

# 三维间隔复合材料面内压缩性能的数值模拟

陈红霞<sup>1</sup> 曹海建<sup>2\*</sup> 黄晓梅<sup>2</sup>

(1.南通大学分析测试中心,南通 226019;2.南通大学纺织服装学院,南通 226019)

**摘 要** 利用有限元软件 Workbench,建立了三维间隔复合材料的细观模型;对材料施加 1.5mm 的面内压缩位移载荷,研究材料的破坏模式及应力、应变分布规律。结果表明:从宏观角度观察,材料上下面板应力较大,容易发生破坏;芯材应力较小,不易发生破坏。从细观角度观察,上下面板的经纱、纬纱、接结经纱的应力较大,是承载主体;树脂的应力较小,起次要作用。上下面板的纬纱平均应力最大,且分布具有随机性。材料的破坏模式主要是上下面板树脂破碎、树脂与纤维严重脱粘等。

**关键词** 三维间隔复合材料,有限元法,面内压缩性能,应力与应变,破坏模式

## Numerical simulation of in-plane compression on 3D space composite

Chen Hongxia<sup>1</sup> Cao Haijian<sup>2</sup> Huang Xiaomei<sup>2</sup>

(1.Analysis & Testing Center,Jiangnan University,Nantong 226019;  
2.School of Textile and Clothing,Nantong University,Nantong 226019)

**Abstract** A new meso-structural model of three-dimensional space composite (3D composite) was built by using the finite element software Workbench. By using the model, in-plane compressive displacement loads with 1.5mm were applied on the 3D composite, and failure mode and distribution of stress & strain was studied too. The results shown that the maximum value of stress occurred on the upper and lower face-sheet macroscopically, where the 3D composite damaged easily. The minimum value of stress occurred on the piles, where the composites damaged difficultly. The yarns of warp, weft and binder warp on upper and lower face-sheet played a major role in bearing, while the resin played a minor role. The average stress value of upper and lower face-sheet was best, and distribution of stress was random. The failure mode was crushing of the resin, and interfacial de-bonding between fibers and resin, which all occurred on the upper and lower face-sheet.

**Key words** 3D space composite, finite element method, in-plane compression, stress & strain, failure mode

三维间隔复合材料是一种新型夹芯结构。该结构主要由三维间隔机织物与热固性树脂复合而成,具有质量轻、高强高模、整体性好等特性,目前已成功应用于国防军工、轨道交通和新能源等领域<sup>[1-3]</sup>。研究发现,该结构在运输、使用 and 维修过程中可能会受到压缩、低速冲击等载荷,易造成材料出现目视勉强可见损伤,使得材料承载能力急剧下降<sup>[4-6]</sup>。如何提高该结构的力学性能,是研究人员和使用者共同关心的问题<sup>[7]</sup>。

目前国内外学者采用有限元方法对多种夹芯结构进行了理论研究,并得到了一些有益结论。郭瑜

超等<sup>[8]</sup>采用数值分析法推导出复杂多边形蜂窝夹芯结构面内等效剪切模量的解析表达式,并借此分析了蜂窝胞元长斜边与垂直方向夹角对结构面内等效剪切模量的影响规律;Li 等<sup>[9]</sup>采用有限元软件 Abaqus 计算不同参数下点阵夹芯结构材料的整体屈曲强度,并与实验值进行对比分析;陈浩然等<sup>[10]</sup>利用有限元法建立了考虑界面裂纹尖端复杂应力场的扩展单元,模拟了碳纤维夹芯试件的界面开裂过程,并揭示了芳纶短纤维增韧界面的断裂机理。王兵等<sup>[11]</sup>通过建立细观力学模型,并结合修正的 Mori-Tanaka 方法预报纤维柱增强泡沫芯材的轴向

**基金项目:**国家重点研发计划(2018YFC0810300);江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(XCL-061);江苏省高校自然科学研究重大项目(16KJA430009);江苏省先进纺织工程技术中心开放基金重大项目(XJFZ/2018/02)

**作者简介:**陈红霞(1981-),女,硕士,工程师,主要研究方向为复合材料性能测试与分析。

**联系人:**曹海建。

弹性模量和横向剪切模量。马超等<sup>[12]</sup>修正了 Reissner 理论的软夹芯假设,提出考虑夹芯面内应力分量和弯曲刚度的硬夹芯板基本假设,并采用有限元方法研究材料的弯曲响应。

本研究采用有限元软件 Workbench,建立了材料的细观结构模型。借助模型,考察材料在面内压缩载荷作用下,应力、应变的分布情况以及材料的破坏模式。本课题组的研究将为该类结构的优化设计与工程化应用提供理论指导。

## 1 建立模型

### 1.1 基本假设

当受到面内压缩载荷时,三维间隔复合材料下面板易发生失稳破坏,因此为了简化模型,假设如下。

(1)三维间隔复合材料的纤维与树脂粘结良好,无气泡、裂纹等缺陷。

(2)经纱、纬纱、接结经纱的截面均近似看成跑道型,且芯材的接结经纱在承载过程中不发生扭转。

### 1.2 模型建立

三维间隔复合材料的组成部分见图 1,包括纱线系统(经纱、接结经纱和纬纱)、树脂系统等。其中,图 1(c)为纱线系统与树脂系统复合而成的三维间隔复合材料,其中,上、下面板边长  $a=126\text{mm}$ 、 $b=50\text{mm}$ ;上、下面板厚度  $h_1=2\text{mm}$ ;芯材高度

$h_2=8\text{mm}$ 。

## 2 加载与计算

### 2.1 工程常数

三维间隔复合材料主要包括纤维和树脂两种组分。其工程常数见表 1 和表 2。

表 1 纤维和树脂的刚度常数

| 组分   | $E_{11}/\text{GPa}$ | $E_{22}/\text{GPa}$ | $E_{33}/\text{GPa}$ | $G_{12}/\text{GPa}$ | $G_{23}/\text{GPa}$ |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 玻璃纤维 | 85                  | 40                  | 40                  | 35                  | 23                  |
| 环氧树脂 | 3.5                 | 3.5                 | 3.5                 | 1.3                 | 1.3                 |

| 组分   | $G_{13}/\text{GPa}$ | $\nu_{12}$ | $\nu_{23}$ | $\nu_{13}$ |
|------|---------------------|------------|------------|------------|
| 玻璃纤维 | 35                  | 0.3        | 0.23       | 0.3        |
| 环氧树脂 | 1.3                 | 0.35       | 0.35       | 0.35       |

注: $E_{11}$ 为纵向杨氏模量; $E_{22}$ 、 $E_{33}$ 为横向杨氏模量; $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 为纵向面内剪切模量; $G_{23}$ 为横向面内剪切模量; $\nu_{12}$ 、 $\nu_{13}$ 为主泊松比; $\nu_{23}$ 为次泊松比。

表 2 纤维和树脂的强度常数

| 组分   | $X_T/\text{MPa}$ | $Y_T/\text{MPa}$ | $Z_T/\text{MPa}$ | $X_C/\text{MPa}$ | $Y_C/\text{MPa}$ |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 玻璃纤维 | 3530             | 2000             | 2000             | -5300            | -1500            |
| 环氧树脂 | 70               | 70               | 70               | -100             | -100             |

| 组分   | $Z_C/\text{MPa}$ | $SS_{12}/\text{MPa}$ | $SS_{23}/\text{MPa}$ | $SS_{31}/\text{MPa}$ |
|------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 玻璃纤维 | -1500            | 1000                 | 800                  | 1000                 |
| 环氧树脂 | -100             | 30                   | 30                   | 30                   |

注: $X_T$ 为纵向拉伸强度; $Y_T$ 、 $Z_T$ 为横向拉伸强度; $X_C$ 为纵向压缩强度; $Y_C$ 、 $Z_C$ 为横向压缩强度; $SS_{12}$ 、 $SS_{23}$ 、 $SS_{31}$ 为截面剪切强度。

### 2.2 网格划分和加载

网格划分:三维间隔复合材料采用三面体进行网格划分,如图 2 所示。前期实验研究表明,三维间隔复合材料发生面板失稳破坏时,最大面内位移是 1.5mm。因此,本课题拟对材料施加 1.5mm 的面内压缩位移载荷。

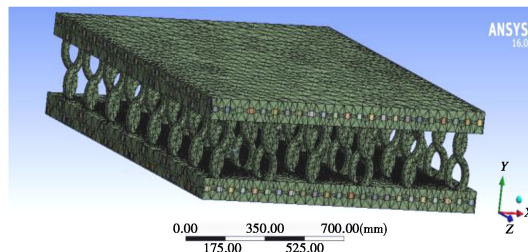


图 2 划分网格后的复合材料细观模型

约束与加载:对上下面板左侧面位移进行约束,其中 X 方向位移设为“0mm”,Y、Z 方向位移均设为

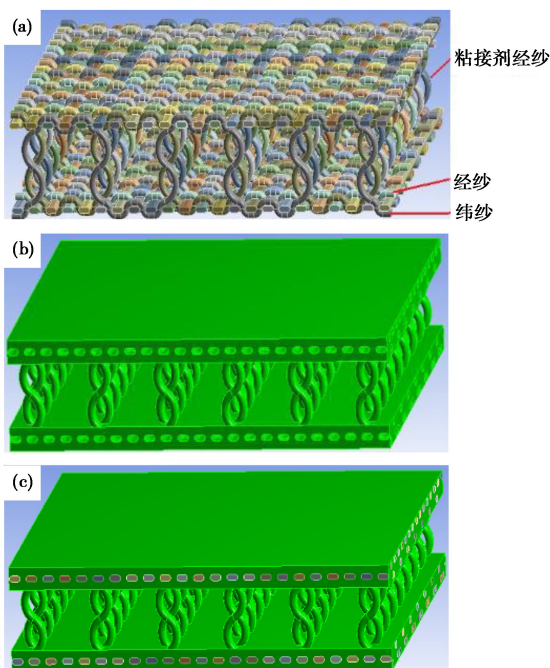


图 1 三维间隔复合材料细观结构模型图  
[(a)纱线系统;(b)树脂系统;(c)复合材料系统]

“Free”。对上下面板右侧面添加位移载荷,其中X方向位移设为“-1.5mm”,Y、Z方向位移均设为“Free”。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 材料的应力和应变分析

三维间隔复合材料在面内压缩载荷作用下的应力、应变云图见图3。

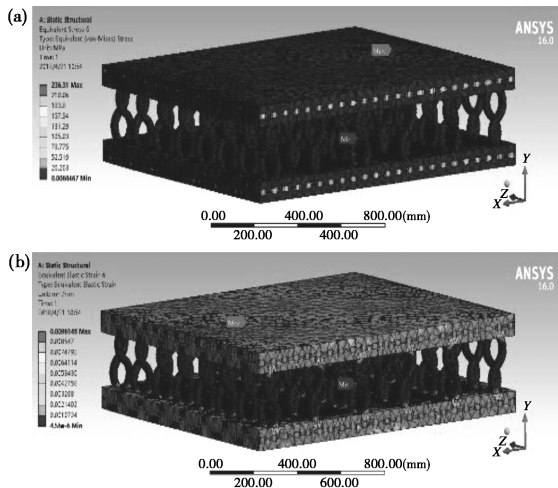


图3 三维间隔复合材料的应力和应变云图  
[(a)应力云图;(b)应变云图]

由图可知,在受到面内压缩载荷作用时,三维间隔复合材料上下面板应力、应变值最大,分别为236.31MPa、 $961.48 \times 10^{-6}$  mm/mm;芯材应力、应变值最小,分别为0.0068467MPa、 $4.56 \times 10^{-6}$  mm/mm。这说明三维间隔复合材料在受到面内压缩载荷作用时,上下面板是承载的主体,最容易发生压缩破坏;芯材承载最小,最不容易破坏<sup>[3-4]</sup>。

三维间隔复合材料面内压缩破坏的实际情况见图4。由图可见,图3结果与实测结果一致。三维间隔复合材料在受到面内压缩载荷作用时,上下面板都会因压缩而发生失稳破坏,这是材料失效的主要原因。因此在实际生产和应用时,应特别加强上下面板的结构强度和刚度的设计。

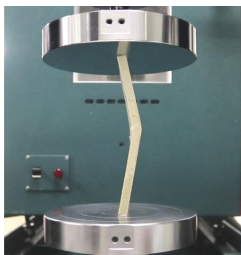


图4 三维间隔复合材料面内压缩的破坏形式图

#### 3.2 组分的应力分析

既然上下面板是承载的主体,有必要进一步分析上下面板的各组分对面内压缩性能的影响规律。图5为三维间隔复合材料经纱、纬纱、接结经纱和树脂等各组分的应力云图。

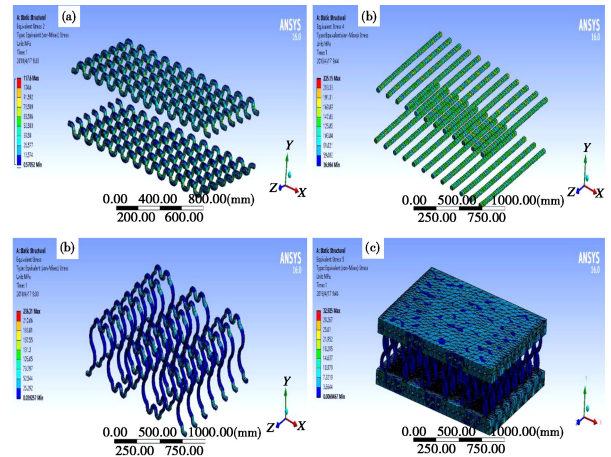


图5 三维间隔复合材料各组分的应力云图

[(a)经纱应力云图;(b)纬纱应力云图;  
(c)接结经纱应力云图;(d)树脂应力云图]

由图可知,在受到面内压缩载荷作用时,(1)经纱全部位于上下面板,应力值范围0.57052~117.6MPa,如图5(a)所示;(2)纬纱全部位于上下面板,应力值范围36.984~235.15MPa,如图5(b)所示;(3)接结经纱部分位于上下面板,部分位于芯材,且上下面板的应力平均值较大,最大值为236.31MPa,如图5(c)所示;(4)树脂部分位于上下面板,部分位于芯材,且上下面板的应力平均值较大,最大值为32.925MPa,如图5(d)所示。

分析可知,(1)纬纱、接结经纱、经纱的平均应力均较大,是承载的主体;树脂的平均应力非常小,是承载的次要因素。(2)纬纱、接结经纱的平均应力值远大于经纱,说明纬纱、接结经纱承载更多。

为了进一步分析材料发生面内压缩破坏的关键区域,采用预制件局部应力放大云图来研究,结果见图6,实际面板形貌破坏情况见图7。

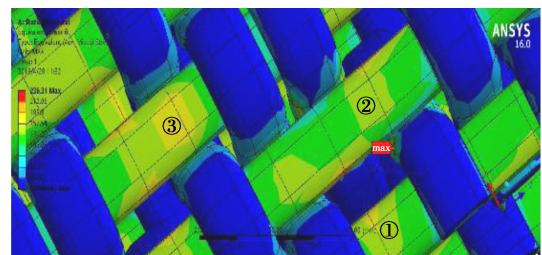


图6 预制件局部应力放大云图



图 7 面板破坏形貌图

分析可知,三维间隔复合材料在承受面内压缩载荷时,应力最大值出现在纬纱与接结经纱交织处,如图中“Max”标记处;且纬纱上平均应力值最大,如图中标记区域“①、②和③”等;同时发现,标记区域①、②和③等随机分布在纬纱上。由此得出结论,三维间隔复合材料在承受面内压缩载荷时,纬纱最容易发生失稳而导致材料破坏,且断口分布是随机的,这一结论与实验结果也是一致的。

### 3.3 组分的应变分析

图 8 为三维间隔复合材料经纱、接结经纱、纬纱和树脂等各组分的应变云图。

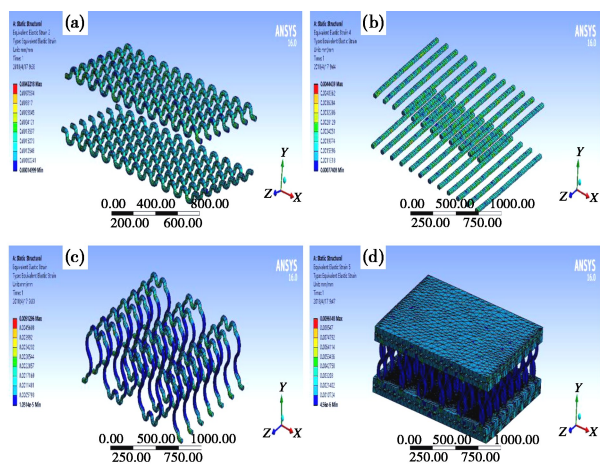


图 8 三维间隔复合材料各组分的应变云图

[(a) 经纱应变云图; (b) 纬纱应变云图;

(c) 接结经纱应变云图; (d) 树脂应变云图]

由图可知,三维间隔复合材料在面内压缩载荷达到 1.5mm 时, (1) 经纱全部位于上下面板, 应变值范围  $1.4999 \times 10^{-4} \sim 4.2218 \times 10^{-3}$  mm, 如图 8(a) 所示; (2) 纬纱全部位于上下面板, 应变值范围  $7.7408 \times 10^{-4} \sim 4.4439 \times 10^{-3}$  mm, 如图 8(b) 所示; (3) 接结经纱部分位于上下面板, 部分位于芯材, 应变值范围  $1.0514 \times 10^{-5} \sim 5.1296 \times 10^{-3}$  mm, 如图 8(c) 所示; (4) 树脂部分位于上下面板, 部分位于芯材, 应变值范围  $4.56 \times 10^{-6} \sim 9.6148 \times 10^{-3}$  mm, 如图 8(d) 所示。由此可见, 经纱、接结经纱、纬纱的应

变值比较接近; 而树脂的应变值较大, 差不多是纤维的 2 倍。说明材料在承受面内压缩载荷作用时, 树脂与纤维已发生严重的脱粘现象。

## 4 结论

(1) 从宏观角度观察, 材料在受到面内压缩载荷作用时, 上下面板应力较大, 容易发生破坏; 芯材应力较小, 不容易发生破坏。

(2) 从细观角度观察, 上下面板的经纱、纬纱、接结经纱的应力较大, 是承载主体; 树脂的应力较小, 起次要作用。

(3) 当面内压缩位移载荷达到 1.5mm 时, 材料的破坏模式主要是上下面板树脂破碎、树脂与纤维严重脱粘等。

## 参考文献

- [1] Li M, Wang S K, Zhang Z G. Effect of structure on the mechanical behaviors of three-dimensional spacer fabric composites[J]. Applied Composite Materials, 2009, 16(1): 1-14.
- [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. 三维间隔连续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] 郭瑜超, 王立凯, 段世慧. 复杂多边形蜂窝夹芯面内等效剪切模量研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(2): 25-28.
- [9] Li M, Wu L Z, Ma L, et al. Structural response of all composite pyramidal truss core sandwich columns in end compression[J]. Composite Structures, 2011, 93(8): 1964-1972.
- [10] 陈浩然, 孙直, 石姗姗, 等. 具芳纶短纤维增韧界面的碳纤维夹芯结构性能、机理和分析[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(1): 103-110.
- [11] 王兵, 冯吉才, 李庆飞, 等. 纤维柱增强泡沫夹芯的等效力学性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(3): 29-33.
- [12] 马超, 邓宗白. 四边简支硬夹芯夹层板的弯曲问题研究[J]. 应用力学学报, 2013, 30(2): 196-200.

收稿日期: 2018-12-20