

# 基于碳纤维的层合结构双极化电磁吸波 及其弯曲性能设计\*

纪正江, 程琳豪, 郑锡涛, 闫雷雷

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 针对现有飞行器复合材料蒙皮难以兼顾承载性能和吸波性能的问题, 利用碳纤维预浸料独特的力电特性构造了碳纤维双极化吸波层合结构(carbon fiber dual-polarized absorbing laminated structure, CFDALS). 通过在玻璃纤维层合结构中引入双向碳纤维阵列结构, 赋予层合结构双极化电磁波吸收特性, 同时利用碳纤维反射层优异的承载性能来增强结构力学性能. 电磁仿真结果表明, 该结构对 TE 极化电磁波在 8~18 GHz 频带、 $0^\circ \sim 45^\circ$  入射角, 同时对 TM 极化电磁波在 5~18 GHz 频带、 $0^\circ \sim 60^\circ$  入射角下平均吸收率均达到 90% 以上. 三点弯曲仿真结果表明, 结构在实现双极化电磁吸波的同时, 在碳纤维阵列两个排列方向上表现出较高的比弯曲强度、比弯曲刚度. 通过在碳纤维预浸料中引入双向排列的碳纤维预浸料并进行一体化设计, 在结构具备双向优异承载性能的同时实现了双极化电磁吸波性能的显著增强, 为飞行器蒙皮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; 双极化; 电磁吸波; 力学性能

**中图分类号:** O342 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450102

## Electromagnetic Wave Dual-Polarized Absorption and Flexural Performance Design of Composite Laminates Based on Carbon Fibers

Ji Zhengjiang, CHENG Linhao, ZHENG Xitao, YAN Leilei

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University,

Xi'an 710072, P.R.China)

**Abstract:** To address the challenge of balancing load-bearing and electromagnetic (EM) wave absorption properties in aircraft composite skin, the outstanding mechanical and electrical characteristics of carbon fiber (CF) prepregs were utilized to construct a carbon fiber dual-polarized absorbing laminated structure (CFDALS). The bidirectional CF arrays were introduced into the glass fiber (GF) laminated structure, to endow the laminated structure with dual-polarized EM wave absorption performances. Additionally, the excellent load-bearing capacity of the CF reflector was used to enhance the mechanical properties. Simulation results indicate that, the CFDALS achieves an average absorptivity over 90% within the 8~18 GHz frequency band at incident angles of  $0^\circ \sim 45^\circ$ , and within the 5~18 GHz band at incident angles of  $0^\circ \sim 60^\circ$  for TE and TM polarized EM waves, respec-

\* 收稿日期: 2024-04-15; 修订日期: 2024-06-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(12372141)

**作者简介:** 纪正江(1998—), 男, 博士生(E-mail: jzj@mail.nwpu.edu.cn);

闫雷雷(1986—), 男, 副教授, 博士, 博士生导师(通讯作者. E-mail: yanleilei@nwpu.edu.cn).

**引用格式:** 纪正江, 程琳豪, 郑锡涛, 闫雷雷. 基于碳纤维的层合结构双极化电磁吸波及其弯曲性能设计[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(8): 1096-1105.

tively. The 3-point bending simulation results show that, the CFDALS exhibits higher specific flexural strengths and stiffnesses along 2 directions of the CF arrays while achieving dual-polarized EM wave absorption. Incorporation of bidirectionally arranged CF prepregs into GF prepregs enhances the dual-polarized EM wave absorption performance and the bidirectional flexural performance of the CFDALS simultaneously. The work provides a novel solution for the EM wave absorbing and load-bearing integrated design for aircraft composite skin applications.

**Key words:** carbon fiber prepreg; laminated structure; dual-polarized; electromagnetic wave absorption; mechanical property

## 0 引 言

飞行器蒙皮结构电磁吸波与承载性能一体化设计逐渐成为未来先进飞行器的发展需求.由于飞行器实际服役时难以预知面对的电磁波极化方向和入射角度<sup>[1]</sup>,因此在电磁吸波性能设计方面,其不仅有厚度薄、质量轻、频带宽、吸收强等常规需求<sup>[2]</sup>,更需要覆盖宽入射角、双极化方向的强电磁波吸收;在力学性能方面,飞行器典型结构如机翼在展向和弦向均需要足够的强度以承担气动载荷<sup>[3]</sup>,因此其承载设计力求在更轻质量下兼顾不同方向的力学承载性能<sup>[4]</sup>.如何通过合理的材料选型和结构设计以满足飞行器蒙皮结构新的力电性能设计需求,成为一个亟待解决的问题.

针对飞行器蒙皮结构在薄厚度下轻质高强的承载需求,传统吸波承载一体化设计存在种种问题,如涂敷吸波涂层方法<sup>[5]</sup>的吸波带宽窄、增重较多、维护成本较高等问题<sup>[6]</sup>,以及在蒙皮夹层内引入的电磁功能结构(电阻膜<sup>[7]</sup>、金属环<sup>[8]</sup>等)难以与基体界面相匹配等问题.针对上述问题,现有研究往往从材料选型出发,采用轻质高强的纤维增强复合材料进行电磁吸波与承载的一体化设计<sup>[9]</sup>,其中最具代表性的是碳纤维复合材料<sup>[10]</sup>.

碳纤维复合材料凭借其轻质、高强度、高模量<sup>[11]</sup>、高电导率<sup>[12]</sup>和耐腐蚀性等,在多功能结构设计中占据着愈发重要的地位<sup>[13]</sup>.一方面,承载性能优异的碳纤维与树脂基体之间界面结合性能良好,保障了结构优异的力学性能<sup>[14]</sup>;另一方面,碳纤维介电性能优良,具备代替金属对电磁波进行高效精准调控的设计潜力<sup>[15]</sup>.近年来,轻质-隐身-承载一体化层合结构设计将离散分布的碳纤维织物与玻璃纤维织物混合,一方面凭借织物复合材料优异的力学性能,结构的承载性能得到有效保障<sup>[16]</sup>;另一方面,通过调整碳纤维功能层的电磁阻抗结构可实现对电磁波的有效调控,展现出卓越的力电性能设计潜力<sup>[17-18]</sup>.如 Li 等<sup>[19]</sup>设计制备了玻璃纤维-碳纤维织物混编层合结构,其雷达散射面积(radar cross section, RCS)低于-10 dB 的频带达到了 9.9~24.3 GHz,同时其刚度相较原玻纤维织物得到了一定的提升,表现出优异的力电性能.然而,上述结构设计只对正入射电磁波有较好的吸收效果,而实际应用对正、斜入射电磁波均有吸收需求<sup>[20]</sup>.由于电阻膜阵列<sup>[21]</sup>、空间波阻抗<sup>[22]</sup>等对电磁波入射角具有高敏感性,结构的吸波性能随入射角的增大通常会趋向恶化.因此,如何通过合理的结构设计构造斜入射性能优良的碳纤维吸波结构,成为了一个新的研究重点.

针对斜入射电磁波的宽频吸收需求,纪正江等<sup>[23]</sup>等基于预浸料工艺,通过构建单方向的离散碳纤维梯度阵列结构并引入到玻璃纤维复合材料(glass fiber reinforced polymer, GFRP)中,构造了极化敏感结构(polarization sensitive structure, PSS),其对 TM 极化电磁波实现了 5~18 GHz 频段、0°~70°入射角下平均吸收率大于 94%的优异吸波效果,与此同时,利用碳纤维底板轻质高强的优异力学性能,其比弯曲强度、比弯曲刚度较玻璃纤维层合结构提升了 86.8%和 76.3%,实现了兼顾斜入射电磁吸波性能和弯曲性能的一体化设计.但该结构仅对 TM 极化波进行电磁设计,而实际自由空间中存在 TE、TM 两种极化波,因此该结构有待进一步改进,以对 TE、TM 两种极化波均可实现宽入射角度、宽频段、高强度的吸收效果.

针对飞行器蒙皮结构双极化电磁吸波的需求,本文通过改进前述极化敏感结构的碳纤维功能层,引入双向排布的碳纤维预浸料设计了双向碳纤维阵列(carbon fiber arrays, CF arrays),并将其与碳纤维反射底板、玻璃纤维复合材料混杂,构造了碳纤维双极化吸波层合结构(carbon fiber dual-polarized absorbing laminated structure, CFDALS,简称“双极化结构”),通过仿真优化设计,该结构实现了对 TE、TM 极化电磁波的优异吸

收性能,此后通过有限元仿真分析,比较了该结构与极化敏感结构在碳纤维阵列两个排列方向上的弯曲性能,验证了该结构在保证相应方向上弯曲性能的同时,实现了双极化方向宽频带、大角度、高强度的电磁波吸收效果.这为兼顾双极化电磁吸波性能和双方向弯曲性能的飞行器复合材料蒙皮结构设计提供了新的范例.

## 1 结构设计

双极化结构如图 1(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,整体结构由玻璃纤维复合材料、双向碳纤维阵列和碳纤维反射层(carbon fiber reflector, CF reflector)三部分组成.其中介电损耗较低的玻璃纤维复合材料既作为透波层方便电磁波透射入结构中,又作为承载基体传递弯曲载荷.双向碳纤维阵列具有双极化方向(TE、TM 极化方向)的电磁波调控功能,是实现电磁吸波的功能层.介电损耗较高的碳纤维反射层既可反射电磁波使上方碳纤维阵列实现二次吸波,又大幅提升了结构的弯曲承载能力.

图 1(a) 展示了结构的碳纤维功能层组成情况,其双向碳纤维阵列所包含的两种单元分别被命名为 cell 1、cell 2,两种单元均由长/宽均梯度排列的碳纤维条组成,并隔层嵌入到玻璃纤维复合材料基质中,其碳纤维方向分别沿  $x$ 、 $y$  轴. $\theta$  代表电磁波的入射角度,而视角 view 1、view 2 分别沿  $y$  轴、 $x$  轴负方向.图 1(b) 中双向碳纤维阵列结构的层数  $n = 15$ ,其余均为单元的尺寸参数: $x_{l_1}$  和  $x_{w_1}$  分别代表单元 1 最上层碳纤维的长度值、宽度值, $x_{d_l}$ 、 $x_{d_w}$  分别代表单元 1 中相邻两层碳纤维长度、宽度的变化梯度, $y_{l_1}$ 、 $y_{w_1}$  分别代表单元 2 最上层碳纤维条的长度值、宽度值, $y_{d_l}$ 、 $y_{d_w}$  分别代表单元 2 中相邻两层碳纤维长度、宽度的变化梯度, $x_h$  和  $x_s$  分别指单元 1 中碳纤维条的厚度值和间隙值, $y_h$  和  $y_s$  分别指单元 2 中碳纤维条的厚度值和间隙值, $x_{p_x}$  和  $x_{p_y}$  分别表示单元 1 在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的周期尺寸, $y_{p_x}$  和  $y_{p_y}$  分别表示单元 2 在  $x$  轴和  $y$  轴方向上的周期尺寸, $t_1$  和  $t_2$  分别表示碳纤维底板、玻璃纤维基质的厚度值.其中  $x_h = x_s = y_h = y_s = 0.125$  mm,  $x_{p_x} = 12.53$  mm,  $y_{p_x} = 6.47$  mm,  $x_{p_y} = y_{p_y} = 15$  mm,  $t_1 = 0.75$  mm,  $t_2 = 4.125$  mm.

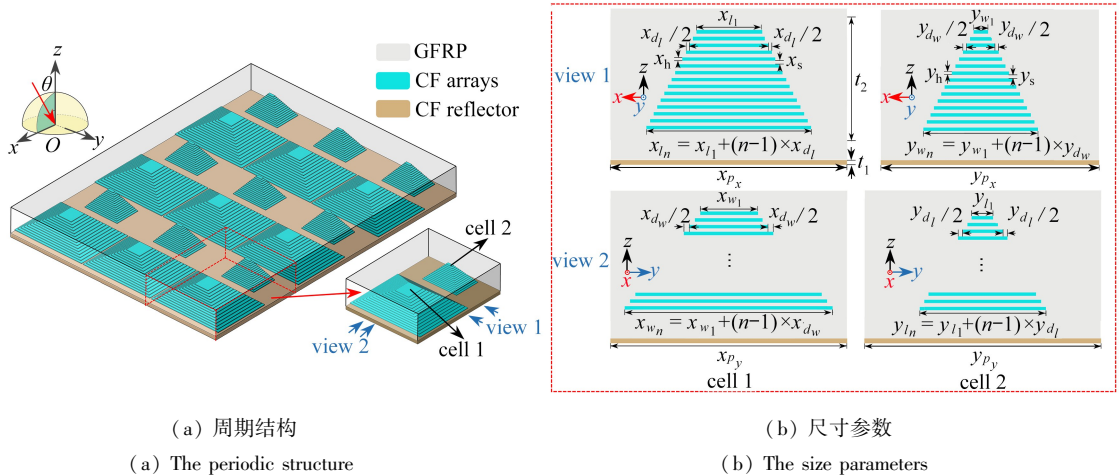


图 1 双极化结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CFDALS

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同.

在建立了仿真模型后,材料的电磁参数如下:碳纤维轴向与径向电导率分别设置为 35 000 S/m 和 89 S/m<sup>[24]</sup>;玻璃纤维复合材料由于介电损耗较碳纤维相比几乎可以忽略,因此将其介电常数设置为各向同性,对结构的电磁性能并不产生显著影响,此处玻璃纤维复合材料的介电常数被设置为在 10 GHz 处等于 4.3(1-0.025j).电磁场边界条件设置为:入射电磁波沿  $xOz$  平面入射且被分别设置为 TE、TM 两种极化条件,结构在  $x$  和  $y$  方向设置为 periodic,而  $z$  方向设置为 open space.为拓展吸收频带、提升吸收强度,本研究利用 CST Studio Suite 2020 电磁仿真软件对该结构进行参数化建模,并通过仿真计算得到  $S_{11}$ ,吸收率计算公式如下:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2, \quad (1)$$

其中  $R(\omega)$  为反射率,  $T(\omega)$  为透射率; 由于碳纤维底板对测试频段的电磁波具有全反射特性, 结构的透射率  $T(\omega) = 0$ 。

研究表明, 影响碳纤维梯度阵列结构与玻璃纤维复合材料基质阻抗匹配的主要尺寸参数为碳纤维条的长度和宽度<sup>[23]</sup>, 调整相关参数可能对整体结构的电磁吸收性能产生影响。为了实现结构在双极化方向上宽频高强的电磁吸波性能, 本文利用遗传算法对影响其电磁波吸收能力的 8 个主要参数:  $x_{l_1}, x_{w_1}, x_{d_l}, x_{d_w}, y_{l_1}, y_{w_1}, y_{d_l}, y_{d_w}$  进行优化分析, 其种群最大数量取 559, 子代基因的交换比例为 80%, 优化的电磁波频带为 8~18 GHz, 反射率标准  $R_1 = -10$  dB, 目标设定为反射率  $R_n < R_1$ , 目标函数表达为  $F_{\text{goal}} = \sum_n (R_n - R_1)^2$ 。在设计频段内, 当反射率  $R_n$  违反目标设定时上述目标函数有效, 目标函数值应取最小值以拓宽吸收带并减小吸收率的波动。表 1 列出了各参数的优化范围以及满足该优化目标的一组较优结果。

表 1 尺寸参数的优化结果(单位: mm)

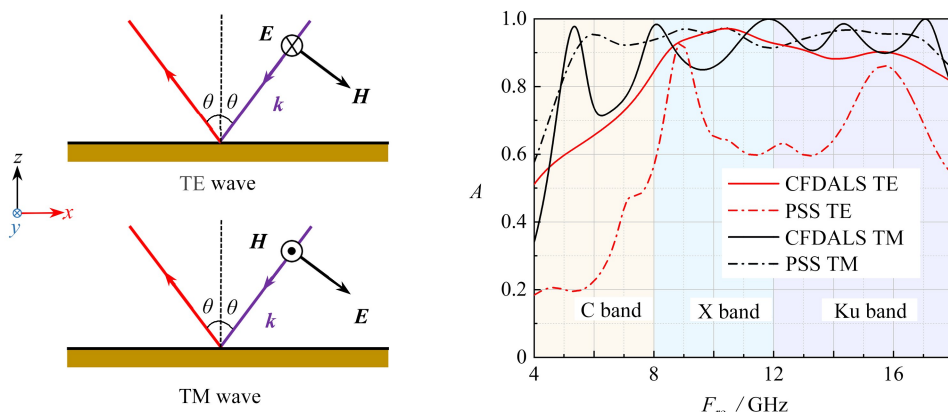
Table 1 Optimization results of size parameters (unit: mm)

parameter	$x_{l_1}$	$x_{w_1}$	$x_{d_l}$	$x_{d_w}$	$y_{l_1}$	$y_{w_1}$	$y_{d_l}$	$y_{d_w}$
optimization range	3.0~5.0	2.5~3.0	0.5~1.0	0.5~1.0	1.0~2.0	0.3~0.6	0.4~0.6	0.3~0.4
optimization result	3.16	2.90	0.56	0.84	1.22	0.46	0.42	0.32

## 2 结果与讨论

### 2.1 电磁性能仿真结果分析

优化后的双极化结构与前期研究的极化敏感结构<sup>[23]</sup>关于 TE、TM 极化波的吸收性能比较如图 2 所示, 其中  $F_{\text{re}}$  表示入射电磁波的频率,  $A$  表示电磁波吸收率, 图 2(a) 展示了 TE、TM 极化波的波矢  $k$ 、磁场  $H$  和电场  $E$  的方向, 由图 2(b) 结果可知, 对于 TE 波在 8~18 GHz 频段的平均吸收率由极化敏感结构的 69.6% 提升至双极化结构的 90.8%, 这表明经双极化吸波功能设计后 TE 波的平均吸收率提升幅度达到了 30.5%。而对 TM 波在 5~18 GHz 频段的平均吸收率由极化敏感结构的 94.1% 下降至双极化结构的 90.6%, 其吸收效果略有下降。总而言之, 双极化结构在保持对 TM 极化波的吸收性能基本不变的前提下, 实现了对 TE 极化波吸收性能的显著提升, 初步证明其对 TE 和 TM 极化电磁波均具有较好的吸收效果。



(a) TE 与 TM 极化波示意图

(b) 吸收率曲线

(a) The schematic diagram of TE and TM polarized waves

(b) The absorptivity curves

图 2 双极化结构与极化敏感结构的吸波性能比较(入射角  $\theta = 30^\circ$ )

Fig. 2 Comparison of CFDALS and PSS in EM wave absorption properties (incident angle  $\theta = 30^\circ$ )

飞行器结构不仅需要实现双极化方向的吸波性能, 还要实现宽入射角下的电磁波吸收性能, 以应对斜入射电磁波的威胁。因此, 本文进一步对极化敏感结构和双极化结构在 TE、TM 极化电磁波斜入射下的吸收性能进行了研究, 仿真结果如图 3 所示。图 3(a) 说明极化敏感结构对 TE 极化电磁波的吸收效果较差, 仅对 8~9 GHz 频段、入射角  $0^\circ \sim 30^\circ$  下电磁波的吸收率达到 90%, 其吸收带宽、入射角范围均较窄, 而图 3(b) 表明双极化结构对  $0^\circ \sim 45^\circ$  入射角下、8~13 GHz 频段电磁波的平均吸收率不低于 90%, 且  $0^\circ \sim 15^\circ$  入射角下对 14



~18 GHz 电磁波同样可实现高于 90% 的电磁波吸收效果,充分证明双向碳纤维阵列的引入有效拓宽了结构对 TE 极化波的强吸收频带和入射角范围.此外,图 3(c) 和图 3(d) 分别展示了极化敏感结构与双极化结构在 TM 极化电磁波斜入射下的吸收性能.可以发现:对于 5~18 GHz 频段电磁波,极化敏感结构的吸收性能随着其入射角增大而逐渐增强,且 5~16 GHz 范围内仍可以保证超过 90% 的高吸收率;然而双极化结构受入射角变化影响较复杂,随着入射角增大,结构对 5~8 GHz 频段电磁波的吸收性能逐渐减弱,反之其对 8~18 GHz 频段电磁波吸收性能逐渐增强,由于 5~18 GHz 内出现多个吸收率达到 99% 的强吸收峰(9 GHz, 12 GHz, 15 GHz 和 17 GHz 附近),且 5 GHz 附近吸收率超过 85%,因而其对 5~18 GHz 频段电磁波也可实现强吸收.

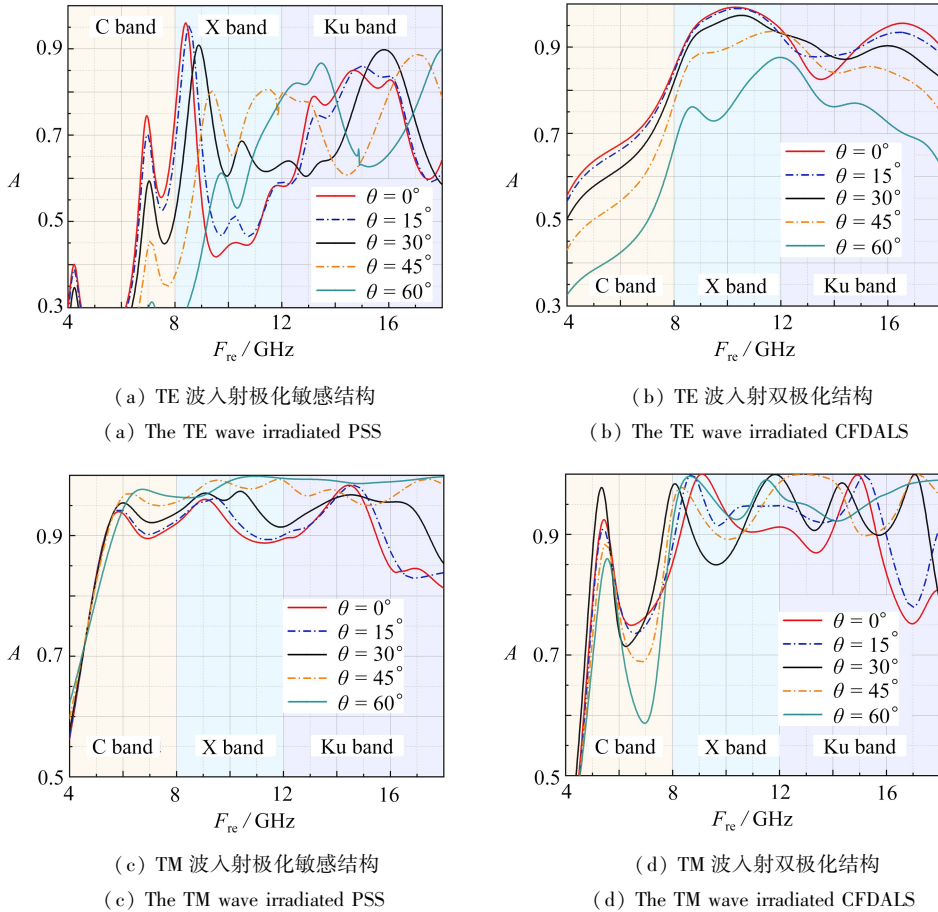


图 3 斜入射性能对比 TE 波入射

Fig. 3 EM wave absorption performances in oblique incidence

综上所述:本文提出的双极化结构对 8~18 GHz 频段、 $0^\circ \sim 45^\circ$  入射角下 TE 极化电磁波的平均吸收率为 91%,而极化敏感结构仅为 70%,相较极化敏感结构其电磁波平均吸收率的提升幅度达到了 30.5%;对于 5~18 GHz 频段、 $0^\circ \sim 60^\circ$  入射角范围的 TM 极化电磁波,极化敏感结构的平均吸收率为 94%,而双极化方向碳纤维吸波结构的平均吸收率达到了 90%,满足了结构对 TM 极化电磁波的强吸收需求.总而言之,双向碳纤维阵列的引入使结构具备对双极化方向宽频斜入射电磁波的高效吸收能力.

## 2.2 力学性能有限元仿真研究

由于双极化结构中引入了纤维方向分别沿  $x, y$  轴的碳纤维阵列结构,因此对其沿  $x, y$  两个方向的三点弯曲性能进行了有限元仿真分析,并与极化敏感结果进行了对比.极化敏感结构和双极化结构在  $x, y$  方向的三点弯曲有限元模型分别被命名为 MX、MY 和 SX、SY,各结构外形尺寸均为  $95 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 4.875 \text{ mm}$ .力学仿真利用有限元软件 ABAQUS 2017 的 Explicit 求解器进行分析,碳纤维、玻璃纤维预浸料的材料参数由复合材料供应商山东光威碳纤维产业技术研究院有限公司提供,在表 2 中列出.

考虑到该尺寸下结构可能无法包含整数个碳纤维阵列,如图 4 所示选取了碳纤维阵列结构的分布位置,各框图的右上角表示加载情况,其中棕色区域表示施加载荷的中横截面,根据力学分析可知该横截面上弯矩最大,同时弯曲正应力也最大.在所选取的碳纤维阵列分布下,一方面保证仿真模型受三点弯曲载荷时左右两半完全对称,另一方面尽量避免在中截面处由碳纤维承担弯曲载荷,从而排除施加载荷的位置不同对三点弯曲仿真结果的影响,使各组结果具备可比性.此外,由于有限元仿真中碳纤维-玻璃纤维界面处纤维保持连续,然而实际制备时引入碳纤维阵列会打断碳纤维和玻璃纤维之间纤维的连续性,可能产生应力集中<sup>[25]</sup>.这一区别严重影响了有限元仿真的准确性,因此如图 4(a)、(c)、(d)所示,通过在标红区域处引入强度、临界断裂能极低的 cohesive 单元(表 3),在尽量消除其引入对整体结构刚度、强度仿真结果的影响下,达到打断上述两种纤维连接处纤维连续性的目的,修正了对应的有限元仿真模型,而图 4(b)结构中碳纤维铺设方向与弯曲正应力方向垂直,因此该结构无需引入 cohesive 单元进行修正.

表 2 材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of materials

mechanical property	carbon fiber prepreg	glass fiber prepreg
density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1 550	1 600
longitudinal elastic modulus $E_1 / \text{MPa}$	125 000	34 000
transverse elastic modulus $E_2 / \text{MPa}$	12 000	10 300
Poisson's ratio $\mu_{12}, \mu_{13}, \mu_{23}$	0.28, 0.28, 0.44	0.278, 0.278, 0.38
shear modulus $G_{12} / \text{MPa}, G_{13} / \text{MPa}, G_{23} / \text{MPa}$	4 500, 4 500, 2 500	2 700, 2 700, 1 500
fiber tensile strength $X_T / \text{MPa}$	2 100	1 300
fiber compressive strength $X_C / \text{MPa}$	1 500	860
matrix tensile strength $Y_T / \text{MPa}$	180	160
matrix compressive strength $Y_C / \text{MPa}$	240	210
normal tensile strength $Z_T / \text{MPa}$	180	160
normal compressive strength $Z_C / \text{MPa}$	240	210
shear strength $S_{12} / \text{MPa}, S_{13} / \text{MPa}, S_{23} / \text{MPa}$	200, 200, 140	140, 140, 80

表 3 Cohesive 单元的力学性能

Table 3 Mechanical properties of cohesive elements

density $\rho_c / (\text{kg}/\text{m}^3)$	modulus			strength			critical fracture energy		
	$E_n / \text{GPa}$	$E_s / \text{GPa}$	$E_T / \text{GPa}$	$\sigma_n / \text{MPa}$	$\sigma_s / \text{MPa}$	$\sigma_T / \text{MPa}$	$G_n^c / (\text{J}/\text{mm}^2)$	$G_s^c / (\text{J}/\text{mm}^2)$	$G_T^c / (\text{J}/\text{mm}^2)$
1 560	3	1.154	1.154	0.01	0.015	0.001	0.02	0.025	0.025

为了使有限元仿真与实际破坏情况相符合,仿真中需引入损伤准则进行判断,本文基于 Hashin 损伤准则计算结构的损伤情况其公式如下:

$$R_{ft} = \left( \frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \alpha \left[ \left( \frac{\sigma_{12}}{S_{12}^c} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{13}}{S_{13}^c} \right)^2 \right] \geq 1, \quad (2)$$

$$R_{fc} = \left( \frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 \geq 1, \quad (3)$$

$$R_{mt} = \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left( \frac{\sigma_{12}}{S_{12}^c} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{13}}{S_{13}^c} \right)^2 \geq 1, \quad (4)$$

$$R_{mc} = \frac{1}{Y_c} \left[ \left( \frac{Y_c}{2S_{23}^c} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{4S_{23}^2} + \left( \frac{\tau_{12}}{S_{12}^c} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{13}}{S_{12}^c} \right)^2 \geq 1, \quad (5)$$

式中,  $R_{ft}, R_{fc}, R_{mt}, R_{mc}$  分别代表纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸、基体压缩的损伤指数;  $\sigma_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$  表示  $ij$  方向的有效应力张量分量;  $X_T, X_C, Y_T, Y_C$  分别代表材料的纤维拉伸强度、纵向压缩强度、横向拉伸强度和横向压缩强度;  $S_{12}, S_{23}, S_{13}$  分别是材料三个方向的剪切强度.在式(2)中,系数  $\alpha$  是纤维拉伸失效中考虑剪切应

力的影响因子,本文中其取值为1.当应力参数满足不等式时,材料力学性能超出线弹性阶段,认为损伤萌生.采用二次名义应力失效准则(quads damage)预测 cohesive 单元的分层损伤起始,由于在面外压缩载荷下分层损伤出现后会急速扩展直至失效,故直接将其视为分层失效判据:

$$R_{dl} = \left( \frac{\sigma_{33}}{Z_T} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{13}}{S_{13}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{23}}{S_{23}} \right)^2 \geq 1, \quad (6)$$

式中  $Z_T$  为法向拉伸强度,  $R_{dl}$  被定义为分层损伤的损伤参量,其值大于1时认为损伤起始.

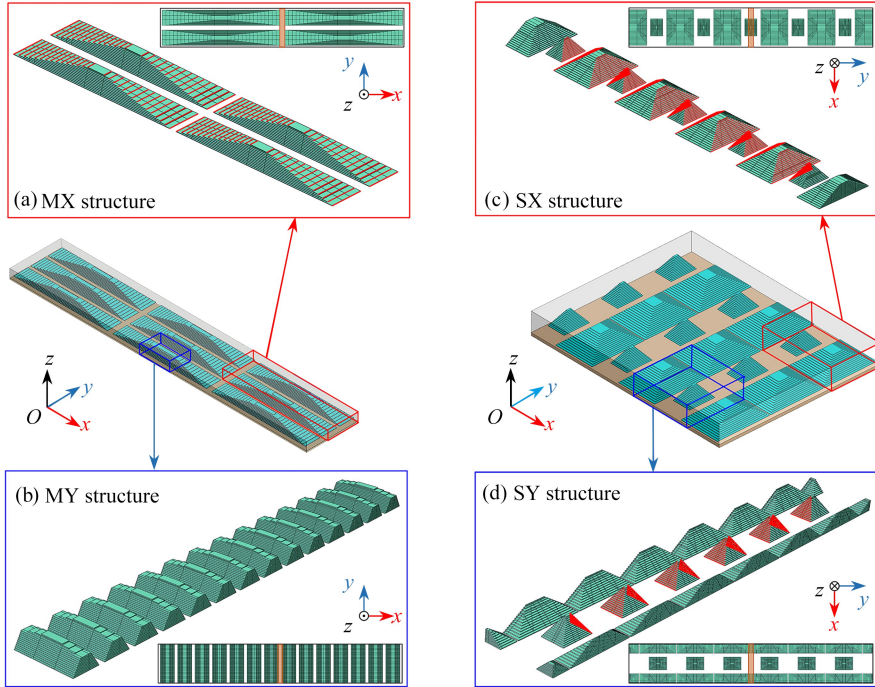


图4 碳纤维阵列排布和弯曲加载区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of CF array distributions and bending load areas

将上述损伤准则应用于仿真计算中,仿真所得结果如图5所示.其中  $\delta$  表示结构在中横截面处的挠度,  $F_l$  表示弯曲载荷.蓝色实线为 MX 结构的试验结果<sup>[23]</sup>;黑线和红线分别表示两结构  $x$  方向与  $y$  方向弯曲性能的仿真结果.可以发现各组结果的趋势基本相同,曲线可分为线弹性阶段和破坏阶段,说明双极化结构与极化敏感结构的变形破坏模式基本一致.MX 结构的仿真结果和试验结果如表4所列,其弯曲强度  $\sigma_p$ 、弯曲刚度  $K_f$  的计算公式分别如下:

$$\sigma_p = \frac{3Fl}{2bh^2}, \quad (7)$$

$$K_f = \frac{F}{d}, \quad (8)$$

式中  $F$  表示施加载荷的峰值,  $l$  表示跨距,  $d$  表示峰值载荷处对应的位移,  $b$  和  $h$  分别表示结构的宽度和高度.将各结构的弯曲强度和弯曲刚度除以对应的密度,可得其比弯曲强度、比弯曲刚度值.

计算 MX 结构仿真与试验结果的误差,其比弯曲刚度、比弯曲强度的误差分别为-3.3%和-15.1%,可以发现仿真结果与试验结果吻合较好,证明了仿真的有效性.在此基础上,将两结构  $x, y$  方向弯曲性能的仿真结果进行对比,对比结果汇总于表5,结果表明,双极化结构相较极化敏感结构,其  $x$  方向的比弯曲刚度、比弯曲强度分别降低了7.5%和9.3%,而其  $y$  方向的比弯曲刚度、比弯曲强度分别提升了3.0%和8.5%,实现了小幅提升.总的来说,双极化结构与极化敏感结构在弯曲性能方面基本持平,而研究表明极化敏感结构与玻璃纤维结构相比其力学性能得到了显著增强<sup>[23]</sup>,这表明本文设计的双极化结构同样展现出双方向优异的弯曲性能,其相较玻璃纤维层合结构实现了双方向弯曲性能的显著提升.

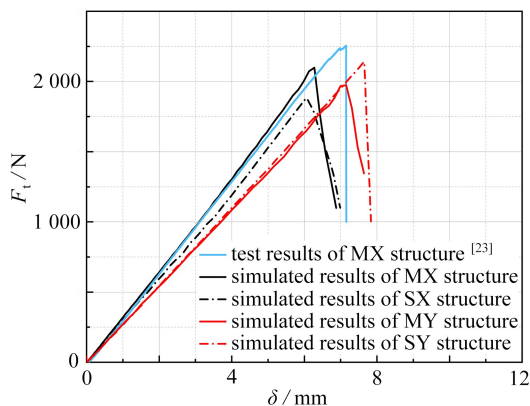


图 5 三点弯曲性能对比

Fig. 5 Comparison of 3-point bending performances

表 4 MX 结构的试验与仿真结果对比

Table 4 Comparison of experimental and simulated results of the MX structure

index	test result	simulated result	simulation error
density $\rho_{MX} / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1 451	1 591	9.6%
flexural stiffness $K_{MX} / (\text{N}/\text{mm})$	315.48	334.34	6.0%
specific flexural stiffness $K_{sMX} / (\text{N}/(\text{kg}/\text{m}^2))$	217.42	210.15	-3.3%
flexural strength $S_{MX} / \text{MPa}$	825.40	768.36	-6.9%
specific flexural strength $S_{sMX} / (\text{MPa}/(\text{kg}/\text{m}^3))$	0.568 8	0.482 9	-15.1%

表 5 双极化结构与极化敏感结构沿  $x, y$  轴弯曲性能仿真结果对比Table 5 Comparison of flexural property simulation results of CFDAIS and PPS along  $x$  and  $y$  axes

index	flexural property				improvement of CFDAIS compared with PPS	
	MX	SX	MY	SY	flexural property in $x$ axis	flexural property in $y$ axis
density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1 591	1 577	1 591	1 591	-0.2%	0
flexural stiffness $K_f / (\text{N}/\text{mm})$	339.31	311.19	271.70	279.92	-8.3%	3.0%
specific flexural stiffness $K_{sf} / (\text{N}/(\text{kg}/\text{m}^2))$	213.27	197.33	170.77	175.94	-7.5%	3.0%
flexural strength $S_f / \text{MPa}$	768.36	690.11	722.39	784.09	-10.2%	8.5%
specific flexural strength $S_{sf} / (\text{MPa}/(\text{kg}/\text{m}^3))$	0.482 9	0.437 6	0.454 0	0.492 8	-9.3%	8.5%

### 3 结 论

针对飞行器蒙皮结构双极化方向的电磁吸波需求与双方向承载性能设计需求,本文利用双向排列的碳纤维预浸料增强玻璃纤维层合结构的电磁吸波和弯曲性能,提出了一种面向飞机蒙皮的新型双极化碳纤维吸波层合结构,此后通过有限元仿真分析将该结构与极化敏感结构在电磁吸波、弯曲性能方面进行对比,得到主要结论如下:

1) 设计对 TE、TM 极化电磁波均实现强吸收的双向碳纤维阵列结构,赋予层合结构双极化电磁吸波性能;同时引入了承载性能优异的碳纤维反射层,实现结构在  $x, y$  方向上弯曲承载性能的大幅提升。

2) 对双极化结构的双向碳纤维阵列进行尺寸优化设计,最终该结构对 8~18 GHz 频段、 $0^\circ \sim 45^\circ$  入射角范围的 TE 极化电磁波,以及对 5~18 GHz 频段、 $0^\circ \sim 60^\circ$  入射角范围的 TM 极化电磁波的平均吸收率均超过 90%,这表明结构具备优异的双极化电磁吸波性能。

3) 通过有限元仿真分析了双极化结构与极化敏感结构在碳纤维阵列两个排列方向上的三点弯曲性能。仿真结果表明,双极化结构较极化敏感结构其  $x$  方向的比弯曲刚度、比弯曲强度分别降低了 7.5% 和 9.3%,



而  $y$  方向的比弯曲刚度、比弯曲强度分别提升了 3.0% 和 8.5%, 表明双极化结构碳纤维阵列两个排列方向上具备优异的弯曲性能。

### 参考文献 (References):

- [1] 姚智馨, 肖绍球. 超宽带宽角极化不敏感的电路模拟吸波材料设计[J]. 雷达学报, 2021, **10**(2): 274-280. (YAO Zhixin, XIAO Shaoqiu. Wide-angle, ultra-wideband, and polarization-insensitive circuit analog absorbers[J]. *Journal of Radars*, 2021, **10**(2): 274-280. (in Chinese))
- [2] 陈明继, 裴永茂, 方岱宁. 夹芯型雷达吸波结构的多目标优化[J]. 应用数学和力学, 2010, **31**(3): 315-323. (CHEN Mingji, PEI Yongmao, FANG Daining. Multi-objective optimization design of radar absorbing sandwich structure[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2010, **31**(3): 315-323. (in Chinese))
- [3] 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. (TAO Meizhen, SUN Qin, AI Jianliang, et al. *Comprehensive Design of Modern Aircraft Structures*[M]. Xi'an: Northwest-ern Polytechnical University Press, 2014. (in Chinese))
- [4] 高彬, 杨文, 彭兴国. 后机身蒙皮的改进优化[J]. 应用数学和力学, 2014, **35**(S1): 113-117. (GAO Bin, YANG Wen, PENG Xingguo. Optimization design of the rear fuselage skin[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(S1): 113-117. (in Chinese))
- [5] 张雪霏, 周金堂, 姚正军, 等. CIP/GF/CF/EP 吸波复合材料的制备及力学性能[J]. 材料工程, 2019, **47**(10): 141-147. (ZHANG Xuefei, ZHOU Jintang, YAO Zhengjun, et al. Preparation and mechanical property of CIP/GF/CF/EP absorbing composites[J]. *Journal of Materials and Engineering*, 2019, **47**(10): 141-147. (in Chinese))
- [6] YUE J, MA X F, GONG Y L, et al. Constructing 3D heterogeneous flower-like spherical MoS<sub>2</sub>/CNTs composites with worm-like surface as a superior electromagnetic wave absorber[J]. *Solid State Sciences*, 2024, **147**: 107388.
- [7] ZHU Z X, ZHOU J, LI Y G, et al. Design of a composite metamaterial toward perfect microwave absorption and excellent load-bearing performance[J]. *Materials and Design*, 2023, **229**: 111910.
- [8] ZHANG C G, JI S J, ZHAO J, et al. Design and analysis of a polarization-independent and incident angle insensitive triple-band metamaterial absorber[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2022, **138**: 115131.
- [9] WANG C X, CHEN M J, LEI H S, et al. Radar stealth and mechanical properties of a broadband radar absorbing structure[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, **123**: 19-27.
- [10] 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*, 2018, **144**: 449-456.
- [11] GOU G J, HUA W L, LIU K Y, et al. Bimetallic MOF@ wood-derived hierarchical porous carbon composites for efficient microwave absorption[J]. *Diamond and Related Materials*, 2024, **141**: 110688.
- [12] KONG W W, SHI J F, ZOU K K, et al. Synergistically optimizing interlaminar and electromagnetic interference shielding behavior of carbon fiber composite based on interfacial reinforcement[J]. *Carbon*, 2022, **200**: 448-455.
- [13] LIU Z X, ZHANG R B, WANG S J, et al. Design and fabrication of an all-composite ultra-broadband absorbing structure with superior load-bearing capacity[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, **240**: 110094.
- [14] 刘鑫, 吴倩倩, 于国财, 等. 碳纤维/树脂基复合材料曲壁蜂窝夹芯结构的三点弯曲性能[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(5): 490-498. (LIU Xin, WU Qianqian, YU Guocai, et al. Three-point bending properties of carbon fiber reinforced polymer composite honeycomb sandwich structures with curved wall[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(5): 490-498. (in Chinese))
- [15] 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. (LU Xiaoxin. Research on the surface impedance modulation and structural absorbing properties of carbon fiber reinforced plastic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese))

- [16] 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.
- [17] LI C, CAO Q S, ZHOU G M, et al. Design and study of a new broadband RCS carbon-glass fiber hybrid meta-material[J]. *Composite Structures*, 2022, **301**: 1116207.
- [18] 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.
- [19] LI C, CAO Q S, ZHOU G M, et al. A new stitched-plain weave fabric composite structure with reduced broadband radar cross-section[J]. *Composite Structures*, 2023, **321**: 117261.
- [20] 王黄腾龙. 宽入射角电磁超介质吸波材料吸波机理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014. (WANG Huangtenglong. Theoretical analyse of wide-angle metamaterial absorber[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese))
- [21] 姚智馨. 超宽带宽入射角的电路模拟吸波材料机理与设计方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021. (YAO Zhixin. Research on mechanism and design of ultra-wideband wide-angle circuit analog absorbers[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese))
- [22] 张海丰, 李颖, 王东方, 等. 斜入射时平板吸波材料电磁参数匹配规律研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2017, **41**(6): 641-644. (ZHANG Haifeng, LI Ying, WANG Dongfang, et al. The study on the electromagnetic matching laws of absorbing materials at the oblique incidence of electromagnetic wave[J]. *Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science)*, 2017, **41**(6): 641-644. (in Chinese))
- [23] 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/OL]. 复合材料学报, 2024: 1-10[2024-06-06]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231019.003>. (JI Zhengjiang, DONG Jiachen, LIANG Liang, et al. Design of carbon fiber prepreg microwave absorbing and load-bearing integrated laminated structure for aircraft skin[J/OL]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024: 1-10[2024-06-06]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231019.003>. (in Chinese))
- [24] 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.
- [25] 曾庆敦, 黄小清, 林雪慧. 层内混杂复合材料应力集中问题的研究[J]. 应用数学和力学, 2001, **22**(2): 135-139. (ZENG Qingdun, HUANG Xiaoqing, LIN Xuehui. Study on stress concentrations in an intraply hybrid composite sheet[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2001, **22**(2): 135-139. (in Chinese))