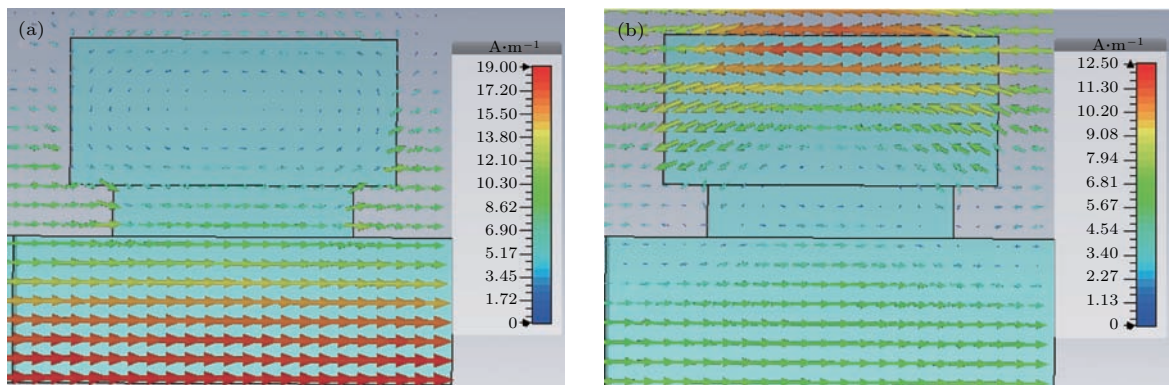


图10 谐振频率处的磁场分布图 (a) 5.3 GHz; (b) 14.1 GHz

Fig. 10. Magnetic field distributions at the resonant frequency of (a) 5.3 GHz, (b) 14.1 GHz.

图10给出了两个吸收峰下的磁场分布, 5.3 GHz 频率下的磁场集中在底层, 14.1 GHz 频率下的磁场主要集中在顶层. 另外, 边缘效应在该结构中对损耗也会产生较大的影响, 在方块棱边, 入射波在边缘位置产生衍射, 使得进入吸波体的波矢方向发生了改变, 在方块边缘的电磁场会发生很大的偏转, 这种对电磁波的偏折作用明显会导致多重散射效应^[31], 增加电磁波在材料中的传播距离, 产生更多的损耗.

为验证以上推论, 设计了两个对比仿真实验. 实验一的仿真对象为厚度为4.7 mm的平板结构, 实验二的仿真对象为表层和中间层的仿真. 图11给出了这两个对比实验与原三层结构超材料吸波体反射率的对比结果. 可以看出, 与三层方正结构超材料相比, 实验一吸收峰向低频偏移, 主要原因是在相同厚度下, 平板吸波材料的介电常数和磁导率均大于三层吸波结构, 导致其特征波长更长, 特征频率更低. 另外, 对比表明平板吸波材料与自由空间没有实现良好的阻抗匹配, 导致吸收带

宽只有1.2 GHz, 而实验二的峰值所对应的频点基本在14.1 GHz附近. 对比结果验证了前文推论的正确性, 三层方阵结构的宽频效果源于三层结构带来的吸收带宽的叠加.

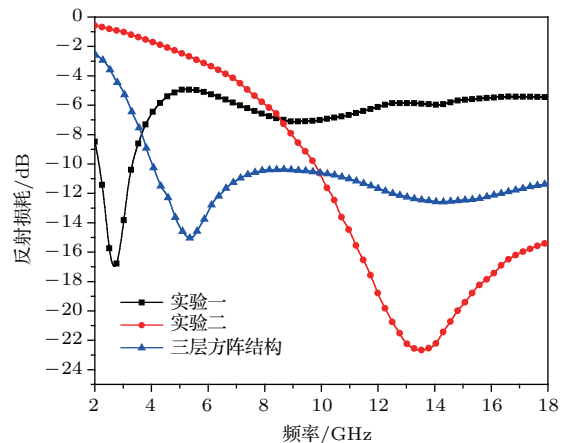


图11 实验一、实验二与三层方阵结构吸波超材料反射损耗对比

Fig. 11. Comparison of reflection loss between experiment 1, experiment 2, and presented absorbing meta-material.

5 结 论

设计了一个三层结构吸波超材料, 利用同种材料在每层设计不同的结构, 经过优化后其反射损耗在4—18 GHz均低于−10 dB, 在5.3和14.1 GHz出现了两个较强的宽频吸收峰. 将每层结构等效为平板结构, 通过理论和仿真计算证明了该超材料的宽频效果源于三层结构带来的吸收带宽的叠加.

本文设计的吸波超材料尺寸较小且结构复杂, 采用3D打印制备该超材料, 在确定其关键参数后可以简单快速地完成制备. 随着超材料领域研究的不断深入, 超材料的设计更加复杂, 在实际应用与制备方面也困难重重. 本文的研究充分证明了3D打印工艺制备精细结构吸波超材料的可行性.

感谢湖南华曙高科有限公司提供的设备帮助和支持!

参考文献

- [1] Hu C X 2004 *Stealth Coating Technology* (Beijing: Chemistry Industry Press) (in Chinese) [胡传忻 2004 隐身涂层技术 (北京: 化学工业出版社)]
- [2] Yuan J, Xiao G, Cao M S 2006 *Mater. Des.* **27** 45
- [3] Zhou L, Zhou W, Chen M, Luo F, Zhu D 2011 *Mater. Sci. Eng. B* **176** 1456
- [4] Kumar T A, Inayathullah J, Nagarajan V A, Kumar S H 2016 *Bull. Mater. Sci.* **39** 279
- [5] Choi I, Jin G K, Seo I S, Dai G L 2012 *Compos. Struct.* **94** 3002
- [6] Feng J, Zhang Y, Wang P, Fan H 2016 *Compos. Part B: Eng.* **99** 465
- [7] Bollen P, Quievy N, Detrembleur C, Thomassin J M, Monnereau L, Bailly C, Huynen I, Pardoën T 2016 *Mater. Des.* **89** 323
- [8] Hosseini S H, Alamian A, Mousavi S M 2016 *Fibers Polym.* **17** 593
- [9] He P, Hou Z L, Zhang K L, Li J, Yin K, Feng S, Bi S 2017 *J. Mater. Sci.* **52** 8258
- [10] Rozanov K N 2000 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **48** 1230
- [11] Song W L, Zhang K L, Chen M J, Hou Z L, Chen H S, Yuan X J, Ma Y B, Fang D N 2017 *Carbon* **118** 86
- [12] Zhou Q, Yin X W, Ye F, Liu X F, Cheng L F, Zhang L T 2017 *Mater. Des.* **123** 46
- [13] Yao B, Xia S X, Ou X H, Cheng C G 2016 *Fiber Reinforced Plastics Composites* **4** 26 (in Chinese) [姚斌, 夏少旭, 欧湘慧, 程朝歌 2016 玻璃钢复合材料 **4** 26]
- [14] Wang H, Kong P, Cheng W T, Bao W Z, Yu X W, Miao L, Jiang J J 2016 *Sci. Rep.* **6** 23081
- [15] Xu W H, He Y, Kong P, Li J L, Xu H B, Miao L, Bie S W, Jiang J J 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 1443
- [16] Bhattacharyya S, Srivastava K V 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 4184
- [17] Cheng Y Z, Nie Y, Wang X, Gong R Z 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 207492
- [18] Wang Q, Tang X Z, Zhou D, Du Z J, Huang X Z 2017 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **16** 3200
- [19] D'Aloia A G, D'Amore M, Sarto M S 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 2527
- [20] Costa F, Monorchio A, Manara G 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1551
- [21] Huang L, Chen H 2011 *OALib Journal* **113** 103
- [22] Zhang S, Zhou J F, Park Y S, Rho J, Singh R, Nam S, Azad A K, Chen H T, Yin X, Taylor A J, Zhang X 2012 *Nat. Commun.* **3** 942
- [23] Zhu W M, Liu A Q, Zhang X M, Tsai D P, Bourouina T, Teng J H, Zhang X H, Guo H C, Tanoto H, Mei T, Lo G Q, Kwong D L 2011 *Adv. Mater.* **23** 1792
- [24] Xiong H 2014 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [熊汉 2014 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [25] Zhao Y C, Wan G B 2013 *Chin. J. Radio.* **28** 2 (in Chinese) [赵雨辰, 万国宾 2013 电波科学学报 **28** 2]
- [26] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [27] Hickey M C, Akyurtlu A, Kussow A G 2010 *Phys. Rev. A* **82** 11992
- [28] Leon L S 2014 *Encyclopedia of Thermal Stresses* (Netherlands: Springer) p5267
- [29] Pan Y F 2005 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [潘琰峰 2005 硕士学位论文 (南京: 南京航空航天大学)]
- [30] Li W, Wu T L, Wang W, Zhai P C, Guan J G 2014 *J. Appl. Phys.* **104** 1189
- [31] Zhou Q, Yin X W, Ye F, Liu X F, Cheng L F, Zhang L T 2017 *Mater. Des.* **123** 46

Structural broadband absorbing metamaterial based on three-dimensional printing technology*

Xiong Yi-Jun¹⁾²⁾ Wang Yan^{1)2)†} Wang Qiang¹⁾²⁾ Wang Chun-Qi¹⁾²⁾
Huang Xiao-Zhong^{1)2)‡} Zhang Fen²⁾³⁾ Zhou Ding²⁾

1) (*Institute of Aeronautics and Astronautics, Central South University, Changsha 410012, China*)

2) (*Hunan Key Laboratory of Advanced Fibers and Composites, Changsha 410012, China*)

3) (*Institute of Physical and Electronic, Central South University, Changsha 410012, China*)

(Received 19 October 2017; revised manuscript received 29 December 2017)

Abstract

In order to verify the feasibility of three-dimensional (3D) printing technology in preparing the metamaterial absorbers with complex structure, a three-layer broadband absorbing metamaterial is designed and fabricated by 3D printing technology. The surface layer and middle layer of the metamaterial are composed of periodic arrays with different unit dimensions and the bottom layer of a slab structure. The optimized thickness of the metamaterial is 4.7 mm. A composite absorbent which consists of carbonyl iron powder and nylon is used to fabricate the absorber. In experiment, the obtained absorber is vertically irradiated by an electromagnetic (EM) wave. Two strong absorption peaks at 5.3 GHz and 14.1 GHz are achieved, with the reflection losses of -15.1 dB and -12.5 dB, respectively. The superposition of the two absorption peaks results in a reflection loss below -10 dB in a range from 4 to 18 GHz. The effective EM parameters of the surface layer and the middle layer are calculated by the S parameter inversion method. An effective model of the three-layer structure absorber is proposed and its reflectivity is calculated by using a multilayer structure reflectivity formula. The calculated reflectivity agrees well with the measured one. The absorbing and resonance mechanisms of the two absorption peaks are investigated by analyzing the dynamic distributions of power density loss, electric field and magnetic field. It can be clearly confirmed that the reflection losses at 5.3 GHz and 14.1 GHz are primarily concentrated on the bottom layer and surface layer, and the broadband absorption performance can be derived from the superposition of broadband absorptions of the three absorbing layers. Meanwhile, the strong electric coupling effect between the adjacent units in the surface layer is demonstrated by analyzing the electric-field distributions, which indicates that the strong reflection loss at 14.1 GHz is mainly caused by the electric response. The multiple scattering effects among the three layers are also considered according to the magnetic field distributions at two resonance frequencies. It is shown that there are two magnetic responses at 5.3 GHz and 14.1 GHz, respectively, and the multiple scattering contributes to increasing the EM wave propagation distance and enhancing the power loss. The designed absorbing metamaterials in this paper achieve good broadband absorption performances, particularly in the low frequency band. Combined with 3D printing rapid technology, a promising route to constructing 3D absorbing metamaterials with complex structures is proposed, which would be of great significance and broad practical prospect.

Keywords: absorbing metamaterial, three-dimensional printing technology, broadband absorption

PACS: 42.25.Bs, 04.30.Nk

DOI: 10.7498/aps.67.20172262

* Project supported by the Science and Technology Plan Project of Hunan Province, China (Grant No. 2015TP1007).

† Corresponding author. E-mail: wangyan@csu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: huangxzh@csu.edu.cn