

# 三维中空夹芯复合材料拉伸性能的有限元分析

曹海建 俞科静 钱坤

(江南大学纺织服装学院,无锡 214112)

**文 摘** 利用有限元软件 Workbench,建立了三维中空夹芯复合材料结构模型,进行拉伸性能研究。利用该模型,探讨了材料在 1 mm 拉伸位移载荷作用下纤维、树脂和复合材料的应力、应变分布。结果表明:三维中空夹芯复合材料在拉伸载荷作用下,“X”形芯材交叉处应力最大,最容易发生拉伸破坏;上下面板应力最小,最不容易发生拉伸破坏;复合材料在承受拉伸载荷作用时,增强体纤维起主要承载作用,基体树脂起次要作用;当拉伸位移载荷达到 1 mm 时,材料的破坏模式主要为树脂破裂。

**关键词** 三维中空夹芯复合材料,有限元软件 Workbench,拉伸性能,应力,应变,破坏模式

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.02.004

## Finite Element Analysis of Three-Dimensional Hollow Sandwich Composites on Tensile Properties

CAO Haijian YU Kejing QIAN Kun

(College of Textile and Clothing, Jiangnan University, Wuxi 214112)

**Abstract** A new structural model was built to study tensile properties of three-dimensional hollow sandwich composites (3D composites) by using the finite element software Workbench. The distribution of stress & strain on the fibers, resin and the 3D composites was discussed under tensile loads of 1 mm displacement by using the model. The results show that the maximum value of stress occurred between the overlap of X-shaped piles, where the 3D composites damaged easily. The minimum value of stress occurred on the up and down face-sheet, where the 3D composites damaged difficulty. The main loads were supported by reinforced fibers and the minor loads were supported by matrix resin. The main failure mode of the 3D composites are resin fracture when the 3D composites suffered tensile displacement loads at 1 mm.

**Key words** Three-dimensional hollow sandwich composites, Finite element software Workbench, Tensile properties, Stress, Strain, Failure mode

### 0 引言

三维中空夹芯复合材料是一种新型的夹芯结构复合材料。该材料主要由玻璃纤维、碳纤维等织造而成,具有高强、高模、轻质等特性,目前已广泛应用于高铁、船舶、飞机、油罐车、建筑等领域<sup>[1-3]</sup>。研究发现,该结构材料在使用过程中主要承受压缩、拉伸和低速冲击等载荷,此类载荷可能对材料造成致命的损伤,甚至威胁到材料的使用寿命<sup>[4-7]</sup>。如何提高材料的抗压、抗拉和抗冲击性能,延长材料的使用寿命,

是众多生产者和使用者共同关心的问题。借助大型有限元软件 ANSYS Workbench,可以对材料承载及破坏历程进行模拟,能够获得传统设计方法难以得到的一系列信息,从而对材料结构实施优化设计,改善材料的性能。

目前国内外学者应用有限元软件对纤维增强复合材料进行了一些相关研究。杨振宇等<sup>[8]</sup>建立三维编织复合材料单胞模型,并对材料的有效模量进行了预测;黄桥平等<sup>[9]</sup>研究了碳纤维/环氧树脂层板的冲

收稿日期:2014-09-24

基金项目:国家自然科学基金(51302110,51203062);江苏省产学研联前瞻性联合研究项目(BY2013015-31,BY2014023-15)

作者简介:曹海建,1979年出生,博士,副研究员,主要从事纺织复合材料的开发与性能研究工作。E-mail:caohaijian@jiangnan.edu.cn

通讯作者:俞科静,副教授,主要从事轻量化复合材料研发工作。E-mail:yukejing@gmail.com

击拉伸性能,并应用弹塑性动力损伤本构模型对层板的拉伸失效过程进行了模拟分析;邹健等<sup>[10]</sup>研究了二维织物增强层板高速冲击后的损伤容限,并借助有限元软件分析了层板拉伸损伤扩展历程;姚秀冬等<sup>[11]</sup>应用有限元软件 ANSYS 建立了复合材料夹芯板的结构模型,并分析了树脂柱分布、材料特性等参数对材料应力分布的影响规律;周亮等<sup>[12]</sup>应用有限元软件 ABAQUS 建立多胞织物结构复合材料模型,并借此研究了材料的静态弯曲性能。

本文借助有限元软件 ANSYS Workbench,建立三维中空夹芯复合材料结构模型,从“纤维—基体”角度出发,对材料的拉伸性能进行细观分析。

## 1 建立模型

### 1.1 基本假设

当材料受到垂直于面板的拉伸载荷作用时产生拉伸变形,芯材起主要支撑作用,因此本文中对三维中空夹芯复合材料进行有限元模拟分析时,重点研究芯材的特性。为了简化模型,作如下假设。

(1) 三维中空夹芯复合材料受到拉伸载荷时,主

要表现为芯材发生拉伸变形,且随着拉伸载荷的增大,变形随之增大;而上下面板在受到拉伸载荷时,面板的拉伸载荷都传递给了芯材。因此假设面板为弹性体,在压缩过程中不产生变形。

(2) 在拉伸过程中,上下面板在水平方向自由度不受限制;上面板在垂直方向有位移;下面板在垂直方向位移为 0。

(3) 在拉伸过程中,将芯材纤维截面也近似看成跑道形,且在承载过程中不发生扭转。

### 1.2 模型建立

三维中空夹芯复合材料主要由三部分组成,上下两个面板和中间的“X”形芯材。上下面板主要承受拉伸变形引起的正应力;中间芯层为材料提供足够的截面惯性矩,主要承受剪应力。图 1 为三维中空夹芯复合材料细观结构模型。

以图 1(d) 的三维中空夹芯复合材料为例,利用有限元软件 ANSYS Workbench 建模时,材料各部分对应数值分别为:上、下面板边长  $a = 106 \text{ mm}$ 、 $b = 56 \text{ mm}$ ;上、下面板厚度  $h_1 = 8 \text{ mm}$ ;芯材高度  $h_2 = 20 \text{ mm}$ 。

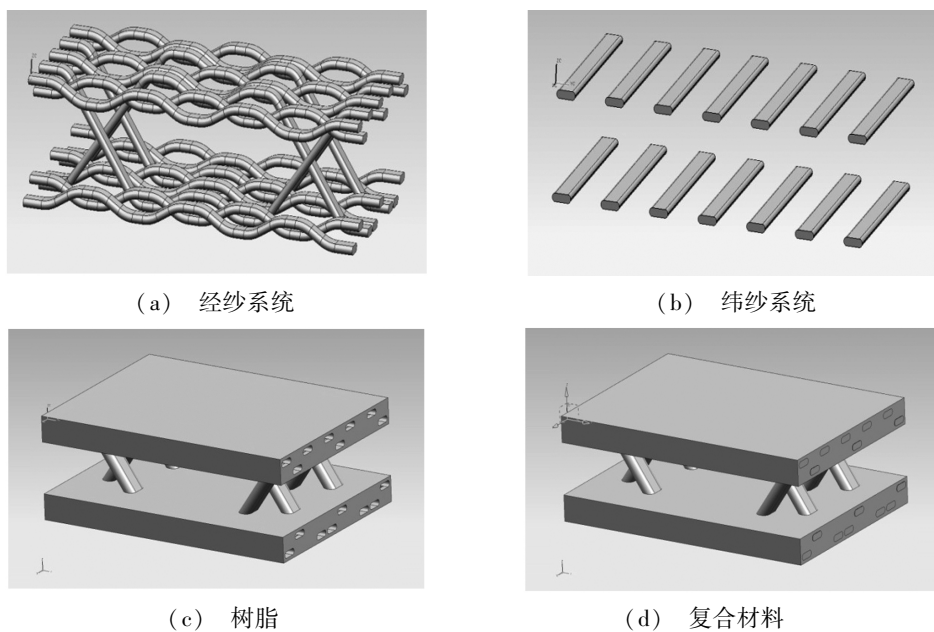


图 1 三维中空夹芯复合材料细观结构模型

Fig. 1 Micro-structural model of three-dimensional hollow sandwich composites

## 2 加载与计算

### 2.1 刚强度常数

本课题的三维中空夹芯复合材料组成主要包括:

增强体为各向异性的碳纤维、基体为各向同性的环氧树脂体系。两种组分的刚强度常数分别如表 1、表 2 所示。

表 1 碳纤维束和树脂基体的刚度常数  
Tab. 1 Stiffness constant of carbon fiber & resin

组分	$E_{11}/\text{GPa}$	$E_{22}/\text{GPa}$	$E_{33}/\text{GPa}$	$G_{12}/\text{GPa}$	$G_{23}/\text{GPa}$	$G_{13}/\text{GPa}$	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{13}$
T300-6K	230	83	83	5	3.65	5	0.36	0.3	0.36
环氧树脂		4.55			1.75			0.3	

表 2 碳纤维束和树脂基体的强度常数<sup>1)</sup>

Tab.2 Stress constant of carbon fiber &amp; resin

组分	$X_T$ /MPa	$X_C$ /MPa	$Y_T$ /MPa	$Y_C$ /MPa	$SS_{12}$ /MPa	$SS_{23}$ /MPa
T300-6K	3530	-5300	1000	-2000	1000	800
环氧树脂	80	-370	-	-	100	100

注:1)  $X_T$  为轴向拉伸强度;  $X_C$  为轴向压缩强度;  $Y_T$  为径向拉伸强度;  $Y_C$  为径向压缩强度;  $SS_{12}$ 、 $SS_{23}$  为截面剪切强度。

## 2.2 网格划分和加载

网格划分:三维中空夹芯复合材料的结构模型采用三面体进行网格划分,划分网格后的复合材料细观模型如图 2 所示。

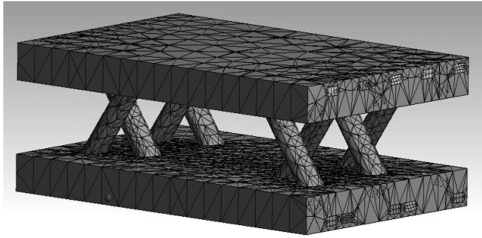


图 2 划分网格后的复合材料细观模型

Fig.2 Micro-structural model of 3D composites after meshing

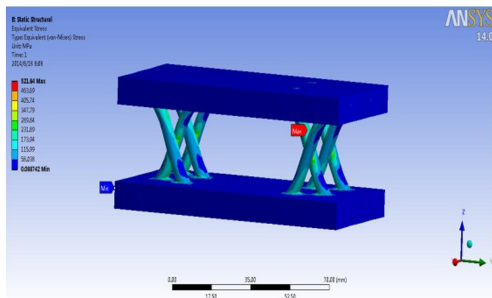
边界条件:按照实际压缩试验工况对材料进行约束,即对下面板的底面进行位移约束,其中  $x$ 、 $y$  方向的位移均设为“Free”, $z$  方向的位移设为“0 mm”。

施加载荷:三维中空夹芯复合材料进行拉伸试验时属于静载荷分析,因此本文采用位移载荷进行加载。其中  $x$ 、 $y$  方向的位移均设为“Free”, $z$  方向的位移设为“1 mm”。

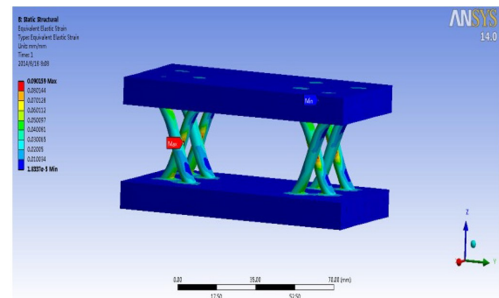
## 3 结果与分析

### 3.1 材料的应力和应变

三维中空夹芯复合材料的拉伸应力、应变云图分别如图 3 所示,芯材的应力放大云图如图 4 所示。



(a) 应力云图



(b) 应变云图

图 3 三维中空夹芯复合材料的拉伸应力和应变云图

Fig.3 Cloud pictures of stress &amp; strain distribution of three-dimensional hollow sandwich composites

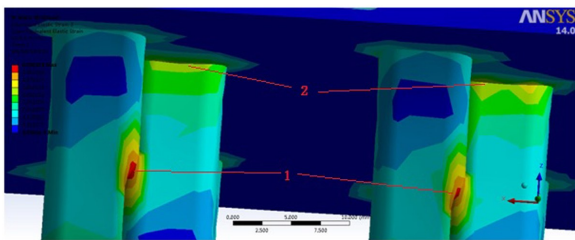


图 4 芯材应力云图局部放大图

Fig.4 Part magnifying pictures of stress cloud on piles

(1)由图 3 可知,在受到拉伸载荷作用时,三维中空夹芯复合材料的“X”形芯材交叉处应力、应变值最大,分别为 521.64 MPa、0.000159,上下面板应力、应变值最小,分别为 88.742 kPa、 $1.8337 \times 10^{-5}$ 。说明三维中空材料在受到拉伸载荷作用时,芯材是承载的主体,上下面板承载较小<sup>[13]</sup>。因此在实际生产和应用时,应特别加强该处的结构强度和刚度的设计。

(2)由图 4 可知,材料在“X”形芯材交叉处应力值

最大,如图中标注 1 处;其次为芯材与面板连接处应力值较大,如图中标注 2 处。说明材料在受到拉伸载荷作用时,芯材交叉处、芯材与面板连接处是最容易发生破坏损伤的区域,这与实际测试结果是一致的<sup>[13]</sup>。

### 3.2 组分的应力和应变

三维中空夹芯复合材料经纱系统、树脂等组分的应力和应变云图分别如图 5 所示。

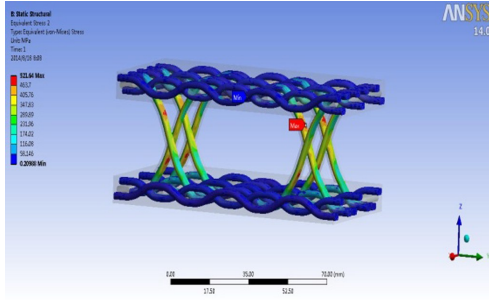
(1)三维中空夹芯复合材料在受到拉伸载荷作用时,纤维起主要承载作用,而树脂起次要作用。经向碳纤维的最大应力值为 521.64 MPa、最小应力值为 209.88 kPa,如图 5(a)所示;树脂的最大应力值为 351.67 MPa、最小应力值为 88.742 kPa,如图 5(c)所示,这与实际测试结果一致,同时进一步验证纤维是复合材料力学性能的主要决定因素<sup>[13]</sup>。

(2)三维中空夹芯复合材料在拉伸位移载荷达到 1 mm 时,材料的破坏模式主要是树脂破裂,由图 5(a)可知,纤维的最大应力值为 521.64 MPa,小于表 2 中碳

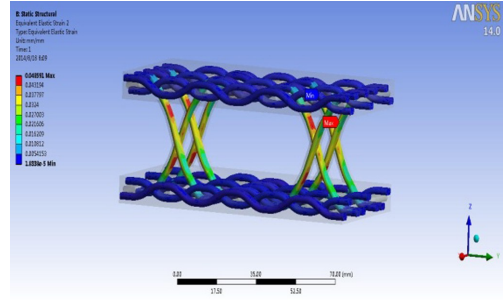


纤维断裂强度值 3.53 GPa,说明碳纤维并未发生破坏;由图 5(c)可知,树脂的最大应力值为 351.67 MPa,远大于表 2 中树脂断裂强度值 80 MPa,说明树脂已经发生破裂损伤,由图 5(b)和 5(d)可知,纤维的最大应变

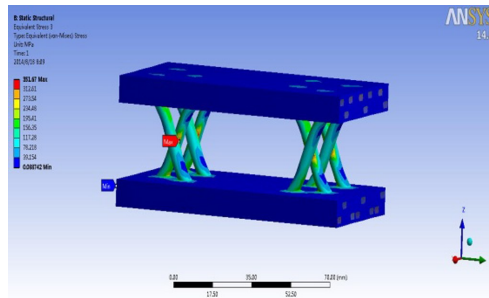
值为 0.048 591,树脂的最大应变值为 0.090 159,树脂的应变值远大于纤维,说明树脂与纤维已发生较大的脱粘现象。



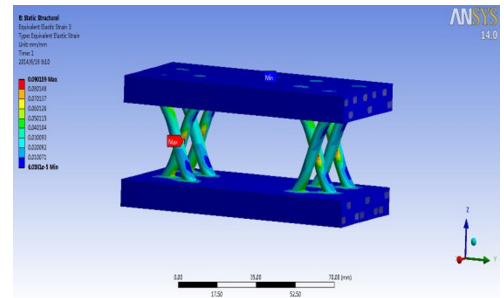
(a) 经纱系统应力云图



(b) 经纱系统应变云图



(c) 树脂应力云图



(d) 树脂应变云图

图 5 三维中空夹芯复合材料经纱和树脂的应力、应变云图

Fig. 5 Stress & strain cloud pictures of warp yarn and resin on three-dimensional hollow sandwich composites

#### 4 结论

(1) 三维中空夹芯复合材料在受到拉伸载荷作用时,“X”形芯材交叉处应力最大,最容易发生拉伸破坏;上下面板应力最小,最不容易发生拉伸破坏。

(2) 三维中空夹芯复合材料在受到拉伸载荷作用时,增强体纤维起主要承载作用,基体树脂起次要作用;当拉伸位移载荷达到 1 mm 时,材料的破坏模式主要为树脂破裂。

#### 参考文献

[1] Ko F K, Du G W. Processing of textile preforms[C]// Gutowski T G eds. Advanced Composites Manufacturing, New York:John Wiley & Sons. Inc., 1997:182-187

[2] 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

[3] Shyr T W, Pan Y H. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and interply hybrid laminate[J]. Composite Structures, 2004, 64(2):189-198

[4] 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

[5] 周光明,钟志珊,张立泉,等. 整体中空夹层复合材料力学性能的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(1):11-15

[6] Vuure A W, Ivens J A, Verpoest I. Mechanical properties of composite panels based on woven sandwich fabric performs [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2000, 31(7):671-680

[7] 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, 65:103-115

[8] 杨振宇,卢子兴,刘振国,等. 三维四向编织复合材料力学性能的有限元分析[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5):155-161

[9] 黄桥平,赵桂平,李杰. 碳纤维/环氧树脂复合材料动态拉伸试验研究与损伤分析[J]. 复合材料学报, 2009, 26(6):143-149

[10] 邹健,程小全,陈浩,等. 二维织物增强层合板高速冲击后拉伸性能模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6):638-642

[11] 姚秀冬,周叮,刘伟庆. 复合材料夹层板芯层内树脂柱对性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(6):37-941

[12] 周亮,予远,建斌. 多胞织物结构复合材料静态弯曲性能与有限元分析[J]. 天津工业大学学报, 2008, 27(5):4-7

[13] 曹海建,钱坤,盛东晓,等. 芯材高度对整体中空复合材料力学性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2010, 38(9):54-57

(编辑 李洪泉)