复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第29卷 第5期 10月 2012年
Vol. 29 No. 5 October 2012

文章编号：1000-3851(2012)05-0018-06

三维连体织物格栅夹芯材料力学特性实验研究

李春霞，孙志杰*，王绍凯，顾轶卓，李 敏，张佐光
（北京航空航天大学 材料科学与工程学院 空天材料与服役教育部重点实验室，北京 100191）

摘 要： 以三维连体织物格栅夹芯材料为研究对象，研究其在平压、剪切载荷作用下的力学特性与破坏模式，并考察格栅分布密度、厚度和泡沫填充等对力学性能的影响，揭示纤维芯柱间的协同作用。结果表明：三维连体织物格栅复合材料及其夹芯材料平压及剪切性能随芯柱纬向间距的增大而减小；三维连体织物格栅夹芯材料芯柱之间的协同作用随着芯柱纬向间距的增大而逐渐增大；大厚度三维连体织物格栅复合材料平压破坏模式主要为芯柱失稳，最终芯柱断裂破坏，剪切破坏模式为芯柱受剪根部断裂。

关键词： 格栅结构；三维织物；夹芯材料；复合材料；力学性能
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Experimental study on the mechanical characteristics of 3D spacer grille fabric composites

LI Chunxia, SUN Zhijie*, WANG Shaokai, GU Yizhuo, LI Min, ZHANG Zuoguang
(Key Laboratory of Aerospace Materials and Performance (Ministry of Education),
School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: 3D spacer grille fabric composites were developed in this paper. Its mechanical characteristics under flatwise compressive and shear loads were analyzed, and the effects of pile distance, pile height and foam on the mechanical properties were investigated. The results indicate that the flatwise compressive and shear properties of 3D spacer grille fabric composites decrease with the pile distance increasing. After filling the foam, synergy effects between the piles increase with the increace of pile distance. The failure modes of heavy-thickness spacer fabric composites are pile instability under flatwise compression, and fractured at the joint of pile and facesheet under shear load.

Keywords: grille structure; 3D spacer fabric; sandwich composites; composites; mechanical properties

随着无机纤维织造水平的提高，纺织复合材料得到了长足的发展。为满足复合材料轻量化的需求，新型的纺织夹芯材料层出不穷，如间隔连体织物复合材料[1-4]、蜂窝状纺织复合材料[5-8]、箱框型增强织物复合材料[9]。这些新型结构开辟了轻质材料的方向。Vuure等[3]对间隔连体织物及其复合材料进行了系统研究，建立力学模型预测间隔连体织物复合材料的剪切性能。国内李敏等[10]开展了三维间隔连体织物复合材料的工艺与力学性能方面的研究，并评价了结构特征对性能的影响规律等。Tan[6-7]等采用有限元模拟研究了不同结构参数对三维蜂窝状纺织复合材料的吸能和防护能力的影响。祝成炎[8]等设计制造了内部具有类似蜂窝孔型夹心层的三维整体夹芯机织结构复合材料，并研究了其能量吸收能力和破坏机制。Abounaim[9]等采用不同编织方式制得U字型箱框式增强织物复合材料，并研究不同编织方式的二维复合材料的力学性能，对三维增强织物的编织进行指导，但并未对该三维复合材料的力学性能进行实验研究。

本文作者发展了一种新型的三维连体织物格栅复合材料，重点研究该新型三维连体织物格栅夹芯材料的力学特性，考察格栅分布密度和厚度等参数对典型平压和剪切性能的影响规律，同时对比分析不同载荷作用下芯柱之间的协同作用。

收到初稿日期： 2011-09-13；**收到修改稿日期：** 2011-12-28；**网络出版时间：** 2012-05-08 16:31:44
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20120508.1631.016.html
通讯作者： 孙志杰，博士，教授，研究方向为先进树脂基复合材料 E-mail：sunzhj@buaa.edu.cn

1 实验材料及方法

1.1 原材料

玻璃纤维三维连体织物，格栅结构面层与芯柱相连呈一体，经纬纱密度可调。增强体所用纱线的线密度均为 132 Tex，面层格栅纬纱的密度为 3.5 picks·cm^{-1}，面层格栅经纱与芯柱纱线的密度一致，均为 2.4～6.0 picks·cm^{-1}可调，面层格栅尺寸为 9.4 mm×2.5 mm～9.4 mm×12.5 mm，如图 1所示，常州伯龙三维复合材料有限公司，芯柱高度为 10 mm 及 35 mm；环氧 E-51 树脂，无锡树脂厂；593 固化剂，上海树脂厂。

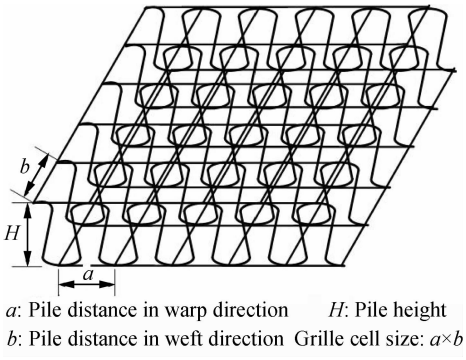


图 1 三维连体格栅织物参数

Fig. 1 Parameters of 3D spacer grille fabric

1.2 三维连体织物格栅夹芯材料制备

三维连体织物格栅复合材料采用手糊工艺[11]制备而成，其关键是树脂含量控制、面层平整度和芯柱角度控制。同时可根据需要在框架内填充聚氨酯泡沫[10]，最终制备得到三维连体织物格栅夹芯材料，如图 2 所示。

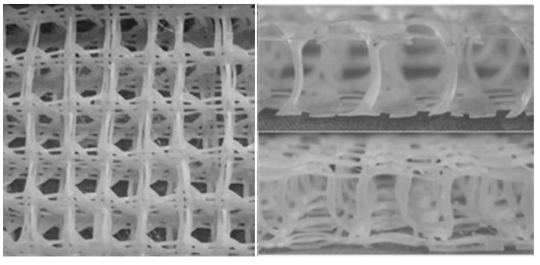


图 2 芯柱纬向间距为 7.5 mm 的三维连体织物格栅复合材料

Fig. 2 3D spacer grille fabric composites (7.5 mm pile distance in weft direction)

1.3 力学性能测试

平压性能采用 GB/T 1453－2005 进行测试。剪切性能采用 GB/T 1455－2005 进行测试。

2 结果与讨论

2.1 芯柱间距对性能的影响规律

2.1.1 平压性能

图 3 为不同芯柱纬向间距、芯柱高度为 10 mm 的三维连体织物格栅材料的平压性能。可知，随芯柱纬向间距的增大，三维连体织物格栅复合材料平压强度、模量及单根芯柱承力均呈逐渐减小趋势，三维连体织物格栅复合材料芯柱间距从 2.5 mm 增加到 12.5 mm 时，平压强度从 2.82 MPa 下降到 0.271 MPa，平压模量从 76.249 MPa 下降至 15.518 MPa，单根芯柱承力从 34.01 N/pile 下降至 13.275 N/pile。填充泡沫后，夹芯材料的平压性能有较大的提高，其平压强度及模量同样随芯柱间距的增大而减小。在平压载荷作用下，三维连体织物格栅复合材料初期破坏为树脂基体发白，而后发生芯柱与面层的粘结处芯柱的断裂破坏，如图 4 所示。

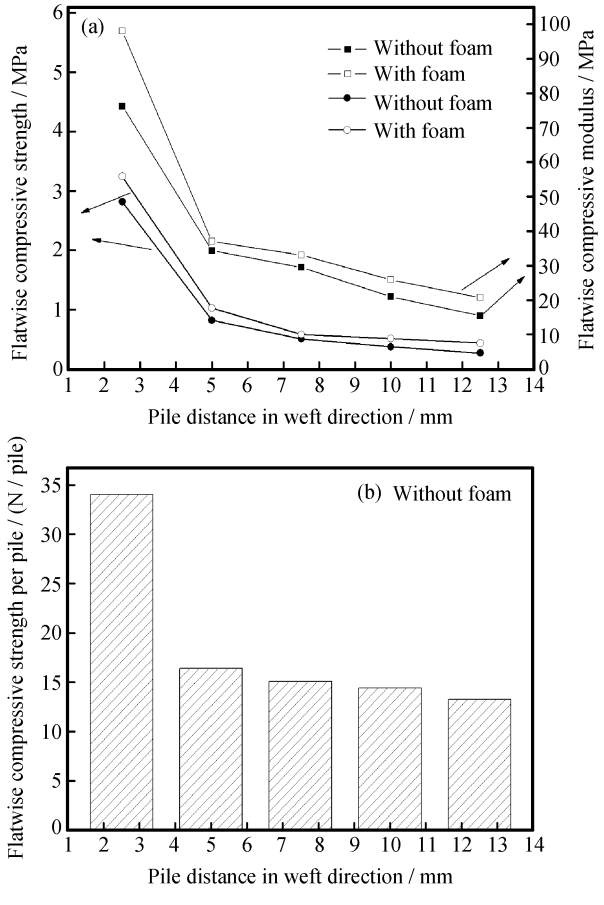


图 3 芯柱纬向间距对三维连体织物格栅复合材料平压性能的影响

Fig. 3 Influence of pile distance in weft direction on flatwise compressive properties of 3D spacer grille fabric composites

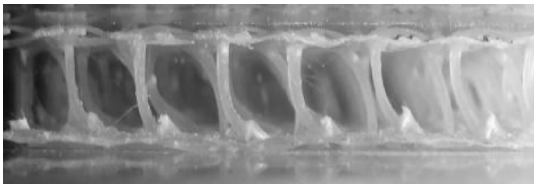


图 4　芯柱纬向间距 7.5 mm 的三维连体织物格栅复合材料平压破坏形貌

Fig. 4　Fracture morphologies of 3D spacer grille fabric composites with 7.5 mm pile distance in weft direction for the flatwise compression test

2.1.2　剪切性能

图 5 为芯柱纬向间距为 7.5 mm 三维连体织物格栅复合材料填充泡沫前后的经纬向剪切载荷-位移曲线。可知，初始阶段三维连体织物格栅复合材料载荷随位移呈线性增加，达到一定载荷后，芯柱与格栅面层连接部位树脂基体出现裂纹，导致载荷下降，随着剪切载荷的进一步作用，芯柱纤维受拉，载荷小幅增加直至芯柱彻底断裂。填充泡沫后的剪切载荷-位移曲线与填充前基本一致，只是第二个峰值较未填充的明显，这可能由于泡沫和芯柱的协同作用，芯柱纤维剪切变形较小，根部应力集中，出现基体开裂和泡沫的剪切裂纹，然后芯柱断裂破坏。其中间距 7.5 mm 三维连体织物格栅复合材料的经向剪切强度达 0.205 MPa，而三维连体织物格栅夹芯材料为 0.382 MPa，填充泡沫前纬向剪切强度为 0.217 MPa，填充后为 0.391 MPa，可以看出填充泡沫后，材料剪切性能提高，但经纬向剪切性能相差不大。三维连体织物格栅复合材料填充泡沫前后破坏形貌分别如图 6 所示。可以看出，两种材料均发生芯柱与面板粘结处芯柱的断裂破坏，而三维连体织物格栅夹芯材料还发生芯柱与面板的粘结处面板纤维的断裂破坏。

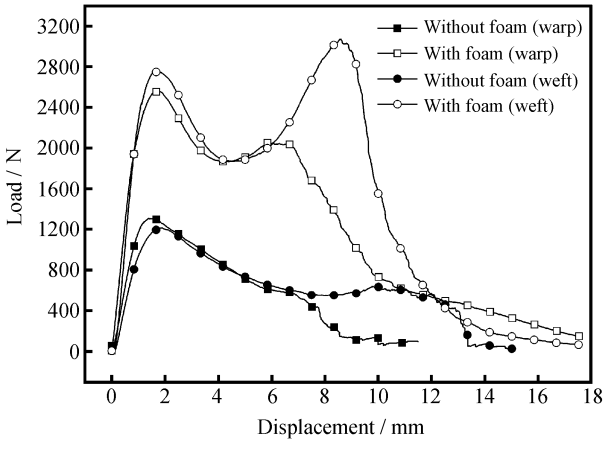


图 5　芯柱纬向间距 7.5 mm 的不同三维连体织物格栅复合材料剪切载荷-位移曲线

Fig. 5　Load－displacement curves of different 3D spacer grille fabric composites with 7.5 mm pile distance in weft direction for shear test

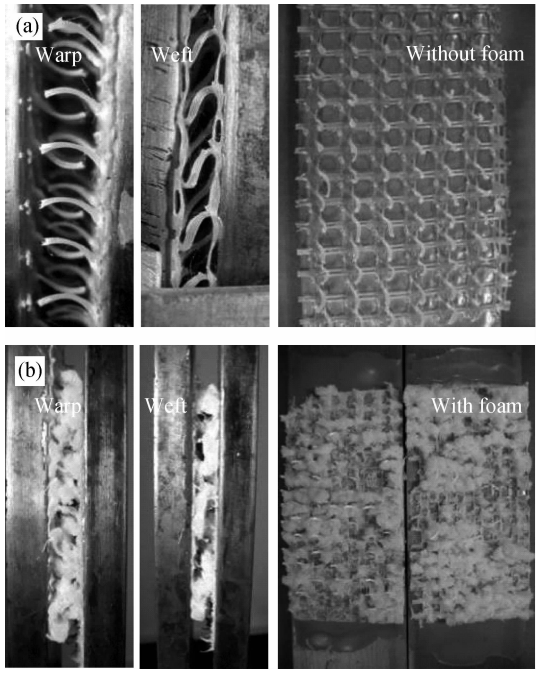
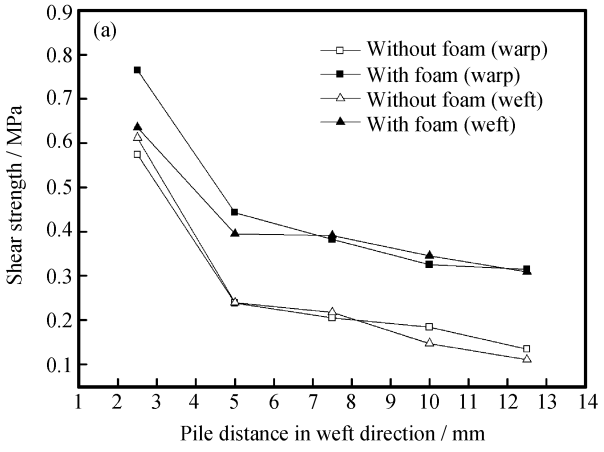
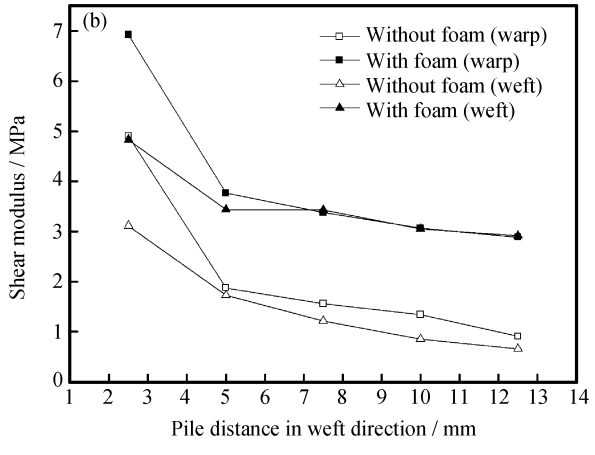


图 6　芯柱纬向间距为 7.5 mm 的不同三维连体织物格栅复合材料剪切破坏形貌

Fig. 6　Fracture morphologies of different 3D spacer grille fabric composites with 7.5 mm pile distance in weft direction for shear test

芯柱纬向间距对三维连体织物格栅复合材料填充泡沫前后剪切性能的影响如图 7 所示。可知，随着芯柱纬向间距的增大，三维连体织物格栅复合材料经向剪切强度与模量均呈递减趋势，当芯柱间距从 2.5 mm 增加到 12.5 mm 时，未填充泡沫的经向剪切强度从 0.574 MPa 下降至 0.134 MPa，经向剪切模量从 4.908 MPa 下降至 0.908 MPa。单根芯柱经向承剪力呈先下降再上升又下降的趋势，这可能是由于在芯柱间距为 2.5～5 mm 时，复合材料结构稳固，此时随芯柱纬向间距增大、芯柱减少，芯柱之间的协同作用减弱，单根芯柱承剪力减弱，然后由于剪切性能的降低相较于芯柱的减少不显著，因此单根芯柱经向承剪力在间距为 5～10 mm 呈增大的趋势；然而随着材料纬向间距继续增大，芯柱的跨距太大，芯柱与面板的粘结点继续减少，更容易发生芯柱与面板的破坏，因而单根芯柱承剪力在 12.5 mm 处开始下降。填充泡沫后，三维连体织物格栅夹芯材料的各项性能都有较大的提高，其中单





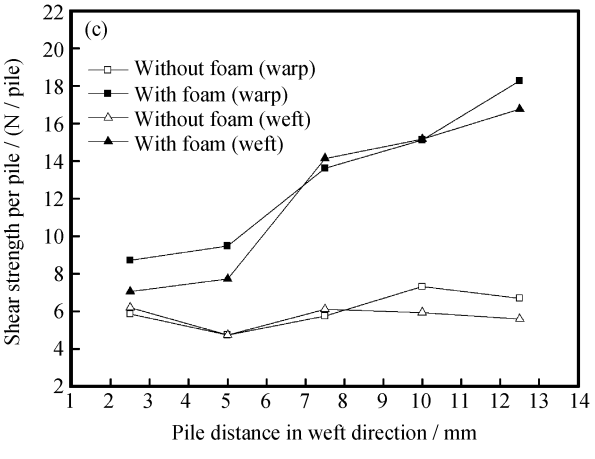


图 7　芯柱纬向间距对三维连体织物格栅复合材料剪切性能的影响

Fig. 7　Influence of pile distance in weft direction on shear properties of 3D spacer grille fabric composites

根芯柱承剪力呈递增趋势，当芯柱间距从 2.5 mm 增加到 12.5 mm 时，单根芯柱经向承剪力从 8.713 N/pile增至 18.268 N/pile，纬向承剪力从 7.05 N/pile 增至 16.761 N/pile。这可能是由于泡沫对芯柱的协同作用提高了材料的剪切性能，如图 8 所示。

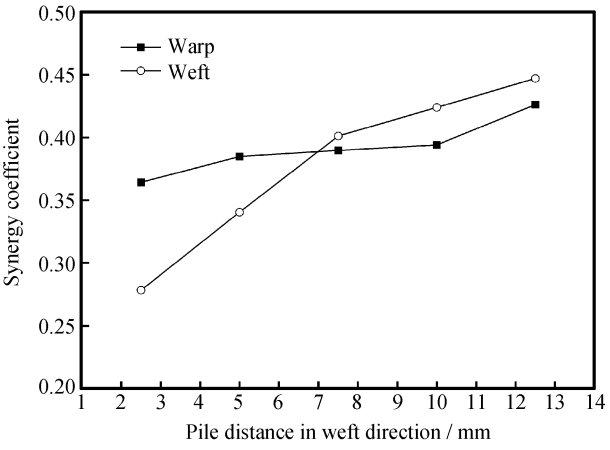


图 8　泡沫对三维连体织物格栅复合材料的比剪切性能协同效应

Fig. 8　Synergy effects between pile and foam of 3D spacer grille fabric composites under shear strength than flat

2.2　大厚度三维连体织物夹芯材料性能分析

图 9 为芯柱高度 35 mm 三维连体织物格栅复合材料的平压载荷-位移曲线。可知，其平压强度为 0.381 MPa，模量为 21.83 MPa。图 10 为芯柱高度 35 mm 三维连体织物格栅复合材料的平压载荷破坏形貌，可以看出材料的破坏主要是芯柱失稳，最终发生倒伏，芯柱断裂破坏。

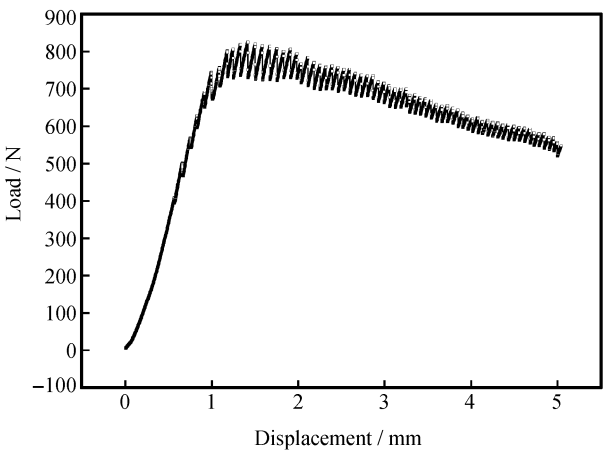


图 9　芯柱高度 35 mm 三维连体织物格栅复合材料平压载荷-位移曲线

Fig. 9　Load - displacement curves of 35 mm 3D spacer grille fabric composites for flatwise compressive test

图 11 为芯柱高度为 35 mm 三维连体织物格栅复合材料经纬向剪切载荷-位移曲线。可以看出经向剪切载荷-位移曲线初始阶段为小段线性，然后随着位移的增大，载荷缓慢增大后又显著上升达到峰值后，由于芯柱的断裂破坏载荷迅速下降；而纬向剪切载荷-位移曲线初始阶段为线性，但载荷达

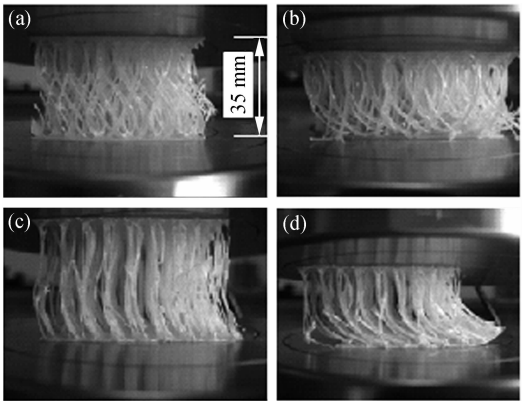


图 10　芯柱高度为 35 mm 三维连体织物格栅复合材料平压载荷破坏形貌

Fig. 10　Fracture morphologies of 35 mm 3D spacer grille fabric composites for the flatwise compression test

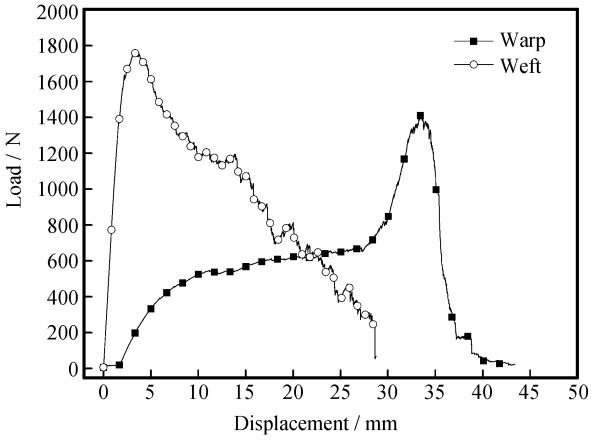


图 11　芯柱高度 35 mm 三维连体织物格栅复合材料剪切载荷-位移曲线

Fig. 11　Load－displacement curves of 35 mm 3D spacer grille fabric composites for shear test

到峰值后，由于芯柱纤维的逐渐断裂，载荷逐渐下降。最终破坏形貌如图 12 所示。

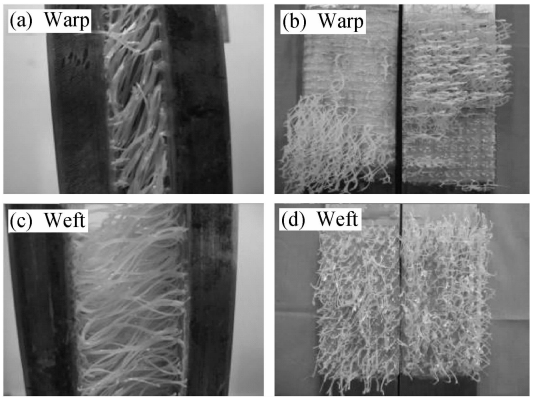


图 12　芯柱高度为 35 mm 三维连体织物格栅复合材料剪切破坏形貌

Fig. 12　Fracture morphologies of 35 mm 3D spacer grille fabric composites for shear test

表 1 为芯柱高度为 35 mm 三维连体织物格栅复合材料的平压剪切性能。可见，复合材料的经向剪切强度仅为 0.086 MPa，而纬向剪切强度达 0.272 MPa，是经向的 3 倍之多；纬向剪切强度及模量均远高于经向，各向异性明显。

表 1　芯柱高度为 35 mm 三维连体织物格栅复合材料力学性能

Table 1　Mechanical properties of 35 mm 3D spacer grille fabric composites

	Strength/MPa	Modulus/MPa	Specific strength/(MPa(g·cm^{-3})$^{-1}$)
Flatwise compression	0.381	21.830	4.079
Shear (Warp)	0.086	0.607	0.921
Shear (Weft)	0.272	4.655	2.911

3　结　论

（1）三维连体织物格栅复合材料及其夹芯材料的平压及剪切性能随芯柱纬向间距的增大而减小。夹芯材料单根芯柱承剪力随着芯柱纬向间距的增大而逐渐增大。

（2）大厚度三维连体织物复合材料平压性能破坏模式主要为芯柱失稳，最终芯柱断裂破坏。剪切破坏模式为发生芯柱根部断裂，各向异性明显。

参考文献：

[1] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani S. Dynamic compression behavior of integrated core sandwich composites [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 445/446: 54-64.

[2] Vaidya A S, Vaidya U K, Uddin N. Impact response of three-dimensional multifunctional sandwich composite [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 472(1/2): 52-58.

[3] Vuure van A W, Pflug J, Ivens J A, Verpoest I. Modeling the core properties of composite panels based on woven sandwich - fabric performs [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(8): 1263-1276.

[4] Judawisastra H, Ivens J, Verpoest I. The fatigue behaviour and damage development of 3D woven sandwich composites [J]. Composite Structures, 1998, 43(1): 35-45.

[5] Chen X, Yu D, Tan X. Finite element simulation of 3D honeycomb textile composites for energy absorption and protection [C]// Proceedings of 2006 China International Wool Textile Conference & IWTO Wool Forum. Xi'an: 2006, 86-95.

[6] Tan Xincai, Chen Xiaogang. Parameters affecting energy absorption and deformation in textile composite cellular structures [J]. Materials and Design, 2005, 26(5): 424-438.

[7] Tan Xincai, Chen Xiaogang, Conway P P, Yan Xiutian.

Effects of plies assembling on textile composite cellular structures [J]. Materials and Design, 2007, 28(3): 857-870.

[8] 祝成炎，谭冬宜，田 伟，等. 三维正交整体夹芯机织物的结构设计及织造 [J]. 纺织学报，2006，27(12)：9-13.
Zhu Chengyan, Tan Dongyi, Tian Wei, et al. Structural design and weaving methods of 3D orthogonal integrated cellular woven fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2006, 27(12): 9-13.

[9] Abounaim M, Hoffmann G, Diestel O, Cherif C. Thermoplastic composite from innovative flat knitted 3D multi-layer spacer fabric using hybrid yarn and the study of 2D mechanical properties [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(2): 363-370.

[10] 庄桂增，孙志杰，王绍凯，等. 三维间隔连体织物泡沫夹层结构复合材料的基本力学特性 [J]. 复合材料学报，2009，26(5)：27-32.
Zhuang Guizeng, Sun Zhijie, Wang Shaokai, et al. Experimental study on the basic mechanical characteristics of foam filled 3-D spacer fabric composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(5): 27-32.

[11] 高爱君，李 敏，王绍凯，等. 三维间隔连体织物复合材料力学性能 [J]. 复合材料学报，2008，25(2)：87-93.
Gao Aijun, Li Min, Wang Shaokai, et al. Experimental study on the mechanical characteristics of 3 - D spacer fabric composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 87-93.

(上接第 10 页)

KEYWORDS FOR COMPOSITES

C: ANALYSIS

analytical modelling
computational modelling
damage mechanics
finite element analysis(FEA)
laminate mechanics
micro-mechanics
numerical analysis
statistical properties/ methods

D: TESTING

acoustic emission
chemical analysis
electron microscopy
fractography
mechanical testing
non-destructive testingoptical microscopy
physical methods of analysis
process monitoring
radiography
surface analysis
thermal analysis
ultrasonics

E: MANUFACTURING/ PROCESSING

assembly
autoclave
automation
braiding
casting
chemical vapour deposition (CVD)
compression mouldingconsolidation
cure
cutting
extrusion
fibre conversion processes
filament winding
forging
forming
heat treatment
injection moulding
isostatic processing
joints/joining
knitting
lay-up(manual/automated)
liquid metal infiltration
machining
melt-spinning
moulding compounds
powder processing
preform
prepreg
pultrusion
recycling
resin film infiltration(RFI)
resin flow
resin transfer moulding (RTM)
sintering
slip casting
stitching
surface treatments
tape
thermal analysis
thermoplastic resin
thermosetting resin
tooling
tow
weaving

(from *Composites Part A*)