

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.016

芳纶纸基蜂窝吸波结构等效模型及电磁特性

付斌^{1,2}, 骆盛^{1,2}, 刘晓菲^{1,2}, 张成军³, 张亚坤², 徐顶国², 郭国强²

(1. 陆空基信息感知与控制全国重点实验室, 西安 710065; 2. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065;

3. 山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 芳纶纸基蜂窝吸波结构通常与其使用平台之间存在较大电尺寸差异, 全波计算方法会严重影响该结构的设计优化效率。基于等效媒质理论, 使用 Hashin-Shtrikman 公式预测了芳纶纸基蜂窝结构等效电磁参数, 并结合多层介质传输反射理论构建了复杂蜂窝吸波结构的等效电磁模型。针对典型雷达波段 S、C、X (2~12 GHz), 研究了芳纶纸基蜂窝高度、网孔大小、炭黑涂覆厚度以及入射角度对结构反射率的影响, 并利用场分析方法给出了蜂窝结构在不同情况下的电场与损耗分布, 解释了蜂窝吸波结构的吸收机理。结果表明: 该等效电磁模型可用于芳纶纸基蜂窝吸波结构的快速优化设计; 电场驻波波腹点和吸收剂表层感应电流方向突变点处的强损耗是该结构吸收峰的主要产生原因, 其中前者对应 1/4 等效介质波长厚度匹配点; 增大蜂窝高度会降低 1/4 等效介质波长匹配频点, 导致吸收峰频点向低频移动; 减小网孔尺寸、增大炭黑涂覆厚度均会增加蜂窝结构的等效介电常数, 导致吸收峰频点向低频移动, 且吸收带宽大幅变化, 其中蜂窝网孔由 4 mm 减小至 1 mm 时, 其 -10 dB 吸收带宽由 59% 缩减至 26%, 炭黑涂覆厚度由 0.2 mm 增大至 0.5 mm 时, 其 -10 dB 吸收带宽由 49% 逐渐减小至 0; 斜入射时蜂窝吸波结构反射率在横电波 (TE) 和横磁波 (TM) 入射情况下将呈现不同变化规律, 当入射角由 0° 增大至 60° 时, TE 波吸收峰频点在 7.6 GHz 附近基本不变, 而 TM 波吸收峰频点由 7.6 GHz 增大至 10.9 GHz。因此, 采用等效模型可针对芳纶纸基蜂窝吸波结构吸收性能进行快速优化设计, 有效缩短蜂窝结构设计周期。

关键词: 蜂窝吸波结构; 等效媒质理论; 多层介质传输反射理论; 等效电磁模型; 等效电磁参数

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0137-10

Effective model of aramid paper-based honeycomb absorbing structures and its electromagnetic characteristics

FU Bin^{1,2}, LUO Sheng^{1,2}, LIU Xiaofei^{1,2}, ZHANG Chengjun³, ZHANG Yakun², XU Dingguo², GUO Guoqiang²

(1. National Key Laboratory of Land and Air Based Information Perception and Control, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China; 3. Shandong Institute of Nonmetallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract: Aramid paper-based honeycomb absorbing structures usually have significant differences in electrical size from their application platforms, and the full-wave method seriously affects the optimization design efficiency of this structure. By the effective medium theory, the Hashin-Shtrikman formula was used to predict the effective electromagnetic parameters of the aramid paper-based honeycomb structure, and constructed an effective electromagnetic model of the complex honeycomb absorbing structure combined with the transmission and reflection theory of layered structures. Focusing on the typical radar frequency bands (2 to 12 GHz), S, C, and X, the influences of aramid paper-based honeycomb height, mesh size, carbon black thickness and incident angle on its reflectivity were investigated. Additionally, field analysis was employed to illustrate the electric field and loss distributions of the honeycomb absorbing structure under different conditions, explaining the absorption mechanism. Results demonstrate that the equivalent electromagnetic model enables rapid optimization design for aramid paper-based honeycomb absorbing structures. The strong energy dissipation at the antinodes of the electric field standing wave and the points with abrupt change in the direction of the induced current at the surface of the coated carbon black are the dominant origin of the absorption peaks of this structure, where the former corresponds to the thickness matching point of a quarter-wavelength of the effective medium. Increasing the honeycomb

通信作者: 付斌, 博士研究生, 工程师, 研究方向为超材料吸波结构设计、飞行器隐身设计

收稿日期: 2026-02-06

引用格式: 付斌, 骆盛, 刘晓菲, 等. 芳纶纸基蜂窝吸波结构等效模型及电磁特性[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(6): 137-146.

FU Bin, LUO Sheng, LIU Xiaofei, et al. Effective model of aramid paper-based honeycomb absorbing structures and its electromagnetic characteristics[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 137-146.

height reduces the frequency corresponding to the quarter-wavelength match, shifting the absorption peak toward lower frequencies. Similarly, reducing the cell size and increasing the coated carbon black thickness both raise the effective permittivity of the honeycomb structure, also causing the absorption peak to shift to lower frequencies. Specifically, when the honeycomb mesh size decreases from 4 mm to 1 mm, the -10 dB absorption bandwidth significantly reduces from 59% to 26%, and when the carbon black coating thickness increases from 0.2 mm to 0.5 mm, the -10 dB absorption bandwidth gradually decreases from 49% to 0. Under oblique incidence, the reflectivity of the honeycomb absorber exhibits distinct behaviors for transverse electric wave (TE) and transverse magnetic wave (TM) polarizations. Especially, as the incident angle increases from 0° to 60°, the absorption peak frequency for TE waves remains approximately constant at 7.6 GHz, while that of TM waves increases from 7.6 GHz to 10.9 GHz. Thus, the effective model enables rapid optimization of the absorption performance of aramid paper-based honeycomb absorbing structures, effectively reducing the design cycle of this type of honeycomb structure.

Keywords: honeycomb absorbing structure; effective medium theory; transmission and reflection theory of layered structure; effective electromagnetic model; effective electromagnetic parameter

芳纶纸基蜂窝是以芳纶纸为基体原料,经涂胶、叠合、热压、拉伸、浸渍固化等工艺制备而成的周期性正六边形多孔蜂窝状夹层结构芯材^[1]。该蜂窝是结构型吸波材料中应用最为广泛的功能性承载结构,问世以来就具备了一系列传统材料所不具有的优点,如高抗压强度、高比强度及高比刚度等,是现代航空、航天工业发展中不可缺少的材料之一。除力学性能外,涂覆炭黑等电磁吸收剂后的芳纶纸基蜂窝结构还具有优良的电磁学特性,特别是蜂窝网孔的多次反射可以展宽对入射电磁波的吸收频带,对于吸波结构的优化设计具有重要意义。

在常规实验方法外,精确建模方法和等效建模方法是研究复杂蜂窝吸波结构电磁特性的主要手段。其中,由于该结构通常与其使用平台之间存在较大电尺寸差异,精确建模方法中的全波算法会导致复杂蜂窝结构产生巨额网格剖分,进而消耗大量仿真资源,严重制约其设计优化效率。在等效建模方法中,等效媒质理论^[2]是处理非均匀复合介质电磁特性的经典理论,其核心是在入射电磁波波长远大于材料微观结构尺寸的准静态条件下,将多相非均匀复合结构等效为具有均匀等效电磁参数的单相介质,使等效介质与原结构的宏观电磁响应保持一致。因此,该理论可大幅简化复杂芳纶纸基蜂窝结构的电磁计算,被广泛应用于各类快速优化设计中。

近年来,国内外学者围绕芳纶纸基蜂窝吸波结构电磁特性开展了大量研究工作。早期工作主要集中在简单芳纶纸基蜂窝的吸波设计方面,Hashin与Shtrikman^[3]基于等效介质理论,利用变分法首次从复合材料有效能量的角度推导得出了复合材料等效电磁参数的预测公式(简称H-S预测公式),为

蜂窝吸波结构的快速优化设计奠定了基础。邢丽英等^[4]通过实验方法研究了芳纶纸基蜂窝吸波性能随网孔大小、蜂窝高度、浸渍工艺等因素的变化规律。Smith^[5]率先使用时域有限差分法研究了蜂窝结构的各向异性特征。Johansson等^[6]利用Hashin-Shtrikman(H-S)预测公式研究了不同蜂窝结构的等效电磁参数,并指出该结构中上下界公式的适用条件。何燕飞等^[7]根据强扰动理论推导出了芳纶纸基蜂窝等效介电常数与磁导率的计算式,并进一步得到其反射系数。

进入2010年后相关研究工作显著增多,主要集中在该结构的高性能设计方面。赵宏杰等^[8]通过实验研究了芳纶纸基蜂窝芯高度、蒙皮厚度、蜂窝芯增重对吸波性能的影响。Zhou等^[9-11]通过实验验证了准静态H-S预测公式的有效性,并完成宽带蜂窝吸波结构设计。并且,该作者发现具有渐变炭黑涂覆厚度的蜂窝吸波结构可有效扩展高频吸收带宽。赵雨辰等^[12-15]基于强扰动理论,在传统等效电磁参数预测公式中引入色散特性的影响,有效提高了蜂窝吸波结构等效参数预测的准确性和适用范围。Rinaldi等^[16]考虑电磁场在蜂窝损耗壁上的扩散效应,首次提出兼顾微观-宏观尺寸的芳纶纸基蜂窝吸波结构等效模型,为宽带轻质吸波结构的准确设计提供了理论支撑。

近期针对蜂窝结构的研究工作更加细致全面,He等^[17-18]针对传统蜂窝吸波结构输入阻抗变化大、数值高等特点,先后利用图形化和渐变式涂覆调控输入阻抗拓展了该结构的吸收带宽。吴润鑫等^[19]设计了一种嵌入式蜂窝超结构,该结构在2~18 GHz内的吸波性能明显优于同面密度的蜂窝结构。牛磊等^[20]针对传统多层蜂窝界面处电磁不连续以及浸渍

工艺自身精度低等问题,通过3D打印技术制备了一种轻质三层梯度宽带蜂窝结构。刘文言所在团队通过实验研究发现^[21-22],梯度浸渍能有效提升阻抗匹配效果,且径向梯度浸渍有利于对大角度入射电磁波的能量吸收。随后该团队还发现在浸渍工艺中,不同厚度蜂窝芯会对应不同的最佳炭黑含量和浸渍次数。何凡召等^[23]针对复杂多层复合蜂窝吸波结构,利用BP神经网络实现了多层阻抗梯度蜂窝结构等效电磁参数的快速提取。礼嵩明等^[24-25]构建了非均质孔格结构材料电磁计算模型,并利用梯度电磁芯材和优化电磁芯材填充结构实现了曲面结构低频电磁波的高效吸收。丁学刚等^[26]通过力热电性能匹配设计,得到了一款耐1 000℃高温的低吸高透夹层蜂窝结构。

通过上述文献可知,在进行芳纶纸基蜂窝吸波结构的电磁特性分析与设计过程中,实验方法过程比较复杂、成本高,全波计算方法计算周期长,不利于复杂蜂窝结构电磁特性的高效分析与设计,而等效媒质理论为蜂窝吸波结构的快速优化设计提供了一条有效解决途径。本文基于等效媒质理论,利用等效电磁参数与多层介质传输反射理论,构建准静态条件下复杂蜂窝吸波结构快速计算分析的电磁特性等效模型,进而研究了芳纶纸基蜂窝结构自身尺寸(高度、网孔、吸收剂厚度)以及入射角度对其电磁特性的影响,为蜂窝吸波结构的吸收机理研究和快速优化设计提供理论指导。

1 芳纶纸基蜂窝吸波结构

芳纶纸基蜂窝吸波结构的制备流程主要包括芳纶纸基蜂窝基体的制备和蜂窝基体的吸波功能化改性两大步骤^[1,4,9,22]。其中,芳纶纸基蜂窝基体的制备过程主要涉及原纸预处理、节点涂胶、叠合与热压固化、拉伸定型、基体增强浸渍与固化、切片与后处理。而蜂窝基体的吸波功能化改性过程可采用常用的浸渍提拉涂覆法,主要有吸波浆料的制备、精准浸渍提拉涂覆与涂层固化成型。经过以上两大步骤后即可得到芳纶纸基蜂窝吸波结构。

图1为标准正六边形芳纶纸基蜂窝吸波结构的横截面示意图。其中,芳纶纸基蜂窝骨架厚度为 $2w$,蜂窝网孔大小为 r ,吸收剂涂覆厚度为 d ,蜂窝高度为 h 。

2 等效电磁参数预测

基于等效媒质理论,当电磁波波长远大于复合

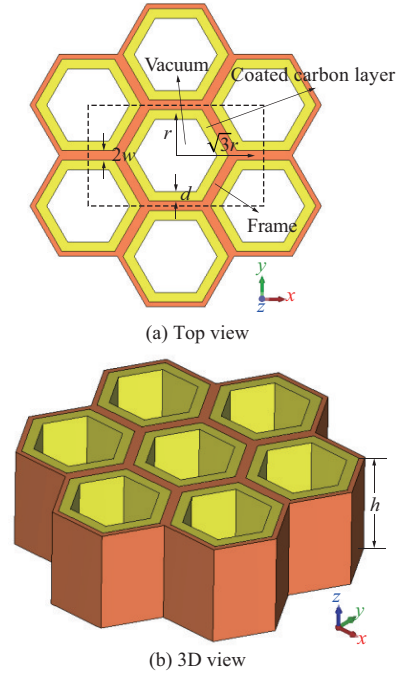


图1 芳纶纸基蜂窝吸波结构示意图

Fig. 1 Configuration of aramid paper-based honeycomb absorber

材料尺寸时,可以忽略材料内部结构的互相影响,将其等效为具有相应等效电磁参数的均匀介质平板。此时,均匀介质平板展现出的宏观电磁特性与真实蜂窝吸波结构电磁特性基本保持一致,因此可以快速分析该结构的宏观电磁特性。

根据H-S变分理论^[3],可以得出用于周期性蜂窝吸波结构等效电磁参数的H-S预测公式,见式(1)、式(2)。

$$\varepsilon_{\text{HS}}^{\text{H}} = \varepsilon_1 \frac{(2-g)\varepsilon_2 + g\varepsilon_1}{g\varepsilon_2 + (2-g)\varepsilon_1} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{HS}}^{\text{L}} = \varepsilon_2 \frac{(1+g)\varepsilon_1 + (1-g)\varepsilon_2}{(1-g)\varepsilon_1 + (1+g)\varepsilon_2} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_{\text{HS}}^{\text{H}}$ 和 $\varepsilon_{\text{HS}}^{\text{L}}$ 分别对应复合材料等效介电常数的上、下边界; ε_1 为蜂窝骨架材料的相对介电常数; ε_2 为蜂窝芯体材料的相对介电常数; g 为蜂窝骨架的单元占比。

将式(1)、式(2)中的相对介电常数更改为相应的磁导率参数就可得到等效磁导率的预测公式。

值得注意的是,文献[6]中通过将以上H-S预测公式构建的等效电磁计算模型与三维有限元方法所得结果进行对比后发现,H-S预测公式的上、下边界分别适用于 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ 和 $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ 的情况。

对于图1b中所示的蜂窝吸波结构,周期单元中包含三种不同介质,由内向外分别为空气、炭黑吸

收剂和芳纶蜂窝壁,因此应用H-S预测公式计算该结构等效电磁参数需分两步进行。图2为该蜂窝吸波结构等效电磁参数的预测流程。如图2所示,第一步为空气与吸收剂的匀质化过程,即将吸收剂包围空气柱结构等效为单相均匀介质芯体;第二步为芯体与蜂窝壁的匀质化过程,即将芳纶蜂窝壁包裹芯体结构等效为单相均匀介质,最终可以得到整体蜂窝吸波结构的等效电磁参数,包括等效介电常数(ϵ_{eff})和等效磁导率(μ_{eff})。由于在制备过程中涉及组分设计、浸渍、涂覆等多项材料设计过程,不同材料组分比例、浸渍液固含量、涂覆厚度等都会改变H-S预测公式中芳纶纸基蜂窝壁或吸收剂的占空比和介电常数、磁导率,导致蜂窝吸波结构的等效电磁参数发生变化,最终该结构的宏观电磁特性也随之变化。

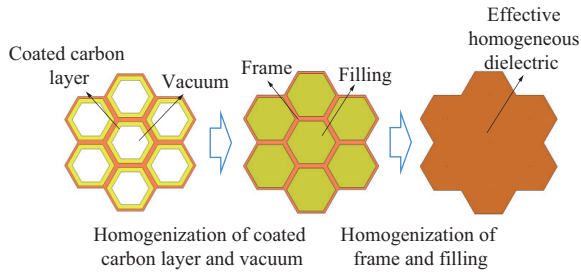


图2 蜂窝吸波结构等效电磁参数预测

Fig. 2 Prediction of the effective electromagnetic parameters of the honeycomb absorber

3 多层介质结构的传输反射理论

含有金属背板的多层介质结构如图3所示, t_i , $\epsilon_i, \mu_i (i=1, 2, \dots, n)$ 分别为各层介质的厚度、相对介电常数和相对磁导率,入射波为均匀平面波。由于沿任意方向极化的电场(E)均可被分解为垂直或平行于入射面的两个分量,因此以下讨论将针对单一分量进行。

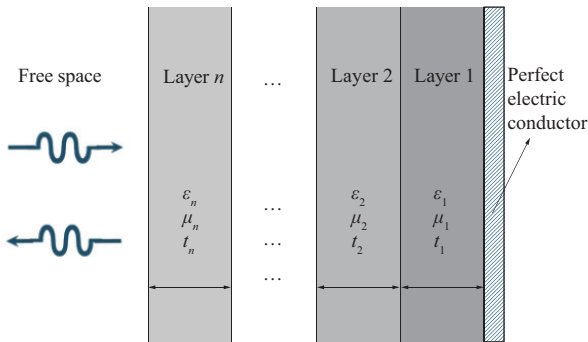


图3 有金属背板的多层介质结构示意图

Fig. 3 Configuration of the layered dielectric with backpanel

3.1 电场垂直于入射面

图4为电磁波在多层介质结构中的传播示意图。如图4所示, xy 坐标平面与分界面重合, z 轴与分界面垂直,电场垂直于入射面,讨论第*i*层与第*i*-1层分界面上的电磁波入射问题^[27-28]。其中, θ_i, θ'_i 分别为第*i*层与第*i*-1层分界面处的入射角与反射角。

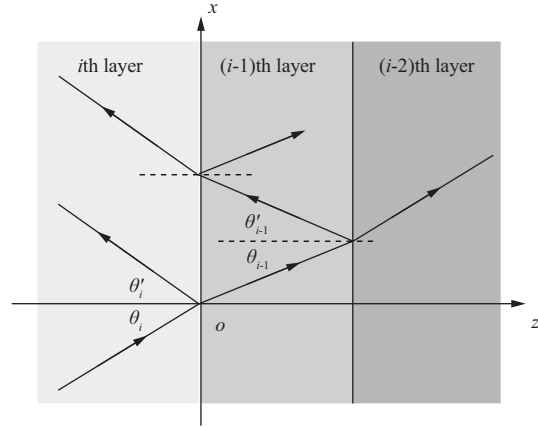


图4 电磁波在多层介质结构中的传播

Fig. 4 Electromagnetic propagation in layered dielectric structure

第*i*层中的入射波与反射波的合成场 E_i 的表达式见式(3)。

$$E_i = E_{iy} \hat{e}_y \quad (3)$$

式中: E_{iy} 为 E_i 的 y 轴分量; $\hat{e}_y$ 为沿 y 轴的单位方向矢量。

令 E_i^+, E_i^- 分别表示入射波与反射波电场的振幅,省略时间因子 $\exp(j\omega t)$,则 E_{iy} 的表达式见式(4)。

$$E_{iy} = E_i^+ a_1 + E_i^- b_1 \quad (4)$$

式中: $a_1 = \exp[-jk_i(x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)]$; $b_1 = \exp[-jk_i(x \sin \theta'_i - z \cos \theta'_i)]$; $k_i = \omega(\epsilon_0 \epsilon_i \mu_0 \mu_i)^{1/2}$,为第*i*层介质中的波数。

由Maxwell旋度方程可得合成磁场 H_i 的两个分量的表达式分别见式(5)、式(6)。

$$H_{ix} = (1/\eta_i)(-\cos \theta_i E_i^+ a_1 + \cos \theta'_i E_i^- b_1) \quad (5)$$

$$H_{iz} = (1/\eta_i)(\sin \theta_i E_i^+ a_1 + \sin \theta'_i E_i^- b_1) \quad (6)$$

式中: $\eta_i = [\mu_0 \mu_i / (\epsilon_0 \epsilon_i)]^{1/2}$,为第*i*层的特征阻抗。

同理,可以得到第*i*-1层中合成电场和合成磁场的分量的表达式分别见式(7)、式(8)、式(9)。

$$E_{(i-1)y} = E_{i-1}^+ a_2 + E_{i-1}^- b_2 \quad (7)$$

$$H_{(i-1)x} = (1/\eta_{i-1})(-\cos \theta_{i-1} E_{i-1}^+ a_2 + \cos \theta'_{i-1} E_{i-1}^- b_2) \quad (8)$$

$$H_{(i-1)z} = (1/\eta_{i-1})(\sin \theta_{i-1} E_{i-1}^+ a_2 + \sin \theta'_{i-1} E_{i-1}^- b_2) \quad (9)$$

式中:

$$a_2 = \exp \{-jk_{i-1} [x \sin \theta_{i-1} + (z - h_{i-1}) \cos \theta_{i-1}]\};$$

$$b_2 = \exp \{-jk_{i-1} [x \sin \theta'_{i-1} - (z - h_{i-1}) \cos \theta'_{i-1}]\}.$$

在第 i 层与第 $i-1$ 层分界面处由相位匹配条件可知, $\theta_i = \theta'_i$ 。

利用第 i 层与第 $i-1$ 层分界面处切向边界条件 $E_{iy} = E_{(i-1)y}$, $H_{ix} = H_{(i-1)x}$, $\mu_i H_{ix} = \mu_{i-1} H_{(i-1)x}$, 并结合式(4)至式(9)可得式(10)、式(11)。

$$(\mu_i \varepsilon_i)^{1/2} \sin \theta_i = (\mu_{i-1} \varepsilon_{i-1})^{1/2} \sin \theta_{i-1} \quad (10)$$

$$\Gamma_i = (A + B\Gamma_{i-1}q)/(B + A\Gamma_{i-1}q) \quad (11)$$

式中: $A = \eta_{i-1} \cos \theta_i - \eta_i \cos \theta_{i-1}$; $B = \eta_{i-1} \cos \theta_i + \eta_i \cos \theta_{i-1}$; $q = \exp(-j2k_{i-1} h_{i-1} \cos \theta_{i-1})$ 。

在 $z=0$ 处, 由第 1 层与金属背板分界面的边界条件可知 $E_{1y}=0$, 由此可计算得到 $\Gamma_1=-1$ 。因此, 通过式(11)可递推确定 n 层介质对斜入射电磁波的反射系数 Γ 表达式, 见式(12)。

$$\Gamma = (C + D\Gamma_n p)/(D + C\Gamma_n p) \quad (12)$$

式中: $C = \mu_n^{1/2} \cos \theta_0 - \varepsilon_0^{1/2} \cos \theta_n$; $D = \mu_n^{1/2} \cos \theta_0 + \varepsilon_0^{1/2} \cos \theta_n$; $p = \exp(-j2k_n h_n \cos \theta_n)$; Γ_n 为第 i 与 $i-1$ 层介质分界面处的反射系数。

同时, 反射系数以分贝(dB)为单位可以表示为式(13)。

$$R = 20 \lg |\Gamma| \quad (13)$$

综上, 当给定入射角 θ_0 后, 首先利用式(10)由外至内依次计算出各层的入射角, 然后利用式(11)由内至外可依次计算出各分界面处的反射系数, 最后将 Γ_n 代入式(12)可得多层介质的反射系数。

3.2 电场平行于入射面

此时磁场只有 y 分量, 电场位于 xz 平面内, 与上述推导过程相同, 可得 $\Gamma_1=-1$ 。 Γ_i 和 Γ 的表达式见式(14)、式(15)。

$$\Gamma_i = (L + M\Gamma_{i-1}h)/(M + L\Gamma_{i-1}h) \quad (14)$$

$$\Gamma = (F + G\Gamma_n p)/(G + F\Gamma_n p) \quad (15)$$

式中: $L = \eta_{i-1} \cos \theta_{i-1} - \eta_i \cos \theta_i$; $M = \eta_{i-1} \cos \theta_{i-1} + \eta_i \cos \theta_i$; $F = \mu_n^{1/2} \cos \theta_n - \varepsilon_0^{1/2} \cos \theta_0$; $G = \mu_n^{1/2} \cos \theta_n + \varepsilon_0^{1/2} \cos \theta_0$ 。

4 电磁特性分析

4.1 算例验证

为验证等效模型的准确性, 选取蜂窝吸波结构的典型结构与材料参数进行算例验证。任意选取参数蜂窝厚度 $h=8$ mm, 网孔大小 $r=3$ mm。芳纶蜂窝骨架厚度 $2w=1$ mm, 骨架相对介电常数 $\varepsilon_1=4$ ^[29], 相对磁导率 $\mu_1=1$ 。为不失一般性, 吸收剂相对介电

常数取为 $\varepsilon_2=12-j1$, 相对磁导率取为 $\mu_2=3-j1$, 吸收剂厚度为 $d=1$ mm, 则由式(1)、式(2)计算可得蜂窝吸波结构的等效相对介电常数为 $\varepsilon_{\text{eff}}=5.5569-j0.2912$, 等效相对磁导率为 $\mu_{\text{eff}}=1.6900-j0.2919$ 。

本文使用的数值验证工具为 CST Microwave Studio 中频域计算模块, 编程后的等效模型计算结果与 CST 全波仿真结果对比如图 5 所示。由对比结果可知, 此时等效模型计算结果在垂直入射和大角度横电波(TE)、横磁波(TM)双极化入射下都与 CST 仿真结果吻合良好, 能够满足蜂窝吸波结构的快速优化设计要求。

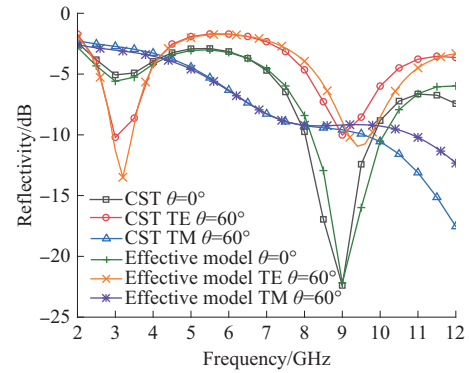


图5 等效模型计算结果与CST仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of effective model calculation results and CST simulation results

4.2 蜂窝高度对电磁特性的影响

图 6 和图 7 给出了在垂直平面波照射下, 不同蜂窝高度对蜂窝吸波结构吸收性能的影响。此时网孔大小 $r=3$ mm, 芳纶蜂窝骨架厚度 $2w=0.04$ mm, 其相对介电常数 $\varepsilon_1=4$, 相对磁导率 $\mu_1=1$ 。吸收剂为常用非磁性炭黑材料, 其相对介电常数取为 $\varepsilon_2=28-j35$ ^[9], 炭黑涂覆厚度为 $d=0.2$ mm。蜂窝高度分别取为 4、6、8、10 mm。

由图 6 结果可知, 伴随蜂窝高度的增大(由 4 mm 增大至 10 mm), 蜂窝吸波结构的吸收峰逐渐向

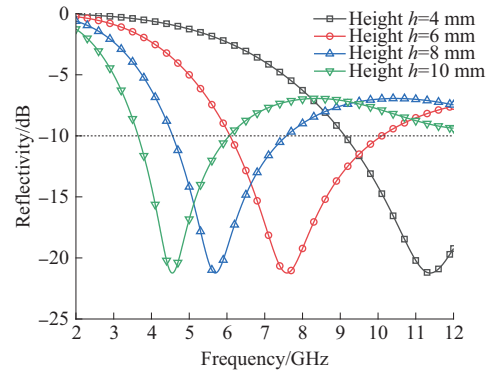


图6 蜂窝高度对反射率的影响

Fig. 6 Influence of the honeycomb height on the reflectivity

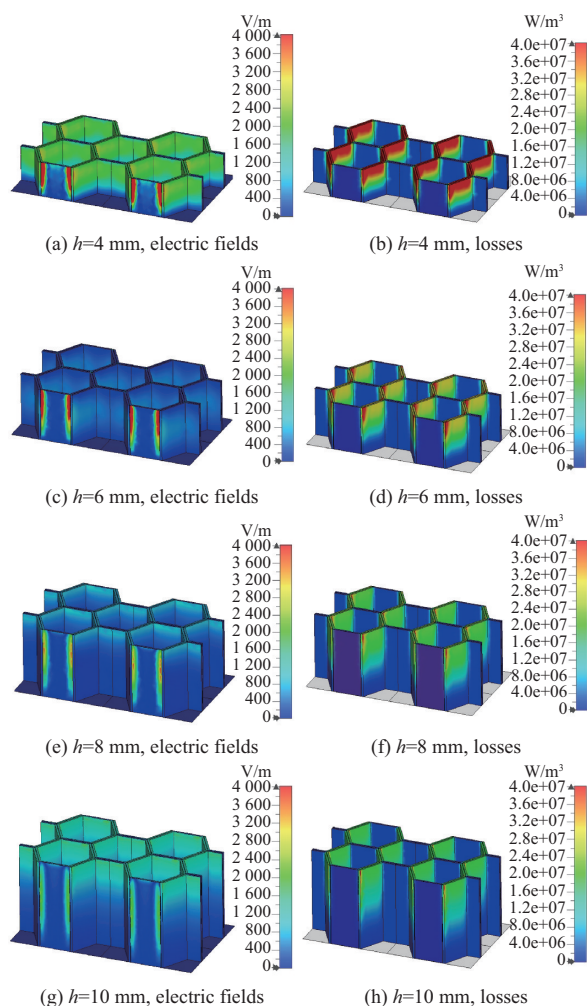


图7 不同蜂窝高度对应吸收峰处的电场与损耗分布

Fig. 7 Distribution of electric fields and losses at the absorption peak of different honeycomb heights

低频移动(由 11.2 GHz 降低至 4.6 GHz),且 -10 dB 吸收带宽逐渐减小。此时蜂窝吸波结构的等效介电常数为 $\epsilon_{\text{eff}}=2.958\ 3-j2.405\ 0$, 等效介质波长为 $\lambda_d \approx \lambda_0 / \sqrt{\text{real}(\epsilon_{\text{eff}})}$, 其中 $\text{real}(\cdot)$ 表示取实部。分析可知,该结构吸收峰均出现在蜂窝高度约为电磁波 1/4 介质波长频点处,此时入射电磁波与经背板反射的电磁波相互干涉,在蜂窝上表面附近电场叠加形成驻波波腹点,吸收剂损耗效果随之增大,从而形成吸收峰。伴随蜂窝高度增大,1/4 介质波长的匹配频率随之降低,导致吸收峰向低频移动。

图 7 为不同高度下蜂窝吸波结构吸收峰附近的电场强度与损耗分布。由电场强度分布可知,此时电场主要分布在不同高度蜂窝的上表面处和相邻蜂窝壁交汇处。其中前者为电场驻波波腹点,产生强损耗吸收,此时对应 1/4 等效介质波长的匹配频

点。与此同时,图 8 为不同蜂窝高度对应吸收峰处的感应电流分布示意图。结合图 7b、7d、7f、7h 和图 8 可知,在沿入射电场方向,吸收剂表层会激励产生感应电流,电流流动时在相邻蜂窝壁交汇处发生方向突变,产生的强电流也会形成强损耗吸收。以上结果表明,电场驻波波腹点和吸收剂表层感应电流方向突变点处的强损耗是该结构吸收峰的主要产生原因。

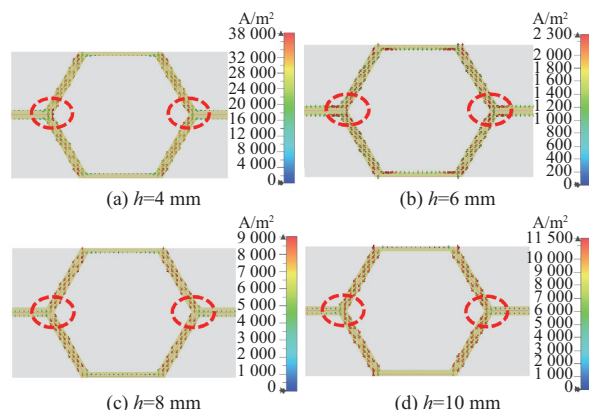


图8 不同蜂窝高度对应吸收峰处的感应电流分布

Fig. 8 Distribution of induced current at the absorption peak of different honeycomb heights

4.3 蜂窝网孔大小对电磁特性的影响

图 9 和图 10 给出了不同网孔大小对蜂窝吸波结构电磁特性的影响。此时蜂窝高度 $h=6\text{ mm}$, 其他参数设置同 4.2。蜂窝网孔大小 r 分别取为 1 mm、2 mm、3 mm 和 4 mm。

由图 9 可知,随着网孔尺寸的逐渐增大(由 1 mm 增至 4 mm),蜂窝结构吸收峰均向高频移动(由 5.7 GHz 升高为 8.7 GHz),吸收峰值不断增大,且伴随 -10 dB 吸收带宽的显著提升(由 26% 提升至 59%)。经计算可知,不同网孔大小下(由 1 mm 增至 4 mm)的蜂窝吸波结构等效介电常数依次为

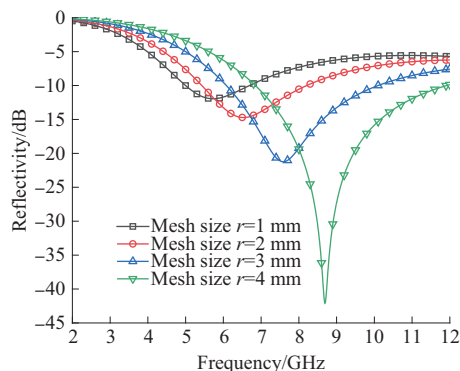


图9 网孔大小对反射率的影响

Fig. 9 Influence of the mesh size on the reflectivity

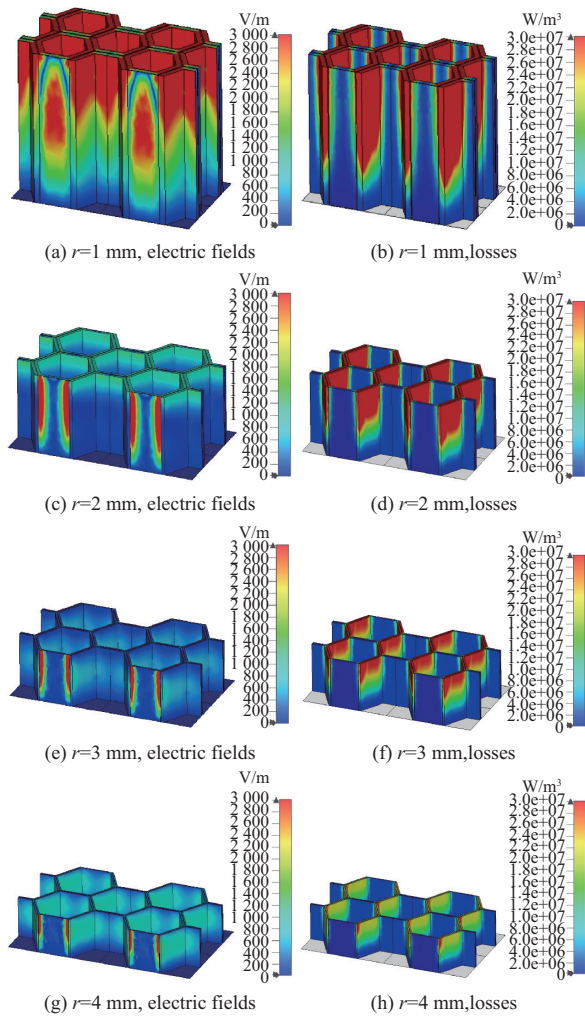


图10 不同蜂窝网孔对应峰值处的电场与损耗分布

Fig. 10 Distribution of electric fields and losses at the absorption peak of different honeycomb mesh sizes

4.495 9-j4.480 0、3.648 9-j3.395 0、2.958 3-j2.405 0、2.455 6-j1.792 8。因此,在炭黑涂覆厚度不变的情况下,网孔尺寸增大导致吸收剂单元占空比下降,进而造成等效介电常数减小,最终对应1/4介质波长的匹配吸收峰逐渐向高频移动。同时由于最小等效介电常数与空气介电匹配性最高,故此时更多电磁能量进入结构中被损耗衰减掉,吸收峰值的对应反射率最小,吸收效果最好。

图10为不同网孔下蜂窝吸波结构吸收峰附近的电场强度与损耗分布。与上文分布规律基本一致,此时电场主要分布在不同高度蜂窝的上表面处和相邻蜂窝壁交汇处,其中前者为电场驻波波腹点,后者为吸收剂涂层表面感应电流方向突变处的强电流点。因此以上两处电场分布较大位置附近均会产生较大介电损耗,从而形成吸收峰。以上结果表明,蜂窝网孔会改变蜂窝的等效电磁参数,进

而影响其吸收峰的频点位置和吸收效果。

4.4 炭黑涂覆厚度对电磁特性的影响

图11和图12给出了不同炭黑涂覆厚度对蜂窝吸波结构电磁特性的影响。此时蜂窝高度 $h=6$ mm,其他参数设置同4.2。炭黑涂覆厚度 d 分别取为0.2 mm、0.3 mm、0.4 mm和0.5 mm。

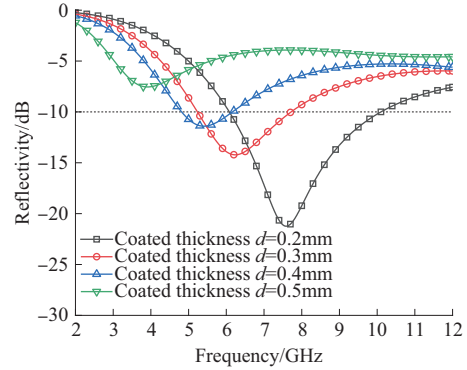


图11 炭黑涂覆厚度对反射率的影响

Fig. 11 Influence of the coated carbon thickness on the reflectivity

由图11可知,随着炭黑涂覆厚度逐渐增大(由0.2 mm增大至0.5 mm),蜂窝吸波结构对应吸收峰逐渐向低频移动(由7.6 GHz降低至3.9 GHz),吸收峰对应的最小反射率随之增大(由-21 dB增大至-7.5 dB),-10 dB吸收带宽不断减小直至消失(由49%减小为0),整体吸收效果减弱。此时不同炭黑涂覆厚度的对应等效介电常数分别为2.958 3-j2.405 0、3.966 7-j3.644 3、4.993 0-j4.919 9、8.746 6-j9.571 3。因此,在蜂窝网孔尺寸不变的情况下,炭黑涂覆厚度增大会增加吸收剂单元占空比,进而导致等效介电常数逐渐升高,最终对应1/4介质波长的匹配吸收峰逐渐向低频移动。同样由于最小等效介电常数的对应等效特性阻抗与空气介电匹配性最高,故此时更多电磁波会进入结构中被损耗衰减,吸收效果最好。

图12为不同炭黑涂覆厚度下的蜂窝吸波结构电场与损耗分布。与上文分析结果类似,最大电场强度主要分布在蜂窝结构的上表面处和沿电场方向的两端蜂窝壁处,其中前者对应电场驻波波腹点,后者对应吸收剂表面感应电流方向突变处的强电流点。因此,在以上两个位置附近会产生大幅介电损耗,形成吸收峰。与前文不同的是,此处虽炭黑涂覆厚度不同,但蜂窝网孔与高度尺寸均保持一致,故随炭黑涂覆厚度增大,图12中的最大损耗位置均出现在1/4介质波长高度处,且最大损耗数值依次减小,与图10中的最小反射率变化规律一致。

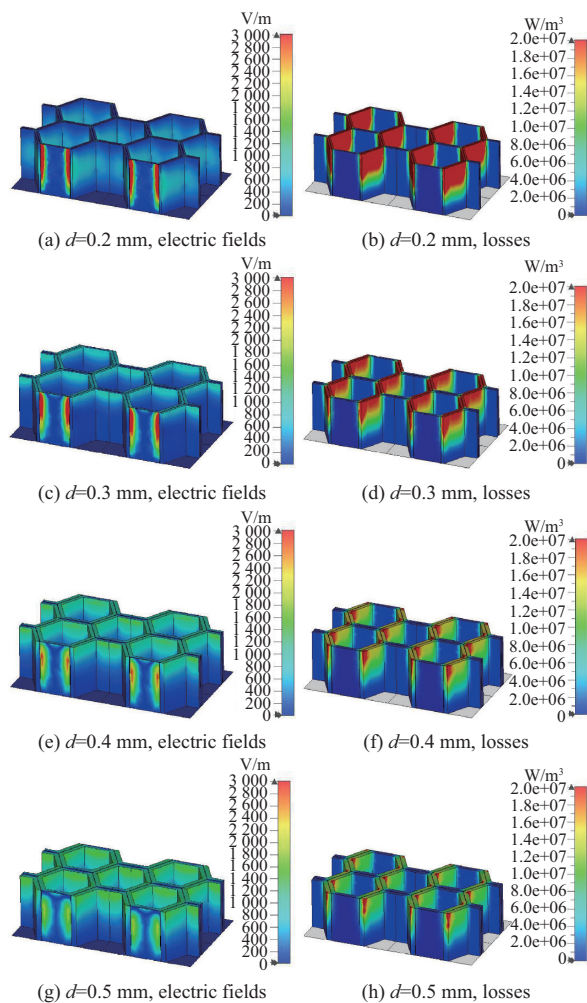


图12 不同吸收剂厚度对应吸收峰处的电场与损耗分布

Fig. 12 Distribution of electric fields and losses at the absorption peak of different coated carbon thickness

同时以上结果也表明,在蜂窝吸波结构中,虽然炭黑吸收剂是主要损耗材料,但需要对其涂覆厚度进行合理介电匹配设计后才能发挥最佳吸收效果。

4.5 入射角度对电磁特性的影响

图13至图15给出了不同入射角对蜂窝吸波结构电磁特性的影响。此时蜂窝高度 $h=6$ mm,其他参数设置同4.2。

由图13可知,伴随电磁波入射角逐渐增大,蜂窝吸波结构在不同极化波的对应吸收峰表现出两种截然不同的变化趋势。其中,TE波情况下,入射角增大时吸收峰频点在7.6 GHz附近基本保持不变,但对应峰值反射率逐渐增大(由-21 dB增大至-7.7 dB),吸收效果恶化。而TM波情况下,入射角增大时吸收峰频点逐渐向高频移动(由7.6 GHz增大至10.9 GHz),且伴随峰值反射率减小和-10 dB吸收带宽增大,整体能量吸收效果提升。

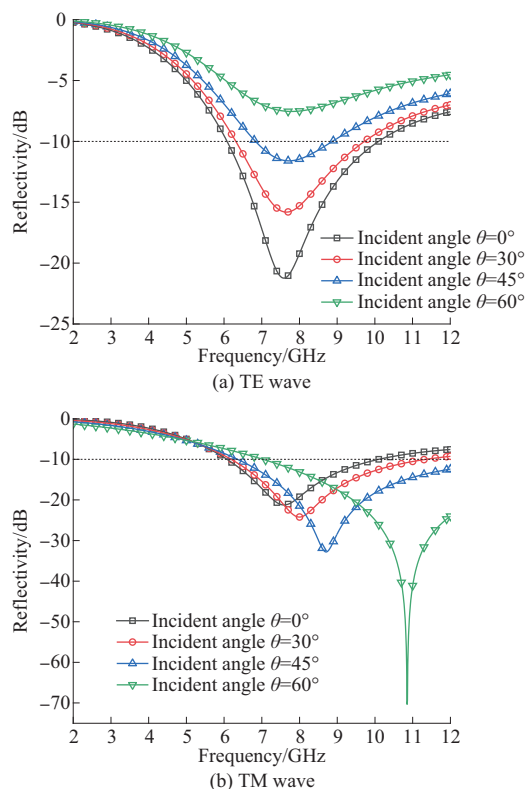


图13 入射角对反射率的影响

Fig. 13 Influence of the incident angle on the reflectivity

根据经典电磁场理论可知,斜入射时TE波下的蜂窝等效介质波长约为 $\lambda_d^{\text{TE}} \approx \lambda_0 / [\sqrt{\text{real}(\epsilon_{\text{eff}})} \cdot \cos \theta]$,而TM波下的蜂窝等效介质波长约为 $\lambda_d^{\text{TM}} \approx \lambda_0 \cos(\theta) / \sqrt{\text{real}(\epsilon_{\text{eff}})}$ 。当入射角 θ 增大时,TE波的等效介质波长 λ_d^{TE} 趋近于无穷大,1/4介质波长也随之趋近无穷大,与实际蜂窝高度失配严重,故TE波斜入射时的蜂窝吸波效果会随入射角增大而快速恶化。此时,TM波的1/4介质波长会逐渐减小,因此其匹配吸收峰会向高频移动。由于其对应特性阻抗与空气介电匹配性最高,故此时更多电磁波会进入结构中被损耗衰减,吸收效果最好。

图14和图15给出了斜入射时,不同极化入射波下蜂窝吸波结构对应吸收峰处的电场与损耗分布。由损耗结果可知,在TE波情况下,伴随入射角增大,吸收峰对应最大能量损耗分布区域逐渐减小,整体吸收效果降低。而在TM波情况下,入射角增大时,蜂窝上表面处的强电场分布区域逐渐增大,能量损耗增大,故吸收峰处的整体吸收效果增强。仿真结果与前文规律性分析结果保持一致,验证了前文分析结果的正确性。

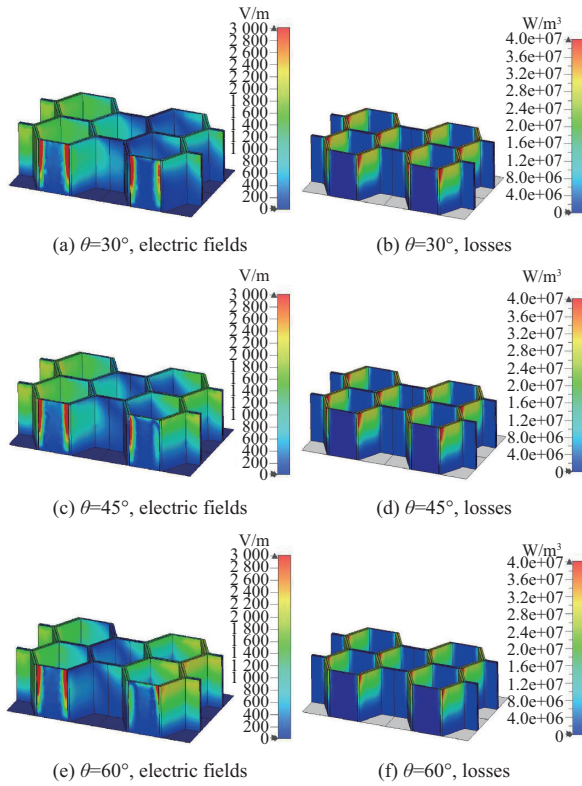


图 14 不同入射角对应 TE 波吸收峰处的电场与损耗分布

Fig. 14 Distribution of electric fields and losses at the absorption peak of different incident angles of TE mode

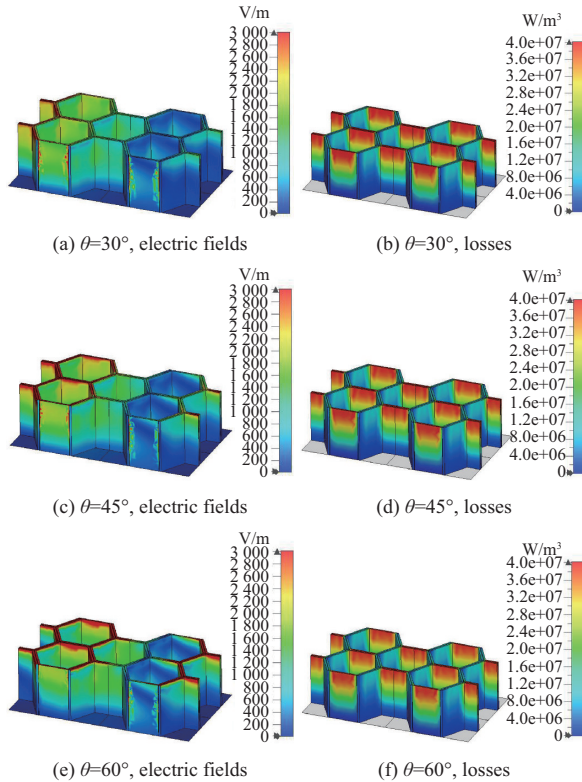


图 15 不同入射角对应 TM 波吸收峰处的电场与损耗分布

Fig. 15 Distribution of electric fields and losses at the absorption peak of different incident angles of TM mode

5 结论

(1)等效电磁模型可用于复杂芳纶纸基蜂窝吸波结构的快速优化设计。

(2)电场驻波波腹点和吸收剂表层感应电流方向突变点处的强损耗是该结构吸收峰的主要产生原因,其中前者对应 1/4 等效介质波长匹配点。

(3)增大蜂窝高度会降低 1/4 等效介质波长匹配频点,导致吸收峰频点向低频移动。其中,蜂窝高度由 4 mm 增大至 10 mm 时,其最大吸收频点将由 11.2 GHz 降低至 4.6 GHz。

(4)减小网孔尺寸、增大炭黑厚度均会增加蜂窝结构的等效介电常数,导致吸收峰频点向低频移动,同时 -10 dB 吸波带宽变化显著。其中,蜂窝网孔由 4 mm 减小至 1 mm 时,其 -10 dB 吸收带宽将由 59% 大幅缩减至 26%;炭黑涂覆厚度由 0.2 mm 增大至 0.5 mm 时,其 -10 dB 吸收带宽将由 49% 逐渐减小至 0。

(5)斜入射时,蜂窝吸波结构反射率在 TE 和 TM 波入射情况下呈现不同变化规律。随入射角增大,TE 波吸收峰频点基本不变,对应最小反射率增大,吸波效果恶化;TM 波吸收峰频点向高频移动,对应最小反射率减小,吸收效果增强。其中入射角由 0° 增大至 60° 时,TE 波吸收峰频点在 7.6 GHz 附近基本不变,而 TM 波吸收峰频点将由 7.6 GHz 增大至 10.9 GHz。

参考文献

- [1] 刘顺华,刘军民,董星龙.电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 2版.北京:化学工业出版社,2014.
LIU Shunhua, LIU Junmin, DONG Xinglong. Electromagnetic wave shielding and absorbing materials[M]. 2nd ed. Beijing:Chemical Industry Press, 2014.
- [2] KONG J A. Electromagnetic wave theory[M]. New York: Wiley, 1986.
- [3] HASHIN Z, SHTRIKMAN S. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials[J]. Journal of Applied Physics, 1962, 33(10):3 125-3 131.
- [4] 邢丽英,刘俊能.蜂窝夹层结构吸波材料研究[J].材料工程, 1992, 20(6):15-18.
XING Liying, LIU Junneng. The study of honeycomb sandwich microwave absorbing materials[J]. Journal of Materials Engineering, 1992, 20(6):15-18.
- [5] SMITH F C. Effective permittivity of dielectric honeycombs[J]. IEE Proceedings -Microwaves, Antennas and Propagation, 1999,

- 146(1):55–59.
- [6] JOHANSSON M, HOLLOWAY C L, KUESTER E F. Effective electromagnetic properties of honeycomb composites, and hollow-pyramidal and alternating-wedge absorbers[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(2):728–736.
- [7] 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[J]. *物理学报*, 2008, 57(8):5 261–5 266.
- HE Yanfei, GONG Rongzhou, WANG Xian, et al. Study on equivalent electromagnetic parameters and absorbing properties of honeycomb-structured absorbing materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8):5 261–5 266.
- [8] 赵宏杰, 嵇培军, 胡本慧, 等. 蜂窝夹层复合材料的吸波性能[J]. *宇航材料工艺*, 2010, 40(2):72–73, 76.
- ZHAO Hongjie, JI Peijun, HU Benhui, et al. Absorbing properties of honeycomb sandwich composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2010, 40(2):72–73, 76.
- [9] ZHOU P H, HUANG L R, XIE J L, et al. A study on the effective permittivity of carbon/PI honeycomb composites for radar absorbing design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(8):3 679–3 683.
- [10] KHURRAM A A, ALI N, RAKHA S A, et al. Optimization of the carbon coating of honeycomb cores for broadband microwave absorption[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(5):1 061–1 066.
- [11] ZHOU P H, HUANG L R, XIE J L, et al. Prediction of microwave absorption behavior of grading honeycomb composites based on effective permittivity formulas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(8):3 496–3 501.
- [12] 赵雨辰, 万国宾. 基于强扰动理论的蜂窝结构等效电磁模型研究[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(2):321–326.
- ZHAO Yuchen, WAN Guobin. Equivalent electromagnetic model for honeycomb structure based on strong fluctuation theory[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(2):321–326.
- [13] ZHAO Y C, LIU J F, SONG Z G, et al. Novel closed-form expressions for effective electromagnetic parameters of honeycomb radar-absorbing structure[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(5):1 768–1 778.
- [14] ZHAO Y C, LIU J F, SONG Z G, et al. Novel design method for grading honeycomb radar absorbing structure based on dispersive effective permittivity formula[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16:1 281–1 284.
- [15] 赵雨辰, 刘江凡, 宋忠国, 等. 覆盖蜂窝吸波结构的有限大目标 RCS 计算与优化[J]. *西安理工大学学报*, 2016, 32(2):169–172.
- ZHAO Yuchen, LIU Jiangfan, SONG Zhongguo, et al. RCS calculation and optimization of limited size object coated with honeycomb absorbing structure[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2016, 32(2):169–172.
- [16] RINALDI A, PROIETTI A, TAMBURRANO A, et al. Graphene-coated honeycomb for broadband lightweight absorbers[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(5):1 454–1 462.
- [17] HE F, SI K X, ZHA D C, et al. Broadband microwave absorption properties of a frequency-selective surface embedded in a patterned honeycomb absorber[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(4):1 290–1 294.
- [18] HE F, SI K X, LI R, et al. Frequency selective surface composites with honeycomb absorbing structure for broadband applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(9):8 643–8 647.
- [19] 吴润鑫, 李芳, 张海宇, 等. 嵌入式蜂窝超结构的设计与微波吸收性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2024, 46(9):11–20, 108.
- WU Runxin, LI Fang, ZHANG Haiyu, et al. Integrated design and performance study of absorption/carrier for an embedded honeycomb superstructure[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2024, 46(9):11–20, 108.
- [20] 牛磊, 郑磊, 潘文辉, 等. 多层复合蜂窝芯结构优化设计及其宽带吸波性能研究[J]. *微波学报*, 2024, 40(3):34–39.
- NIU Lei, ZHENG Lei, PAN Wenhui, et al. Optimization design of multi-layer composite honeycomb core structure and research on its broadband absorbing performance[J]. *Journal of Microwaves*, 2024, 40(3):34–39.
- [21] 张亚发, 刘文言, 刘辰旭, 等. 孔向和径向蜂窝梯度浸渍对比[J]. *复合材料科学与工程*, 2024(6):118–122, 128.
- ZHANG Yafa, LIU Wenyan, LIU Chenxu, et al. Comparison of cellular gradient impregnation with hole incidence and radial incidence[J]. *Composites Science and Engineering*, 2024(6):118–122, 128.
- [22] 屈嘉煜, 刘文言, 李志超, 等. 浸渍工艺对不同厚度蜂窝吸波材料性能的影响研究[J]. *化工新型材料*, 2025, 53(9):170–174, 179.
- QU Jiayu, LIU Wenyan, LI Zhichao, et al. Study on the influence of impregnation process on the properties of honeycomb absorbing materials with different thicknesses[J]. *New Chemical Materials*, 2025, 53(9):170–174, 179.
- [23] 何凡召. 结构型电磁吸波材料等效媒质理论研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- HE Fanzhao. The equivalent medium theory study of structural electromagnetic wave-absorbing materials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025.
- [24] 礼嵩明, 刘雨舜, 郭闻, 等. 非均质孔格结构材料电磁性能分析[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(8):4 368–4 375.
- LI Songming, LIU Yushun, GUO Wen, et al. Analysis of electromagnetic properties of heterogeneous lattice structure materials [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(8):4 368–4 375.