复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第27卷 第1期 2月 2010年
Vol. 27 No. 1 February 2010

文章编号：1000-3851(2010)01-0133-06

碳纤维增强金字塔点阵夹芯结构的抗压缩性能

王 兵，吴林志*，杜善义，孙雨果，马 力
（哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所，哈尔滨 150080）

摘 要： 提出了一种碳纤维增强复合材料点阵夹芯结构的一体化成型工艺方法。该方法克服了传统夹芯结构面板与芯子之间因需要二次粘接或焊接的方法所带来弱界面的缺点。将纤维杆两端埋入面板内，使面板与芯子成为一体而不存在明显的界面。对用该方法制备的碳纤维增强金字塔点阵夹芯板进行平压试验，研究发现随着载荷的增加，纤维杆发生弹性屈曲并在中间部位出现断裂。理论分析了点阵夹芯结构平压载荷下的弹性模量和纤维杆极限屈曲载荷。通过与传统夹芯材料相比较发现，这种新型复合材料点阵夹芯结构具有密度低、比强度和比刚度高等优点。

关键词： 复合材料；点阵夹芯；金字塔；压缩性能
中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Compressive behavior of sandwich structures with carbon fiber reinforced pyramidal lattice truss cores

WANG Bing, WU Linzhi*, DU Shanyi, SUN Yuguo, MA Li
(Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A new fabrication technology of carbon fiber reinforced pyramidal lattice truss core sandwich structures was presented. It dealt with the disadvantage of such traditional technology as the facesheets and core needing bonded or joined additionally. Both ends of truss members were embedded into the facesheets without evident interface between the core and facesheets. The pyramidal lattice truss core sandwich structures were tested under compressive load. Observation of the buckling and splitting of truss members was done during the tests. And the compressive stiffness and the limit buckling load of the lattice truss core sandwich structures were calculated theoretically. Compared with the traditional sandwich structures, the pyramidal lattice truss core sandwich structures have the advantages of lower density, higher specific stiffness and higher specific strength.

Keywords: composite materials; truss core; pyramidal; compressive properties

复合材料夹芯结构由于其结构合理、质量轻等特点而得到广泛应用。近年来在航空、航天、船舶、汽车等领域中的使用量逐年增加。目前普遍使用的复合材料夹芯结构主要是通过粘接剂把芯材和面板粘接在一起。传统夹芯结构使用的芯材主要有泡沫、蜂窝、波纹板等[1-2]。在2000年左右，一种新型的超轻点阵夹芯结构被提出，并越来越受到材料和力学界科技工作者的青睐。这种新型的点阵夹芯结构不仅具有轻质、高强等优点，同时还具备散热快等多功能特性[3-7]。

点阵材料是由结点和连接结点杆件单元所组成的周期性结构材料。杆件单元为形状规则的直杆，且满足拉伸主导型构造，胞元按周期性排列。点阵材料的主要构型有：四面体型、金字塔型、Kagome型等[8-10]。制造工艺主要为熔模铸造法、层间焊接、金属编织技术及光刻工艺等方法，可制作出厘米乃至微米量级的金属点阵材料[11-16]。目前对点阵材料的研究主要集中在金属点阵材料方面，而对复合材料点阵夹芯结构的研究还少见报道。范华林等人采用纤维穿插编织工艺制备了碳纤维复合材料点阵夹芯结构[17-18]，Wadley等人将层合板切割并粘接成金字塔点阵芯子，再与面板胶接成点阵夹芯

收稿日期： 2009-03-02；**收修改稿日期：** 2009-08-13
基金项目： 国家“973”基金(2006CB601206)；国家自然科学基金(90816024，10872059，10972069)
通讯作者： 吴林志，教授，博士生导师，长江学者，研究方向：复合材料力学，多功能复合材料夹芯结构 E-mail：wlz@hit.edu.cn

结构[19]。本文中提出了一种一体化制备复合材料金字塔型点阵夹芯结构的工艺方法，并对该方法制备的点阵夹芯结构抗压性能进行了实验研究和理论分析。复合材料金字塔点阵夹芯结构示意图如图 1 所示。

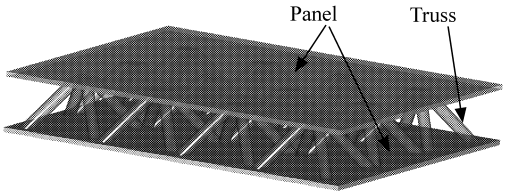


图 1　复合材料金字塔点阵夹芯结构示意图

Fig. 1　Schematic of composite pyramidal lattice truss sandwich structure

1　复合材料金字塔点阵夹芯结构模具及工艺方法

1.1　模　具

制备金字塔点阵夹芯结构所使用的模具如图 2 所示。为了方便脱模，该模具是由多块长条多边形模具组合而成。每个模具单胞由 2 块 3# 模具、1 块 1# 模具和 1 块 4# 模具组成。成型时根据需要加工试件的尺寸，组合模具单胞的数量，并在两边的最外侧加 2 个 2# 直角梯形模具。1# 模具和 3# 模具侧面开有半圆形槽，成型时点阵柱就在这些半圆槽中成型。脱模时分离模具的顺序为：4# →3# →1# 。

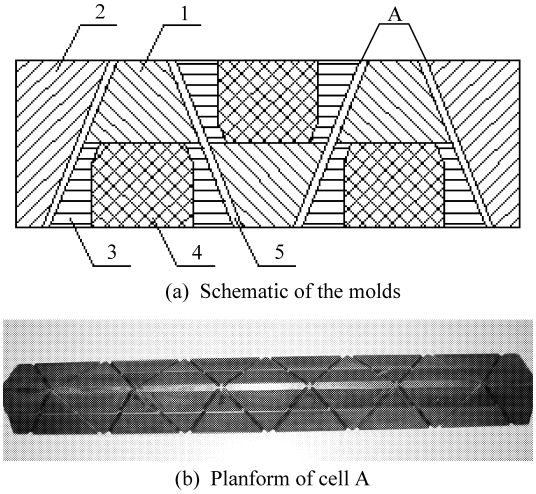


图 2　成型夹芯结构的模具

Fig. 2　Schematic and photograph of the molds

1.2　点阵结构制备工艺

首先将模具表面清理干净并涂上脱模剂，再将其组合成图 2(b)所示的模具单胞结构。为了成型点阵杆，将碳纤维预浸料剪裁成 65 mm×30 mm 的矩形块。平行于纤维方向挫捻成直径为 2 mm 的纤维杆。然后将纤维杆对称地排放在组合好的模具单胞半圆形槽内。根据所要成型的夹芯板的宽度，按图 2(a)所示的顺序将模具组装好并用辅助模具定位。纤维杆正好在图 2(a)所示的圆槽 5# 模具内。模具组合好后，在模具上下表面铺设面板预浸料，并将纤维杆两端埋到上下面板内，如图 3 所示。面板铺放一半厚度，纤维杆端部的纤维也正好全被埋入到每一层内。再按次序铺放其余的层数，面板铺层方式为$[0/45/-45/0]_S$。上下面板铺放完成后，放置于热压机上进行热压固化。固化条件为：压力，0.6 MPa；温度，170℃；时间，3 h。固化结束后，降至室温，脱模取出碳纤维增强复合材料金字塔点阵夹芯结构，图 4 为试件照片。

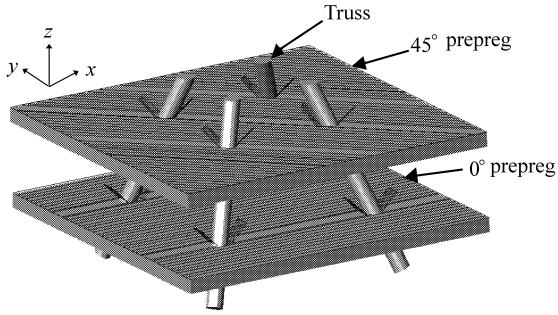


图 3　纤维杆埋入面板方法示意图

Fig. 3　Method for embedding truss members into facesheets

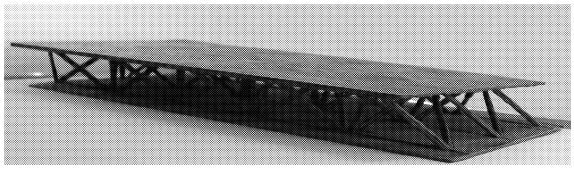


图 4　碳纤维增强金字塔点阵夹芯板

Fig. 4　Sandwich panel with carbon fiber reinforced pyramidal lattice truss cores

2　平压性能

2.1　平压实验

平压实验参照 ASTM C365 标准，采用位移控制方式，进行准静态加载直至破坏，加载速率为 0.5 mm/min。试件尺寸为 110 mm×110 mm×22.5 mm。应力-应变曲线如图 5(a)所示。载荷线性增加到最大载荷，纤维杆发生破坏，如图 5(b)所示。纤维杆发生屈曲并在中间发生断裂。由于成型时 1# 和 3# 模具之间可能会产生相对错动，这样正

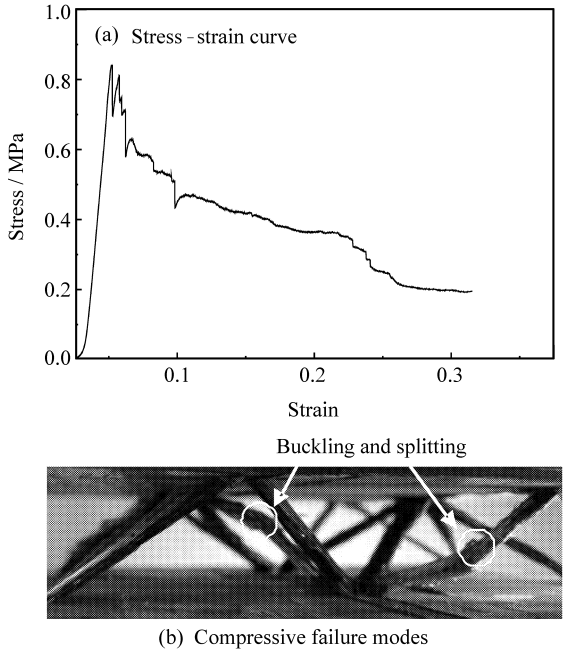


图 5　平压试验应力-应变曲线与破坏模式

Fig. 5　Out-of-plane compressive stress-strain curve and failure modes

好在纤维杆中部产生由于模具相对错动而出现的缺陷。实验所测得的点阵夹芯结构的平压弹性模量为 25.1 MPa，平压强度为 0.84 MPa。

2.2　平压性能对比

表 1 给出几种常见多孔材料压缩性能参数的对比。本文中研究的碳纤维增强金字塔型点阵夹芯结构密度最低，比刚度约为铝合金点阵材料和铝泡沫的 10 倍，略高于铝蜂窝。比强度高于铝蜂窝和铝泡沫，而略低于铝合金点阵材料。通过比较可以发现，碳纤维增强金字塔点阵夹芯结构具有密度低和比强度、比刚度高等优点，可以用作超轻结构材料。

表 1　多孔材料压缩性能对比[20]

Table 1　Compressive properties of cellular materials[20]

Properties	Aluminum honeycomb	Aluminum lattice	Aluminum-foam	CFRP lattice
Density/(g·cm^{-3})	0.033	0.17	0.243	0.018
Relative density/%	1.2	6.2	9.0	1.2
Modulus/MPa	38.7	80.4	23.8	25.1
Strength/MPa	0.91	11	2.2	0.84
Specific stiffness/(10^3 m^2·s^{-2})	1172.7	114.9	97.9	1394.4
Specific strength/(10^3 m^2·s^{-2})	27.6	64.7	9.1	46.7

3　理论分析

3.1　芯子相对密度

本文中所研究的金字塔点阵夹芯结构胞元如图 6 所示。设胞元中每个杆单元的长度为 l，直径为 d，杆单元与面板的夹角为 ω，则点阵芯子的相对密度 $\overline{\rho}$（点阵芯子密度与组成点阵单元的实体材料密度的比值）为

$$\overline{\rho} = \frac{\pi d^2}{\sin\omega(\sqrt{2}l\cos\omega + t)^2} \tag{1}$$

其中：单元长度 l=36.4 mm；直径 d=2 mm；倾斜角 ω=35.26°；间距 t=3 mm。理论计算的金字塔点阵芯子相对密度约为 1.18%，实测的芯子相对密度为 1.2%±0.1%。

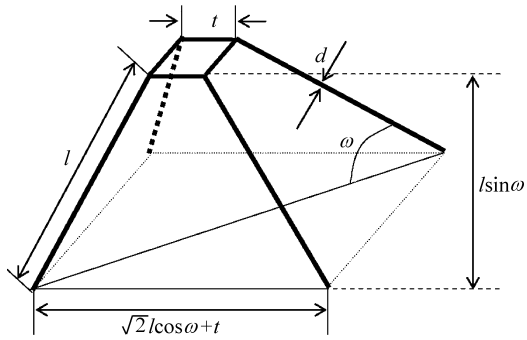


图 6　金字塔点阵单胞示意图

Fig. 6　Schematic of a pyramidal unit cell

3.2　平压弹性模量

金字塔点阵单胞的 4 个杆是对称结构，取出其中 1 根杆对其进行受力分析，如图 7 所示。纤维杆被埋入上下面板内，纤维杆的两端与上下面板可视为固支连接，即只允许产生 x_3 方向的位移。假设在 x_3 方向的力 F 作用在单根纤维杆上，结构在 x_3 方向的位移大小为 δ，则纤维杆内的轴向力 F_a 和剪切力 F_s 分别为

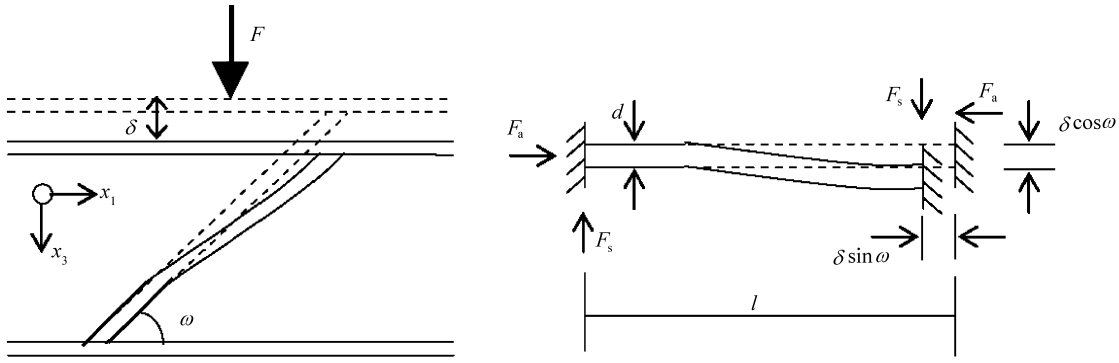
$$F_a = \frac{1}{4}\pi d^2 E_a \frac{\delta\sin\omega}{l} \tag{2a}$$

$$F_s = \frac{3E_a I\delta\cos\omega}{l^3} \tag{2b}$$

其中：$I=\frac{\pi d^4}{64}$为纤维杆的截面系数；E_a 为纤维杆的轴向压缩弹性模量。x_3 方向的合力 F 可写成

$$\begin{aligned} F &= F_a\sin\omega + F_s\cos\omega \\ &= \frac{E_a\pi d^2\delta}{4l}\left[\sin^2\omega + \frac{3}{16}\left(\frac{d}{l}\right)^2\cos^2\omega\right] \end{aligned} \tag{3}$$

一个完整的金字塔单胞由 4 根对称的纤维杆组成，



(a) Sketch of the deformation of a single strut of the pyramidal core under out-of-plane compression

(b) Free-body diagram of a strut loaded in a combination of compression and shear

图 7　金字塔芯子受力示意图

Fig. 7　Sketch of the deformation of pyramidal core

图 6 所示的整个金字塔单胞 4 根杆在 x_3 方向的等效应力 σ 和等效应变 ε 可以表示成

$$\sigma \equiv \frac{4F}{(\sqrt{2}l\cos\omega + t)^2} = \frac{E_a \pi d^2 \delta}{l(\sqrt{2}l\cos\omega + t)^2}\left[\sin^2\omega \frac{3}{16}\left(\frac{d}{l}\right)^2 \cos^2\omega\right] \tag{4a}$$

$$\varepsilon \equiv \frac{\delta}{l\sin\omega} \tag{4b}$$

将式(3)和式(4)代入弹性模量的定义 $E \equiv \sigma/\varepsilon$，可得到

$$\frac{E}{E_a} = \frac{\pi d^2 \sin\omega}{(\sqrt{2}l\cos\omega + t)^2}\left[\sin^2\omega + \frac{3}{16}\left(\frac{d}{l}\right)^2 \cos^2\omega\right] \tag{5}$$

将式(1)代入式(5)，对其进一步简化为

$$E = E_a \overline{\rho} \sin^4\omega + \frac{3}{16} E_a \overline{\rho}\left(\frac{d}{l}\right)^2 \sin^2\omega\cos^2\omega \tag{6}$$

式(6)的右边第 1 项是由于纤维杆轴向压缩引起的，第 2 项是纤维杆弯曲所至。由于点阵结构满足平面拉伸主导几何构型，杆件单元受力以轴向力为主，每根杆件单元只产生轴向变形，而不产生弯曲变形。式(6)中右边第 2 项相对第 1 项也是个小量（$(d/l)^2$很小），对于本文中研究的金字塔芯子的几何尺寸，该项仅为第 1 项的 0.113%，因此可以忽略不计。此时点阵夹芯结构在 x_3 方向的弹性模量可表示为

$$E = E_a \overline{\rho} \sin^4\omega \tag{7}$$

由式(7)可以看出在不牺牲质量优势的前提下要提高点阵夹芯结构的平压弹性模量，可以通过提高点阵杆材料的弹性模量，或增大倾斜角度来实现。但倾斜角过分增大，结构的抗剪切性能将会下降。所以一般金字塔点阵夹芯结构倾斜角 ω 都设计为 45°[13, 19]。

3.3　纤维杆弹性屈曲

在压缩载荷作用下，纤维杆发生弹性屈曲时，根据欧拉屈曲载荷公式，纤维杆发生弹性屈曲时的轴向载荷为

$$P_b = \frac{k\pi^2 E_a I}{l^2} \tag{8}$$

纤维杆两端固支，$k=4$。当纤维杆发生弹性屈曲时，点阵夹芯结构极限压缩强度

$$\sigma_{cr} = \frac{4P_b}{\sin\omega(\sqrt{2}l\cos\omega + t)^2} \tag{9}$$

将式(1)和式(8)代入式(9)得

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 d^2 E_a}{4l^2}\overline{\rho} \tag{10}$$

从式(7)和式(10)可以看出点阵实体材料的弹性模量 E_a 对点阵夹芯结构的压缩模量和极限压缩强度影响较大。在芯子几何外形确定的情况下，可以通过提高点阵实体材料的弹性模量来提高整个夹芯结构的压缩模量和极限压缩强度。

4　结果与讨论

表 2 给出了碳纤维金字塔点阵夹芯结构平压载荷作用下的理论分析与实验结果对比。理论分析的平压弹性模量比实验测得的高出 29%，而平压强度相差较大。这主要是由于成型时受工艺条件的限制，导致纤维杆内出现缺陷。如由于 1# 和 3# 模具之间容易出现相对错动，使纤维杆在中间部位出现皱曲；在成型时纤维杆在径向不能施加足够的压力，导致纤维杆内出现空隙，从而影响纤维杆的性能。而理论分析并没有考虑复合材料内存在这些缺陷，所以导致理论分析和实验结果出现偏差。在计算纤维杆极限屈曲载荷时，假设纤维杆两端的边界

表 2　碳纤维金字塔点阵夹芯结构平压模量和强度的理论结果与实验结果对比

Table 2　Analytical results and experimental data for the compressive stiffness and strength of the pyramidal lattice truss core sandwich structure　MPa

Mechanical property	Analytical expression	Analytical results	Experimental data
Compressive stiffness	$E_c = E_a \sin^4\omega \overline{\rho}$	32.4	25.1
Compressive strength	$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 d^2 E_a}{4l^2} \overline{\rho}$	2.29	0.84

条件都是固支，而实际的边界条件是介于固支和简支之间的一种约束条件[21]。所以按照两端固支边界条件计算的极限屈曲载荷与实验值相比也偏高。

传统点阵夹芯结构面板与芯子之间通过胶粘或焊接的方式连接，在动态或准静态载荷作用下主要破坏将会发生在面芯之间[16]，而本文中采用一体化成型工艺所制备的复合材料点阵夹芯结构在平压载荷作用下并没有观察到面芯之间的破坏。这种面板与芯子一体化成型方法，不需要二次粘接，成型工艺简单，并且克服了传统夹芯结构面芯薄弱的缺点。

5　结　论

（1）介绍了一种一体化成型复合材料金字塔点阵夹芯结构的工艺方法。该方法克服了传统点阵夹芯面板与芯子之间因需要通过二次粘接或焊接所带来的弱界面的缺点。

（2）在平压载荷作用下，通过观察发现纤维杆发生屈曲，并在中间部位断裂。

（3）成型时，由于模具的滑动，纤维杆径向压力不够，导致纤维杆内存在缺陷，所以理论强度和模量比实验测得的大。

（4）目前只是对这种全复合材料金字塔点阵夹芯结构使用热压工艺制造技术进行了初步的研究。由于工艺条件的限制，使点阵柱和面板内存在一些缺陷。后续工作可以重点考虑改善工艺条件，使结构内的缺陷含量降到最低，提高结构的整体性能。另外，这种全复合材料点阵夹芯结构还是首次提出，对这种结构的研究还刚刚开始。其结构的优化设计、结构破坏和损伤机制以及应用前景有待于进一步的深入研究。

参考文献：

[1] 马世勇，刘洪军. 玻璃钢夹芯材料的应用［J］. 玻璃钢/复合材料，2001(2)：53-55
Ma Shiyong，Liu Hongjun. FRP sandwich structure materials application［J］. Fiber Reinforced Plastics/Composite，2001(2)：53-55.

[2] Gibson L J，Ashby M F. Cellular solids：Structure and properties［M］. 刘培生，译. 北京：清华大学出版社，2003：5-8.

[3] Evans A G，Hutchinson J W，Ashby M F. Multifunctionality of cellular metal systems［J］. Progress in Materials Scinece，1999，43(3)：171-221.

[4] Wicks N，Hutchinson J W. Optimal truss plates［J］. International Journal of Solid and Structures，2001，38(30/31)：5165-5183.

[5] Lu T J，Valdevit L，Evans A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores［J］. Progress in Materials Science，2005，50(7)：789-815.

[6] Zok F W，Waltner S A，Wei Z，Rathbum H J，McMeeking R M，Evans A G. A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels：Application to pyramidal truss cores［J］. International Journal of Solid and Structures，2004，41(22/23)：6249-6271.

[7] Deshpande V S，Fleck N A. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending［J］. International Journal of Solid and Structures，2001，38(36/37)：6275-6305.

[8] Deshpande V S，Ashby M F，Fleck N A. Form topology bending versus stretching dominated architectures［J］. Acta Materialia，2001，49(10)：1035-1040.

[9] Evans A G，Hutchinson J W，Fleck N A，et al. The topological design of multifunctional cellular metals［J］. Progress in Materials Science，2001，50(3/4)：309-327.

[10] Deshpande V S，Fleck N A，Ashby M F. Effective properties of the octet-truss lattice material［J］. Journal of the Mechanics and Physics of Solids，2001，49(8)：1747-1769.

[11] Wadley H N G，Fleck N A，Evans A G. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures［J］. Composites Science and Technology，2003，63(16)：2331-2343.

[12] Chiras S，Mumm D R，Evans A G，et al. The structural performance of near-optimized truss core panels［J］. International Journal of Solids and Structures，2002，39(15)：4093-4115.

[13] Queheillalt D T，Wadley H N G. Pyramidal lattice truss structures with hollow trusses［J］. Materials Science and Engineering A，2005，397(112)：132-137.

[14] Biagi R，Bart-Smith H. Imperfection sensitivity of pyramidal core sandwich structures［J］. International Journal of Solids and Structures，2007，44(14/15)：4690-4706.

[15] Lim Ji-Hyun, Kang Ki-Ju. Mechanical behavior of sandwich panels with tetrahedral and Kagome truss cores fabricated from wires [J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 43(17): 5228-5246.

[16] Queheillalt D T, Murty Y, Wadley H N G. Mechanical properties of an extruded pyramidal lattice truss sandwich structure [J]. Scripta Materialia, 2008, 58(1): 76-79.

[17] 范华林，杨　卫，方岱宁，庄　茁，陈祥宝，邢丽英，李斌太，蒋诗才. 新型碳纤维点阵复合材料技术研究[J]. 航空材料学报，2007，27(1)：46-50.
Fan Hualin, Yang Wei, Fang Daining, Zhuang Zhuo, Chen Xiangbao, Xing Liying, Li Bintai, Jiang Shicai. Interlacing technique for new carbon fiber lattice materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(1): 46-50.

[18] Fan Hualin, Yang Wei, Wang Bin, Yan Yong, Fu Qiang, Fang Daining, Zhuang Zhuo. Design and manufacturing of a composite lattice structure reinforced by continuous carbon fibers [J]. Tsinghua Science and Technology, 2006, 11(5): 515-522.

[19] Finnegan K, Koositra G, Wadley H N G, Dshpande V S. The compressive response of carbon fiber composite pyramidal truss sandwich cores [J]. International Journal of Material Research, 2007, 98(12): 1264-1272.

[20] Fan H L, Meng F H, Yang W. Sandwich panels with Kagome lattice cores reinforced by carbon fibers [J]. Composite Structures, 2007, 81(4): 533-539.

[21] Zok F W, Rathbun H J, Wei Z, Evans A G. Design of metallic textile core sandwich panels [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(21): 5707-5722.