

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.004

## 一种超宽频共形天线结构的力学性能测试

谢宗蕻<sup>1</sup> 吴 师<sup>1</sup> 王文贵<sup>2</sup> 彭 飞<sup>1</sup> 张 朋<sup>3</sup> 赵 伟<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学航天学院, 西安, 710072; 2. 中航复合材料有限责任公司, 北京, 101300;

3. 西北工业大学第 365 研究所, 西安, 710065)

**摘要:** 共形天线结构是一种将机载天线集成到飞机复合材料结构中的集承载、维形、隐身及通信功能于一体的多功能结构。本文采用对数螺旋天线作为内植传感器件, 设计并制造了一种超宽频共形天线结构, 通过面内压缩试验和三点弯曲试验对该型共形天线结构的力学性能进行了考核测试。试验结果表明, 超宽频共形天线结构具有更优的力学性能。相对于未植入天线的复合材料夹层结构, 超宽频共形天线结构的面内压缩刚度提高了 112%, 面内压缩强度提高了 95%, 结构压缩破坏模式由单纯的面芯分离变成了多个胶接界面分离和芯体剪切破坏的复合破坏模式, 且强度分散性变大; 超宽频共形天线结构面外弯曲刚度提高了 26%, 面外弯曲强度提高了 17%, 弯曲破坏模式由上蒙皮与芯体间的大面积面芯分离变成了压头下部局部蒙皮折断和芯体塌陷。

**关键词:** 共形天线结构; 力学试验; 面内压缩; 三点弯曲

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2015)06-0811-07

## Mechanical Tests on Broadband Conformal Antenna Structure

Xie Zonghong<sup>1</sup>, Wu Shi<sup>1</sup>, Wang Wengui<sup>2</sup>, Peng Fei<sup>1</sup>, Zhang Peng<sup>3</sup>, Zhao Wei<sup>1</sup>

(1. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China;

2. AVIC Composite Corporation LTD, Beijing, 101300, China;

3. The 365th Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710065, China)

**Abstract:** Conformal antenna structure (CAS), also called the smart skin antenna structure, is a kind of multifunctional structure with the integration of airborne antenna and a composite sandwich structure. It possesses the functionalities of load-bearing, shape-maintaining, stealthy, and communication together. This study is focused on the mechanical tests on a broadband conformal antenna structure with the integration of a planar spiral antenna. In-plane compression test and three-point bending test are conducted. According with the test results, the broadband conformal antenna structure has a superior mechanical performance compared with the ordinary composite sandwich structure. Its compressive stiffness and strength are 112% and 95% higher than the corresponding values of the normal composite sandwich panel, while its bending stiffness and strength increase by 26% and 17%, respectively. The typical failure modes under compression and bending are changed from skin-core debonding only to multiple bonding surface failure combined with local skin fracture and core crushing and fracture.

**Key words:** conformal antenna structure; mechanical test; in-plane compression; three-point bending

共形天线结构 (Conformal antenna structure, CAS) 是一种在飞行器承载结构 (如纤维增强树脂

基金项目: “十二五”航空支撑基金 (61901110103) 资助项目。

收稿日期: 2015-10-14; 修订日期: 2015-11-10

作者简介: 谢宗蕻, 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 飞行器复合材料结构, 多功能及智能复合材料结构等。

通信作者: 谢宗蕻, E-mail: xzhae@nwpu.edu.cn。

基复合材料蒙皮)中植入射频发射和接收装置的多功能复合材料结构,该结构集承载、维形、隐身及通信功能于一体,大大地降低了飞行器整体重量、气动阻力和雷达散射面积<sup>[1]</sup>。

现代战机对雷达、导航、通信和电子战等机载电子设备的依赖度极高,飞机上安装的通信、雷达、电子侦查、干扰及导航等天线通常多达几十副。这些机载天线对 RCS 的综合贡献有可能远大于经外形隐身和材料/结构隐身技术处理的低散射飞行平台本身。因此,机载射频孔径系统的隐身已成为进一步提高作战飞机雷达隐身性能的瓶颈和关键<sup>[2]</sup>。另外,飞机上可供高增益天线安装的位置有限,数量众多的机载天线常常会在安装位置上产生冲突,造成天线遮挡和电磁兼容等一系列问题。开发和研制一套工作在多个波段的低散射机载天线综合系统<sup>[3]</sup>显得尤为必要。本文设计并制造了一种植入了平面对数螺旋天线的超宽频共形天线结构(Broadband conformal antenna structure, BCAS),该天线可以实现在 UHF~XC 波段宽频范围内工作,具有在支持机载系统多模式协同工作的能力。

植入天线必将改变整体结构力学性能。美国海军的“军用巡逻机低成本共形发射/接收卫通天线”项目<sup>[4]</sup>曾开发一种能工作于 X, Ku 和 Ka 波段的低成本共形卫通发射/接收天线系统,但是没有公开文献介绍其力学性能测试。美国空军射频多功能结构孔径项目(MUSTRAP)<sup>[5]</sup>研发了一款与结构集成的多功能、宽频及低成本天线,能用于通信、导航、识别及电子战,并进行了相应的力学性能测试,天线工作频带在 0.03 ~ 2.0 GHz。韩国浦项科技大学公布了所设计的共形天线结构在面内

压缩载荷下的屈曲特性测试<sup>[6]</sup>,但其试验件结构型式均为蜂窝夹层结构,且其内部的植入天线为 C 波段的微带天线阵。

本文在共形天线结构中植入的传感器元件为多层超宽频螺旋天线,共形天线结构构型为多层泡沫夹层结构,通过试验的方法研究了该新型宽频共形天线结构的面内压缩和面外弯曲力学性能,并与不含天线的普通复合材料夹层结构进行了对比。

## 1 试验件描述

超宽频共形天线结构力学性能测试试验件分两类,每类试验件包括 3 件超宽频共形天线结构试验件和 3 件普通复合材料夹层结构对比试验件,对比试验件形状尺寸等几何参数与超宽频共形天线结构试验件完全相同。本文所采用的平面螺旋天线和共形天线结构如图 1 所示。由于完整的共形天线结构尺寸较大,故根据共形天线结构中含天线部分的结构型式设计并制造了力学性能考核典型试验件,如图 2 所示。试验件面内尺寸与天线面内尺寸相同,因此可以采用均匀夹层结构试验标准进行试验件制备和试验考核。面内压缩测试试验件长 200 mm,宽 100 mm,厚 34 mm,内植天线厚度为 22 mm,如图 3 所示。三点弯曲测试试验件长 540 mm,宽 60 mm,厚 34 mm,内植天线厚度为 22 mm,如图 4 所示。共形天线结构试验件与对比试验件结构分解对比如图 5 所示。试验件选用的复合材料列表如表 1 所示。

表 1 试验件材料

Tab. 1 Specimen materials

名称	蒙皮	泡沫板	天线介质板	天线泡沫板
材料	S 玻纤环氧	PMI 泡沫	聚四氟乙烯	PMI 泡沫

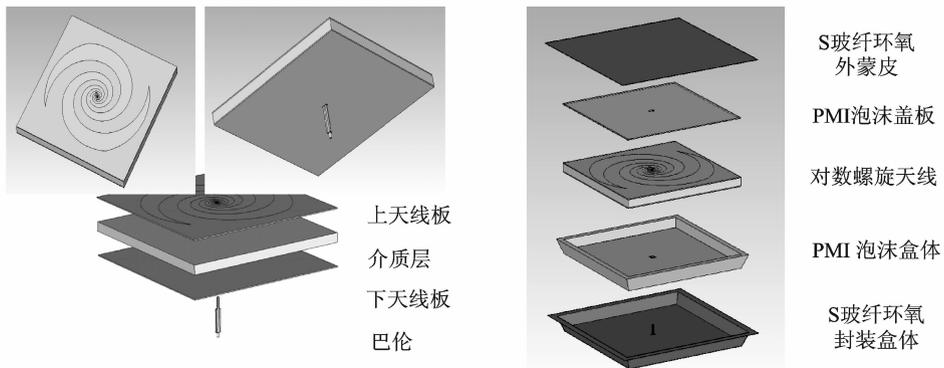


图 1 平面螺旋天线(左)与共形天线结构(右)

Fig. 1 Planar spiral antenna (left) and conformal antenna structure (right)

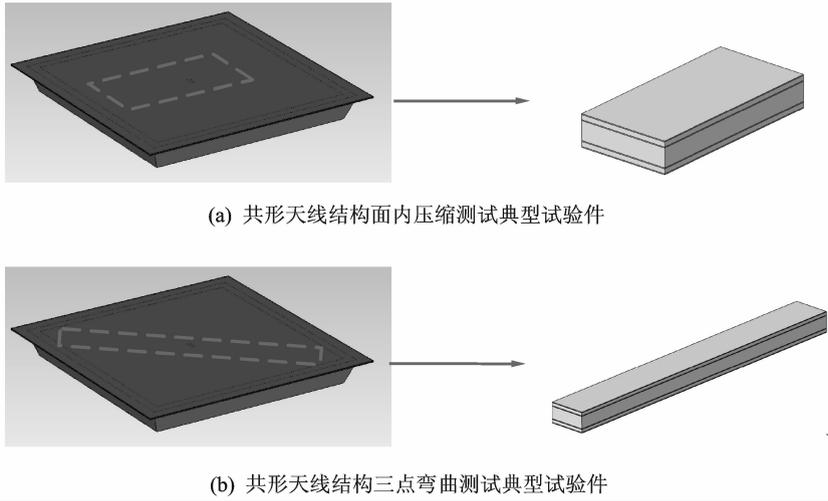


图 2 截取部分共形天线结构得到力学性能测试试验件

Fig. 2 Mechanical test specimens by cutting out part of BCAS

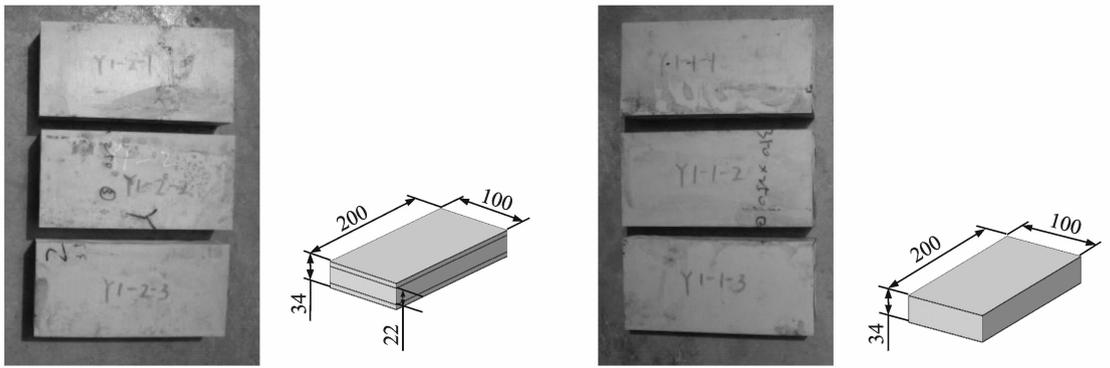


图 3 面内压缩测试试验件实物照片与尺寸

Fig. 3 Photos and size of in-plane compression test specimens

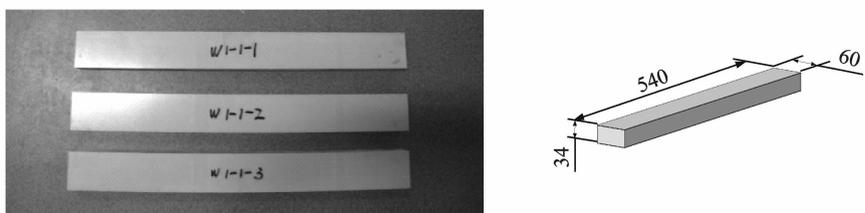
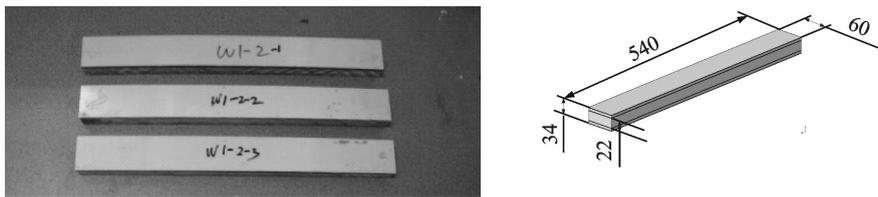


图 4 三点弯曲测试试验件实物与尺寸

Fig. 4 Photos and size of three-point test specimens

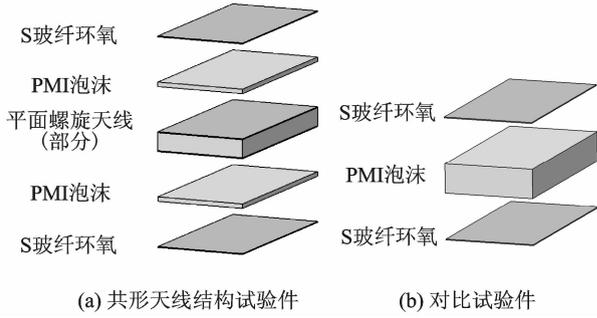


图5 试验件结构分解示意图

Fig. 5 Exploded view of specimens

## 2 力学性能试验

力学性能试验采用位移加载控制,在电子万能试验机上进行。面内压缩试验参照 ASTM C 364-99 标准<sup>[7]</sup>进行。图6为面内压缩试验装置。试验件被安装固定于试验夹具中,试验装置与试验机支座中轴线重合。试验得到结构压缩破坏模式和载荷-位移曲线,计算得到试验件压缩强度和压缩刚度。

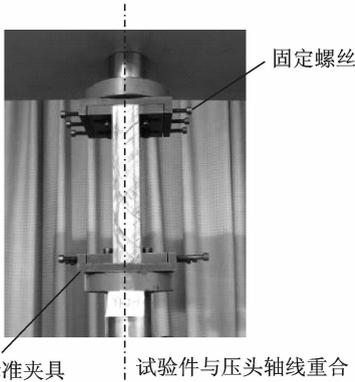


图6 面内压缩试验装置

Fig. 6 Setup of in-plane compression test

三点弯曲试验参照标准 GB/T 1456-2005 夹层结构弯曲性能试验方法<sup>[8]</sup>进行。图7为三点弯曲试验装置,试验件被安放在跨距为500 mm的支座上。试验得到结构弯曲破坏模式和压头载荷-位移曲线,试验件在加载点处所受弯矩为

$$M = \frac{1}{4}FL \quad (1)$$

载荷较小时,加载点处小变形如图8所示。

根据相似三角形定理,得到试验件在加载点处曲率为

$$\rho = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{L^2}{4\Delta} + \Delta} \approx \frac{4\Delta}{L^2} \quad (2)$$

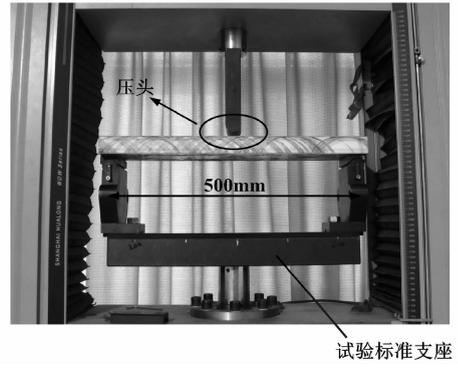


图7 三点弯曲试验装置

Fig. 7 Setup of three-point bending test

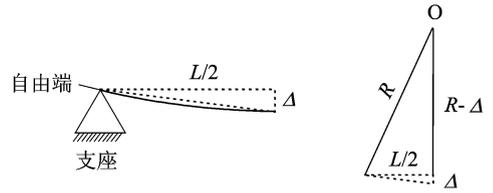


图8 三点弯曲试验件小变形近似

Fig. 8 Estimation of small deformation in three-point bending test

式中:  $L$  为支座跨距,  $\Delta$  为压头位移。绘制弯矩-曲率曲线,计算得到试验件弯曲强度和弯曲刚度。其中试验件弯曲刚度 ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ) 为曲线斜率,  $K_b = \frac{\Delta M}{\Delta P}$ , 弯曲刚度量纲为  $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 面内压缩试验

对比试验件的破坏模式全部是面芯分离并导致蒙皮失稳,如图9所示。与普通夹层结构相比,共形天线结构中天线的植入导致胶接面数量增加,会引入更多的胶接缺陷,使得共形天线结构试验件在面内压缩载荷作用下破坏模式更趋复杂。随着面内压缩载荷的增加,共形天线结构会发生多个胶接面的分离,进而导致夹层结构蒙皮失稳和泡沫芯体的最终剪切破坏。因此,共形天线结构呈现多个胶接界面分离和芯体剪切破坏的复合破坏模式,如图10所示。其中,试验件 Y1-2-3 仅出现了面芯分离破坏,并导致面板失稳,与对比试验件相同。试验件 Y1-2-1 和 Y1-2-2 同时出现了面板和芯体分离破坏、芯体和天线的胶接面脱离破坏以及芯体沿45°方向的剪切破坏。

图11为共形天线结构和对比试验件面内压缩试验典型载荷-位移曲线。如表2所示,复合材料夹

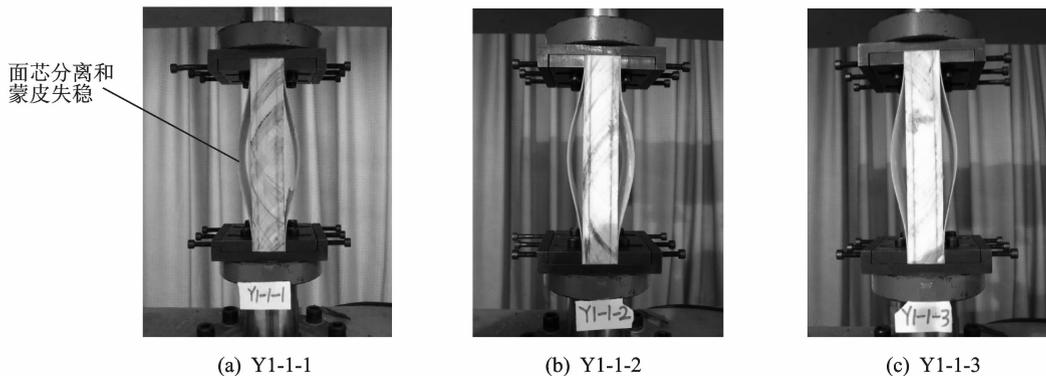


图 9 面内压缩试验中对比试验件的破坏模式

Fig. 9 Failure modes of contrast specimens under in-plane compression

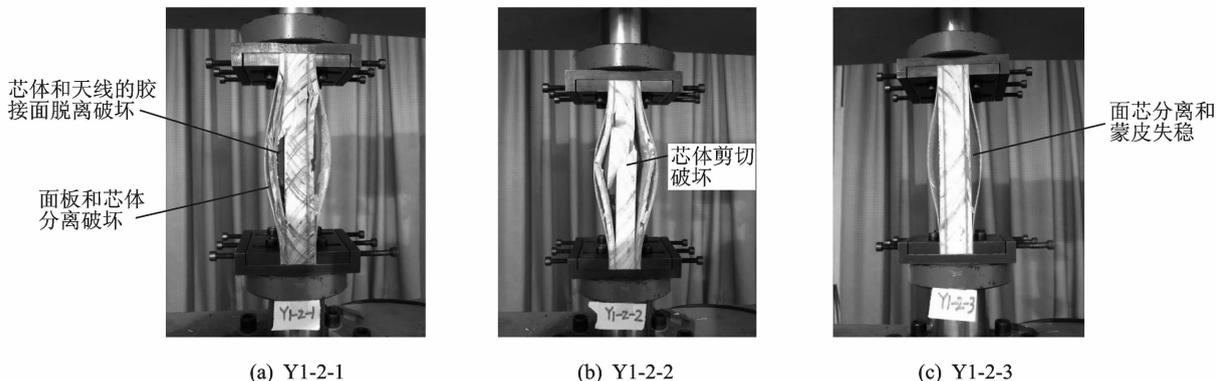


图 10 面内压缩试验中共形天线结构试验件的破坏模式

Fig. 10 Failure modes of BCAS under in-plane compression

表 2 面内压缩测试结果

Tab. 2 Test results of in-plane compression tests

试验件种类	编号	压缩强度			压缩刚度		
		测试值/MPa	平均值/MPa	离散系数/%	测试值/MPa	平均值/MPa	离散系数/%
对比试验件	Y1-1-1	12.4			0.89		
	Y1-1-2	11.5	11.3	12	0.91	0.90	1.2
	Y1-1-3	9.9			0.91		
共形天线结构试验件	Y1-2-1	22.1			1.90		
	Y1-2-2	26.8	22.0	22	1.90	1.91	1.1
	Y1-2-3	17.0			1.93		
性能指标提升/%			95			112	

层结构在植入天线后面内压缩性能发生明显变化,其中承载能力增加 95%,压缩刚度增加 112%。共形天线结构试验件的面内压缩强度离散性较大,达到 22%。

### 3.2 三点弯曲试验

在弯曲载荷作用下,普通泡沫夹层结构破坏模式为上蒙皮与芯体之间的面芯分离进而导致上蒙皮的失稳破坏,如图 12 所示。共形天线结构的典型破坏模式则变为压头区下部区域上蒙皮的纤维

断裂和芯体塌陷,如图 13 所示。其原因是由于植入多层宽频螺旋天线后,共形天线结构的弯曲刚度要比普通的夹层结构明显提高。在某特定弯曲载荷作用下,共形天线结构的弯曲变形量趋小,上蒙皮与芯体之间的剪切载荷趋小,发生分离破坏更难,结构典型破坏模式由面芯分离导致的上蒙皮失稳转变为压头下部集中压缩载荷导致的芯体局部塌陷和上蒙皮纤维断裂。

图 14 为共形天线结构试验件和对比试验件三

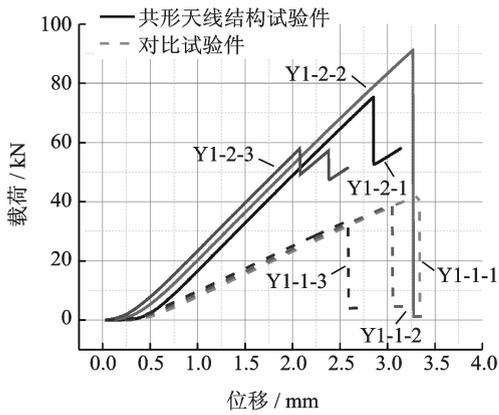


图 11 面内压缩试验载荷-位移曲线

Fig. 11 Load vs. displacement curves of in-plane compression bending tests

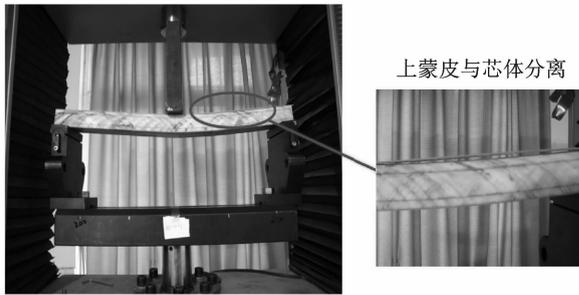


图 12 三点弯曲试验对比试验件破坏模式

Fig. 12 Failure modes of contrast specimens under three-point bending

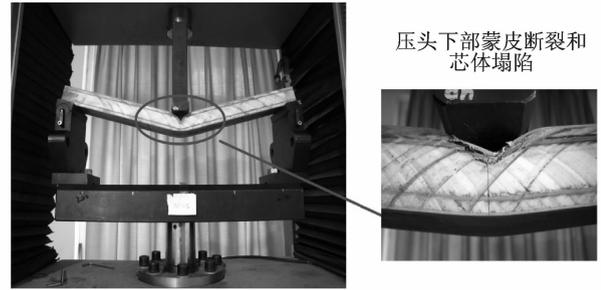


图 13 三点弯曲试验共形天线结构试验件破坏模式

Fig. 13 Failure modes of BCAS specimens under three-point bending

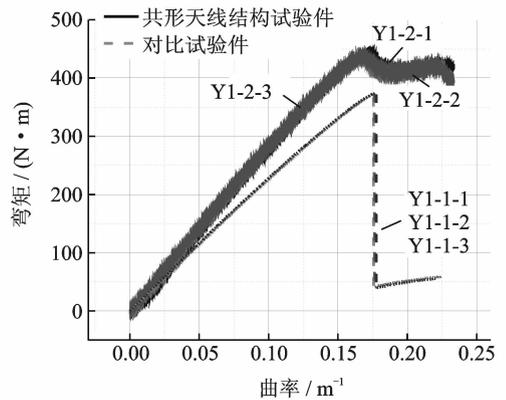


图 14 三点弯曲试验弯矩-曲率曲线

Fig. 14 Flexural moment vs. curvature curves in three-point bending tests

点弯曲试验典型弯矩-曲率曲线。如表 3 所示,复合材料夹层结构在植入天线后弯曲性能发生一定

变化,其中弯曲强度增加 17%,弯曲刚度提升 26%。

表 3 三点弯曲测试结果

Tab. 3 Results of three-point bending tests

试验件种类	编号	弯曲强度			弯曲刚度		
		测试值/MPa	平均值/MPa	离散系数/%	测试值/(N·m <sup>2</sup> )	平均值/(N·m <sup>2</sup> )	离散系数/%
对比试验件	Y1-1-1	32.3			2.4		
	Y1-1-2	32.4	32.4	0.2	2.3	2.3	2.5
	Y1-1-3	32.5			2.3		
共形天线结构试验件	Y1-2-1	38.6			3.0		
	Y1-2-2	37.5	38.0	1.6	3.0	2.9	2.6
	Y1-2-3	37.8			2.9		
性能提升/%			17			26	

## 4 结 论

通过对超宽频共形天线结构及其对比试验件力学性能的试验研究,可以得到了下述结论:

(1)相对于未植入天线的复合材料夹层结构,超宽频共形天线结构面内压缩刚度提高了 112%,

面内压缩强度提高了 95%,但由于天线的植入引入了额外的胶接面和更多的胶接缺陷,结构压缩破坏模式由单纯的面芯分离变成了多个胶接界面分离和芯体剪切破坏的复合破坏模式,且强度值分散性变大。超宽频天线的植入大幅提升了夹层结构的面内压缩性能。

(2)超宽频共形天线结构面外弯曲刚度提高了26%,面外弯曲强度提高了17%,由于共形天线结构芯体比普通复合材料夹层结构多了两块天线介质板,改变了结构刚度,弯曲破坏模式由普通复合材料夹层结构上蒙皮与芯体间的大面积面芯分离改变成了压头下部局部蒙皮折断和芯体塌陷。超宽频天线的植入在一定程度上改善了结构的面外弯曲性能。

#### 参考文献:

- [1] Callus P J. Conformal load-bearing antenna structure for Australian defence force aircraft [R]. DSTO-TR-1963,2007.
- [2] 孙聪,张澎. 先进战斗机对机载射频孔径系统隐身的需求及解决方案 [J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1472-1481.  
Sun Cong,Zhang Peng. Requirements and solutions of the airborne radio frequency aperture system for advanced fighter [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1472-1481.
- [3] 陈加海,周建江. 机载天线 RCS 减缩及其布局设计 [J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(6): 845-850.  
Chen Jiahai,Zhou Jianjiang. Airborne antennas RCS reduction and layout design [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(6): 845-850.
- [4] Gemeny S. Low cost conformal transmit/receive SATCOM antenna for military patrol aircraft [EB/OL]. <http://www.indabook.org/d/Low-Cost-Conformal-Transmit-Receive-SATCOM.pdf>, 2006-07/2015-11.
- [5] Alt K H, Lockyer A J, Coughlin D P, et al. Overview of the DoD's RF multifunction structure aperture (MUSTRAP) program [C] // SPIE Conference on Smart Structures and Materials. Newport Beach, California, USA:Proc SPIE, 2001: 137-146.
- [6] Jihoon Jeon, Woonbong Hwang, Hyunchul Park, et al. Buckling characteristics of smart skin structures [J]. Composite Structures, 2004, 63(3): 427-437.
- [7] The American Society for Testing and Materials Committee Standards. Standard test method for edgewise compressive strength of sandwich constructions, C364-99 [S]. West Conshohocken: ASTM, 1999.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 夹层结构弯曲性能试验方法 [S]. GB/T 1456—2005. 北京:中国标准出版社, 2005.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for flexural properties of sandwich constructions [S]. GB/T 1456—2005. Beijing:Standards Press of China, 2005.

