

基于复合材料夹芯结构的辐射/承载一体化天线设计与表征



董佳晨¹, 黄睿麟¹, 邱煜坤¹, 张鹏飞², 于霞², 郑锡涛¹, 闫雷雷¹

1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072

2. 航空工业成都飞机设计研究所, 四川 成都 610041

摘要:传统天线安装在飞行器上会产生增大飞机雷达截面积(RCS)、影响气动性能等问题,严重影响飞行器性能,因此,天线与飞行器结构进行一体化设计是未来机载天线的发展趋势之一。本文通过将玻璃纤维复合材料(FR-4)格栅结构与微带天线进行复合,提出了一种辐射/承载一体化天线设计方案,设计了格栅夹芯天线和泡沫填充格栅天线。通过电磁仿真和测试表征了两种天线结构的辐射性能,其工作频段均在12.65~12.85GHz之间,增益均大于10dBi。面外压缩试验结果表明,通过在格栅夹芯天线填充泡沫,可有效地提升原结构的承载特性和能量吸收特性。本文提出的一体化天线结构有效地提高了结构效率,在工程应用中可替换飞行器中现有夹芯结构,进一步扩展一体化结构的应用空间。

关键词:微带天线; 格栅结构; 泡沫填充; 一体化设计; 力学性能

中图分类号: TB332

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.06.002

天线是现代通信系统的关键结构,是飞机上用来辐射和接收电磁波的装置,承担着飞机通信、导航、电子对抗等多重任务^[1-2]。为满足多方面对通信性能的要求,一架飞机上往往装有70多种天线^[3-4]。为了在机身内部安装天线,需要配套凸出机身,并形成鼓包的天线罩;而凸出在机身外部的天线多为刀形天线或鞭状天线。无论是鼓包还是外部天线,不仅会增大飞机的雷达截面积(RCS),还会对气动性能产生不利影响,同时增加了飞行器的整体重量(质量)、复杂性以及维护成本^[5-7]。同时,机体上任何部位都会对其搭载的通信天线造成各种电磁影响,从而引起天线的辐射特性产生变化,影响天线的电磁性能。因此迫切需要既能与飞机装备平台高度集成和融合,又兼具优良力学和电磁性能的天线结构^[8],可见结构功能一体化已经成为飞行器结构发展的必然趋势^[9]。

针对同时具有优良力学和电磁性能的一体化天线设计, Baek等^[10]提出了一种支持阵列天线的网格结构,通过将天线、复合材料保护外壳与天线罩进行集成,使天线结构具备承载能力。除此之外,复合材料夹芯结构的发展也为一

体化天线提供了设计思路^[11]。周金柱等^[12-13]提出了多种蜂窝夹芯微带天线,进而通过植入功能层,设计了一种集聚力纤传感器的智能蒙皮天线结构。 Ji等^[14]提出利用泡沫芯体构建一体化天线结构,可以保证天线在与结构集成的同时不损伤任何电磁性能,并对其抗屈曲特性进行了研究。但是以上设计只是将单一芯体与天线进行简单复合,而忽略了夹芯结构芯体的高可设计性。

近年来,得益于芯体的轻质、高刚性、高强度及材料可设计性等特征,新型复合材料夹芯结构的设计成为国内外学者的研究热点^[15]。目前常见的芯体材料有格栅^[16]、泡沫^[17]、蜂窝^[18]等,其中,格栅结构因其轻质和优异的承载性能而受到广泛关注^[16,19]。为了进一步提高格栅结构的力学性能, Zhou Hao等^[20]通过数值和试验研究了聚甲基丙烯酸亚胺(PMI)泡沫填充对碳纤维复合材料格栅结构抗压强度的影响,说明PMI泡沫填充可以改变其破坏模式,有效地提高其抗压强度。此外,玻璃纤维复合材料(FR-4)作为一种广泛应用于航空航天结构的复合材料,因其优良的介电和力学性能^[21-22]而被广泛应用于电磁波调控领域, Cheng

收稿日期: 2023-10-26; 退修日期: 2024-01-31; 录用日期: 2024-03-01

基金项目: 航空科学基金(201909053001)

引用格式: Dong Jiachen, Huang Ruilin, Qiu Yukun, et al. Design and characterization of radiation/load-bearing integrated antenna based on composite sandwich structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(06): 12-21. 董佳晨, 黄睿麟, 邱煜坤, 等. 基于复合材料夹芯结构的辐射/承载一体化天线设计与表征[J]. 航空科学技术, 2024, 35(06): 12-21.

Linhao 等^[23]基于FR-4 制备格栅结构,并在格栅壁设置超材料阵列,设计出可以实现吸波功能的夹芯结构。

综上所述,现有的一体化天线设计方案只是将单一芯体与天线进行简单集成,忽略了芯体的高可设计性。而利用不同材料进行芯体设计不仅可以实现力学增强,还可以实现电磁吸波、隔热等多种功能,这就为一体化天线的设计提供了一种新的研究思路,即将夹芯结构增强设计的思想与一体化天线进行结合,设计出兼具辐射功能与力学性能增强的一体化天线。

因此,本文通过将FR-4 格栅结构与微带天线进行复合,设计了一种格栅夹芯天线,在保护微带天线的同时赋予其承载能力。通过在格栅内部填充PMI 泡沫,设计了一种泡沫填充格栅天线,进一步提升了结构的抗压缩性能。通过仿真和试验,表征了两种天线结构的辐射性能。此外,通过试验表征了格栅夹芯天线和泡沫填充格栅天线的抗压缩性能并揭示了其增强机理。该结构兼备电磁辐射和承载性能,有效提高了结构利用效率,在工程应用中可替换现有蜂窝夹芯天线,进一步提升结构承载能力。

1 天线结构设计

1.1 天线电磁参数

一个天线的性能主要可以从三个方面进行表征与评价,分别是其工作频率及频带宽度、方向特性(方向图、增益等)及阻抗特性(回波损耗等)。本文选取天线的中心工作频率及频带宽度、方向图、增益、回波损耗 S_{11} 等参数作为天线设计时的评估指标,下面对这4个电磁参数进行详细介绍。

(1) 中心工作频率及频带宽度

每个天线都有一定的频率范围,称为其频带宽度,在该范围内天线阻抗小、增益高,可以实现设计的辐射性能。这个范围的中间最佳点即为中心工作频率。

(2) 天线方向图

当一个天线发射电磁波时,辐射场的相对场强随球坐标系的角坐标 (θ, φ) 分布的图形称为天线的辐射方向图,通常采用通过天线最大辐射方向上的两个相互垂直的平面方向图来表示,即E平面和H平面,其中E平面是电场矢量所在平面,H平面是磁场矢量所在平面。

(3) 增益

在输入功率相等时,实际天线与理想辐射单元在空间中同一点处产生的功率密度之比。一般来说,天线增益是所有方向的增益中的最大增益,反映了天线把输入功率集中辐射的程度,是用来衡量天线向某一特定方向收发电磁

信号的能力。

(4) 回波损耗 S_{11}

电磁波在不同介质间传播时,由于介质不同,电磁波的能量会有一部分被反射。回波损耗 S_{11} 反映了天线的阻抗匹配特性,其表达式见式(1),表示输入能量中有多少被反射回源端。为保证天线输入阻抗匹配,一般建议 S_{11} 小于-10dB。

$$S_{11} = 20 \lg(\Gamma) \quad (1)$$

式中, Γ 是反射信号的幅值与输入信号的幅值的比值。

1.2 微带天线设计

微带天线通常是由介质基板、传输线、辐射贴片以及接地板4部分构成,其中基板底部的金属薄层作为接地板与地相连,正面则通过印刷特定形状的金属薄层作为辐射体。相比于传统天线,微带天线不仅体积小、重量轻、低剖面、易共形,而且易集成、成本低,适合批量生产,此外还兼备电性能多样化等优势。辐射贴片的形状有很多种,可以根据设计需要选择不同的形状。由于矩形、圆形等辐射贴片天线设计加工比较简单,且有较好的辐射特性、较低的交叉极化,所以在微带天线中最为常见^[24]。

本文选择矩形微带天线作为一体化天线的设计基础。设矩形微带天线介质基板的介电常数为 ϵ_r ,厚度为 t 。该矩形微带天线工作频率为 f ,其自由空间波长 $\lambda_0 = c/f$,其中 c 为光速。针对矩形微带天线,基于参考文献[25]的研究,对各尺寸参数的初始值进行选取。

(1) 介质基板厚度 t 的选取

为减少表面波对电磁性能的影响,介质基板厚度 t 需要满足 $0.003\lambda_0 < t < 0.005\lambda_0$,同时其介电常数 ϵ_r 应该尽可能小。

(2) 矩形贴片宽度 b 的选取

$$b = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

(3) 矩形贴片长度 a 的选取

$$a = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_c}} \quad (3)$$

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{t}{b} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中, ϵ_c 为有效介电常数。

同时,Yang Fan 等^[26]发现将传输线深入贴片,形成E形贴片,可以将天线由单个谐振电路转变为双个谐振电路,进而增强天线阻抗匹配能力,有效增加天线的工作带宽。

基于上述理论,可以初步确定微带天线的结构及其初始尺寸。进而通过建立参数化模型,以天线工作频带更宽、阻抗匹配更优、天线增益更高为目标进行参数优选,并结合

实际工艺限制,确定最优电磁性能下的尺寸参数,最终设计了一款矩形贴片微带天线,优化后的几何结构如图1所示。其中介质基板选用聚四氟乙烯(F4B)制备,一面部分覆铜作为辐射贴片,另一面全部覆铜作为接地板,覆铜厚度 $t_m = 0.035\text{mm}$ 。在电磁仿真过程中,F4B与FR-4的电磁参数分别设置为 $2.65(1-j0.001)$ 和 $4.3(1-j0.025)$,PMI泡沫的电磁参数设置为 $1.1(1-j0.0054)$,其中实部表示材料对电场的响应能力,虚部表示其对电场的损耗能力,铜的电导率被设置为 $5.8 \times 10^7\text{S/m}$ 。经过多轮仿真优选,最终确定尺寸参数为:介质基板边长 $l = 49\text{mm}$,厚度 $t = 0.5\text{mm}$,矩形贴片长度 a 和 b 均确定为 21mm ,边距 $s = 14\text{mm}$,传输线宽 $w = 0.7\text{mm}$ 。I区域为传输线深入区域,深入距离 $c = 0.56\text{mm}$,深入宽度 $d = 0.36\text{mm}$;为了更好地实现天线输入端阻抗匹配,设置II区域为过渡段,过渡段传输线宽度 $w_t = 0.9\text{mm}$,长度 $s_t = 1.2\text{mm}$ 。

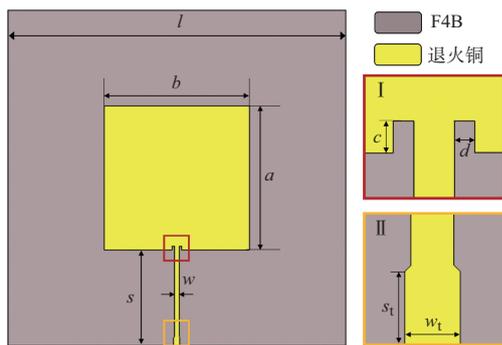


图1 微带天线结构示意图

Fig.1 Structure diagram of microstrip antenna

1.3 辐射/承载一体化天线结构设计

单纯的微带天线只考虑到天线电磁性能而未考虑到天线在工作过程中的承载问题,而本文设计一体化天线结构的思路就是利用介电损耗低的材料来构建复合材料夹芯结构的芯体,并进行力学增强设计,在不影响微带天线电磁性能的同时赋予天线结构优异的承载能力。

在常用于力学承载的复合材料中,FR-4因其优异的介电特性与较低的介电损耗而被广泛应用于电磁功能设计领域,故本节通过FR-4构建格栅芯体,并将其与微带天线进行复合,构造格栅夹芯天线,其结构示意图如图2所示。为更好地与微带天线贴合,经过多轮优选设计,格栅芯体包含 2×2 个完整胞元,格栅壁厚为 0.5mm ,芯体高度 $h = 14.5\text{mm}$ 。

Zhou Hao等^[20]发现通过PMI泡沫填充可以改变碳纤维格栅破坏模式,有效提高其抗压强度。而PMI泡沫具有良好的透波能力,故可以将其填充于FR-4格栅芯体中,在不

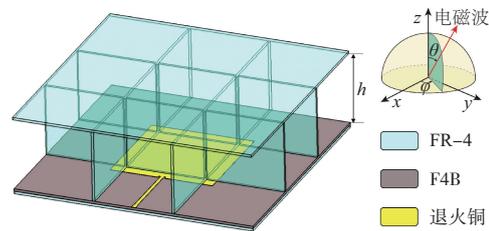


图2 格栅夹芯天线结构示意图

Fig.2 Structure diagram of grid sandwich antenna

影响结构电磁特性的情况下进一步增强格栅夹芯天线的力学性能。本文将PMI泡沫填充于格栅夹芯天线中,其余尺寸参数均保持不变,记为泡沫填充格栅天线。

仿真了微带天线、格栅夹芯天线、泡沫填充格栅天线的电磁特性,包括 S_{11} 与实际增益。仿真结果如图3所示,三种天线中,格栅夹芯天线性能最优,微带天线次之,泡沫填充格栅天线略差,这是因为格栅结构对电磁波起到了一定的束缚作用,而电磁波在PMI泡沫中传播会产生一定损耗。但是总的来说,格栅芯体、PMI泡沫与微带天线的复合对微带天线的电磁性能影响不大,三种天线工作频段均在 $12.65 \sim 12.85\text{GHz}$ 之间,增益均大于 10dBi ,在工作频率下,电磁波沿着夹芯结构面外方向进行辐射。

2 辐射性能测试

2.1 试验件制备及测试条件

为了验证上述仿真所得结果的正确性,分别制作了格栅夹芯天线、泡沫填充格栅天线的电磁试验样件,其制作工艺如图4所示,具体步骤如下:(1)通过真空辅助成形工艺固化FR-4平板;(2)用精雕机对FR-4平板进行切割,切割为面板与格栅壁,并对格栅壁进行开槽,开槽深度为格栅壁高的一半;(3)格栅壁之间通过相互嵌锁制备格栅芯体;(4)对结构进行组装,在PMI泡沫块上涂抹环氧树脂胶并将其嵌入格栅芯体的空隙内,形成泡沫填充格栅芯体;最后用环氧树脂胶将FR-4面板与微带天线依次粘贴在芯材上下表面。最终得到的电磁试验试样如图5(a)所示,为方便测试,图中两种天线均在传输线上焊接有射频连接器。

电磁测试环境如图5(b)所示,先利用矢量网络分析仪(VNA)测量试样的 S_{11} 并确定其工作频段,之后在微波暗室中测量远场特性,试样被固定在水平转台上,接收天线喇叭($12 \sim 16\text{GHz}$)平行于试件安装,并与试件中心对正。试验开始后,转台开始转动,记录接收天线喇叭接收到的电磁波,通过对比法计算天线的实际增益。按照以上方法分别测量天线E面和H面的实际增益。

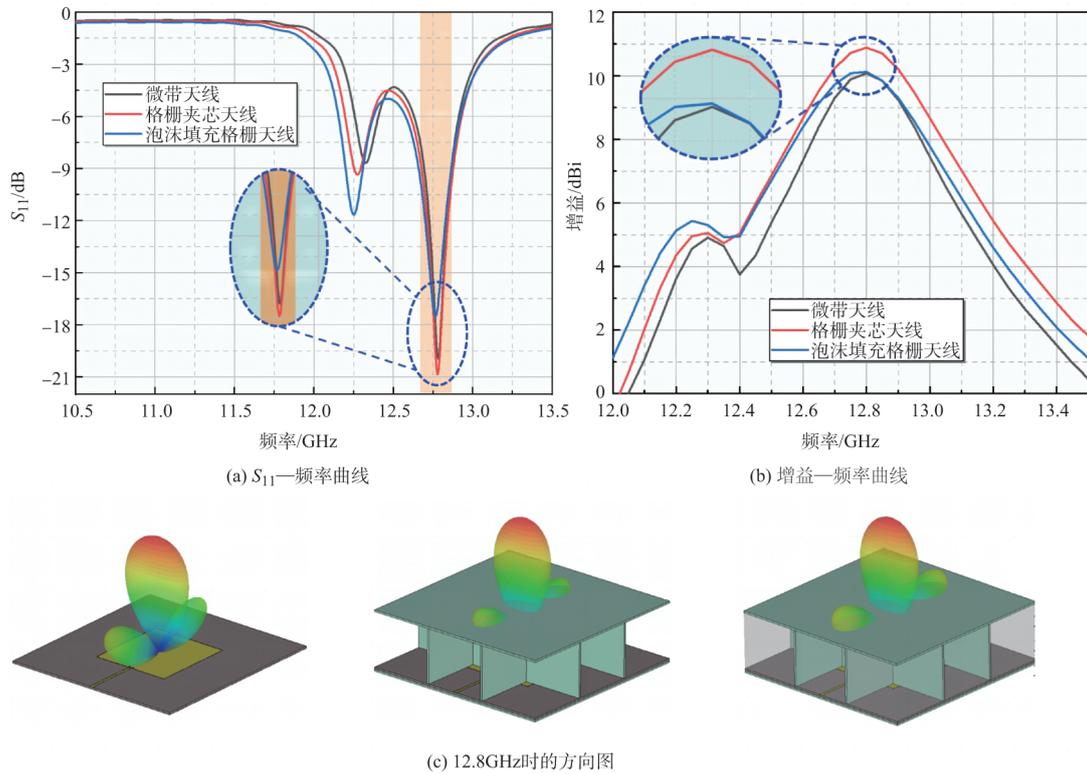


图3 三种天线的电磁性能

Fig.3 The electromagnetic properties of three antennas

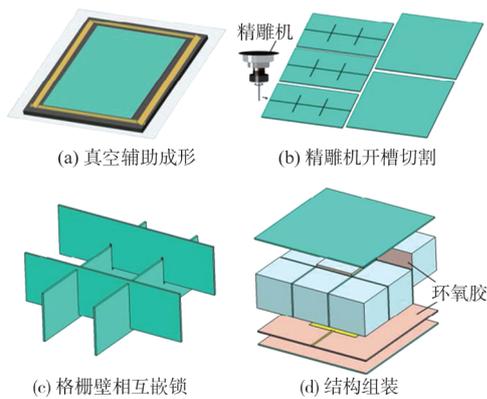


图4 试验件制备流程

Fig.4 The preparation process of the specimens

2.2 辐射测试结果分析

电磁测试结果如图6所示,其中黑线为仿真结果,红线为测试结果。图6(a)~图6(c)分别为格栅夹芯天线的 S_{11} 、E面方向图及H面方向图。结果表明,格栅夹芯天线的仿真结果与测试结果基本一致,且 S_{11} 测试结果与仿真结果能够很好吻合,E面方向图及H面方向图显示实际增益测试结果略小于仿真,这是因为仿真时忽略了胶黏剂等因素对天

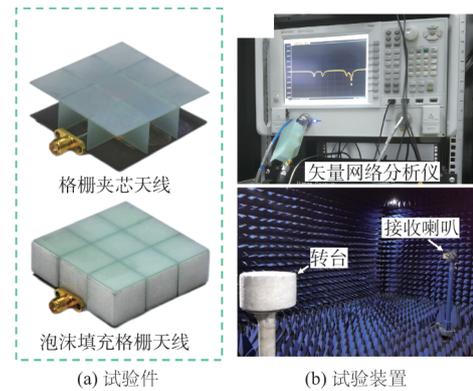


图5 电磁测试

Fig.5 Electromagnetic measurement

线性能的影响。

图6(d)~图6(f)分别为泡沫填充格栅夹芯天线的 S_{11} 、E面方向图及H面方向图。结果表明,格栅夹芯天线的E面方向图及H面方向图仿真结果与测试结果吻合良好, S_{11} 误差主要是由结构制备与测试时的不确定因素引起的。

因此,测试结果与仿真结果基本相同,验证了仿真和设计的准确性,充分说明通过将FR-4格栅芯体、PMI泡沫与微带天

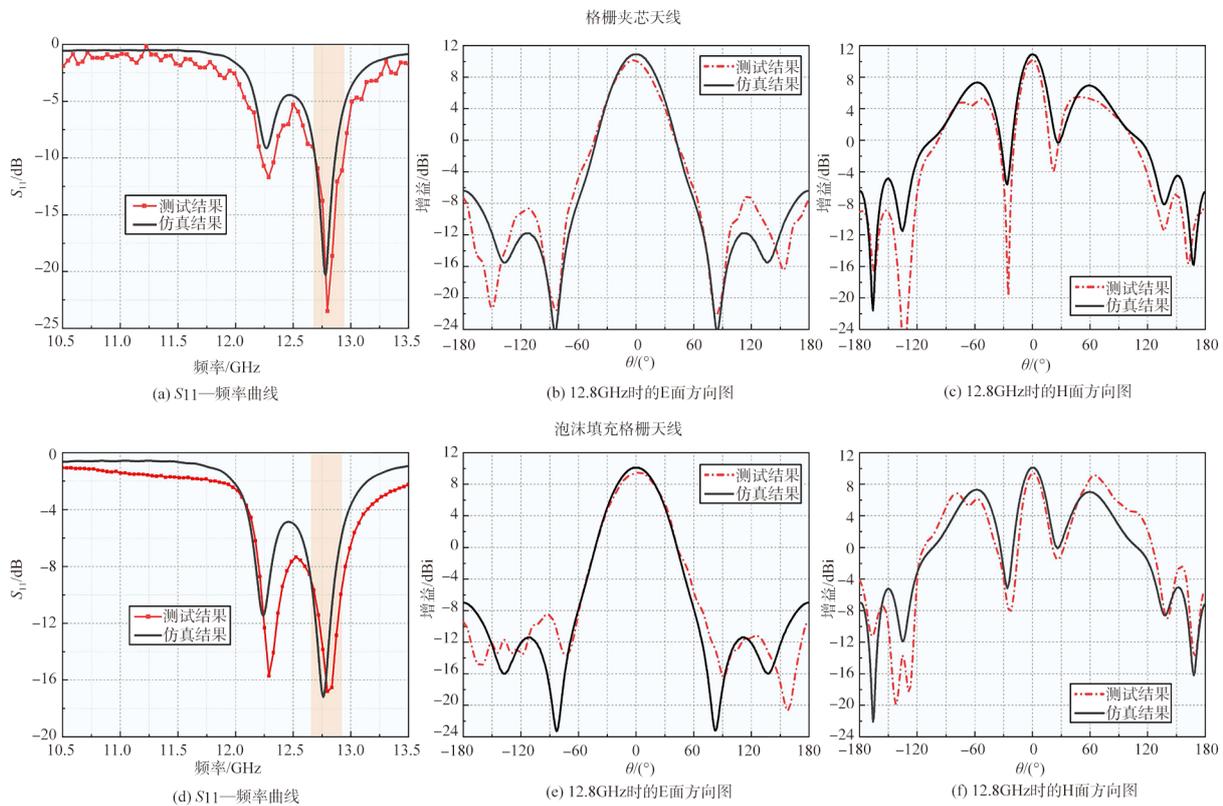


图6 电磁仿真和测试结果

Fig.6 Electromagnetic simulated and measured results

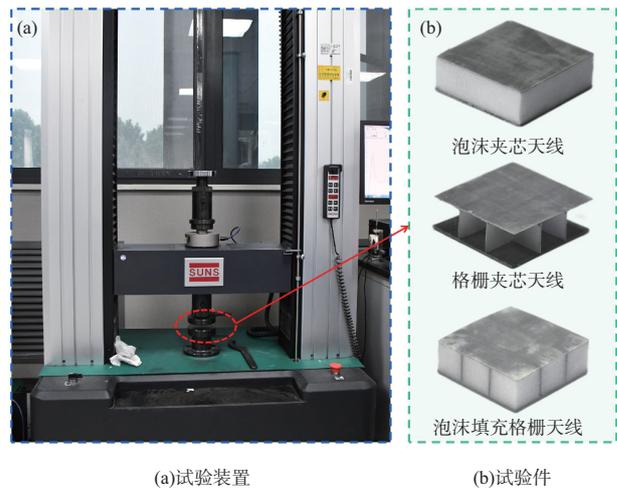
线进行复合,可以在不影响电磁性能的同时赋予其承载能力。

3 力学性能测试

3.1 试验件设计及测试条件

为准确表征出格栅夹芯天线、泡沫填充格栅天线的承载性能及承载时的力学行为,制备了泡沫夹芯天线、格栅夹芯天线、泡沫填充格栅天线三组试验件来探究结构在准静态压缩载荷作用下的力学行为及各材料之间的影响关系。力学试验件制备流程与电磁样件基本相同,但为便于测试,在制备力学试验件时没有焊接射频连接器;同时由于力学试验需要进行铺层设计,FR-4板采用G15000/9A16/33%玻璃纤维预浸料铺制而成,铺层方式为[0/90/90/0];泡沫采用密度为 75kg/m^3 的PMI泡沫,最终制备的试验件如图7(b)所示,试样尺寸大小为 $49\text{mm}\times 49\text{mm}\times 16\text{mm}$ 。

力学试验使用电子万能试验机(UTM5105)进行,试验加载速率设置为 1mm/min 。每秒记录100次的力和位移,试验过程中使用照相机全程记录各结构的失效过程,选取典型试样测试结果绘制应力-应变曲线。



(a)试验装置

(b)试验件

图7 力学测试

Fig.7 Mechanical test

3.2 力学性能测试结果分析

3.2.1 力学性能测试现象

力学性能测试结果如图8所示,为了揭示各材料之间的相互影响,本文展示了泡沫夹芯天线、格栅夹芯天线和泡沫填充格栅天线三种结构在各个阶段的典型试验现象,并

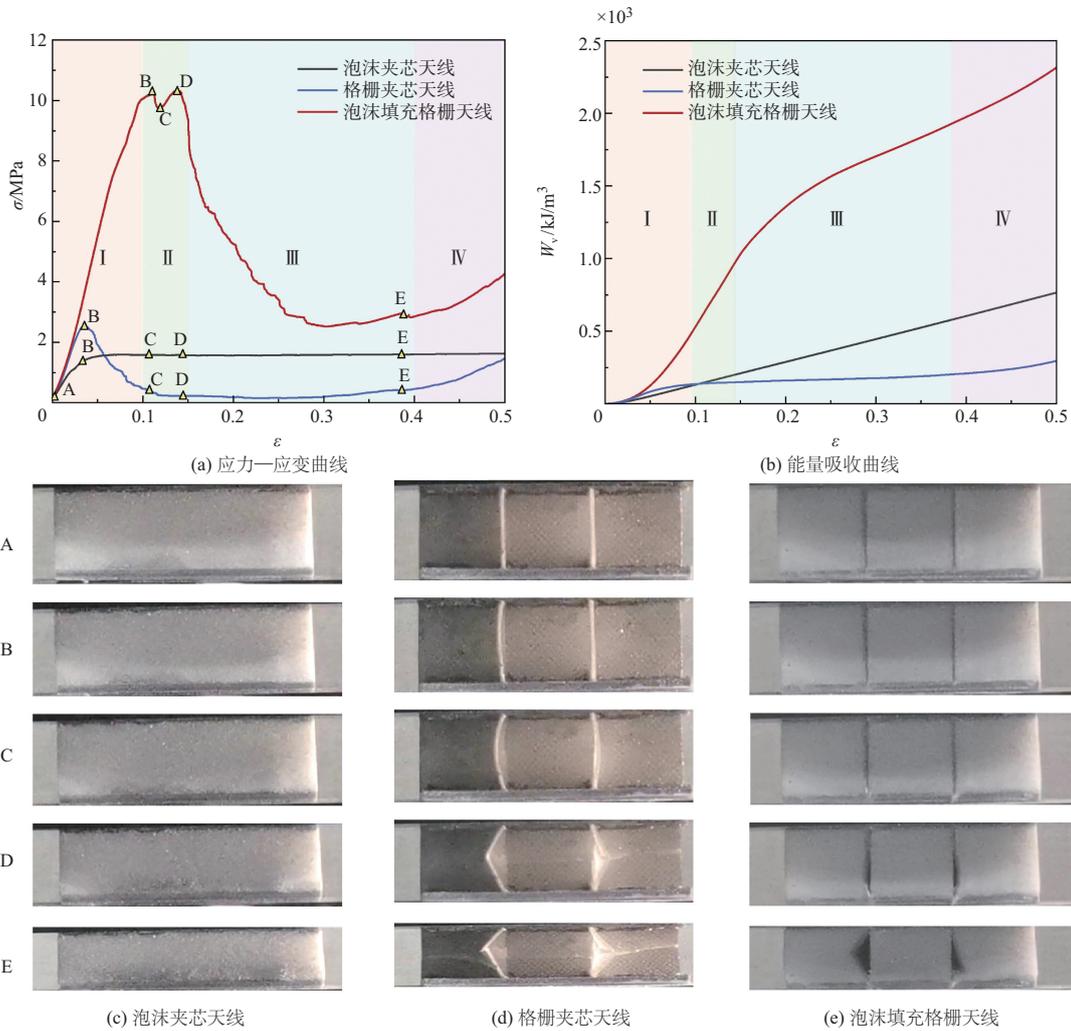


图8 力学测试结果及试验现象

Fig.8 The mechanical results and deformation images of specimens

在应力—应变曲线上标记了相应特征点。

对于泡沫夹芯天线,其压缩过程可以大致分为两个阶段:线性阶段和塑性阶段。在线性阶段,结构的压缩刚度为 $K_1=57.01\text{kN/mm}$,之后其刚度逐渐变小直到进入塑性阶段,此时峰值应力 $\sigma_{p1}=1.84\text{MPa}$,之后结构进入平台期,应力一直维持在 1.84MPa 附近直到泡沫密实,展现出PMI泡沫优异的能量吸收性能。

对于格栅夹芯天线而言,其压缩过程可以分为4个阶段:线性阶段(A-B)、屈曲阶段(B-D)、屈曲破坏阶段(D-E)和密实阶段(E之后)。在线性阶段,应力线性增加,期间结构的压缩刚度为 $K_2=57.01\text{kN/mm}$ 。但随着应变的继续增加,相互嵌锁的格栅壁之间无法提供足够的侧向支撑,相继发生屈曲,并在开槽端点出现了损伤,此时达到峰值应力 $\sigma_{p2}=2.54\text{MPa}$ (对应特征点B)。之后格栅壁相继发生屈曲破

坏,发出纤维断裂的声音,此时应力持续降低(对应特征点D)。最后,格栅壁坍塌并发生折叠,试样逐渐密实,应力再次升高。

与格栅夹芯天线相比,泡沫填充格栅天线的压缩过程大致也可分为4个阶段:线性阶段(A-B)、混合损伤阶段(B-D)、破坏阶段(D-E)和密实阶段(E之后)。在线性阶段,即使其应力值已远远超过了泡沫结构与格栅夹芯天线的峰值应力,格栅壁始终保持直立直至其到达峰值应力 $\sigma_{p3}=10.33\text{MPa}$ (约为格栅夹芯天线的406%),同时其刚度 $K_3=60.19\text{kN/mm}$,相比于格栅夹芯天线也略有提升(对应特征点B)。此时,PMI泡沫与格栅壁之间的胶层可以在一定程度上抑制格栅壁的屈曲。之后随着应变的持续增加,PMI泡沫与格栅壁之间的胶层发生破坏,格栅壁开始屈曲,应力开始下降。格栅壁发生屈曲直到抵住PMI泡沫后,

PMI 泡沫开始为格栅壁提供侧向支撑,应力继续增加(对应特征点 C)。但随着进一步压缩,PMI 泡沫无法再提供足够的侧向支撑,使得格栅壁的屈曲变形增大,应力开始下降,同时格栅壁的屈曲使得泡沫芯体发生塑性变形且格栅壁和 PMI 泡沫之间出现脱黏现象(对应特征点 D)。之后格栅壁继续屈曲直至发生断裂(对应特征点 E),试验件逐步被压实并进入密实阶段,使得应力再次增加。

3.2.2 有限元仿真及机理分析

为进一步验证 PMI 泡沫对格栅壁屈曲起到的抑制作用,本节在某有限元分析软件中建立了格栅夹芯天线和泡沫填充格栅天线的有限元模型,其由 FR-4 上下面板、FR-4 格栅壁板、F4B 介质基板和 PMI 泡沫 4 组部件装配而成,由于金属贴片厚度远小于介质基板厚度,在仿真时将其省略,最终建立模型如图 9(a)所示。由于试验结果中面板与芯体间没有明显的脱黏现象,为了提高计算效率,面板与芯体之间采用“Tie”约束,其他表面采用“通用接触”,摩擦系数设置为 0.3。采用 C3D8R 三维实体单元划分网格,对格栅壁的网格进行了更精细的划分,格栅夹芯天线共划分 130809 个网格,泡沫填充格栅天线共划分 173491 个网格。利用三维 Hashin 失效准则^[27-28]作为损伤起始判据并编写用户定义 VUMAT 子程序,各材料力学参数见表 1。其中, E_{11} 、 E_{22} 分别为纵向和横向模量; G_{12} 、 G_{13} 分别为面内剪切模量; G_{23} 为面外剪切模量; X_T 、 X_C 、 Y_T 、 Y_C 分别为纵向和横向拉伸、压缩强度; S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 均为剪切强度。

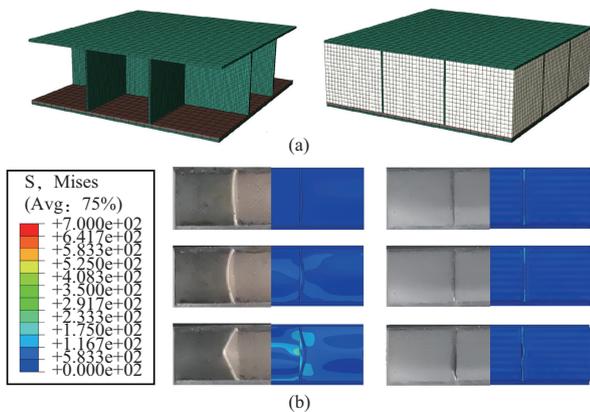


图9 有限元模型及压缩过程中结构应力分布

Fig.9 Finite element model and stress distribution during compression process

仿真结果如图 9(b)所示,为便于对比,将仿真与试验结果放在一起进行对比,仿真与试验吻合较好,从仿真结果中发现,泡沫填充格栅天线中代表格栅壁的有限元单元应力

表1 各材料力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of each material

| 力学性能 | 玻璃纤维复合材料 | PMI 泡沫 |
|-------------------------|---|--------|
| 密度/(kg/m ³) | 1000 | 75 |
| 模量/GPa | $E_{11}=13.5$; $E_{22}=E_{33}=2.8$; $G_{12}=G_{13}=1.5$; $G_{23}=1.2$ | 62.0 |
| 泊松比 | $\nu_{12}=\nu_{13}=0.28$; $\nu_{23}=0.3$ | 0.16 |
| 强度/MPa | $X_T=860$; $X_C=550$; $Y_T=Z_T=48$; $Y_C=Z_C=140$; $S_{12}=S_{13}=S_{23}=60$ | 1.72 |

分布明显高于代表 PMI 泡沫的有限元单元,因此两种结构在受到面外压缩载荷时,起到主要承载作用的均为 FR-4 格栅壁。但是 PMI 泡沫的填充使得格栅壁的破坏模式发生了变化,从而导致两种天线结构出现了不同的破坏模式。其中,格栅夹芯天线的主要破坏模式为格栅壁的屈曲破坏,而在填充 PMI 泡沫后,由于 PMI 泡沫提供的侧向支撑作用,格栅壁的屈曲变形得到了抑制,导致其屈曲波长变短,屈曲临界载荷值得到了极大的提升,最终使得结构的力学性能得到明显提高。

3.3 一体化结构力学性能分析

通过对应力-应变曲线的积分,可以计算泡沫夹芯天线、格栅夹芯天线和泡沫填充格栅天线三种结构的能量吸收能力,结果如图 8(b)所示。结构的单位体积能量吸收能力 W_v 和单位质量能量吸收能力 W_m 可以分别由下述公式得到^[29]

$$W_v = \int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma d\epsilon \quad (5)$$

$$W_m = \frac{W_v}{\rho} \quad (6)$$

式中,应变 $\bar{\epsilon}=0.5$ 。结果表明,泡沫夹芯天线、格栅夹芯天线和泡沫填充格栅天线的单位体积能量吸收能力分别为 $W_{v1}=7.66 \times 10^2 \text{kJ/m}^3$ 、 $W_{v2}=2.95 \times 10^2 \text{kJ/m}^3$ 、 $W_{v3}=2.32 \times 10^3 \text{kJ/m}^3$ 。通过典型试验现象可以发现,相较于泡沫夹芯天线,泡沫填充格栅天线的高能量吸收能力主要来自格栅壁的塑性断裂和屈曲变形所提供的高压缩强度和刚度。根据式(6), $\rho_1=75.54 \text{kg/m}^3$ 、 $\rho_2=96.28 \text{kg/m}^3$ 和 $\rho_3=179.04 \text{kg/m}^3$,可得到这三种天线结构的单位质量能量吸收能力分别为 $W_{m1}=10.13 \times 10^3 \text{J/g}$ 、 $W_{m2}=3.07 \times 10^3 \text{J/g}$ 、 $W_{m3}=12.93 \times 10^3 \text{J/g}$ 。

表 2 展示了三种天线结构的力学性能,以及泡沫填充格栅天线相较格栅夹芯天线和泡沫夹芯天线的力学性能增强幅度。此外,分别通过将各结构的压缩强度除以其自身密度,得到了其比压缩强度。结果显示泡沫填充格栅天线的力学性能得到显著增强,体现出了明显的协同增强效

表2 各天线结构压缩试验数据汇总

Table 2 Summary of compression test data of each antenna structure

| | 格栅夹芯天线 | 泡沫夹芯天线 | 泡沫填充格栅天线 | 泡沫填充格栅天线的相对增幅/% | |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------|
| | | | | 相较于格栅夹芯天线 | 相较于泡沫夹芯天线 |
| 芯体密度/(kg/m ³) | 96.28 | 75.54 | 179.04 | 85.96 | 151.71 |
| 刚度/(kN/mm) | 55.32 | 13.41 | 60.19 | 8.79 | 348.99 |
| 压缩强度/MPa | 2.54 | 1.84 | 10.33 | 305.91 | 459.97 |
| 比压缩强度/(MPa/(kg/m ³)) | 0.0264 | 0.0244 | 0.0577 | 118.29 | 136.27 |
| 单位体积能量吸收能力/(kJ/m ³) | 0.2952×10 ³ | 0.7655×10 ³ | 2.3152×10 ³ | 684.30 | 202.43 |
| 单位质量能量吸收能力/(J/g) | 3.07 | 10.13 | 12.93 | 321.77 | 27.61 |

应,而这种现象可以解释为:PMI 泡沫为格栅壁所提供的侧向支撑,大幅提升了格栅壁的临界破坏值。具体体现在:相较于格栅夹芯天线,泡沫填充格栅天线的压缩强度和比压缩强度提升了 305.91% 和 118.29%;相较于泡沫夹芯天线,其单位体积和单位质量的能量吸收能力分别增强了 202.43% 和 27.61%。

4 结论

本文提出了一种辐射/承载一体化天线设计方案,通过将 FR-4 格栅结构与微带天线进行复合,设计了一种格栅夹芯天线,在保护微带天线的同时赋予其承载能力。通过在格栅内部填充 PMI 泡沫,设计了一种泡沫填充格栅天线,在不影响格栅夹芯天线电磁性能的同时,进一步提升结构的抗压缩性能。具体研究结果如下:

(1) 电磁仿真结果表明,FR-4 格栅芯体、PMI 泡沫与微带天线进行复合对微带天线的电磁性能影响很小。

(2) 本文辐射/承载一体化天线仿真和电磁测试结果吻合良好,其工作频段在 12.65~12.85GHz 之间,增益大于 10dBi。

(3) 通过填充 PMI 泡沫,抑制了格栅壁屈曲,有效提升了泡沫填充格栅天线的强度和能量吸收特性。相较于格栅夹芯天线,泡沫填充格栅天线的压缩强度和比压缩强度提升了 305.91% 和 118.29%;相较于泡沫夹芯天线,其单位体积和单位质量的能量吸收能力分别增强了 202.43% 和 27.61%。

AST

参考文献

[1] 许群,王云香,刘少斌,等.飞行器共形天线技术综述[J].现代雷达,2015,37(9):50-54.
Xu Qun, Wang Yunxiang, Liu Shaobin, et al. An overview on conformal antenna technology for aircraft[J]. Modern Radar,

2015, 37(9): 50-54. (in Chinese)

- [2] 徐晨,郝金杰.飞行器天线的发展与应用[J].电子世界,2016(14):15.
Xu Chen, Hao Jinjie. Development and application of aircraft antenna[J]. Electronic World, 2016(14): 15. (in Chinese)
- [3] 朱松.共形天线的发展及其电子战应用[J].中国电子科学研究院学报,2007,2(6):6.
Zhu Song. Development of conformal antenna and its EW applications[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2007, 2(6): 6. (in Chinese)
- [4] Lars J, Patrik P. Conformal array antenna theory and design [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [5] Dong Jiachen, Zheng Xitao, Han Yajuan, et al. A novel sandwich structured spoof surface plasmon polaritons antenna integrating multibeam and enhanced mechanical performances [J]. Thin-walled Structures, 2024, 194: 111306.
- [6] Bishop N A, Miller J, Zeppettella D, et al. A broadband high-gain bi-layer LPDA for UHF conformal load-bearing antenna structures (CLASs) applications[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015, 63(5): 2359-2364.
- [7] Zhang Kun, Zhao Da, Chen Wei, et al. Three-dimensional woven structural glass fiber/polytetrafluoroethylene (PTFE) composite antenna with superb integrity and electromagnetic performance[J]. Composite Structures, 2022, 281: 115096.
- [8] 史则颖,叶冬,彭子寒,等.飞行器共形天线新型制造工艺及应用研究进展[J].航空学报,2021,42(10):524812.
Shi Zeying, Ye Dong, Peng Zihan, et al. Research progress on novel manufacturing approaches of conformal antenna for aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524812. (in Chinese)
- [9] 马野,宋盛菊,刘焱飞.飞行器新结构技术展望[J].航空科学

- 技术, 2023, 34(11): 63-74.
- Ma Ye, Song Shengju, Liu Yanfei. Prospect of new structure technology for flight vehicle[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(11): 63-74. (in Chinese)
- [10] Baek S M, Lim S J, Ko M G, et al. Structural design, fabrication and static testing of smart composite skin structure: Conformal load-bearing SATCOM array antenna structure (CLSAAS)[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2020, 21: 50-62.
- [11] 王荣蕊, 吕丽华. 以复合材料为基础的微带天线的研究进展[J]. *上海纺织科技*, 2022, 50(8): 1-4.
- Wang Rongrui, Lyu Lihua. Research progress of microstrip antennas based on composite materials[J]. *Shanghai Textile Science & Technology*, 2022, 50(8): 1-4. (in Chinese)
- [12] 周金柱, 宋立伟, 杜雷刚, 等. 动载荷对结构功能一体化天线力电性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(9): 105-115.
- Zhou Jinzhu, Song Liwei, Du Leigang, et al. Influence of dynamic load on the mechanical and electrical performance of structurally integrated antenna[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(9): 105-115. (in Chinese)
- [13] Zhou Jinzhu, Cai Zhiheng, Kang Le, et al. Deformation sensing and electrical compensation of smart skin antenna structure with optimal fiber Bragg grating strain sensor placements[J]. *Composite Structures*, 2019, 211: 418-432.
- [14] Ji H J, Hwang W, Park H C, et al. Buckling characteristics of smart skin structures[J]. *Composite Structures*, 2004, 63(3): 427-437.
- [15] Birman V, Kardomateas G A. Review of current trends in research and applications of sandwich structures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 142: 221-224.
- [16] 于雅琳, 李健芳, 黄智彬, 等. 复合材料负泊松比格栅结构设计及力学性能评价[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(4): 1107-1114.
- Yu Yalin, Li Jianfang, Huang Zhibin, et al. Structural design and mechanical characterization of an auxetic advanced grid structure composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(4): 1107-1114. (in Chinese)
- [17] 王轩, 江庆庸, 张世秋. 平纹编织面板泡沫夹芯结构修补后侧向压缩有限元渐进失效分析[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(4): 81-93.
- Wang Xuan, Gang Qingyong, Zhang Shiqiu. Progressive failure analysis on repaired foam sandwich structure with plain weave face plate under edgewise compression[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(4): 81-93. (in Chinese)
- [18] 左建华, 杨书仪, 谭毅, 等. 计及温度的铝蜂窝夹芯结构机匣抗冲击性分析[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(8): 23-31.
- Zuo Jianhua, Yang Shuyi, Tan Yi, et al. Impact resistance analysis on aluminum honeycomb sandwich structure casing considering temperature[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(8): 23-31. (in Chinese)
- [19] 王世勋, 石玉红, 张希, 等. 复合材料格栅结构研究进展与应用[J]. *宇航材料工艺*, 2017, 47(1): 5-12.
- Wang Shixun, Shi Yuhong, Zhang Xi, et al. Application and research progress of composite lattice grids structure[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2017, 47(1): 5-12. (in Chinese)
- [20] Zhou Hao, Liu Rongzhong, Hu Yubing, et al. Quasi-static compressive strength of polymethacrylimide foam-filled square carbon fiber reinforced composite honeycombs[J]. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 2021, 23(6): 2358-2374.
- [21] 阮心怡. 玻纤/碳纤/超材料吸波体夹芯复合材料设计及吸波性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- Ruan Xinyi. Design and wave absorbing performance of sandwich composites with glass fibers/carbon fibers/metamaterial absorbers integrated[D]. Shanghai: Donghua University, 2022. (in Chinese)
- [22] 康逢辉, 张可鑫, 程亚杰, 等. 环氧树脂/玻璃纤维@聚吡咯复合吸波材料的制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(10): 24-30.
- Kang Fenghui, Zhang Kexin, Cheng Yajie, et al. Preparation and properties of epoxy resin/glass fiber@polypyrrole composite absorbing materials[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(10): 24-30. (in Chinese)
- [23] Cheng Linhao, Si Yuan, Ji Zhengjiang, 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.
- [24] 夏鹏. 矩形贴片微带天线尺寸预测模型分析与研究[D]. 太原: 山西大学, 2023.

- Xia Peng. Analysis and research on the size prediction model of rectangular patch microstrip antenna[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2023. (in Chinese)
- [25] 赵伟. 埋微带天线阵复合材料叠层结构力电性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Zhao Wei. Analysis of mechanical and antenna performance of embed microstrip antenna array laminated composite structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [26] Yang Fan, Zhang Xuexia, Ye Xiaoning, et al. Wide-band E-shaped patch antennas for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(7): 1094-1100.
- [27] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47: 329-334.
- [28] Hashin Z, Rotem A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials[J]. Journal of Composite Materials, 1973, 7: 448-464.
- [29] 白佳瑶, 黄金红, 侯兵, 等. 不同压溃速度下复合材料圆管吸能特性试验及数值模拟研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(12): 66-73.
- Bai Jiayao, Huang Jinhong, Hou Bing, et al. On the energy absorption properties of composite circular tubes at different impact velocities[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(12): 66-73. (in Chinese)

Design and Characterization of Radiation/Load-bearing Integrated Antenna Based on Composite Sandwich Structure

Dong Jiachen¹, Huang Ruilin¹, Qiu Yukun¹, Zhang Pengfei², Yu Xia², Zheng Xitao¹, Yan Leilei¹

1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610041, China

Abstract: The traditional antenna installed on the aircraft will increase the radar cross-sectional area of the aircraft and affect the aerodynamic performance, which will seriously affect the performance of the aircraft. Therefore, the integrated design of the antenna and the aircraft structure is one of the development trends of the future airborne antenna. In this paper, a radiation/load-bearing integrated antenna design scheme is proposed by combining the glass fiber composite (FR-4) grid structure with the microstrip antenna. The grid sandwich antenna and the foam-filled grid antenna are designed. The radiation performance of the two antenna structures is characterized by electromagnetic simulation and test. The working frequency band is between 12.65~12.85GHz, and the peak gain is greater than 10dBi. The out-of-plane compression test results show that the load-bearing characteristics and energy absorption characteristics of the original structure can be effectively improved by filling the foam in the grid sandwich antenna. The proposed integrated antenna structure effectively improves the structural efficiency, and can replace the existing sandwich structure in the aircraft in engineering applications, further expanding the application space of the integrated structure.

Key Words: microstrip antenna; grid sandwich structure; foam filling; integrated design; mechanical properties

Received: 2023-10-26; Revised: 2024-01-31; Accepted: 2024-03-01

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (201909053001)