



面向飞机蒙皮的碳纤维预浸料吸波承载一体化层合结构设计

纪正江 董佳晨 梁良 程琳豪 闫雷雷 郑锡涛

Design of carbon fiber prepreg electromagnetic wave absorbing and load-bearing integrated laminated structure for aircraft skin

Ji Zhengjiang, Dong Jiachen, Liang Liang, Cheng Linhao, Yan Leilei, Zheng Xitao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231019.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑泊松效应的材料/结构一体化设计方法

A concurrent design method for microstructures of materials and macrostructures by considering the Poisson effect

复合材料学报. 2017, 34(6): 1252–1260 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161024.001>

含流道微桁架夹层面板隔热性能评估方法

A method of evaluating thermal insulant performance of micro-truss sandwich panel with channels

复合材料学报. 2017, 34(4): 850–858 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170122.001>

防隔热一体化复合材料整体性能优化设计方法

Optimization design method of integrated thermal protection/insulation composite material

复合材料学报. 2019, 36(2): 450–460 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180423.002>

超薄预浸料对碳纤维/环氧树脂复合材料导电性能的影响

Effect of ultra-thin prepreg on conductive properties of carbon fiber/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(3): 539–545 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190527.002>

单向碳纤维/环氧树脂预浸料叠层的面内变形行为

In-plane deformation behavior of unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg layups

复合材料学报. 2020, 37(5): 1049–1055 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190730.006>

基于RTM技术的碳纤维/聚酰亚胺复合材料舵面一体化制备与验证

Integration manufacturing and testing verification for RTMable carbon fiber/polyimide composite rudder

复合材料学报. 2020, 37(9): 2152–2162 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200429.002>



面向飞机蒙皮的碳纤维预浸料吸波承载一体化层合结构设计



分享本文

纪正江, 董佳晨, 梁良, 程琳豪, 闫雷雷*, 郑锡涛

(西北工业大学 航空学院 飞行器复合材料结构研究所, 西安 710072)

摘要: 针对现有飞机复合材料蒙皮设计难以兼顾承载性能和吸波性能的问题, 凭借碳纤维预浸料独特的力电特性, 基于阻抗渐变原理设计了具有优异吸波性能的梯度碳纤维阵列, 赋予结构吸波性能; 利用碳纤维底板优异的承载性能, 进行力学性能的增强设计。通过玻璃纤维层合结构 (Glass fiber laminated structure, GFLS) 电磁和承载性能的双增强设计, 构造了吸波/承载一体化层合结构 (Integrated laminated structure, ILS)。电磁仿真和试验结果表明: 结构实现了薄厚度下 (<5 mm) 宽频段 (5~18 GHz)、大角度 (0°~70°)、高强度 (平均吸收率>94%) 的吸波效果。通过吸波机制研究发现了结构的谐振频率与碳纤维宽度成反比, 碳纤维宽度逐层渐变的设计使结构在较宽频段范围内产生多个相近的强吸收频点, 从而实现了宽频高强吸波。弯曲性能试验结果表明, 一体化层合结构的比弯曲强度和比刚度相较于同尺寸的玻璃纤维层合结构分别提升了 86.8% 和 76.3%。本文通过在玻璃纤维预浸料铺层中引入碳纤维预浸料并进行结构构型设计, 可实现结构吸波性能和承载性能的大幅增强, 为飞机蒙皮的轻质隐身承载一体化设计提供了一种新的解决方案。

关键词: 碳纤维预浸料; 层合结构; 一体化设计; 阻抗渐变原理; 宽频吸波

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)09-4791-11

Design of carbon fiber prepreg electromagnetic wave absorbing and load-bearing integrated laminated structure for aircraft skin

JI Zhengjiang, DONG Jiachen, LIANG Liang, CHENG Linhao, YAN Leilei*, ZHENG Xitao

(Institute of Aeronautical Composite Structures, School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In response to the difficulty in balancing load-bearing and electromagnetic (EM) wave absorbing performance in the design of existing aircraft composite skin, the unique mechanical and electrical characteristics of carbon fiber prepreg were utilized to enhance the mechanical and electrical properties of glass fiber laminated structure (GFLS). Gradient carbon fiber arrays were designed with excellent absorbing performance based on the impedance gradient principle, endowing the structure with EM wave absorbing performance; Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) back sheet with excellent load-bearing performance was utilized to achieve enhanced design of mechanical properties. By enhancement design of both magnetic and mechanical properties of GFLS, the EM wave absorbing and load-bearing integrated laminated structure (ILS) was finally constructed. EM simulation and experiment show that the ILS realizes a broadband (5-18 GHz), multiangle (0°-70°), and efficient (average absorptivity >94%) absorption effects for EM wave under thin thickness (<5 mm). Through study of absorption

收稿日期: 2023-08-09; 修回日期: 2023-09-23; 录用日期: 2023-10-09; 网络首发时间: 2023-10-20 12:06:53

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231019.003>

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (D5000220029); 航空科学基金 (201909053001); 陕西省人工结构功能材料与器件重点实验室基础研究基金 (AFMD-KFJJ-21212)

Fundamental Research Funds for the Central Universities (D5000220029); Aeronautical Science Foundation of China (201909053001); Fundamental Research Funds of Shaanxi Key Laboratory of Artificially-Structured Functional Materials and Devices (AFMD-KFJJ-21212)

通信作者: 闫雷雷, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为多功能复合材料 E-mail: yanleilei@nwpu.edu.cn

引用格式: 纪正江, 董佳晨, 梁良, 等. 面向飞机蒙皮的碳纤维预浸料吸波承载一体化层合结构设计 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4791-4801.

JI Zhengjiang, DONG Jiachen, LIANG Liang, et al. Design of carbon fiber prepreg electromagnetic wave absorbing and load-bearing integrated laminated structure for aircraft skin[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4791-4801(in Chinese).

mechanisms, it is discovered that the resonant frequency of a structure is inversely proportional to the width of carbon fibers. The layer-by-layer gradual change of the width of the carbon fibers in the ILS is designed to produce multiple adjacent strong absorption frequency points in a wide range of frequency band, which achieves a broadband and strong EM wave absorption. The mechanical experiment results show that the specific bending strength and specific stiffness of the ILS have increased by 86.8% and 76.3% respectively, compared to the GFLS of the same size. Through the introduction of carbon fiber prepreg in glass fiber prepreg layup and structural design in this paper, the EM wave absorbing and load-bearing performance of the GFLS have significantly been enhanced, providing a novel solution for the EM wave absorbing and load-bearing integrated design of aircraft composite skin.

Keywords: carbon fiber prepreg; laminated structure; integrated design; impedance gradient principle; broadband electromagnetic wave absorption

蒙皮是维持飞机流线型外形的一种次承力结构,并直接承担其面外方向的气动载荷^[1]。近年来随着雷达技术的发展,飞机的隐身性能逐渐成为决定其战场生存力的主要因素,而蒙皮作为飞机重要的雷达反射源,其吸波性能优劣极大的影响着飞机的生存能力^[2]。现阶段复合材料蒙皮设计主要包含碳纤维层合结构和玻璃纤维层合结构,其主要考虑承载性能而往往忽视了吸波性能,如碳纤维层合结构对电磁波反射率较高^[3],玻璃纤维层合结构只在极窄的频带内具有吸波性能。现阶段飞机结构的吸波性能增强设计大致可归为两类:一类是在蒙皮表面附加吸波涂层来增强吸波性能^[4],但涂层存在易脱落、使结构增重等问题^[5];另一类是在蒙皮内部利用吸波蜂窝^[6-7]、吸波泡沫^[8]等结构实现宽频吸波并兼顾一定的承载性能,但这类结构一般较厚,难以应用在一些较薄的需要重点隐身的部位。不难发现,制约新一代飞机蒙皮结构发展的关键问题,主要聚焦于如何发掘结构本身吸波性能的增强设计潜力,以实现兼顾宽频高强吸波性能和优异承载性能的力电一体化设计,并尽可能满足飞机结构薄厚度的外形需求。

针对蒙皮宽频高强的吸波性能设计需求,有学者利用了阻抗渐变设计方法^[9-10],构造多层吸波结构以期实现薄厚度下的宽频高强吸波^[11],如 Sun 等^[12]利用多层金属结构环设计了一种吸波结构,通过调节其中金属结构环的尺寸来调控每个介质层的电磁参数,仿真显示该结构 4 mm 厚度下 -10 dB 的吸波带宽达到了 60 GHz。然而,该结构金属环与基体界面难以兼容,并未考虑实际应用时的承载效果。因此,有学者研究了兼顾吸波和承载的多层吸波结构,如黄恂行^[13]研究了碳纤维衬底增强柔性阶梯锥状超结构,在 4 mm 厚度下实现了 2~40 GHz 高于 90% 吸波率的超宽频隐身性能,同时其拉伸强度达到 24 MPa。但是,这些

多层吸波结构要么未充分考虑结构的轻量化承载^[13],要么单位厚度下吸波材料层数较少导致薄厚度下宽频吸波效果有待提高^[14],在吸波性能、承载性能两方面均存在一定的提升空间。因此,亟待开发新的结构设计方法和材料体系以实现面向飞机蒙皮的层合结构吸波承载一体化设计。

碳纤维凭借其电磁和力学性能的独特优势,一定程度上解决了多层吸波结构应用于蒙皮时电磁和力学性能难以兼顾的问题。近年来有部分学者基于树脂传递模塑成型 (Resin Transfer Moulding, RTM) 工艺,将碳纤维织物引入复合材料层合结构中,一方面利用碳纤维织物优良的力学性能及与树脂基体良好的匹配性,实现一定的轻量化承载性能^[15];另一方面通过碳纤维层或其他介质层的电磁参数匹配设计,实现宽频吸波^[16-17]。如: Huang 等^[18]通过 RTM 工艺利用改性树脂制备玻璃纤维/碳纤维多层吸波结构,在 3.42~19.73 GHz 频段内吸波率高于 90%,且吸波层厚度仅为 3.5 mm,并且凭借附加的纤维增强复合材料优良的力学性能,结构的拉伸弹性模量提高到了 30.7 GPa,实现了相较于金属构造的传统多层吸波结构更优的吸波性能和承载性能。但是需要指出的是,基于 RTM 工艺制备的碳纤维层合板拉伸强度为 1 900 MPa 左右^[19],而基于预浸料工艺制备的碳纤维层合板其拉伸强度可达到 2 200 MPa^[20],相比之下提高了 16% 左右,这是由于预浸料工艺制备的复合材料结构纤维体积含量有所增加,因此其力学性能有一定提升。此外,RTM 工艺制备的复合材料层合结构为实现不同层的阻抗渐变设计往往要多次固化^[21],制备工艺复杂,且其单位厚度下可设计的层数与预浸料工艺相比较少^[22-23],难以充分发挥碳纤维电磁和力学性能的优势。显然,为了增强复合材料层合结构的承载性能,并提升碳纤维层数以拓宽电磁和力学性能的设计空

间, 采用预浸料工艺制备是更佳的选择。

现阶段基于预浸料工艺制备的复合材料层合结构其研究重点, 主要是聚焦于如何设计碳纤维在层合结构中的布局, 以实现更优的承载性能, 但却忽略了电磁性能设计。部分学者研究利用碳纤维与金属类似的高电导率性能^[24-25], 构造吸波结构, 如鹿海军等^[26]在吸波蜂窝夹层结构的上面板引入碳纤维超材料以代替金属线阵列, 增强结构 1~2 GHz 频段的吸波性能, 但并没有实现宽频吸波的效果。与此同时, 有学者对鱼骨状结构进行研究^[27-28], 发现类似布局形式的金属线阵列在较宽频段内具备高效的电磁波调控性能。如 Ding 等^[29]利用金字塔排布的金属条设计了多层吸波体, 研究发现其谐振频率与贴片宽度成反比关系, 这种从底部往上宽度逐渐变小的结构由于能够产生很多个相近的谐振点, 故能拓宽其吸收频带, 最终结构在 5 mm 厚度下实现了 7.8~14.7 GHz 频段、入射角 0°~60°范围内 90% 以上的吸波率。可以设想若采用类似布局的碳纤维条并引入玻璃纤维复合材料层合结构中, 再通过适当的尺寸优化设计和承载设计, 则有望实现玻璃纤维层合结构电磁和力学性能的增强设计。

在上述研究的基础上, 本文基于预浸料工艺, 引入在电磁和力学性能方面具有独特优势的碳纤维来改进玻璃纤维层合结构的电磁和力学性能, 通过将梯度碳纤维阵列、碳纤维底板融入玻璃纤维层合结构中进行混杂设计, 最终得到了一种新型吸波/承载一体化层合结构。一方面, 利用预浸料工艺下层合结构单位厚度可设计层数多的优势及梯度碳纤维阵列优异的电磁波吸收性能, 实现宽频带、大角度、高强度吸波; 另一方面, 利用碳纤维底板轻质高强的优异力学性能, 进一步提升玻璃纤维层合结构的承载性能。与此同时, 该一体化层合结构的厚度只有 5 mm, 为未来飞机复合材料蒙皮的轻质隐身承载一体化设计提供了一种有力的解决方案。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

在本实验中, 所用材料分别为中国威海光威复合材料股份有限公司生产的 G15000/9A16/33% 玻璃纤维预浸料和 USN12500/9A16/33% 碳纤维预浸料, 两者树脂体系一致, 避免了界面不匹配对结构承载性能的影响。

1.2 试样制备

图 1(a) 介绍了一体化层合结构试样的大致制备流程, 可分为三步: 第一步, 按设计尺寸用美工刀裁剪所需的碳纤维条预浸料和玻璃纤维预浸料, 并取一部分玻璃纤维预浸料裁剪出与碳纤维条尺寸一致的孔; 第二步, 将碳纤维条全部嵌入对应大小的孔中, 并按照设计逐层铺设预浸料, 先铺设碳纤维底板, 再交替铺玻璃纤维层和含碳纤维条层; 第三步, 将试验件放入成型模具中, 上紧螺丝以提供模压所需的压力, 再放入烘箱逐步升温后在 120°C 固化 1.5 h。最终获得了一体化层合结构的电磁吸波试验样件和三点弯曲试验样件。而玻璃纤维层合结构三点弯曲试验样件的制备方法为: 先逐层铺设玻璃纤维预浸料, 再通过模压、固化并最终得到试验样件。

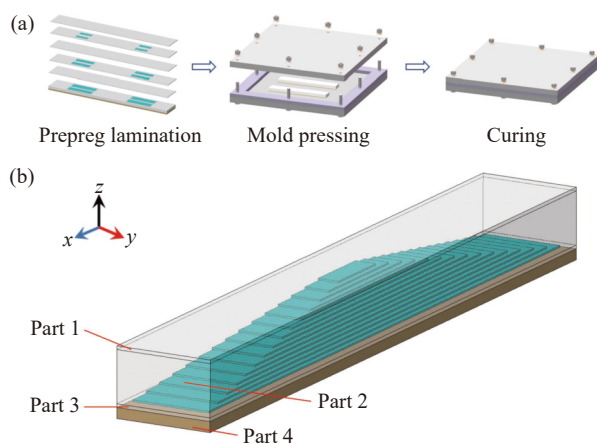


图 1 一体化层合结构 (ILS) 试样: (a) 制备流程; (b) 区域划分示意图

Fig. 1 Integrated laminated structure (ILS) specimens:

(a) Preparation process; (b) Schematic diagram of part division

为方便展示一体化层合结构 (Integrated laminated structure, ILS) 和玻璃纤维层合结构 (Glass fiber laminated structure, GFLS) 力学试样的铺层设置, 将一体化层合结构按图 1(b) 所示进行区域划分并编号, 玻璃纤维层合结构的区域划分与之相同。表 1 展示了各区域的铺层, GF 表示玻璃纤维, CF 表示碳纤维, 括号中 0 和 90 分别表示纤维沿 0°(x 轴方向) 和 90°(y 轴方向) 铺设。两结构力学试验件总铺层数相同, 但是特别地, 在一体化层合结构 Part 2 区域中, 各层碳纤维条以 0°铺层方向依次嵌入 0°铺层玻璃纤维预留的对应大小孔中。

制备的一体化层合结构和玻璃纤维层合结构的力学三点弯曲试验样件如图 2(a) 所示, 两种结

构形式各制备了 3 个平行试验件, 一体化层合结构试样编号为 CB-1、CB-2、CB-3, 玻璃纤维层合板试样编号为 B-1、B-2、B-3, 各试样尺寸均为 $95\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。为方便展示一体化层合结构吸波性能试验样件内部的碳纤维条, 对制备工艺进行适当调整, 制备了如图 2(b) 所示的样件, 其尺寸为长宽 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 。

表 1 铺层列表
Table 1 List of layers

	ILS	GFLS
Part 1	GF:[90/0/90] GF:[(0/90) ₁₄ /0]	GF:[90/0/90]
Part 2	0° CF inserted into the holes of 0° GF	GF:[(0/90) ₁₄ /0]
Part 3	GF:[90/0/90]	GF:[90/0/90]
Part 4	CF:[0/90/90/0]	GF:[0/90/90/0]
Summary	39 layers	39 layers

Notes: ILS—Integrated laminated structure; GFLS—Glass fiber laminated structure; GF—Glass fiber; CF—Carbon fiber.

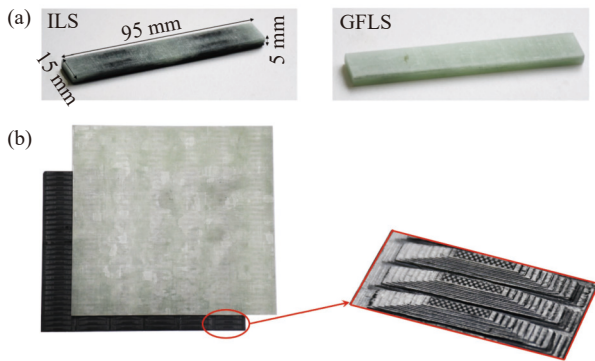


图 2 样件: (a) 力学试验; (b) 电磁试验

Fig. 2 Specimens: (a) Mechanical experiments; (b) EM experiments

1.3 性能测试

1.3.1 电磁波吸收性能测试

使用弓形法测试系统对一体化层合结构进行电磁波反射率测试, 用于表征其吸波性能。使用一对喇叭天线起到电磁波发射与接收的作用, 矢量网络分析仪进行扫频测试, 测试频率范围为 2~18 GHz, 测试环境温度 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$, 相对湿度 40%~55%。通过分别测量一体化层合结构的电磁波反射功率 P_{rs} 与相同尺寸金属板的电磁波反射功率 P_{rm} , 可得电磁波反射率 $R = P_{rs}/P_{rm}$, 而透射率 $T=0$ (碳纤维底板对电磁波有强反射性), 因此其电磁波吸收率计算公式为 $A=1-P_{rs}/P_{rm}$ 。

1.3.2 三点弯曲承载性能测试

在电子万能试验机 (美国 Instron 公司生产的 INSTRON—3382) 上, 依据三点弯曲试验标准

ASTM D7264^[30], 对一体化层合结构和同尺寸玻璃纤维层合结构开展了面外准静态三点弯曲试验。

2 结果与讨论

2.1 一体化层合结构设计及其吸波性能仿真分析

碳纤维预浸料吸波承载一体化层合结构如图 3(a) 所示, 该吸波器的基本结构形式为 39 层的玻璃纤维-碳纤维复合材料混杂层合结构, 具体可分为: 起到透射作用和作为承载基体的玻璃纤维增强复合材料 (Glass fiber reinforced polymer, GFRP); 承担吸波功能的梯度碳纤维阵列 (Carbon fiber arrays, CF arrays); 具备优异承载性能并可反射电磁波使上方碳纤维阵列实现二次吸波的碳纤维增强复合材料底板 (Carbon fiber reinforced polymers back sheet, CFRP back sheet)。其中碳纤维阵列由长/宽均梯度排列的碳纤维条组成, 并隔层嵌入到玻璃纤维层合结构中。图 3(a) 中 θ 表示电磁波入射角, Cross section A 和 Cross section B 为单元结构的两个对称截面, 截面法线方向分别沿 x 轴和 y 轴。图 3(b) 分别表示了这两个截面处的梯度碳纤维阵列视图, 其中 $n=15$ 代表碳纤维条的层数, 其余标识参数均为该结构的尺寸参数: l_1 和 h_1 分别代表结构中最短碳纤维条的长度和宽度, d_1 和 d_n 分别为碳纤维条长度和宽度的变化梯度, s 和 w 分别代表碳纤维条的厚度和间距, t_1 表示碳纤维底板厚度, t_2 表示玻璃纤维结构的厚度, p_x 和 p_y 分别代表单元沿 x 方向和 y 方向的周期长度。

本文主要针对 C 波段 (4~8 GHz)、X 波段 (8~12 GHz) 和 Ku 波段 (12~18 GHz) 电磁波进行吸波性能设计, 并首先考虑 30° 斜入射的情况, 对一体化层合结构的电磁性能进行分析。

记 $R(\omega)$ 为反射率、 $T(\omega)$ 为透射率, 则结构的吸波率 $A(\omega)$ 可以表示为

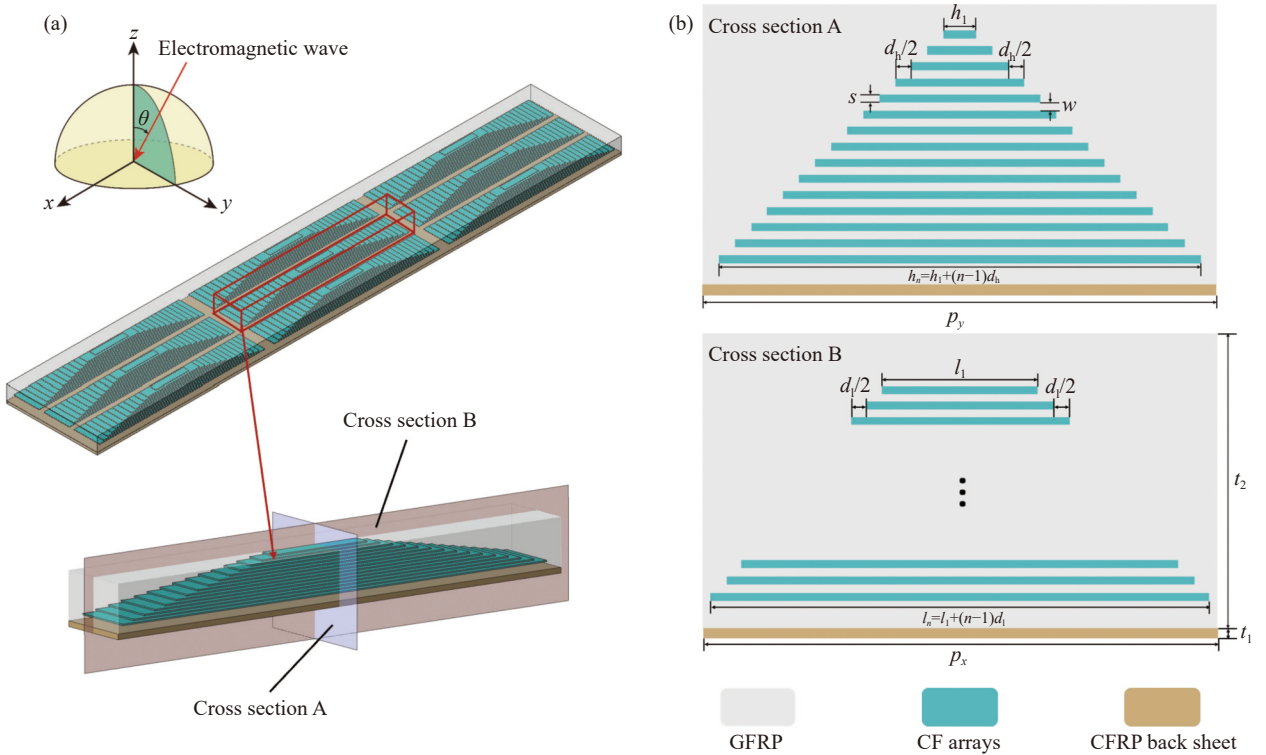
$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (1)$$

这里引入传输线理论的 S 参数, 设电磁波从端口 1 入射、从端口 2 出射, 由于碳纤维底板的存在, 结构的透射率 $T(\omega)=0$, 结构的反射率 $R(\omega)$ 可以表示为^[31]

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 \quad (2)$$

其中, S_{11} 参数通过电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2015 的频域求解器进行计算, 再通过式 (1) 即可得到一体化层合结构在 4~18 GHz 频段上的吸波性能。

仿真过程中各材料的电磁参数设置如下: 碳



θ —Incident angle; l_1 —Length of the shortest CF strip; h_1 —Width of the shortest CF strip; d_l —Length gradient of the CF strips; d_h —Width gradient of the CF strips; s —Thickness of the CF strips; w —Spacing of the CF strips; n —Number of CF strips; t_1 —Thickness of the CFRP back sheet; t_2 —Thickness of the GFRP structure; p_x —Periodic length of the unit along x direction; p_y —Periodic length of the unit along y direction; GFRP—Glass fiber reinforced polymer; CF—Carbon fiber; CFRP—Carbon fiber reinforced polymer

图3 一体化层合结构示意图: (a) 周期结构; (b) 尺寸参数

Fig. 3 Schematic diagram of ILS: (a) Periodic structure; (b) Size parameters

纤维沿纤维方向和垂直于纤维方向的电导率分别设置为 35 000 S/m 和 89 S/m^[31]; 玻璃纤维复合材料介电常数设置为 4.3(1-0.025j), 其中 j 为虚数单位, 入射电磁波设置为磁场沿 x 轴极化的横磁波 (Transverse magnetic wave, TMW), 单元结构 x 和 y 方向设置为周期性边界条件, z 方向设置为开放边界条件。为了拓宽结构吸波频带并增强吸波强度, 本文通过参数化建模, 探究了碳纤维阵列各尺寸参数对吸波性能的影响并进行优选。

该结构电磁吸收性能的优劣主要与碳纤维阵列激发的表面等离子激元效应有关, 而影响表面等离子激元效应的最主要因素是碳纤维条的长度 l 和宽度 h , 因此探究以上尺寸参数对结构吸波性能的影响尤为重要, 本文主要通过控制 l_1 、 h_1 、 d_l 和 d_h 这 4 个参数来实现。图 4 为保持其他几何参数不变, 入射角 $\theta=30^\circ$ 下不同 l_1 、 d_l 、 h_1 、 d_h 时的吸收率曲线。

从图 4(a) 中可以看出, 改变最短碳纤维条的长度 l_1 对吸波性能影响并不明显, 当 l_1 取 5 mm 时, 5~18 GHz 频段整体的吸波性能最好, 故取 l_1 为 5 mm。从图 4(b) 中可以看出, 随着 d_l 增加结

构的有效吸收带宽 (段内各频点吸收率均不低于 90%) 逐渐右移, 同时整体吸波性能更加平稳, 综合考虑结构全频段的电磁性能要求, 本文选取 $d_l=3$ mm。同步分析图 4(c) 和图 4(d) 的扫参结果, 随着碳纤维条整体宽度的减小, 5~8 GHz 频段的吸收峰值和平均吸收率都有所提高, 但是如图 4(d) 所示当碳纤维宽度梯度减小时, 12~18 GHz 频段平均吸收率有所下降。综合考虑 5~18 GHz 频段电磁波平均吸收率和制备工艺两方面因素, 选取 h_1 为 1.5 mm, d_h 为 0.3 mm。最终得到的最优参数如表 2 所列。

在该最优参数设置下, 一体化层合结构在电磁波 30° 斜入射情况下的吸波性能如图 5 实线所示, 点划线表示各频段吸收率 90% 的点所在位置。可以发现, 该结构在 5~17.5 GHz 波段内吸收率均高于 90%, 这能够有效地提高隐身飞行器的战场生存力。

为了更好地探究一体化层合结构在不同入射角下的吸收性能, 绘制了一体化层合结构的吸收率云图如图 6。可以发现, 结构在 5~16 GHz 频段、

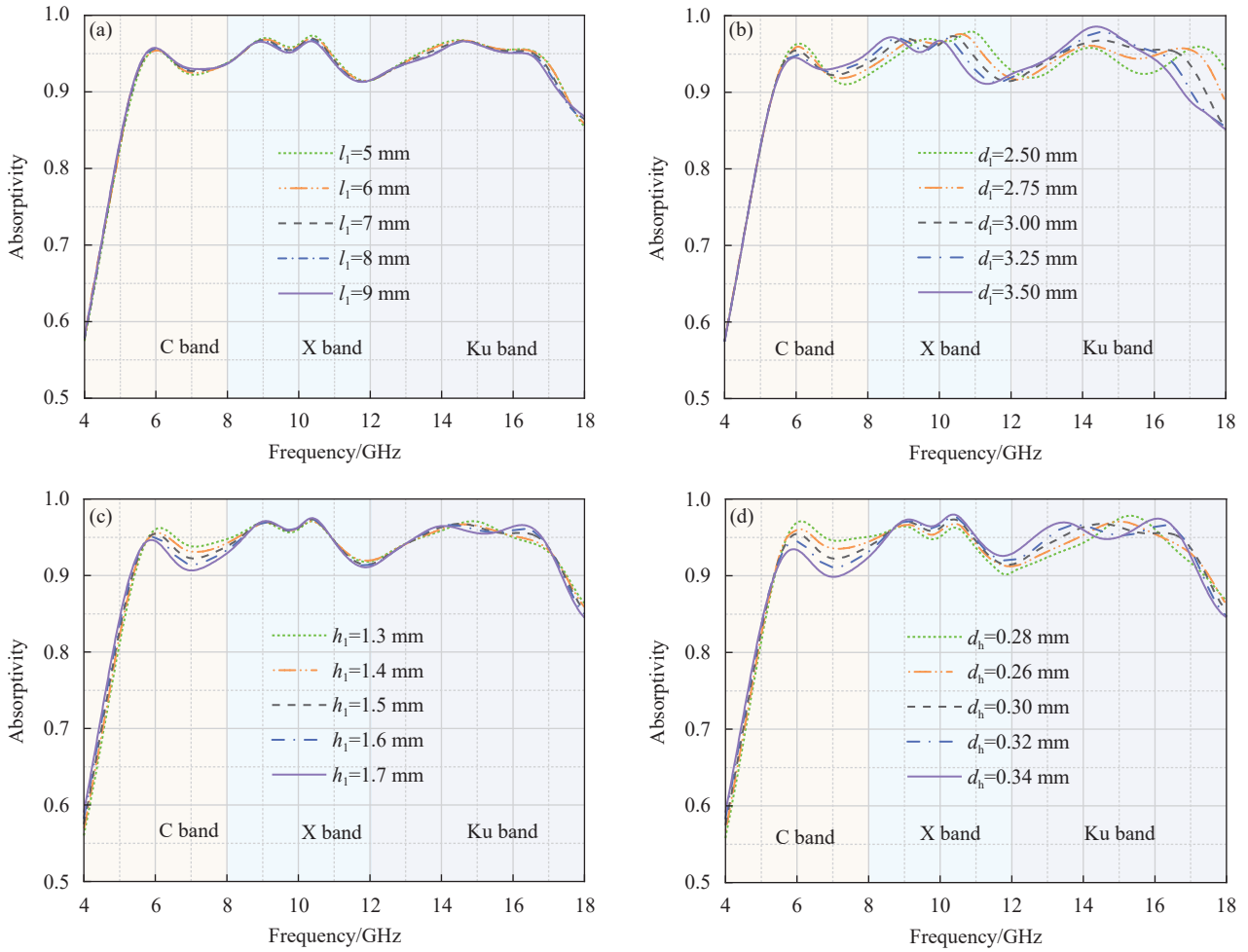


图4 碳纤维阵列不同尺寸参数对吸收率的影响分析

Fig. 4 Absorptivity analyses with different size parameters of CF arrays

表2 吸波性能最优参数 (尺寸单位: mm)

Table 2 Optimal parameters of absorption property (Size unit: mm)

l_1	h_1	d_1	d_h	p_x	p_y	t_1	t_2
5	1.5	3.0	0.3	49	7	0.75	4.175

0°~60°入射角范围内任意点的吸收率均超过了85%。从垂直入射开始,随着入射角的增加,16~20 GHz频段内吸收率低于85%的范围在逐渐缩小并在入射角增至35°时消失,而低频段截止频率稳定在5 GHz附近;当入射角在35°~60°范围时,结构在5~20 GHz范围内的吸收率均高于85%,实现了高强度的电磁波吸收性能;而当入射角在60°~75°逐渐增大时,左截止频率由5 GHz缓慢右移至7 GHz,7~20 GHz整个频段下均能够达到85%以上的吸收率。总的来说,一体化层合结构对斜入射电磁波也可以实现高强度的吸收。

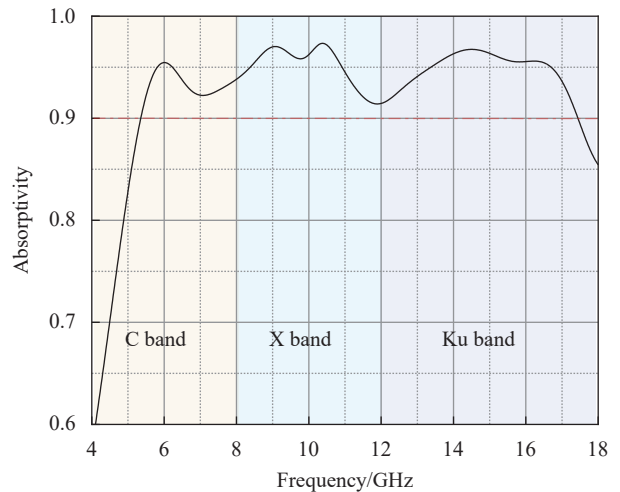


图5 吸收率仿真曲线

Fig. 5 Simulation curve of absorptivity

2.2 一体化层合结构吸波性能试验验证

使用弓形法测试系统对一体化层合结构进行

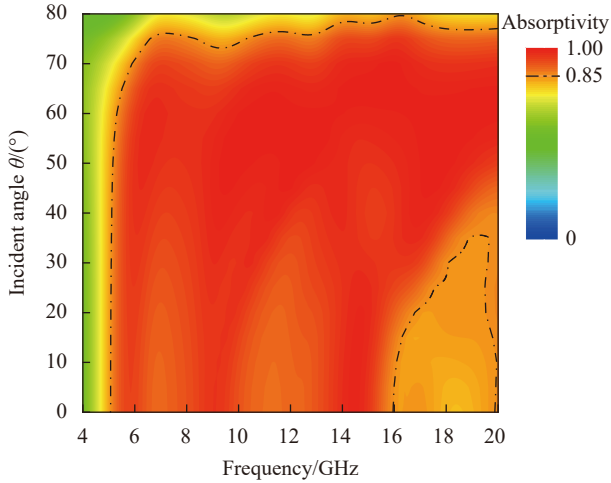


图6 不同入射角下一体化层合结构的吸收率云图

Fig. 6 Absorptivity spectrum with different incident angle θ of ILS

电磁波反射率测试,用于表征其4~18 GHz频段的吸波性能。图7为入射角5°时测试结果与仿真结果的电磁波吸收率曲线对比图,图中虚线为试验测得的一体化层合结构的吸波曲线,实线为其仿真吸波曲线,点划线表示各频段吸收率85%的点所在位置。在绘制图7电磁仿真曲线时,由于电磁试验件制备精度有限,为使仿真结构接近实测结构,根据实际测量结果仿真中取 $d_h=0.25$ mm。

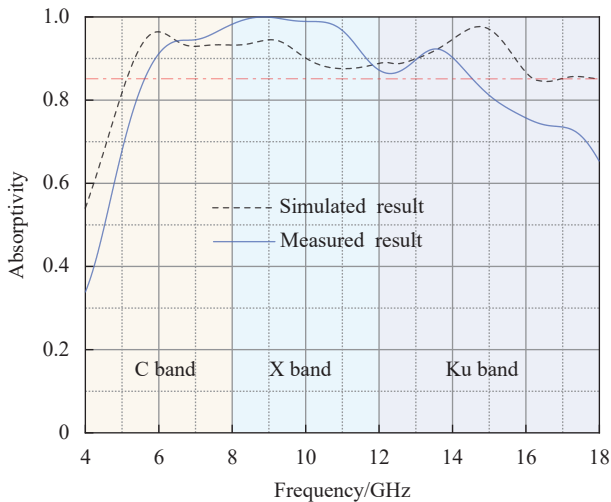


图7 电磁波吸收率测试结果与仿真结果

Fig. 7 Measured and simulated result of electromagnetic wave absorptivity

电磁试验结果表明,结构在5~16 GHz的平均吸收率在90%以上,吸波性能良好。对比发现仿真与试验结果之间存在一定偏差,主要原因是由于制备工艺限制,试验件成型尺寸与设计值存在一定偏差,此外试验件无法保证完全平整。以上

这些误差均难以预测,导致峰值频率及吸收强度出现一定的偏差。两曲线走势、强吸收频带基本一致,说明了设计的准确性。

电磁波吸收性能仿真分析和试验验证表明,一体化层合结构对5~18 GHz频段、0°~70°入射角范围内电磁波的平均吸收率达到了94%,实现了宽频段、大角度、高强度吸波,这为面向飞机蒙皮的复合材料层合结构吸波功能设计提供了一种有力的解决方案。

2.3 一体化层合结构吸波机制研究

在非磁性材料如碳纤维材料中,电磁波能量的吸收与材料的损耗和激发的电场强度有关^[31],可表示为

$$P_{\text{abs}} = \frac{1}{2}(\omega\varepsilon'' + \sigma)|E|^2 \quad (3)$$

其中: P_{abs} 是损耗功率; ω 是角频率; ε'' 是介电常数的虚部; σ 是电导率; E 是总电场。由式(3)可知,损耗功率与电场强度的平方成正比,这表明损耗功率最大值和电场强度最大值出现的位置应当相对应。

Pang等^[25]的研究表明,对于一些金属条梳状结构,其色散关系如下:

$$\beta^2 = (s_0/p_0)^2 k_0^2 \tan(k_0 h_0) + k_0^2 \quad (4)$$

其中: β 为电磁波的波矢; $k_0 = 2\pi f/c$ 是其对应的自由空间波矢, f 和 c 分别表示入射电磁波的频率和真空中波速; s_0 是金属条的宽度; p_0 是周期长度。梯度碳纤维阵列结构与梳型结构外型相似,碳纤维的尺寸参数可能对一体化层合结构的色散特性产生影响,因此下面着重探究碳纤维尺寸参数与能量损耗密度最大值出现位置之间的关系,并进一步揭示一体化层合结构的吸波机制。

从扫参优化结果可看出,一体化层合结构中碳纤维的长度、宽度均对吸波率存在复杂的影响,其中宽度变化相较于长度变化对吸收率的影响更显著。为了直观地探究碳纤维的宽度变化与结构色散特性之间的关系,本文构造了三组结构,在保持碳纤维长度为优化结果条件下,每组结构各层碳纤维宽度一致($d_h=0$),但不同组之间碳纤维宽度的取值各不相同。取 $g_1=1.5$ mm, $g_2=3.6$ mm, $g_3=5.7$ mm(下标数字表示组别, g 代表该组结构各层碳纤维的宽度),分别对应原结构第1、8、15层碳纤维条的宽度,以分析碳纤维宽度与结构电场强度和能量损耗密度最大值出现位置之间的

规律。

鉴于高电导率材料的趋肤效应，为了能更显著地观察到电场强度和能量损耗密度的变化，选取过碳纤维条侧边的斜截面和穿过碳纤维长边的竖直截面，分别得到截面 Cross section C 和 Cross section D，如图 8(a) 所示。各组的电场分布图(对应 Cross section D)和能量损耗密度图(对应 Cross section C)如图 8(b) 所示。

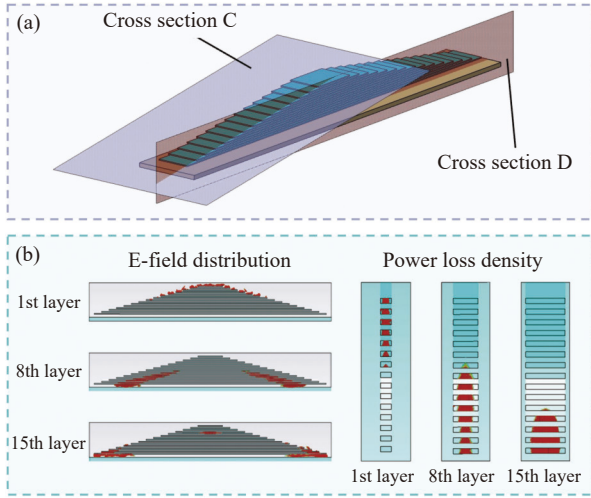


图 8 电磁波吸收机制: (a) 截面示意图; (b) 不同碳纤维条宽度下的电场和能量损耗场分布

Fig. 8 EM wave absorption mechanism: (a) Diagram of cross sections; (b) Distribution of E-field and power loss in different widths of CF strips

分析三组结构的色散特性，包括电场分布和能量损耗分布。电场强度最大值出现位置集中在碳纤维附近，这主要是由于碳纤维激发了电磁波的表面等离子激元模式，电场被束缚在了碳纤维附近；此外，随着各层碳纤维条宽度的增加，电场强度最大值出现的位置从上往下逐渐移动。相关研究表明，对于由金属片构成的金字塔结构其谐振频率与金属片宽度成反比关系，且频率较低的电磁波在金字塔的底端被吸收^[32]。本结构与金字塔结构布局相似，并且碳纤维也具备与金属类似的电特性，因此结构的谐振频率与碳纤维宽度成反比关系，这也就解释了所观察到的现象：在某频率入射电磁波的激励下，结构的某一部分对该电磁波产生谐振实现了强吸收，而随着各层碳纤维宽度逐渐增大，结构的谐振频率在逐渐减小，发生谐振的位置也从结构的顶部向底部移动。进一步地，该理论也解释了一体化层合结构中碳纤维条的宽度要按照梯度排布的原因，即这种设计

可以实现一体化层合结构对各频段电磁波的逐层谐振，在较宽频带内产生很多个相近的强电磁波吸收点，从而最大限度地实现宽频高强的吸波效果。

能量损耗分布结果表明，虽然玻璃纤维对电磁波具有一定的介质损耗作用，但与电场分布情况相同，能量损耗高的区域集中分布在碳纤维上，并且随着各层碳纤维宽度的增加，高能量损耗区域也随之向下移动。根据公式 (3) 知对碳纤维这样的非磁性材料，其电场强度高位置与电磁能量损耗高的位置基本对应，这也就解释了能量损耗密度分布和电场分布基本一致的原因。

总而言之，依据色散理论，本结构中碳纤维条对电磁波的谐振频率与其宽度成反比关系，梯度碳纤维阵列宽度逐层渐变的设计使结构在较宽频段范围内产生多个相近的强吸收频点，赋予了其宽频高强的吸波效果。研究金字塔结构的阻抗渐变吸波机制，对设计类似构型的结构具有很大的指导意义，能有效提升其吸波强度并拓宽其吸波频带。

2.4 一体化层合结构承载性能分析

图 9 为玻璃纤维层合结构和一体化层合结构的三点弯曲试验装置图和破坏模式图。通过观察失效模式图可以发现，两种结构试验件的失效模式均为下表面纤维拉伸破坏，而一体化层合结构下表面的碳纤维与玻璃纤维层合结构下表面的玻璃纤维相比，其比强度、比模量显著提高。

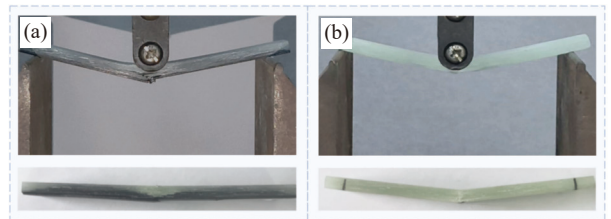


图 9 试验装置和失效模式照片: (a) 玻璃纤维层合结构; (b) 一体化层合结构

Fig. 9 Photos of experimental setup and failure mode: (a) GFLS; (b) ILS

为清楚地表征结构弯曲性能的增强效果，本文绘制了各试样件的三点弯试验载荷-位移曲线，如图 10 所示，各试样件的弯曲性能如表 3 所列，两种结构的试验平均值及一体化层合结构相较玻璃纤维层合结构承载性能的增强效果如表 4 所列。结果表明，一体化层合结构的弯曲强度与绝对刚度相较玻璃纤维层合结构分别提升了 70.7% 和

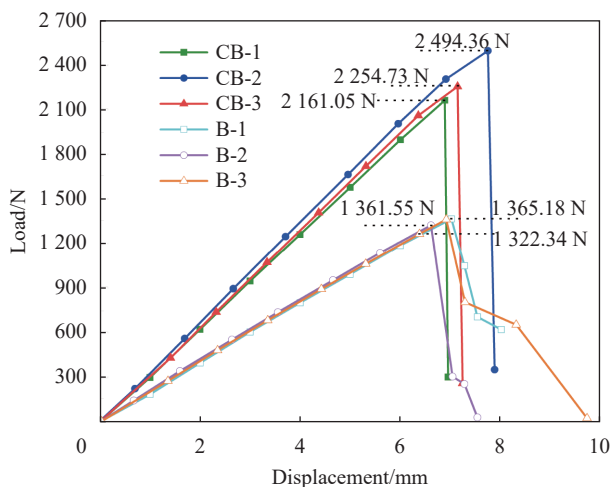


图 10 准静态三点弯曲试验载荷-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of quasi-static three-point bending experiments

60.9%，而比弯曲强度和比刚度分别提升了 86.8% 和 76.3%，提升幅度更加明显。总之，本文利用碳纤维高比强度与高比模量的特性构造了碳纤维底板，并将其引入玻璃纤维层合结构中进行承载设计，最终实现了玻璃纤维层合结构弯曲性能的显著增强。

3 总结

针对飞机蒙皮结构的吸波承载一体化设计需求，本文利用预浸料工艺及层合结构设计空间充足的优势，利用碳纤维增强玻璃纤维层合结构的电磁和力学性能，提出了一种面向飞机蒙皮的新型吸波/承载一体化层合结构。此后通过仿真与试验相结合的方式，研究了该结构的吸波和承载性能，本文主要结论如下：

表 3 各试验样件弯曲性能

Table 3 Flexural properties of each experimental specimen

Sample number	Density/ (g·cm ⁻³)	Stiffness/ (N·mm ⁻¹)	Specific stiffness/ (N·(g·cm ⁻²) ⁻¹)	Flexural strength/MPa	Specific flexural strength/(MPa·(g·cm ⁻³) ⁻¹)
CB-1	1.404	313.51	22.33	345.77	246.28
CB-2	1.544	321.65	20.83	399.10	258.48
CB-3	1.404	315.48	22.47	360.76	256.95
B-1	1.684	194.33	11.54	218.43	129.71
B-2	1.544	199.84	12.94	211.57	137.03
B-3	1.544	196.78	12.75	217.85	141.09

表 4 两结构弯曲性能平均值及其对比

Table 4 Average and comparison of flexural properties of the two structures

	Density/ (g·cm ⁻³)	Stiffness/ (N·mm ⁻¹)	Specific stiffness/ (N·(g·cm ⁻²) ⁻¹)	Flexural strength/MPa	Specific flexural strength/(MPa·(g·cm ⁻³) ⁻¹)
ILS	1.451	316.88	21.88	368.54	253.90
GFLS	1.591	196.98	12.41	215.95	135.94
Improvement of ILS compared with GFLS/%	-8.8	60.9	76.3	70.7	86.8

(1) 设计具有宽频吸波功能的梯度碳纤维阵列，赋予结构电磁波吸收性能；同时引入承载性能优异的碳纤维反射底板，大幅提高结构的承载性能；

(2) 对梯度碳纤维阵列进行尺寸优选设计，最终结构在 5 mm 厚度下实现了宽频段 (5~18 GHz)、大角度 (0°~70°)、高强度 (平均吸收率 >94%) 吸波，表现出优异的电磁波吸收性能；

(3) 基于色散理论，发现结构谐振频率与碳纤维宽度成反比，碳纤维宽度逐层渐变的设计使结构在较宽频段范围内产生多个相近的强电磁波吸收点，从而实现了宽频高强的吸波效果；

(4) 凭借碳纤维底板优异的承载性能，一体化

层合结构的比弯曲强度和比刚度相较同尺寸的玻璃纤维层合结构分别提升了 86.8% 和 76.3%，实现了弯曲性能的大幅增强。

参考文献:

[1] 陶梅贞, 孙秦, 艾剑良, 等. 现代飞机结构综合设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2014: 56-57.
TAO Meizhen, SUN Qin, AI Jianliang, et al. Comprehensive design of modern aircraft structures [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2014: 56-57 (in Chinese).
[2] 桑建华. 飞行器隐身技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013: 1-5.

- SANG Jianhua. Low-observable technologies of aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013: 1-5(in Chinese).
- [3] 张尉博, 张琦, 徐宏涛, 等. 高稳定碳纤维格栅夹层反射器结构设计及型面热变形优化 [J]. *复合材料科学与工程*, 2020(5): 40-46, 62.
- ZHANG Weibo, ZHANG Qi, XU Hongtao, et al. Structural design and surface thermal deformation optimization of high stability carbon fiber grille sandwich reflector[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2020(5): 40-46, 62(in Chinese).
- [4] 王一帆, 朱琳, 韩露, 等. 电磁吸波材料的研究现状与发展趋势 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 1-12.
- WANG Yifan, ZHU Lin, HAN Lu, et al. Research status and development trend of electromagnetic absorbing materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(1): 1-12(in Chinese).
- [5] 王彦丰, 张琳, 李益文, 等. 吸波涂层损伤对隐身性能的影响 [J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 23(3): 1-6.
- WANG Yanfeng, ZHANG Lin, LI Yiwen, et al. Effect of absorbing coatings damage on invisibility performance[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2022, 23(3): 1-6(in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 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 Songming, WU Sibao, WANG Jiafu, et al. New type honeycomb sandwich structure microwave absorbing composite containing metamaterial[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(3): 94-99(in Chinese).
- [8] 彭益菲. C_f /聚氨酯泡沫宽频吸波复合材料的制备与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 59-60.
- PENG Yifei. Preparation and properties of C_f /polyurethane foam broadband microwave absorbing composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 59-60(in Chinese).
- [9] 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, 34.
- ZHAO Hongjie, GONG Yuanxun, XING Mengda, et al. Design and application of multilayer graded impedance in structural radar absorbing materials[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2015, 45(4): 19-22, 34(in Chinese).
- [10] 马觅洋, 张西军, 曾一兵. 多层结构设计在吸波材料中的应用 [J]. *宇航材料工艺*, 2017, 47(4): 8-13.
- MA Miyang, ZHANG Xijun, ZENG Yibing. Application of multilayer structure design in absorbing materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2017, 47(4): 8-13(in Chinese).
- [11] ALI H O, AL-HINDAWI A M, ABDULKARIM Y I, et al. New compact six-band metamaterial absorber based on closed circular ring resonator (CCRR) for radar applications[J]. *Optics Communications*, 2022, 503: 127457.
- [12] SUN J B, LIU L Y, DONG G Y, et al. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21155-21162.
- [13] 黄悻行. 薄型宽频隐身承载超结构的材料-结构-功能一体化设计、制备与表征 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 213-214.
- HUANG Yixing. Material structure function integrated design, preparation, and characterization of thin broadband stealth and load-bearing super structures[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 213-214(in Chinese).
- [14] 杨超, 叶永盛, 叶喜葱, 等. 多层吸波体的设计、制备及其广角宽频吸收特性 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(11): 6202-6216.
- YANG Chao, YE Yongsheng, YE Xicong, et al. Design, fabrication and wide-angle broadband absorption characteristics of the multilayer microwave absorber[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(11): 6202-6216(in Chinese).
- [15] ZHANG Z, LEI H S, YANG H Y, et al. Novel multifunctional lattice composite structures with superior load-bearing capacities and radar absorption characteristics[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 216: 109064.
- [16] LI C, CAO Q S, ZHOU G M, et al. Design and study of a new broadband RCS carbon-glass fiber hybrid metamaterial[J]. *Composite Structures*, 2022, 301: 116207.
- [17] JIN D H, JANG M S, CHOI J H, et al. Multi-slab hybrid radar absorbing structure containing short carbon fiber layer with controllable permittivity[J]. *Composite Structures*, 2021, 273: 114279.
- [18] HUANG Y X, YUAN X J, CHEN M J, et al. Ultrathin multifunctional carbon/glass fiber reinforced lossy lattice metastructure for integrated design of broadband microwave absorption and effective load bearing[J]. *Carbon*, 2019, 144: 449-456.
- [19] 何先成, 钟翔屿, 李晔, 等. RTM工艺成型国产T700碳纤维复合材料湿热性能 [J]. *高科技纤维与应用*, 2016, 41(6): 47-52.
- HE Xiancheng, ZHONG Xiangyu, LI Ye, et al. Hygrothermal properties of domestic T700 grade carbon fiber composites processed by RTM[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2016, 41(6): 47-52, 56(in Chinese).
- [20] 张海燕, 李根臣, 刘震宇, 等. 国产T700级碳纤维及复合材料性能表征 [J]. *化工新型材料*, 2020, 48(4): 238-240.

- ZHANG Haiyan, LI Genchen, LIU Zhenyu, et al. Characterization of domestic T700 grade CF and composite[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(4): 238-240(in Chinese).
- [21] ZHOU Q, SHI T T, XUE B, et al. Multi-scale integrated design and fabrication of ultra-broadband electromagnetic absorption utilizing multi-walled carbon nanotubes-based hierarchical metamaterial[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 232: 109877.
- [22] ZHAN R, ZHANG J Q, GAO Q, et al. Microwave absorption performance of single-layer and multi-layer structures prepared by CNTs/Fe₃O₄ nonwoven materials[J]. *Crystals*, 2021, 11(8): 1000.
- [23] GORAI A, MANDAL D, MANDAL K. Multi-layered nanohollow spheres for efficient electromagnetic wave absorption[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(34): 345707.
- [24] 陆晓欣. 碳纤维增强树脂基复合材料表面阻抗调制与结构吸波性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 3-6.
LU Xiaoxin. Research on the surface impedance modulation and structural absorbing properties of carbon fiber reinforced plastic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 3-6(in Chinese).
- [25] PANG Y Q, LI Y F, WANG J F, et al. Carbon fiber assisted glass fabric composite materials for broadband radar cross section reduction[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 158: 19-25.
- [26] 鹿海军, 礼嵩明, 黄浩, 等. 宽频蜂窝夹层结构吸波复合材料的低频隐身介质超材料研究 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(1): 188-195.
LU Haijun, LI Songming, HUANG Hao, et al. Study on the low frequency radar-stealth dielectric metamaterial of broadband wave-absorbing honeycomb sandwich composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(1): 188-195(in Chinese).
- [27] YAN L L, HE Z H, JIANG W, et al. A novel scheme to enhance both electromagnetic wave transmission and compressive properties of PMI foam sandwich structures[J]. *Composite Structures*, 2021, 277: 114582.
- [28] JIANG W, MA H, WANG J F, et al. Spoof surface plasmon polaritons realized by unidirectional carbon fibers arrays and applications in structure/function integrated sandwich structure[J]. *Results in Physics*, 2020, 17: 103081.
- [29] DING F, CUI Y X, GE X C, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(10): 103506.
- [30] ASTM International. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials: ASTM D7264[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2022.
- [31] CHENG L H, SI Y, JI Z J, et al. A novel linear gradient carbon fiber array integrated square honeycomb structure with electromagnetic wave absorption and enhanced mechanical performances[J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116510.
- [32] 熊汉. 电磁超材料在微波吸波体与天线中的应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 13-14.
XIONG Han. Research on the application of electromagnetic metamaterials in microwave absorber and antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 13-14(in Chinese).