

纤维柱增强泡沫夹芯的等效力学性能研究

王 兵^{1,2}, 冯吉才², 李庆飞³, 吴林志¹, 马 力¹

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 150080 哈尔滨, wangbing86@hit.edu.cn;

2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 150001 哈尔滨; 3. 上海飞机设计研究院 结构部, 200232 上海)

摘 要: 纤维柱增强泡沫夹芯结构是沿厚度方向在泡沫中植入纤维柱, 以提高泡沫夹芯结构的抗压性能、抗剪切性能和抗弯曲性能. 根据纤维柱增强泡沫夹芯结构的这一特点, 通过建立细观力学模型, 并结合修正的 Mori-Tanaka 方法预报纤维柱增强泡沫芯材的法向弹性模量和横向剪切模量. 实验结果验证了该方法预报结果的准确性. 利用该模型进一步探讨了纤维柱增强泡沫夹芯结构参数对芯子等效性能的影响. 结果表明, 纤维柱内纤维体积的变化对结构的法向弹性模量影响较大, 对横向性能影响不大; 纤维柱直径增大芯子法向比刚度也增大, 但芯子的横向比剪切刚度反而降低.

关键词: 复合材料; 泡沫夹芯; 修正的 Mori-Tanaka 方法; 等效性能

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)03-0029-05

Study on the effective mechanical properties of foam core sandwich structure reinforced by fiber composite columns

WANG Bing^{1,2}, FENG Ji-cai², LI Qing-fei³, WU Lin-zhi¹, MA Li¹

(1. Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, wangbing86@hit.edu.cn;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

3. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, 200232 Shanghai, China)

Abstract: A micro mechanical model was established to analyze the longitudinal Young' modulus and transverse shear modulus of the fiber composite columns reinforced foam core by using Corrected Mori-Tanaka theory. The test results show that the prediction results of the longitudinal Young' modulus and transverse shear modulus of the composite structure was effective. And then the effect of the fiber composite column parameters was evaluated. Results indicate that the volume fraction in the fiber composite columns has great influence on longitudinal Young' modulus, but has little influence on the transverse shear modulus. The specific longitudinal Young's modulus increases with the increase of diameter of fiber composite columns, but the specific transverse shear modulus decreases with the increase diameter of fiber composite columns.

Key words: composites; foam core sandwich; corrected Mori-Tanaka; effective property

复合材料夹芯结构由于其结构合理, 质量轻等特点而被广泛使用^[1-2]. 传统夹芯结构是通过黏接剂将低密度的芯材和面板黏在一起. 这种传

统夹芯结构都有一个不可回避的弱点, 即面芯界面性能薄弱, 且由于一般芯材密度低性能弱, 而影响结构的整体性能^[3-4]. 为了提高夹芯结构的承载能力而不损失其质轻的优势, 近些年国内外许多学者对此进行了研究. 主要有 Z-Pin 增强泡沫夹芯结构^[5-8], 缝绉泡沫夹芯结构^[9-12] 以及三维整体编织夹芯结构^[13-15]. 但这些方法在提高夹芯结构力学性能的同时, 也增加了其制造成本. 本文研究了一种新型纤维柱增强泡沫夹芯结构, 与传统泡沫夹芯结构相比既提高了结构的力学性能,

收稿日期: 2010-06-21.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目 (2011CB610303); 中央高校基本研究业务费专项基金资助项目 (HIT. NSRIF. 2010069); 国家自然科学基金资助项目 (90816024, 10872059).

作者简介: 王 兵 (1981—), 男, 讲师, 博士后;

冯吉才 (1958—), 男, 教授, 博士生导师;

吴林志 (1963—), 男, 教授, 博士生导师.

又能实现复合材料低成本制造技术.

1 纤维柱增强泡沫夹芯结构

纤维柱增强泡沫夹芯结构的结构形式如图 1 所示. 在夹芯结构厚度方向有复合材料纤维柱, 采用一次固化成型, 将纤维柱与上下面板连接在一起. 既提高了面芯界面性能, 又增强了低密度的芯子的力学性能. 复合材料柱起到连接和支撑上下面板的作用. 该柱结构与上下面板的增强材料和基体是连通的, 在同一个工艺过程中成型而构成一个整体, 没有界面. 从根本上改善了夹芯结构面板与芯材之间的性能薄弱问题, 使其具有更高的抗层间剪切、抗剥离和抗平压性能.

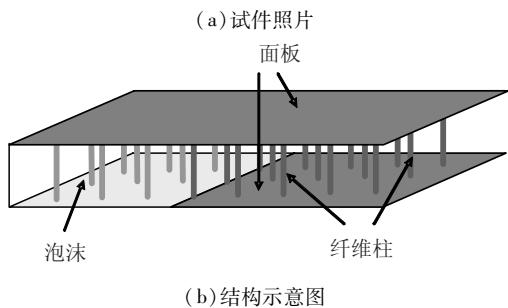
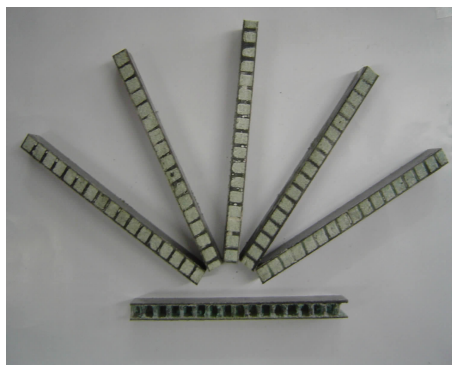


图 1 纤维柱增强泡沫夹芯结构

2 细观力学模型

2.1 理论模型

纤维柱增强泡沫夹芯结构的理论模型如图 2 所示. 芯子可以看作由纤维柱作为增强相, 基体为泡沫的复合材料, 而纤维柱本身也是单向纤维增强的复合材料. 可以利用 2 次细观力学均匀化方法来研究纤维柱增强泡沫夹芯的等效力学性能:

1) 单向纤维增强复合材料柱, 记为 (H_1) . 纤维柱中增强纤维的体积分数为 C_m , 纤维柱的弹性性能为 $\tilde{L}$.

(2) 纤维柱增强泡沫复合芯材结构, 记为 (H_2) . 复合芯材结构中纤维柱的体积含量为 C_{m2} , 复合芯材的弹性性能为 $\tilde{L}$.

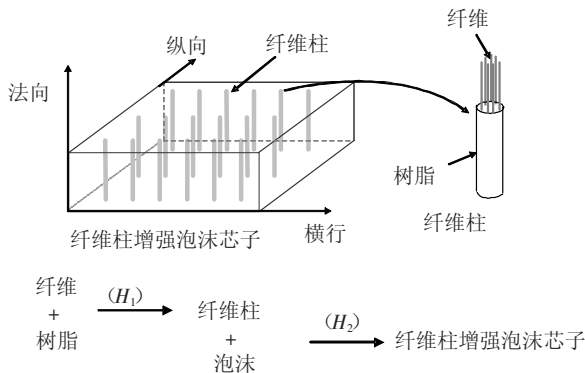


图 2 纤维柱增强泡沫夹芯结构细观力学模型图

2.2 Mori-Tanaka 方法

Mori-Tanaka 方法是一种基于 Eshelby 等效夹杂理论求解复合材料有效弹性性能的细观力学方法. 复合材料在其边界上受到远场均匀应力作用, Mori 和 Tanaka 引入 Eshelby 等效夹杂理论^[16]推导了复合材料等效弹性常数张量为

$$L = L_0(I + C_1 A)^{-1}.$$

其中

$$A = \{L_0 + (L_1 - L_0)[C_1 I + (1 - C_1)S]\}^{-1}(L_0 - L_1).$$

式中: L_1 为增强相的弹性张量; L_0 为基体相的弹性张量; C_1 为增强相的体积分数; S 为 Eshelby 张量; I 为单位四阶张量.

为了便于计算将上述张量写成矩阵形式, 采用 MATLAB 编程计算. 具体计算过程为: 1) 通过 Mori-Tanaka 方法求出纤维柱的刚度矩阵; 2) 采用引入修正系数的 Mori-Tanaka 方法求纤维柱增强泡沫芯子的刚度矩阵, 再由刚度矩阵算出芯子的柔度矩阵, 然后由柔度矩阵求得材料的等效弹性模量.

2.3 修正系数

为了比较理论计算结果与实验结果的差别, 引入修正系数 r 为

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^{\text{est.}}}{L_i^{\text{exp.}}}.$$

式中: $L_i^{\text{est.}}$ 、 $L_i^{\text{exp.}}$ 分别为第 i 组理论计算和实验结果; N 为总的计算和实验组数. 则修正后的理论计算结果为

$$L_i^{\text{corr.}} = \frac{L_i^{\text{est.}}}{r}.$$

3 结果与讨论

3.1 实验结果

纤维柱增强泡沫夹芯结构的纤维柱内的纤维体积分数均为 15% (通过烧失法测得纤维柱内纤维体积分数为 $15 \pm 4\%$), 纤维柱直径均为 2 mm.

纤维柱间距分为4种,分别为12,15,20,25 mm.对4组试件分别进行平压实验和剪切实验,可以测得夹芯结构的法向压缩弹性模量和横向剪切模量,实验结果如表1所示.实验所用原材料的材料参数如表2所示.

表1 纤维柱增强泡沫夹芯结构试验结果

序号	C_{H1}	纤维柱间距/mm	C_{H2}	E_{11}/MPa	G_{12}/MPa
1	0.15	12	0.021 8	196.52	29.94
2	0.15	15	0.014 0	132.30	32.42
3	0.15	20	0.007 9	89.70	38.60
4	0.15	25	0.005 0	56.21	47.65

表2 原材料材料参数

材 料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
无碱玻璃纤维	73.00	0.22	2.54
不饱和聚酯树脂	1.50	0.40	1.29
泡沫 t70.40	0.02	0.48	0.04

3.2 实验与计算结果

图3给出了理论预报与实验所测得的横向弹性模量的比较(图3中 est 为理论预报结果;exp 为实验结果;corr 为修正后的预报结果).理论预报结果高于实验结果,因为试件在制备时可能会存在缺陷,而理论预报时并没有考虑这些缺陷的存在,但通过修正后的结果与实验结果吻合较好.图4给出横向剪切模量的实验结果与理论预报结果的比较,剪切模量的预报结果与实验结果相差最大达到57.2%,而引入修正后误差最大达到22.8%.

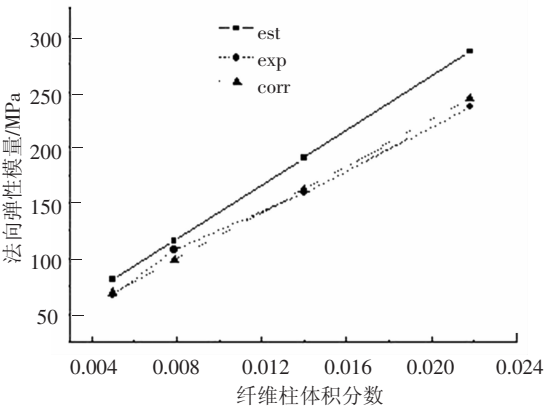


图3 法向弹性模量试验结果与理论预报结果随纤维柱体积分数的变化

图5,6分别给出了纤维柱内纤维体积分数均为15%时,纤维柱增强泡沫芯子的横向杨氏模量和法向泊松比随纤维柱体积分数的变化.随着纤维柱体积分数的增大,芯子的横向杨氏模量和法向泊松比变化均较小.提高纤维柱体积分数,可以有效提高纤维柱增强泡沫芯子的法向性能,而对

芯子横向性能影响不大,芯子横向性能主要由泡沫的性能确定.所以纤维柱体积分数变化时,芯子横向杨氏模量变化较小.纤维柱体积分数增大,芯子法向泊松比反而降低,本文计算的纤维柱体积分数较低,最大也只有2.2%,所以在本文计算的纤维柱体积分数变化范围内,芯子法向泊松比变化也较小.

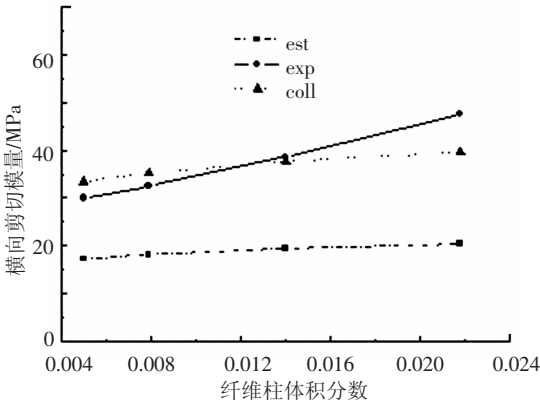


图4 横向剪切模量试验结果与理论预报结果随纤维柱体积分数的变化

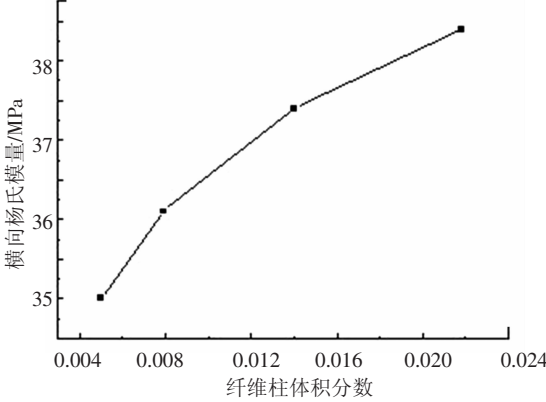


图5 横向杨氏模量随纤维柱体积分数的变化

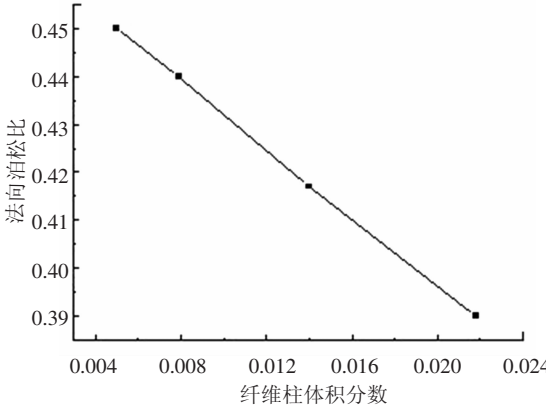


图6 法向泊松比随纤维柱体积分数的变化

为了将这种新型夹芯结构快速应用到实际工程中,减少实验并为这种新材料的使用提供可靠的指导数据,可以利用本文提出的模型和方法,计算纤维柱增强泡沫夹芯结构结构参数的变化,对其宏观力学性能的影响趋势.

3.3 纤维柱内纤维体积分数(C_{H})变化的影响

纤维柱内纤维体积分数(C_{H})从5%变化到30%时,结构法向弹性模量随纤维柱间距的变化如图7所示,可以发现法向弹性模量随纤维柱内纤维体积分数的增大而增大。

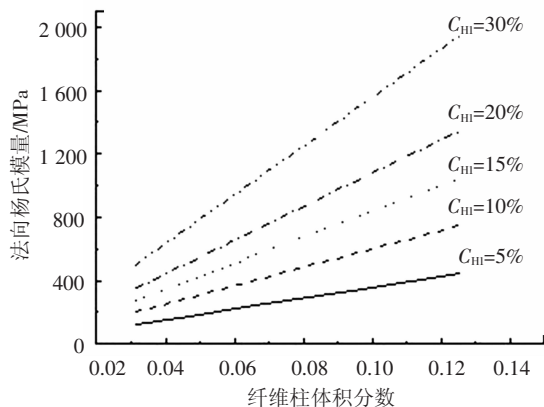


图7 纤维柱内纤维体积分数不同时法向弹性模量随纤维柱体积分数的变化

图8给出不同纤维柱内纤维体积分数时,结构横向剪切模量随纤维柱在泡沫中体积分数的变化。图9给出不同纤维柱内纤维体积分数时,结构横向弹性模量随纤维柱体积分数的变化,可以看出纤维柱内纤维体积分数的变化对结构横向剪切模量和横向弹性模量的影响都不大。

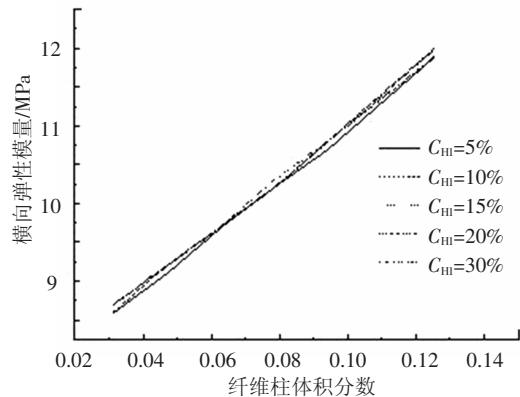


图8 纤维柱内纤维体积分数不同时横向剪切模量随纤维柱体积分数的变化

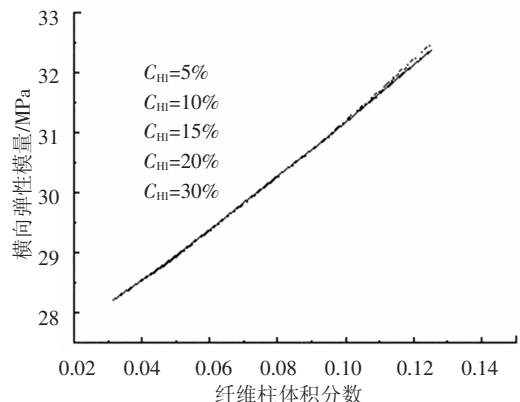


图9 纤维柱内纤维体积分数不同时横向弹性模量随纤维柱体积分数的变化

纤维柱内纤维体积分数增大,事实上就是增强了纤维柱的力学性能,且主要是提高纤维柱纵向(沿纤维方向)性能。而对横向性能(垂直纤维方向)的提高不大,横向性能主要是由基体的性能决定的。所以提高纤维柱内纤维体积分数也只能提高复合芯子的法向(沿纤维柱方向)性能,结构的横向性能主要还是取决于泡沫的性能。减小纤维柱间距,即提高纤维柱的体积分数,也可以提高结构的法向性能和横向性能,但纤维柱体积分数的增大,也会带来结构质量的增大,所以在实际应用中需根据需要进行设计。

3.4 纤维柱直径变化对芯子等效性能的影响

在纤维柱间距不变的情况下,改变纤维柱的直径,结构的力学性能和芯子的密度都会发生变化。图10,11分别给出纤维柱间距相同而直径变化对芯子法向比刚度和横向比剪切刚度的影响(芯子法向比刚度定义为芯子法向弹性模量与芯子密度的比为 E_{11}/ρ_c ,横向比剪切刚度为 G_{12}/ρ_c)。从图10中可以看出,随纤维柱直径增大,芯子法向比刚度增大。纤维柱直径从1 mm变化到3 mm时芯子法向比刚度增大较快,而直径从3 mm变化到5 mm时变化缓慢。从图11可以看出,随纤维柱直径的增大,芯子横向比剪切刚度反而降低。在纤维柱间距相同的情况下,增大纤维柱的直径,可以提高芯子横向剪切模量,但同时芯子的密度也增大了,且芯子密度增大的幅度比横向剪切模量增大的幅度大,如图12所示,所以导致增大纤维柱直径反而芯子横向比剪切刚度降低。(图12中 ρ 为芯子的密度, ρ^1 为纤维柱直径为1 mm时芯子的密度; G_{12} 为芯子横向剪切模量, G_{12}^1 为纤维柱直径为1 mm时芯子的横向剪切模量)。增大纤维的直径,可以提高结构的横向比刚度,也可以提高结构的法向剪切刚度,但必须以牺牲其质量作为代价。

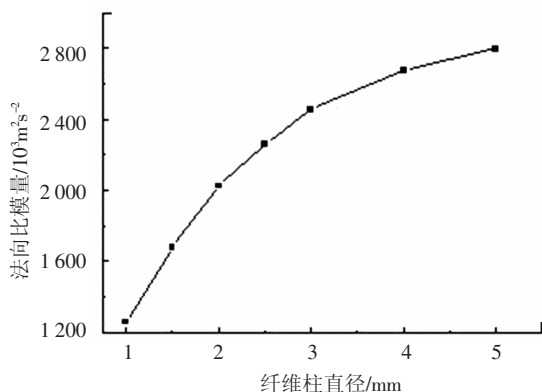


图10 芯子法向比模量随纤维柱直径的变化

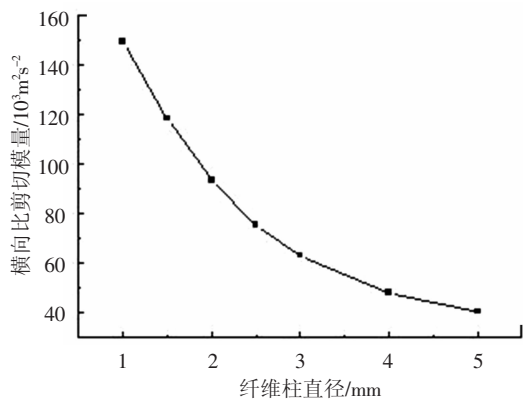


图11 芯子横向比剪切模量随纤维柱直径的变化

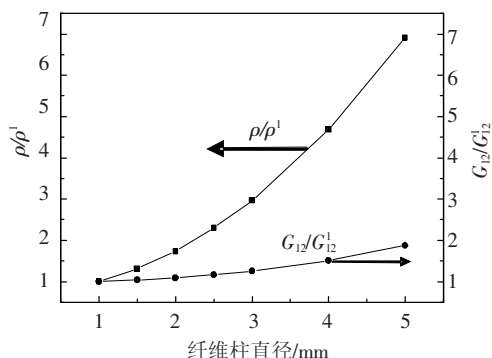


图12 纤维柱直径变化对芯子密度和横向剪切模量的影响

4 结 论

1) 采用本文建立的细观力学模型,结合修正的 Mori-Tanaka 方法可以准确预测纤维柱增强泡沫芯子的法向弹性模量和横向剪切模量。

2) 纤维柱内纤维体积分数的变化对芯子法向弹性模量影响较大,而对横向弹性性能影响很小。随纤维柱内纤维体积分数增大,芯子法向弹性模量也增大。

3) 纤维柱直径增大芯子法向比刚度也增大,但芯子的横向比剪切刚度反而降低。因为虽然纤维柱直径增大可以提高芯子的横向剪切模量,但芯子的密度也随之增大,且增大幅度高于横向剪切模量的增大幅度。

4) 提高纤维柱内的纤维体积分数是提高纤维柱增强泡沫芯子的法向弹性模量的有效途径,而要提高芯子的横向剪切模量,则需要提高泡沫材料性能。增加纤维柱在泡沫内的体积分数可以有效提高芯子的法向弹性模量和横向剪切模量,但同时也会增加其质量。

参考文献:

[1] 颜鸿斌,孙红卫,凌英,等. 树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构成型技术研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2004,34(1):12-15.

[2] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular Solids: Structure

and Properties [M]. London: Cambridge University Press, 1997.

[3] GUILLEMINOT J, COMAS-CARDONA S, KONDO D, *et al.* Multiscale modeling of the composite reinforced foam core of a 3D sandwich structure[J]. Composite Science and Technology, 2008, 68(7/8): 1777-1786.

[4] 黄涛, 矫桂琼, 徐婷婷. Z向增强泡沫夹层结构复合材料[J]. 纤维复合材料, 2005, 22(3): 19-23.

[5] PALAZOTTO A N, GUMMADI L N B, VAIDYA U K, *et al.* Low velocity impact damage characteristics of Z-fiber reinforced sandwich panels——an experimental study[J]. Composite Structures, 1998, 43(4): 275-288.

[6] MARASCO A I, Cartie D D R, PARTRIDGE I K, *et al.* Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: Out-of-plane properties [J]. Composites Part A, 2006, 37(2): 295-302.

[7] DU Long, JIAO Gui-qiong. Indentation study of Z-pin reinforced polymer foam core sandwich structures [J]. Composites Part A, 2009, 40(6/7): 822-829.

[8] 郝继军, 张佐光, 张蕾, 等. Z-pin 植入参数对 X-Cor 夹层复合材料力学性能的影响[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 763-768.

[9] LASCOP B, ABOURA Z, KHELLIL K, *et al.* On the mechanical effect of stitch addition in sandwich panel [J]. Composites Sciences and Technology, 2006, 66(10): 1385-1398.

[10] POTLURI P, KUSAK E, REDDY T. Novel stitch-bonded sandwich composite structures [J]. Composite Structures, 2003, 59(2): 251-259.

[11] 郑锡涛, 孙秦, 李野, 等. 全厚度缝合复合材料泡沫芯夹层结构力学性能研究与损伤容限评定[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 29-37.

[12] 黄涛, 矫桂琼, 李野. 缝制泡沫夹层结构芯子剪切模量研究. 机械强度, 2007, 29(1): 113-117.

[13] 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(8): 761-772.

[14] 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.

[15] 祝成炎, 陈俊俊, 朱俊萍, 等. 三维整体夹芯织物增强复合材料的研制[J]. 纺织学报, 2007, 28(1): 56-59.

[16] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[17] WANG Bing, WU Lin-zhi, JIN Xin, *et al.* Experimental investigation of 3-D sandwich structure with core reinforced by composite columns[J]. Material & Design, 2010, 31(1): 158-165.

(编辑 张 红)