

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.04.017

整体中空夹层复合材料经向弯曲刚度的预测

刘 畅 周光明 王狄辉 李文龙 陆方舟

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,南京,210016)

摘要:提出了预测整体中空夹层复合材料经向弯曲刚度的理论方法。根据织物结构特点,运用夹层梁理论推导出纯弯曲时面板承担的弯矩占总弯矩的比例,在此基础上建立了材料宏观弯曲刚度和面板弯曲刚度的关系式,从而通过计算面板刚度以及相应结构参数预测了材料经向弯曲刚度,并研究了不同织造参数下弯曲刚度的变化。通过与实验值和理论预测值的对比,验证了理论预测方法的正确性。

关键词:复合材料;整体中空;经向弯曲;理论预测方法

中图分类号:TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2016)04-0558-05

Prediction of Warp Bending Modulus for Hollow Integrated Sandwich Composites

Liu Chang, Zhou Guangming, Wang Dihui, Li Wenlong, Lu Fangzhou

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: A theoretical method is developed to predict the bending modulus of hollow integrated sandwich composites in the warp direction. The pure bending moment is deduced by the sandwich beam theories when the face-sheet is responsible for the total moment proportion. On this basis, the relationship between the total bending modulus and the bending modulus of the face-sheet is established. Therefore, the bending modulus of the material is predicted by calculating the modulus of the face-sheet and combining the corresponding structural parameters, and the influence of various woven parameters on the bending modulus is also examined and analyzed. In the end, the accuracy of the theoretical prediction method is verified by comparing the theoretical predictions and the experimental data.

Key words: composites; integrated hollow; warp bending; theoretical prediction method

整体中空夹层复合材料是一种新型的夹层结构材料,和传统的夹层材料相比,具有轻质、抗分层及耐冲击等优点^[1-2],在高铁、飞机、船舶以及地板和隔墙等领域有较广泛的应用前景。

国内外对该材料展开了实验和理论研究。

Mojtaba 等^[3]对该材料进行了包括侧拉、侧压等在内的力学性能测试;Judawisastra 等^[4]研究了材料的疲劳性能和损伤扩展;Hosur^[5-6]通过实验分析了材料低速冲击性能。

对整体中空夹层复合材料力学性能的预测采

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20160111)资助项目。

收稿日期:2015-11-15;**修订日期:**2015-12-10

通信作者:周光明,男,教授,博士生导师,E-mail:zhougm@nuaa.edu.cn。

引用格式:刘畅,周光明,王狄辉,等.整体中空夹层复合材料经向弯曲刚度的预测[J].南京航空航天大学学报,2016,48(4):558-562. Liu Chang, Zhou Guangming, Wang Dihui, et al. Prediction of warp bending modulus for hollow integrated sandwich composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016,48(4):558-562.

用解析刚度法和有限元仿真分析^[3]。周光明等^[7]基于织物真实形态选取了整体中空夹层复合材料的最小结构单元,通过分析纱线走向采用解析法预测了材料在侧拉工况下的工程弹性常数;李鸿顺等^[8]建立了整体中空夹层复合材料的有限元模型,并模拟了压缩、弯曲和剪切过程中的应力分布;曹海建等^[9]建立了三维整体中空复合材料结构模型,进行压缩力学性能分析,并研究了芯材高度对其压缩性能的影响。

目前,国内外对整体中空夹层复合材料弯曲性能理论研究的报道较少,多数弯曲性能的研究都基于有限元模型。3D 实体有限元模型^[10-11]可以细致地描述纺织复合材料的微观结构^[12]和应力分布,但建模工作量大,进行参数分析时不够方便。

本文结合研究机织复合材料的刚度性能方法^[13],对整体中空夹层复合材料的经向弯曲刚度进行了理论预测。基于材料结构特点,用夹层梁理论^[14]推导出纯弯曲时面板承担的弯矩占总弯矩的比例,并建立了材料经向宏观弯曲刚度和面板弯曲刚度的理论关系式,进而通过计算面板刚度预测材料经向弯曲刚度,验证了理论的正确性。最后分析了纱线密度、芯材高度以及绒经的倾角对经向弯曲刚度的影响,为材料结构和性能优化提供了一定理论的基础。

1 理论研究

1.1 经向结构分析

图 1 为“X”形整体中空夹层复合材料的结构示意图。和传统玻璃钢/橡胶夹层材料等芯材较软^[14]以及层间性能较差的夹层结构不同,整体中空夹层复合材料中,作为芯材的绒经同时穿过上、下面板中的纬纱,并缠绕成一个整体,这使得材料抗分层能力大大提高,同时在小变形下芯材和面板间相对滑动可忽略不计,满足材料力学中关于梁的平面假设。

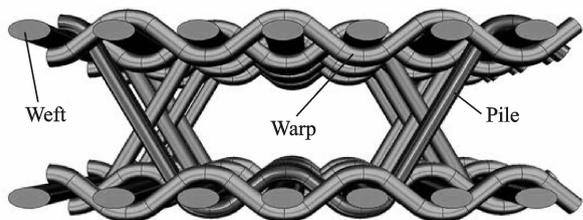


图 1 整体中空夹层复合材料三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of hollow sandwich composites

1.2 夹层梁模型

将整体中空夹层复合材料简化成如图 2 所示夹层梁,其中材料整体厚度和芯材的厚度分别为 h 和 h_c ,面板梁弯矩为 M_t ,芯材梁弯矩为 M_c ,总弯矩为 M 。

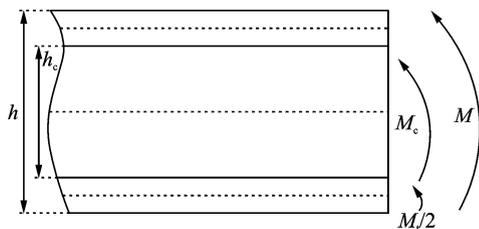


图 2 夹层梁截面内力分布

Fig. 2 Moment in section of sandwich beam

在夹层梁纯弯曲时满足平面假设的前提下,把夹层梁看作两个部分,即:上、下面板组成的面板梁和中间的芯材梁。根据材料的对称性,面板梁和芯材梁以及整个夹层梁的中性层是合一的,根据材料力学公式有

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_t} = \frac{1}{\rho_c} \tag{1}$$

式中 ρ, ρ_t, ρ_c 分别为整个夹层梁、面板梁和芯材梁的中性层曲率。

弯曲时,总弯矩由面板梁和芯材梁共同承担,即

$$M = M_t + M_c \tag{2}$$

由曲率和弯矩的关系以及式(1)得到

$$\frac{M_t}{E_t I_t} = \frac{M_c}{E_c I_c} \tag{3}$$

式中 E, I 分别为弹性模量和惯性矩;下标 t 和 c 分别表示面板和芯材。令 $\frac{E_t}{E_c} = \alpha, \frac{I_t}{I_c} = \beta$,再根据式(2,3)得面板梁的弯矩为

$$M_t = \frac{\alpha\beta}{1 + \alpha\beta} M \tag{4}$$

设材料经向宏观弯曲刚度为 EI ,考虑到弯曲正应力与弯矩、惯性矩的关系,由式(4)得材料经向弯曲刚度表达式为

$$EI = \frac{(1 + \alpha\beta)E_t I_t}{\alpha\beta} \tag{5}$$

工程中常采用单位宽度的弯曲刚度表征整体中空夹层复合材料的弯曲刚度,根据式(5)可得材料经向单位宽度的弯曲刚度

$$\frac{EI}{b} = \frac{(1 + \alpha\beta)E_t I_t}{\alpha\beta b} \tag{6}$$

式中 b 为材料宽度。从式(5)能看出经向弯曲刚度是和面板、芯材刚度性能以及材料结构参数相关的函数。因此需要对相应参数进行计算。

关于面板和芯材各自的刚度计算可采用机织材料刚度性能理论计算的方法^[13]。基于图 1 材料结构模型,根据纤维和树脂的基本力学性能参数计算纤维束的工程弹性常数,并由纤维束的工程弹性常数可以得到其柔度矩阵,进而得到局部坐标系下纤维束的刚度矩阵为

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}^{-1} \quad (7)$$

由于材料内部大部分纱线的材料局部坐标系和总体坐标系不重合,属于偏轴问题,需要通过转轴公式转换到总体坐标系下,即

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{TCT}' \quad (8)$$

式中 \mathbf{T} 为转换矩阵。

然后将各组纱线的刚度矩阵再按体积平均化的方法集成得到单元体总刚度矩阵为

$$\mathbf{C}_g = \sum \lambda_i \mathbf{C}_i \quad (9)$$

对总刚度矩阵求逆得到单元体总柔度矩阵,进而得到相应的面板和芯材的刚度。将所得面板和芯材刚度以及材料结构参数代入式(6),即得材料经向弯曲刚度。利用 MATLAB 语言编写计算程序实现上述分析,并基于 MATLAB 的 GUI 模块进一步开发了整体中空夹层复合材料经向弯曲刚度预测软件,如图 3 所示。

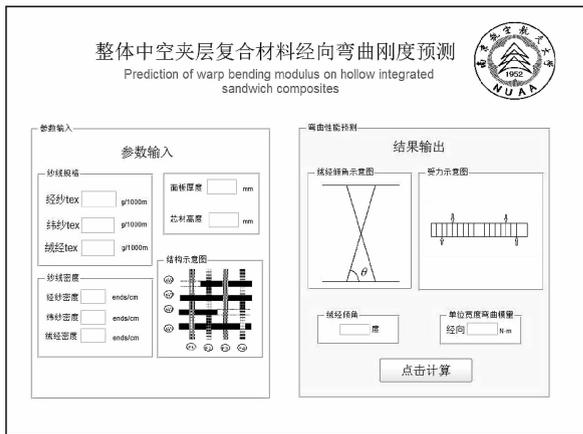


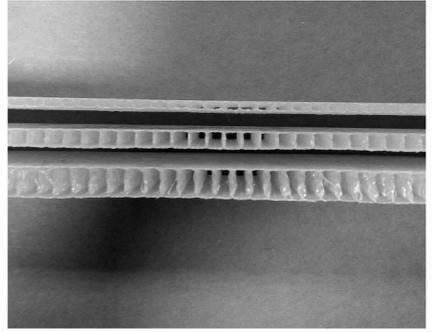
图 3 整体中空夹层复合材料经向弯曲刚度预测软件

Fig. 3 Software for prediction of warp bending modulus on hollow integrated sandwich composites

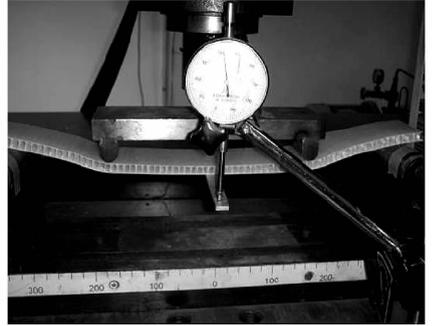
2 实验验证

为验证理论分析的可行性和正确性,采用 3 种不同高度的试件(图 4(a))进行了整体中空夹层复合材料经向的四点弯曲实验(图 4(b))。四点弯曲实验参照标准 ASTM393 用百分表测量中点挠度。

实验测得的单位宽度经向弯曲刚度结果和理论计算结果如表 1 所示。



(a) Sandwich composites with three different height



(b) Four-point bending test

图 4 整体中空夹层复合材料四点弯曲实验

Fig. 4 Four-point bending test of hollow integrated sandwich composites

表 1 理论解和实验值对比

Tab. 1 Experimental results and theoretical predictions

芯材高度/ mm	实验值/ (N · m)	理论解/ (N · m)	误差/ %
3	31.70	33.20	4.73
5	101.60	106.80	5.12
8	170.50	185.80	8.97

从表 1 中能够得到如下结论:

(1)理论解和实验结果最大误差为 8.97%,在合理范围内,验证了理论方法的可行性;

(2)理论解和实验结果存在一定的误差,主要原因可能是织物织造完成后,织物参数与设计参数发生变化;另外采用压辊手糊成型法成型过程中,由于压力的存在,纤维的排列也产生变化。

3 织造参数对经向弯曲刚度的影响

在整体中空夹层复合材料的织造参数中,保持其他参数不变,分别改变纬纱、经纱、绒经密度、芯材高度以及绒经倾角,然后利用所编计算单位宽度经向弯曲刚度软件进行参数计算,如图 5~7 所示。

从图 5 可以看出,在其他参数不变的情况下,分别增加经纱、纬纱和绒经的密度均能提高材料经

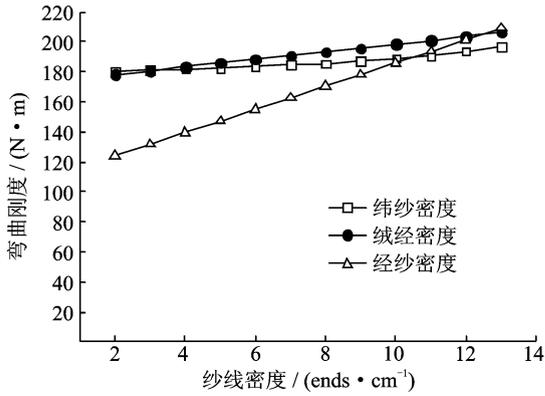


图5 经纱、纬纱和绒经密度对经向弯曲刚度的影响

Fig. 5 Influence of warp, weft and pile density on warp bending modulus

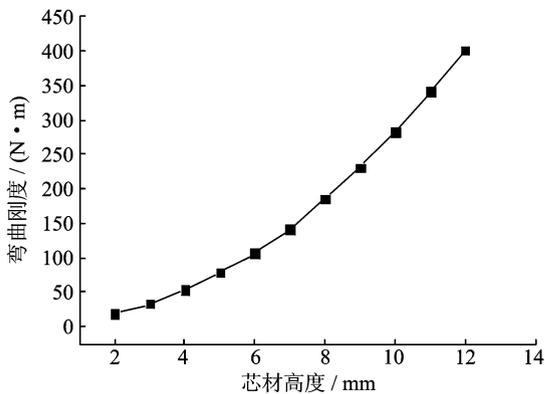


图6 芯材高度对经向弯曲刚度的影响

Fig. 6 Influence of pile height on warp bending modulus

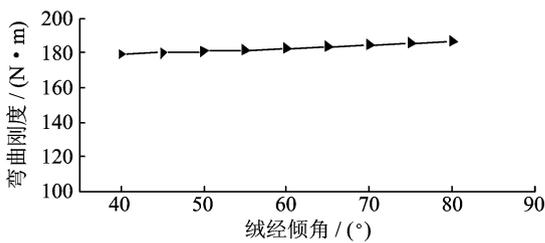


图7 绒经倾角对经向弯曲刚度的影响

Fig. 7 Influence of pile angles on warp bending modulus

向弯曲刚度,且弯曲刚度的增长趋势呈线性。其中经纱密度对弯曲刚度的影响尤为显著,其次是绒经,最后是纬纱。这是因为经向弯曲时,主要承弯矩的是面板中的经纱,纬纱承受弯矩较少。

由图6可以看出,经向弯曲刚度随着芯材高度的增加而增加,且增长速度随着高度的增加也逐渐增大。这主要是因为芯材高度的增加引起了惯性矩的增加。

图7给出了绒经倾角对经向弯曲刚度的影响,从图中能明显看到,在芯材高度等结构参数不变的情况下,绒经的倾角对经向弯曲刚度影响较小。再结合图5,6可以得出:绒经的密度及倾角对经向弯曲刚度影响较小,而其高度对经向弯曲刚度影响较大。因此在整体中空夹层复合材料经向弯曲性能的研究和设计中,相比于芯材的其他结构参数,其高度参数需要重点考虑。

4 结束语

本文针对整体中空夹层复合材料的弯曲变形,采用夹层梁进行模型简化,推导出面板承担弯矩占总弯矩的比例,并进一步推导出材料经向宏观弯曲刚度与面板弯曲刚度以及材料结构参数的理论关系。再结合机织复合材料刚度性能理论计算方法,通过计算得到的面板、芯材弯曲刚度以及材料结构参数预测了材料的经向弯曲刚度,并和实验结果进行对比,验证了理论方法的正确性。本文还在上述研究基础上分析了材料经向弯曲刚度随整体中空夹层织造参数改变的变化趋势,为材料的进一步优化设计提供了一定的理论参考。

参考文献:

- [1] Vaidya U K, Hosur M V, Earl D, et al. Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels[J]. *Composites Part A*, 2000, 31: 761-772.
- [2] Tien W S, Yu H P. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and interply hybrid laminate[J]. *Composite Structures*, 2003, 64(2): 189-198.
- [3] Sadighi M, Hosseini S A. Finite element simulation and experimental study on mechanical behavior of 3D woven glass fiber composite sandwich panels[J]. *Composites Part B*, 2013, 55:158-166.
- [4] Judawisastra H, Ivens H, Verpoest I. The fatigue behaviour and damage development of 3D woven sandwich composites [J]. *Composite Structures*, 1998, 43:35-45.
- [5] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani S. Manufacturing and low-velocity impact characterization of hollow integrated core sandwich composites with hybrid face sheets[J]. *Composite Structures*, 2004, 65(1): 103-115.
- [6] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani S. Manufacturing and low velocity impact characterization of foam filled 3-D integrated core sandwich composites with hybrid

- face sheets[J]. *Composite Structures*, 2005, 69 (2): 167-181.
- [7] 周光明,薄晓莉,匡宁. 整体中空夹层复合材料的弹性性能分析[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(1): 185-189.
Zhou Guangming, Bo Xiaoli, Kuang Ning. Analysis of elastic property for hollow integrated sandwich composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(1): 185-189.
- [8] 李鸿顺,曹海建,钱坤. 整体中空夹层复合材料有限元模型的建立[J]. *材料导报*, 2010, 24(16): 265-267.
Li Hongshun, Cao Haijian, Qian Kun. The finite element model of integrated hollow core sandwich composites[J]. *Materials Review*, 2010, 24(16): 265-267.
- [9] Cao H J, Wei Q F, Qian K, et al. Finite element analysis of the compressive properties of 3-D hollow integrated sandwich composites[J]. *Fibers and Polymers*, 2012, 13(3): 358-362.
- [10] 周光明,王宁. 平面机织复合材料低温力学性能数值分析与实验验证[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 45(6): 838-848.
Zhou Guangming, Wang Ning. Numerical Analysis and test evaluation on cryogenic mechanical properties of two-dimensional woven composite[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 45(6): 838-848.
- [11] 张超,许希武,严雪. 三维五向及全五向编织复合材料的三单胞结构模型[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(2): 170-178.
Zhang Chao, Xu Xiwu, Yan Xue. Three-unit-cell structure model of 3D five-directional and full five-directional braided composites[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(2): 170-178.
- [12] 周储伟. 三维机织复合材料细观黏弹性梁模型[J]. *航空学报*, 2009, 30(2): 283-289.
Zhou Chuwei. Visco-elastic meso beam model of 3D woven composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(2): 283-289.
- [13] 周光明,王新峰,王鑫伟. 三维机织复合材料的力学模型与实验验证[J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, 36(4): 444-448.
Zhou Guangming, Wang Xinfeng, Wang Xinwei. Mechanical model and experimental verifications of 3D woven composites[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 36(4): 444-448.
- [14] 石勇,朱锡,毛亮. 玻璃钢/橡胶夹层复合材料弯曲性能计算与实验[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 29(2): 54-57.
Shi Yong, Zhu Xi, Mao Liang. Calculation and experimental research on bending performance of glass fiber reinforced plastics/rubber sandwich beams[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(2): 54-57.