

复合材料夹芯壁板轴向压缩稳定性研究

古小磊,彭昂,蔡登安,周光明
(南京航空航天大学 航空学院,江苏 南京 210016)

摘要:随着复合材料夹芯结构在航空航天等领域越来越广泛的应用,对其稳定性研究显得尤为重要。通过非接触测量系统对试件面外变形进行监控,通过传统应变测量系统对面内变形情况进行监测,结合有限元仿真对复合材料夹芯壁板结构的屈曲、极限承载能力和破坏机理等方面进行详细的分析。结果表明:夹芯壁板在发生屈曲后会很快失去其承载能力,壁板的损伤形式表现出明显的纤维断裂、芯材压溃和面芯分离。

关键词:复合材料;夹芯壁板;屈曲载荷;承载能力

中图分类号:TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0016-03

Stability Analysis of Composite Sandwich Panels Under Axial Compression

GU Xiaolei, PENG Ang, CAI Dengan, ZHOU Guangming

(College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With more extensive application of composite sandwich structure in aerospace and other fields, the research on its stability is particularly important. The out-of-plane deformation of the specimen was monitored by non-contact measurement system. The strain of the face was monitored by the traditional strain measuring system. The buckling, ultimate bearing capacity and failure mechanism of composite sandwich panel were analyzed in detail with finite element simulation. The results show that sandwich panels lose their bearing capacity quickly after buckling, and the damage forms of the panels represent evident fiber fracture, core material collapse and face core separation.

Keywords: composite materials; sandwich panel; buckling load; bearing capacity

0 引言

在实际的工程应用中,结构的稳定性是评价一种部件是否可靠的一项重要指标,因此为了实际应用的安全性,十分有必要对结构的稳定性做深入的分析。

目前,国内外很多学者对复合材料夹层结构的稳定性进行了广泛的研究并取得了一定的成果。陈悦等^[1]通过实验和数值仿真对夹层结构轴承载荷下的屈曲和后屈曲进行了研究。结果表明面芯脱粘是夹芯结构屈曲破坏最先出现的形式。作者还研究了面板铺层角度、表层厚度及芯材厚度对整体承载能力的影响。结果显示增加面板的轴向刚度以及芯材的厚度都会提高其承载能力,但增加芯材厚度的同时,结构也会产生一定的横向剪切力。万玉敏等^[2]通过解析法、有限元法和实验法相结合的方式对夹层结构在压缩和剪切载荷作用下整体屈曲进行了分析,并基于工程解析法和经典层合板理论推导出了试验件尺寸对整体稳定性的影响。结果表明,在结构受压时,其单位屈曲载荷会随着结构长宽比的增大而增大,但会渐渐收敛到某一特定的值,而在剪切载荷的作用下,对单位屈曲载

荷受试件长宽比的影响不大。王宝芹等^[3]通过基于改进的通用单胞模型的宏观多尺度数值模型对夹芯结构的轴压稳定性进行了研究,所得到的结果与试验结果吻合较好,验证了该模型的有效性。HELLAL H等^[4]提出一种新的剪切变形理论用来对功能性材料夹芯板在湿热环境下的动态屈曲进行分析。

本文采用线性屈曲分析对夹芯壁板的屈曲载荷进行预测,基于传统 Hashin 准则^[5]和适用于织物的三维 Hashin 准则^[6]对面板铺层的损伤进行预测;考虑到泡沫夹芯材料抗压强度的不同,采用基于拉伸、压缩和剪切三强度的三元广义强度准则^[7]对泡沫芯材的极限强度进行预测。将仿真结果与试验结果进行对比,验证了模型的有效性。

1 试验分析

试件尺寸为 300 mm×415 mm,芯材厚度为 8 mm,两端各有 35 mm 的端部保护,如图 1 所示。复合材料面板铺层顺序为[(±45)/0/(±45)/芯层/(±45)/(±45)]。材料属性见表 1,夹芯泡沫材料属性见表 2。

基金项目:国家自然科学基金项目(52005256);江苏省基础 Research 计划(自然科学基金)资助项目(BK20190394);江苏省博士后科研资助计划项目(2020Z437);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20200104);江苏高校优势学科建设工程资助项目

第一作者简介:古小磊(1993—),河南周口人,硕士研究生,研究方向为复合材料结构设计及强度理论与仿真。

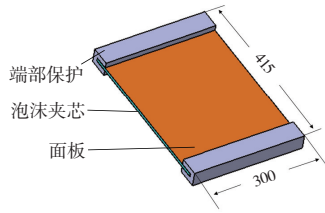


图1 试件样式

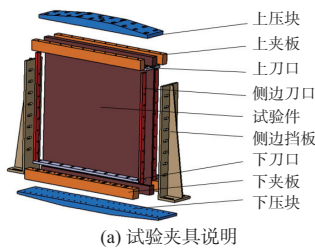
表1 复合材料性能参数

参数	单向带	织物
E_1/GPa	116.2	59.2
E_2/GPa	8.4	58.8
E_3/GPa	8.4	8.4
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.29	0.045
ν_{23}	0.43	0.045
$G_{12} = G_{13}/\text{GPa}$	4.1	4.09
G_{23}/GPa	4.1	4.09
X_T/MPa	1 415	556
X_C/MPa	993	673
Y_T/MPa	43	601
Y_C/MPa	184	651
Z_T/MPa	43	50
Z_C/MPa	184	155
$S_{12} = S_{13}/\text{MPa}$	88.3	83.2
S_{23}/MPa	86	64.9

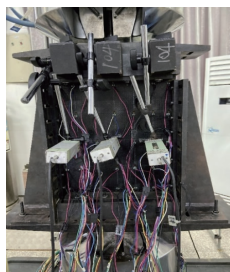
表2 PMI 泡沫材料属性

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	X_T/MPa	X_C/MPa	S/MPa	G/MPa
75	1.56	1.05	0.9	24

轴向压缩试验在 MTS370.50 疲劳试验机上进行,试验夹具和夹持方式如图 2 所示。



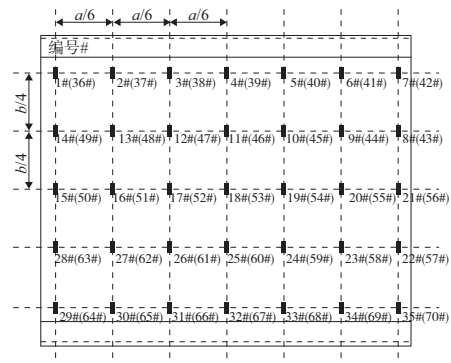
(a) 试验夹具说明



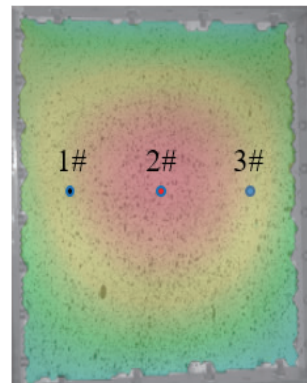
(b) 压缩试验夹持方式

图2 轴向压缩试验夹具及夹持方式

应变片粘贴位置和 DIC 面外变形测量点如图 3 所示。



(a) 应变测量点



(b) DIC测量点

图3 试件应变和面外变形测量点位置

轴向压缩试验部分应变情况如图 4 所示。采用文献中的判别方法可确定试件的屈曲载荷,对应图中竖向虚线所在载荷,大小约为 46 kN。图 5 为 DIC 测量点面外变形情况,当达到屈曲载荷后面外变形加剧。

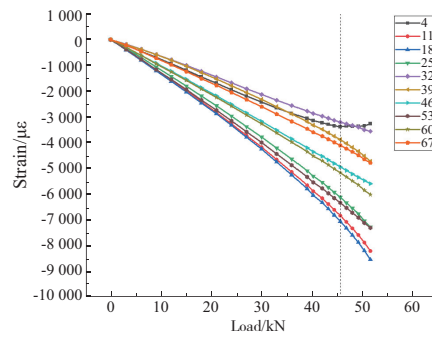


图4 典型载荷-应变曲线

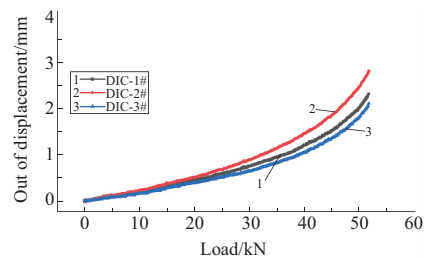


图5 DIC 测量载荷-面外变形曲线

试件的主要破坏模式表现为大面积的面芯分离和芯材压溃以及伴随着局部区域的纤维断裂,如图 6 所示。

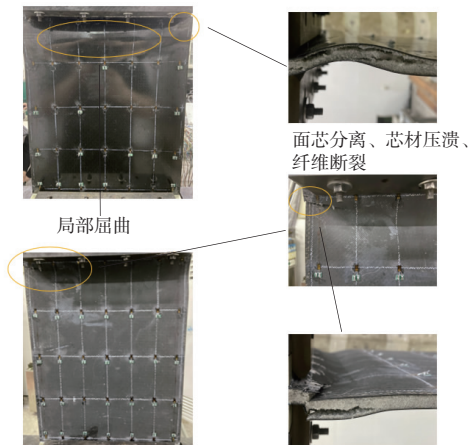


图 6 试件典型破坏模式

2 有限元分析

在商用有限元软件 ABAQUS 中完成结构的建模及材料属性的赋予。其中上下面板及芯材均采用 C3D8R 实体单元。

由于在实际加载的过程中,试件的上下两端分别加了 35 mm 夹持端,所以在 ABAQUS 有限元模拟中,这部分采用多点约束 (MPC) 的方式进行与参考点之间的绑定连接。试件整体的约束方式按照实际约束进行施加,右端为固定端,进行固支约束;试件左端为加载端,只释放 x 方向的自由度;试件的两侧添加 z 向约束限制其离面位移,预留部分位移承载区,如图 7 所示。

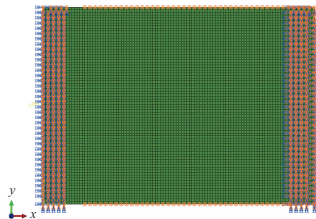


图 7 轴向压缩有限元模型

采用 ABAQUS 中的 BUCKLE 模块对复合材料夹芯壁板进行线性屈曲分析,得到仿真线性屈曲载荷为 52 kN,与试验误差在 12% 左右。将有限元仿真得到的屈曲模式与试验 DIC 所测得面外变形结果进行对比,可看出两者具有很好的 consistency (图 8)。

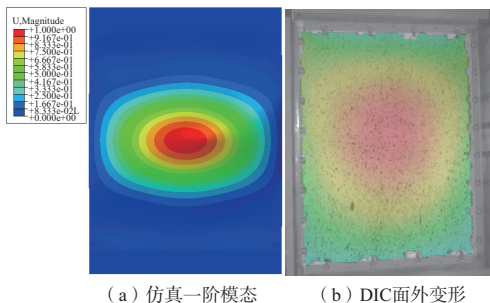


图 8 试件屈曲模式

采用非线性有限元法对夹芯壁板轴向压缩的破坏强度进行预测。有限元分析流程如图 9 所示。面板单向带铺层和织物铺层损伤准则分别见文献[8]和文献[6]。

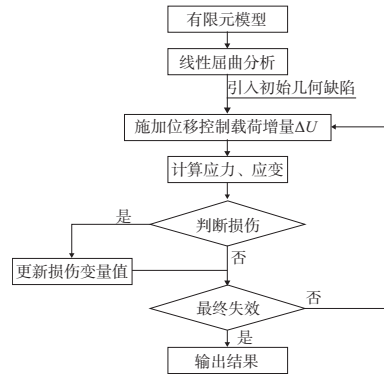


图 9 夹芯壁板轴向压缩有限元分析流程

图 10 所示为有限元载荷-位移曲线与试件结果对比。从图中可以看出,仿真结果与试验结果初始阶段吻合性都比较好,但随着载荷的增加,试验的载荷-位移曲线比仿真载荷-位移曲线非线性更加明显。其可能原因是虽然仿真增加了初始几何缺陷,但在材料内部还存在其他微小缺陷。仿真破坏载荷为 59.7 kN,试验破坏载荷为 54.6 kN,误差为 9.3%。说明本模型可以很好地预测夹芯壁板结构的承载能力。

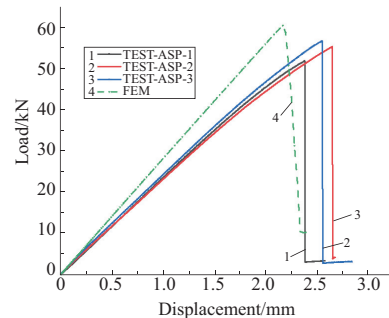


图 10 夹芯壁板仿真和试验载荷-位移曲线对比

图 11 为夹芯壁板面板损伤情况,其中红色代表损伤,蓝色表示无损伤,灰色区域为夹持端(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。从中可看出损伤主要发生试件的两端,而在加载端部预留的承载位移区使仿真的损伤区域更大,和试验结果一致。



图 11 夹芯壁板面板损伤云图

(下转第 26 页)

HARRIS 在 L-P 理论的基础上对寿命进行了改进^[8], 考虑了滚子的寿命、轴承整体寿命与内圈、外圈以及滚子寿命的关系如公式(10)所示。

$$L = (L_r^{-e} + L_i^{-e} + L_e^{-e})^{-\frac{1}{e}} \quad (10)$$

式中: L 为轴承的整体寿命; L_r 为轴承的滚子寿命; L_i 为轴承的内圈寿命; L_e 为轴承的外圈寿命, e 取 $\frac{9}{8}$ ^[9]。

综合表 3 及公式(10)可得, 内圈装反轴承寿命为 302.55×10^4 km, 仅是正确安装轴承寿命的 20.44%, 说明轴承内圈装反对轴承的寿命影响极大。

3 结语

1) 分别采用 Hertz 弹性接触理论和有限元方法对正确安装的双列圆柱滚子轴承接触应力进行计算, 对比分析了两种方法下滚子与外圈以及滚子与内圈的接触应力分布情况。Hertz 弹性接触理论由于受到各种假设的限制, 不能考虑轴承受载以及形状的复杂性, 因此采用有限元方法对内圈装反的轴承进行建模分析。

2) 采用 ISO 国际标准理论算法, 确定了正确安装工况下轴承寿命。根据 L-P 寿命理论和 ASH 法则得到了内圈装反轴承寿命。以轴承整体寿命作为评估对象, 内圈装反

轴承寿命为 302.55×10^4 km, 仅仅是正确安装轴承寿命的 20.44%。

参考文献:

- [1] 陈於学, 杨曙年. 圆柱滚子轴承的动载荷分布[J]. 轴承, 2007(1): 9-11.
- [2] 郑志伟, 黄志辉. 高速变轨距转向架轴箱轴承在偏载作用下的寿命评估[J]. 机车电传动, 2020(5): 106-110, 113.
- [3] 陈於学. 基于接触力学的圆柱滚子轴承振动研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [4] 余江鸿, 杨文, 李超, 等. 弹性复合圆柱滚子轴承接触特性分析[J]. 机械强度, 2015, 37(6): 1099-1105.
- [5] ISO 281: 2007 (E) Rolling bearings - dynamic load ratings and rating life. International organization for standardization [S].
- [6] 李震, 商慧玲, 张旭, 等. 高速动车轴箱轴承疲劳寿命计算方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(3): 55-62.
- [7] 毛月新. 偏载滚子轴承凸度设计及疲劳寿命分析[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [8] 冷钢, 王黎钦, 郑德志, 等. 复杂工况下滚子轴承寿命的修正计算方法[J]. 轴承, 2012(12): 1-5.
- [9] 冷钢. 复合工况下高速滚动轴承的寿命和可靠性预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

收稿日期: 2021-02-01

(上接第 18 页)

3 结语

基于试验和有限元仿真软件对复合材料夹芯壁板结构轴向压缩稳定性进行了系统的分析, 结果表明:

1) 复合材料夹芯结构在轴向压缩的过程中, 当达到屈曲载荷后会很快失去其承载能力;

2) 复合材料夹芯结构的破坏形式主要表现为明显的纤维断裂、芯材压溃和面芯分离;

3) 建立的有限元仿真分析模型可以对结构的承载能力以及破坏形式做出较好的预测。

参考文献:

- [1] 陈悦, 朱锡, 李华东, 等. 复合材料夹芯梁屈曲破坏模式及极限承载[J]. 复合材料学报, 2016, 33(5): 991-997.
- [2] 万玉敏, 张发, 刘长喜, 等. 飞机典型薄壁复合材料夹层结构整体屈曲[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2235-2245.

[3] 王宝芹, 王沫楠, 刘长喜. 基于多尺度方法的蜂窝夹层复合材料结构轴向压缩稳定性[J]. 复合材料学报, 2020, 37(3): 601-608.

[4] HELLAL H, BOURADA M, HEBALI H, et al. Dynamic and stability analysis of functionally graded material sandwich plates in hygro-thermal environment using a simple higher shear deformation theory [J]. Journal of Sandwich Structures & Materials, 2019: 109963621984584.

[5] HASHIN Z. Analysis of composite materials—a survey [J]. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50(3): 481-505.

[6] 程小全, 邹健, 许延敏, 等. 含孔平面编织混杂铺层层合板压缩破坏仿真[J]. 力学学报, 2007, 39(6): 829-834.

[7] 陈秀华. 三参数强度准则及复合材料层压板失效研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

[8] 吴龙兴. 复合材料泡沫夹芯壁板稳定性及承载能力研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.

收稿日期: 2021-03-05