

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.07.022

夹层复合材料三点弯曲试验和有限元模拟分析对比

陈同海,周正亮,张守玉,赵大娟,戚洪强

(中材科技股份有限公司,南京 210012)

摘要:采用真空辅助树脂传递模塑成型工艺制备了泡沫夹层复合材料,并测试了泡沫夹层复合材料在不同作用载荷下的位移;同时,采用有限元软件 ANSYS Workbench 在上述加载条件下对该材料进行数值仿真,并和实验结果进行对比分析。研究表明,在 100~600 N 载荷作用下,数值仿真结果和实验结果误差在 10% 以内,数据吻合良好,验证了该方法具有潜在的工程应用价值。

关键词:复合材料;夹层结构;三点弯曲;数值模拟

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)07-0111-04

Comparison of Three Point Bending Test and Finite Element Simulation Analysis of Sandwich Composites

Chen Tonghai, Zhou Zhengliang, Zhang Shouyu, Zhao Dajuan, Qi Hongqiang

(Sinomascience & Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract : The foam sandwich composites were prepared by vacuum assisted resin transfer molding process. The displacement of foam sandwich composites under different load was tested. At the same time, the finite element software ANSYS Workbench was used to simulate the displacement of the material under the above loading conditions, and the results were compared with the experimental results. The results show that under 100-600 N load, the numerical simulation results and the experimental results are within 10%, and the data are in good agreement. The results show that the method has potential value in engineering application.

Keywords : composite ; sandwich structure ; three point bending ; numerical simulation

在夹层结构复合材料中使用低密度夹芯材料可增加层合板的厚度,大幅度提高结构的模量,而被广泛应用于航空、风力发电机叶片、体育运动器材、船舶制造、列车等领域^[1-3]。采用高性能的夹层复合材料,可以大大减轻运行设备的质量,这意味着油耗和废气排放的减少,尤其在当今石油日益紧缺的情况下,意义尤为明显。

目前,关于夹层复合材料的研究主要分为成型工艺、力学性能测试和有限元数值分析研究。赖家美等^[4]在缝合泡沫夹层结构复合材料三点弯曲性能的研究中,采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺制备了夹层结构复合材料,并进行了三点弯曲性能研究;Wang Peiyan等^[5]研究了六种不同缝合密度泡沫夹层结构复合材料的抗弯性能,并将实验数据和有限元数据进行了对比分析;Jiang Banghai等^[6]采用数值分析方法研究了夹层结构的三点弯曲失效机理,研究结果表明,其优化失效模型的极限载荷的预测和实验结果较为吻合;易雯等^[7-8]在泡沫夹层复合材料全船有限元分析及结构特性研究中,以实体单元为基础建立了数值模型,并将有限元数值分析和实验结果进行对比,确定了夹层结构复

合材料仿真分析方法。R. Martin等^[9]通过试验方法分析了泡沫夹芯复合材料在静载下的三点弯曲的破坏并与有限元模拟进行了对比。笔者主要研究泡沫夹层结构复合材料三点弯曲实验数据和有限元数值分析数据的吻合性,探明有限元数值分析方法在一定程度上是否可指导实际工程应用。实验研究内容为对该材料的两个主要方向开展三点弯曲试验,测定其载荷-位移曲线、弯曲弹性模量与弯曲强度,实验结果可为有限元计算结果提供数据验证。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂:GT-807A-1,惠柏新材料科技(上海)股份有限公司;

环氧固化剂:GT-807B-1,惠柏新材料科技(上海)股份有限公司;

聚对苯二甲酸乙二酯(PET)泡沫:100 kg/m³,固瑞特(天津)复合材料有限公司;

无碱方格布:300 g/m²,泰山玻璃纤维有限公司。

联系人:陈同海,硕士,主要从事复合材料成型及有限元结构分析

收稿日期:2017-05-01

1.2 主要设备及仪器

五轴智能水刀:LTJ2040-5B型,上海狮迈科技有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9626A型,苏州柏兆科学仪器有限公司;

MTS材料测试系统:MTS809型,美国MTS系统公司;

电子万能材料试验机:DDL-100型,长春试验机研究所有限公司。

1.3 实验方法

采用VARTM工艺制备了泡沫夹层复合材料,如图1所示。

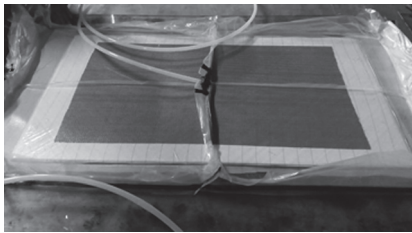


图1 VARTM工艺制备泡沫夹层复合材料照片

实验参照标准GB/T1456-2005进行,为避免试验的偶然性,每组试件为7个,测试结果去掉最大值和最小值。本次实验的试验件的尺寸及工装如图2所示,其中上下蒙皮厚度1.5 mm和PET泡沫厚度为17 mm;三点弯曲试验的跨距为360 mm,三点弯曲的最大位移发生在测试样条中心^[10]。



图2 试件尺寸与试验工装图

2 结果与讨论

2.1 实验结果

材料0°方向和90°方向试件的弯曲弹性模量、弯曲强度数据见表1。

表1 三点弯曲力学性能测试数据

序号	0°弯曲弹性模量/MPa	0°弯曲强度/MPa	90°弯曲弹性模量/MPa	90°弯曲强度/MPa
1 [#]	3 669.30	26.10	2 883.68	19.80
2 [#]	3 679.50	24.30	2 959.50	22.50
3 [#]	3 743.42	24.30	2 959.25	21.60
4 [#]	3 629.45	25.50	2 986.96	22.50
5 [#]	3 707.94	23.40	2 986.96	22.50
均值	3 685.92	24.72	2 955.27	21.78

图3为0°和90°方向试件载荷-位移曲线。

由图3可知,初始阶段,载荷位移曲线较平缓,这主要因为刚加载时夹头和试验件之间存在一定间隙,随着位移的增大,载荷变化不大;随后曲线进入线性段,由该段的斜率可求出其弯曲模量;当载荷达到峰值后,曲线开始下降,呈非线性。

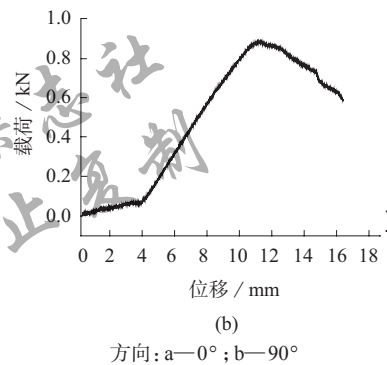
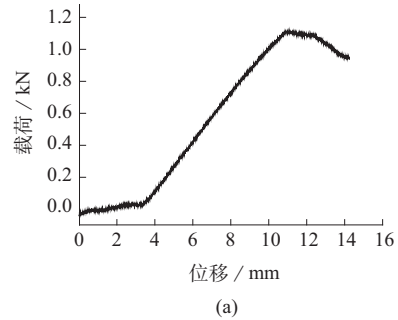


图3 0°和90°方向试件载荷-位移曲线

分析上述数据可得,同一组试件的试验结果一致性较好;通过对实验原始数据进行系统分析得到了0°方向夹层结构复合材料中点在100,200,300,400,500,600 N作用下的位移结果,见表2。

表2 不同载荷作用下的位移

试样编号	载荷/N					
	100	200	300	400	500	600
1 [#]	0.666	1.332	1.998	2.664	3.33	3.996
2 [#]	0.672	1.344	2.016	2.688	3.36	4.032
3 [#]	0.666	1.332	1.998	2.664	3.33	3.996
4 [#]	0.659	1.318	1.977	2.636	3.295	3.954
5 [#]	0.664	1.328	1.992	2.656	3.32	3.984
均值	0.665 4	1.330 8	1.996 2	2.661 6	3.327	3.992 4

2.2 有限元分析

(1) 复合材料力学性能参数预测。

由于泡沫夹层复合材料中含有泡沫、玻璃纤维和树脂等,其计算模型的建立与金属结构等仅含单一材料的模型不同,因而将上下蒙皮采用实体单元模拟多层复合材料,输入每一层纤维混合层的等效材料参数,即混合层的弹性模量、泊松比和剪切模量等。对于中间泡沫层的泡沫芯材同样采用实体单

元进行模拟。

建模中所需的材料参数是玻璃纤维与树脂基体混合的等效材料参数,需通过计算转化得到,相关参数名称定义如下:

纤维密度: ρ_f , g/mm^3 ; 弹性模量: E_f , MPa; 泊松比: μ_f ; 树脂基体密度: ρ_m , g/mm^3 ; 弹性模量: E_m , MPa; 树脂剪切模量: G_m , GPa; 泊松比: μ_m ; 经纬纤维比 $n_L : n_T$, 经纬纤维模量 E_L, E_T ; 各种织物的树脂含量 A_f , %; 孔隙率 C , %; 树脂质量含量 35%, 孔隙率为 0.8%, 其余原材料性能参数见表 3。

表 3 材料性能参数

材料	密度 / ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	弹性模量 / GPa	泊松比	剪切模量 / GPa
玻璃纤维	2.54	73	0.23	
环氧树脂	1.1	2.8	0.35	1.4

根据材料力学方法及相关文献得出纤维增强复合材料材料参数计算公式如下^[11-13]:

纤维体积含量比例参数为:

$$V_f = \frac{1 - C}{1 + \frac{A_f \rho_f}{(1 - A_f) \rho_m}} \quad (1)$$

纤维毡增强复合材料的弹性模量为:

$$E = \frac{1}{3} [E_f V_f + E_m (3 - V_f)] \quad (2)$$

纤维增强复合材料的泊松比为:

$$\mu_1 = \mu_f V_f + \mu_m (1 - V_f) \mu_T = \frac{\mu_f E_f}{E_1} \quad (3)$$

纤维复合材料-方格布的纵向和横向弹性模量分别为:

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f) E_T = E_m \frac{1 + V_f}{1 - V_f} \quad (4)$$

纤维复合材料-方格布的面内剪切模量为:

$$G = G_m \frac{1 + V_f}{1 - V_f} \quad (5)$$

对于方格布,径向和纵向弹性模量为:

$$E_1 = E_f \frac{n_L}{n_L + n_T} + E_T \frac{n_T}{n_L + n_T} \quad (6)$$

$$E_2 = E_f \frac{n_T}{n_L + n_T} + E_T \frac{n_L}{n_L + n_T} \quad (7)$$

方格布面内剪切模量为:

$$G = G_m \frac{1 + V_f}{1 - V_f} \quad (8)$$

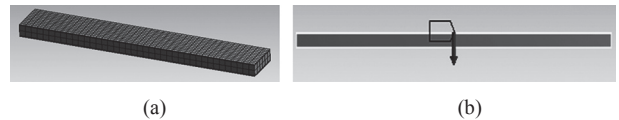
根据复合材料结构的实际铺层设计,选择上述相关公式进行计算,得到模拟分析主要参数见表 4。其中, E_{11} 为 X 弹性模量, E_{22} 为 Y 弹性模量, μ_{12} 为 XY 泊松比, G_{12} 为 XY 剪切弹性模量, G_{23} 为 YZ 剪切弹性模量, G_{13} 为 XZ 剪切弹性模量。

表 4 模拟分析参数数值

E_{11}	E_{22}	μ_{12}	G_{12}	G_{23}	G_{13}
20.67 GPa	20.67 GPa	0.297	3.62 GPa	7.968 GPa	7.968 GPa

(2) 有限元模型的建立。

本方案模拟分析的模型主要是结合现有测试设备和参照 GB/T1456-2005 夹层结构弯曲性能试验方法规定的样品尺寸进行模型的建立,三维模型尺寸如图 4 所示,其中上下蒙皮为 1.5 mm、PET 泡沫厚度为 17 mm;边界条件为两边为支点简支,在模型中间施加节点力。

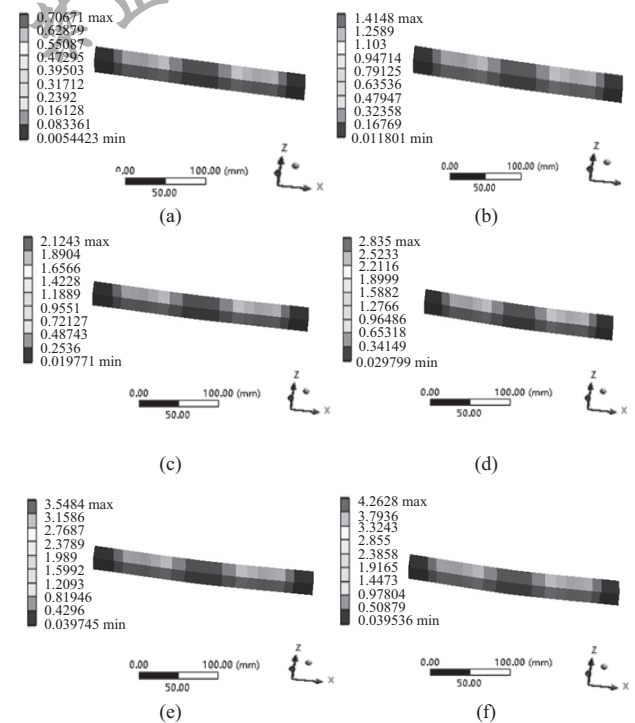


a—网格划分模型; b—载荷约束模型

图 4 有限元分析模型

(3) 有限元模拟结果。

对泡沫夹层结构进行了三点弯曲模拟,得到了中点在 100, 200, 300, 400, 500, 600 N 作用下的作用云图如图 5 所示,通过分析六组数据发现,位移随着载荷的增加呈现正相关关系。



a—100 N; b—200 N; c—300 N; d—400 N; e—500 N; f—600 N

图 5 不同载荷作用云图

模拟位移结果见表 5。

表 5 模拟位移数据

项目	载荷 / N					
	100	200	300	400	500	600
位移 / mm	0.71	1.41	2.12	2.83	3.54	4.26

3 实验结果和有限元分析对比

通过实验研究和有限元分析,获得了泡沫夹层结构复合材料三点弯曲的实验数据和有限元分析数据;分析上述两项数据,以便检验实验结果和有限元模拟分析结果的吻合程度,以此来决定该有限元模拟是否可以在实际生产中进行指导。

表6 实验数据和有限元分析数据误差分析

项目	载荷 / N					
	100	200	300	400	500	600
实验位移 / mm	0.665 4	1.330 8	1.996 2	2.661 6	3.327	3.992 4
有限元位移 / mm	0.71	1.41	2.12	2.83	3.54	4.26
误差 / %	6.7	5.95	6.2	6.33	6.4	6.7

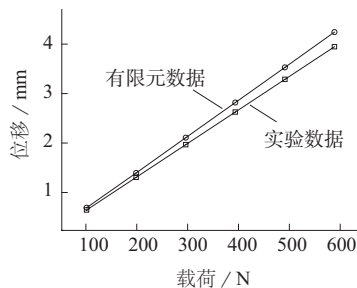


图6 实验数据和有限元数据对比分析

实验数据和有限元分析数据均呈现载荷增量和位移增量为线性相关关系,通过对比100~600 N这6个数据,有限元分析数据与实验数据误差在10%以内,数据吻合良好,因此,可以指导实际生产。但是,有限元数值分析结果较实验数据偏大,造成上述现象的原因有以下几方面:1)上下蒙皮铺层时,层数较多,不能保证层与层纤维之间的直线度;2)测试样条切割时,不能保证样条切割的精度,如角度和尺寸等;3)未考虑纤维与纤维、纤维与泡沫之间的层间剪切力。

4 结论

(1) 泡沫夹层复合材料进行了三点弯曲性能测试,该材料两个方向的弯曲弹性模量和弯曲强度试验结果较稳定。

(2) 实验数据和有限元分析数据均呈现载荷增量和位移增量为线性相关关系,通过对比100~600 N 6个数据,有限元分析数据与实验数据误差在10%以内,数据吻合良好,因此,可以指导实际生产。

(3) 从以下两方面入手可以提高复合材料的力学性能:第一、在成型过程中通过控制铺层结构层与层之间的直线度;第二、控制切割样条的精度。

参考文献

[1] Yang F P, Lin Q Y, Jiang J J. Experimental study on fatigue failure and damage of sandwich structure with PMI foam core[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014, 38:456-465.

[2] Atkinson R. Innovative uses for sandwich constructions[J]. Reinforced Plastics, 1997, 41:30-33.

[3] Belingardi G, Cavatorta M P, Duella R. Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train[J]. Composite Structures, 2003, 61:13-25.

[4] 赖家美, 鄢冬冬, 饶欣远, 等. 缝合泡沫夹层结构复合材料三点弯曲性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2):101-105.

Lai Jiamei, Yan Dongdong, Rao Xinyuan, et al. Study on three-point bending properties of stitched foam sandwich structure composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):101-105.

[5] Wang Peiyan, Yin Lei, Yue Zhufeng. Experimental and numerical evaluation of the flexural properties of stitched foam core sandwich structure[J]. Composite Structures, 2013, 100:243-248.

[6] Jiang Banghai, Li Zhibin, Lu Fangyun. Failure mechanism of sandwich beams subjected to three-point bending[J]. Composite Structures, 2015, 133:739-745.

[7] 易雯, 赵耀, 高畅. 泡沫夹层复合材料的初始破坏载荷与极限载荷计算 [J]. 中国造船, 2013, 54(2):45-54.

Yi Wen, Zhao Yao, Gao Chang. Calculation of initial failure load and ultimate load for foam sandwich composites[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(2):45-54.

[8] 易雯. 泡沫夹层复合材料全船有限元分析及结构特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

Yi Wen. The study of the FEM analysis for form sandwich composite ship and structure characteristics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[9] Martin R, Marianne J, Pierre C Z, et al. Face sheet debonding in CFRP / PMI sandwich structures under quasi-static and fatigue loading considering residual thermal stress[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78:2835-2847.

[10] 尉坤. 含缺陷蜂窝夹层板的弯曲力学性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

Yu Kun. Analysis of bending mechanical properties of honeycomb sandwich structure with defects[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[11] 周祝林, 王亚雄. 多层复合材料弹性模量理论估算 [J]. 玻璃钢, 2002, 32(2):6-11.

Zhou Zhulin, Wang Yaxiong. The oretical estimation of elastic modulus of multilayer composites[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2002, 32(2):6-11.

[12] 孙春方, 薛元德, 胡培. 复合材料泡沫夹层结构力学性能与实验方法 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2005, 32(2):3-6.

Sun Chunfang, Xue Yuande, Hu Pei. Mechanical properties and test method for foam core sandwich structure[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2005, 32(2):3-6.

[13] 周祝林, 张长明. 船舰用玻璃钢夹层结构设计基础 [J]. 中国造船, 2004, 45(3):43-49.

Zhou Zhulin, Zhang Changming. Design base of FRP sandwich construction for ship[J]. Shipbuilding of China, 2004, 45(3):43-49.