复 合 材 料 学 报　　第24 卷　第5 期　10 月　2007 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 24　No. 5　October　2007

文章编号: 1000-3851(2007)05-0050-05

Z 向增强泡沫夹芯阻燃复合材料力学性能

邓爱民[1], 张佐光[1], 李　敏*[1], 王大勇[2], 陈　跃[2]
(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 北京中铁长龙新型复合材料有限公司, 北京 102628)

摘　要: 研制了一种 Z 向玻璃纤维增强酚醛泡沫的高阻燃性复合材料, 并试验分析了承力柱高度、分布密度、排布方式及缝编纱细度、缝合面板层数等结构参数对复合材料力学性能的影响。结果表明: 与普通泡沫夹芯复合材料相比, Z 向增强泡沫夹芯复合材料的力学性能得到了大幅度提升; 在承力柱分布密度相同的条件下, Z 向增强泡沫夹芯复合材料的力学性能基本不随承力柱排布方式而变化; 承力柱高度、分布密度及缝编纱细度、缝合面板层数等结构参数对 Z 向增强泡沫夹芯复合材料的力学性能有重要影响。

关键词: 复合材料; 泡沫夹芯; Z 向增强; 缝编; 力学性能
中图分类号: TB332　　**文献标识码:** A

Mechanical properties of Z-direction reinforced foam core sandwich fire-resistant composite

DENG Aimin[1], ZHANG Zuoguang[1], LI Min*[1], WANG Dayong[2], CHEN Yue[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. China Railway Long Dragon New Composite Materials Co., Ltd., Beijing 102628, China)

Abstract: A highly fire-resistant phenolic foam core sandwich reinforced with fiberglass through the thickness Z-direction was prepared, and the effects of distribution density, height, arrangement manner of load-bearing pillars, fineness of stitches and number of stitched layers on its mechanical properties were investigated. The results indicate that the mechanical properties of the Z-direction reinforced foam core sandwich are much better than those of the unstitched foam core sandwich. The arrangement manner of load-bearing pillars has little effect on its mechanical properties under the condition of uniform distribution density of load-bearing pillars. The height, distribution density of load-bearing pillars, fineness of stitches and number of stitched layers have great effects on the mechanical properties of the Z-direction reinforced foam core sandwich.

Keywords: composite; foam core sandwich; Z-direction reinforcement; stitch; mechanical properties

目前, 常用的轻质复合材料多为蜂窝夹芯结构和泡沫夹芯结构, 这些夹芯结构复合材料具有良好的轻质高强特性, 得到了大量的应用。然而, 在一些带有振荡性的应用场合, 比如轨道交通, 经常会开胶、脱黏, 甚至会引起芯子塌陷、面板凹陷和皱褶失稳, 耐久性也难以评定。因此, 为了满足应用的结构超轻化和多功能化要求, 发展出了一些八面体、四面体、四棱椎、Kagome 和全三角形等结构的点阵夹芯材料, 实现了集材料设计、结构设计和功能设计为一体的协同优化设计。本文中研究的 Z 向增强泡沫夹芯复合材料结构即为点阵材料的一种。美国国家宇航局蓝利研究中心(NASA Langley Research Center)[1,2]、犹他大学(University of Utah)[3,4]开展了相关研究, 采用 Kevlar 线缝编制备夹芯结构。此外, Jae Hoon Kim 等人研究了缝编夹芯结构的强度和耐持久性[5]。然而, 国内外研究在材料体系上多限于 Kevlar 线、聚氨酯泡沫、环氧或乙烯基树脂, 不具有整体阻燃性, 制约了其广泛应用[6-11]。针对具体应用的阻燃要求, 本文中采用酚醛泡沫作芯子, 酚醛树脂作基体, 得到了阻燃性优良的 Z 向增强泡沫夹芯　合材料。为了拓展该材料的应用范围, 本文中重点研究了该材料的力

收稿日期: 2006-12-15; 收修改稿日期: 2007-01-30
基金项目: 北京航空航天大学青年创新基金(3209353)
通讯作者: 李　敏, 博士, 研究方向为先进树脂基复合材料　E-mail: leemy@buaa.edu.cn

学性能，分析了结构参数对其力学性能的影响规律，研究结果对 Z 向增强泡沫夹芯复合材料的应用开发及其结构优化具有重要的指导意义。该材料已在地铁“A 型”车上得到应用，还可推广至火车、航空航天、船舶、汽车和建筑等领域，潜在的经济和社会效益巨大。

1 实 验

1.1 实验材料与设备

原材料：酚醛树脂、酚醛泡沫（自主开发）；EJW800 玻璃纤维经纬布（航天材料及工艺研究所）；ME300 玻璃纤维连续毡、S-SM50 玻璃纤维表面毡（常州玻纤制品厂）。成型工艺辅助材料：DPT1000 真空袋、JF75 高渗透介质、AT200Y1/2 密封胶（AIRTECH）。

Z 向增强泡沫夹芯复合材料力学性能的测试采用 CMT550 万能试验机（深圳新三思计量技术有限公司）。

1.2 Z 向增强泡沫夹芯复合材料的制备

Z 向增强酚醛泡沫夹芯复合材料的制备主要经过缝编、成型和固化三个步骤。首先，选取韧性较好的酚醛泡沫作为芯子，在其上下铺放 1.0 ～ 4.0 mm 厚的玻璃纤维经纬布作为缝合面板内层。然后将芯子和经纬布用大纱束玻璃纤维沿垂直厚度方向缝合成为一个整体。再在夹芯上下铺放 0.5 ～ 3.0 mm 厚玻璃纤维经纬布、连续毡和表面毡作为缝合面板外层，形成预成型体。

为获得良好的浸润质量和高生产效率，试验采用真空辅助工艺进行复合成型。充模结束后一直保持 0.1 MPa 左右的真空度，在适当的温度条件下固化成型。由此制备出来的试样其面板极限氧指数和烟密度分别达到 60.0 和 6，泡沫芯子极限氧指数达到 46.7。可见这种 Z 向增强泡沫夹芯具有独特的整体阻燃性，完全满足轨道交通等民用市场对材料的阻燃要求。

1.3 性能测试

Z 向增强泡沫夹芯复合材料的力学性能按照平压强度和模量 GB/T 1453-2005，侧压强度和模量 GB/T 1454-2005、弯曲强度 GB/T 1449-83 进行测试。

2 结果与讨论

2.1 Z 向增强对泡沫夹芯复合材料力学性能的影响

为了对比 Z 向增强对泡沫夹芯复合材料力学性能的影响，试验采用相同的材料体系，分别制备了 Z 向增强泡沫夹芯复合材料和普通泡沫夹芯复合材料。Z 向增强泡沫夹芯复合材料中承力柱分布密度为 2500 m^{-2}，面板厚度约 2.6 mm，密度约为 0.53 g/cm^3；普通泡沫夹芯复合材料采用手糊工艺，真空袋成型，制品面板厚度约 2.7 mm，密度约为 0.40 g/cm^3。

两种泡沫夹芯复合材料的平压试验应力-应变曲线如图 1 所示。由图 1 可知，普通泡沫夹芯复合材料在 0.4 MPa 即达到最大破坏载荷，呈压塌破坏，然后在最大破坏载荷下持续被压缩，直到压实；Z 向增强泡沫夹芯复合材料由于有承力柱支撑，载荷需增加到 6.0 MPa 以上，承力柱才发生根部断裂，呈压塌破坏。可见 Z 向增强使夹芯复合材料平压强度提高 15 倍以上。

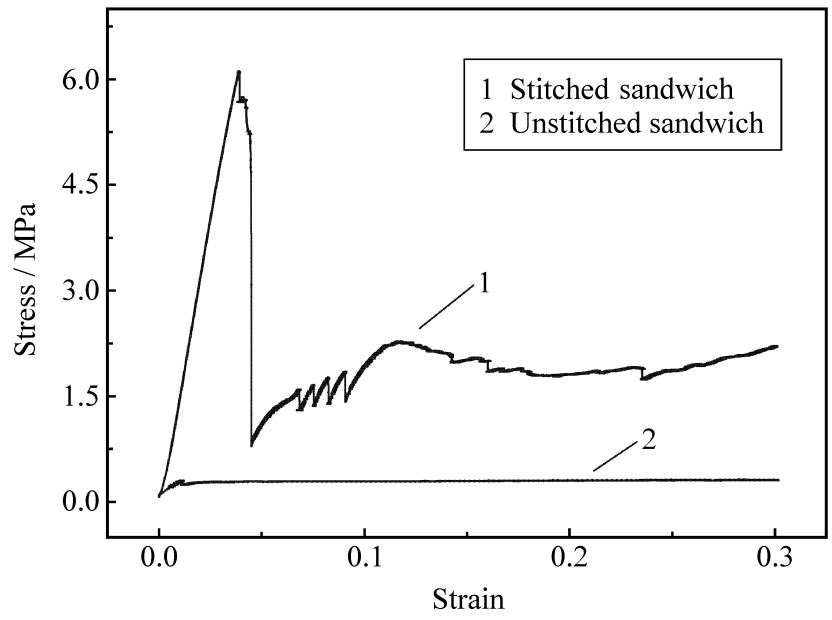

图 1 两种泡沫夹芯复合材料的平压应力-应变曲线

Fig.1 The flatwise compressive stress-strain curves of two kinds of foamcore sandwich composites

两种泡沫夹芯复合材料的侧压试验应力-应变曲线如图 2 所示。由图 2 可知，对于普通泡沫夹芯复合材料，载荷增加到 10 MPa 左右就突然下降，面板断裂，插进泡沫；而 Z 向增强泡沫夹芯复合材料载荷需增加到 20 MPa 以上才出现面板的断裂破坏。对于 Z 向增强泡沫夹芯复合材料，侧压破坏点均集中在承力柱与面板连接处，可能是缝编导致面板增强纤维破坏，强度有所损失。

两种泡沫夹芯复合材料的三点弯曲试验载荷-位移曲线如图 3 所示。由图 3 可知，对于普通泡沫夹芯复合材料，泡沫芯子的剪切裂纹迅速沿界面扩展，当载荷增加到 600 N（此时对应弯曲强度为 14.81 MPa）时，就出现大面积分层；而对于 Z 向增

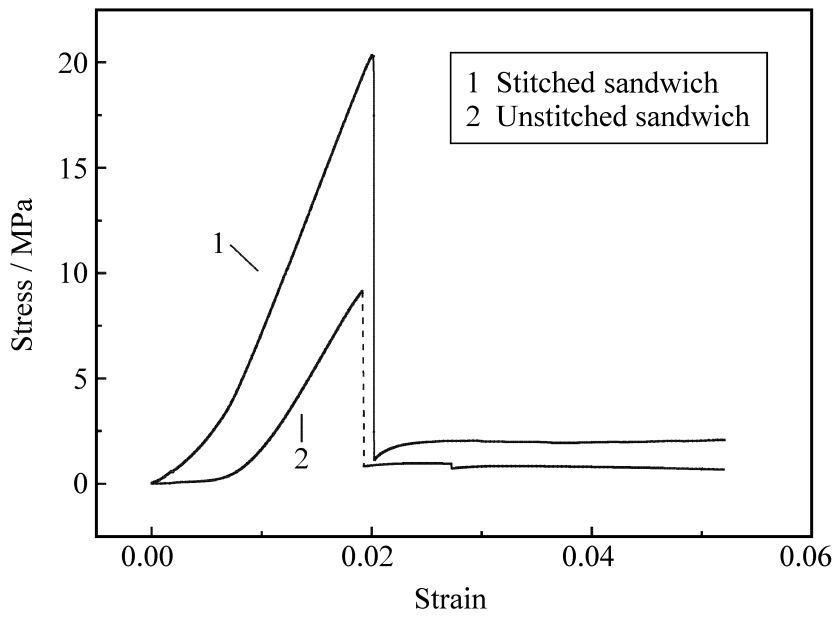

图2　两种泡沫夹芯复合材料的侧压应力- 应变曲线

Fig.2　The edgewise compressive stress-strain curves of two kinds of foam core sandwich composites

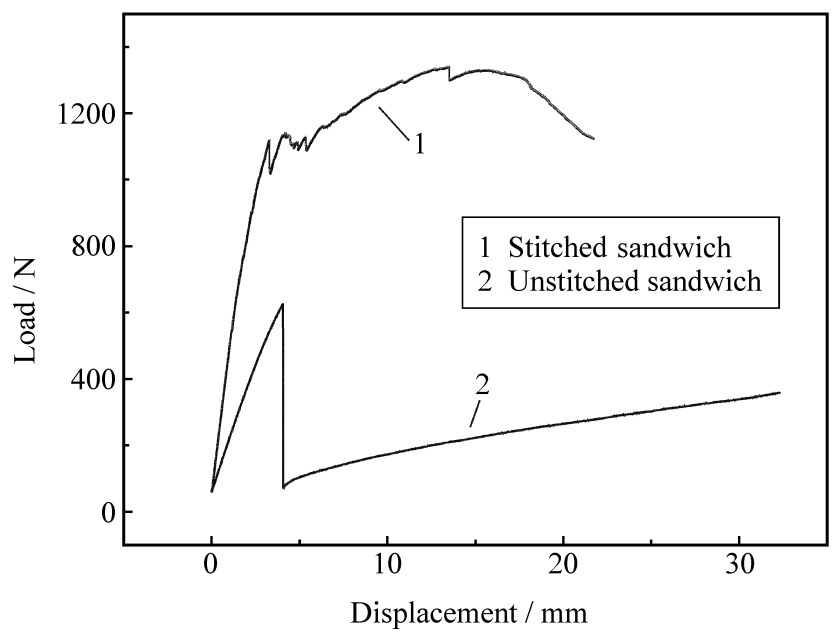

图3　两种泡沫夹芯复合材料的三点弯曲载荷- 位移曲线

Fig.3　The flexural load-displacement curves of two kinds of foam core sandwich composites

强泡沫夹芯复合材料，剪切裂纹的扩展受到承力柱的限制，载荷增大到1200 N 时才出现界面分层，最终导致缝合面板内层与面板外层分开(对应弯曲强度为30 .52 MPa) ，3 个破坏过程相继对应着载荷的3 次下降。可见Z 向增强泡沫夹芯复合材料与普通泡沫夹芯复合材料相比，弯曲强度提高1 倍以上。

2.2　承力柱排布方式对力学性能的影响

为考察承力柱排布方式对Z 向增强泡沫夹芯复合材料力学性能的影响，采用相同承力柱分布密度(2500 m^{-2}) ，制备了承力柱呈正方形、正三角形与正六边形排布的Z 向增强泡沫夹芯复合材料(见图4) 。试验测试了3 种复合材料的平压、侧压和三点弯曲性能，结果如图5 所示。

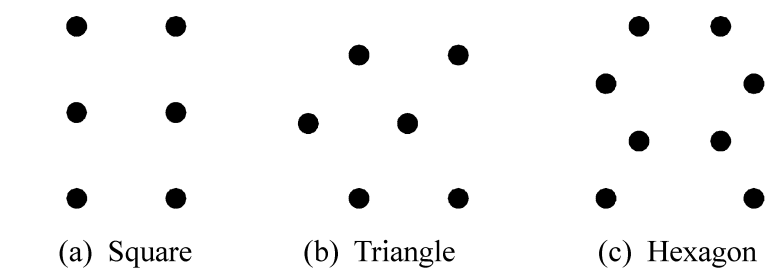

图4　3 种承力柱排布方式

Fig.4　Three kinds of arrangement manners of load-bearing pillars

由图5 可知，在相同的承力柱分布密度条件下，排布方式对Z 向增强泡沫夹芯复合材料的力学性能影响很小。因此本文作者后续研究均采用正方形排布方式，以便于泡沫夹芯的缝编。

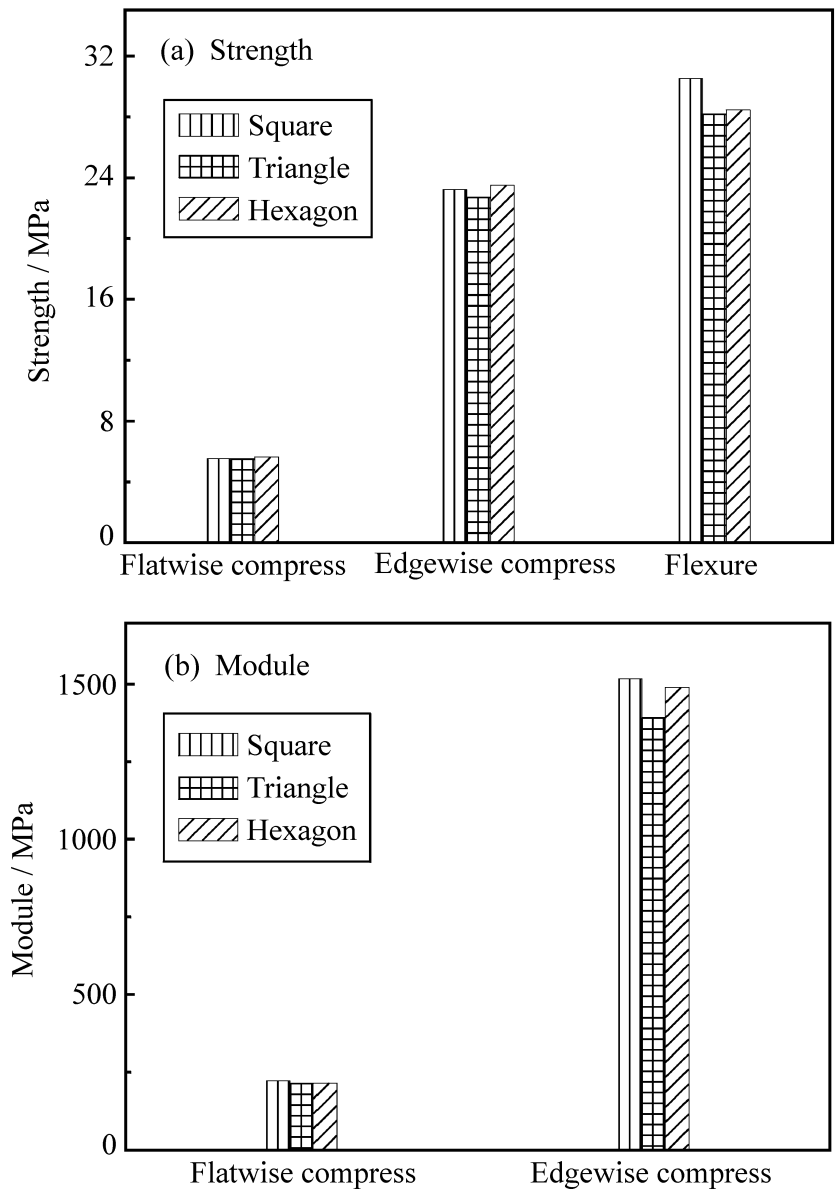

图5　不同排布方式Z 向增强泡沫夹芯的强度和模量

Fig.5　The strength and module of Z-direction reinforced foam core sandwiches with different arrangement manners

2.3　结构参数对力学性能的影响

Z 向增强泡沫夹芯复合材料结构复杂，其性能受到多种参数的影响。试验选取承力柱分布密度、承力柱高度、缝编纱细度和缝合面板层数分别记为A、B、C 和D 因子(见表1) ，考察了这些参数对力学性能的影响。试验过程中保持面板总层数为4 层不变。

表1 实验选取的结构参数与水平

Table 1 The selected structure parameters and levels in the experiment

Parameters	Levels			
	I	II	III	IV
A/ m^{-2}	3333	2500	2000	1667
B/ mm	10	15	20	25
C/ tex	1600	2000	2400	2800
D	1	2	3	4

由图6 可知，对于 Z 向增强泡沫夹芯复合材料平压性能，承力柱分布密度和缝编纱细度影响显著，承力柱高度与缝合面板层数则影响很小。平压性能随承力柱分布密度和缝编纱细度的增加而增大。

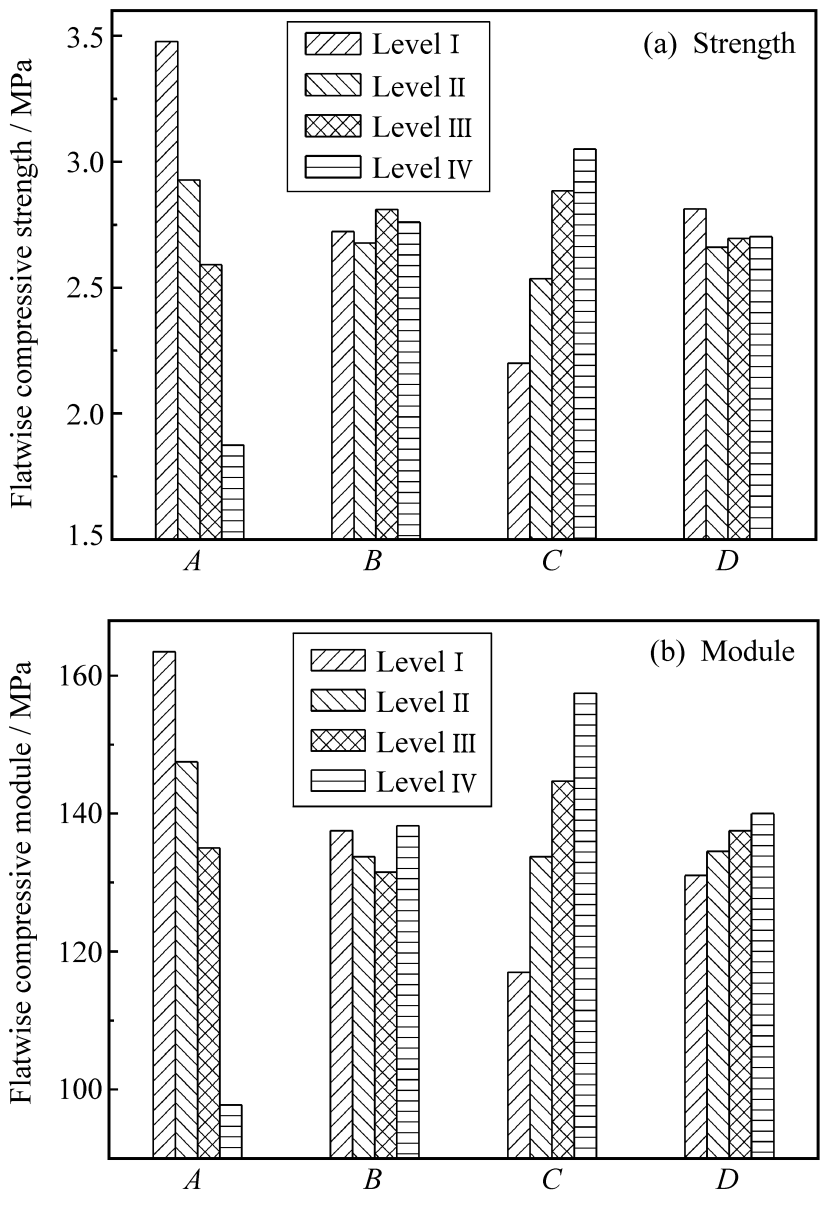

图6 结构参数对平压强度和模量的影响

Fig.6 The effects of structural parameters on flatwise compressive strength and module

由图7 可知，对于 Z 向增强泡沫夹芯复合材料的侧压性能，承力柱高度影响显著，其次是缝合面板层数，而承力柱分布密度与缝编纱细度影响较小。Z 向增强泡沫夹芯复合材料的侧压性能随承力柱高度的减小、承力柱分布密度与缝编纱细度的增加而增大。可见增强承力柱对面板的支撑作用，对于提高复合材料的侧压强度非常重要。试验发现，缝合面板层数为4 的 Z 向增强泡沫夹芯复合材料的侧压性能低于缝合面板层数为3 的情况。这是因为所有面板均与泡沫缝合为一体时，Z 向缝编纱贯穿整个面板，使得复合材料面板承受载荷的整体性受到破坏。

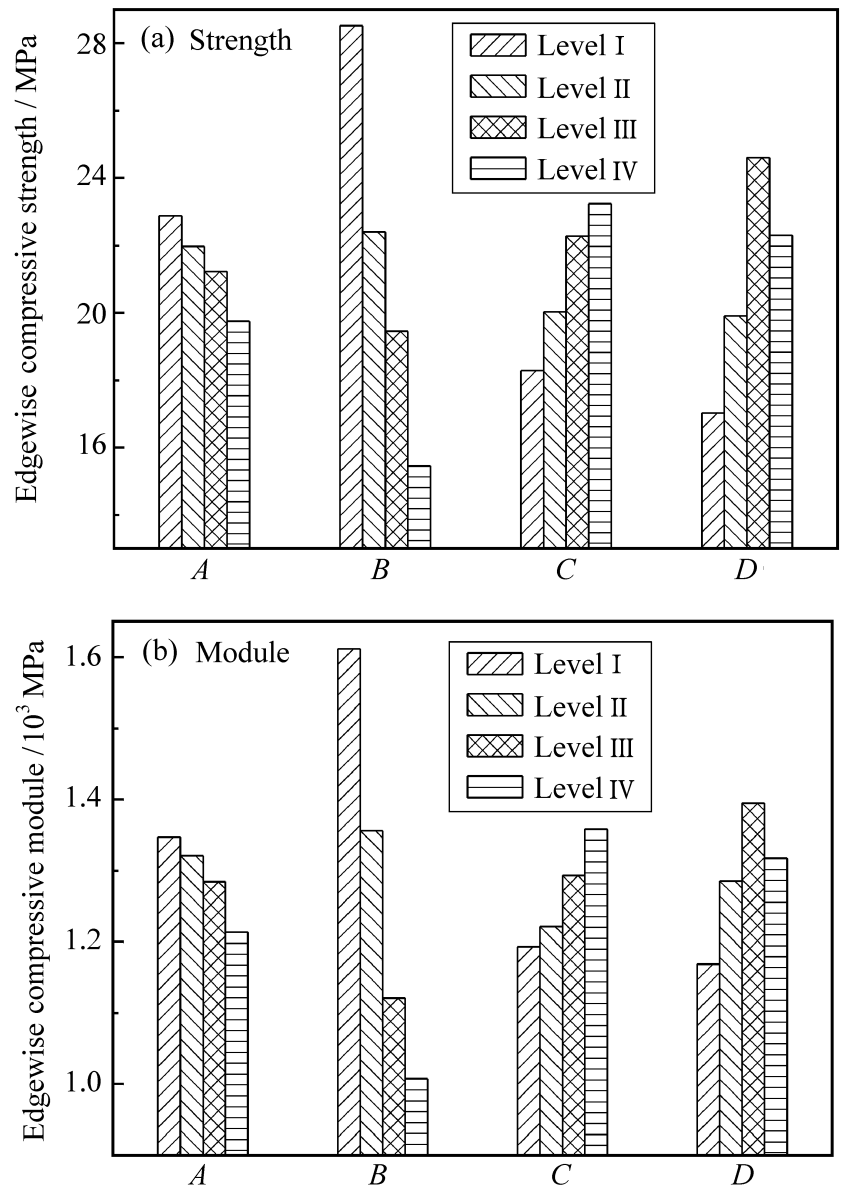

图7 结构参数对侧压强度和模量的影响

Fig.7 The effects of structural parameters on edgewise compressive strength and module

由图8 可知，对于 Z 向增强泡沫夹芯复合材料的弯曲强度，承力柱分布密度和缝编纱细度影响显著，缝合面板层数的影响次之。其弯曲强度随承力柱分布密度、缝编纱细度和缝合面板层数的增加而增大，这是因为这些参数的增大加强了面板之间的连接。

3 结 论

(1) 与相应的普通泡沫夹芯复合材料相比，Z 向增强泡沫夹芯复合材料的力学性能得到了大幅度提升。在承力柱分布密度相同且均匀分布条件下，

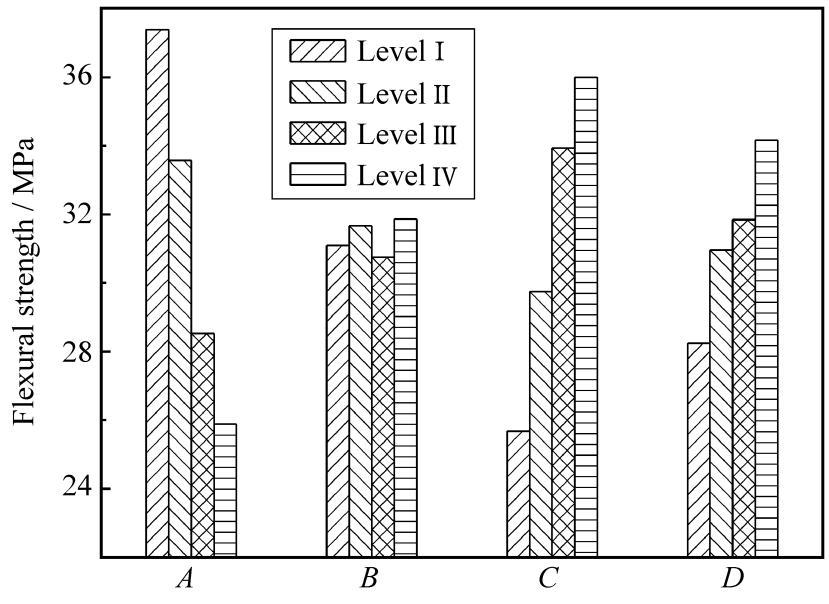

图8　结构参数对弯曲强度的影响

Fig .8　The effects of structural parameters on flexural strength

Z 向增强泡沫夹芯复合材料的力学性能基本不随承力柱排布方式而变化。

(2) Z 向增强泡沫夹芯复合材料的平压性能和弯曲性能主要受承力柱分布密度和缝编纱细度的影响，两种力学性能均随承力柱分布密度和缝编纱细度的增加而增大；侧压性能主要受承力柱高度和缝合面板层数的影响，随承力柱高度的减小而增大，并且 Z 向缝合纤维贯穿整个面板时，不利于 Z 向增强泡沫夹芯复合材料侧压性能的提高。

参考文献:

[1] Glaessgen E H, Sleight D W, Raju I S, Krishnamurthy T. Analyses for debonding of stitched composite sandwich structure using improved constitutive models, AIAA-2001-1279 [R]. Seattle: AIAA, 2001: 1-10.

[2] O Brien T Kevin, Paris Isabelle L. Exploratory investigation of failure mechanisms in transition regions between solid laminates and X-cor truss sandwich [J]. Composite Structures, 2002, 57(1): 189-204.

[3] Saponara Valeria La, Kamaya Shinjiro. Evaluation of static compression properties of notched stitched sandwich structures, AIAA-2004-1704 [R]. California: AIAA, 2004: 1-9

[4] Singh Parampal, Saponara Valeria La. Experimental investigation on performance of angle-stitched sandwich structures, AIAA-2004-1705 [R]. California: AIAA, 2004: 1-14.

[5] Kim Jae Hoon, Lee Young Shin, Park Byoung Jun, Kim Duck Hoi. Evaluation of durability and strength of stitched foam-cored sandwich structures [J]. Composite Structures, 1999, 47: 543-550.

[6] 郑锡涛，孙　秦，李　野，柴亚南，曹正华. 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): 29-36.
Zheng Xitao, Sun Qin, Li Ye, Chai Yanan, Cao Zhenghua. Mechanical behavior and damage tolerance tests of composites through-thickness stitched foam sandwich panels [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 29-36.

[7] 黄　涛，矫桂琼，潘文革. 缝纫泡沫夹层结构弯曲性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(4): 535-538.
Huang Tao, Jiao Guiqiong, Pan Wenge. Study on flexural behavior of stitched foam-core sandwich [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2006, 24(4): 535-538.

[8] 黄　涛，矫桂琼，徐婷婷. Z 向增强泡沫夹芯结构复合材料[J]. 纤维复合材料, 2005, 22(3): 19-23.
Huang Tao, Jiao Guiqiong, Xu Tingting. Research development and application of Z-reinforcement foam core sandwich [J]. Fiber Composites, 2005, 22(3): 19-23.

[9] 田　旭，肖　军，李　勇. X-cor 夹层结构试制与性能研究[J]. 飞机设计, 2004(1): 22-25.
Tian Xu, Xiao Jun, Li Yong. Study on X-cor sandwich structure manufacture and its mechanical performance [J]. Design of Airplane, 2004(1): 22-25.

[10] eis E M, Hassanv T K, Rizkalla S H. Behavior of FRP sandwich panels for transportation infrastructure [C] // 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures. Calgary, 2004: 1-7.

[11] otluri P, Kusak E, Reddy T Y. Novel stitch-bonded sandwich composite structures [J]. Composite Structures, 2003, 59(2): 251-259.