



论文

蜂窝夹芯结构吸波性能的有限元计算分析

邱克鹏*, 吴晨, 张卫红

西北工业大学机电学院, 西安 710072

*联系人, E-mail: qiukp@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2013-03-19; 接受日期: 2013-06-17

国家自然科学基金(批准号: 11002112)、航空科学基金(编号: 2012ZA53011)和西北工业大学基础研究基金(编号: JC20110252)资助项目

摘要 针对周期性蜂窝夹芯结构型吸波材料的非均匀性, 提出采用频域有限元数值仿真和散射参数反演法计算不同构型蜂窝夹芯材料的雷达散射截面(RCS)和反射系数, 并探讨了周期性蜂窝夹芯结构中胞元的尺寸效应对结构型吸波材料隐身性能的影响. 计算结果表明: 对于具有相同体分比的构型蜂窝夹芯结构型吸波材料, 当胞元尺寸大于工作波长时, 夹芯材料的不均匀性导致 RCS 值变化幅度较大; 随着尺寸的缩减, RCS 值逐渐减小且变化趋于平缓. 但在不同入射方向具有明显的散射特性, 而且不同构型蜂窝夹芯结构的反射系数也表现出明显的尺寸效应. 研究结果为周期蜂窝夹芯结构型吸波材料的多功能设计提供了计算依据.

关键词 蜂窝夹芯, 结构型吸波材料, 尺寸效应, 隐身性能, 频域有限元法

PACS: 02.70.-c, 11.55.Bq, 13.40.-f, 41.90.+e

doi: 10.1360/132013-126

外形隐身和材料隐身是航空装备隐身技术的两种最基本的方法. 一方面, 减少目标在雷达波照射下所产生的回波强度, 缩减目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS); 另一方面, 需要降低入射电磁波在材料介质表面的反射系数(R-Reflective Index), 使电磁波最大程度地进入材料内部而被损耗吸收. 蜂窝夹层结构是一种典型的多功能结构型吸波材料, 其最外层具有良好的透波性能, 而底层为全反射层, 中间蜂窝夹芯层经过多功能优化设计后可同时具有吸波、承载、散热等性能, 并能有效减轻整体结构重量, 已成为近年来材料、结构跨学科领域的一个研究热点, 广泛用于航空航天飞行器的机身、机翼、天线

罩等部件^[1-3]. 针对蜂窝夹芯结构型吸波材料方面的研究, 从等效电磁性能的预测^[4,5]、吸波性能的分析^[6-9]和周期性蜂窝夹芯的设计^[6-9]等方面取得了显著的研究成果, 并指出了周期性蜂窝结构的构型、尺寸以及吸波材料属性等因素都影响着周期性蜂窝夹芯结构的吸波性能. Johansson 等人^[10]指出在满足周期性结构尺寸小于一个波长的条件下, 采用基于渐进展开的均匀化方法能够精确预测其等效介电常数, 但均匀化方法是基于宏微观多尺度渐进展开技术, 适用于平均场求解, 不能反应出周期性结构的尺寸效应. 另外, Smith^[11]指出蜂窝材料的非均匀尺寸趋于 $\lambda/2\pi$ (λ 为等效介质内入射电磁波的波长)时, 将导致高频范

引用格式: 邱克鹏, 吴晨, 张卫红. 蜂窝夹芯结构吸波性能的有限元计算分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1057–1064

Qiu K P, Wu C, Zhang W H. Numerical analysis of absorbing property for structural absorbing material (SAM) with honeycomb cores (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1057–1064, doi: 10.1360/132013-126

围内蜂窝结构的等效介电常数计算失效, 从而影响 RCS 和反射系数的计算分析结果。

在结构尺寸不变而胞体大小不同时, 材料空间分布的变化导致相同边界条件下不同的表征性能及响应, 这一现象被称之为尺寸效应, Dai 等人^[12]和 Qiu 等人^[13]分别研究了周期性蜂窝夹芯结构的尺寸效应对其等效弹性性能及宏观力学响应的影响机理。根据电磁波的入射特性, 蜂窝材料的隐身性能更是取决于蜂窝夹芯胞元的结构形状和尺寸大小, 基于此问题, 本文探讨了尺寸效应对不同构型周期性蜂窝夹芯结构吸波材料隐身性能的影响。

1 计算方法及分析模型

利用有限元方法计算分析电磁场问题, 实际上是近似求解给定边界条件下微分形式的麦克斯韦方程组。根据电磁学中介质本构关系, 可由麦克斯韦方程组推导出矢量波动方程^[14]。

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \mathbf{J}. \quad (1)$$

式中 ε_r 和 μ_r 分别是介质的相对介电常数和相对磁导率。对于非均匀介质, 它们是位置的标量函数。 μ_0 是真空中磁导率; k_0 是真空中波数; ω 是工作角频率; $\mathbf{J}$ 是激励电流密度。

周期性蜂窝夹芯结构是由单胞周期性重复形成, 在计算其隐身性能时, 建立单胞分析模型, 并施加周期性边界条件以仿真夹芯结构。利用三维电磁仿真平台 CST MICROWAVE STUDIO 中频域有限元法, 对单胞施加 PEC (Perfect Electric Conductor) 和 PMC (Perfect Magnetic Conductor) 条件进行建模, 选用的是六面体单元, 每波长划分的点数为 10, 结构线度上最小网格点数为 10, 最大网格与最小网格之比限制为 10, 自适应生成网格, 然后使用波导激励完成仿真实验。

在采用周期性蜂窝夹芯结构作为吸波材料时, 因考虑其综合性能而往往需要选取不同构型的蜂窝夹芯,

为此在满足具有相同材料用量的条件下, 分析比较不同构型(正六边形、正方形、圆形)介质蜂窝的隐身性能, 单胞基本尺寸如图 1 所示。

电磁波入射至蜂窝夹层介质时, 涉及介质的电磁性能、材料厚度及入射频率。在分析模型中选定蜂窝夹芯材料为铝, 其相对介电常数为 8.6, 相对磁导率为 1.0, 入射波频率范围为 2–12 GHz(相应波长范围是 150–25 mm), 并假设介质蜂窝夹芯具有相同的厚度 $t=5$ mm。

2 雷达散射截面

当物体被电磁波照射时, 其能量朝各个方向散射, 散射的空间分布一般采用散射截面来表征, 能量的空间分布依赖于物体的形状、大小、结构以及入射波的频率和特性。雷达散射截面是雷达隐身技术中最关键的参数指标, 表征了目标在雷达波照射下所产生回波强度的一种物理量, 是目标远场特性, 其定义是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念。

假设目标等效成为点散射体, 雷达散射截面定义为^[15]

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{H}_s|^2}{|\mathbf{H}_i|^2}. \quad (2)$$

式中, $\mathbf{E}_i$ 和 $\mathbf{H}_i$ 分别是入射电场和磁场的强度, $\mathbf{E}_s$ 和 $\mathbf{H}_s$ 分别是散射电场和磁场的强度, R 为远场距离, 满足远场条件 $R = kD^2 / \lambda$, 一般 $k \geq 2$, D 取目标尺寸。在实际 RCS 测量中, 常以金属球为定标体, 在球的周长大于 10 倍波长的光学区, 金属球的 RCS 等于球的投影面积。本工作中选用的目标最大尺寸为 108 mm(正六边形蜂窝夹芯最大外形尺寸), 入射波最小波长为 25 mm, 取 $k=2$, 求得远场距离 0.933 m, 而设定的参考距离为 1 m, 在计算频段范围内满足远场条件, 与实际测量要求相近。

因为雷达散射截面随角度变化很大, 把数据表示成对数形式。常用的对数单位是分贝, RCS 值通常以

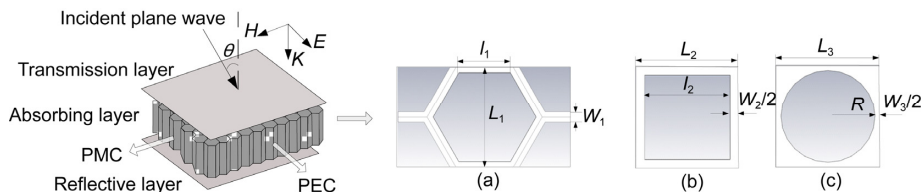


图 1 含不同蜂窝单胞构型的吸波结构示意图
Figure 1 Absorbing structures with different unit cells.

dBsm 为单位, 其意义为平方米的分贝数, 即

$$RCS=10\log_{10}(\sigma).$$
 (3)

式中σ是以平方米为单位.

由上式可知, 采用目标散射电磁波的能力来描述目标的有效散射面积, 从而衡量雷达探测目标的可见度, 单位常用分贝(dB)表示, 其大小主要取决于目标的参数(如目标的形状、尺寸及表面电性能)和雷达参数(如一次场的极化形式、波长等)以及目标的视角.

以下工作针对不同构型的周期性蜂窝夹芯结构型吸波材料, 分析蜂窝夹芯单胞尺寸、平面入射波频率及入射角度对其 RCS 值的影响.

2.1 不同构型蜂窝夹芯 RCS 值尺寸效应分析

在分析周期性蜂窝夹芯结构型吸波材料 RCS 值的尺寸效应时, 采用图 1 所示的分析模型, 正六边形蜂窝

单胞体积 $V_1 = \sqrt{3}W_1(2L_1 - W_1)t$, 其中 $L_1 = \sqrt{3}l_1 + W_1$; 正方形蜂窝单胞体积 $V_2 = (L_2^2 - (L_2 - W_2)^2)t$; 圆形蜂窝单胞体积 $V_3 = (L_3^2 - \pi(L_3 - W_3)^2/4)t$. 为了保证三种构型分析结果具有可比性, 在满足体积相同($V_1=V_2=V_3$)的条件下, 假定 $W_1/l_1 = W_2/l_2 = W_3/R=0.2$, 可得三种不同蜂窝单胞构型不同尺度下的尺寸参数, 如表 1 所示. 通常, 当蜂窝材料结构单元电尺寸接近于 1/4 个工作波长时, 由于蜂窝材料不均匀而影响 RCS 值的大小.

确定单胞构型后, 保持周期性蜂窝夹芯结构尺寸一定和相同的材料用量, 通过缩放体胞尺寸, 建立一系列包含不同数目体胞的周期蜂窝夹芯材料结构模型, 经数值模拟计算分析蜂窝夹芯材料结构 RCS 值. 图 2 所示单胞个数分别为 1×1, 2×2, 4×4, 8×8 时不同构型的周期性蜂窝夹芯材料结构 RCS 值变化趋势.

表 1 蜂窝夹芯胞元尺寸与入射波长的关系

Table 1 Relationship between sizes of different unit cells and incident wave length

单胞个数	1×1	2×2	4×4	8×8
单胞尺寸范围	$L_i>\lambda_i/4$ $f_1=2\text{ GHz}$ $\lambda_1=150\text{ mm}$	$L_i\approx\lambda_i/4$ $f_1=2\text{ GHz}$ $\lambda_1=150\text{ mm}$	$\lambda_1/4>L_i>\lambda_2/4$ $f_1=2\text{ GHz}$ $\lambda_1=150\text{ mm}$ $f_2=12\text{ GHz}$ $\lambda_2=25\text{ mm}$	$L_i\approx\lambda_2/4$ $f_2=12\text{ GHz}$ $\lambda_2=25\text{ mm}$
单胞尺寸	$L_1=57.96\text{ mm}$ $L_2=61.14\text{ mm}$ $L_3=57.024\text{ mm}$	$L_1=28.98\text{ mm}$ $L_2=30.57\text{ mm}$ $L_3=28.512\text{ mm}$	$L_1=14.49\text{ mm}$ $L_2=15.285\text{ mm}$ $L_3=14.256\text{ mm}$	$L_1=7.245\text{ mm}$ $L_2=7.6425\text{ mm}$ $L_3=7.128\text{ mm}$
体分比		$n_1=19.63\%; n_2=30.56\%; n_3=35.09\%$		

注: $i=1, 2, 3$ (1-正六边形单胞, 2-正方形单胞, 3-圆形单胞)

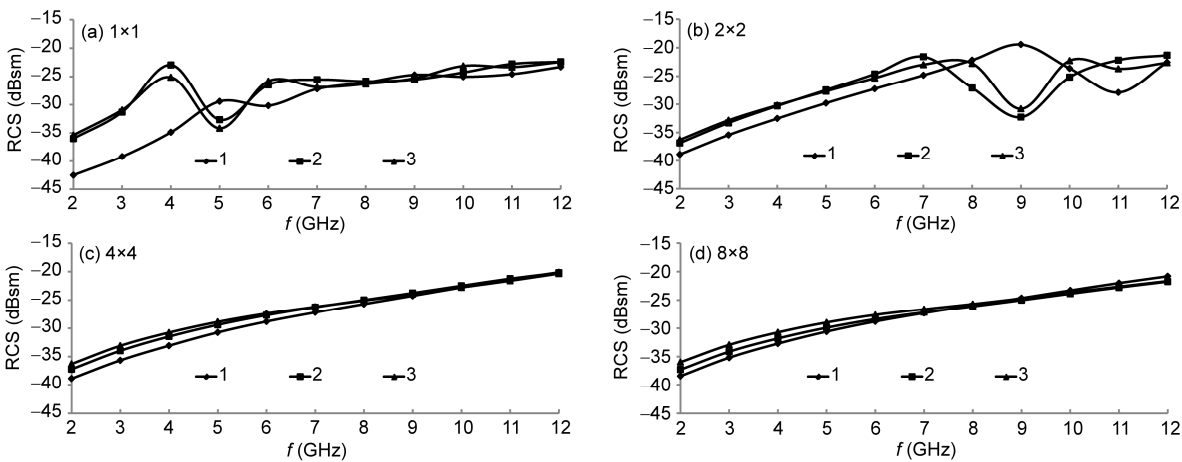


图 2 不同尺寸下不同构型蜂窝夹芯 RCS 值比较
Figure 2 RCS of different unit cells with different sizes.

由图 2 可知, 在单胞个数为 1×1 时, 胞元尺寸大于频段范围内 $1/4$ 个最大工作波长, 由于材料结构的不均匀性导致不同构型的蜂窝夹芯 RCS 值起伏变化较大, 且 RCS 值相互之间差别也较大; 随着单胞尺度的缩减 (2×2), 胞元尺寸接近于低频段的 $1/4$ 个工作波长, 在低频段区 ($2 \sim 7$ GHz), RCS 值随着频率增大而平缓增大, 且正六边形蜂窝夹芯材料结构的 RCS 小于其他两种构型; 当单胞尺度缩减至 4×4 时, 胞元尺寸介于低频段和高频段 $1/4$ 个工作波长之间, 不同构型的蜂窝夹芯 RCS 值在分析频率范围内变化趋于平缓, 在高频段处趋于相同, 并且正六边形蜂窝夹芯的 RCS 值相对较小; 随着单胞尺度进一步缩减 (8×8), 胞元尺寸接近于高频段 $1/4$ 个工作波长, 不同构型蜂窝夹芯结构趋于均匀材料, 其 RCS 差值更小; 并比较可知, 随着单胞尺度的减小, 蜂窝夹芯结构的体分比对 RCS 值影响甚微. 计算结果表明, 以 RCS 值表征的蜂窝夹芯结构的吸波性能取决

于单胞构型的形状、大小及入射波频率, 当蜂窝单胞尺寸相对入射波波长越来越小时, 夹芯构型对 RCS 值的影响逐渐减小.

2.2 不同边长正六边形蜂窝夹芯 RCS 值分析比较

上述工作是假设蜂窝结构电尺寸在工作频段波长范围内, 并保持不变, 通过缩放胞元尺寸, 分析不同构型 RCS 的变化趋势. 以下仅针对正六边形蜂窝构型, 通过选取胞体的不同尺寸并进行缩放, 分析其对 RCS 值的影响.

在计算频段范围 ($2 \sim 12$ GHz) 内最大工作波长为 $\lambda = 150$ mm, 假定正六边形蜂窝夹芯胞体边长 l 分别等于 $\lambda, \lambda/2, \lambda/4, \lambda/8$, 其单胞结构电尺寸为 $L_1 = \sqrt{3}l + W_1$, 具体尺寸与入射波长关系如表 2 所示. 不同尺寸正六边形蜂窝夹芯 RCS 值计算结果比较如图 3 所示.

由图 3 可知, 在单胞个数为 1×1 时, 胞元边长为

表 2 正六边形蜂窝夹芯胞元尺寸与入射波长的关系

Table 2 Relationship between sizes of hexagonal unit cells and incident wave length

单胞个数	1×1	2×2	4×4	8×8
$l = \lambda$	$L_1 = 289.8$ mm $L_1 > \lambda/4$	$L_1 = 144.9$ mm $L_1 > \lambda/4$	$L_1 = 72.45$ mm $L_1 > \lambda/4$	$L_1 = 36.225$ mm $L_1 \approx \lambda/4$
$l = \lambda/2$	$L_1 = 144.9$ mm $L_1 > \lambda/4$	$L_1 = 72.45$ mm $L_1 > \lambda/4$	$L_1 = 36.225$ mm $L_1 \approx \lambda/4$	$L_1 = 18.1125$ mm $L_1 < \lambda/4$
$l = \lambda/4$	$L_1 = 72.45$ mm $L_1 > \lambda/4$	$L_1 = 36.225$ mm $L_1 \approx \lambda/4$	$L_1 = 18.1125$ mm $L_1 < \lambda/4$	$L_1 = 9.056$ mm $L_1 < \lambda/4$
$l = \lambda/8$	$L_1 = 36.225$ mm $L_1 \approx \lambda/4$	$L_1 = 18.1125$ mm $L_1 < \lambda/4$	$L_1 = 9.056$ mm $L_1 < \lambda/4$	$L_1 = 4.528$ mm $L_1 < \lambda/4$

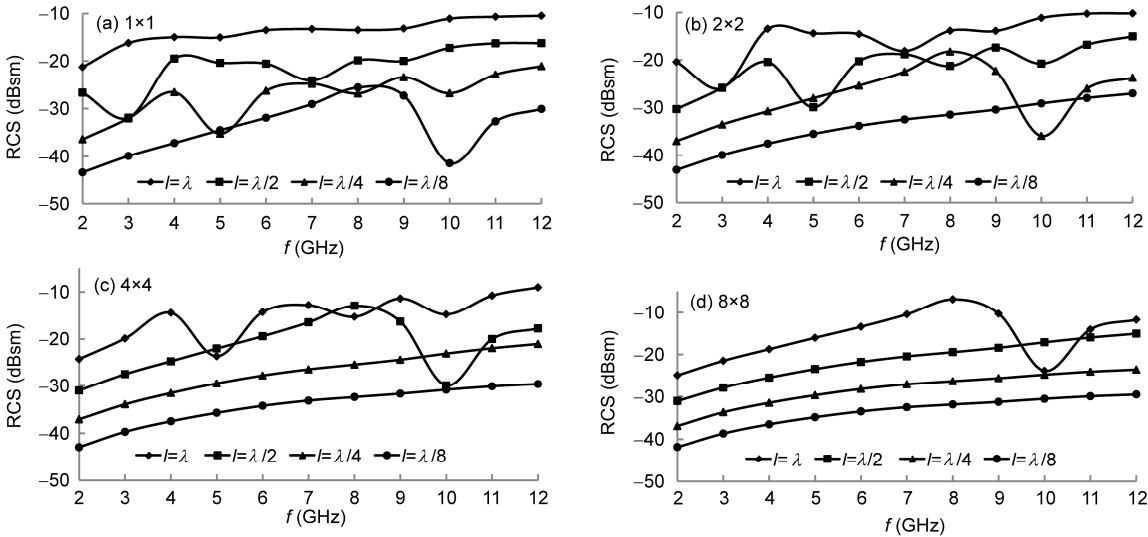


图 3 不同边长正六边形蜂窝夹芯 RCS 值比较

Figure 3 RCS of hexagonal unit cells with given sizes relative to incident wave length.

$\lambda/8$ 时, 其电尺寸为 32.475 mm, 接近于低频端 $1/4$ 个工作波长, RCS 值在低频段范围内(2–8 GHz)随着频率增大而逐渐增大; 同样随着单胞个数的增加, 胞元电尺寸相应为 32.475 mm 时, RCS 值具有相同的变化趋势, 且都在工作频率点 $f=10$ GHz(相应波长为 30 mm)附近出现谐振现象; 另外由图 3(d)所示, 当胞元电尺寸小于低频端 $1/4$ 个工作波长时, RCS 值随着频率的增大而单调增大, 同时也看出, 蜂窝夹芯材料结构的 RCS 值随着胞元的尺寸增大而增大。

2.3 入射角对正六边形蜂窝夹芯 RCS 值的影响

由以上分析可知, 在不同的频率点, RCS 值变化较大, 此处选择三个不同频率点分析平面波入射角对周期性正六边形蜂窝夹芯结构 RCS 值的影响, 分析模型同 2.1。

所选三个频率点对应的 $1/4$ 个波长分别为 15 mm, 9.375 mm, 6.82 mm, 由图 4 可知, 在单胞个数为 1×1 和 2×2 时, 其胞元尺寸均大于三个频率点对应的 $1/4$ 个波长, 在不同的入射方向 RCS 起伏变化较大; 在单胞个数为 4×4 时, 胞元尺寸近似于频率点 5 GHz 对应的 $1/4$ 个工作波长, 在入射角接近于 90° 时, RCS 值下降幅度最大。随着单胞个数进一步增大, 胞元尺寸缩减, 蜂窝夹芯结构趋于均匀, RCS 值在入射角小于 60° 时变化范围较小, 且在相同的入射方向, 频率越高, 对应的 RCS 值越大。

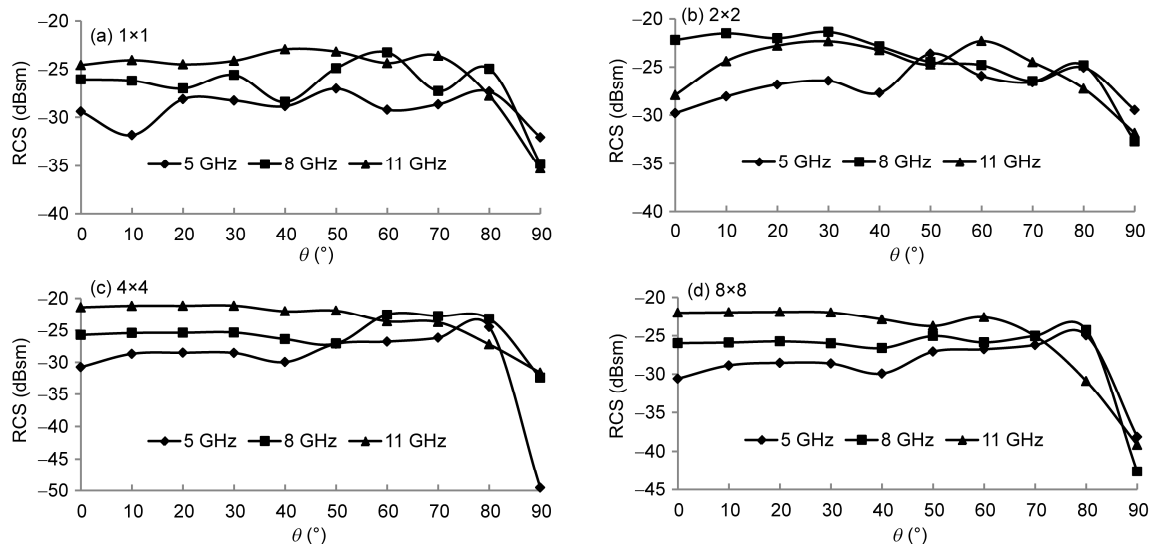


图 4 不同频率点处正六边形蜂窝夹芯 RCS 与入射角关系
Figure 4 RCS of hexagonal unit cells with different incident angles in different frequency values.

3 反射系数

反射系数作为衡量目标隐身性能的另一个重要参数指标, 主要依赖于吸波材料的介电性能等因素, 要使被探测目标不被雷达波发现, 必须最大限度地降低被照射物体的雷达波反射系数, 同时也缩减了目标表面的 RCS 值。本工作考虑周期性蜂窝夹芯尺寸效应对等效介电性能的影响, 分析不同蜂窝夹芯结构型及尺寸效应对其反射系数的影响。

仿真实验表明, 周期性正六边形、正方形和圆形蜂窝夹芯材料结构对应的散射参数矩阵 S 具有对称性, 即 $S_{11}=S_{22}$, $S_{12}=S_{21}$, 满足有效介质理论要求, 因此可采用散射参数反演法 (S-Scattering Parameter Retrieval Method) 计算其反射系数^[16]。

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

式中 z 表示介质板的波阻抗。

对于自由空间中的结构吸波材料, 其反射系数 R 与归一化阻抗 z_r 关系为

$$R = \frac{z_r - z_0}{z_r + z_0}. \quad (5)$$

式中 $z_r = z/z_0$, z_0 为自由空间阻抗; $z_r = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r}$, μ_r 为吸波材料的磁导率; ϵ_r 为吸波材料的介电常数。

反射系数的 dB 表示形式为

$$R_L(\text{dB}) = 20 \log |R|. \tag{6}$$

理想情况下要使反射系数为零, 则要求 z_0 和 z 匹配 ($z_r=1$), 即 μ_r 和 ε_r 相等. 实际上, 阻抗匹配是使吸波材料表面介质的特性尽量接近于空气的性质, 因此, 周期性蜂窝夹芯结构型吸波材料中胞元构型和尺寸直接影响阻抗匹配或波的吸收.

3.1 正六边形蜂窝夹芯尺寸效应分析

采用图 1 所示分析模型, 取周期性蜂窝夹芯结构尺寸为低频端 1/4 个工作波长(37.5 mm), 然后对其进行缩放后计算得到不同尺寸下的反射系数, 如图 5 所示.

由图 5 及表 3 可知, 在低频段范围(2–4 GHz)内, 当夹芯胞元尺寸(2×2, 4×4, 8×8)小于入射波 1/4 波长时, 反射系数受胞元尺寸的影响较小且基本相等; 随着频率的增大, 当胞元尺寸(1×1, 2×2)大于入射波 1/4 波长时, 反射系数起伏变化越大; 随着胞元个数增加, 蜂窝夹芯结构材料分布逐渐均匀, 反射系数变化趋于相同; 并且吸收谐振峰呈周期性变化, 周期频带宽为 1.8 GHz, 周期频带范围内相对波长值逐渐减小.

3.2 不同构型反射系数比较

由 3.1 节分析可知, 当蜂窝夹芯胞元尺寸缩减 8 倍后, 反射系数变化趋于稳定, 在此尺度下分析比较正六边形、正方形和圆形蜂窝夹芯结构材料的反射系数, 如图 6 所示, 其中正六边形胞元尺寸 $L_1=4.6875$ mm, 正方形胞元尺寸 $L_2=4.945$ mm, 圆形蜂窝胞元尺寸 $L_3=4.615$ mm.

由图 6 可知, 在不同的频段范围内, 蜂窝夹芯胞元构型也影响反射系数大小, 圆形蜂窝夹芯材料的反射系数最大, 正方形次之, 正六边形最小, 但其谐振峰呈相同周期性变化. 同时表明, 在相同尺度下, 蜂窝夹芯胞元尺寸小于 1/4 个工作波长, 材料用量相等时, 不同构型蜂窝的反射系数在具有相同周期性频带宽范围内变化, 且变化趋势相同, 因此可以利用均化方法分析研究蜂窝夹芯结构的吸波性能.

4 结论

针对不同构型(正六边形、正方形、圆形)蜂窝夹芯结构型吸波材料, 在相同体分比条件下, 当胞元尺

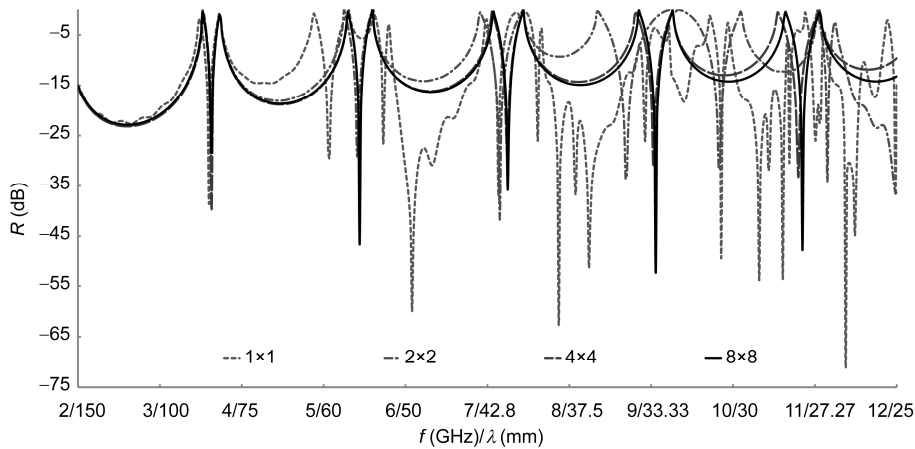


图 5 不同尺寸下正六边形蜂窝夹芯结构反射系数

Figure 5 Reflection coefficient of hexagonal unit cells with different sizes.

表 3 正六边形蜂窝夹芯胞元尺寸与谐振峰频率点及对应波长

Table 3 Sizes of hexagonal unit cells and wave length for resonant frequency

单胞个数	1×1	2×2	4×4	8×8	
单胞尺寸	37.5 mm	18.75 mm	9.375 mm	4.6875 mm	
谐振峰频率	3.6 GHz	5.4 GHz	7.2 GHz	9 GHz	10.8 GHz
谐振峰频率点对应波长	83.33 mm	55.55	41.67	33.33	27.78
谐振峰频率点对应 1/4 波长	20.83 mm	13.89 mm	10.42 mm	8.33 mm	6.95 mm

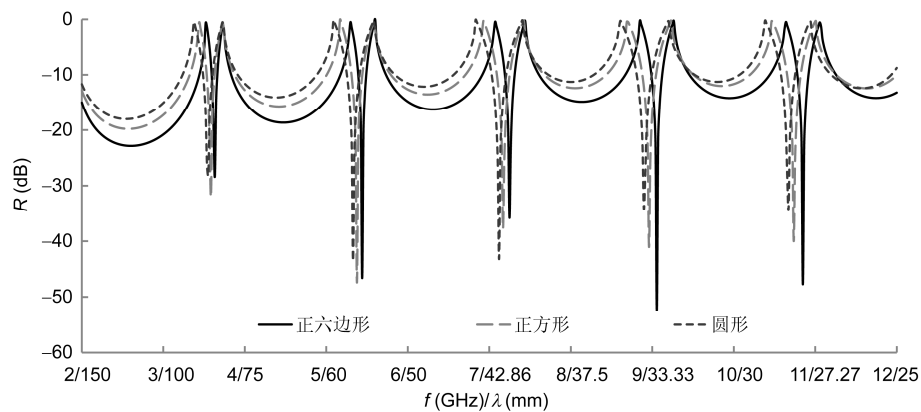


图 6 不同构型单胞的反射系数
Figure 6 Reflection coefficient of different unit cells.

寸大于 $1/4$ 个工作波长时, 由于夹芯材料的不均匀性使得 RCS 值变化幅度较大; 在胞元尺寸接近于或小于 $1/4$ 个工作波长时, RCS 值变化较缓且趋势明显, 胞元尺寸越小, RCS 值也越小; 在胞元尺寸等于工作波长的频率点处将产生谐振现象. 平面波入射角是影响蜂窝夹芯结构型吸波材料 RCS 值的另一个重要因素, 同样也受到夹芯胞元尺寸的影响, 胞元尺寸较大时, 相对孔洞尺寸较大, 在不同的平面波入射方向, RCS 值起伏变化较大; 随着胞元尺寸的缩减, 在入射角小于 60° 时, RCS 值变化范围小; 当入射角接近于 90° 时, RCS 值急剧下降, 表现出明显的散射特性. 另外, 周期性蜂窝夹芯结构的胞元尺寸也直接影响反

射系数的大小及变化趋势, 当胞元尺寸缩小时, 反射系数变化趋于平缓, 但在特定的频率范围内, 胞元尺寸较大时反射系数相对较低; 同时在相同尺寸下, 胞元构型也直接影响反射系数的大小.

总之, 在进行蜂窝夹芯结构型吸波材料的隐身性能分析以及结构-隐身性能综合设计时, 为满足性能要求选取不同构型, 并设计其形状与尺寸, 同时还必须综合考虑胞元尺寸对其结构和隐身性能的影响; 另外也验证了在对周期性材料和结构的电磁性能分析时必须保证胞元电尺寸小于 $1/4$ 个工作波长, 以避免由于材料的不均匀而带来的一系列问题, 如各向异性以及交界面处散射增加等.

参考文献

- 1 邢丽英, 等. 隐身材料. 北京: 化学工业出版社, 2004
- 2 Smith F C, Scarpa F, Bumesci G. Simultaneous optimization of the electromagnetic and mechanical properties of honeycomb materials. Proc SPIE 2002, 4701: 582–591
- 3 Seepersad C C, Dempsey B M, Allen J K, et al. Design of multifunctional honeycomb materials. AIAA J, 2004, 42(5): 1025–1033
- 4 Zhao B L. The calculation of effective electromagnetic parameters of honeycomb radar absorbing structural materials (in Chinese). Acta Aeronaut Et Astronaut Sin, 1992, 13(11): 662–669 [赵伯琳. 蜂窝结构吸波材料等效电磁参数的计算. 航空学报, 1992, 13(11): 662–669]
- 5 He Y F, Gong R Z, Wang X, et al. Study on equivalent electromagnetic parameters and absorbing properties of honeycomb-structured absorbing materials (in Chinese). Acta Phys Sin, 2008, 57(8): 5261–5266 [何燕飞, 龚荣洲, 王鲜, 等. 蜂窝结构吸波材料等效电磁参数和吸波特性研究. 物理学报, 2008, 57(8): 5261–5266]
- 6 Chen M J, Pei Y M, Fang D N. Multi-objective optimization design of radar absorbing sandwich structure (in Chinese). Appl Math Mech, 2010, 31(3): 315–323 [陈明继, 裴永茂, 方岱宁. 夹芯型雷达吸波结构的多目标优化. 应用数学和力学, 2010, 31(3): 315–323]
- 7 Jiang S C, Xing L Y, Li B T, et al. Study on wave-absorbing properties advanced stiffened grid structure (in Chinese). J Aeronaut Mater, 2006, 26(3): 196–198 [蒋诗才, 邢丽英, 李斌太, 等. 格栅结构吸波性能探索研究. 航空材料学报, 2006, 26(3): 196–198]
- 8 Chen M J, Pei Y M, Fang D N. Computational method for radar absorbing composite lattice grids. Comput Mater Sci, 2009, 46: 591–594
- 9 Chen H F, Liu H T, Chu Z Y, et al. Design and reflectivity analysis of a kind of radar absorbing materials with periodical structures (in

- Chinese). *J Aeronaut Mater*, 2006, 26(4): 80–83 [程海峰, 刘海韬, 楚增勇, 等. 一类周期结构雷达吸波材料的设计与吸波性能研究. *航空材料学报*, 2006, 26(4): 80–83]
- 10 Johansson M, Holloway C L, Kuester E F. Effective electromagnetic properties of honeycomb composites, and hollow-pyramidal and alternating-wedge absorbers. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2005, 53(2): 728–736
- 11 Smith F C. Effective permittivity of dielectric honeycombs. *IEEE Proc-Microw. Antennas Propag*, 1999, 146(1): 55–59
- 12 Dai G M, Zhang W H. Cell size effect analysis of the effective Young's modulus of sandwich core. *Comput Mater Sci*, 2009, 46(3): 744–748
- 13 Qiu K P, Zhang W H, Zhu J H. Bending and dynamic analyses of sandwich panels considering the size effect of sandwich core. *Inter J Simul Mul Design Opt*, 2009, 3: 370–383
- 14 Jin J M. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. New York: Wiley, 2002
- 15 Knott E F et al. 雷达散射截面——预估、测量和减缩. 阮颖铮, 陈海, 等译. 北京: 电子工业出版社, 1988
- 16 Smith D R, Vier D C, Koschny Th, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. *Phys Rev E*, 2005, 71(3): 1–11

Numerical analysis of absorbing property for structural absorbing material (SAM) with honeycomb cores

QIU KePeng*, WU Chen & ZHANG WeiHong

School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

In order to explore the effects of inhomogeneity of structural absorbing material (SAM) with periodic sandwich cores on its stealthy property, the frequency-domain finite element numerical computation and the retrieval technique are adopted to evaluate the radar cross section (RCS) and the reflective index of honeycomb cores. And then we compare the RCS and the reflective index of honeycomb cores with the different configurations. The size effect of periodic honeycomb unit cells on the stealthy property is pointed out. To simulate the periodic boundary conditions, the PEC (Perfect Electric Conductor) and PMC (Perfect Magnetic Conductor) are imposed on the unit cells in the different periodic dielectric honeycombs. Moreover, the radar cross section is defined by the ratio of scattering power density and incident wave power density. The reflective index is obtained by the scattering parameter retrieval method. On this basis, the stealth property for structural absorbing material with honeycomb cores is evaluated. Numerical results show that the configuration and size of honeycomb unit cells have the obvious influences on the RCS and reflective index. When there is much difference between the size of honeycomb unit cells and incident wave length, the inhomogeneity of sandwich cores results into the great variation of RCS values. With the size reduction, the RCS values have the gradual variation. However the obvious scattering property appears in the different incident directions. The research provides the basis for the analysis of the multifunctional design and application of structural absorbing material with honeycomb cores.

honeycomb core, structural absorbing material, size effect, stealthy property, frequency-domain finite element method

PACS: 02.70.-c, 11.55.Bq, 13.40.-f, 41.90.+e

doi: 10.1360/132013-126