

文章编号:1674-8190(2022)05-116-07

蜂窝夹层结构弯曲性能测试方法的离散度分析

李云鹏, 郭祥

(航空工业第一飞机设计研究院 结构设计研究所, 西安 710089)

摘要:在对蜂窝夹层结构弯曲性能的测试中,由于测试方法的不同,存在数据离散度较大,造成可信度降低的情形,不利于对结构真实性能的评估。应用弯曲测定方法(ASTM方法)、弯曲性能均值法和侧压法对蜂窝夹层结构进行弯曲性能研究,对比数据的离散性差异,评定三种测试方法的有效性;通过对试验件的测试和分析,获得蜂窝夹层板的弯曲性能数据。结果表明:按ASTM方法测定的弯曲性能数据,离散系数大于0.1,无法体现测试结果的真实性;按弯曲性能均值法将蜂窝芯剪切模量代入关系式求解夹层结构的弯曲性能,离散系数小于0.09,结果可信;按GB/T 1454—2005侧压法测定夹层结构的侧压模量,其结果低于弯曲方法测定值,考虑面板自身的刚度影响,侧压方法的结果真实性更高,离散系数小于0.07,可信度进一步提高。

关键词:蜂窝夹层结构;弯曲性能;侧压法;离散性;真实性

中图分类号: V214.6

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dispersion Analysis of the Testing Method for the Flexural Performance of Honeycomb Sandwich Structure

LI Yunpeng, GUO Xiang

(Structure Design Department, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: In the test of the flexural performance of the honeycomb sandwich structure, due to the different test methods, there is a situation that the data dispersion is large, which causes the reliability to be reduced, which is not conducive to the evaluation of the true performance of the structure. The flexural performance of the honeycomb sandwich structure is studied by flexural measurement method (ASTM method); flexural performance average method analysis and lateral pressure method, and the discrete difference of data is compared to evaluate the effectiveness of the three test methods. Through the test and analysis of the test pieces, the flexural performance data of the honeycomb sandwich panel is obtained. The results show that: the dispersion coefficient of the flexural performance data measured according to the ASTM method is greater than 0.1, which conceals the authenticity of the test results; according to the mean value of the flexural performance, the method substituting the honeycomb core shear modulus into the relational formula to solve the flexural performance of the sandwich structure, the dispersion coefficient is less than 0.09, the result is credible; according to GB/T 1454—2005 lateral compression method, the lateral compression modulus of the sandwich structure is lower than that of flexural test, considering the influence of the stiffness of the panel itself, the result of the lateral pressure method is more authentic and the dispersion coefficient is less than 0.07. The credibility is further improved.

Key words: honeycomb sandwich structure; flexural performance; lateral pressure method; discreteness; authenticity

收稿日期: 2021-12-21; 修回日期: 2022-03-13

通信作者: 李云鹏, vemail@sohu.com

引用格式: 李云鹏, 郭祥. 蜂窝夹层结构弯曲性能测试方法的离散度分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 116-122.

LI Yunpeng, GUO Xiang. Dispersion analysis of the testing method for the flexural performance of honeycomb sandwich structure[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 116-122. (in Chinese)

0 引言

蜂窝夹层结构是一种轻质高承载复合材料结构形式,在飞行器上有着广泛的应用。蜂窝夹层结构一般由面板、蜂窝芯和胶黏剂构成,具有优良的可设计性,较高的比强度和比刚度,良好的吸振、隔声等功能^[1]。随着材料应用多样化的发展,目前以纸质蜂窝结构为主要应用形式。

蜂窝夹层结构的弯曲性能是表征其承载能力的一个重要指标,测定方法主要有美国材料标准 ASTM D7250/D7250M-20^[2](本文简称 D7250)和我国国家标准 GB/T 1456—2005^[3],根据这两种测试方法获得的数据,在反映材料特性上存在一定程度的差异。

目前,国内外已对夹层结构开展了多方面的研究,包括结构形式、试验方法、加载方式和数据分析等。

对于夹层结构形式,研究内容包括面板及夹芯增强形式对结构承载能力的影响。杨宇^[4]、张富宾等^[5]分析了面板厚度增大对结构承载能力提升的变化趋势;龚小辉^[6]对比了缝合及加强筋增强方式下泡沫夹层复合材料弯曲性能的差异;C. Caglayan 等^[7]研究了碳纳米管增强聚氨酯泡沫对复合材料夹层结构压缩性能的影响;P. Sharafi 等^[8]研究了带有铆钉的面板对泡沫夹芯层分层强度的影响;H. A. Atar 等^[9]、A. Hamzah 等^[10]研究了夹心结构单元形状对其力学特性的影响。

对于试验方法,研究内容包括了三点或四点弯曲下夹层结构的力学性能。张利猛^[11]对 ASTM C393 与 D7250 中所忽略的面板对夹层板整体剪切刚度的影响进行了分析;马子广等^[12]应用 Patran 建立四点弯曲的有限元模型,研究了复合材料夹层结构的力学特征;Wei X Y 等^[13]研究了三点弯曲模式下蜂窝夹层结构的失效形态。

对于加载方式,研究内容包括了侧压强度的差异及影响因素。周祝林^[14]采用侧压方式研究了面板波纹度对夹层结构力学性能的影响;曹阳丽等^[15]利用 ABAQUS 建立了蜂窝夹层结构侧压计算模型;郑康^[16]通过试验研究了热塑性蜂窝夹层结构的面内压缩性能。

对于试验方法的数据可信度也有相关研究。殷广强等^[17]对夹层结构弯曲性能的测试进行了不确定度的评定,通过采用 GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能试验方法》进行测量,根据 JJF 1059—1999^[18]《测量不确定度评定与表示》对测量结果的不确定度进行了评定,结果表明,应用外伸梁弯曲试验方法进行夹层结构的弯曲模量和弯曲强度测试,测量结果离散性小,结果可靠;之后与 ASTM C393/C393M-11^[19]进行了对比,结果表明采用国标所得试验数据离散度小,更稳定可靠^[20]。

综合分析蜂窝夹层结构的研究进展,试验方法的不同会对试验结果的分析带来较大影响。有必要开展试验方法、计算方法和加载方式的对比,从而研究其间的可信度差异。本文首先按照 D7250 方法对蜂窝夹层结构的弯曲性能进行测定,对试验数据的离散性进行分析;然后采用弯曲性能的均值法进行数据处理,提高其可信度;最后采用 GB/T 1454—2005^[21]测定夹层结构的侧压模量,将 ASTM、均值法和侧压法三者的测试数据进行对比,评估数据的真实性。

1 试验件

试验件为某型碳纤维蜂窝夹层结构,尺寸为 500 mm×60 mm,每类试验件数量为 5 件,蜂窝芯子高度为 20 mm,芯子两侧铺层对称,铺层信息如表 1 所示。

表 1 试验件铺层信息
Table 1 Stack of the specimens

类别	层数	角度/(°)
A	10	$[(\pm 45)/(0,90)/(\pm 45)/(0,90)/(\pm 45)]_s$
B	9	$[(\pm 45)/(0,90)/(\pm 45)/(0,90)/(\pm 45)]_s$
C	8	$[(\pm 45)/(0,90)/(\pm 45)/(0,90)]_s$
D	7	$[(\pm 45)/(0,90)/(\pm 45)/(0,90)]_s$

2 试验方法

2.1 D7250

2.1.1 测试方法

弯曲试验夹具和试验装置参照 D7250 标准设

计,弯曲试件简图及加载方向如图 1 所示。通过该测试方法可以测定夹层结构的弯曲性能。

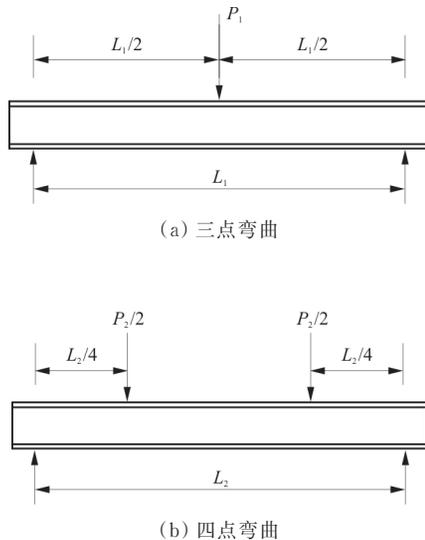


图 1 加载类型(1/4加载)^[2]

Fig. 1 Loading configurations (quarter point loading)^[2]

组装完成后的弯曲试验实物夹持如图 2 所示。三点弯曲试验时,去掉上加载夹具即可。

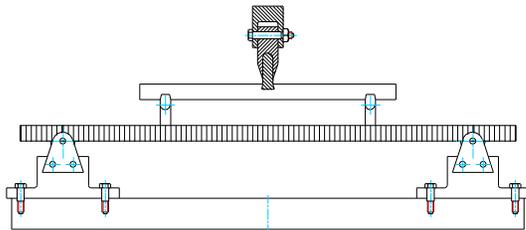


图 2 弯曲夹持示意图

Fig. 2 Diagram of flexural test

通过夹层结构长梁试件的三点弯曲和四点弯曲试件,采用激光位移传感器测试试件中点的挠度,而后根据 D7250 标准公式计算得到夹层结构的弯曲刚度、面板的弹性模量和蜂窝芯的剪切模量。本文所用到的符号释义如下:

b —蜂窝夹层板宽度,单位 mm;

h —蜂窝夹层板厚度,单位 mm;

h_c —蜂窝芯的厚度,单位 mm;

Δ_1 —三点弯曲测试时,试件中点在载荷 P_1 作用下试件中点的位移,单位 mm;

Δ_2 —四点弯曲测试时,试件中点在载荷 P_2 作用下试件中点的位移,单位 mm;

D —弯曲刚度,单位 $N \cdot mm^2$,如式(1)所示。

$$D = \frac{P_1 L_1^3 (1 - 11L_2^2 / 8L_1^2)}{48\Delta_1 (1 - 2P_1 L_1 \Delta_2 / P_2 L_2 \Delta_1)} \quad (1)$$

E —面板弯曲模量,单位 GPa,如式(2)所示。

$$E = \frac{12D}{(h^3 - h_c^3)b} \quad (2)$$

G —蜂窝芯剪切模量,单位 MPa,如式(3)所示。

$$G = \frac{P_1 L_1 h_c [8L_1^2 / 11L_2^2 - 1]}{\Delta_1 b (h + h_c) [(16P_1 L_1^3 \Delta_2 / 11P_2 L_2^3 \Delta_1) - 1]} \quad (3)$$

2.1.2 试验过程

试验过程如图 3~图 4 所示,在获得充足的试验数据之后,以三点弯曲方式加载至试验件破坏。



图 3 三点弯曲试验

Fig. 3 3-point loading test



图 4 四点弯曲试验

Fig. 4 4-point loading test

2.1.3 数据分析

按 D7250 提供的公式计算得到的夹层结构弯曲刚度如表 2 所示,面板弹性模量如表 3 所示,失效弯矩如表 4 所示,可以看出:弯曲刚度和弯曲模量的离散系数大于 0.1,掩盖了真实情况,结果可信度低。

表2 D7250弯曲刚度
Table 2 Flexural stiffness according to D7250

类别	弯曲刚度/(10 ⁹ N·mm ²)					离散度	平均值/ (10 ⁹ N·mm ²)
	试件1	试件2	试件3	试件4	试件5		
A	1.530	1.100	2.550	2.020	1.630	0.310	1.766
B	1.470	1.440	1.470	2.100	2.140	0.210	1.724
C	1.130	1.470	1.650	1.190	1.620	0.171	1.412
D	0.867	0.684	1.160	0.696	0.746	0.238	0.831

表3 D7250面板弯曲模量
Table 3 Facing flexural module according to D7250

类别	弯曲模量/GPa					离散度	平均值/ GPa
	试件1	试件2	试件3	试件4	试件5		
A	47.02	45.69	32.92	59.45	48.22	0.202	46.660
B	51.26	47.15	51.98	70.82	75.43	0.216	59.328
C	43.58	57.76	60.73	48.94	61.90	0.146	54.582
D	38.62	30.37	52.33	33.80	35.63	0.222	38.150

表4 失效弯矩
Table 4 Yield moment of sandwich

类别	失效弯矩/(10 ⁵ N·mm)					离散度	平均值/ (10 ⁵ N·mm)
	试件1	试件2	试件3	试件4	试件5		
A	6.87	6.8	7.09	6.59	7.19	0.034	6.908
B	6.47	6.95	6.37	5.88	6.38	0.059	6.410
C	6.59	6.15	6.54	6.00	6.66	0.046	6.388
D	6.20	5.77	6.03	5.97	5.63	0.038	5.920

2.2 均值法

2.2.1 分析方法

根据式(1)~式(3)计算得到的D、E、G都表现出非常大的分散性,掩盖了测试结果的真实分布规律。

从计算过程分析,导致上述结果的原因在于:①公式(1)分母中,1-2P₁L₁Δ₂/P₂L₂Δ₁在计算时趋于一个比较小的数,使得计算公式病态;②计算过程需要同时用到三点弯曲和四点弯曲的测试值,计算公式的函数结构使得误差表现为累积放大效应。

为了解决这一问题,可以先采用ASTM

C273/C273M-20^[22]方法测定蜂窝芯子的剪切模量G*,再将G*代入夹层板剪切刚度U(式(6)),之后通过三点弯曲和四点弯曲的挠度表达式,求得弯曲刚度均值,进而计算面板的弯曲模量。

三点弯曲时,中点挠度为

$$\Delta_1 = \frac{P_1 L_1^3}{48D} + \frac{P_1 L_1}{4U} \quad (4)$$

四点弯曲时,中点挠度为

$$\Delta_2 = \frac{11P_2 L_2^3}{768D} + \frac{P_2 L_2}{8U} \quad (5)$$

夹层板的剪切刚度可表示为

$$U = \frac{G^*(h+h_c)^2 b}{4h_c} \quad (6)$$

式中:G*为芯子剪切模量(对于芯高h_c=20 mm的蜂窝夹层板,G*=32.7 MPa)。

在已知P₁、Δ₁、P₂、Δ₂和G*的条件下,根据式(4)~式(6)可分别导出弯曲刚度的表达式:

$$D_3 = \frac{P_1 U L_1^3}{48\Delta_1 U - 12P_1 L_1} \quad (7)$$

$$D_4 = \frac{11P_2 U L_2^3}{768\Delta_2 U - 96P_2 L_2} \quad (8)$$

按均值法求得平均弯曲刚度:

$$D^* = \frac{D_3 + D_4}{2} \quad (9)$$

根据D*计算得面板平均弯曲模量:

$$E^* = \frac{12D^*}{(h^3 - h_c^3)b} \quad (10)$$

2.2.2 数据分析

通过弯曲性能均值法计算得到的平均弯曲刚度和平均弯曲模量数据分别如表5~表6所示,可以看出:离散系数小于0.09,结果可信度提升。

表5 均值法弯曲刚度

类别	弯曲刚度/(10 ⁹ N·mm ²)					离散度	平均值/ (10 ⁹ N·mm ²)
	试件1	试件2	试件3	试件4	试件5		
A	2.07	2.21	1.85	2.03	2.35	0.090	2.102
B	1.82	1.97	1.69	1.66	1.94	0.078	1.816
C	1.65	1.56	1.62	1.52	1.79	0.064	1.628
D	1.13	1.11	1.19	1.23	1.14	0.042	1.160

表6 均值法弯曲模量
Table 6 Facing flexural module according to mean algorithm

类别	弯曲模量/GPa					离散度	平均值/GPa
	试件1	试件2	试件3	试件4	试件5		
A	63.48	65.95	55.29	59.7	69.39	0.087	62.762
B	63.53	64.22	64.83	60.02	55.8	0.061	61.680
C	64.72	58.35	59.78	62.38	68.27	0.063	62.700
D	50.22	49.11	53.66	59.45	54.40	0.076	53.368

2.3 GB/T 1454—2005

为了进一步准确测试面板的弹性模量,针对每一组弯曲试板,进行侧压试验,直接测量面板的侧压弹性模量。

2.3.1 测试方法

侧压试验夹具和试验装置参照 GB/T 1454—2005 设计,组装完成后的试验夹具装备图和测试系统布置如图 5 所示。在试件正反面沿纵向各贴一个应变片,两个应变片沿试件中心线对称分布,分别测量试件两侧的应变值。

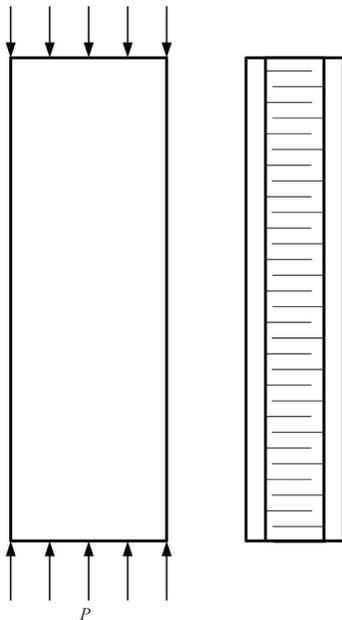


图5 侧压加载
Fig. 5 lateral loading

2.3.2 测试

侧压试验如图 6 所示。



图6 侧压实物夹持图
Fig. 6 Lateral loading test

2.3.3 数据分析

按 GB/T 1454—2005 侧压试验测得的面板等效侧压模量数据如表 7 所示,可以看出:离散系数小于 0.07,考虑面板自身的刚度影响,侧压方法的结果真实性更高。从数据值比较,低于弯曲方法测定的弹性模量,原因在于弯曲测试方法假定面板内轴向应力均匀分布,忽略了面板自身的弯曲刚度影响。相比而言,侧压方法得到的弹性模量更接近面板实际的弹性模量。

表7 面板的等效侧压模量
Table 7 Facing equivalent lateral compression modulus

类别	等效侧压模量/GPa					离散度	平均值/GPa
	试件1	试件2	试件3	试件4	试件5		
A	43.16	45.85	46.06	38.98	43.5	0.066	43.510
B	43.01	46.77	40.59	42.15	44.5	0.054	43.404
C	53.11	51.49	47.18	47.41	50.72	0.052	49.982
D	40.07	43.97	41.48	42.47	40.05	0.040	41.608

3 试验分析

对上述试验结果进行分析可知:

(1) 根据失效弯矩的对比分析,夹层结构的失效弯矩随面板铺层数的增加而增加,铺层数量的增加有助于承载能力的提升。

(2) 夹层板失效表现为芯子剪切失稳,类似于“塑性”失效,失效后试板仍保持有残余承弯能力。

(3) 考虑面板自身的刚度以及对比试验数据的离散度,侧压方法测得的面板弹性模量值真实性更高。

(4) 8层铺层方案的面板弹性模量相对最高,这与该两种铺层方案中(0,90)度层相对含量高

有关。

4 结 论

(1) 按 ASTM D7250 提供的公式计算得到的面板弹性模量和弯曲刚度,离散系数大于 0.1,掩盖了真实情况,结果可信度低。

(2) 按弯曲性能均值法,将蜂窝芯剪切模量代入关系式求解出夹层结构的弯曲性能,离散系数小于 0.09,结果可信。

(3) 按侧压法,测定芯子的侧压模量,低于弯曲方法测定的弹性模量,离散系数小于 0.07,考虑面板自身的刚度影响,侧压方法的结果真实性更高。

参 考 文 献

- [1] CMH.17 协调委员会. 复合材料手册(6): 复合材料夹层结构[M]. 汪海, 沈真, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2016: 13.
CMH.17 Coordination Committee. Composite material handbook (6): structural sandwich composites[M]. Translated by WANG Hai, SHEN Zhen. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016: 13. (in Chinese)
- [2] ASTM. Standard practice for determining sandwich beam flexural and shear stiffness: D7250/D7250M-20[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 夹层结构弯曲性能试验方法: GB/T 1456—2005[S]. 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. Test method for flexural properties of sandwich construction: GB/T 1456—2005[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [4] 杨宇. 金属蜂窝夹层结构弯曲性能分析[J]. 科技视界, 2015(26): 104-105.
YANG Yu. Bending property analysis of metal honeycomb sandwich structure[J]. Science & Technology Vision, 2015 (26): 104-105. (in Chinese)
- [5] 张富宾, 刘伟庆, 齐玉军, 等. 面板厚度对复合材料夹层梁整体及局部弯曲力学性能影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(5): 21-26.
ZHANG Fubin, LIU Weiqing, QI Yujun, et al. The whole and local flexural performance of sandwich beams with different face thickness [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(5): 21-26. (in Chinese)
- [6] 龚小辉. 泡沫夹芯结构复合材料低速冲击和弯曲性能的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- GONG Xiaohui. Study on low-velocity and bending property of foam sandwich structure composites [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018. (in Chinese)
- [7] CAGLAYAN C, GURKAN I, GUNGOR S, et al. The effect of CNT-reinforced polyurethane foam cores to flexural properties of sandwich composites [J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 2018, 115: 187-195.
- [8] SHARAFI P, NEMATI S, SAMALI B B, et al. Flexural and shear performance of an innovative foam-filled sandwich panel with 3-D high density polyethylene skins [J]. Engineering Solid Mechanics, 2018, 6(2): 113-128.
- [9] ATAR H A, ZARREBINI M, HASANI H, et al. Determination of corrugated core sandwich panels elastic constant based on three different experimental methods and effect of structural integrity on flexural properties [J]. SN Applied Sciences, 2021, 3(4): 1-11.
- [10] HAMZAH A, AMMAR E, SATTAR A. Effect of cell shape on flexural strength of honey comb structure (experimental and numerical study) [J]. Test Engineering and Management, 2020, 83(2): 14982-14991.
- [11] 张利猛. 蜂窝夹层结构弯曲载荷下面板剪切性能分析[J]. 科技视界, 2017(6): 136-137.
ZHANG Limeng. Shear performance analysis of panel of honeycomb sandwich structure under bending load [J]. Science & Technology Vision, 2017 (6): 136-137. (in Chinese)
- [12] 马子广, 王卫卫. 复合材料蜂窝夹层结构四点弯曲性能研究[J]. 纤维复合材料, 2019(4): 8-11.
MA Ziguang, WANG Weiwei. The exploring of four-point bending behavior of composite honeycomb sandwich structures [J]. Fiber Composites, 2019(4): 8-11. (in Chinese)
- [13] WEI X Y, WU Q Q, GAO Y, et al. Bending characteristics of all composite hexagon honeycomb sandwich beams: experimental tests and a three-dimensional failure mechanism map [J]. Mechanics of Materials, 2020, 148(9): 103401.
- [14] 周祝林. 碳纤维复合材料蜂窝夹层结构侧压强度理论计算 [J]. 纤维复合材料, 2000, 17(3): 24-25.
ZHOU Zhulin. Theoretical calculation of lateral compressive strength of carbon fiber composite honeycomb sandwich structure [J]. Fiber Composites, 2000, 17 (3): 24-25. (in Chinese)
- [15] 曹阳丽, 徐建新, 王轩, 等. 蜂窝夹层复合材料结构侧压强度研究 [J]. 科技与创新, 2018(13): 73-74.
CAO Yangli, XU Jianxin, WANG Xuan, et al. Research on lateral compressive strength of honeycomb sandwich composite structure [J]. Science and Technology & Innovation, 2018(13): 73-74. (in Chinese)
- [16] 郑康. 热塑复合材料夹层结构面内压缩性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHENG Kang. In-plane compression behavior of thermoplastic composite sandwich structure [D]. Dalian: Dalian

