

# 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\*

周卓辉<sup>1)</sup> 刘晓来<sup>1)</sup> 黄大庆<sup>2)3)†</sup> 康飞宇<sup>3)</sup>

1)(北京化工大学理学院, 北京 100029)

2)(北京航空材料研究院, 北京 100095)

3)(清华大学材料科学与工程系, 北京 100083)

(2014年3月8日收到; 2014年5月10日收到修改稿)

设计了一种十字镂空的超材料结构, 与传统的铁磁吸波材料相结合, 实现了低频吸收频带的扩宽. 仿真结果显示, 吸波体在2—4 GHz范围可以实现−10 dB以下的吸收, 相比于没有加载超材料的情况, 吸收带宽扩展了0.5 GHz. 实验结果在2.5—5.1 GHz范围内也显示了相似的吸收曲线, 低于−9 dB的吸收频带有0.48 GHz的扩宽, 扩展了23%. 不同结构的能量损耗密度分布表明, 相比于无镂空的十字结构, 镂空十字结构可以增加磁场能量损耗, 加强单元结构之间的耦合, 降低超材料对传统吸波材料性能的破坏. 探索了传统铁磁吸波材料厚度的变化对吸波体吸收性能的影响, 发现由超材料引入的附加峰位置不随着吸波材料厚度的改变而明显地移动. 根据这个结果, 进一步设计了由两种超材料叠加组合而成的吸波体, 仿真结果和实验结果均显示, 在降低了1.1 mm铁磁吸波材料层厚度的情况下, 使低频吸收带宽又扩展了0.9 GHz.

**关键词:** 超材料, 低频吸收, 多频带吸收, 磁性材料

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 81.05.Zx

**DOI:** 10.7498/aps.63.184101

## 1 引言

低频隐身一直是武器装备远程突防的迫切需求与材料研究工作的重点, 特别是如何通过“薄”和“轻”的材料去实现低频的高衰减吸收是吸波材料研制的一大难题. 然而, 传统的吸波材料在低频频段的吸波性能往往表现不佳, 根据四分之一波长的规律, 要通过“薄”的材料实现低频的吸收, 需要吸波材料具有很大的介电常数. 然而大的介电常数很可能导致阻抗匹配上的问题, 不能实现宽而深的吸收频带. 同时, 通过“厚”的材料虽然可以实现低频的吸收<sup>[1]</sup>, 但由于应用于低频吸收的铁磁性材料的密度比较大, 增加厚度的结果必然导致重量方面的不可接受.

超材料的出现为扩宽低频吸收带宽提供了一

个新的思路<sup>[2]</sup>. 超材料是一种人工制造的规则排列的金属周期阵列, 这种材料的主要特点是能够实现负折射率、负介电常数以及负磁导率<sup>[3–5]</sup>. 对于吸波材料来说, 超材料的优势是能够实现吸收频带的可设计性<sup>[6,7]</sup>, 通过调节超材料的金属结构参数<sup>[8,9]</sup>, 或者调整基底材料的电磁参数都能有效地移动超材料吸收频带的位置<sup>[10]</sup>. 然而超材料作为吸波材料的缺点也很明显, 由于其吸波机理为金属谐振吸收, 所以本身的吸收带宽很窄<sup>[11]</sup>. 近些年来, 人们通过各种方法去扩宽超材料的吸波带宽<sup>[12–15]</sup>, 最常用的手段就是把不同结构参数的超材料水平组合来实现频带的叠加<sup>[16–18]</sup>. 这种方法取得了一定的成果, 但是根据等效媒质理论, 能够组合的超材料数量有限, 特别是在低频频段, 入射波波长长, 超材料结构本身尺寸就很大, 采用超材料水平组合的方法去获得低频的宽吸收就比较困

\* 国防预研基金(批准号: 9140A10030110HK5105)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: [hdqbiam@163.com](mailto:hdqbiam@163.com)

难. 所以采用超材料结构与传统的吸波材料相结合, 利用超材料在低频的谐振来扩宽传统材料的吸波带宽是一个比较好的方向.

本文设计制造了一种十字镂空结构的超材料, 与传统的铁磁性材料相结合, 可以实现铁磁性材料低频频带的扩宽. 仿真结果和实验结果均显示有 0.5 GHz 左右的频带扩展, 相比于无镂空的十字结构, 镂空结构能加强单元结构之间的耦合, 实现更大的磁损耗, 进而实现更宽的吸收频带. 对加载不同厚度磁性材料的吸波体进行了仿真计算和实验研究, 结果显示由超材料引入的附加峰并不随着磁性材料厚度的变化而大范围地移动, 这个附加峰总是出现在 2—4 GHz 范围内. 基于附加峰不移动的特点, 设计了附加峰位置在 4—5 GHz 范围内的超材料结构, 把这两个结构组合起来, 在减少铁磁材料厚度的情况下, 进一步扩展了 0.9 GHz 的吸收频带.

## 2 仿真计算

本文提出了一种十字镂空超材料结构, 整个吸波体结构如图 1(a), (b) 所示, 上层为十字镂空超材

料金属结构、金属厚度为 0.035 mm、背板为 0.4 mm 的 FR-4 材料, 其介电常数为 4.9, 损耗角正切为 0.025; 中间层为铁磁材料吸收层, 其电磁参数如图 1(c) 所示, 底层为金属层. 采用 CST microwave studio 2011 商业软件进行仿真计算, 边界条件设置为 unit, 电磁波垂直于超材料结构表面入射, 其磁场方向沿着 X 轴, 电场方向沿着 Y 轴. 经过仿真和优化, 获得的目标最佳衰减吸收结构参数为: 周期性  $p = 10$  mm,  $w = 0.84$  mm,  $a = 10.08$  mm,  $b = 3.6$  mm, 金属线宽  $d = 0.18$  mm,  $c = 2.4$  mm, 铁磁材料厚度  $h = 2.4$  mm. 其仿真结果如图 1(d) 所示.

仿真结果显示, 吸波体实现了 1.9—4.1 GHz 范围内的吸收, 相比于没有加载超材料结构的传统吸波材料, 频带扩展了 0.5 GHz, 从加载超材料之后的反射率曲线 (S11) 中可以很明显的看到双峰, 正是附加峰的出现扩展了吸收频带. 为了探究哪个峰由超材料谐振引入的, 对吸波体在两个吸收峰中心频点处的表面电流分布情况进行了研究, 如图 2 所示.

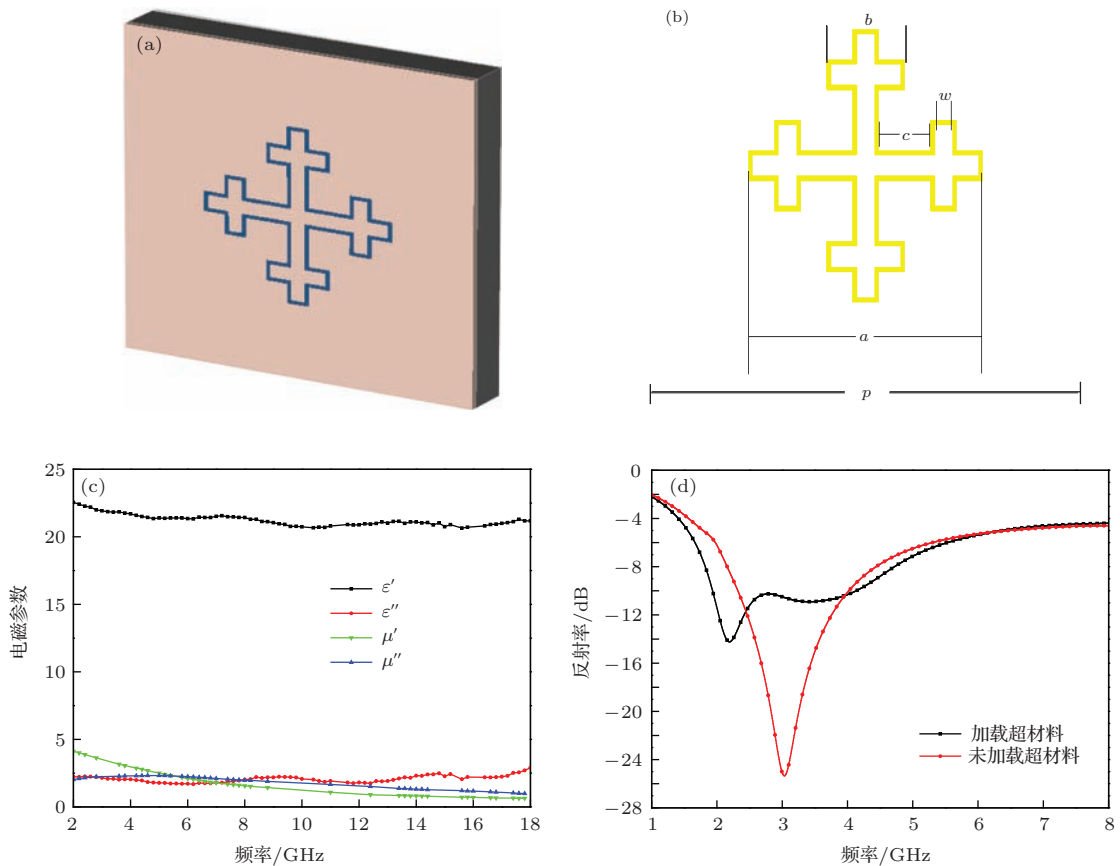


图 1 (网刊彩色) 模型图及其反射率曲线 (a) 模型图; (b) 超材料结构参数; (c) 铁磁材料的电磁参数; (d) 反射率曲线

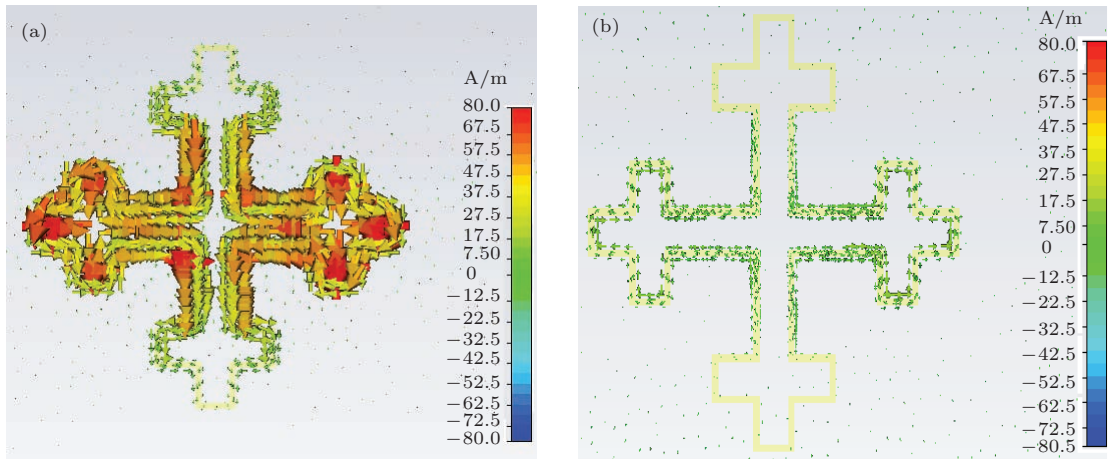


图2 (网刊彩色) 吸收峰中心频点处表面电流分布 (a) 2.22 GHz; (b) 3.45 GHz

由表面电流的分布可以看出, 超材料表面电流在低频吸收峰中心频点处的分布强度远大于其在高频吸收峰中心频点处的分布强度, 这说明超材料在低频发生了谐振, 低频吸收峰就是由超材料的加载而产生的, 而高频峰则是由铁磁吸波材料产生的, 但相比于没有超材料结构加载时的吸波体, 吸波材料产生的吸收峰比加载超材料时的高频峰要深, 这说明超材料的加入会破坏不在其谐振频段内的传统吸波材料的吸波性能. 为了更好地说明这个问题, 对不同镂空宽度的结构进行了仿真计算, 其仿真结构如图3所示.

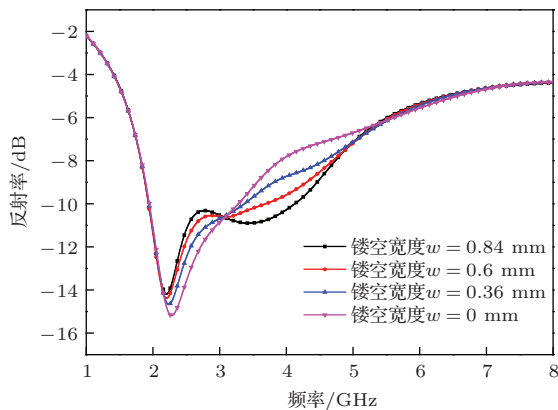


图3 (网刊彩色) 不同镂空宽度的反射率曲线

图3显示, 随着镂空宽度的减少, 低频吸收峰几乎没有变化, 而高频峰却逐渐消失, 这说明超材料的加载确实会破坏传统吸波材料的吸收性能, 同时也证明了镂空可以在保留低频谐振吸收峰的同时, 降低结构对传统吸波材料吸波性能的破坏作用. 我们认为这是因为镂空减少了吸波体表面的金属面积, 同时并没有破坏产生谐振吸收的基本结构. 为了证明我们的想法, 进一步分析了无镂空情况下结构的表面电流分布, 仿真结果如图4所示.

比较图4和图2(b)可以发现, 无镂空时的结构其表面电流主要分布在中心竖直金属结构的两边, 而镂空结构除了中心竖直金属结构有电流分布以外, 横着的金属结构上也分布有表面电流, 并且其强度远大于竖直金属结构上的表面电流. 这就说明镂空不仅没有破坏原来的谐振结构, 还引入了新的谐振结构. 镂空结构表面电流的最大值为  $111.758 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ , 几乎是无镂空情况下表面电流最大值的两倍. 这些附加表面电流的出现使得高频吸收峰加深. 由于表面电流主要是由磁耦合激发, 这就说明磁场能量分布也会相应地加强. 图5给出了这两个结构的磁场能量分布.

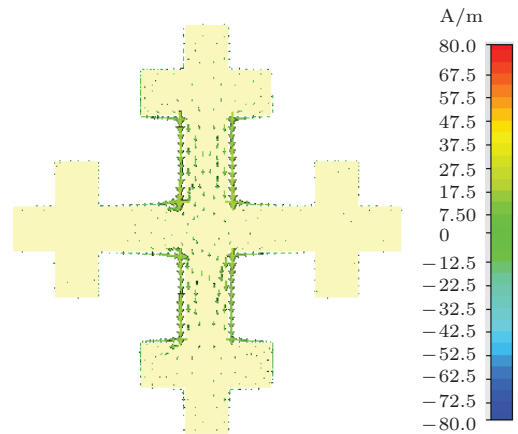


图4 (网刊彩色) 无镂空情况下的表面电流分布

由图5可以明显看到, 在镂空结构中, 磁场能量主要分布在被镂空的结构处, 即新引入的谐振结构处, 而在无镂空结构中, 磁场能量主要分布在竖直金属结构的两边, 这与其表面电流的分布位置相似. 为了更好地探究高频吸收峰加深的原因, 进一步对不同镂空宽度时整个材料的能量损耗密度分布进行了研究, 如图6所示.

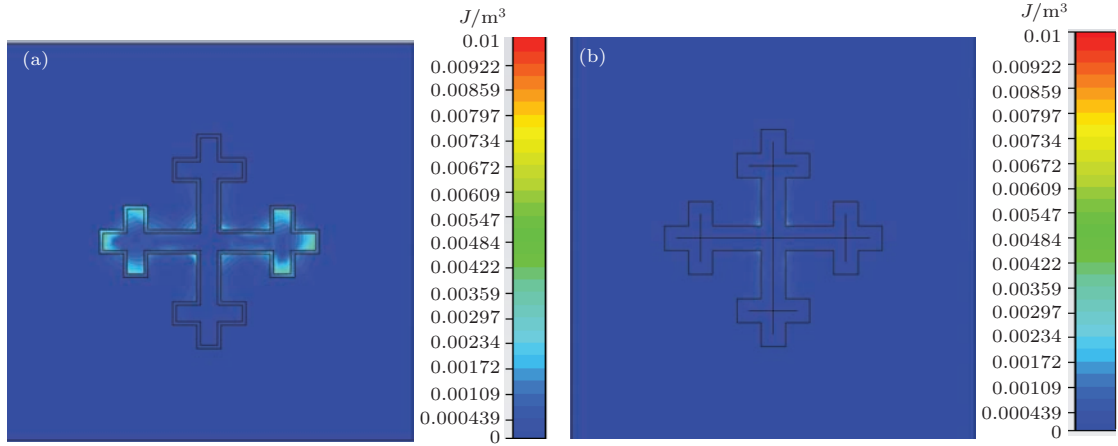


图5 (网刊彩色) 高频磁场能量分布 (a) 镂空情况下; (b) 无镂空情况下

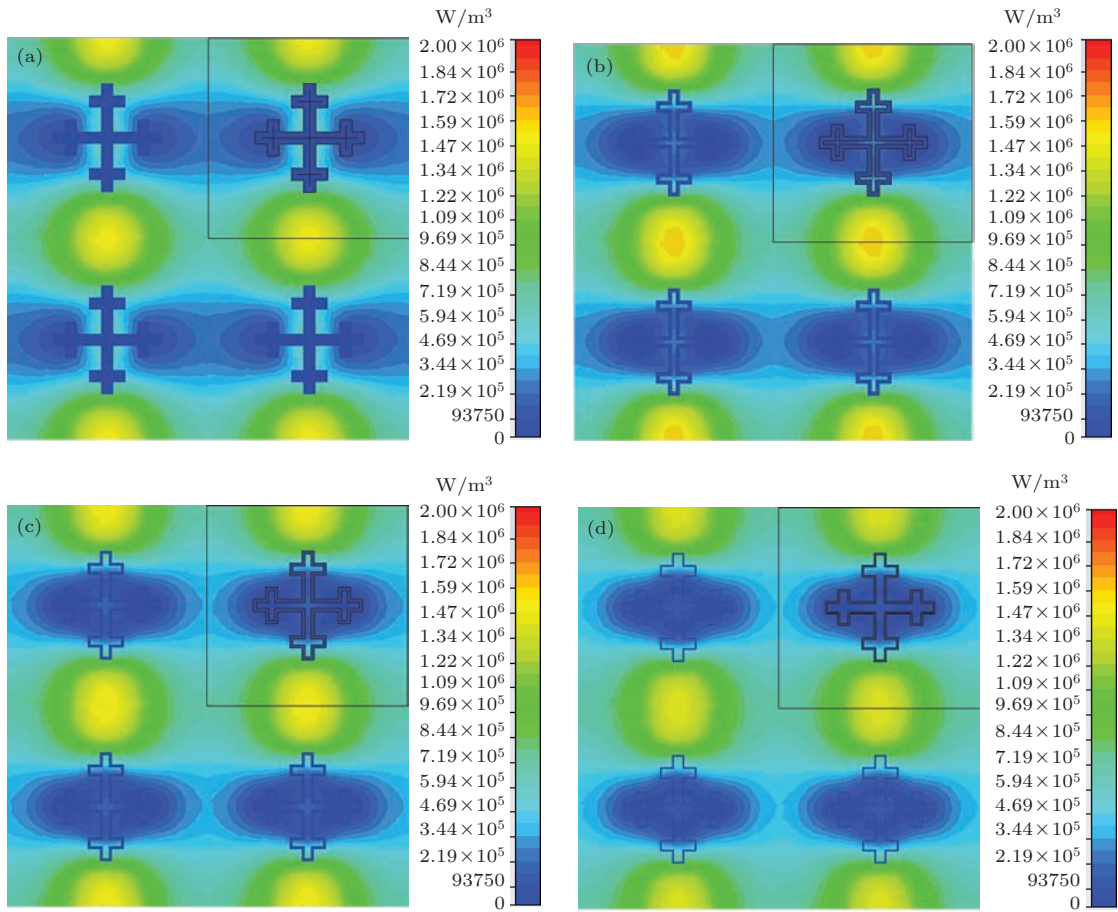


图6 (网刊彩色) 高频吸收峰中心频点处能量损耗密度分布 (a)  $w = 0$  mm; (b)  $w = 0.36$  mm; (c)  $w = 0.6$  mm; (d)  $w = 0.84$  mm

观察十字结构的中心以及单元格之间的能量损耗密度分布发现: 随着镂空宽度的增加, 十字结构中心的能量损耗密度分布逐渐减弱, 而单元格之间的能量损耗密度分布逐渐加强. 这说明单元格之间的耦合随着镂空宽度的增加而加强, 使得能量损耗区域从单元的中心移动到了单元格之间, 从而加强了高频峰的吸收.

### 3 实验验证与分析

实验中通过印刷电路板加工的方法制造  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  的超材料板子, 采用喷涂加工工艺, 在  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  的金属板上喷涂上一层  $2.4\text{ mm}$  厚的铁磁性吸波材料. 采用弓形架测量反射率, 实验结果如图 7 所示.

实验结果证实了双峰的存在, 加载镂空结构超

材料吸波体的吸收频带在 2.55—5.13 GHz 范围内实现了 -9 dB 的吸收, 相比于没有超材料结构加载的情况, 其吸收带宽扩展了 0.48 GHz, 扩展了 23%, 相比于加载了没有镂空结构的超材料, 其吸收带宽扩展了 1 GHz. 从实验结果和仿真结果对比发现, 实验结果的吸收峰都往高频移动了, 同时, 其吸收峰的吸收深度也变浅了. 我们认为这是由于仿真软件在对实测的铁磁吸波材料电磁参数进行拟合时产生的误差造成的. 众所周知, 提高材料的介电常数会使其吸收峰频带往低频移动, 同时吸收峰的吸收深度是由材料的损耗角正切来决定的, 损耗角正切越大其吸收峰越深. 由于所用的材料为铁磁材料, 其损耗的方式主要为磁损耗. 因此, 我们导出了由仿真软件拟合的材料介电常数以及磁损耗角正切, 与实际测量的材料的电磁参数相对比, 结果如图 8 所示.

图 8(a) 显示了在 2—12 GHz 范围内, 软件拟合的介电常数总是高于测量的介电常数, 这就导致了仿真时铁磁材料在此频段范围内的吸收峰会向低频移动. 而拟合的磁损耗角正切在 2—7 GHz 范围内比材料的测量值要大, 这就使得实验结果中的吸收峰深度小于仿真结果中的吸收峰深度.

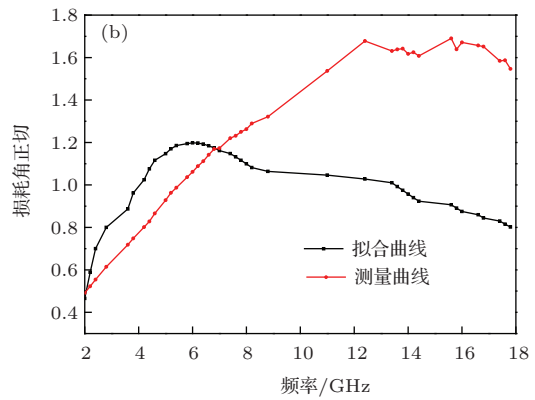
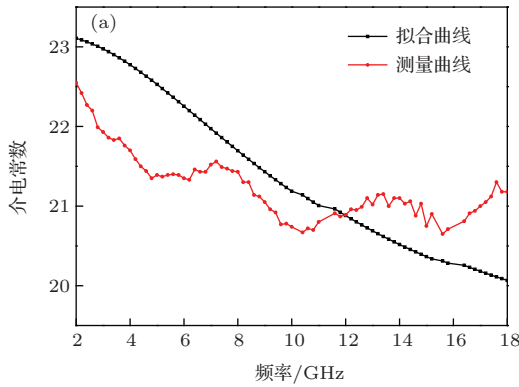


图 8 电磁参数的软件拟合曲线与测量曲线之间的对比 (a) 介电常数; (b) 磁损耗角正切

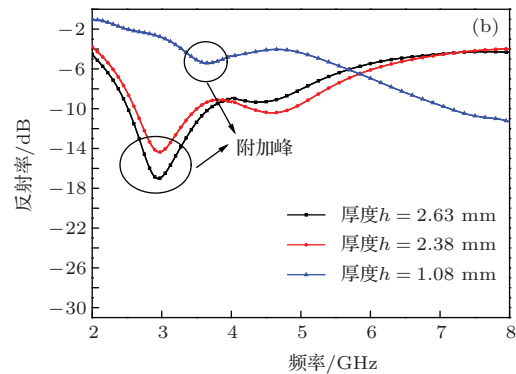
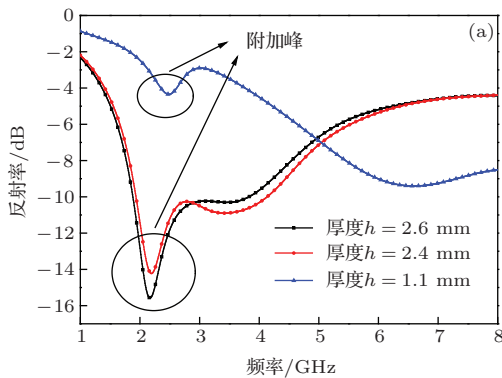


图 9 吸波材料层厚度变化时的 S11 曲线 (a) 仿真结果; (b) 实验结果

为了进一步探究由超材料引入的附加峰在不同吸波材料厚度情况下的变化规律, 对加载了不同厚度吸波材料的吸波体进行了仿真和实验, 结果如图 9 所示.

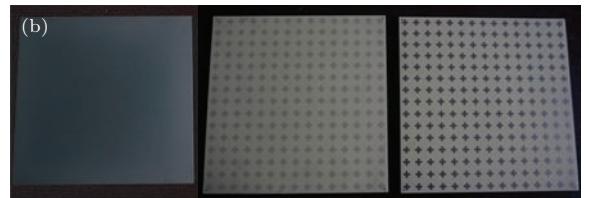
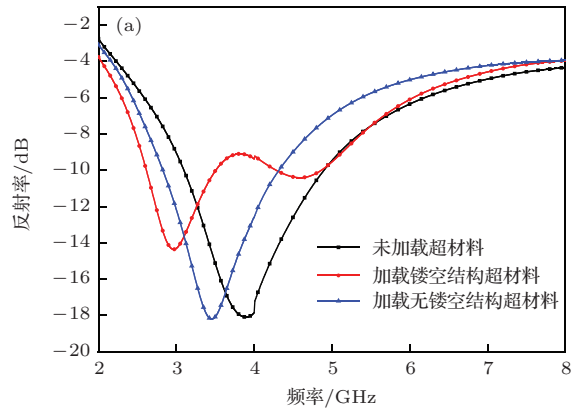


图 7 实验结果 (a) 反射率曲线; (b) 左边为底层吸波涂层, 中间为镂空结构, 右边为无镂空结构

我们知道, 随着吸波材料厚度的减少, 其吸收峰会往高频移动. 从仿真结果可以发现, 随着吸波材料厚度的减少, 高频吸收峰逐渐地移动到高频, 再次证明了这个吸收峰就是由吸波涂层产生的. 同时我们还注意到了低频附加峰的中心并没有随着厚度的减少而大幅度地移动, 它总是出现在 2—4 GHz 范围内, 改变的只是吸收峰的深度, 而吸收深度的改变是由于厚度的变化导致了阻抗不匹配而造成的. 这说明, 吸波材料厚度的变化并不会造成低频附加峰位置的移动, 只会改变其吸收峰的深度.

#### 4 附加峰组合设计

基于上面的分析可以得出, 超材料结构引入的附加峰的位置不会被吸波材料的厚度变化所改变.

因此, 如果把两个可以引入不同附加峰的超材料结构进行组合, 就可以保留它们各自的附加峰, 进而获得更加宽频的吸波体. 根据上面已有的超材料结构, 设计了一个组合吸波体, 如图 10 所示.

设计方案如图 10 (a) 所示, 在图 1 (a) 的超材料吸波体下面加载了另一个超材料吸波体, 这个超材料吸波体是由图 1 (a) 的结构通过在  $X$  轴和  $Y$  轴上进行等比例缩放得到的. 在金属超材料结构的后面还加载了一层 FR-4 背板. 由于这个超材料结构在吸波材料的下面, 所以并没有进行镂空处理. 经过优化仿真, 得到整个吸波体的最优尺寸为: 超材料金属结构的缩放比例为  $s = 0.5$ , 周期性为  $p = 20/3$  mm, 吸波材料的厚度  $h = 1.3$  mm, 背板 FR-4 的厚度为 1.6 mm. 仿真结果和实验结果如图 11 所示.

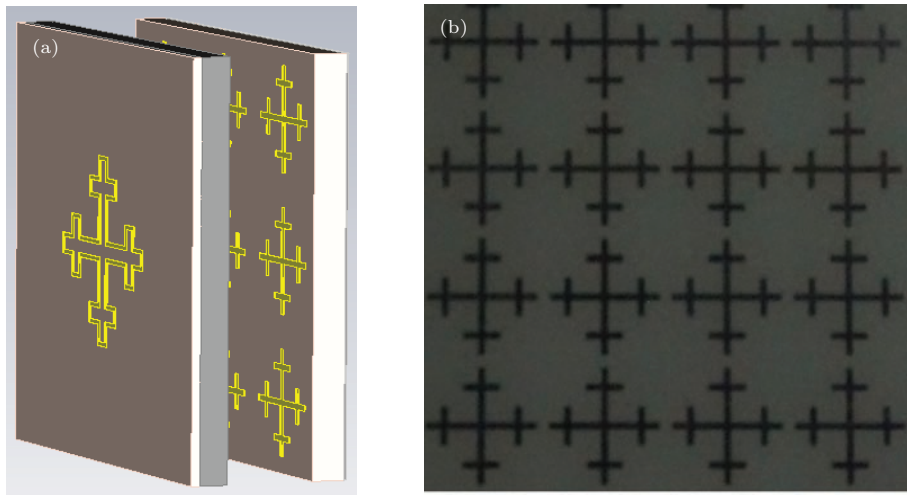


图 10 组合模型 (a) 结构示意图; (b) 底层超材料结构实物图

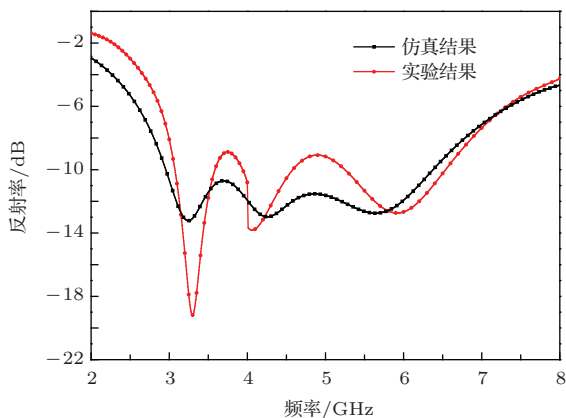


图 11 组合吸波体反射率曲线

仿真结果和实验结果都证实了三个峰的存在. 仿真中, 其在 3—6.4 GHz 范围内实现了 -10 dB 以

下的吸收. 实验中, 其在 3—6.6 GHz 范围内实现了 -9 dB 以下的吸收. 吸收峰深度的不同依然是由 CST 软件拟合铁磁材料电磁参数时产生的误差造成的. 相比于图 1 的设计方案, 其吸收带宽扩展了 0.9 GHz. 根据设计思路, 这三个峰中应该有两个是由超材料引入的. 而另一个峰则是吸波涂层实现的. 为了探究设计的正确性, 对不同吸波材料厚度的组合吸波体进行仿真和实验, 结果如图 12 所示.

由仿真结果和实验结果都可以看到: 低频的两个吸收峰并没有随着吸波材料厚度的变化而有大的移动, 变化的只是它们的吸收深度, 而高频的吸收峰随着厚度的减小大幅度地移向高频. 这就说明低频的两个吸收峰是由超材料引入的, 根据图 9 的分析, 我们知道最左边的吸收峰是由上层的

超材料实现的, 所以中间的附加峰就是最低层的超材料实现的. 通过这样的设计实现了多附加峰的叠加, 进一步扩展了吸收频带.

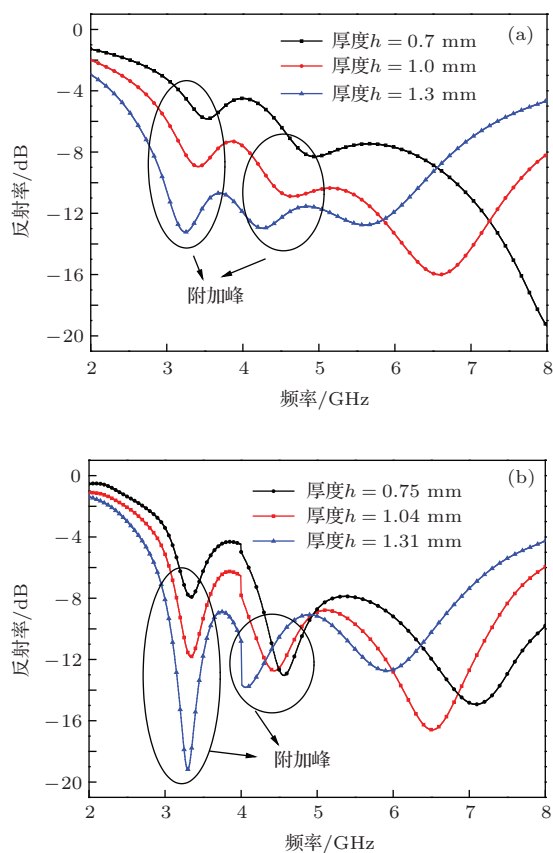


图 12 吸波材料厚度变化 (a) 仿真结果; (b) 实验结果

## 5 结 论

本文设计了一种十字镂空超材料结构, 扩展了传统铁磁吸波材料的低频吸收频带. 仿真结果和实验结果都表明加载了超材料的吸波体的吸收频带比没有加载的扩展了 0.5 GHz. 不同镂空宽度结构的表面电流分布和磁场能量分布说明了镂空之后的十字结构不仅可以保留原结构中的谐振结构, 而且还能引入新的谐振结构, 从而降低超材料对传统吸波材料吸波性能的破坏. 整个吸波体的能量损失密度分布图清晰地显示了高频吸收峰加深是由于镂空结构加强了单元结构之间的耦合, 实现了更大的能量损耗, 从而获得更宽的吸收频带. 吸波材料

层厚度变化的研究结果显示, 由超材料引入的低频附加峰位置并不会随着吸波材料厚度的变化而改变. 根据这个结论, 把可以实现不同附加峰的超材料结构组合起来, 在降低传统吸波材料厚度的情况下, 获得了一个可以实现更宽频带吸收的吸波体, 使低频吸收频带进一步扩展了 0.9 GHz.

## 参考文献

- [1] Zhang H B, Deng L W, Zhou P H, Zhang L, Cheng D M 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 013903
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [3] Pendry J B, Pendry A J, Stewart W J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4758
- [4] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J 1998 *J. Phys. Condens. Matter.* **10** 4785
- [5] Shelby R, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [6] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6078 (in Chinese) [张燕萍, 赵晓鹏, 保石, 罗春荣 2010 物理学报 **59** 6078]
- [7] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J, Pang Y Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 108901 (in Chinese) [孙良奎, 程海峰, 周永江, 王军, 庞永强 2011 物理学报 **60** 108901]
- [8] Baena J D, Marques R, Medina F, Martel J 2004 *Phys. Rev. B* **69** 014402
- [9] Wakatsuchi H, Paul J, Greedy S, Christopoulos C 2012 *IEEE. Trans. Antennas Propag.* **60** 3670
- [10] Liu X L, Starr T, Starr A F, Padilla W J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 207403
- [11] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [12] Tao H, Bingham C M, Pilon D, Fan K, Strikwerda A C, Shrekenhamer D, Padilla W J, Zhang X, Averitt R D 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 225102
- [13] Fan Y N, Cheng Y Z, Nie Y, Wang X, Gong R Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 067801
- [14] Lin B Q, Da X Y, Zhao S H, Meng W, Li F, Fang Y W, Wang J F 2014 *Chin. Phys. B* **23** 067801
- [15] Li M H, Yang H L, Hou X W, Tian Y, Hou D Y 2010 *Prog. Electromagnet. Res.* **108** 37
- [16] Luo H, Wang T, Gong R Z, Nie Y, Wang X 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 034204
- [17] Sun J B, Liu L Y, Dong G Y, Zhou J 2011 *Opt. Express* **19** 21155
- [18] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802

# Design and preparation of a low frequency absorber based on hollowed-out cross-shaped meta-material structure\*

Zhou Zhuo-Hui<sup>1)</sup> Liu Xiao-Lai<sup>1)</sup> Huang Da-Qing<sup>2)3)†</sup> Kang Fei-Yu<sup>3)</sup>

1) (*College of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*)

2) (*Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China*)

3) (*Materials Science and Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100083, China*)

( Received 8 March 2014; revised manuscript received 10 May 2014 )

## Abstract

A hollowed-out cross-shaped meta-material structure is designed and fabricated in this work. A kind of conventional magnetic material which works at low frequency is used as the absorber substrate. The simulation results demonstrate that an absorber can reach an absorption of less than  $-10$  dB in a range between 2 GHz and 4 GHz, and the absorption band is expanded by a 0.5 GHz when the meta-material structure is unloaded. The experimental results indicate that a similar absorption band appears between 2.5 GHz and 5.1 GHz, which is 0.48 GHz wider than meta-material structure and the absorption band is expanded by 23% when the depth of absorption band below  $-9$  dB. Compared with the cross meta-material, the hollowed-out structure has ability to increase the magnetic energy loss and strengthen the coupling between the units. The influence of magnetic layer thickness on absorption capability of wave absorber is analyzed. The result indicates that the position of addition absorption band does not apparently move with variation in thickness of the magnetic material layer. Based on these results, two different meta-material structures are combined to obtain a wider absorber. The simulation result and the experimental result both show another 0.9 GHz expansion of the absorption band and it can also reduce the thickness of the magnetic layer.

**Keywords:** meta-material, low frequency absorber, multiple absorption bands, magnetic material

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 81.05.Zx

**DOI:** [10.7498/aps.63.184101](https://doi.org/10.7498/aps.63.184101)

---

\* Project supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (Grant No. 9140A10030110HK5105).

† Corresponding author. E-mail: [hdqbiam@163.com](mailto:hdqbiam@163.com)