

宽频吸声兼容电磁吸波的多功能超材料设计

郭鑫羽, 高南沙, 程宝柱, 侯宏

(西北工业大学航海学院, 西安, 710072)

摘要 超材料具有传统材料所不具备的超常物理性质,对电磁场、声场等物理场可以实现自由调控。设计了一种由多尺寸的亥姆霍兹共振器和多尺寸的金属谐振结构组成的宽频吸声兼容电磁吸波的多功能超材料,实现了对声波和电磁波的宽频双吸收。仿真结果表明:文中提出的超材料在690~927 Hz范围内具有0.8以上的高吸声系数,在9.11~11.10 GHz范围内对微波具有0.8以上的吸收系数。所提出的多功能超材料对于声波及电磁波均具有宽频、高效的吸收作用,在噪声污染防治和电磁防护方面有潜在的应用价值。

关键词 超材料;吸收体;电磁/声波兼容

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.01.005

中图分类号 U416.216 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)01-0037-06

A Design of Multifunctional Meta-Material with Broadband Sound Absorption and Microwave Absorption

GUO Xinyu, GAO Nansha, CHENG Baozhu, HOU Hong

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Meta-materials demonstrate a series of unique properties in which natural materials do not have, and these properties have powerful manipulations to electromagnetic field, acoustic field and other physical fields. Being capable of absorbing sound wave and electromagnetic wave in broadband range, a multifunctional meta-material composed of the multi-sized Helmholtz resonators and multi-sized metal resonators, is designed. The results show that the device could achieve an acoustic coefficient of more than 0.8 in the 690~927 Hz region and a microwave absorption over 80% in the 9.11~11.10 GHz range. The multifunctional metamaterials proposed are capable of absorbing both acoustic and electromagnetic waves with broadband and high efficiency and have potential applications in the aspects of noise pollution prevention and electromagnetic protection.

Key words meta-materials; absorber; electromagnetic/acoustic compatibility

随着工业化进程的快速发展,各个行业进步的同时也带来了一些负面影响。近年来,为了减少噪声和电磁的危害,研究人员在声学及电磁领域开展了大量研究。超材料由于具有传统材料所不具备的

超常物理性质,为物理场的调控提供了新的思路^[1-2]。其中,超材料吸收体是一项重要应用^[3]。与传统材料相比,超材料吸收体具有厚度更薄、质量更轻、吸收频带更宽等优点。2008年,Landy等人^[4]

收稿日期: 2021-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(11704314);中国博士后基金(2018M631194,2020T130533);陕西省重点研发计划(2020GY208)

作者简介: 郭鑫羽(1997—),女,陕西宝鸡人,硕士生,研究方向为超材料设计。E-mail:gxy1997@mail.nwpu.edu.cn

引用格式: 郭鑫羽,高南沙,程宝柱,等.宽频吸声兼容电磁吸波的多功能超材料设计[J].空军工程大学学报(自然科学版),2022,23(1):37-42. GUO Xinyu, GAO Nansha, CHENG Baozhu, et al. A Design of Multifunctional Meta-Material with Broadband Sound Absorption and Microwave Absorption[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(1): 37-42.

在FR4板两侧分别排列金属开口谐振环和金属线阵列结构,在11.5 GHz处获得一个高吸收峰。2018年,于惠存等人^[5]提出了一种由“H”型金属贴片结构、介质板和金属底板构成的超宽带反射型极化转换超表面。Nguyen等^[6]设计了一种“eight-resistive-arm”型金属贴片结构,在8.2~13.4 GHz频带内吸收率能够达到90%以上。在声学领域,2006年,Fang等^[7]将亥姆霍兹共振腔周期排列,实验验证在其共振频段具有负的等效弹性模量。Gao等人^[8]利用机器学习算法,优化得到了在多孔材料中插入不同尺寸侧板的结构,获得了优异的吸声效果。随后,Gao等人^[9]在多孔聚氨酯海绵中插入多层侧板,并分别通过理论和实验对该结构的吸声性能加以分析。2020年,Cheng等人^[10]设计了不同尺寸的亥姆霍兹共振腔,并在内部填充多孔材料,4个单元并联后实现了低频宽带完美吸声。

随着技术的发展,往往需要同时对多个物理场进行调控以达到对敏感仪器或人群的隔离。为此,针对多物理场有效调控的研究迫在眉睫。2019年,李莹^[11]将声学超结构和石墨烯薄膜结合,成功制备出兼备声学 and 电磁双屏蔽的多功能结构。张琤^[12]利用薄膜隔声结构和吸波单元设计出的复合超结构在仿真中实现了对声和电磁场的有效调控。2020年,Zhou等人^[13]将电磁超表面和具有多尺寸空腔的声学薄膜超表面相结合,从而实现了对微波和水下声波的双吸收。

在以往的研究中,同时实现微波与声波双吸收的结构非常少,且作用的吸声频率往往处于超声波段,难以抑制环境噪声。本文针对电磁及声波的中高频段双重吸收的研究目标,提出了一种实现宽频吸波及吸声的超材料。

1 整体结构及模型分析

由于声波与电磁波所涉及到的物理机理难以兼容,使用单一结构难以实现对2个物理场的共同调控。本文通过将声学亥姆霍兹共振器和吸波结构复合,实现了吸声兼容吸波这一目标。为了实现宽频吸声,将16个亥姆霍兹共振器并联在同一平面上;类似的,将不同尺寸的吸波结构集成到一个单元内以扩大吸波带宽。考虑到承载一体化及后续样品加工,选择金属铜贴片作为吸波结构。该材料整体结构如图1(a)所示,单个吸收器的剖面见图1(b)。其中, a 代表声管边长, b 代表颈部边长, h 和 h_c 分别代表颈部和腔体深度。单个亥姆霍兹共振器的腔体尺寸为 $a=20$ mm, $h_c=30$ mm,可以通过改变颈部深

度和颈部边长以调整其谐振频率。底部置放的吸波结构由3个部分组成:金属贴片、介电基板和金属底板。其中,金属贴片的单元周期 $p=20$ mm,金属贴片和金属底板的厚度分别为0.03 mm和0.5 mm。本节将从声学及电磁2个方面对所提结构吸收性能进行讨论。

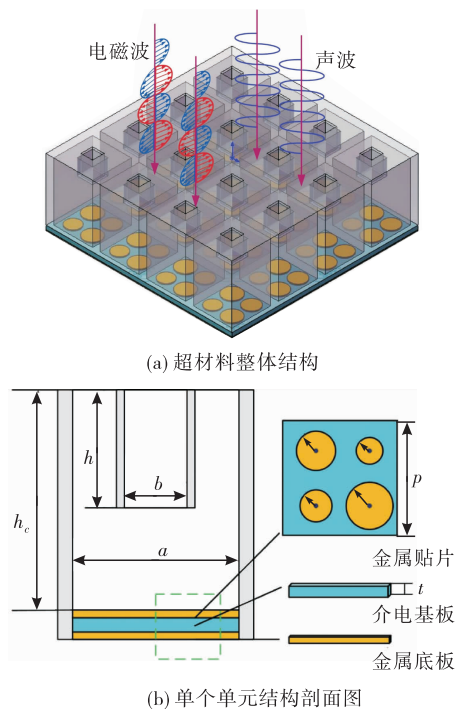


图1 超材料吸收体结构图

1.1 亥姆霍兹共振器理论模型

对于局域共振型声学超材料,一般采用等效介质理论对其材料参数进行分析^[14]。若背景介质特性阻抗为 Z_0 ,结构的等效特性阻抗为 Z_1 ,则共振器对于垂直入射平面波的反射系数 r 及透射系数 t 可表示为:

$$r = \left(\frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right)^2 \quad (1)$$

$$t = \frac{4Z_1 Z_0}{(Z_1 + Z_0)^2} \quad (2)$$

传统亥姆霍兹共振器包括共振器颈部和腔体两部分,由于共振时声波的强烈散射会引起黏滞损耗和热损耗,引入黏滞阻尼和热阻尼,热边界层厚度 δ_h 及黏性边界层厚度 δ_v 分别表示为:

$$\delta_h = \sqrt{2K/(\rho_0 \omega C_p)} \quad (3)$$

$$\delta_v = \sqrt{2\mu/(\rho_0 \omega)} \quad (4)$$

式中: μ 表示空气的运动黏度, $\mu=1.568 \times 10^{-5}$ m²/s; $\chi = \sqrt{Pr}$, $Pr = C_p \mu / K = 0.707$ 是一个大气压下的普朗特数; $C_p = 1.0057$ kJ/(kg·K)是空气的恒压热容, $K = 0.02624$ 是空气的导热系数,可得到 $\delta_v = \chi \delta_h$ 。将亥姆霍兹共振器颈部和腔体内的复波数和复阻抗分别表示为^[10, 15]:

$$k_i = \frac{\omega}{c_0} \left(1 + \frac{\beta}{s_i} (1 + (\gamma - 1)/\chi) \right) \quad (5)$$

$$Z_i = \frac{\rho_0 c_0}{S_i} \left(1 + \frac{\beta}{s_i} (1 - (\gamma - 1)/\chi) \right) \quad (6)$$

式中: $s_i = r_i/\delta_v$; $S_1 = \pi a^2$ 为腔体的截面积; $S_2 = \pi b^2$ 为颈部的截面积; $\omega = 2\pi f$ 表示角频率; ρ_0 和 c_0 分别代表空气的密度和声速; $\beta = (1+i)/\sqrt{2}$ 为常数; $\gamma = 1.4$ 为空气的比热率。

本节设亥姆霍兹共振器管口处和末端的声压分别为 p_1 、 p_2 , 管口和末端的速度分别为 v_1 、 v_2 , 那么单元的声波传播方程为:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_n h & jZ_n \sin k_n h \\ j\sin k_n h/Z_n & \cos k_n h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jZ_n k_n \Delta h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Z = -j \frac{\cos k_n h \cos k_c h_c - Z_n k_n \Delta h \cos k_n h \sin k_c h_c / Z_c - Z_n k_n \Delta h \sin k_n h \sin k_c h_c / Z_c}{\cos k_c h_c \sin k_n h / Z_n - \sin k_c h_c \sin k_n h / Z_c + \cos k_n h \sin k_c h_c / Z_c} \quad (10)$$

亥姆霍兹共振器可等效为阻抗为式(10)的阻抗表面。

1.2 吸波体结构的设计及分析

一般而言,吸波体的设计方法包括本征阻抗匹配法和波阻抗匹配法。本征阻抗匹配法是指吸波结构与外部空间的阻抗相匹配,电磁波入射到结构表面时不会发生反射,进入结构后利用自身材料特性对能量进行损耗。基于波阻抗匹配法的吸波结构往往由金属贴片、介电基板、金属底板组成,电磁波接触底板后会发生全反射,并在金属贴片和底板之间形成谐振层,以此消耗电磁波的能量^[16]。这种结构对微波吸收主要归因于介电基板的介电损耗。通过调节金属贴片的尺寸及排布,可以调节吸收频带。本文选择波阻抗匹配法进行结构设计。

吸波结构的吸收率 A 可表示为^[17]:

$$A = 1 - R - T \quad (11)$$

由于吸波结构底部为全反射金属板, $T = 0$, 则 $A = 1 - R$ 。

若自由空间的特性阻抗为 μ , 金属和介质基板的阻抗分别为 Z_1 、 Z_2 , 吸波结构的输入阻抗为^[18]:

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

继而,垂直入射的电磁波在结构表面的反射系数为^[18]:

$$R = \frac{Z - \mu}{Z + \mu} \quad (13)$$

根据标准 GJB 2038A-2011《雷达吸波材料反射率测试方法》^[18], 吸波材料的性能评价指标包括频率带宽、最小反射率及对应频率,但并没有作出数

式中: k_n 和 k_c 分别是颈部和腔体的等效波数; Z_n 和 Z_c 分别为颈部和腔体的法向声阻抗; Δh 表示声波分别从颈部向腔体内或者从颈部向外部空间传播时,由于存在非连续界面所引起的末端辐射声阻抗修正值,修正长度由两部分组成:

$$\Delta L_1^{\text{corr}} = 0.82 \left[1 - 1.35 \left(\frac{b}{a} \right) + 0.35 \left(\frac{b}{a} \right)^3 \right] r_n \quad (8)$$

$$\Delta L_2^{\text{corr}} = 0.82 \left[1 - 0.235 \left(\frac{b}{c} \right) - 1.32 \left(\frac{b}{c} \right)^2 + 1.54 \left(\frac{b}{c} \right)^3 - 0.86 \left(\frac{b}{c} \right)^4 \right] b \quad (9)$$

式中: a 、 b 、 c 分别表示颈部边长、腔体边长和复合结构总边长。总修正长度为 $\Delta L_1^{\text{corr}} + \Delta L_2^{\text{corr}}$ 。

由于亥姆霍兹共振器是封闭的, $v_2 = 0$, 则入口端的声阻抗为:

值规定。以往的研究中大多将反射率小于 -10 dB 即吸收率大于 80% 的频带作为有效带宽^[13]。

2 计算方法和结果讨论

本文基于超材料的设计及优化方法,针对吸声兼容微波吸收这一目标,利用声学亥姆霍兹共振器和微波吸收结构设计了一种多功能复合结构,实现了宽频吸声及吸波的目的。本节将主要介绍在 COMSOL Multiphysics 5.5 有限元仿真软件中所提结构在声场及电磁场的结构优化和仿真计算。

2.1 超材料声吸收体的仿真结果及分析

首先,利用有限元技术对单个亥姆霍兹共振器进行了吸声性能分析。在 COMSOL Multiphysics 5.5 仿真软件中建立了单个亥姆霍兹共振器及声管的模型,该共振器腔体边长 $a = 20$ mm,腔体深度 $h_c = 30$ mm,颈部边长 $b = 6$ mm,颈部深度 $h = 8$ mm,矩形声管边长为 96 mm,共振器位于声管中心位置。在声管中设置 2 组域点探针模拟实际声管测试中的传声器,采用平面波辐射边界条件,将腔体及颈部边界设为硬声场边界条件。由于金属贴片的厚度远小于声波波长,且金属对于声波属于全反射边界,底部的吸波结构对吸声效果几乎没有影响。利用 COMSOL Multiphysics 5.5 材料库中的空气来模拟空气特性。图 2(a) 中的吸声系数曲线显示该共振器的谐振频率为 821 Hz,对应的吸声系数为 0.98 。图 2(b) 中,在谐振频率处,能量主要集中在共振器内部,腔体共振消耗掉大量声能。由于颈部

深度远小于谐振频率处的声波波长,故而颈部难以显示出声压的强弱分布。

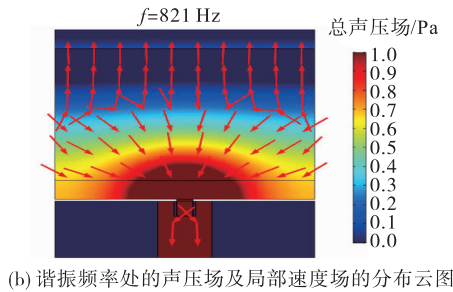
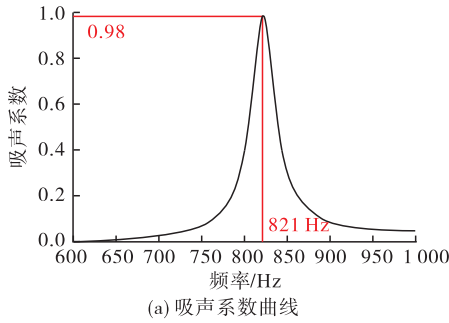


图2 单个亥姆霍兹共振器仿真结果

通过理论分析可知,亥姆霍兹共振器的谐振频率与腔体边长 a 、腔体深度 h_c 、颈部边长 b 和颈部深度 h 有关。这里以其中一个共振器为例,讨论 h 对共振器谐振频率的影响。在COMSOL Multiphysics 5.5有限元仿真软件中建立一个腔体边长 $a=20$ mm,腔体深度 $h_c=30$ mm的亥姆霍兹共振器及边长为96 mm的矩形声管模型,共振器位于声管的中央。保持其他结构参数不变,利用COMSOL Multiphysics 5.5仿真软件分别对 h 和 b 进行参数扫描,得到不同数值对应的谐振频率及吸声系数。如图3(a)所示,固定颈部边长 $b=6$ mm,仅改变参数 h 的数值,其吸声峰随颈部深度 h 的增大不断向低频移动且缓步下降。保持颈部深度 $h=8$ mm不变,对参数 b 进行扫描,得到的吸声系数仿真结果如图3(b)所示,随着 b 的不断增大,谐振频率逐渐向高频移动,且吸声峰缓步上升。

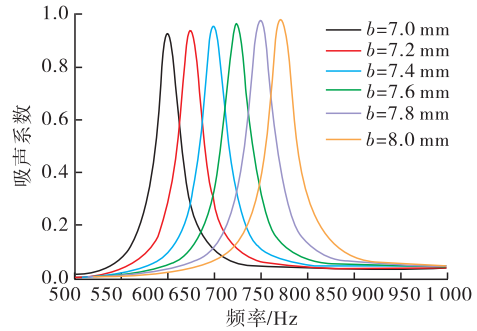
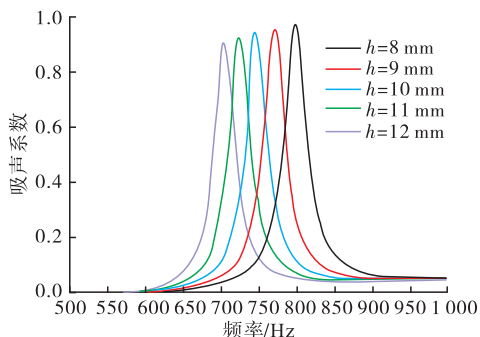


图3 亥姆霍兹共振器不同颈部参数的吸声系数曲线

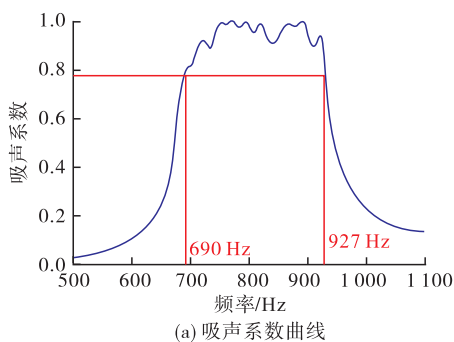
由于亥姆霍兹共振器是通过腔体共振消耗声能,单个共振器只对应一个谐振频率,吸声带宽过窄。为了达到拓宽吸声频带的目的,这里共选择了16个共振器单元,并联在同一平面上以拓宽吸声频带。利用COMSOL Multiphysics 5.5软件进行优化后的每个单元结构参数、对应的谐振频率 f_0 及吸声系数 α 见表1。

表1 亥姆霍兹共振器结构参数及对应的声学特性

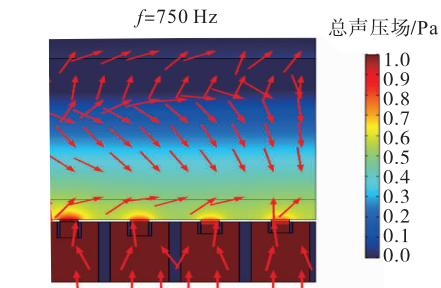
| 共振器 | b/mm | h/mm | f_0/Hz | α |
|------|---------------|---------------|-----------------|----------|
| 单元1 | 3.8 | 3.5 | 667 | 0.93 |
| 单元2 | 4.0 | 3.5 | 686 | 0.89 |
| 单元3 | 4.0 | 4.0 | 695 | 0.95 |
| 单元4 | 5.8 | 13.0 | 705 | 0.91 |
| 单元5 | 5.8 | 12.0 | 717 | 0.98 |
| 单元6 | 5.8 | 11.0 | 732 | 0.92 |
| 单元7 | 5.8 | 10.0 | 748 | 0.94 |
| 单元8 | 5.8 | 9.0 | 771 | 0.96 |
| 单元9 | 5.8 | 8.0 | 798 | 0.97 |
| 单元10 | 6.0 | 8.0 | 812 | 0.97 |
| 单元11 | 6.2 | 9.0 | 821 | 0.98 |
| 单元12 | 6.2 | 8.0 | 846 | 0.98 |
| 单元13 | 6.2 | 7.0 | 877 | 0.99 |
| 单元14 | 6.2 | 6.0 | 911 | 0.99 |
| 单元15 | 6.2 | 5.5 | 930 | 0.99 |
| 单元16 | 6.2 | 5.0 | 950 | 0.99 |

通过COMSOL Multiphysics 5.5软件的仿真计算,并联后结构的吸声系数如图4(a)所示,该结构在690~927 Hz的频段内吸声系数达到0.8以上。较之单个共振器单元的吸声系数,组合后的谐振频率发生一定的频移,且吸声系数略有下降,这是由于并联后多个结构之间的互相影响,使得吸声系数有一定的变化。与单个亥姆霍兹共振器类似,由于入射声波波长远大于共振器的颈部尺寸,且共振器内部的空气存在弹性,颈部的空气柱可看作活塞做往复运动,推动腔体内空气的振动。处于谐振频率时阻尼最大,如图4(b)所示,能量通过颈部开口进入共振器内部,腔体激烈共振,空气柱振动的速度幅值最高,在和壁面的摩擦过程中,由于黏滞损耗和热损耗消耗掉大

部分声能,从而表现出较好的吸声性能。



(a) 吸声系数曲线



(b) 谐振频率时的声压场及局部速度场分布云图

图 4 超材料吸声性能仿真结果

2.2 超材料吸波体的仿真结果及分析

本节通过有限元方法仿真并研究了超材料的微波吸收特性。值得注意的是,进行微波仿真时也需要对亥姆霍兹共振器进行建模。金属贴片结构包括 4 个不同尺寸的圆型结构,其半径用 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 表示。通过调整金属贴片的形状尺寸和布放,可以改变结构的谐振频率和吸波带宽。以吸波系数大于 0.8 且吸波频带尽可能宽作为优化原则,经过 COMSOL Multiphysics 5.5 软件优化后,贴片形状调整为椭圆形,其结构参数包括延 x 轴方向的半径 r_{1x} 、 r_{2x} 、 r_{3x} 、 r_{4x} ,以及延 y 轴方向的半径 r_{1y} 、 r_{2y} 、 r_{3y} 、 r_{4y} ,具体数值为: $r_{1x}=4.4\text{ mm}$, $r_{1y}=4\text{ mm}$, $r_{2x}=4.6\text{ mm}$, $r_{2y}=4.7\text{ mm}$, $r_{3x}=3.3\text{ mm}$, $r_{3y}=3.4\text{ mm}$, $r_{4x}=4.8\text{ mm}$, $r_{4y}=4.7\text{ mm}$,介电基板的厚度 $t=1.5\text{ mm}$ 。优化前后的结构如图 5 所示。

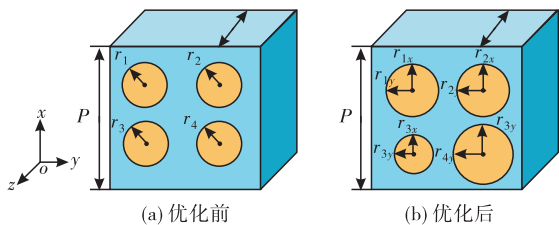


图 5 金属贴片结构

为了尽量减少声学亥姆霍兹共振器对电磁波辐射的影响,这里使用聚四氟乙烯作为共振器的材料。由前期测得的实验数据可得,介电常数设置为 2.1,正切损耗为 2.5×10^{-4} ,可近似视为透波材料。介质基板材料设置为环氧树脂,介电常数实部为

2.86,介电常数虚部为 0.086,上述材料参数来自课题组前期实验测试。金属贴片与金属底板采用 COMSOL Multiphysics 5.5 软件中材料库里铜的性质,电导率设置为 $5.62 \times 10^7\text{ S/m}$,并将边界条件设为 Floquet 周期性边界条件。TE(横电)极化法向入射时该结构的微波吸收系数仿真结果如图 6 所示,在 9.11~11.10 GHz 的范围内吸收率达到 80% 以上,吸收率峰值为 97%。可以从图中观察到 4 个明显峰值: $f_1=9.40\text{ GHz}$, $f_2=10.04\text{ GHz}$, $f_3=10.59\text{ GHz}$, $f_4=10.98\text{ GHz}$,分别对应 4 个不同尺寸的金属贴片。显然,吸收峰是由金属贴片的谐振引起的,贴片的谐振频率会在尺寸增大时向低频移动。

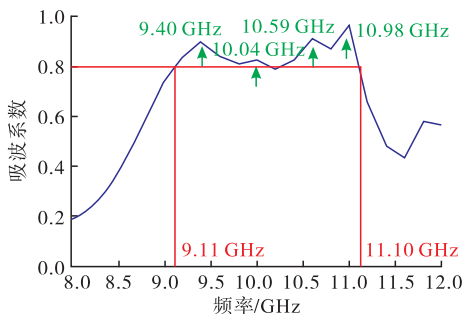


图 6 TE 极化下的吸波系数曲线

如图 7(a)~(d)所示,左侧图形在吸收峰对应的频率点处,电场主要集中在金属贴片的边缘区域,表明贴片结构中存在谐振效应。在外电场的驱动下,电场能量集中在贴片附近区域,产生强电谐振,增大了介电基板对电磁波能量的消耗,从而获得较好的微波吸收率。图 7(a)~(d)右侧图形为金属底板的电场及表面电流分布,表明在不同频率点处,金属贴片与金属底板的表面电流方向均相反,两者形成一个电流回路。其中,在 9.40 GHz 处,2 个产生强电谐振的区域表面电流方向相反,存在一定的相对相消,进一步减小结构的反射率。在 10.04 GHz 处,强谐振区域的表面电流与其他区域电流方向相反,说明外加电场与感应电场叠加产生的电场方向与外加电场相反,即感应电场大于外加电场,此处强吸收的主要原因是电谐振。对于 10.59 GHz 及 10.98 GHz,金属贴片的表面电流方向统一,说明合成电场与外加电场方向一致,即感应电场小于外加电场,而金属贴片的表面电流与金属底板表面电流方向相反,即合成磁场与外加磁场方向相反,感应磁场大于外加磁场,此时强吸收的主要原因是磁谐振。

对于本文提出的多功能复合结构,若改变介电基板的厚度 t ,得到的吸波系数仿真结果如图 8 所示。介电基板可等效为特性阻抗为 Z_0 的传输线模型,若 Z_0 与空气阻抗相当,则介电基板的厚度为波长的 1/4 时能够实现最佳吸收率。当采用介电常数

较大的材料作为介电基板时,其厚度可相应降低,但吸收峰会变窄。图8所示的结果中,一定范围内增大介电基板的厚度,结构的吸波带宽逐渐增大,吸收峰趋于平坦且向低频移动,但超过1.5 mm后,吸波带宽收窄且出现明显的谷值。

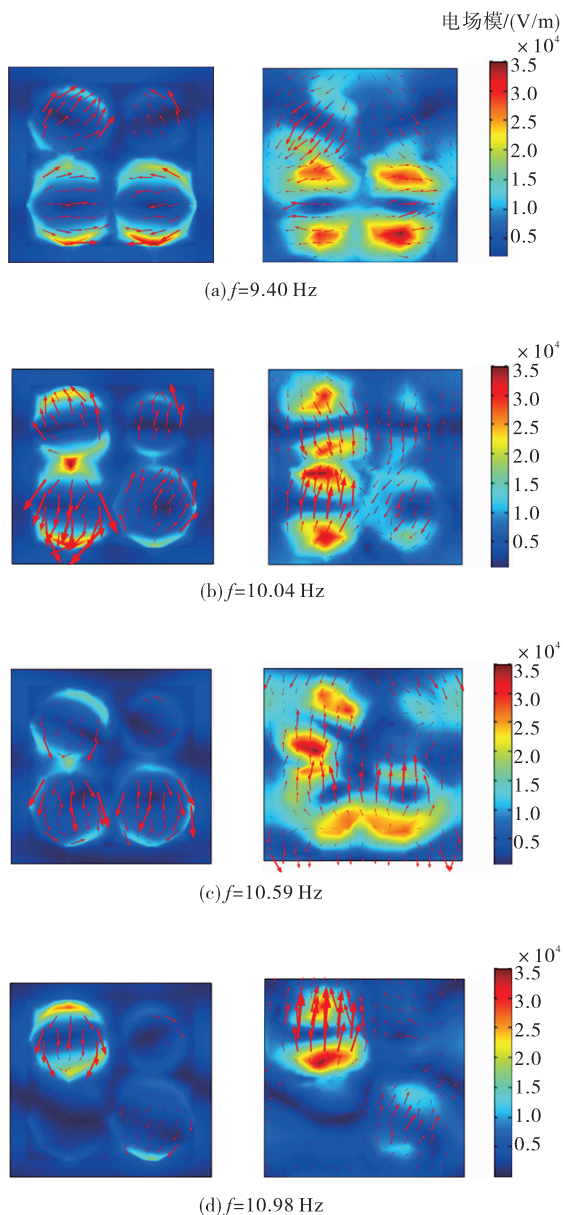


图7 4个吸收峰对应的贴片电场模及表面电流分布云图

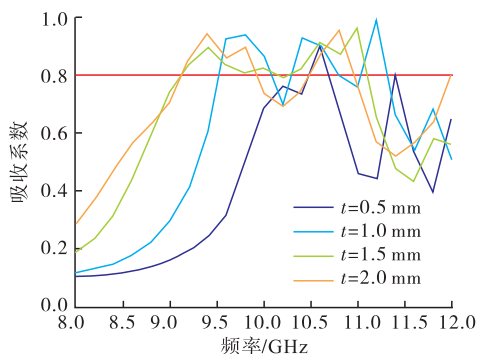


图8 不同介电基板厚度对应的吸波曲线结果

3 结语

综上,本文针对噪声及电磁污染致力于提出用于宽带吸波和吸声的多功能超材料。通过将亥姆霍兹共振器和金属贴片结构相结合,实现了电磁吸波兼容宽带吸声的功能,为解决噪声污染和电磁辐射问题带来了新思路。多功能超材料的整体厚度小于35 mm,约为吸收频带声波波长的十分之一,且底部吸波结构的厚度约为吸波频带对应微波波长的七分之一(不包含金属底板)。通过有限元仿真计算,系统研究了所提出的多功能超材料的吸声性能和吸波性能,并分别阐述了内在的物理机制,包括亥姆霍兹共振器的共振吸声机理及吸波结构的吸波机制。结果表明,该结构在690~927 Hz内实现80%以上的声吸收率,9.11~11.10 GHz内实现80%以上的微波吸收率。本文提出的多功能复合超材料实现了中高频宽带吸声兼容微波吸收的目标,能够满足同时隔离噪声及电磁污染的需求,为多物理场调控提供了新的解决方案。

参考文献

- [1] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84: 4184-4187.
- [2] PENDRY J B. Negative Refraction[J]. *Contemporary Physics*, 2004, 45(3): 191-202.
- [3] 沈杨, 王甲富, 张介秋, 等. 基于超材料的雷达吸波材料研究进展[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 19(6): 39-47.
- [4] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [5] 于惠存, 曹祥玉, 高军, 等. 一种超宽带反射型极化转换超表面设计[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 19(3): 60-65.
- [6] NGUYEN T T, LIM S. Design of Metamaterial Absorber Using Eight-Resistive-Arm Cell for Simultaneous Broadband and Wide-Incidence-Angle Absorption[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 6633.
- [7] FANG N, XI D J, XU J Y, et al. Ultrasonic Metamaterials with Negative Modulus[J]. *Nature Materials*, 2006, 5(6): 452-456.
- [8] GAO N S, ZHANG Z C, TANG L L, et al. Optimal Design of Broadband Quasi-Perfect Sound Absorption of Composite Hybrid Porous Metamaterial Using TLBO Algorithm[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 183: 108296.

- Conference on Computer Vision (ECCV). [S. l.]: Springer, 2018: 734-750.
- [15] DUAN K, BAI S, XIE L, et al. Centernet: Keypoint Triplets for Object Detection[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. [S. l.]:IEEE, 2019: 6569-6578.
- [16] FU C Y, LIU W, RANGA A, et al. Dssd: Deconvolutional Single Shot Detector[J]. ArXiv Preprint ArXiv:1701.06659, 2017.
- [17] JEONG J, PARK H, KWAK N. Enhancement of SSD by Concatenating Feature Maps for Objectdetection[J]. ArXiv Preprint ArXiv:1705.09587. 2017.
- [18] ZHANG S, WEN L, BIAN X, et al. Single-Shot Refinement Neural Network for Object Detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2018: 4203-4212.
- [19] LIU S, HUANG D. Receptive Field Block Net for Accurateand Fast Object Detection[C] //Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). [S. l.]:Springer, 2018: 385-400.
- [20] LI Z, ZHOU F. FSSD: Feature Fusion Single Shot Multibox Detector[J]. ArXiv Preprint ArXiv:1712.00960, 2017.
- [21] 张新良,谢恒,赵运基,等. 融合多维空间卷积算子和多层次特征的深度网络检测算法[J]. 模式识别与人工智能,2020, 33(10): 898-905.
- [22] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-Excitation Networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE, 2018: 7132-7141.
- [23] DAL J, LI Y, HE K, et al. R-fcn: Object Detection via Region-Based Fully Convolutional Networks[C]//Advances in Neural Information Processing Systems. [S. l.]:IEEE, 2016: 379-387.
- [24] 王燕妮,刘祥,刘江. 一种改进的单步多框目标检测算法[J]. 西安交通大学学报,2021,55(4):145-153.

(编辑:徐敏)

(上接第 42 页)

- [9] GAO N S, TANG L L, DENG J, et al. Design, Fabrication and Sound Absorption Test of Composite Porous Material with Embedding I-plates into Porous Polyurethane [J]. Applied Acoustics, 2021, 175: 107845.
- [10] CHENG B Z, GAO N S, ZHANG R H, et al. Design and Experimental Investigation of Broadband Quasi-Perfect Composite Loaded Sound Absorber at Low Frequencies[J]. Applied Acoustics, 2021, 178: 108026.
- [11] 李莹. 基于石墨烯纳米复合材料及超结构的电磁屏蔽和声学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [12] 张铮. 基于超材料的隐身技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [13] ZHOU Y, CHEN J, CHEN R, et al. Ultrathin Electromagnetic-Acoustic Amphibious Stealth Coats [J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8: 2000200.
- [14] FOKIN V, AMBATI M, SUN C, et al. Method for Retrieving Effective Properties of Locally Resonant Acoustic Metamaterials[J]. Physical Review B, 2007, 76: 144302.
- [15] ROMERO-GARCIA V, THEOCHARIS G, RICHOUX O, et al. Use of Complex Frequency Plane to Design Broadband and Sub-Wavelength Absorbers [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 139(6): 3394-3402.
- [16] 王甲富. 左手材料的设计及性能研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2010.
- [17] 张国瑞. 宽带周期吸波结构设计及其电磁耦合特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [18] 雷达吸波材料反射率测试方法: GJB 2038A—2011 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部军标出版发行部, 2011.

(编辑:徐楠楠)