

# 中空复合材料压缩性能及有限元分析

冯古雨<sup>1</sup> 钱坤<sup>1</sup> 曹海建<sup>1,2</sup> 王新月<sup>1</sup> 卢雪峰<sup>1</sup>

(1 江南大学纺织服装学院,生态纺织教育部重点实验室,无锡 214122)

(2 南通大学纺织服装学院,南通 226019)

**文 摘** 对“X”形的中空复合材料的压缩性能进行测试,并根据其结构参数建立模型,使用 ANSYS Workbench 软件对建立出的模型进行静力学数值模拟分析,拟合出其压缩力学性能曲线,对比数值模拟结果与实验数据。结果表明:该复合材料压缩时芯材主要承受压缩载荷作用,更容易发生破坏,5 mm 压缩变形时,最大压缩应力为 475.25 MPa,最大压缩应变为 3.9785%;建立出的复合材料结构模型压缩性能模拟结果与实验测试结果基本吻合,误差比例仅为(8.73±2.92)%,证明该模型具有一定的准确性。

**关键词** 三维中空,复合材料,压缩性能,有限元分析

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.12044-2330.2017.03.007

## Compression Property Testing and FEM Analysis of Hollow Composite

FENG Guyu<sup>1</sup> QIAN Kun<sup>1</sup> CAO Haijian<sup>1,2</sup> WANG Xinyue<sup>1</sup> LU Xuefeng<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Eco-Textile of Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122)

(2 College of Textile and Clothing, Nantong University, Nantong 226019)

**Abstract** A 3D hollow composite with "X" core structure was designed and composited. Compression characteristic and property of 3D hollow composite were tested by Instron 3385H, and the stress-strain curve was obtained. According to structure parameter of the composite, the structural model was established. Static properties of the composite are simulated by ANSYS Workbench. Simulated result is compared to the testing result. The result showed that the main loads were supported by core structure of composite and the main failure occurred there. Simulated results approximately agree with the experimental, the models have certain veracity.

**Key words** 3D hollow, Composite, Compression property, FEM analysis

### 0 引言

三维中空复合材料是一种使用高性能工程纤维(如玻璃纤维、碳纤维、玄武岩纤维等)以特殊的织造工艺在经过改造的三维织机上制备出不同结构的复合材料预制体,以环氧树脂、酚醛树脂等树脂基材料作为树脂基体与预制体复合制成复合材料<sup>[1-5]</sup>。三维中空复合材料具有高强、高模、轻质等特性,特别适合作为部分低强度的泡沫材料的骨架结构使用<sup>[6-7]</sup>。目前该复合材料已经广泛应用于铁路、公路、船舶、航天航空等领域<sup>[8-9]</sup>。

在实际应用中发现,该复合材料主要受到压缩及

低速冲击载荷的作用,因此更多的专家、学者开始着眼于三维中空复合材料压缩及低速冲击力学性能的研究<sup>[10-13]</sup>。通过传统实验、测试的方式只能得到复合材料力学性能结果,无法对复合材料的破坏机理及更细观的破坏模式进行分析,随着计算机技术的发展,ANSYS 有限元软件将模型划分为网格后通过分析其应力应变分布情况可以得到复合材料更加细观的力学性能参数<sup>[14-15]</sup>。

本文在制备出一种三维中空复合材料的基础上,按照其相应比例建立出复合材料结构模型,并借助 ANSYS 有限元软件分析其在 5 mm 内的压缩载荷作

收稿日期:2016-09-09;修回日期:2016-12-28

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目“土工建筑增强材料制备与应用”(2016YFB0303205);江苏省自然科学基金-青年基金项目(BK20160157);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2015019-33、BY2016022-07);中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP51505)

第一作者简介:冯古雨,1992 年出生,博士研究生,主要从事纺织复合材料的制备及性能研究。E-mail:fengguyu890@163.com

通信作者:钱坤,1963 年出生,博士生导师,教授,主要从事纤维复合材料的制备及应用。E-mail:qiankun\_8@163.com

用下应力应变分布情况,分析其破坏机理。将模拟结果与测试结果对比,验证模型的准确性,并分析误差原因,本文为建立出更科学的三维中空复合材料结构模型奠定了基础。

## 1 结构与模型建立

### 1.1 复合材料结构设计

该复合材料结构见图 1,其中小图为芯柱结构示意图。复合材料中经纬纱均为 200 tex 玻璃纤维,织物一个结构循环由 16 根纬纱、8 根经纱构成。其中织物上下面板处由 4 根经纱组成平纹结构,另 4 根经纱作为衬经形成复合材料的芯柱结构。

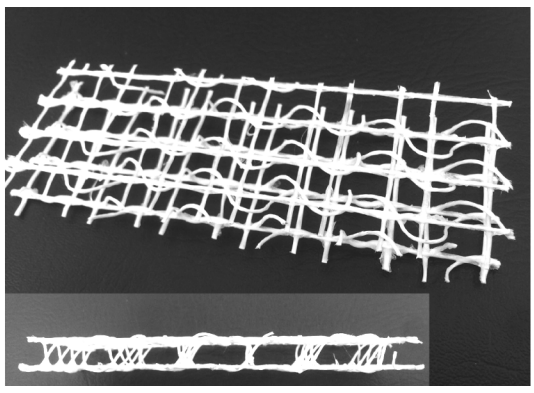


图 1 三维中空复合材料结构图

Fig.1 Structure chart of 3D hollow composite

复合材料树脂基体由无锡树脂厂提供的凤凰牌 E-51 型环氧树脂,和聚酰胺 WHR-H023 固化剂以质量比为 3:1 的比例均匀混合后制成。称取与纤维增强体质量相同的树脂基体,并通过手糊成型的方式制备三维中空复合材料。

### 1.2 建立数字模型

在建立模型时,作出如下假设<sup>[16]</sup>:

- (1) 复合材料中经纬纱在张力作用下相互间发生挤压作用,形成跑道型界面,如图 2 所示。
- (2) 复合材料中纬纱保持直线状态,经纱屈曲包缠在纬纱周围,贯穿纬纱的上下表面。在与纬纱接触

的位置呈现出与纬纱跑道型截面相同的轨迹,纬纱之间呈直线状态,复合材料发生拉伸变形时,经纬纱界面不发生变化。

(3) 复合材料在复合时树脂与纤维的浸润良好,界面性能良好,且复合材料中没有气泡等容易产生应力集中点的缺陷存在。

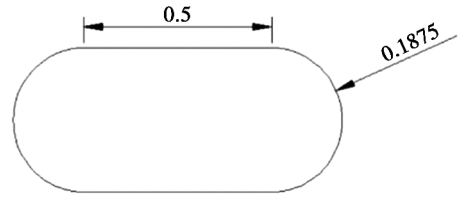


图 2 经纬纱横截面示意图

Fig.2 Diagram of fibers cross section

使用 ANSYS Workbench 建立复合材料数字结构及压缩模具结构模型,其结构参数见图 3。

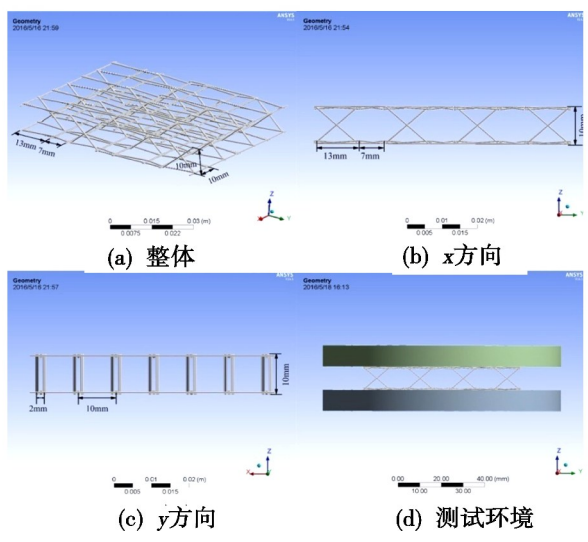


图 3 复合材料数字结构模型

Fig.3 Digital structure model of composite

### 1.3 设置材料参数

根据之前的研究及经验<sup>[17]</sup>,在 ANSYS Engineering Data 中设置复合材料性能参数,如表 1 所示。

表 1 复合材料弹性常数

Tab.1 Basic performance constant of fibers

fiber type	elasticity modulus/GPa			Poisson's ratio			shear modulus/GPa		
	x	y	z	x	y	z	xy	yz	xz
warp fiber	5	70	5	0.25	0.25	0.4	10	10	6.50
weft fiber	70	5	5	0.25	0.4	0.25	10	6.5	10

## 2 测试及模拟计算

### 2.1 压缩力学性能测试

按照建立出的复合材料结构模型尺寸制备出相应尺寸的复合材料压缩试样,尺寸为 80 mm×65 mm×10 mm。使用 Instron 3385H 型万能材料试验机对复合材料的压缩性能进行测试,获得其压缩应力-应变

曲线,测试速度为 5 mm/min,测试位移为 1 mm。

### 2.2 划分网格及边界条件

在 ANSYS 软件中网格划分形式可以分为自动网格划分、扫掠网格划分、使用四面体网格划分、使用六面体网格划分。其中六面体网格划分是以六面体网格为主体进行划分,在无法以六面体网格划分的区域

使用楔形、金字塔单元或四面体网格填充。在同样的求解精度下,六面体网格以最少的网格及节点数量获得准确度相同的结果,在数值计算中,网格量对计算机计算时间的影响很大,所以本文使用尺寸为 1 mm 的六面体网格对复合材料单胞结构模型进行扫略,复合材料由 61 988 个节点和 29 260 个元件组成。

设定其边界条件,下压缩夹具设定为 Fixed Support 完全固定约束,上压头设定为 Displacement 强迫位移约束,其  $x, y$  方向设为 0 mm,  $z$  方向分别设置为 -0.5、-1、-1.5、-5 mm。

### 3 结果与分析

#### 3.1 复合材料压缩性能

对复合材料进行压缩性能测试,其压缩应力-应变曲线见图 4。结合测试过程分析可知,该复合材料在承受压缩载荷作用时,首先发生弹性形变,主要表现为复合材料芯柱结构的弯曲变形,弹性形变阶段复合材料的应力应变曲线呈现压缩应力随压缩应变直线上升。如图中 a-b 段所示;随着压缩载荷的继续增加,复合材料芯柱结构弯曲幅度逐渐增加,复合材料部分芯柱发生塑性形变,部分芯柱中的纤维束中的纤维发生撕裂、错位、滑移等,该变形阶段复合材料的应力应变曲线呈现压缩应力随压缩应变上升,但由于复合材料部分芯柱结构逐一发生破坏,复合材料应力应变曲线斜率逐渐降低,且当芯柱发生破坏时曲线发生锯齿形下降。见图中 b-c 段。

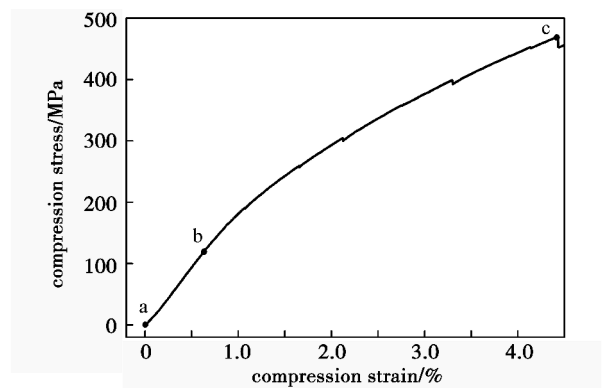
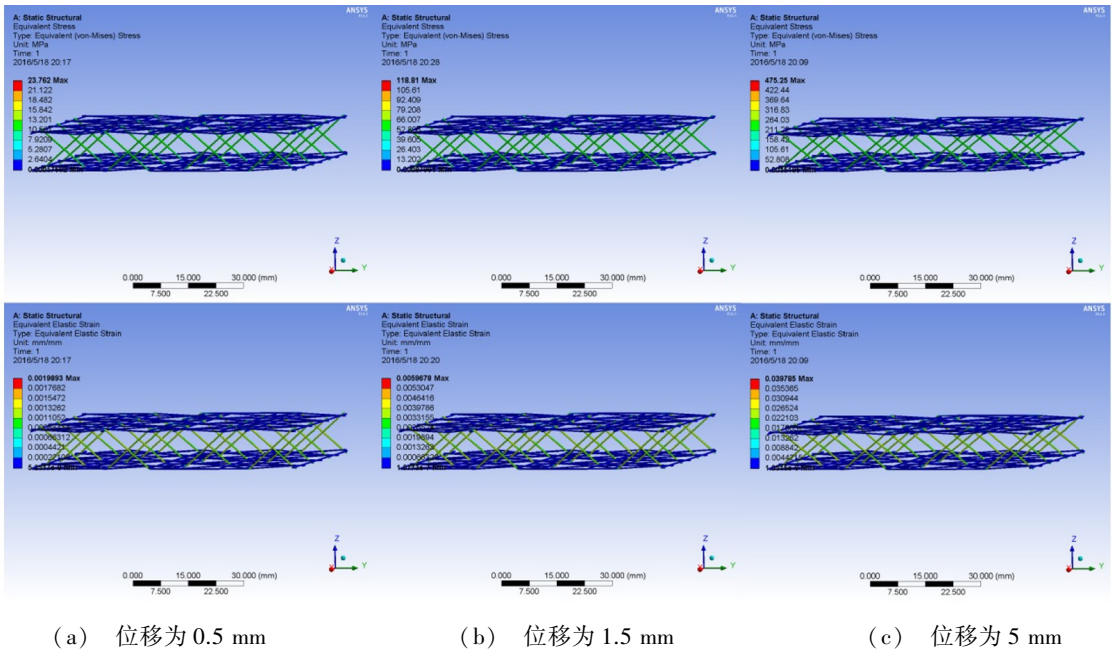


图 4 复合材料压缩应力-应变曲线

Fig.4 Compressive stress-strain curve of composite

#### 3.2 压缩性能数值模拟

图 5 为不同位移时复合材料的应力、应变分布云图。该复合材料在压缩位移为 0.5 mm 时,其最大压缩应力和应变分别为 23.762 MPa 和 0.19893%;当压缩位移为 1.5 mm,其最大压缩应力和应变分别为 118.81 MPa 和 0.596 78%;当压缩位移为 5 mm,其最大压缩应力和应变分别为 475.25 MPa 和 3.9785%。选取该复合材料几个较为典型的压缩位移载荷下应力-应变分布云图。由图 5 可知,复合材料在承受压缩载荷作用时,芯柱结构承受较多的载荷作用并产生较大的应变,上下面板则承受载荷较少,产生较小的应变。这说明复合材料在承受压缩载荷作用时,芯柱结构的力学性能决定了复合材料的力学性能,且破坏主要发生在芯柱结构上,这与实验结果吻合。



(a) 位移为 0.5 mm

(b) 位移为 1.5 mm

(c) 位移为 5 mm

图 5 复合材料应力-应变分布云图

Fig.5 Cloud pictures of stress and strain of composite

#### 3.3 数字模拟验证

统计压缩位移为 0.5、1、1.5、5 mm 时复合材料的最大应力和最大应变,做出散点图,并与压缩测试应

力-应变曲线对比,如图 6 所示。可以看出,在复合材料的弹性形变阶段,复合材料的实际测试结果与模拟结果基本相同,复合材料模拟结果散点围绕在测试

结果应力-应变曲线上。当压缩应变超过1%后,测试结果曲线斜率发生明显下降,应力应变曲线由直线上升变为曲线上升,同时曲线出现锯齿状下降现象;但由模拟结果可以看出,复合材料应力-应变曲线弹性形变大约持续到压缩应变为1.5%时,曲线才发生斜率下降的现象,这是由于复合材料结构模型在建立过程中建立了一些基本假设,复合材料在制备过程中可能产生的一些气泡、缺陷等问题在数字化模型中均未出现,故该复合材料理论模型在压缩应变为1%~1.5%时的压缩应力均大于实验值。

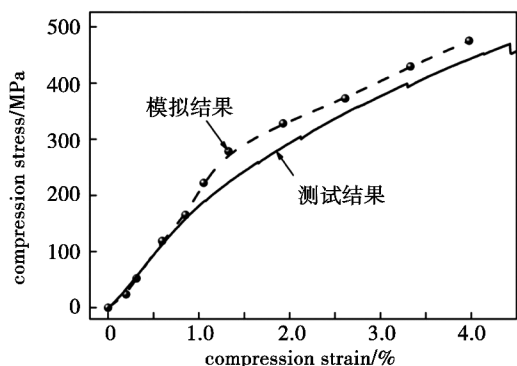


图6 测试与模拟结果对比

Fig.6 Comparison of testing and simulated results

当压缩应变大于1.5%后,该复合材料的压缩性能模拟曲线斜率与实验值相似,但同样由于复合材料结构模型建立时理想性假设的存在,在相同压缩应变的条件下,该复合材料结构模型压缩应力模拟结果均大于复合材料的实验测试值,误差为 $33.98 \pm 6.80$ ,误差比例为 $(8.73 \pm 2.92)\%$ 。

#### 4 结论

(1) 三维中空复合材料压缩时芯材主要承受压缩载荷作用并产生较大的压缩应力和压缩应变,更容易发生破坏,5 mm 压缩变形时,最大压缩应力为475.25 MPa,最大压缩应变为3.9785%;上下面板则承受较少的载荷作用,产生较小的压缩应力和压缩应变,不易发生破坏;

(2) 本文建立出三维中空复合材料结构模型的压缩应力应变曲线与试验测试结果相似,误差比例仅为 $(8.73 \pm 2.92)\%$ ,说明该模型能够较好的还原复合材料的结构特性。

#### 参考文献

[1] 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): 52-58.  
 [2] VAIDYA U K, HOSUR M V, EARL D, et al. Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels [J].

*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(8): 761-772.

[3] CHEN R, ZHAO T, LU J, et al. Graphene-based three-dimensional hierarchical sandwich-type architecture for high-performance Li/S batteries [J]. *Nano letters*, 2013, 13(10): 4642-4649.

[4] MAHFUZ H, HOSUR M V, KAMATH M V, et al. Low-velocity impact response of cross-ply laminated sandwich composites with hollow and foam-filled Z-pin reinforced core [J]. *Journal of Composites, Technology and Research*, 1999, 21(2): 84-97.

[5] BARDELLA L, GENNA F. Elastic design of syntactic foamed sandwiches obtained by filling of three-dimensional sandwich-fabric panels [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(2): 307-333.

[6] VAIDYA U K, NELSON S, SINN B, et al. Processing and high strain rate impact response of multi-functional sandwich composites [J]. *Composite Structures*, 2001, 52(3): 429-440.

[7] LI M, WANG S, ZHANG Z, et al. Effect of structure on the mechanical behaviors of three-dimensional spacer fabric composites [J]. *Applied Composite Materials*, 2009, 16(1): 1-14.

[8] 钟崇岩, 曹海建, 李娟. 组织结构对三维整体中空复合材料压缩性能的影响 [J]. *材料导报*, 2012(S2): 279-281.

[9] 匡宁, 陈同海, 钱育胜, 等. 中空复合材料的成型工艺及应用进展 [J]. *工程塑料应用*, 2015(1): 120-123.

[10] LASCOP B, ABOURA Z, KHELLIL K, et al. Impact response of three-dimensional stitched sandwich composite [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(2): 347-353.

[11] XIONG J, VAZIRI A, MA L, et al. Compression and impact testing of two-layer composite pyramidal-core sandwich panels [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(2): 793-801.

[12] VAIDYA U K, PALAZOTTO A N, GUMMADI L N B. Low velocity impact and compression-after-impact response of Z-pin reinforced core sandwich composites [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2000, 122(4): 434-442.

[13] 曹海建, 钱坤, 魏取福, 等. 三维整体中空复合材料压缩性能的有限元分析 [J]. *复合材料学报*, 2011(1): 230-234.

[14] JIANG N, XIE Q, DAI Y, et al. The fatigue analysis of UAV composite wing based on ANSYS/FE-SAFE [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2009(6): 3-4.

[15] SONG F, NI Y, TAN Z. Optimization design, modeling and dynamic analysis for composite wind turbine blade [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 16: 369-375.

[16] 曹海建, 冯古雨, 俞科静, 等. 碳纤维/环氧树脂基中空夹芯复合材料压缩性能的有限元法研究 [J]. *纺织学报*, 2015(9): 50-54.

[17] 冯古雨, 曹海建, 钱坤. 三维浅交弯联机织复合材料弯曲性能的有限元分析 [J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(6): 22-26.