

A型蒙皮复合蜂窝结构设计及其吸波性能

邢孟达 马向雨 宫元勋 吕通 李策 赵宏杰

Design and wave absorbing properties of honeycomb with A-type skin

XING Mengda, MA Xiangyu, GONG Yuanxun, LV Tong, LI Ce, ZHAO Hongjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210414.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型碳基磁性复合吸波材料的研究进展

Research progress of new carbon based magnetic composite electromagnetic waveabsorbing materials

复合材料学报. 2020, 37(12): 3004–3016 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200825.002>

水热法制备高反射率TiO₂壳层中空玻璃微球

Preparation of TiO₂ shelled hollow glass microspheres with high reflectivity by hydrothermal method

复合材料学报. 2021, 38(10): 3514–3521 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210105.001>

铁氧体及其复合吸波材料的研究进展

Research progress of ferrite and its composite absorbing materials

复合材料学报. 2020, 37(11): 2684–2699 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200727.002>

结构参数对CFRP蒙皮-铝蜂窝夹层板低速冲击性能的影响

Effect of structural parameters on the low-velocity impact performance of aluminum honeycomb sandwich plate with CFRP face sheets

复合材料学报. 2020, 37(6): 1352–1363 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190815.001>

复合材料负泊松比格栅结构设计及力学性能评价

Structural design and mechanical characterization of an auxetic advanced grid structure composite

复合材料学报. 2021, 38(4): 1107–1114 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200623.002>

Fe₃O₄@锂铝硅微晶玻璃/还原氧化石墨烯复合材料的制备和吸波性能

Preparation and microwave absorbing properties of Fe₃O₄@lithium aluminum silicate glass ceramic/reduced graphene oxide composite

复合材料学报. 2019, 36(11): 2651–2664 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181224.002>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210414.003

A 型蒙皮复合蜂窝结构设计及其吸波性能

邢孟达*, 马向雨, 宫元勋, 吕通, 李策, 赵宏杰

(航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)



分享本文

摘要: 针对引入蒙皮材料导致吸波蜂窝 26.5~40 GHz 频段吸波性能退化的问题, 对蒙皮的结构进行了改进设计, 研究了 A 型蒙皮结构对多层蜂窝吸波性能的影响机制及规律, 并得到了最优的蒙皮结构参数。研究表明, 设计的 A 型结构, 可有效改善蒙皮的高频段透波性能。随着 A 型蒙皮中透波蜂窝厚度的增加, 复合吸波蜂窝在 2~18 GHz 频段内的吸波性能保持在相当的水平, 在 26.5~40 GHz 波段吸波性能先升高后降低, 透波蜂窝的最优厚度为 2 mm。基于 5 种不同电磁特性的吸波蜂窝片材料, 设计制备的具有 0.3 mm 石英布/2 mm 透波蜂窝/0.3 mm 石英布蒙皮结构的复合蜂窝在 2~18 GHz 及 26.5~40 GHz 的超宽频带内具备优异的吸波性能, 与仿真优化结果保持一致。

关键词: 吸波蜂窝; A 型蒙皮; 宽频; 反射率; 阻抗匹配

中图分类号: TM25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)03-1180-06

Design and wave absorbing properties of honeycomb with A-type skin

XING Mengda*, MA Xiangyu, GONG Yuanxun, LV Tong, LI Ce, ZHAO Hongjie
(Aerospace Institute of Advanced Material & Processing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to solve the problem of wave absorption performance degradation in the 26.5-40 GHz frequency band caused by the introduction of skin material, the design of the skin structure was improved, the influence mechanism and law of A-type skin structure on the wave absorption performance of multi-layer honeycomb were studied, and the optimal structure parameters of A-type skin were obtained. The research results show that the A-type skin can improve the high frequency wave-transmitting property effectively. With the thickness of the honeycomb increasing, the reflectivity in the 2-18 GHz frequency band remains at the same level and the reflectivity in the 26.5-40 GHz frequency band increases at first and then decreases. The optimal thickness of the honeycomb is 2 mm. Based on five kinds of absorbing honeycomb sheets, the composite honeycomb was designed and prepared with the structure of quartz cloth (0.3 mm)/wave-transmitting honeycomb (2 mm)/quartz cloth (0.3 mm). The optimized absorbing honeycomb has excellent absorbing property in the wide frequency band of 2-18 GHz and 26.5-40 GHz, which is corresponding to the simulation result.

Keywords: absorbing honeycomb; A-type skin; broadband; reflectivity; impedance matching

吸波材料的研制与应用技术源于第二次世界大战期间, 如今已进入了深化研究与广泛应用阶段^[1]。吸波材料按照应用形式可以划分为涂覆型、贴片型及结构型等多种类别, 以吸波蜂窝/泡沫为代表的轻质吸波材料是结构型吸波材料类别下的重要分支^[2-5]。吸波泡沫材料一般通过在泡沫基体中加入羰基铁粉、炭黑或短切碳纤维等吸收剂得到^[6-9],

吸波蜂窝材料则一般通过在芳纶蜂窝芯壁上浸渍混有炭黑的胶液^[10-12], 或者在造纸时直接掺杂短切碳纤维得到^[13]。为了拓宽吸波蜂窝的吸波带宽, 一般将吸波蜂窝设计为多层阻抗渐变结构^[14-15], 并通过电磁仿真算法进行吸波结构的优化^[16-19]。

随着战场环境的变化, 军事装备的隐身频带需求已从传统的 2~18 GHz 波段拓展到更高的 26.5~

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-04-01; 录用日期: 2021-04-09; 网络首发时间: 2021-04-14 16:34:05

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210414.003>

通信作者: 邢孟达, 硕士, 高级工程师, 研究方向为吸波复合材料 E-mail: xingmengda@163.com

引用格式: 邢孟达, 马向雨, 宫元勋, 等. A 型蒙皮复合蜂窝结构设计及其吸波性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1180-1185.

XING Mengda, MA Xiangyu, GONG Yuanxun, et al. Design and wave absorbing properties of honeycomb with A-type skin[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1180-1185(in Chinese).

40 GHz 波段(通常称为 Ka 波段),但目前对吸波材料 Ka 波段性能的研究报道较少。对于结构型吸波材料,在实际工程应用中往往需要在其表面包覆蒙皮(厚度一般不小于 0.3 mm)以提高力学性能及耐环境性能,何山等^[20]、赵宏杰等^[21]研究了蒙皮/保护层对吸波材料反射率性能的影响,但均限于 18 GHz 以下,未涉及 Ka 波段。蒙皮的引入往往会导致 Ka 波段反射率性能退化,退化幅度达 10 dB 以上,成为现阶段需要重点解决的技术难题。

本文从工程应用的实际需求出发,制备不同牌号的吸波蜂窝片材料,通过仿真优化得到吸波蜂窝结构,并研究蒙皮对蜂窝吸波性能的影响。通过 A 型蒙皮结构设计,提高复合吸波蜂窝 Ka 波段吸波性能,最后得到超宽频高效复合吸波蜂窝样品。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

1.1.1 吸波蜂窝

吸波蜂窝的基体材料为 Nomex 芳纶纸蜂窝(孔格边长为 1.73 mm),吸收剂为炭黑颗粒,通过将 Nomex 蜂窝浸渍到炭黑与树脂的混合溶液内并晾晒、固化后得到吸波蜂窝。控制吸波蜂窝浸渍后的增重可以得到具备不同电磁损耗特性的吸波蜂窝。吸波蜂窝的制备过程为:将酚醛树脂溶于无水乙醇中稀释制成胶液,加入吸收剂并搅拌均匀,用高速匀质机充分分散后,倒入浸胶槽中备用。将 Nomex 蜂窝裁剪后置入浸胶槽中浸渍,取出并晾晒 20~30 min,然后放入烘箱内进行固化,固化工艺条件为 180℃ 下恒温 2 h。为了得到最佳的吸波性能,制备了 5 种不同规格的吸波蜂窝,用于多层吸波蜂窝结构的阻抗渐变匹配设计。5 种吸波蜂窝的编号及增重比率见表 1。

表 1 不同规格吸波蜂窝的增重比率

Sample number	Mass gain rate/%
F-1	6
F-2	12
F-3	25
F-4	50
F-5	90

1.1.2 蒙皮

蒙皮采用透波性能优异的石英/环氧复合材料,石英纤维织物作为增强材料,石英纤维织物为菲

利华公司生产的 B 型石英纤维/环氧布,单层厚度为 0.1 mm。石英纤维的介电常数实部为 3.8,环氧树脂的介电常数实部为 3.1,纤维体积含量约为 70%。

1.2 实验方法

1.2.1 吸波蜂窝电磁参数测试

吸波蜂窝的电磁参数采用传输反射法进行测量,测试夹具为矩形波导,将吸波蜂窝加工为与测试夹具内边缘紧密贴合的尺寸,然后放入波导片内部,用矢量网络分析仪测试其电磁参数。分频段进行电磁参数测试,频段分别为 2.6~3.95 GHz、3.95~5.85 GHz 和 5.85~8.2 GHz,对应的测试样品尺寸分别为 72.14 mm×34.04 mm×5.00 mm、47.55 mm×22.15 mm×4.00 mm 和 34.85 mm×15.80 mm×3.00 mm。

1.2.2 蒙皮介电常数测试

蒙皮采用的石英/环氧复合材料为低损耗介电材料,采用高 Q 腔法测定其介电常数。测试夹具为圆柱形波导腔,样品直径为 50.5 mm,厚度为 3.0 mm。

1.2.3 A 型蒙皮复合吸波蜂窝结构的制备

首先将 5 种规格的吸波蜂窝及 Nomex 蜂窝切割为设计的厚度。准备好 J-47 胶膜、石英布/环氧树脂预浸料并裁切,然后将吸波蜂窝、胶膜及蒙皮等按照设计的顺序进行铺层。放入模具中,进行真空封装,在烘箱内进行升温、固化,固化工艺为模具温度达到 130℃ 并稳定后,保温 2 h。脱模后,裁切为 300 mm×300 mm、180 mm×180 mm 的方块形。

1.2.4 反射率测试

将制备得到的 A 型蒙皮复合吸波蜂窝样品进行反射率测试,测试设备为弓形法反射率测试系统,300 mm×300 mm 的样品用于测试 2~18 GHz 频段,180 mm×180 mm 的样品用于测试 26.5~40 GHz 频段^[22]。

2 结果与讨论

2.1 A 型蒙皮复合吸波蜂窝结构电磁特性

采用上述方法对吸波蜂窝的电磁参数进行了测试,测得的介电常数实部、虚部及损耗角见图 1。可以看出,吸波蜂窝片材的介电常数实部和虚部均随着浸渍吸波浆料增重的增加而增加,电磁参数最低的牌号为 F-1,其介电常数实部为 1.1~1.3,介电常数虚部为 0.1~0.3;电磁参数最高的牌号为 F-5,其介电常数实部为 1.8~2.8,介电常数虚部为

0.9~2.5。相应的，随着吸波浆料浸渍质量的增加，蜂窝片材料的介电损耗角正切值也随之增加，电磁波吸收性能逐步提升。这种电磁参数的离散化有利于吸波蜂窝的阻抗匹配设计。

同时也测试了石英/环氧复合材料的介电常数，测得其介电常数为 3.4，介电损耗为 0.0095。

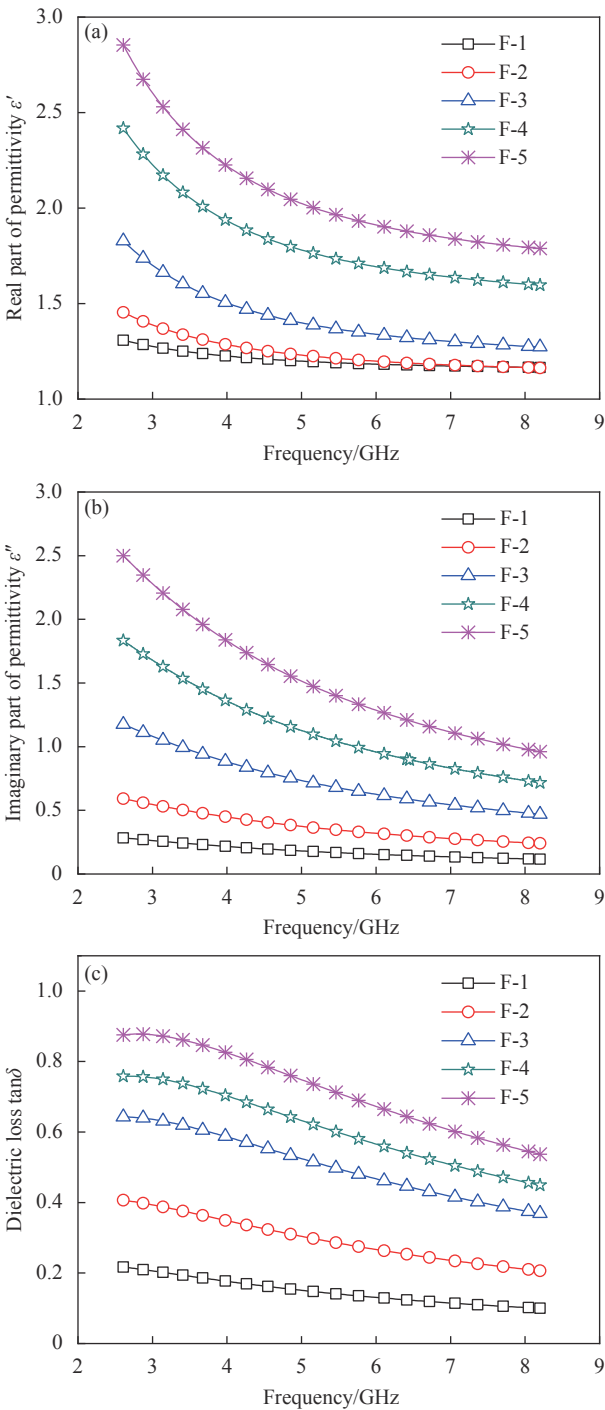


图1 不同规格吸波蜂窝材料的电磁参数
Fig. 1 Electromagnetic parameters of different absorbing honeycombs

2.2 A型蒙皮复合吸波蜂窝结构仿真设计

2.2.1 蒙皮对吸波性能的影响

对于由 k 层吸波材料组成的多层结构，对电磁波正入射的反射率取决于吸波材料表面的输入阻抗 Z_k 。 Z_k 的值由下式递推得出^[23]：

$$Z_k = \eta_k \frac{Z_{k-1} + \eta_k \tanh(i\gamma_k d_k)}{Z_{k-1} \tanh(i\gamma_k d_k) + \eta_k}$$
 (1)

其中： Z_k 为第 k 层输入阻抗（金属反射板的输入阻抗 $Z_0=0$ ）； $\eta_k = \sqrt{\epsilon_k \mu_k}$ 为第 k 层的本征阻抗； $\gamma_k = 2\pi f \sqrt{\epsilon_k \mu_k}$ 为第 k 层的波数； ϵ_k 、 μ_k 为第 k 层材料的复介电常数及复磁导率； d_k 为第 k 层的厚度； i 为虚数单位。

在自由空间与材料的分界面上，电磁波反射率 R 表示为

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_k - \eta_0}{Z_k + \eta_0} \right|$$
 (2)

由式 (2) 可知，各层材料的电磁参数及厚度决定了材料的最终反射率。对上述已制得的 5 种不同吸波蜂窝材料的电磁参数，通过对各层的厚度进行设计，可以优化吸波材料整体的吸波性能。各层吸波蜂窝材料的厚度采用遗传算法进行优化，经多次迭代计算后，最终得到了在 2~18 GHz 及 26.5~40 GHz 超宽频带内吸波性能优异方案。吸波蜂窝的总厚度为 24 mm，各层材料厚度见表 2，仿真得到的吸波蜂窝反射率曲线如图 2 中 1#曲线所示。

表 2 各层吸波蜂窝材料的厚度		
Table 2 Thickness of each layer for absorbing honeycomb		
Number of plies	Sample number	Thickness/mm
1	F-1	3.8
2	F-2	4.2
3	F-3	5.3
4	F-4	3.9
5	F-5	6.8

根据实际应用需求，吸波蜂窝表面需粘贴 0.3 mm 的复合材料蒙皮。计算了粘贴蒙皮后复合吸波蜂窝材料反射率的变化情况，仿真结果见图 2 中 2#曲线所示。可以看出，吸波蜂窝复合蒙皮后，其 Ka 波段反射率性能相比未复合蒙皮时退化了 5~30 dB。这表明蒙皮的阻抗在 Ka 波段与吸波蜂窝不匹配，导致 Ka 波段的电磁波在接触到蒙皮时产生了较大比例的直接反射，从而使反射率性能下降。

2.2.2 改进的蒙皮结构设计

为了降低蒙皮对吸波蜂窝 Ka 波段吸波性能的

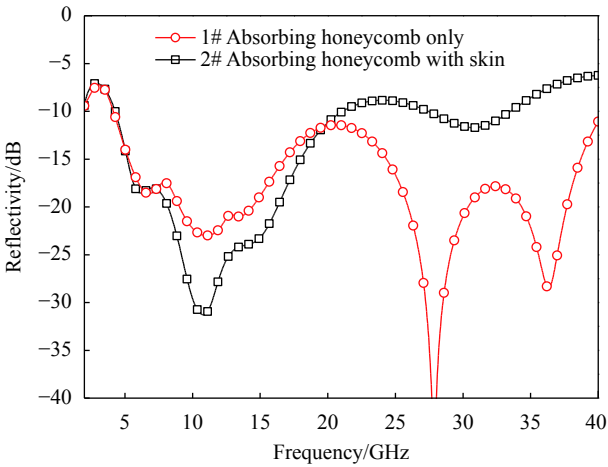


图2 吸波蜂窝复合石英/环氧蒙皮前后的反射率
Fig. 2 Reflectivity of absorbing honeycomb with and without quartz/epoxy skin

影响,对蒙皮的结构进行了改进设计。A型夹层结构可以有效提高特定设计频带内的透波率,因此已在天线罩中得到了广泛的应用^[24-25]。A型夹层结构由上、下两层蒙皮组成,中间采用透波蜂窝材料作为支撑,如图3所示。

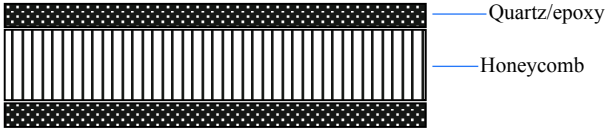


图3 A型蒙皮结构示意图
Fig. 3 Schematic drawing of A-type skin

仿真研究了A型夹层蒙皮在无反射面情况下的反射率,因蒙皮及蜂窝均无损耗,反射率越低则代表透波率越高。图4是单层蒙皮及不同厚度蜂窝双层蒙皮的反射率计算结果。可以看出,单层蒙皮反射系数随频率的增加而增加,而采用双层蒙皮结构后形成了低反高透区,且随着蜂窝厚度的增加,低反高透区向低频移动。这是由于单层蒙皮对入射电磁波产生的反射只与介电常数及其电厚度有关,随着频率的增加,蒙皮的电厚度也增加,因此单层蒙皮的反射率呈单调上升的趋势,频率越高越不利于透波。采用A型蒙皮后,电磁波在两层蒙皮间发生多次反射,一次反射波与多次反射波在特定频带内可形成干涉相消,从而大幅增加电磁波在特定频带内的总透波率。随着蜂窝厚度的增加,两层蒙皮间的电磁波行程增加,干涉相消的谐振波长也相应的增加,因此导致低反高透区向低频移动。利用A型蒙皮在特定

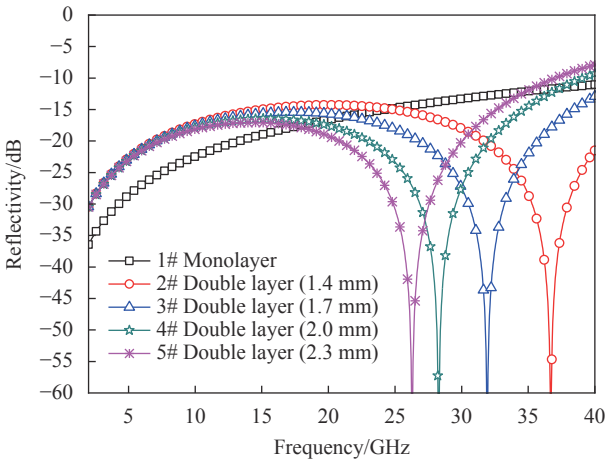


图4 A型蒙皮反射率曲线
Fig. 4 Reflectance curve of A-type skin

频率的高透特性,可以改善其对吸波蜂窝高频吸波性能的影响。

将A型夹层结构应用在吸波材料的表面,组成A型蒙皮复合吸波蜂窝结构,见图5。

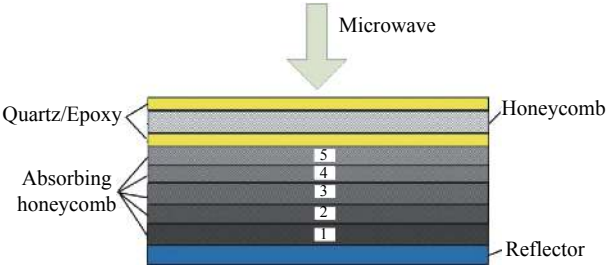


图5 A型蒙皮复合吸波蜂窝结构
Fig. 5 Structure of absorbing honeycomb with A-type skin

图6中2#~5#曲线为不同厚度蜂窝双层蒙皮放置到吸波蜂窝上表面后的反射率计算结果。可以看出,随着透波蜂窝厚度增加,Ka波段反射率性能逐步提高,但超过最佳值后,反射率性能开始随着厚度增加而退化。经仿真对比,A型蒙皮中透波蜂窝厚度为2.0 mm时,复合结构Ka波段的反射率最低。

2.3 A型蒙皮复合吸波蜂窝结构反射率验证

按照设计的结构分别制备了反射率试样,1#试样为吸波蜂窝结构复合单层0.3 mm蒙皮;2#~5#试样为吸波蜂窝结构复合A型蒙皮(中间蜂窝层厚度分别为1.4 mm、1.7 mm、2.0 mm、2.3 mm),反射率测试结果见图7所示。

可以看出,反射率实测结果与仿真设计的结果相比,数值和规律均保持一致。其中蜂窝层厚度为2.0 mm的A型蒙皮复合吸波蜂窝在整个宽频

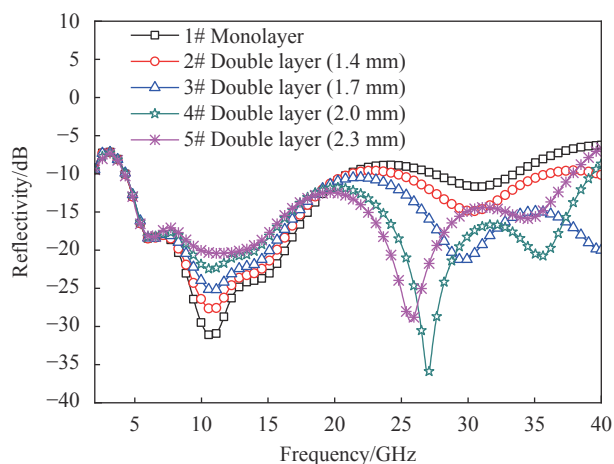


图6 吸波蜂窝复合A型蒙皮后的反射率曲线

Fig. 6 Reflectance curve of absorbing honeycomb with A-type skin

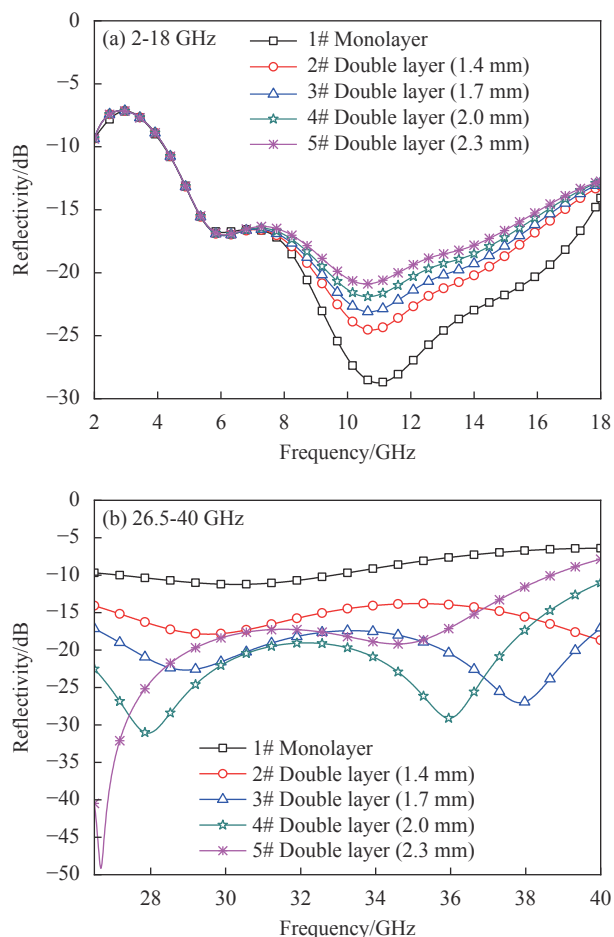


图7 A型蒙皮复合吸波蜂窝的反射率测试值

Fig. 7 Reflectance values of absorbing honeycomb with A-type skin

范围内吸波性能最优, 在 4.5~18 GHz、26.5~40 GHz 反射率优于 -10 dB, 在 6~16 GHz、26.5~38 GHz 反射率优于 -15 dB。

3 结论

(1) 采用 A 型夹层结构蒙皮可以有效改善蒙皮的加入对 26.5~40 GHz 波段反射率造成的不良影响, 改善效果达到 5~20 dB。

(2) 随着 A 型蒙皮中间透波蜂窝厚度的增加, 复合吸波蜂窝在 2~18 GHz 频段内的吸波性能保持在相当的水平, 在 26.5~40 GHz 波段吸波性能先升高后降低, 透波蜂窝的最优厚度为 2 mm。

(3) 设计并制备的 A 型蒙皮复合吸波蜂窝样品, 总厚度小于 27 mm 时, 在 2~18 GHz 及 26.5~40 GHz 的超宽频段内具备优异的吸波性能, 在 4.5~18 GHz、26.5~40 GHz 反射率优于 -10 dB, 在 6~16 GHz、26.5~38 GHz 反射率优于 -15 dB。

参考文献:

- [1] 邢丽英, 刘俊能. 电阻渐变型结构吸波材料的研究与发展[J]. *航空材料学报*, 2000, 20(3): 187-191.
XING Liying, LIU Junneng. Development of resistance gradual variation radar-absorbing composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2000, 20(3): 187-191(in Chinese).
- [2] 鹿海军, 刘晓丽, 刘义, 等. 结构吸波泡沫及其夹层结构隐身材料的研究现状[J]. *材料工程*, 2011(z1): 9-14.
LU Haijun, LIU Xiaoli, LIU Yi, et al. Development and progress in structural foam absorber and foamed stealth sandwich composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011(z1): 9-14(in Chinese).
- [3] 礼嵩明, 蒋诗才, 望咏林, 等. “超材料”结构吸波复合材料技术研究[J]. *材料工程*, 2017, 45(11): 10-14.
LI Songming, JIANG Shicai, WANG Yonglin, et al. Study on “metamaterial” structural absorbing composite technology[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(11): 10-14(in Chinese).
- [4] 胡爱军, 王志媛, 金净, 等. 泡沫夹芯型吸波隐身结构复合材料的发展趋势[J]. *宇航材料工艺*, 2009, 39(1): 1-4.
HU Aijun, WANG Zhiyuan, JIN Zheng, et al. Advances in foam core sandwich structure composites with absorbing stealth materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2009, 39(1): 1-4(in Chinese).
- [5] 周远良, 赛义德, 张黎, 等. 树脂基Fe纳米粒子及碳纤维复合吸波平板的制备与性能[J]. *材料工程*, 2018, 46(3): 41-47.
ZHOU Yuanliang, SAI Yide, ZHANG Li, et al. Preparation and performance of resin-based Fe nanoparticles/carbon fibers microwave absorbing composite plates[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(3): 41-47(in Chinese).
- [6] MEJEAN C, POMETCU L, BENZERGA R, et al. Electromagnetic absorber composite made of carbon fibers loaded epoxy foam for anechoic chamber application[J]. *Materi-*

- als Science and Engineering: B, 2017, 220: 59-65.
- [7] YUAN H, XIONG Y L, SHEN Q, et al. Synthesis and electromagnetic absorbing performances of CNTs/PMMA laminated nanocomposite foams in X-band[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 107: 334-341.
- [8] DONG S, HU P, ZHANG X H, et al. Carbon foams modified with in-situ formation of Si_3N_4 and SiC for enhanced electromagnetic microwave absorption property and thermostability[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(6): 7141-7150.
- [9] LAUR V, BENZERGA R, LEBULLENGER R, et al. Green foams for microwave absorbing applications: Synthesis and characterization[J]. *Materials Research Bulletin*, 2017, 96: 100-106.
- [10] 马科峰, 张广成, 刘良威, 等. 夹层结构复合材料的吸波隐身技术研究进展[J]. *材料开发与应用*, 2010, 25(6): 53-57.
MA Kefeng, ZHANG Guangcheng, LIU Liangwei, et al. Research progress of technology for sandwich structural absorbing stealthy composite materials[J]. *Development and Application of Materials*, 2010, 25(6): 53-57(in Chinese).
- [11] 邢丽英, 刘俊能. 蜂窝夹层结构吸波材料浸渍胶液体体系的研究[J]. *航空材料学报*, 1993, 13(2): 44-51.
XING Liying, LIU Junneng. The study of honeycomb sandwich microwave absorbing materials dip coating system[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 1993, 13(2): 44-51(in Chinese).
- [12] YAM L H, YAN Y J, JIANG J S. Vibration-based damage detection for composite structures using wavelet transform and neural network identification[J]. *Composite Structures*, 2003, 60(4): 403-412.
- [13] 程芳静, 孙耀, 王宜, 等. 纸基吸波材料的制备及其电磁性能探究[J]. *中国造纸*, 2016, 35(5): 39-45.
CHENG Fangjing, SUN Yao, WANG Yi, et al. Study on preparation of paper-based absorbing material and its electromagnetic properties[J]. *China Pulp & Paper*, 2016, 35(5): 39-45(in Chinese).
- [14] 赵宏杰, 宫元勋, 邢孟达, 等. 结构吸波材料多层阻抗渐变设计及应用[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(4): 19-22.
ZHAO Hongjie, GONG Yuanxun, XING Mengda, et al. Design and application of multilayer graded impedance in structural radar absorbing materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2015, 45(4): 19-22(in Chinese).
- [15] 克拉特E F. 雷达散射截面: 预估、测量和减缩[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988: 244-247.
KNOTT E F. Radar cross section: Prediction measurement and reduction[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1988: 244-247(in Chinese).
- [16] 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): 5261-5266.
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): 5261-5266(in Chinese).
- [17] 礼嵩明, 吴思保, 阮伟, 等. 宽频蜂窝夹层结构吸波复合材料设计方法研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(7): 92-97.
LI Chongming, WU Sibao, YUAN Wei, et al. Study on design method of wide-band wave-absorbing honeycomb sandwich composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2019(7): 92-97(in Chinese).
- [18] 马向雨, 邢孟达, 张耀辉, 等. 无反射层泡沫夹层结构设计及吸波性能研究[J]. *材料工程*, 2020, 48(2): 94-99.
MA Xiangyu, XING Mengda, ZHANG Yaohui, et al. Design and electromagnetic wave absorbing properties of foam sandwich structure without reflective layer[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(2): 94-99(in Chinese).
- [19] GAO Z P, LUO Q. Reflection characteristics of impregnated absorbent honeycomb under normal incidence of plane wave[J]. *Journal of UEST of China*, 2003, 32(4): 389-394.
- [20] 何山, 熊克敏. 雷达罩内用泡沫型吸波材料研究[J]. *航空材料学报*, 2001, 21(3): 19-23.
HE Shan, XIONG Kemin. Application of a foam RAM in the radome[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2001, 21(3): 19-23(in Chinese).
- [21] 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.
ZHAO Hongjie, JI Peijun, HU Benhui, et al. Absorbing properties of honeycomb sandwich composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2010, 40(2): 72-73(in Chinese).
- [22] 中国人民解放军总装备部(标准制定单位). GJB 2038A—2011 雷达吸波材料反射率测试方法[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2011.
General Reserve Department of PLA. GJB 2038A-2011 Measurement methods for reflectivity of radar absorbing material[S]. Beijing: Military Standard Publication Department, 2011(in Chinese).
- [23] 胡传忻. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 202-205.
HU Chuanxin. Stealth coating technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 202-205(in Chinese).
- [24] 张家林, 林周进. 某Ka波段天线罩的设计[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013(7): 42-46.
ZHANG Jialin, LIN Zhoujin. Design of a Ka-band radome[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013(7): 42-46(in Chinese).
- [25] 夏文干, 韩养军, 杨洁, 等. 高功率高透波材料的研究[J]. *高科技纤维与应用*, 2003, 28(2): 39-43.
XIA Wengan, HAN Yangjun, YANG Jie, et al. Study on high power and high wave-transmissivity materials[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2003, 28(2): 39-43(in Chinese).