

电磁吸波超结构各向异性对雷达散射截面的影响机制*

安庆¹⁾ 廖文和^{1)†} 李大伟¹⁾ 刘婷婷¹⁾ 李炜坪¹⁾ 张森²⁾ 赵俊明²⁾

1) (南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

2) (南京大学电子科学与工程学院, 南京 210023)

(2025年9月3日收到; 2025年10月7日收到修改稿)

为揭示电磁吸波超结构的各向异性与其宏观部件雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 的内在关系, 本文系统研究了典型的各向异性六边形蜂窝 (hexagonal honeycomb, HH) 超结构与各向同性面状 Gyroid (sheet gyroid, SG) 超结构在低雷达散射部件设计中的应用. 通过采用保角映射和非保角映射设计电磁吸波超结构曲面部件, 并结合仿真计算与微波暗室测试, 对比了不同方法设计的曲面部件 RCS. 结果表明, 各向同性面状 Gyroid 曲面部件, 其 RCS 对设计方法不敏感, 展现较强吸波能力鲁棒性; 而各向异性六边形蜂窝曲面部件, 其 RCS 对设计方法表现出强烈的依赖性. 与各向异性结构相比, 具备电磁各向同性的超结构在实现曲面部件广角、稳健的低散射特性方面更具优势, 其性能对设计和加工的依赖性更低, 为开发高性能雷达吸波部件提供了重要的设计依据.

关键词: 电磁吸波超结构, 电磁各向异性, 共形设计, 增材制造**DOI:** 10.7498/aps.75.20251200**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251200

1 引言

电磁吸波超结构是一种轻质、承载、宽频吸波于一体的多功能吸波体, 在工程领域有着广泛的应用^[1-6], 例如飞机机翼前缘、微波暗室屏蔽墙面等. 电磁吸波超结构具有多种制备工艺加工方法^[7-9], 典型的工艺包括基于挤塑或压合工艺制备的复合材料型吸波结构^[10-12]、基于表面浸渍或溅射工艺制备的涂敷型吸波结构^[13-16]. 电磁吸波超结构的入射角敏感特性与超结构单元几何构型密切相关^[17], 例如, 六边形蜂窝 (hexagonal honeycomb, HH) 超结构的电磁特性呈现显著的各向异性, 不同入射角条件下电磁吸波能力不同, 因此, 基于六边形蜂窝超结构制备的共形曲面部件, 其雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 在不同方向上具有显著的方向特性.

为实现宏观结构宽角域低雷达散射截面, 各向来波的电磁损耗能力一致性是实现该目标的关键, 其核心问题在于探究电磁吸波超结构的各向同性与其宏观部件雷达散射截面的内在关联. 针对六边形蜂窝超结构的电磁各向异性已有相关研究^[18-20], 例如, Choi 和 Kim^[18] 对比了六边形蜂窝超结构横向与轴向的电磁吸收率差异, 通过玻璃/环氧树脂和多壁碳纳米管涂料浸渍制备了六边形蜂窝超结构, 测试结果表明六边形蜂窝超结构轴向比切向的吸收率更优. 何燕飞等^[19] 根据强扰动理论, 分析了六边形蜂窝超结构的各向异性等效电磁规律, 等效介电常数和等效磁导率随吸收层厚度的增加而增加, 优化等效介电常数和等效磁导率使其更接近, 指导了蜂窝超结构阻抗匹配设计. 此外, Yao 等^[20] 研究了面状 Gyroid (sheet gyroid, SG) 超结构在不同立方体晶格方向上的电磁吸收特性差异, 并通过实验验证, 研究结果表明 SG 超结构在三个

* 江苏省基础研究计划重点项目 (批准号: BK20243009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cnwho@njust.edu.cn

晶格方向上具有优异的电磁各向同性.

为提高低雷达散射部件的设计鲁棒性, 本文探究了组成电磁吸波超结构单元电磁各向异性与宏观部件雷达散射截面之间的关联规律, 明确了低雷达散射部件合适的电磁吸波超结构类型. 首先, 选择电磁各向异性 HH 超结构和各向同性 SG 超结构作为研究对象, 通过电磁仿真软件对比三个主轴方向的电磁吸波能力, 明确超结构单元的电磁吸收率各向异性. 进一步, 采用保角映射和非保角映射设计方法对 HH 超结构和 SG 超结构曲面部件填充设计, 并对曲面部件进行数值分析和制造测试, 分析不同部件的雷达散射截面. 结果表明, 各向同性电磁吸波超结构在设计与加工中均能够保证各来波方向稳定的电磁吸波特性和较强吸波能力鲁棒性, 对提高全向低雷达散射截面的部件设计鲁棒性具有重要的指导意义.

2 超结构单元设计与部件设计

2.1 超结构单元设计

本研究选择典型的 HH 和 SG 电磁吸波超结构开展研究. 图 1(a) 和图 1(b) 分别为两种电磁吸波超结构单元的几何特征和结构组成, 其中超结构由表面损耗材料和基体结构两部分组成. HH 超结构单元的长宽高为 $l = 17.4 \text{ mm}$, $w = 10 \text{ mm}$ 和 $h = 15 \text{ mm}$, SG 超结构单元的长宽高为 $l = w = h = 15 \text{ mm}$, 两种超结构单元的体积分数均选择 $\rho = 0.1$. 采用隐式建模方法对 SG 超结构单元进行建模, 隐式方程如 (1) 式所示:

$$\text{SG} = U^2 - C^2, \quad (1)$$

式中, C 和 U 分别代表等值面偏置系数和等值面参数项, 分别为 (2) 式和 (3) 式:

$$C = (\rho + 0.0149) / 0.6816, \quad (2)$$

$$U = \cos\left(2\pi\frac{x}{l}\right) \sin\left(2\pi\frac{y}{l}\right) + \cos\left(2\pi\frac{y}{l}\right) \sin\left(2\pi\frac{z}{l}\right) + \cos\left(2\pi\frac{z}{l}\right) \sin\left(2\pi\frac{x}{l}\right). \quad (3)$$

(2) 式代表了体积分数 ρ 与等值面偏置系数 C 的关系, SG 超结构单元的壁厚与超结构单元体积分数呈正相关, (3) 式决定 SG 超结构单元的尺寸, 式中 l 为超结构单元尺寸, 超结构设计域长宽高分

别为 x , y , z . 因此, x/l , y/l , z/l 分别代表三个正交方向上的单元数量.

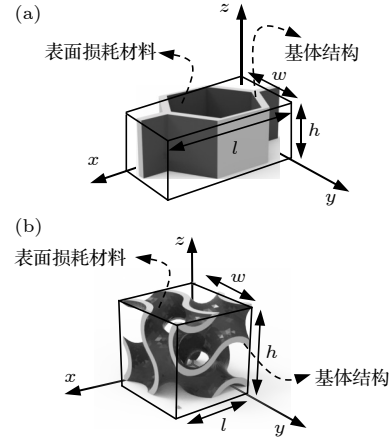


图 1 (a) 六边形蜂窝超结构单元; (b) 面状 Gyroid 超结构单元

Fig. 1. (a) Hexagonal honeycomb metastructure unit; (b) sheet gyroid metastructure unit.

2.2 超结构曲面部件设计方法

传统的电磁吸波超结构曲面部件设计采用非保角映射设计方法, 该方法所设计的曲面部件各个角度的超结构单元呈显著的各向异性. 曲面部件的单站雷达散射场宽角域性能一致性较差. 图 2(a) 为非保角映射设计方法. 在笛卡尔坐标系中, 沿着三个正交方向进行阵列得到超结构设计空间 Ω_1 , 将需要设计的曲面部件 Ω_2 置于超结构设计空间中, 采用布尔交运算 ($\Omega_1 \cap \Omega_2$) 得到非保角映射曲面部件. 非保角映射曲面部件中所有超结构单元的法向均为同一方向. 因此, 曲面部件各入射方向的雷达散射截面与超结构单元入射角敏感性密切相关.

与非保角映射方法相比, 保角映射方法能够有效保持填充曲面部件中单元结构的排列与曲面曲率分布的一致性, 如图 2(b) 所示, 该方法首先将曲面部件离散为六面体单元组成的有限元网格, 该网格的几何质量是决定映射是否保持共形性质的关键因素 [21]. 在此基础上, 用形函数 N_i 对曲面部件每个六面体单元进行描述, 对六面体单元的不同几何形态, 形函数具体可分为 4 种不同情况:

对于 ζ_i , η_i 和 ξ_i 均不为 0:

$$N_i = \frac{1}{8} (1 + \zeta_i \zeta) (1 + \eta_i \eta) (1 + \xi_i \xi) \times (\zeta_i \zeta + \eta_i \eta + \xi_i \xi - 2), \quad (4)$$

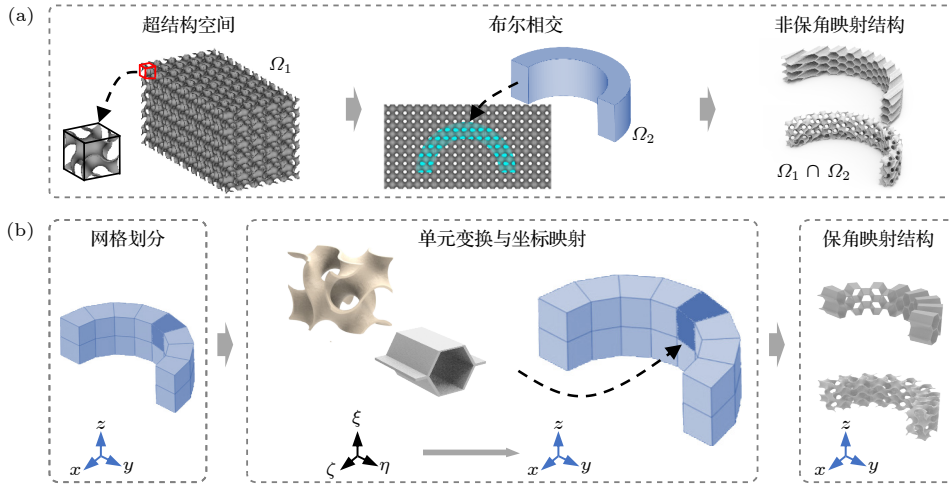


图 2 电磁吸波超结构曲面部件的设计方法 (a) 非保角映射和 (b) 保角映射方法

Fig. 2. Design method for electromagnetic absorbing metastructure curved component: (a) Non-conformal transformation method; (b) conformal transformation method.

对于 $\zeta_i = 0$:

$$N_i = \frac{1}{4} (1 - \zeta^2) (1 + \eta_i \eta) (1 + \xi_i \xi), \quad (5)$$

对于 $\eta_i = 0$:

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \zeta_i \zeta) (1 - \eta^2) (1 + \xi_i \xi), \quad (6)$$

对于 $\xi_i = 0$:

$$N_i = \frac{1}{4} (1 + \zeta_i \zeta) (1 + \eta_i \eta) (1 - \xi^2), \quad (7)$$

式中, ζ_i , η_i 和 ξ_i 是超结构单元中 8 个节点的局部坐标. 根据曲面部件每个六面体单元的形状, 将超结构单元进行几何变换. 根据 (8) 式的保角映射方法将超结构单元与六面体单元坐标位置进行映射, 得到曲面部件保角映射单元结构. 将所有结构依次进行填充最终得到保角映射曲面部件:

$$(x, y, z) \begin{cases} x = \sum_{i=1}^8 N_i x_i \\ y = \sum_{i=1}^8 N_i y_i \\ z = \sum_{i=1}^8 N_i z_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 8), \quad (8)$$

式中, x_i , y_i 和 z_i 是六面体在全局坐标系中的 8 个节点坐标.

3 超结构的电磁各向异性分析

3.1 电磁吸收率各向异性分析

为探究 HH 和 SG 电磁吸波超结构的电磁吸

收率各向异性, 按照图 4(a) 所示的仿真场景, 分析 HH 和 SG 电磁吸波超结构在三个正交方向上电磁入射下的吸波性能. 电磁吸波超结构的边界条件设置为“Unit cell”, $+z$ 方向的边界条件设置为“Open(add space)”, $-z$ 方向的边界条件设置为“Electric(Et = 0)”, 选择频域求解器求解, 激励源选择高斯激励. 为保证 HH 和 SG 超结构在电磁波入射方向的厚度一致, 二者厚度统一设定为 $h = 15$ mm. 超结构的基体结构材料为 ABS 材料, 其介电常数为 2.96 且损耗角正切为 0.03, 通过电磁参数拟合, 获得 2—18 GHz 范围内的材料介电常数色散值; 此外, ABS 材料磁导率设置为实部取 1 虚部取 0. 表面损耗材料呈现电阻特性, 因此表面损耗材料设置为表面电阻 (ohmic sheet). 进一步, 探究了不同表面电阻对电磁吸收率的影响, 结果如图 3 所示. 对于 HH 电磁吸波超结构在 $R = 700$ — 800 Ω/sq 范围内反射损耗 < -10 dB 的频率带宽最宽; 对于 SG 电磁吸波超结构在 $R = 600$ — 800 Ω/sq 范围内反射损耗 < -10 dB 的频率带宽最宽. 综上仿真分析, 本文选择 $R = 750$ Ω/sq 作为超结构的表面电阻. 对于带有金属背板的电磁吸波超结构, 电磁波透射率为 0, 电磁吸收率 A 与反射损耗 RL 关系式为 $A = 1 - R, R = 10^{(\text{RL}/10)}$.

图 4(b) 和图 4(c) 分别为 HH 和 SG 电磁吸波超结构在 x , y 和 z 方向上的电磁吸收率, HH 超结构在 y 轴方向与 x , z 轴方向的电磁波吸收率差异较大, 尤其在 5.5 GHz 相差 10%, 同时, HH 超结构 z 轴方向的电磁波吸收率优于 x 轴方向. 对于 SG

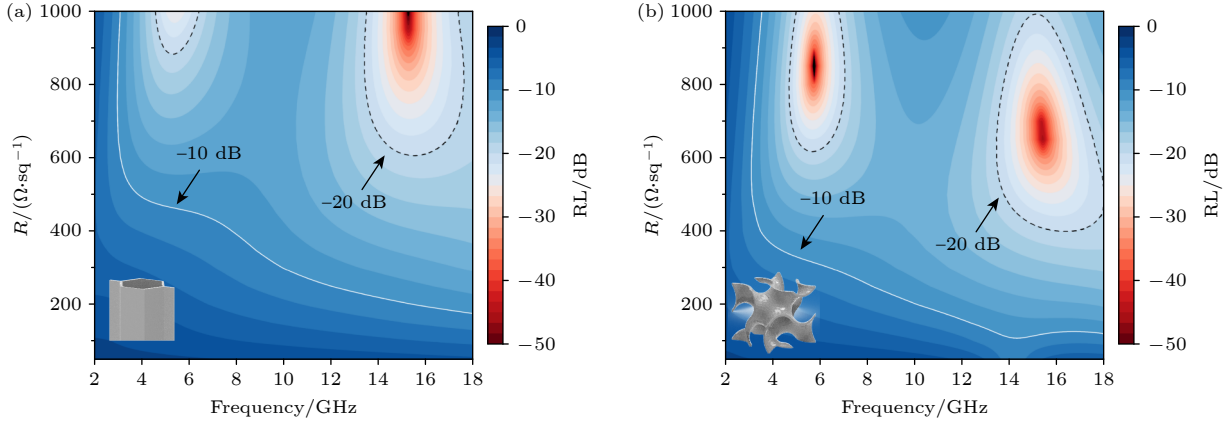


图 3 表面电阻对反射损耗的影响 (a) HH 电磁吸波超结构; (b) SG 电磁吸波超结构

Fig. 3. Effect of surface resistance on RL for (a) the HH electromagnetic absorbing metastructure and (b) SG electromagnetic absorbing metastructure.

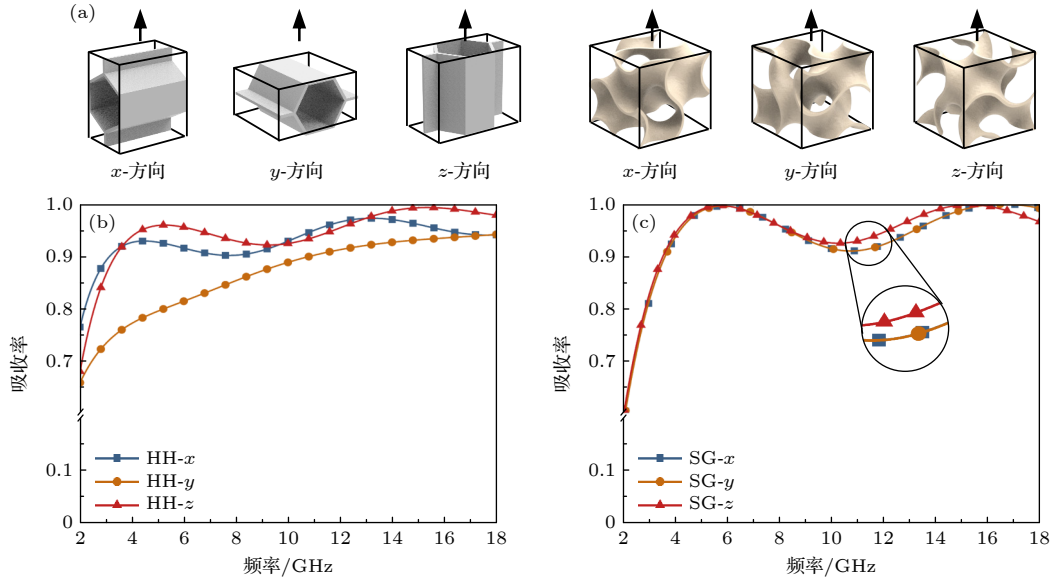


图 4 电磁吸波超结构各向异性分析 (a) 三个正交方向的电磁波入射示意图; (b) HH 电磁吸波超结构; (c) SG 电磁吸波超结构在 x , y , z 三个方向的吸收率

Fig. 4. The electromagnetic isotropy analysis: (a) The incident directions; (b) absorptivity of the HH electromagnetic absorbing metastructure; (c) the SG electromagnetic absorbing metastructure under the x -direction, y -direction, and z -direction.

超结构, 2—10 GHz 频段内三个正交方向的电磁吸收率均相同, y 轴方向略低于其他方向的电磁吸收率。

将仿真得到的反射系数 S_{11} 和传输系数 S_{21} 代入 (9) 式中计算电磁吸波超结构的折射率, 通过 (10) 式描述的折射率椭球模型评估 HH 和 SG 电磁吸波超结构的电磁各向异性, 对于双轴各向异性介质, n_1, n_2, n_3 各不相等, 反之, 对于各向同性介质, n_1, n_2, n_3 均相等 [22–25]。

$$n = n' - jn'' = \frac{1}{d} \cdot \frac{c}{\omega} \cdot \cos^{-1} \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{11}}, \quad (9)$$

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1, \quad (10)$$

式中, n, n' 和 n'' 分别代表折射率、折射率实部和虚部; d 代表超结构厚度; c 代表光速; ω 代表角频率; n_1, n_2, n_3 分别代表折射率椭球半长轴 x, y, z 方向上的折射率。

图 5(a) 和图 5(b) 分别为 HH 和 SG 电磁吸波超结构在 5.5 和 16 GHz 频点的折射率椭球模型。对于 HH 电磁吸波超结构, 5.5 GHz 的折射率最大值和最小值分别为 5.35 和 4.61 (差值为 0.74), 沿着 z 方向的折射率最大; 随着频率的增大, 16 GHz

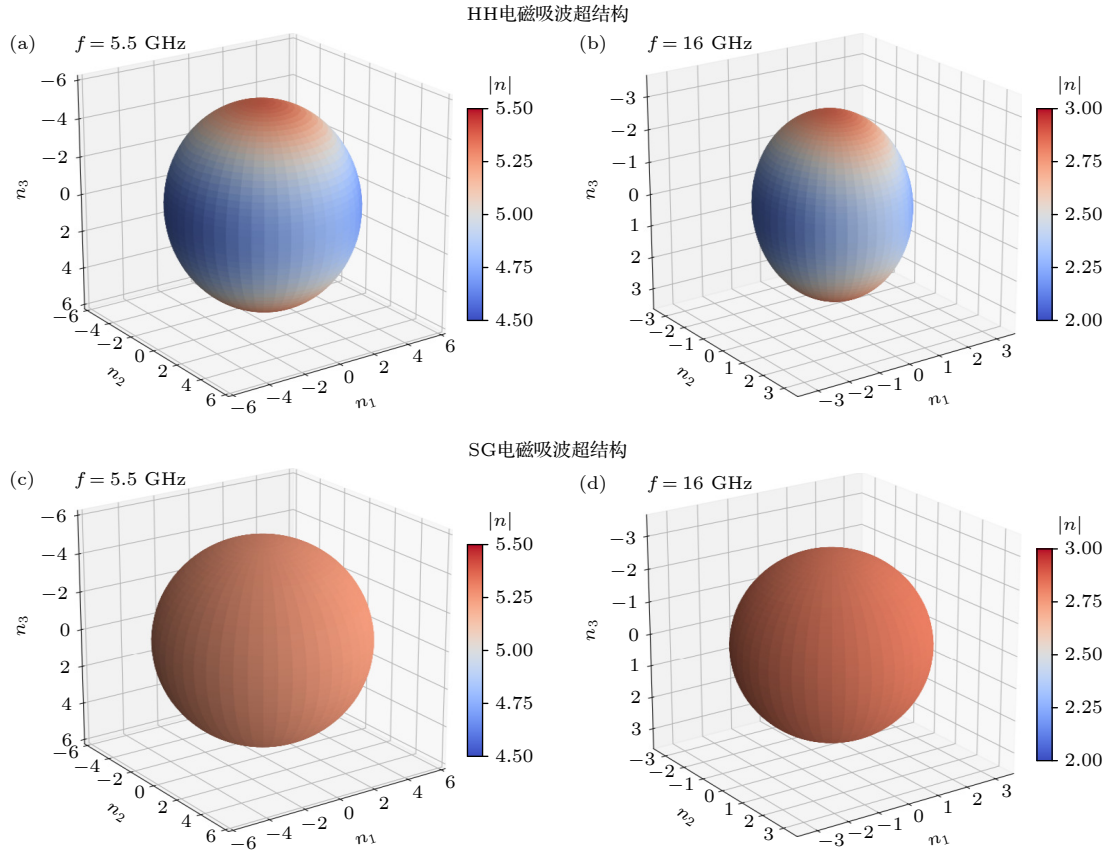


图5 折射率椭球模型 (a) 5.5 GHz 和 (b) 16 GHz 频率下的 HH 电磁吸波超结构; (c) 5.5 GHz 和 (d) 16 GHz 频率下的 SG 电磁吸波超结构

Fig. 5. Refractive index ellipsoid model: HH electromagnetic absorbing metastructure at (a) 5.5 GHz and (b) 16 GHz; SG HH electromagnetic absorbing metastructure at (c) 5.5 GHz and (d) 16 GHz.

折射率之差变小, 最大和最小值分别为 2.84 和 2.13, 相差 0.71. 图 5(c) 和图 5(d) 分别为 5.5 和 16 GHz 的 SG 电磁吸波超结构折射率椭球模型, 随着频率增加, SG 电磁吸波超结构的折射率逐渐减小; 与 HH 电磁吸波超结构不同的是, 5.5 和 16 GHz 的折射率最大和最小值差值均小于 0.01. 基于电磁吸波超结构的吸收率曲线和折射率椭球模型, 结果表明 HH 电磁吸波超结构呈现显著的各向异性电磁特性, SG 电磁吸波超结构呈现各向同性电磁特性.

3.2 电磁吸收机制分析

如图 6(a) 所示, HH 电磁吸波超结构在 HH- x 和 HH- z 方向入射时, 其内部能激发强磁谐振, 尤其在 5.5 和 16 GHz 频点附近, 这与图 4(b) 中观察到的高吸收率峰相互对应; 相反, 当电磁波沿 HH- y 方向入射时, 单元内部未能形成有效的磁谐振, 导致吸收性能显著下降, 这一现象直观地反映了其电磁响应的各向异性来源, HH 电磁吸波超结构展现出明显的各向异性电磁吸收性能. 图 6(b) 为 SG

电磁吸波超结构在 x, y, z 方向上的磁场分布, 其三个方向上的磁场分布一致, 例如在 5.5 GHz 频率下, 三个方向强磁谐振主要集中在电磁吸波超结构的上部. 综上, HH 和 SG 电磁吸波超结构的磁场分布特性与图 4(b) 和图 4(c) 中的吸收率一致, 各向同性的 SG 电磁吸波超结构在正交方向上的磁谐振一致, 而 HH 电磁吸波超结构则表现出显著的各向异性电磁特性, 其磁谐振在三个正交轴向上存在明显差异.

4 雷达散射截面仿真和测试

4.1 曲面部件雷达散射截面仿真

为验证不同超结构单元填充的曲面部件的雷达散射截面差异. 首先, 通过非保角映射方法设计 HH 电磁吸波超结构曲面部件 (uni-HH) 和 SG 电磁吸波超结构曲面部件 (uni-SG); 再采用保角映射方法设计 HH 电磁吸波超结构曲面部件 (con-HH) 和 SG 电磁吸波超结构曲面部件 (con-SG). 图 7(a)

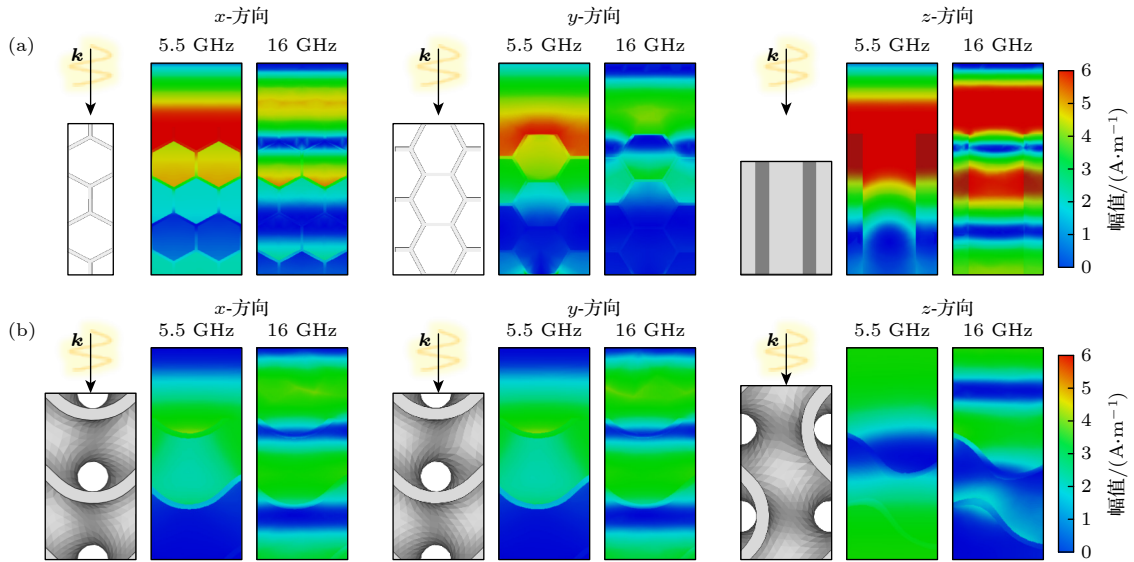


图 6 x , y 和 z 方向的磁场下电磁吸波超结构 (a) HH; (b) SG

Fig. 6. Electromagnetic absorbing metastructure at magnetic field under the x , y , and z -direction: (a) HH; (b) SG.

分别为 4 种超结构曲面部件, 曲面部件的内径和外径分别为 $r_1 = 75$ mm 和 $r_2 = 90$ mm, 其中填充超结构单元厚度为 15 mm, 如图 7(aI) 所示. 其中, 采用频域求解器对 4 种超结构曲面部件进行雷达散射截面分析.

图 7(b) 和图 7(c) 分别分析了 5.5 GHz 频率下 con-HH 和 uni-HH 曲面部件、con-SG 和 uni-SG 曲面部件的雷达散射截面. 其中 Theta 和 Phi 分别代表了曲面部件的俯仰角和横滚角, 角度定义如图 7(aII) 所示. 在 5.5 GHz 频率下, uni-HH 与 con-HH 曲面部件在方位角 $\phi = \pm 20^\circ$ 至 $\pm 90^\circ$ 范围内表现出显著的雷达散射截面差异, 其中 uni-HH 曲面部件在该区域出现 $RCS \approx -40$ dBsm 的低散射区域. 对于 SG 电磁吸波超结构, 分别采用非保角映射方法与保角映射方法所获得的曲面部件, 其雷达散射截面曲线基本一致, 各测试角度下的 RCS 数值均较为接近. 图 7(d), (e) 分别分析了 16 GHz 频率下 con-HH 和 uni-HH 曲面部件、con-SG 和 uni-SG 曲面部件的雷达散射截面, 随着频率的增加, 雷达散射截面呈现显著的波动, 因此, 16 GHz 频率下主要对比 $\phi = -20^\circ$ — $+20^\circ$ 和 $\theta = 75^\circ$ — 100° 范围内的雷达散射截面. 对于 HH 电磁吸波超结构, con-HH 和 uni-HH 曲面部件存在雷达散射截面不同的角度范围; 对于 SG 电磁吸波超结构, con-SG 和 uni-SG 曲面部件的雷达散射截面基本一致. 图 8(a) 和图 8(b) 分别为 5.5, 16 GHz 下, $\theta = 0^\circ$, $\phi = -90^\circ$ —

$+90^\circ$ 范围内, con-SG 和 uni-SG, con-HH 和 uni-HH 曲面部件雷达散射截面差异曲线. 在 5.5 GHz 频率下, 无论采用非保角映射方法还是保角映射方法, SG 电磁吸波超结构曲面部件的雷达散射截面随入射方向的变化差异均不显著; 而 HH 电磁吸波超结构曲面部件采用不同设计方法时, 其雷达散射截面随入射方向的变化差异则较为明显. 在高频下 (16 GHz), 曲面部件不同入射方向的雷达散射截面对超结构单元的电磁各向同性特性敏感度降低.

4.2 曲面部件制备与雷达散射截面测试

为了验证曲面部件的雷达散射截面, 对曲面部件进行制备并测试. 图 9(a) 为超结构和曲面部件的制备流程图, 首先, 通过数字化设计软件对曲面部件进行建模; 并采用光固化 3D 打印设备制备超结构基体结构, 材料为 ABS(大简 8111X, 大简科技有限公司, 中国) 作为基体结构材料; 对基体结构表面进行浸涂工艺处理, 形成表面损耗材料层, 其中, 表面损耗材料由炭黑粉末和固化溶液混合配制形成, 将超结构与金属反射板粘接得到电磁吸波样件. 图 9(b) 分别为 con-HH, uni-HH, con-SG 和 uni-SG 曲面部件, 加工部件尺寸与 4.1 节中仿真模型尺寸相同. 图 9(c) 为微波暗室中曲面部件的测试状态, 对超结构曲面部件进行 $\pm 90^\circ$ 范围内的雷达散射截面进行测试, 测试频段为 C 波段 (4—8 GHz) 和 Ku 波段 (12—18 GHz).

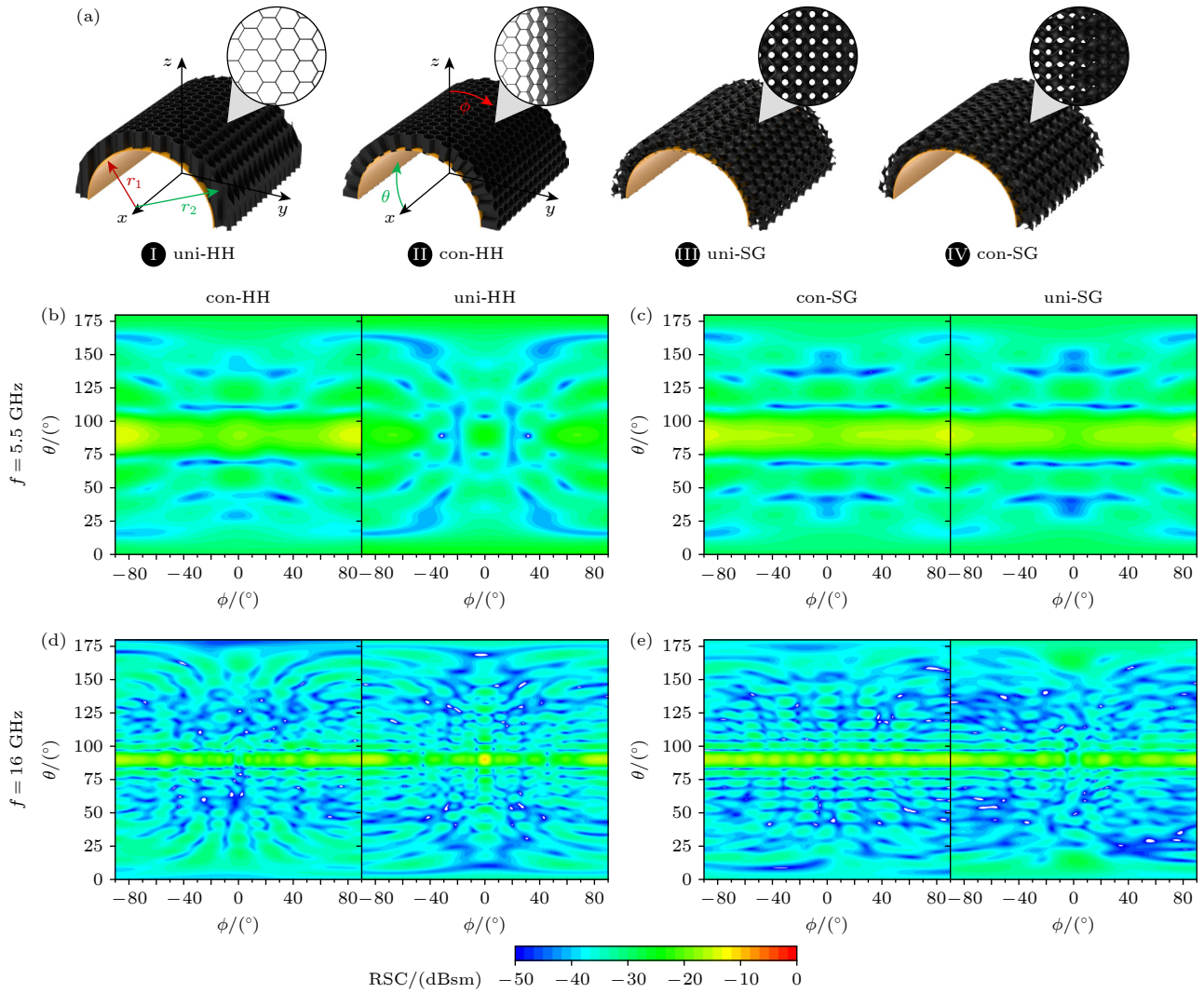


图 7 (a) 曲面部件样品; 5.5 GHz 频率下的 (b) con-HH 和 uni-HH 曲面部件, (c) con-SG 和 uni-SG 部件的雷达散射截面; 16 GHz 频率下的 (d) con-HH 和 uni-HH 曲面部件, (e) con-SG 和 uni-SG 曲面部件的雷达散射截面
 Fig. 7. (a) Curved component samples; radar cross section of (b) con-HH and uni-HH curved components and (c) con-SG and uni-SG curved components at 5.5 GHz; radar cross section of (d) con-HH and uni-HH curved components and (e) con-SG and uni-SG curved components at 16 GHz.

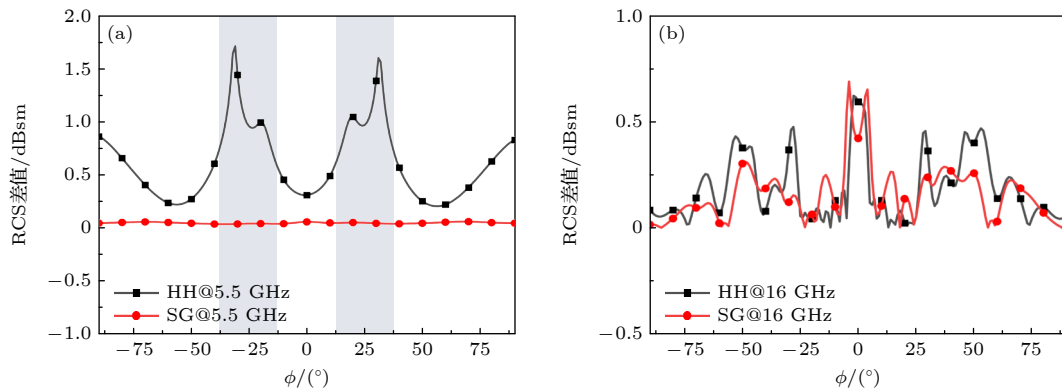


图 8 (a) 5.5 和 (b) 16 GHz 频率下不同设计方法对 HH 和 SG 曲面部件 RCS 差异图
 Fig. 8. Differential curves of RCS for non-conformal and conformal HH curved components and SG curved components at (a) 5.5 and (b) 16 GHz.

图 10(a) 和图 10(b) 分别为 HH 曲面部件和 SG 曲面部件在 5.5 GHz 频率下的 RCS, 在入射角

范围 -90° — $+90^{\circ}$ 内, con-HH 与 uni-HH 曲面部件之间的 RCS 差异显著; 而 con-SG 和 uni-SG 曲面

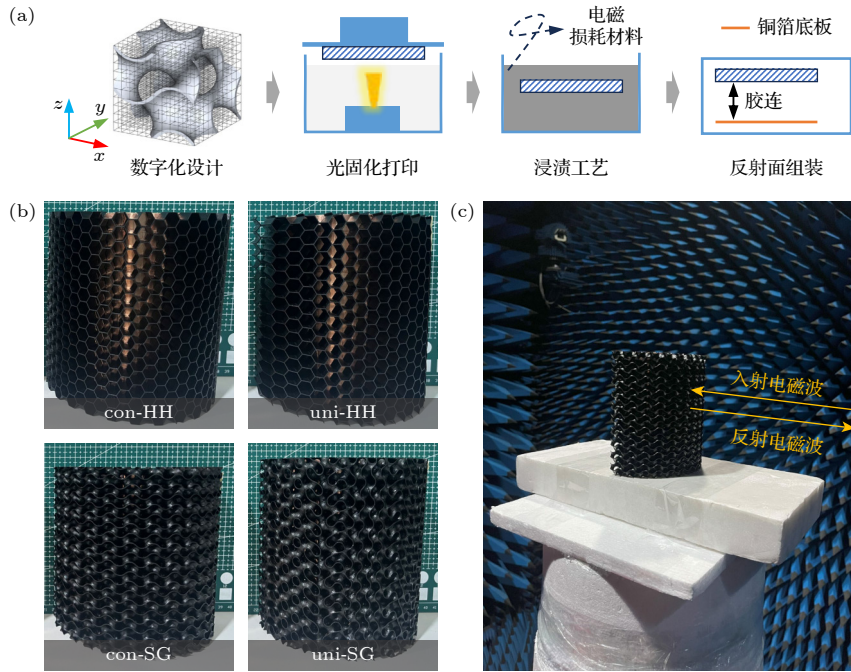


图 9 制备与测试 (a) 制造工艺; (b) con-HH, uni-HH, con-SG 和 uni-SG 曲面部件; (c) 测试场景

Fig. 9. Fabrication and testing: (a) The fabrication processing; (b) the con-HH, the uni-HH, the con-SG, and the uni-SG curved components; (c) the RCS testing scenario.

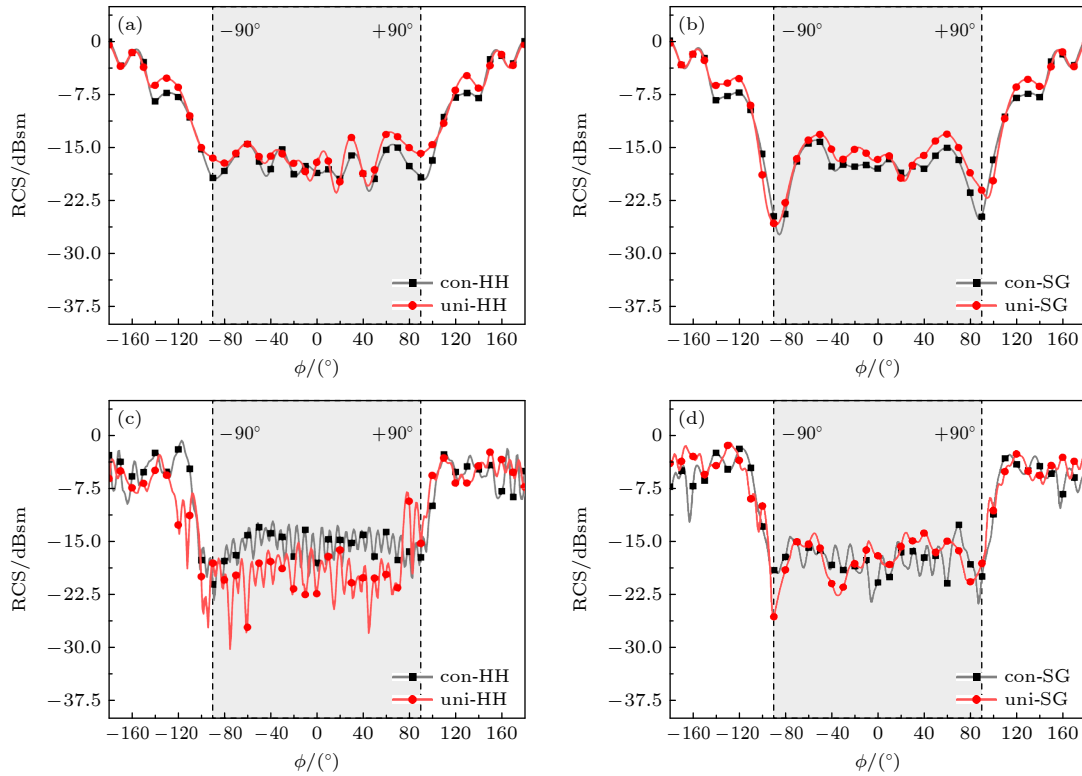


图 10 con-HH, con-SG, uni-HH 和 uni-SG 在 (a), (b) 5.5 GHz 和 (c), (d) 16 GHz 下的 RCS 测试曲线

Fig. 10. RCS testing curves of the con-HH, con-SG, uni-HH, and uni-SG curved components at (a), (b) 5.5 GHz and (c), (d) 16 GHz.

部件在 -45° — $+45^\circ$ 范围内, RCS 差异显著. 随着频率的增大, 在 16 GHz 时, con-HH 和 uni-HH 曲面部件在 $\pm 45^\circ$ 入射角 RCS 呈现显著差异; 而 con-SG 和 uni-SG 曲面部件则呈现近似平缓的 RCS 曲线, 如图 10(c), (d) 所示.

进一步, 对 5.5 和 16 GHz 频点曲面部件 RCS 进行差值计算, 得到图 11(a) 和图 11(b) 所示的差值曲线. 采用样本标准差 (sample standard deviation, SSD) 对保角映射方法和非保角映射方法的曲面部件雷达散射截面差异进行分析, 如 (11) 式所示:

$$D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (11)$$

式中, \bar{x} 为 RCS 的平均值; x_i 为 RCS 数据; n 表示样本数量. 差值 A 定义为归一化后的标准差的平均值, 即 (12) 式—(13) 式所示,

$$ND = \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}, \quad (12)$$

$$A = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m ND, \quad (13)$$

式中, ND 为归一化的标准差; D_{\max} 和 D_{\min} 分别代表标准差的最大值和最小值; S_i 为每一个标准差数值; m 为 RCS 采样数. 通过上述计算, 对于 HH 电磁吸波超结构, 保角映射设计和非保角映射设计的曲面部件在 5.5 GHz 频点下 $A = 0.31$, 16 GHz 频点 $A = 0.24$; 而对于 SG 电磁吸波超结构, 保角映射设计和非保角映射设计的曲面部件在 5.5 GHz 频点下 $A = 0.28$, 16 GHz 频点 $A = 0.24$. 综上所述, SG 结构的吸波能力鲁棒性更强. 值得关注的

是, 超结构各向异性对曲面部件 RCS 的影响呈现频率依赖性. 在 5.5 GHz 的较低频段 (波长与结构比 $\alpha = \lambda/h = 3.6 \approx 4$), 设计方法 (非保角映射方法和保角映射方法) 对 HH 曲面部件 RCS 的影响极为显著; 而在 16 GHz 的较高频段 ($\alpha = 1.2 \approx 1$ 结构尺寸与波长相当), 设计方法带来的差异有所减小. 分析可知高频时电磁波波长短, 绕射和散射效应更为复杂, 在一定程度上削弱了由单元宏观保角映射排布方向性所主导的低 RCS 特性. 受到加工工艺和测试过程中的环境噪声影响, 测试结果与仿真结果存在差异, 但测试结果呈现的规律与仿真规律一致.

5 保角与非保角方法雷达散射差异分析

为揭示不同入射角度下曲面部件雷达散射截面差异性, 对垂直入射电磁波条件下的曲面结构磁场分布特性进行分析对比. 图 12 为 5.5 和 16 GHz 频率下不同入射角度下曲面部件的磁场分布, 其中图 12(a) 是频率 5.5 GHz 和相位 45° 下, con-HH, uni-HH, con-SG 和 uni-SG 曲面部件的磁场分布. 在 5.5 GHz 频率下, 波长 (约 54.5 mm) 远大于电磁吸波超结构单元尺寸 ($h = 15$ mm), 超结构可等效为均匀化的各向同性材料; 对于各向异性 HH 电磁吸波超结构曲面部件, 在垂直入射电磁波下, con-HH 曲面部件强磁谐振位置在左右两侧, 而 uni-HH 曲面部件任何角度均有强磁谐振; 对于各向同性 SG 曲面部件, 在垂直入射电磁波下, con-SG 和 uni-SG 曲面部件的强磁谐振分布相同, 图 12(a) 黑色圈内所示.

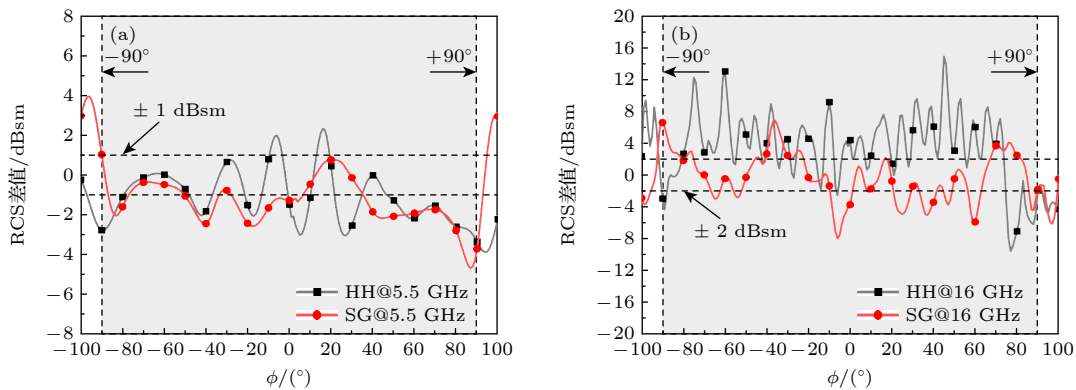


图 11 在 (a) 5.5 GHz 和 (b) 16 GHz 频率下 HH 和 SG 超结构曲面部件的 RCS 差异

Fig. 11. The RCS difference of HH and SG curved components for (a) 5.5 GHz and (b) 16 GHz.

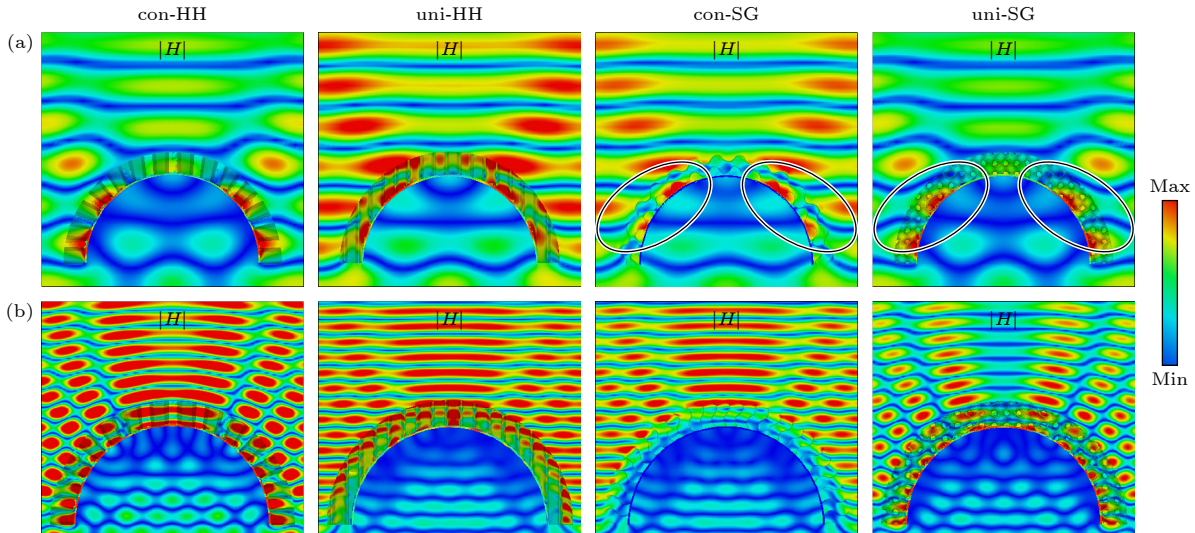


图 12 con-HH, con-SG, uni-HH 和 uni-SG (a) 在 5.5 GHz, 相位为 45° 时的磁场分布; (b) 在 16 GHz, 相位为 45° 时的磁场分布
Fig. 12. Magnetic field distribution of con-HH, con-SG, uni-HH, and uni-SG (a) at 5.5 GHz with a phase of 45° and (b) at 16 GHz with a phase of 45° .

而 16 GHz 频率下, 波长 (约 18.8 mm) 与电磁吸波超结构单元尺寸 ($h = 15$ mm) 相当, 局部散射等效效应开始变得显著, 如图 12(b) 所示. 对于 HH 电磁吸波超结构, con-HH 和 uni-HH 曲面部件的磁谐振分布不同, con-HH 曲面部件强磁谐振区域在部件底部, 而 uni-HH 曲面部件强磁谐振区域在部件顶部. 对于 SG 电磁吸波超结构, con-SG 和 uni-SG 曲面部件强磁谐振区域分布不同. 磁谐振特性与电磁谐振共存. 通过对四种曲面部件磁场分布的对比, 在低频段内各向同性电磁吸波超结构曲面部件的电磁场特性对 (非) 保角映射方法不敏感, 高频段内曲面部件的电磁场特性对 (非) 保角映射方法敏感, 且与超结构的各向同性无关.

6 结 论

本文分析了电磁吸波超结构的各向同性与其宏观部件雷达散射截面的内在关系. 探究了典型的各向异性六边形蜂窝电磁吸波超结构和面状 Gyroid 电磁吸波超结构不同来波方向上的磁场分布图和电磁吸收率特性, 并建立了 5.5 和 16 GHz 频点的折射率椭球模型, 通过电磁数值计算解释了两种结构的电磁各向异性差异. 采用保角映射和非保角映射设计方法构建超结构曲面部件, 并对曲面部件进行雷达散射截面仿真与测试. 曲面部件的雷达散射截面表明, 各向同性面状 Gyroid 曲面部件, 其 RCS 特性对设计方法不敏感, 展现较强吸波能

力鲁棒性; 而各向异性六边形蜂窝曲面部件, 其 RCS 则对设计方法表现出强烈的依赖性.

综上所述, 在进行宽角域低雷达散射截面的超结构部件设计时, 各向同性电磁吸波超结构 (如面状 Gyroid 超结构) 展现出较强吸波能力鲁棒性. 而当需要对特定方向进行极致电磁波吸收时, 可采用各向异性电磁吸波超结构进行设计 (如六边形蜂窝超结构). 本研究聚焦于单曲率条件下的宏微观一体化电磁特性规律, 未来可将电磁各向同性的面状 Gyroid 超结构拓展至复杂的曲面部件设计中, 为宏微观一体化低雷达散射特性部件设计提供了理论依据和工程指导.

参考文献

- [1] Wang Y Z, Xu H X, Wang C H, Wang M Z, Wang S J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 134101 (in Chinese) [王彦朝, 许河秀, 王朝辉, 王明照, 王少杰 2020 物理学报 **69** 134101]
- [2] Yang L X, Li Y B, Fei Q G 2025 *Acta Astronaut. Astronaut. Sin.* **46** 331808 (in Chinese) [杨利鑫, 李彦斌, 费庆国 2025 航空学报 **46** 331808]
- [3] Mo M M, Ma W W, Pang Y Q, Chen R H, Zhang X M, Liu Z T, Li X, Guo W T 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 217801 (in Chinese) [莫漫漫, 马武伟, 庞永强, 陈润华, 张笑梅, 柳兆堂, 李想, 郭万涛 2018 物理学报 **67** 217801]
- [4] Zhou P H, Huang L R, Xie J L, Liang D F, Lu H P, Deng L J 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3496
- [5] Gong P, Li Y, Xin C X, Chen Q Y, Hao L, Sun Q L, Li Z 2022 *Ceram. Int.* **48** 9873
- [6] Li Z C, Xu J, Zhang L, Li Y W, Yang R S, Fu Q H, Zhang F L, Fan Y C 2023 *Ann. Phys.* **535** 2300054
- [7] Zhang J H, Li D S, Wang M M 2025 *Addit. Manuf.* **97** 104613
- [8] Zheng L, Niu L, Wang T, Li X C, Wang X, Gong R Z 2023

- Compos. Struct.* **305** 116464
- [9] Xiong Y J, Wang Y, Wang Q, Wang C Q, Huang X Z, Zhang F, Zhou D 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 084202 (in Chinese) [熊益军, 王岩, 王强, 王春齐, 黄小忠, 张芬, 周丁 2018 *物理学报* **67** 084202]
- [10] Bai L, Chang N, Zhao M Y, Hou C, Cao Y, Li D C 2024 *Chin. J. Aeronaut.* **37** 547
- [11] Fan Q F, Yang X Z, Lei H S, Liu Y Y, Huang Y X, Chen M J 2020 *Composites Part A* **129** 105698
- [12] Zhou Q, Qi C X, Shi T T, Li Y K, Ren W, Gu S Y, Xue B, Ye F, Fan X M, Du L F 2023 *Composites Part A* **169** 107541
- [13] Lin Z M, Yu M M, Wen M L, Ma Z, Gao L H, Wang Y T, Chen W H, Chen G H, Ma C 2023 *Carbon* **214** 118389
- [14] Ye F, Song Q, Zhang Z C, Li W, Zhang S Y, Yin X W, Zhou Y Z, Tao H W, Liu Y S, Cheng L F, Zhang L T, Li H J 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1707205
- [15] Luo H, Chen F, Wang X, Dai W Y, Xiong Y, Yang J J, Gong R Z 2019 *Composites Part A* **119** 1
- [16] Kwak B S, Choi W H, Noh Y H, Jeong G W, Yook J G, Kweon J H, Nam Y W 2020 *Composites Part B* **191** 107952
- [17] Xu J, Fan Y C, Su X P, Guo J, Zhu J X, Fu Q H, Zhang F L 2021 *Opt. Mater.* **113** 110852
- [18] Choi W H, Kim C G 2015 *Composites Part B* **83** 14
- [19] He Y F, Gong R Z, Wang X, Zhao Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5261 (in Chinese) [何燕飞, 龚荣洲, 王鲜, 赵强 2008 *物理学报* **57** 5261]
- [20] Yao L, Yang W Q, Zhou S X, Mei H, Li Y, Dassios K G, Riedel R, Liu C D, Cheng L F, Zhang L T 2023 *Acta Mater.* **249** 118803
- [21] Fu J, Ding J H, Zhang L, Qu S, Song X, Fu M W 2023 *Addit. Manuf.* **62** 103406
- [22] Tang X G, Zhang W H, Qiu K P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084102 (in Chinese) [汤兴刚, 张卫红, 邱克鹏 2013 *物理学报* **62** 084102]
- [23] Gu Z Z, Chen L, Sun H M, Wang J P, Fan D G 2023 2023 *National Antenna Conference* Haerbin, China, August 20, 2023 p2231 (in Chinese) [顾兆梅, 陈乐, 孙惠敏, 王金平, 樊迪刚 2023 2023 年全国天线年会 中国黑龙江哈尔滨 8 月 20 日, 2023 第 2231 页]
- [24] Fan J Y, Zhang Y X, Feng X L, Huang Z X 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 244101 [樊久扬, 张玉贤, 冯晓丽, 黄志祥 2024 *物理学报* **73** 244101]
- [25] Xu S F, Sun Q 2013 *Adv. Aeronaut. Sci. Eng.* **4** 119 (in Chinese) [许少峰, 孙秦 2013 *航空工程进展* **4** 119]

Influence mechanism of electromagnetic absorbing metastructure anisotropy on radar cross section*

AN Qing¹⁾ LIAO Wenhe^{1)†} LI Dawei¹⁾ LIU Tingting¹⁾ LI Weiping¹⁾
 ZHANG Sen²⁾ ZHAO Junming²⁾

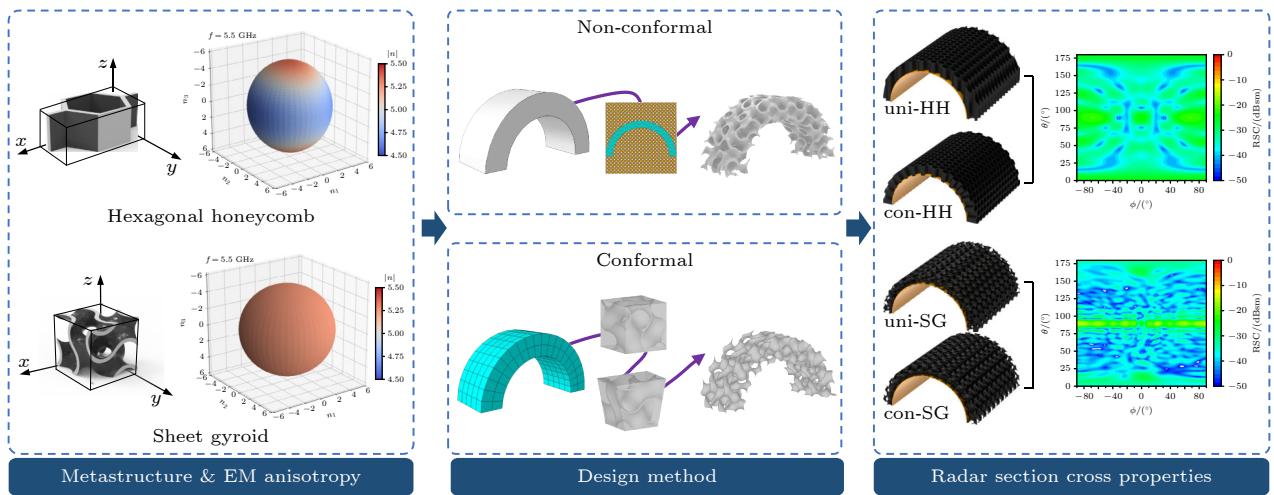
1) (School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

2) (School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

(Received 3 September 2025; revised manuscript received 7 October 2025)

Abstract

To reveal the correlation between the anisotropy of electromagnetic absorbing metastructure and the radar cross section (RCS) of its curved components, the typical anisotropic hexagonal honeycomb (HH) metastructure and isotropic sheet gyroid (SG) metastructure are systematically studied. Both conformal mapping and non-conformal mapping methods are employed for designing the conformal curved components. These designs are compared using simulation and microwave anechoic chamber testing to evaluate their RCSs. The results indicate that the RCS of isotropic sheet gyroid curved components is insensitive to design methods, exhibiting strong design method and absorbing robustness; however, the RCS of anisotropic hexagonal honeycomb curved components exhibits strong dependence on design methods. Compared with anisotropic structures, metastructures with electromagnetic isotropy have significant advantages in achieving wide-angle and robust low-scattering characteristics of curved components, with lower dependence on design and processing. This study provides important design guidance for developing high-performance radar low-scattering components.



Keywords: electromagnetic absorbing metastructure, electromagnetic anisotropic, conformal design, additive manufacturing

DOI: [10.7498/aps.75.20251200](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251200)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251200](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251200)

* Project supported by the Key Project of Jiangsu Provincial Basic Research Program, China (Grant No. BK20243009).

† Corresponding author. E-mail: cnwho@njust.edu.cn