

基于拓扑优化设计的宽频吸波复合材料

莫漫漫 马武伟 庞永强 陈润华 张笑梅 柳兆堂 李想 郭万涛

Broadband absorbent materials based on topology optimization design

Mo Man-Man Ma Wu-Wei Pang Yong-Qiang Chen Run-Hua Zhang Xiao-Mei Liu Zhao-Tang  
Li Xiang Guo Wan-Tao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 217801 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181170

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181170>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I21>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[一种宽角域散射增强超表面的研究](#)

Research of a wide-angle backscattering enhancement metasurface

物理学报.2018, 67(19): 198101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181053>

[基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控](#)

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报.2018, 67(11): 118102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

[InGaN/GaN 超晶格厚度对 Si 衬底 GaN 基蓝光发光二极管光电性能的影响](#)

Influences of InGaN/GaN superlattice thickness on the electronic and optical properties of GaN based blue light-emitting diodes grown on Si substrates

物理学报.2016, 65(7): 077801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.077801>

[铌酸锂波导电光重叠积分因子的波长依赖特性分析](#)

Analyses of wavelength dependence of the electro-optic overlap integral factor for LiNbO<sub>3</sub> channel waveguides

物理学报.2014, 63(7): 077801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.077801>

[激子复合区厚度对有机磁效应的影响](#)

The influence of the excitation recombination zone on the organic magnetic-field effect

物理学报.2013, 62(6): 067801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.067801>

# 基于拓扑优化设计的宽频吸波复合材料

莫漫漫<sup>1)†</sup> 马武伟<sup>1)</sup> 庞永强<sup>2)</sup> 陈润华<sup>1)</sup> 张笑梅<sup>1)</sup>  
柳兆堂<sup>2)</sup> 李想<sup>1)</sup> 郭万涛<sup>1)</sup>

1) (中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 洛阳 471023)

2) (江苏赛博空间科学技术有限公司, 南京 210000)

(2018年6月14日收到; 2018年8月28日收到修改稿)

本文基于拓扑优化方法设计并制备了一种宽频吸波复合材料, 该吸波复合材料由高强玻璃纤维透波板、电阻损耗型超材料、聚氨酯泡沫和碳纤维反射板组成. 仿真及测试结果表明, 该吸波复合材料在2—18 GHz频段内的平板反射率均小于-12 dB. 并且由于采用高强玻璃纤维及碳纤维复合材料作为面板层, 聚氨酯泡沫作为芯材, 因此该吸波复合材料不仅在较宽频带内对电磁波具有高的吸收率, 同时还具有质量轻、耐高温、耐低温、耐湿热、抗腐蚀等特点, 便于实现吸波与力学性能及耐环境性能的兼容, 具有一定的工程应用价值.

**关键词:** 拓扑优化, 电阻损耗型超材料, 吸波性能, 力学性能, 耐环境性能

**PACS:** 78.20.Ci, 81.05.Zx

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181170

## 1 引言

在海洋精确制导技术及探测雷达不断发展的同时, 反雷达侦破的吸波材料也获得了空前发展. 大力发展隐身技术, 尽可能地消除或减弱武器装备的暴露征候, 对提高其战场生存以及突防能力具有非常重要的军事意义. 在雷达特性一定的情况下, 降低目标雷达回波的主要途径包括目标外形设计、采用雷达吸波材料、无源对消和有源对消. 其中, 外形设计和采用吸波材料为最常用途径. 基于外形设计的雷达隐身(简称外形隐身)是实现目标隐身最直接有效的手段, 其原理是利用系统工程理论, 对隐身目标的形体结构进行优化设计, 使目标反射的雷达波能量偏离雷达发射方向, 从而有效降低目标的平均雷达散射截面(RCS). 影响目标RCS的因素较多, 不仅包括雷达频率、雷达观测目标的方位角、雷达极化等雷达特性, 还包括目标尺寸、形状和性质等因素. 实践证明, 采用外形隐身设计, 可有效降低目标RCS, 显著提高隐身性能. 然而, 外形隐身具有明显局限性. 首先, 对外形的过度要求可能

影响舰船的流体动力学性能, 并减小装容空间; 其次, 目标在某个角域内RCS减小, 必然使另一些角域内RCS增加. 随着多站雷达网的发展, 单靠外形隐身不可能在全立体范围同时减小目标RCS. 在多站雷达网的帮助下, 敌方同样能较早发现来犯的隐身目标, 并有充足的时间派出战机拦截. 因此, 外形隐身技术的优势在未来战争中越来越难以发挥, 若从根本上赋予目标优异的隐身性能, 必须依靠材料本征隐身功能, 即发展雷达吸波材料. 舰船用雷达吸波材料多以吸波涂层为主, 存在频段窄、吸收弱、隐身角度小、增重大、易脱落等问题, 并且难以实现低频段隐身, 更不能满足水面舰船的宽频带、宽角度隐身.

超材料作为一种新型功能材料, 已经引起了广泛的关注. 近年来, 国内外学者对基于超材料的吸波材料进行了大胆的探索. 2008年, 美国波士顿学院的Landy等<sup>[1]</sup>设计出基于超材料的“完美吸收体”(perfect absorber), 仅依靠金属的结构设计就完成了11.5 GHz近乎100%的吸波性能. 2006年, 英国科学家Pendry等<sup>[2]</sup>在《Science》上发表了基

† 通信作者. E-mail: mmm725@126.com

于坐标变换的完美隐身斗篷设计理论; 同年, 美国科学家 Schurig 等<sup>[3]</sup>借助超材料, 制备了世界首个隐身斗篷的原理样件, 研究结果发表在《Science》, 在国际上引起了极大的轰动. 2013年, 杨欢欢等<sup>[4]</sup>提出了基于电磁谐振分离的宽带低雷达截面超材料吸波体, 该吸波体的低 RCS 特性具有极化无关、宽入射角的特点, 且通过改变吸波体的夹层结构可以实现工作带宽的灵活调节. 东南大学崔铁军课题组<sup>[5-7]</sup>提出编码超材料(coding metamaterials)、数字超材料(digital metamaterials)和可编程超材料(programmable metamaterials)并进行了隐身应用研究; 2017年该课题组<sup>[8]</sup>又开展了光频/微波频段一体化兼容设计雷达吸波材料的研究. 屈绍波课题组<sup>[9,10]</sup>于2014年提出了宽带隐身超表面设计技术, 研制了基于多机理复合的宽带隐身超表面, 在7.8—13 GHz可将RCS缩减10 dB以上; 并且他们<sup>[11]</sup>建立了基于超表面的超宽带复合吸波材料设计技术. 南京大学冯一军课题组<sup>[12]</sup>于2009年开展了极化无关超材料吸波体研究, 所研制的材料在X波段具有窄带吸波特性的特点. 中国科学院光电技术研究所罗先刚课题组<sup>[13]</sup>实验验证了基于超材料的S/X波段宽带复合吸波材料, 同时开展基于超材料吸波体的低RCS、高增益天线设计研究, 制备了工作于S波段的低RCS天线原理样件, 在5.5—16 GHz可将天线RCS平均缩减15 dB以上. 2009年电子科技大学文岐业课题组<sup>[14]</sup>提出了一个太赫兹频段的双频吸收器, 该吸收器的一个吸收单元包含两个电谐振结构, 因而能实现两个频点的强吸收, 该双频吸收器引起了对多频段超材料吸收器的广泛研究. 电子科技大学邓龙江课题组<sup>[15-17]</sup>开展了渐变阻抗加载吸波结构、超材料吸波体、基于超材料的宽带复合吸波材料以及频率选择表面天线罩设计研究. 浙江大学何赛灵课题组<sup>[18-23]</sup>开展了基于超材料的宽带吸波材料设计研究, 提出了基于超材料的大入射角窄带吸波材料、基于多尺度/多谐振的锯齿形宽带吸波材料、二维极化无关宽带吸波材料、基于负磁导率超材料的轻质超薄窄带吸波材料. 2012年程用志等<sup>[24]</sup>提出了基于超材料与电阻型频率选择表面的薄型宽频带吸波体的设计, 在3—25 GHz之间吸收率大于90%, 相对带宽为150%, 这为薄型宽频带吸波材料的应用提供了一种新途径; 同年该课题组又提出了基于电阻型

频率选择表面的低频宽带超材料吸波体的设计<sup>[25]</sup>, 在整个1—5 GHz频率范围内, 吸收率大于80%, 吸收峰值达到98%以上.

然而, 目前传统结构吸波材料吸波带宽较窄或者吸波率较低, 且大都停留在实验室研制阶段, 难以大批量制备并工程化应用在舰船复合材料上层建筑、舷墙等部位. 将雷达吸波材料与其他材料一起制成具备宽频吸波能力的复合材料, 作为船体结构的一部分或者全部, 可以使船体具备强度高、重量轻且兼具隐身性能与耐环境性能的优势, 更适合应用在隐身舰艇上. 因此, 研制一种适用于工程化应用的宽频吸波复合材料是今后研究的主要方向之一.

本文基于超材料拓扑优化设计方法, 研制并制备了一种宽频吸波复合材料. 该吸波复合材料的吸波带宽为16 GHz, 且该频段内反射率均小于-10 dB, 高频段甚至低于-20 dB, 从设计上讲, 明显优于传统吸波材料. 该吸波复合材料为“三明治”夹芯结构, 由外蒙皮面板、轻质芯材和反射层面板构成. 外蒙皮面板为低介电常数的高强玻璃纤维, 具有良好的透波性能和一定的力学承载力, 同时可以保护吸波复合材料不受海洋环境的腐蚀; 芯材由低密度的聚氨酯泡沫和超材料功能层构成, 可以很好地满足材料的减重要求和隐身特性; 反射层面板为低电阻率的树脂基碳纤维, 在阻止电磁波透射的同时, 为超材料功能层提供电边界条件, 产生强的电磁谐振. 超材料功能层封装在复合材料内部, 避免了外界环境因素对电阻膜的影响, 且便于和常用夹芯结构复合材料兼容实现力学与隐身功能一体化, 具有一定的工程化应用价值.

## 2 结构建模及分析

本文设计的夹芯结构吸波复合材料由表层透波面板、轻质泡沫芯材和底层反射面板构成的三明治结构, 基本结构如图1所示. 其中图1(b)为芯材的各层结构分布图, 包括聚氨酯泡沫、超材料功能层、环氧基玻璃纤维(以下简称FR4)、环氧胶膜(以下简称胶膜). FR4为超材料功能层的基材, 介电常数为4.3, 损耗角正切为0.025; 胶膜的介电常数为3.3, 损耗角正切为0.01, 主要用于聚氨酯泡沫与超材料功能层的一体化成型.

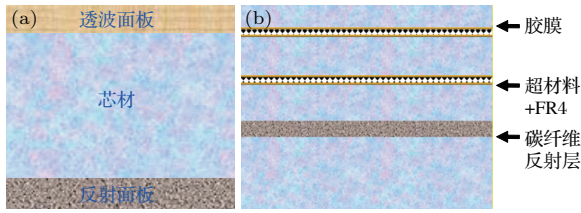


图1 夹芯结构吸波复合材料结构示意图 (a) 夹芯结构示意图; (b) 芯材功能层结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of sandwich structure absorbent materials: (a) Sandwich structure; (b) schematic diagram of the core functional layer.

超材料吸收电磁波的本质是通过结构设计形成电磁谐振,使得电场和磁场得到显著增强,从而利用材料的电损耗和磁损耗将入射电磁波消耗掉.为了获得宽带吸波性能,要保证在相对应频段内的多谐振效应,而超材料结构单元本身是谐振单元,因此能够满足设计要求.另一方面,从“路”的角度考虑,电阻型超材料谐振单元在等效电阻的基础上引入了电抗成分,且与传统接地基体的电磁响应正好相反,从而获得宽频带的阻抗匹配,实现较强的吸波性能.

具有损耗特性的电阻型超材料的等效电路如图2所示,分为容性和感性两种.为了产出强谐振,

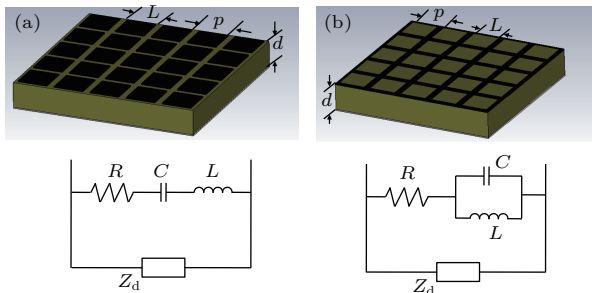
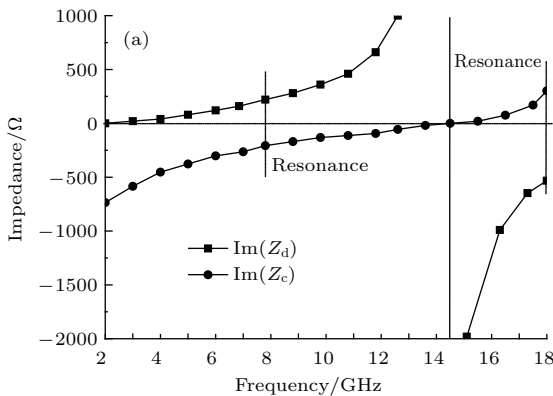


图2 超材料及其等效电路模型

Fig. 2. Metamaterials and equivalent circuit models.



均由结构单元、基体和反射层构成,介质基体可以等效为一段传输线.

本文采取容性电阻膜设计,其等效阻抗为

$$Z_m = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right), \quad (1)$$

其中,  $R$ ,  $L$  和  $C$  分别是等效电阻、电感和电容. 接地基板的阻抗可以采用传输线方法计算得到

$$Z_d = jZ_0 \sqrt{1/\epsilon_r} \tan \left( \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\epsilon_r} \right), \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_r$  是基板材料的相对复数介电常数,  $Z_0$  为自由空间的特征阻抗. 这里假设基板为非磁性材料,因而相对磁导率恒为1.

由等效电路模型可以看到,超材料的输入阻抗为并联电路,通过一系列数学化简,可以得到输入阻抗的实部和虚部分别为

$$\text{Re}(Z_{in}) = \frac{R[\text{Im}(Z_d)]^2}{R^2 + [\text{Im}(Z_d) + \text{Im}(Z_m)]^2}, \quad (3a)$$

$$\text{Im}(Z_{in}) = \frac{R^2[\text{Im}(Z_d)] - \text{Im}(Z_m)\text{Im}(Z_d)[\text{Im}(Z_d) + \text{Im}(Z_m)]}{R^2 + [\text{Im}(Z_d) + \text{Im}(Z_m)]^2}. \quad (3b)$$

吸波电阻膜产生吸收峰的条件是输入阻抗和自由空间阻抗匹配,因此可以分以下两种情况进行分析:

1)  $\text{Im}(Z_d) = -\text{Im}(Z_m)$ , 且等效电阻  $R = \text{Im}^2(Z_d)/Z$ ;

2)  $\text{Im}(Z_d) = \infty$  时,  $R = Z_0$ .

基于上述设计思路,仿真计算了一种超材料的阻抗关系以及对应反射率,结果如图3所示.可以看出,吸收峰形成的位置,就是基体阻抗与超材料

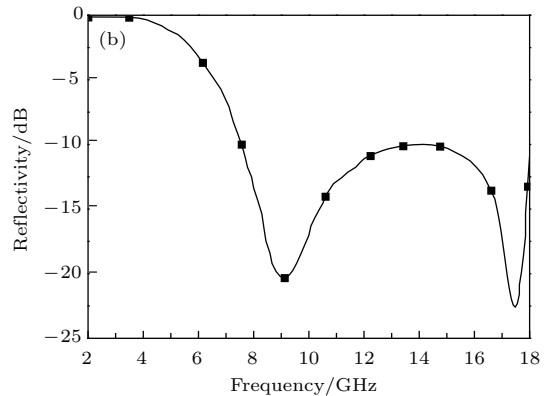


图3 电阻型超材料阻抗匹配关系 (a) 及其对应的反射率曲线 (b)

Fig. 3. Impedance matching (a) and reflectance curve (b) of resistive metamaterials.

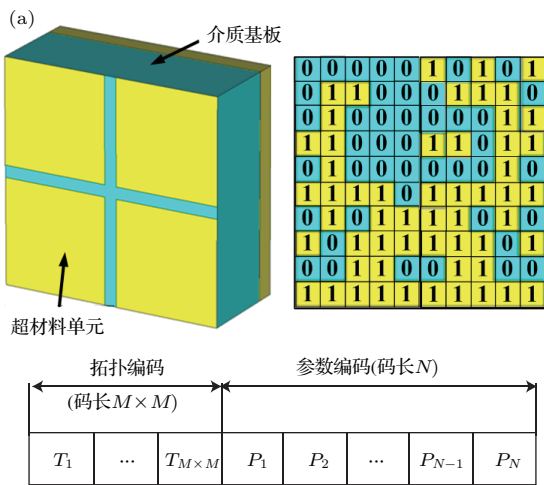
阻抗互相抵消的位置, 要拓展吸收带宽, 首先要拓展吸收峰之间的距离. 同时, 要改善低频吸波性能, 要将吸收峰向低频移动.

为了获得在 2—18 GHz 范围内的宽带强吸收, 单层结构难以满足, 必须采取多层结构, 增加谐振频率, 从而获得宽带吸波效果. 本文采用如图 1 所示的双层超材料结构.

### 3 超材料拓扑优化设计

超材料拓扑优化设计的关键是超材料编码化, 编码越长, 越不利于优化算法的收敛, 也就是说在有限的范围内搜索到最优解的可能性越小. 超材料离散化的编码包括拓扑编码和参数编码两部分, 其中拓扑编码采用图 4(a) 所示的方式, 由于材料的极化无关特性, 采用轴对称结构的二进制编码, 将超材料单元表面划分成  $M \times M$  个网格, 编码长度为  $M \times M$ , 每个小方格均采用 0 或 1 进行填充, 其中 0 代表无表面结构, 1 代表填充相应材料的方形结构, 由于采用轴对称的二进制编码, 编码长度缩短为  $(M \times M)/4$ . 参数编码就是将超材料单元结构的尺寸参数(如单元长、宽、高等)和材料参数(如材料介电常数、磁导率等)、面板厚度  $h_0$ 、第一层泡沫厚度  $h_1$ 、第二层泡沫厚度  $h_2$ 、第三层泡沫厚度  $h_3$ 、电阻型超材料的方阻值  $r$  等参数按照二进制编码的规则进行编码, 编码长度为  $N$ .

编码总长度为  $(M \times M)/4 + N$ , 参数编码的解码过程为



$$p = p_{\min} + 2^{N_1-i} S_1 \sum_{i=1}^{N_1} p_i,$$

$$r = r_{\min} + 2^{N_2-i} S_2 \sum_{i=1}^{N_2} r_i,$$

$$h_0 = h_{0 \min} + 2^{N_3-i} S_3 \sum_{i=1}^{N_3} h_{0i},$$

$$h_1 = h_{1 \min} + 2^{N_4-i} S_4 \sum_{i=1}^{N_4} h_{1i},$$

$$h_2 = h_{2 \min} + 2^{N_5-i} S_5 \sum_{i=1}^{N_5} h_{2i},$$

$$h_3 = h_{3 \min} + 2^{N_6-i} S_6 \sum_{i=1}^{N_6} h_{3i},$$

其中,  $p_{\min}, r_{\min}, h_{0 \min}, h_{1 \min}, h_{2 \min}, h_{3 \min}$  为单元结构参数的最小值;  $N_1—N_6$  为对应参数编码的最大长度;  $S_1—S_6$  为最小海明码距离对应的数值;  $p_i, h_{0i}, h_{1i}, h_{2i}, h_{3i}, r_i$  为对应位置的二进制编码. 根据设计要求, 给出了如表 1 所列的结构参数的经验值.

设定吸波复合材料的反射率为  $R(w)$ 、透射率为  $T(w)$ 、吸波率为  $A(w)$ , 根据等效电路理论:

$$R(w) = |S_{11}|^2, \quad T(w) = |S_{21}|^2,$$

$$A(w) = 1 - R(w) - T(w) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2,$$

其中,  $S_{11}$  为反射系数,  $S_{21}$  为传输系数, 在本文中, 由于在材料底部加载了反射背板, 因此, 透射率  $T(w) = 0$ , 吸收率  $A(w) = 1 - R(w) = 1 - |S_{11}|^2$ .

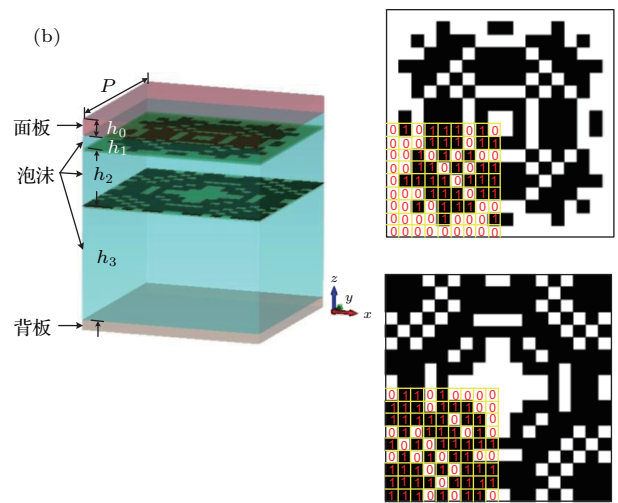


图 4 (a) 拓扑优化设计的编码方法示意图; (b) 吸波复合材料结构及超材料拓扑图

Fig. 4. (a) Schematic of the coding method of topological optimization design; (b) the structure of absorber materials and metamaterial topology.

表1 结构参数经验值  
Table 1. Experience values of structural parameters.

参数	取值	参数	取值
$p_{\min}$	6	$N_4$	4
$r_{\min}$	35	$N_5$	4
$h_{0\min}$	0.7	$N_6$	4
$h_{1\min}$	1	$S_1$	0.25
$h_{2\min}$	3	$S_2$	1
$h_{3\min}$	10	$S_3$	0.2
$N_1$	5	$S_4$	0.2
$N_2$	5	$S_5$	0.2
$N_3$	4	$S_6$	0.2

为了提高吸波复合材料的吸波性能, 必须使材料的反射系数  $S_{11}$  足够小, 因此, 求解材料吸波率的问题转化为求解反射系数  $S_{11}$  的问题.

本文采用 MATLAB 和 CST 联合仿真的方法进行拓扑优化设计, 以 MATLAB 为主程序运行优化算法, 通过反复调用 CST 进行建模、条件设定、仿真, 最后将计算结果返回主程序, 以此形成循环, 直到达到预定的终止条件或达到设计目标, 流程图如图 5 所示.

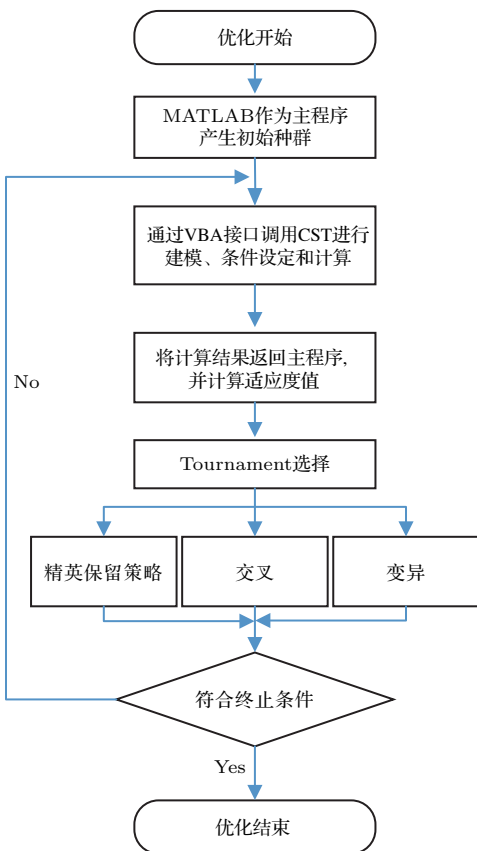


图5 联合仿真优化流程图  
Fig. 5. Flowchart of simulation and optimization.

用拓扑编码和参数编码组合的完整二进制串, 便实现了超材料单元的离散化. 通过对基本单元的分布设计, 再利用数学优化算法, 即可设计出满足吸波性能要求的超材料结构, 最终得到的超材料结构单元的编码设计如图 4(b) 所示, 其中黑色区域为结构区域, 编码为 1, 白色区域为空白区域, 编码为 0.

### 4 结果与分析

采用离散化的思想, 将超材料结构单元进行编码, 经过拓扑优化得到最优化的编码方式, 经过相应的解码过程可以得到表 2 所列的结构参数及方阻参数, 结构单位为 mm, 方阻单位为  $\Omega/\text{sq}$ . 图 6 所示为最优结构参数所对应的上下两层超材料结构图.

根据设计和材料体系的设定, 利用电磁仿真软件 CST 进行仿真计算, 利用表 2 中的结构参数,

表2 吸波复合材料最优结构参数和方阻值  
Table 2. Optimal structural parameters and sheet resistance of the absorbent materials.

$p/\text{mm}$	$r/\Omega\cdot\text{sq}^{-1}$	$h_0/\text{mm}$	$h_1/\text{mm}$	$h_2/\text{mm}$	$h_3/\text{mm}$
18.5	65	1.7	1.5	5.4	11.3

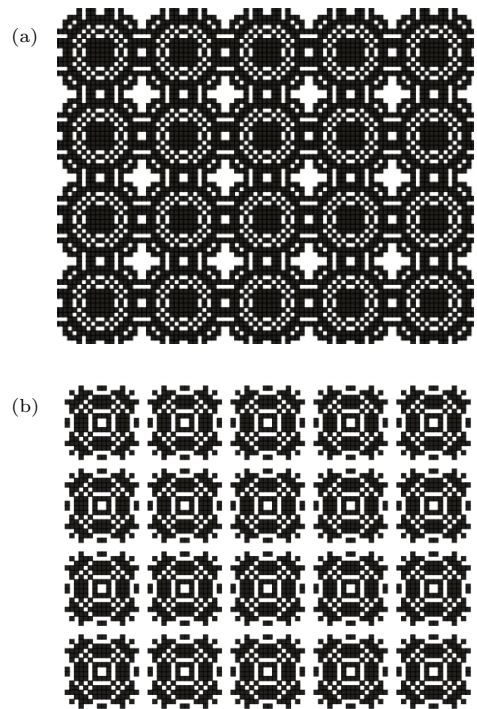


图6 超材料结构图 (a) 上层; (b) 下层  
Fig. 6. Structure of metamaterials: (a) Upper layer; (b) under layer.

获得了最优的仿真反射曲线,如图7所示.从图7可以看到,在2—18 GHz范围内,仿真反射率均小于-10.5 dB,在整个频段内的平均反射率小于-14 dB,反射率最低处可达-24 dB.

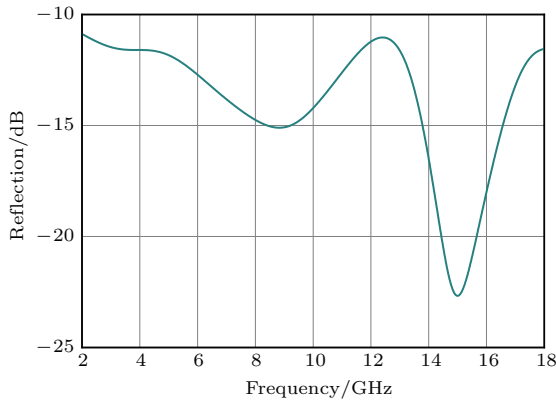


图7 吸波复合材料反射率仿真曲线

Fig. 7. Reflectivity simulation curve of absorbent material.

为了清晰描述吸波复合材料的吸波机理,在8.7和15.0 GHz频点处分别截取了上、下两层电阻上的电场和磁场分布,如图8所示.

根据设计可知,入射电场的波矢方向垂直于超材料结构单元,即入射电磁波的磁场方向平行于超材料.由发生磁谐振的条件易知,在上、下两层电

阻膜上并未发生磁谐振,只发生了电谐振.所以,电阻型吸波复合材料是依靠电谐振来达到吸波效果的.

由图8可知:在上层电阻膜电场强的区域,下层电阻膜上的电场比较弱;反之亦然,在上层电阻膜电场弱的区域,下层电阻膜上的电场比较强.这种现象说明,入射电磁波电场在上、下两层的电阻膜之间发生了耦合谐振,由于耦合谐振的作用,电场被局域在上、下两层电阻膜上.又由于电阻膜具有欧姆损耗特性,所以入射电磁波最终被电阻型超材料以热损耗的形式吸收.

电阻型吸波复合材料的吸收带宽主要取决于其结构、材料组分和材料参数等.宽频带、高效率、大角度稳定的吸波复合材料设计是一个多目标的优化问题,因此,为了探究各个参数对吸波复合材料性能的影响,对单元结构中的参数进行了扫描,得到仿真结果分别如图9和图10所示,其中 $h$ 为第一层泡沫的厚度; $d$ 为复合材料的总厚度.

通过图9可以看到,当 $h_0 = h = 1.5$  mm时,吸波复合材料的吸波性能最好,随着 $h$ 的增大(1.5—3 mm),其吸波性能逐渐恶化.

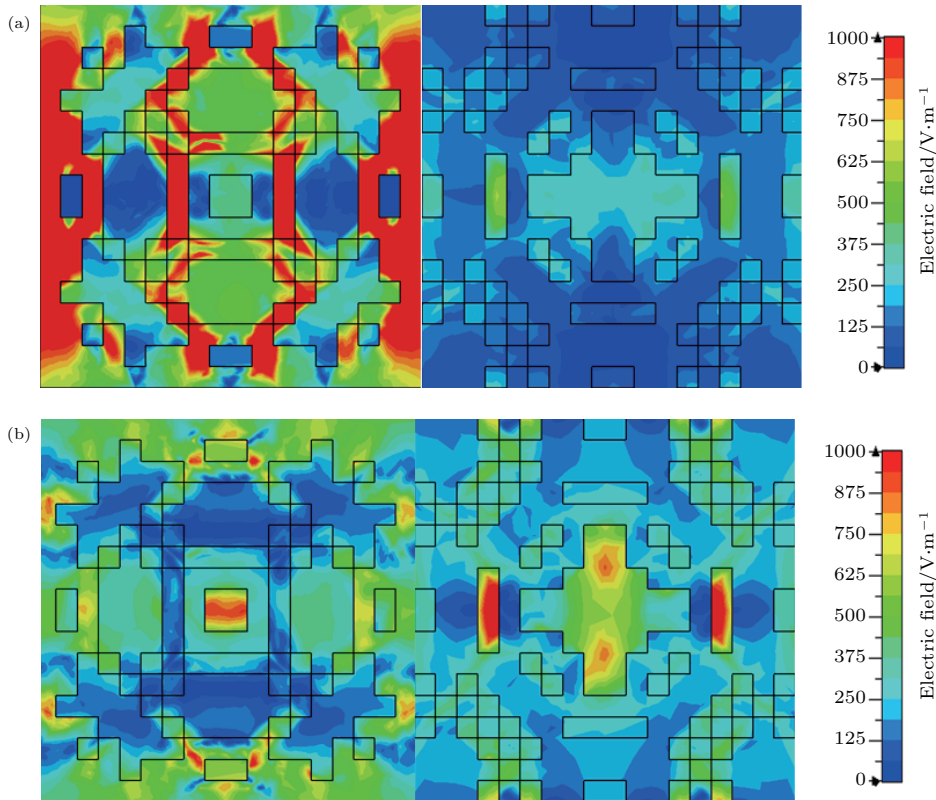


图8 上下两层超材料上电场分布图 (a)  $f = 8.7$  GHz; (b)  $f = 15$  GHz

Fig. 8. Electric field distribution of upper and under layer of metamaterial: (a)  $f = 8.7$  GHz; (b)  $f = 15$  GHz.

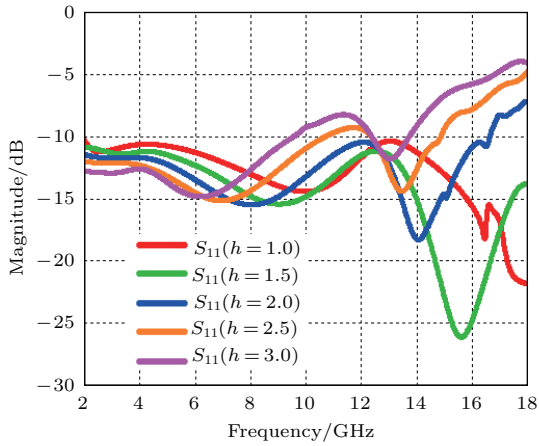


图9 第一层泡沫厚度对材料吸波性能的影响  
Fig. 9. Effect of the thickness of primary foam on absorbing properties.

从图10可以看出, 随着吸波复合材料总厚度的增加, 复合材料整体的吸波性能呈现不规则变化, 但是可以看出, 在总厚度为19 mm时, 复合材料的整体吸波性能达到最好.

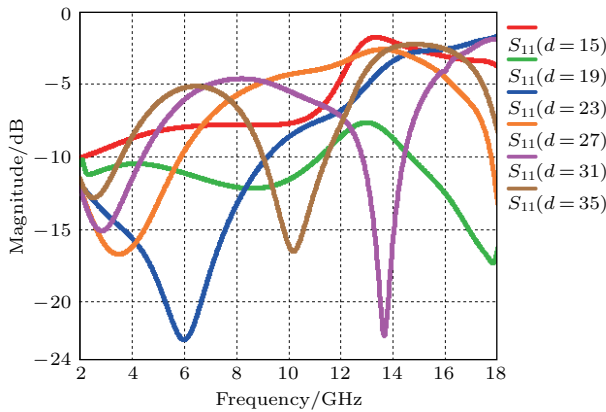


图10 材料总厚度对材料吸波性能的影响  
Fig. 10. Effect of the thickness of total material on absorbing properties.

图11是超材料方阻对吸波性能的影响规律, 图11中数字1—7代表的曲线分别对应方阻值为65, 60, 50, 55, 80, 75和70  $\Omega/\text{sq}$ . 可以看出, 当超

材料方阻在65  $\Omega/\text{sq}$ 附近时吸波复合材料的吸波性能达到最优.

由以上分析可知, 影响吸波复合材料吸波性能的关键因素是泡沫层厚度、超材料方阻值、超材料单元结构等参数. 运用拓扑优化设计可以摆脱经验束缚, 快速地设计出满足隐身性能要求的结构功能一体化吸波复合材料.

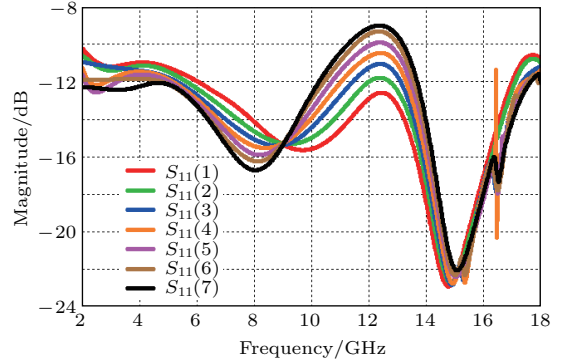


图11 电阻膜方阻值对复合材料吸波性能的影响  
Fig. 11. Effect of the resistance value of resistive film on absorbing properties.

## 5 宽频吸波复合材料制备

根据设计结果, 制备了该宽频吸波复合材料并完成了产品的批量化生产工艺定型. 首先利用丝网印刷技术, 在FR4上用导电碳浆印刷设计的吸波结构, 通过控制导电碳浆的厚度来控制电阻片的方阻, 使用四探针方块电阻测试仪(ST-21系列)测定方阻值. 然后进行基于电阻膜功能层的吸波芯材的成型, 再将吸波芯材与复合材料面板结合进行真空辅助成型.

目前一次成型的电阻膜尺寸为300 mm  $\times$  300 mm, 采用与复合材料相同的本体树脂体系对超材料进行黏接, 获得如图12(a)所示的所需尺寸的

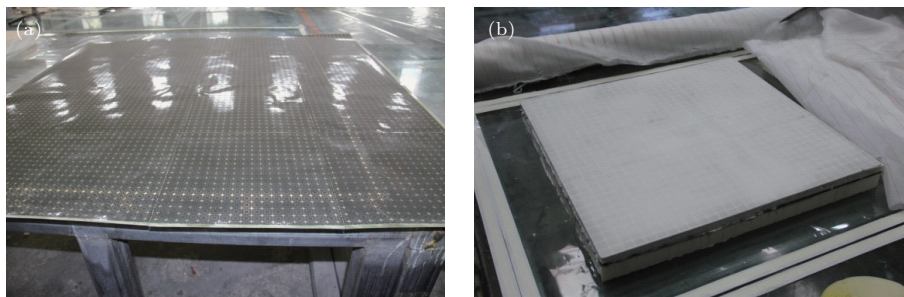


图12 (a) 黏接成型的大尺寸电阻膜; (b) 吸波芯材  
Fig. 12. (a) Bonded large size resistive film; (b) absorbing core material.



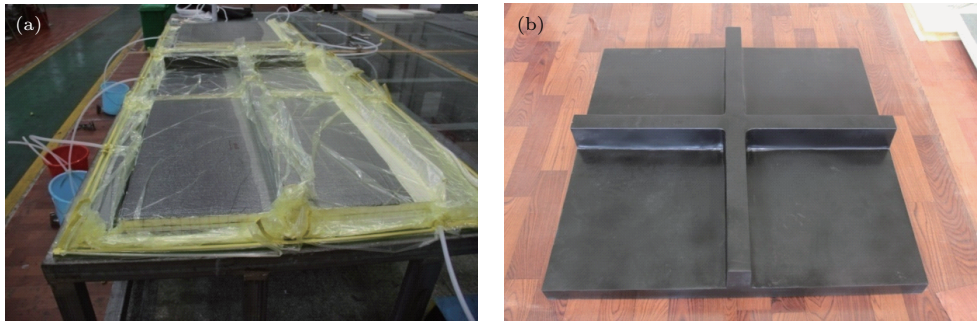


图 13 (a) 夹芯复合材料成型过程; (b) 宽频吸波复合材料典型节点单元

Fig. 13. (a) Manufacturing process of the sandwich structure materials; (b) typical node unit of broadband absorbent materials.

的电阻膜功能层, 再通过本体树脂黏接固化进行多层吸波芯材的复合.

采用常规真空辅助成型工艺进行芯材与面板的复合制备, 成型过程如图 13(a) 所示, 进行表面处理喷涂黑色面漆, 喷漆后的复合材料典型节点单元如图 13(b) 所示.

## 6 宽频吸波复合材料性能测试

### 6.1 力学性能

按照 GB/T1453-2005, GB/T1452-2005, GB/T1454-2005 和 GB/T1456-2005, 制备试验试样, 分别对宽频吸波复合材料的平压强度、平拉强度、侧压强度及弯曲刚度进行性能测试, 测试结果如表 3 所列, 结果显示, 宽频吸波复合材料具有良好的力学性能, 与普通夹芯复合材料的力学性能相当, 基本力学性能满足结构材料的使用要求.

表 3 夹芯复合材料力学性能

Table 3. Mechanical properties of sandwich structure materials.

序号	检测项目	检测结果
1	平压强度/MPa	3.17
2	平拉强度/MPa	2.16
3	侧压强度/MPa	12.525
4	弯曲刚度/N·mm <sup>2</sup>	6.07 × 10 <sup>9</sup>

### 6.2 隐身性能

参照 GJB2038A-2011 制备标准试样, 在微波暗室中, 利用矢量网络分析仪, 对宽频吸波复合材料的反射率进行测试, 测试曲线见图 14, 可以看出, 在 2—18 GHz 范围内, 该吸波复合材料的反射

率均小于 -10 dB, 通过对比仿真结果和实验结果发现, 测试结果与仿真结果基本符合, 说明设计方法与成型工艺的可行性. 测试曲线的抖动主要来自环境影响、工艺误差和测量误差等; 反射率测试结果在 4 和 8 GHz 位置处的奇异点是由喇叭的更换造成的, 即 2—18 GHz 频段范围的测试结果是由 2—4 GHz, 4—8 GHz 和 8—18 GHz 三次测试结果拼接而成.

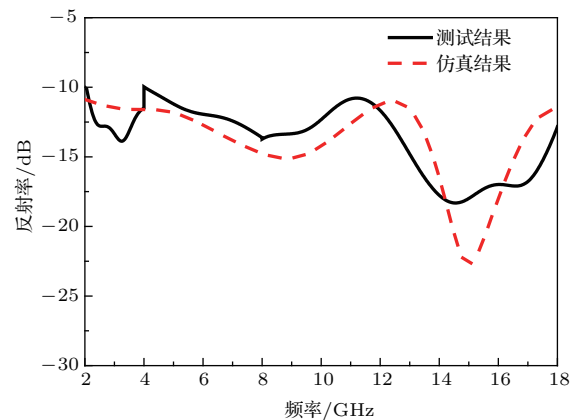


图 14 宽频吸波复合材料平板反射率

Fig. 14. Reflectivity of broadband absorbent material.

## 7 结 论

本文借助 CST 软件的有限元分析法模拟计算了宽频吸波复合材料的吸波特性, 并通过真空辅助成型工艺制备了试验样件. 制备的宽频吸波复合材料工艺兼容性优良, 充分考虑了材料的成型可实现性、成型工艺影响因素等, 可以实现宽频吸波复合材料的大面积工程化应用. 测试结果显示, 本文的宽频吸波复合材料具有良好的力学性能, 基本力学性能满足结构材料的使用要求; 在 2—18 GHz 较宽频段内具有良好的吸波性能; 由于电阻膜的对称

结构设计, 该吸波复合材料具有较好的极化不敏感性, 满足舰船用吸波复合材料隐身性能的要求. 因此, 本文所研究制备的宽频吸波复合材料具有较好的工程化应用价值.

### 参考文献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [2] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [3] Schurig D, Mock J J, Justice B J 2006 *Science* **314** 977
- [4] Yan H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Li S J, Zhao Y, Yuan Z D, Zhang H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214101 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 李思佳, 赵一, 袁子东, 张浩 2013 物理学报 **62** 214101]
- [5] Zhang L, Liu S, Cui T J 2017 *Chin. Opt.* **10** 1 (in Chinese) [张磊, 刘硕, 崔铁军 2017 中国光学 **10** 1]
- [6] Yan X, Liang L J, Yang J, Liu W W, Ding X, Xu D G, Zhang Y T, Cui T J, Yao J Q 2015 *Opt. Express* **23** 29128
- [7] Liu J F, Liu S, Fu X J, Cui T J 2018 *J. Radars* **7** 46 (in Chinese) [刘峻峰, 刘硕, 傅晓建, 崔铁军 2018 雷达学报 **7** 46]
- [8] Zhang C, Cheng Q, Yang J, Zhao J, Cui T J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 143511
- [9] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 221110
- [10] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084103 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 陈红雅, 徐卓, 张安学 2014 物理学报 **63** 084103]
- [11] Li Y F, Wang J F, Zhang J Q, Qu S B, Pang Y Q, Zheng L, Yan M B, Xu Z, Zhang A X 2014 *Prog. Electromagn. Res. M* **40** 9
- [12] Zhu B, Wang Z B, Yu Z Z, Zhang Q, Zhao J M, Feng Y J, Jing T 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 114102
- [13] Pan W B, Huang C, Chen P, Ma X L, Hu C G, Luo X G 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 945
- [14] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241111
- [15] Chen H Y, Hou X Y, Deng L J 2009 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **8** 1231
- [16] Xu Y Q, Zhou P H, Zhang H B, Chen L, Deng L J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044102
- [17] Zhang L B, Zhou P H, Chen H Y, Lu H P, Xie H Y, Zhang L, Li E, Xie J L, Deng L J 2016 *Sci. Rep.* **6** 33826
- [18] Cui Y X, Feng K H, Xu J, Ma H J, Jin Y, He S L, Fang N X 2012 *Nano Lett.* **12** 1443
- [19] Cui Y X, He Y R, Jin Y, Ding F, Yang L, Ye Y Q, Zhong S M, Lin Y Y, He S L 2014 *Laser Photon. Rev.* **8** 495
- [20] Zhong S M, He S L 2013 *Sci. Rep.* **3** 2083
- [21] Zhong S M, Ma Y G, He S L 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 023504
- [22] Zhu J F, Ma Z F, Sun W J, Ding F, He Q, Zhou L, Ma Y G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 021102
- [23] Ding F, Jin Y, Li B R, Cheng H, Mo L, He S L 2014 *Laser Photonics Rev.* **8** 946
- [24] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, Zheng D H, Fan Y N, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134101 (in Chinese) [程用志, 聂彦, 龚荣洲, 郑栋浩, 范跃农, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134101]
- [25] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, Zheng D H, Gong R Z, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134102 (in Chinese) [程用志, 王莹, 聂彦, 郑栋浩, 龚荣洲, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134102]

# Broadband absorbent materials based on topology optimization design

Mo Man-Man<sup>1)†</sup> Ma Wu-Wei<sup>1)</sup> Pang Yong-Qiang<sup>2)</sup> Chen Run-Hua<sup>1)</sup>  
Zhang Xiao-Mei<sup>1)</sup> Liu Zhao-Tang<sup>2)</sup> Li Xiang<sup>1)</sup> Guo Wan-Tao<sup>1)</sup>

1) (Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

2) (Jiangsu Saibo Space Science and Technology Co., Ltd, Nanjing 210000, China)

( Received 14 June 2018; revised manuscript received 28 August 2018 )

## Abstract

In this paper, we present a kind of broadband absorbent material. The broadband absorbent material is designed based on topology optimization and tested. The optimizing of metamaterials with a genetic algorithm has become one of the most effective methods of designing metamaterials in recent years. An integral system with interactive simulation of MATLAB and CST Microwave Studio is developed, and the main program of genetic algorithm is written in MATLAB; with simulation and computation in CST the metamaterial is optimized by a genetic algorithm with power of global optimization. Vacuum assistant resin infusion process is a new cost-effective and high-performance process. The proposed radar absorbent material possesses a sandwich structure, which consists of transparent composite skin panel, resistive metasurface, polyurethane foam and reflective composite skin panel. The transparent composite skin panel is low-dielectric-constant glass fiber reinforced composite, which has excellent physical properties and weather resistant property. The core material is composed of low density polyurethane foam and metamaterials, which can well meet the requirements for weight reduction and the invisibility. The reflective composite skin panel is a low-resistance carbon fiber reinforced composite, which prevents the electromagnetic waves from transmitting and also provides electrical boundary conditions for metamaterial. Simulation and test results indicate that the reflectivity of the radar absorbent material is less than  $-12$  dB in a range of 2–18 GHz. Because of the symmetrical structure design of the resistance film, the radar absorbent material is polarization-independent. We preliminarily produce a batch of radar absorbent materials and test their various performances. Such a radar absorbent material has a strong absorption and other properties such as light quality, high temperature resistance, low temperature resistance, humidity resistance and corrosion resistance. The radar absorbent material which has been widely used in the engineering field is easy to achieve the compatibility of absorption, mechanical properties and environmental performance. Compared with previous design method, the topology optimization design is simple in programming operation, good in generality, and short in design period. The radar absorbent materials owns strong application value.

**Keywords:** topology optimization, resistive metasurface, radar absorbing property, mechanical properties, environmental performance

**PACS:** 78.20.Ci, 81.05.Zx

**DOI:** 10.7498/aps.67.20181170

† Corresponding author. E-mail: [mmm725@126.com](mailto:mmm725@126.com)