

# MNZ材料在蜂窝吸波结构中的应用

张彪 陈乐 孙惠敏 顾兆梅

(南京大学电子科学与工程学院, 南京 210023)

**文 摘** 针对传统蜂窝吸波材料在低频段吸波效果差的特点,设计了一种蜂窝内壁加载回字形导线的复合吸波结构。这种回形线组合成的二维阵列本身是一种磁导率近零的频率选择表面。采用的蜂窝吸波结构高度为30 mm,吸波涂层厚度0.024 2 mm。仿真结果表明,加载回形线的复合吸波结构相较原蜂窝,在0.4~2 GHz内出现吸收峰,<-10 dB带宽增加10%~50%,并且在入射角0°~60°内具有良好的吸波稳定性。可通过调节回形线的几何参数与材料方阻,实现吸低频收峰位置与带宽的调控。

**关键词** 蜂窝吸波材料,超材料,磁导率近零,吸波性能,宽带大角度

中图分类号:TB333

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.XXXX.XX.001

## Application of MNZ Material in Honeycomb Absorbing Structure

ZHANG Biao CHEN Le SUN Huimin GU Zhaozhan

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

**Abstract** In view of the poor absorbing effect of traditional honeycomb absorbing materials at low frequency, a composite absorbing structure of honeycomb inner wall loaded with zigzag wire is designed. The two-dimensional array is a frequency selective surface with near zero permeability. The height of honeycomb absorbing structure is 30 mm and the thickness of absorbing coating is 0.024 2 mm. The simulation results show that compared with the original honeycomb, the composite absorption structure loaded with the loop line has an absorption peak in the range of 0.4 to 2 GHz, the bandwidth of < -10 dB increases by 10% to 50%, and has good absorption stability in the range of 0° to 60° incidence angle. By adjusting the geometrical parameters of the loop and the square resistance of the material, the position and the bandwidth of the low-frequency peak absorption can be adjusted.

**Key words** Honeycomb absorbing material, Metamaterial, Permeability near zero, Absorbing performance, Wide band and large angle

### 0 引言

蜂窝吸波结构是一种典型的结构型吸波材料,其质量轻、热导率低兼具良好的力学性能和吸波性能,应用广泛<sup>[1-3]</sup>。传统的吸波蜂窝主要以芳纶纸蜂窝为骨架,浸渍碳系或磁性金属微粉等具有复电磁参数的吸波涂料,使入射电磁波在蜂窝腔体内进行多次散射损耗,从而实现优异的宽频吸波效果。随着雷达探测领域的不断发展,P波段、L波段等低频吸波性能较差已成为制约蜂窝吸波材料应用的瓶颈问题。针对传统吸波材料在P波段与L波段吸波效果的明显短板,仅仅从材料学的角度,通过研发新型吸收剂来实现超宽频吸波同时兼顾低频段吸波效果,近年来已愈发困难。

鉴于此,许多学者提出利用电磁超材料良好的低频吸波性能,将传统吸波材料与超材料结合,以实现改善传统吸波材料的低频劣势,拓展吸波带宽<sup>[4-6]</sup>。本文以此目的,基于一种磁导率近零超材料<sup>[7-9]</sup>,设计复合蜂窝吸波结构。

### 1 复合蜂窝吸波结构设计

复合蜂窝吸波结构由芳纶纸折叠拉伸成孔格边长为 $c=2.75$  mm正六边形周期蜂窝作为骨架,高度为 $h_0=30$  mm,如图1所示,浸渍吸波涂料,其电磁参数如图2所示。涂料理论厚度由增重得出:

$$d_r = \frac{\sqrt{3}}{2} c \left( 1 - \frac{3\rho_h}{8\rho_{hr}} - \sqrt{\left( 1 - \frac{3\rho_h}{8\rho_{hr}} \right)^2 - A \frac{\rho_h}{\rho_{hr}}} \right) \quad (1)$$

式中, $\rho_h$ 为蜂窝表观密度, $\rho_{hr}$ 为蜂窝壁真密度, $c$ 为蜂

收稿日期:2020-05-21

第一作者简介:张彪,1992年出生,硕士,主要从事电磁仿真方面的研究工作,E-mail:mg1623010@smail.nju.edu.cn

通信作者:顾兆梅,1963年出生,教授,主要从事电磁功能材料的设计与研制工作,E-mail:tommygu@nju.edu.cn

窝边长;A为蜂窝增重。

所采用的回形线结构单元线宽与线间距均设为  $w=0.2\text{ mm}$ ,单元整体长度  $h=20\text{ mm}$ ,采用2.5匝螺旋结构(图3)。单元材料为铜,整体厚度为  $0.02\text{ mm}$ ,宽  $2.6\text{ mm}$ 。其本身阵列结构具有磁导率近零特性,,反射系数为:

$$r = \frac{\varepsilon_{1z} \cos\theta + ik_0 \mu_{1z} \varepsilon_{1z} d - ik_0 d \sin^2\theta}{\varepsilon_{1z} \cos\theta - ik_0 \mu_{1z} \varepsilon_{1z} d + ik_0 d \sin^2\theta} \quad (2)$$

式中, $d$ 为阵列整体厚度, $\theta$ 为电磁波入射角, $k_0$ 为真空波数。

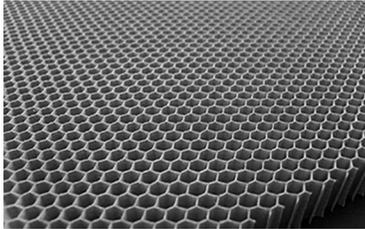


图1 芳纶纸蜂窝骨架

Fig. 1 Aramid paper honeycomb

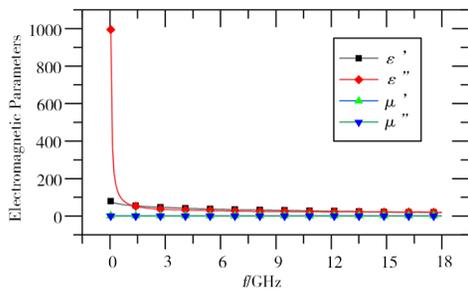


图2 吸波涂料电磁参数

Fig. 2 Electromagnetic relative parameters of absorbing coatings

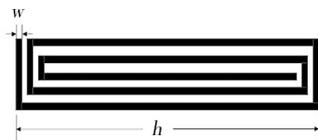


图3 回形线单元

Fig. 3 Homocentric squares array element

将回形线结构单元内贴于蜂窝吸波涂层内表面中间位置,使其长边方向与蜂窝高度方向一致,如图4、5所示。

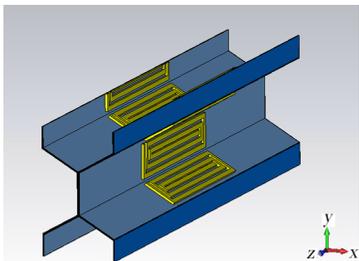


图4 复合蜂窝吸波结构模型图

Fig. 4 Model of composite honeycomb absorbing structure

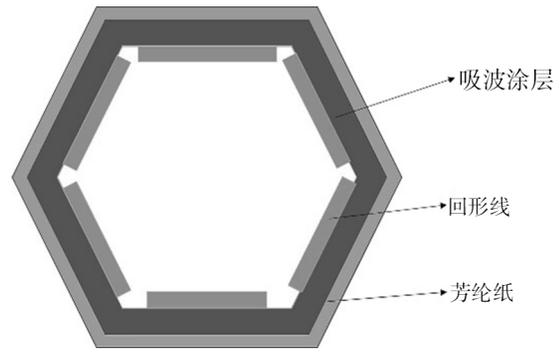


图5 复合蜂窝吸波结构组分图

Fig. 5 Constitutional diagram of composite honeycomb absorbing structure

## 2 仿真结果与讨论

### 2.1 超材料单元的加载对浸渍蜂窝的影响

首先利用基于有限元算法的CST软件,仿真得到未加载回形线结构单元的纯蜂窝结构  $S_{11}$  参数(反射系数)。后将所设计的复合蜂窝结构,在  $w=0.2\text{ mm}$ 、 $h=20\text{ mm}$  条件下以同样的周期边界条件进行仿真计算,得到在该设定尺寸下复合吸波结构的反射系数,与前文所述未加载回形线单元的纯蜂窝反射系数进行对比,从图6可以看出,加载回形线结构单元后,蜂窝吸波结构在  $2.8$  和  $8.8\text{ GHz}$  处出现了明显的谐振峰。

为了研究回形线单元在蜂窝中所处的位置对整体吸波性能的影响。将回形线单元由中间位置下移使其底边与蜂窝地面重合,令  $w=0.2\text{ mm}$ 、 $h=15$ 、 $20\text{ mm}$  进行仿真,并与在相同  $w$ 、 $h$  值的情况下,回形线单元加载于蜂窝中间位置的仿真结果进行对比。发现中间加载单元的蜂窝在  $0.4\text{ GHz}$  处出现吸收峰,而低端加载单元的蜂窝并无  $0\sim 2\text{ GHz}$  内的吸收峰。分析认为,低频吸收峰出现的主要原因是回形线单元电磁谐振的结果,将单元置于蜂窝底端,其上方的反射层增厚,对低频反射能力增大。

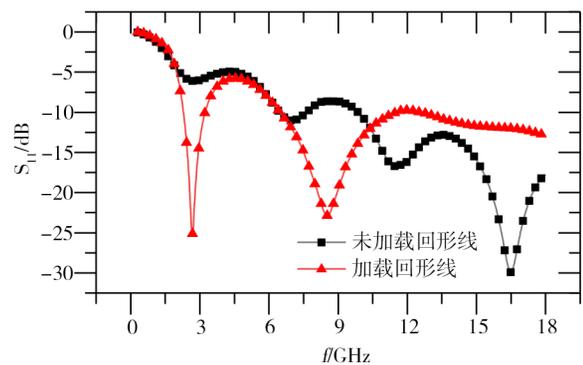


图6 吸波蜂窝有无加载回形线单元  $S_{11}$  对比

Fig. 6  $S_{11}$  comparison of absorbing honeycomb loading homocentric squares array element or not

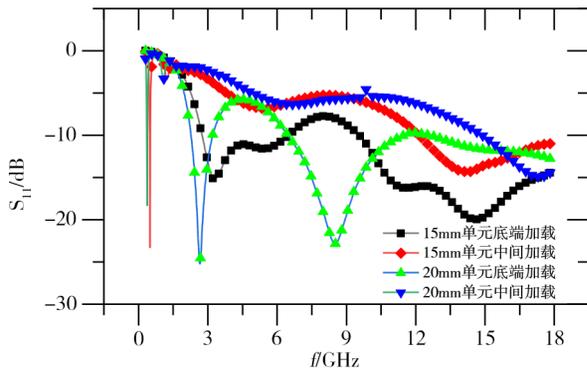


图7 回形线单元不同加载方式 $S_{11}$ 对比图

Fig. 7  $S_{11}$  comparison of homocentric squares array element with different approaches

## 2.2 超材料单元面积对吸波性能的影响

回形线单元的面积同样会对整体吸波性能产生影响。为此,选择单元底端加载方式,设计两种仿真方案:一是在 $w=0.2\text{ mm}$ 条件下,令 $h=10、20\text{ mm}$ 进行仿真;二是在 $h=15\text{ mm}$ 条件下令 $W=0.1、0.2\text{ mm}$ 进行仿真。得到 $S_{11}$ 曲线分别如图8、9所示,回形线面积主要影响的是高频吸波性能,这是由于高频吸波主要依赖吸波涂料, $w$ 和 $h$ 的增加均会导致单元面积增大,进而使得吸波涂料暴露面积减少,使其对电磁波的损耗降低。

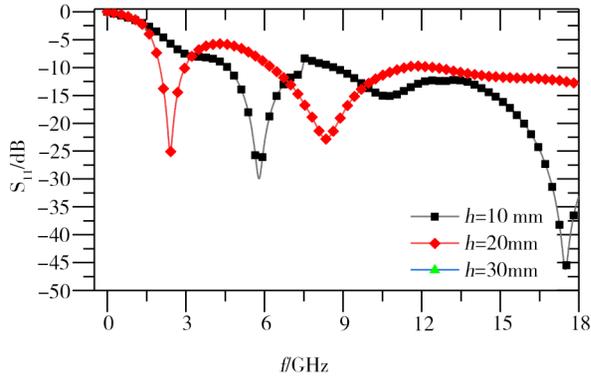


图8 单元长度对吸波性能的影响

Fig. 8 Effect of unit element length on absorbing performance

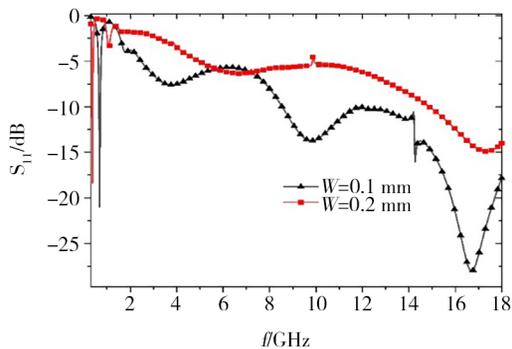


图9 单元线宽对吸波性能的影响

Fig. 9 Effect of unit element linewidth on absorbing performance

## 2.3 有耗介质超材料对吸波性能的影响

单元材料的导电性能是影响整体吸波性能的另一重要因素。图10是在 $w=0.15\text{ mm}$ 、 $h=15\text{ mm}$ 单元处于中间加载方式下,将单元材料的方阻设为 $R=0.05、5、500\ \Omega$ 时得到的 $S_{11}$ 仿真曲线。单元材料的方阻增大时低频吸收峰向右移,高方阻使电磁波可穿透 $0.02\text{ mm}$ 厚度的单元层,此时回形线单元的存在对高频吸波影响较少,内部的有耗介质反而对高频吸波性能有帮助作用,但低频谐振的效果降低。方阻为 $500\ \Omega$ 时,在 $0\sim 2\text{ GHz}$ 内无谐振峰出现,使用有耗介质超材料将显著影响复合蜂窝的低频吸波性能,尽管理论上浸渍蜂窝本身与超材料阵列的吸波性能的发 挥不应完全独立,两者之间会存在耦合作用,但在复合蜂窝结构的设计过程中应尽量保证超材料本身的低频谐振性能。

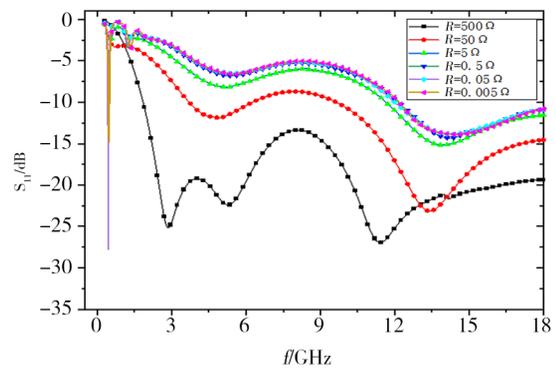


图10 单元材料方阻对吸波性能的影响

Fig. 10 Effect of square resistance of unit element materials on absorbing properties

## 2.4 复合蜂窝结构大角度对吸波性能的影响

改变电磁波的人射角度进行仿真,可以得到吸波结构的大角度吸波性能。取入射角 $\theta=0^\circ、30^\circ、60^\circ$ ,分别在TM和TE模式下进行仿真。仿真结果显示如图11、12所示,复合蜂窝吸波结构具有良好的大角度吸波性能。

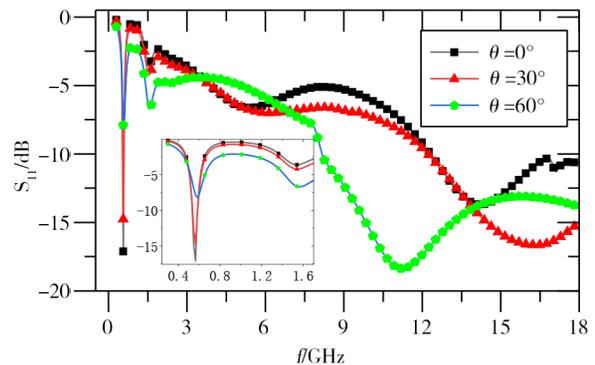


图11 TM模式下不同入射角 $S_{11}$ 图

Fig. 11  $S_{11}$  of different incident angles in TM mode

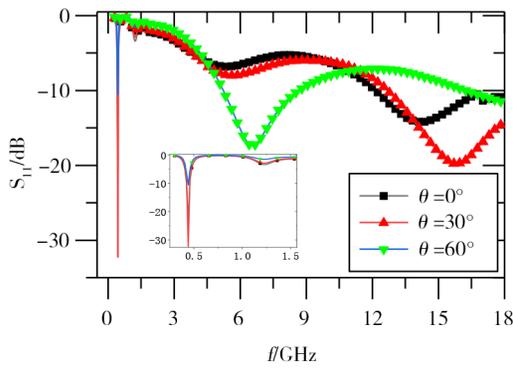


图 12 TE 模式不同入射角  $S_{11}$  图

Fig. 12  $S_{11}$  of different incident angles in TE mode

### 3 结论

基于一种磁导率近零超材料,将其与吸波蜂窝材料进行复合设计,利用 CST 软件进行仿真,在 0.4~2 GHz 出现吸收峰,<-10 dB 带宽平均增加 20%,并且在入射角  $0^\circ\sim 60^\circ$  内具有良好的吸波稳定性。通过调节回形线的几何参数与材料电导率,实现吸低频收峰位置与带宽的调控。验证了传统蜂窝吸波材料与超材料结合的可行性,拓展了传统吸波材料研究思路。

#### 参考文献

[1] HE Y F, GONG R Z, CAO H, et al. Preparation and microwave absorption properties of metal magnetic micropowder-coated honeycomb sand with structures [J]. SMARTMATERIALS ANDSTRUCTURES, 2007, 16: 1501-1505

[2] 陈雪刚,叶瑛,程继鹏. 电磁波吸收材料的研究进展 [J]. 无机材料学报,2011,26(5):449-457.

CHEN X G, YE Y, CHENG J P. Recent Progress in

Electromagnetic Wave Absorbers [J]. Journal of Inorganic Materials, 2011,26(5):449-457.

[3] ZHAO Y C, WAN G B. Simulation study on equivalent electromagnetic models of honeycomb structure [J]. Journal of Microwaves,2013,29( 1) : 38-45

[4] 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]. Transactions on Antennas and Propagation,2012,60(8):3679-3683

[5] 礼嵩明,吴思保,王甲富,等. 含超材料的新型蜂窝夹层结构吸波复合材料[J]. 航空材料学报,2019,39(3): 94-99.

LI S M, WU S B , WANG J F, et al. Novel honeycomb sandwich structure wave-absorbing composites with metamaterials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39 (3):94-99.

[6] WANG M L , LI J Q , LIU X , et al. Research on influence of special-shaped honeycomb radar absorbing structure for wide-band absorbing design[J]. The Journal of Engineering, 2019(20):6723-6728.

[7] 陈育秋,祖亚培,宫骏,等. 有耗频率选择表面吸波复合材料的电磁性能[J]. 材料研究学报,2018,32(8):567-574.

CHEN Y Q, ZU Y P, et al. Electromagnetic Property of Honeycomb Absorbing Composites with Lossy Frequency Selective Surface. [J] Chinese Journal of Materials Research, 2018,32(8):567-574.

[8] HUANG D Q, KANG F Y, ZHOU Z H. An "H"-shape three-dimensional meta-material used in honeycomb structure absorbing material[J]. Appl. Phys. A,2015,118:1099-1106.

[9] ZHANG S M, HE S L. Ultrathin and lightweight microwave absorbers made of mu-near-zero metamaterials [J]. Scientific Reports,2013,3(8):2083-2088.