

# 三维机织复合材料侧压性能有限元分析

冯古雨<sup>1</sup> 曹海建<sup>1,2</sup> 钱 坤<sup>1</sup> 卢雪峰<sup>1</sup> 俞科静<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** 使用 Pro/E 5.0 构建出一种三维角联锁机织复合材料细观结构模型,利用 ANSYS 分析侧压载荷下复合材料中纤维与树脂应力应变分布情况,预测复合材料在侧压载荷下的力学行为,并对比复合材料侧压性能。结果表明:复合材料侧压性能表现出各向异性,纬向侧压性能好于经向;复合材料中纤维承载更多的载荷作用,树脂发生更大的变形;轴向平行于侧压方向的纤维承受更大的载荷作用,轴向垂直于侧压方向的纤维承受较小的载荷作用。

**关键词** 三维机织复合材料,侧压性能,有限元分析

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.06.006

## Finite Element Analysis on Lateral Compressive Property of 3D Woven Composite

FENG Guyu<sup>1</sup> CAO Haijian<sup>1,2</sup> QIAN Kun<sup>1</sup> LU Xuefeng<sup>1</sup> YU Kejing<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** Mapping software Pro/E 5.0 was used to build structure models of 3D angle-interlock composite in warp and weft directions. Finite element analysis software ANSYS was used to simulate the lateral compressive properties of the 3D composite in warp and weft directions. The mechanical behavior of the composite was predicted by investigating the stress and strain distribution of fiber and resin under lateral compressive loads. In addition, the lateral compressive property between warp and weft directions was compared with each other. Results showed that the lateral compressive property of the 3D composite is obviously anisotropic, behaving as the lateral compressive property in weft direction better than that in warp direction. Fiber made the major contribution for subjecting the load, while the resin made the major contribution for deformation. Fibers parallel to the lateral direction are subjected to larger load, while fibers perpendicular to the lateral direction are subjected to smaller load.

**Key words** 3D Woven composite, Lateral property, Finite element analysis

### 0 引言

三维机织复合材料是一种以三维机织物作为增强体,环氧树脂作为基体的新型纤维增强复合材料<sup>[1-3]</sup>。相比于传统的二维机织复合材料及层合板结构,三维角联锁机织复合材料由一体成型的三维机

织物作为增强体,其特殊结构中弯曲的经纱上存在复合材料厚度方向上的分量,这种特殊的结构使三维机织复合材料拥有更强的整体性及层间剪切强度<sup>[4-6]</sup>。三维机织复合材料的出现增加了纤维增强复合材料的应用范围,在交通运输、航天航空、制造加工以及国

收稿日期:2016-03-07;修回日期:2016-06-27

基金项目:国家自然科学基金(51302110);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2014023-14, BY2014023-15);中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP41501);江苏高校优势学科建设工程资助项目

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

通讯作者:曹海建,博士,副教授,主要从事轻量化复合材料的制备及应用。E-mail:caohaijian20010@163.com

防等领域有着重要的应用价值<sup>[7]</sup>。

侧压性能是指复合材料的侧面受到压缩载荷作用时复合材料所表现出的力学行为及应力应变分布情况等<sup>[8]</sup>。在实际应用中,侧压载荷是三维机织复合材料所承受的较为常见的载荷,所以侧压性能作为复合材料的重要力学性能被众多学者分析研究<sup>[9-10]</sup>。目前,对于三维机织复合材料侧压性能的研究主要是通过实验、测试的方法,但实验过程中无法避免的误差及结果的宏观性使得这种方法不能提供更加准确和详细的结果数据<sup>[11-13]</sup>。有限元分析方法的出现解决了这个问题,数值模拟的手段避免了误差的出现,并可以提供更加详细的结果<sup>[14-15]</sup>。

本文使用三维绘图软件 Pro/E 构建出三维角联锁机织复合材料侧压测试细观模型,通过有限元分析软件 ANSYS 对其侧压性能进行模拟。通过分析复合材料中纤维、树脂的应力应变分布情况,考察复合材料在侧压作用下的力学行为,并探究复合材料侧压性能。

## 1 模型建立

### 1.1 基本假设

由于复合材料由纤维增强体和树脂基体共同组成,其内部结构错综复杂,模型构建上存在一定难度。因此在模型建立时,设定一些基本假设以降低构建模型难度,并减少计算机工作量。具体的基本假设如下<sup>[16]</sup>。

(1)在经纬纱相互挤压的作用下,经纬纱的横截

面呈跑道型,如图 1 所示。纤维在轴向假设为连续的长丝束。

(2)复合材料在复合成型过程中,树脂基体中及纤维与树脂的界面上没有明显的气泡、裂痕等容易形成应力集中点的缺陷。

(3)在加工过程中纤维及树脂的性能没有遭到破坏,预制体的结构保存完整。

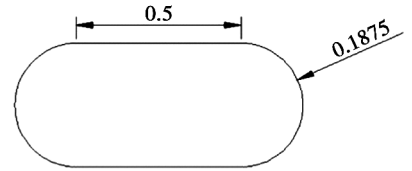


图 1 经纬纱横截面尺寸示意图

Fig.1 Diagram of fibers cross section

### 1.2 模型建立

通过绘图软件 Pro/E 的扫绘功能分别构建出复合材料中经纬纱线,并通过装配功能将经纬纱装配成复合材料预制体,侧压测试样条预制体分别如图 2 中(a)(d)所示。通过切除功能建立出树脂基体的结构模型,侧压测试样条树脂基体模型如图 2 中(b)(e)所示。将预制体与树脂基体装配在一起形成复合材料的侧压模型分别如图 2 中(c)(f)所示。构建出的复合材料预制体模型中经纱间距  $P_j = 3.33$  mm,纬纱间距  $P_w = 3$  mm,纬纱层数为 3 层;复合材料模型的尺寸为 51 mm×15 mm×2.625 mm。

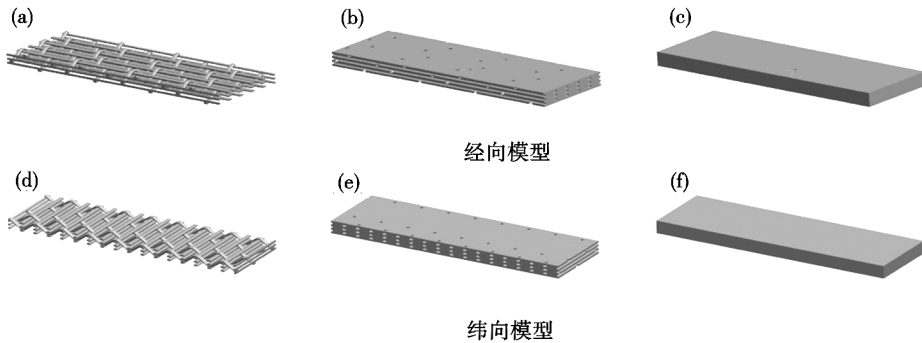


图 2 复合材料侧压细观模型

Fig.2 Micro-structural model of 3D composites

## 2 模拟计算

### 2.1 各组分性能参数

在 ANSYS Engineering Date 中,定义复合材料中纤维与树脂的材料分别为 2 400 tex 无捻玻纤粗纱和环氧树脂 E51。根据之前的研究,输入两种材料的基本结构参数,如表 1 所示。

表 1 复合材料结构模型材料参数

Tab.1 Parameter of material in structure model of composites

材料	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	弹性模量/GPa	泊松比	拉伸强度/MPa
E 玻璃纤维	2.5	70	0.25	1000
E51 环氧	1.2	1	0.38	70

### 2.2 网格划分与边界条件设定

将由 Pro/E 构建出的复合材料测试模型导入 ANSYS 有限元分析软件中,通过布尔运算将预制体中的经纬纱连接成一个整体,在分析中作为一个整体看待。在 Mechanical 中定义纤维与树脂分别为相应的材料。

使用 0.5 mm 的六面体网格对复合材料细观结构模型进行扫略式的网格划分。相比于其他的网格模式,在相同的计算精度下,六面体网格数量更少,计算机需承受的计算负担更小;而扫略式的划分方式则更

为简便。经过划分后,复合材料测试模型如图3所示,其中经向测试模型中纤维由102 223个节点和48 258个网格单元组成,树脂由179 944个节点和106 436个网格单元组成。纬向测试模型中纤维由64 212个节点和29 277个网格单元组成,树脂由118 760个节

点和70 837个网格单元组成。

对于模型的边界条件设定为普通循环边界条件,复合材料的一个侧面设定 Fixed Support 完全固定边界条件,与之相对的侧面施加5 kN的载荷,其他4个侧面则设置为 Free 完全自由边界条件。

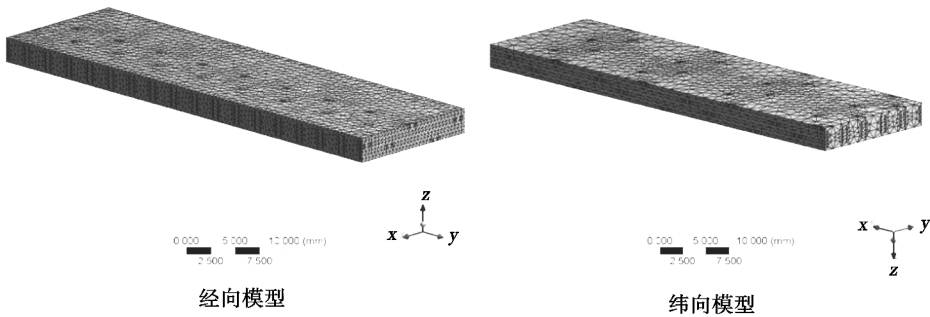


图3 划分网格后的复合材料结构模型

Fig.3 Structural model of 3D composites after meshing

### 3 结果与分析

#### 3.1 复合材料侧压力学性能

复合材料侧压模型中纤维、树脂的应力应变分布云图如图4所示。

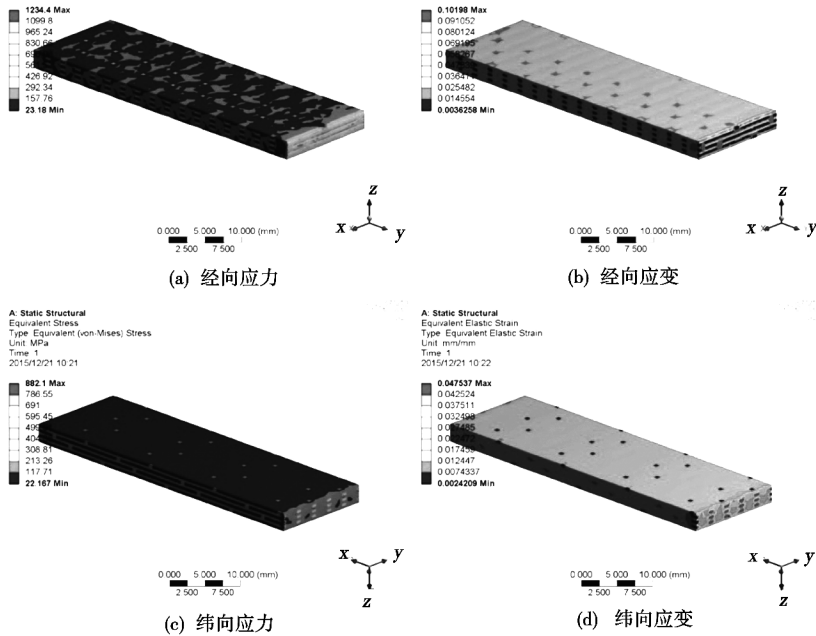


图4 复合材料侧压应力、应变分布

Fig.4 Distribution of side compression stress and shear strain of 3D composite

由图4及数据分析可知,复合材料在经向承受5 kN侧压载荷作用时其最大压缩应力为1 234.4 MPa,最小压缩应力为23.18 MPa;最大压缩应变为10.198%,最小压缩应变为0.362 58%。复合材料在纬向承受5 kN侧压载荷作用时其最大压缩应力为882.1 MPa,最小压缩应力为22.167 MPa;最大压缩应变为4.753 7%,最小压缩应变为0.242 09%。

综合以上数据分析,在同样的侧压载荷作用下,三维角连锁机织复合材料在经向受到侧压载荷作用时,表现出更大的压缩应力和压缩应变。这说明复合材料表现出明显的侧压各向异性,且在纬向的侧压性能好

于经向。同样的侧压载荷下,经向更容易发生破坏。由于单独对于复合材料整体的力学性能分析较为复杂,将纤维组份与树脂组份分开,分别作为单独的承载个体进行分析。

#### 3.2 复合材料各组份侧压力学性能

复合材料侧压试样中纤维与树脂组分应力、应变分布情况如图5、图6所示。由图5分析可知,复合材料在经向侧压载荷作用下发生压缩变形,经纱的屈曲程度增加,纬纱形状相对保持完好。与纬纱相比,经纱表现出稍大的压缩应力于弯曲应变。由图6分析,复合材料在纬向侧压载荷作用下,伸直的纬纱相对于弯

曲的经纱在压缩应力、应变上,表现出较为明显的差异。轴向平行于侧压载荷方向的纬纱在压缩应力与压缩应变方便均大于轴向垂直于侧压载荷方向的经纱。出现这种差异的原因是,经向侧压载荷下,经纱承载较多载荷作用,但其屈曲的结构决定了他可以通过一定

的变形来减少载荷的作用;在纬向侧压载荷作用下,纬纱承载较多载荷作用,由于其伸直的结构,在承受载荷作用时表现出相对较大的压缩应力,同时发生较小的变形。

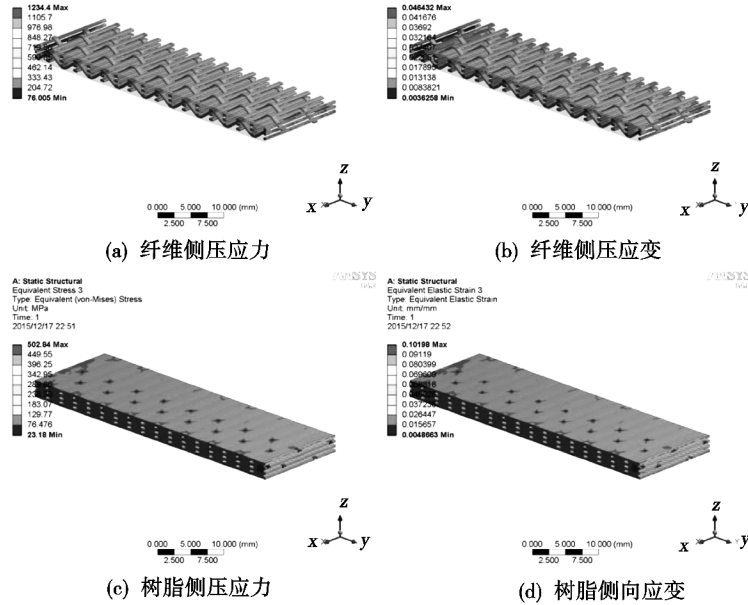


图 5 经向复合材料各组份侧压应力、应变分布

Fig.5 Distribution of side compression stress and shear strain of fibers and resin in warp directions

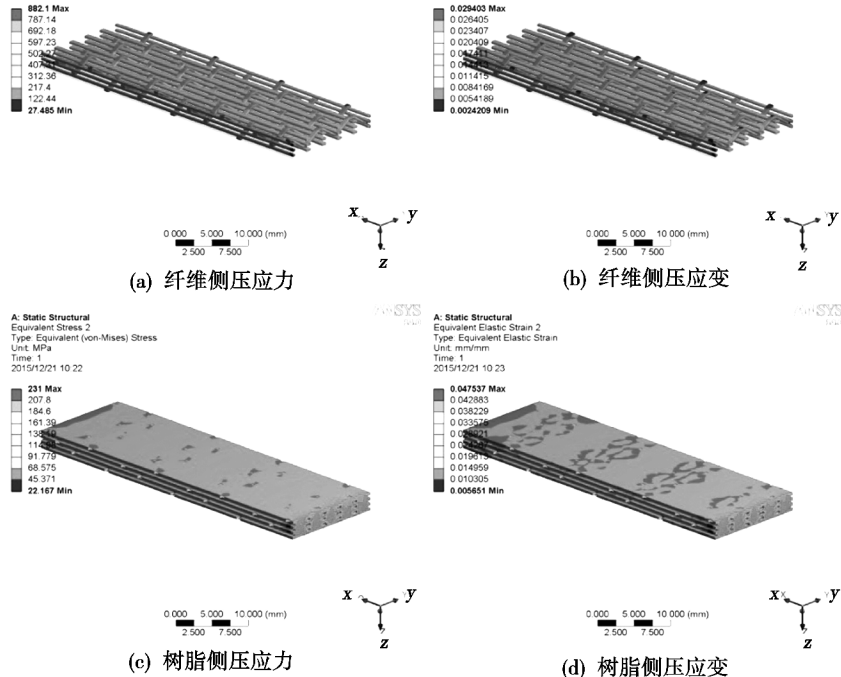


图 6 纬向复合材料各组份侧压应力、应变分布

Fig.6 Distribution of side compression stress and shear strain of fibers and resin in weft directions

对于复合材料侧压试样的差异主要是由于轴向平行于侧压载荷方向的经纬纱密度的差异造成的。密度较小的经纱在作为主要承载部分承载侧压载荷时,每根经纱上分配的压缩载荷大于密度较大的纬纱作为主要承载部分承载侧压载荷时,每根纬纱上所分

配到的压缩载荷。所以在相同侧压载荷的作用下,三维角联锁机织复合材料在经向更容易发生破坏。

对比复合材料中纤维与树脂的压缩应力应变分布情况。无论在经向还是纬向侧压载荷作用下,相对于树脂基体纤维体在承受载荷作用时表现出较大的

压缩应力和较小的压缩应变。这是由于纤维增强体拥有更大的弹性模量与拉伸强度,而树脂基体则表现出更小的弹性模量与较大的泊松比,在复合材料承受侧压载荷时纤维作为主要承载体承受较大的载荷作用,为树脂基体作为次要承载体承受较小的载荷作用,但由于其本身属性,树脂基体发生较大的变形。

#### 4 结论

(1) 三维机织复合材料的侧压性能表现出明显的各向异性,在同样大小的侧压载荷作用下复合材料在经向更容易发生破坏。

(2) 三维机织复合材料预制体中轴向平行于侧压载荷方向的纤维相对于轴向垂直于载荷方向的纤维,承受更多的载荷作用,表现出更大的压缩应力与压缩应变。

(3) 三维机织复合材料中纤维作为主要承载体,表现出更大的压缩应力;树脂作为次要承载体,表现出更大的压缩应变。

#### 参考文献

[1] COX B N, DADKHAH M S, MORRIS W L. On the tensile failure of 3D woven composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, 27(6): 447-458.

[2] MOURITZ A P. Tensile fatigue properties of 3D composites with through-thickness reinforcement[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(12): 2503-2510.

[3] VEEDU V P, CAO A, LI X, et al. Multifunctional composites using reinforced laminae with carbon-nanotube forests[J]. *Nature Materials*, 2006, 5(6): 457-462.

[4] CHOU S, CHEN H C, WU C C. BMI resin composites reinforced with 3D carbon-fibrefabrics[J]. *Composites Science and Technology*, 1992, 43(2): 117-128.

[5] KUO W S. The role of loops in 3D fabric composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(9): 1835-1849.

[6] 冯古雨, 曹海建, 钱坤. 树脂含量对装甲车体内饰用轻质复合材料弯曲性能的影响[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45

(5): 26-30.

[7] MAHESH S, PHOENIX S L, BEYERLEIN I J. Strength distributions and size effects for 2D and 3D composites with weibull fibers in an elastic matrix[J]. *International Journal of Fracture*, 2002, 115(1): 41-85.

[8] 赵景丽. 蜂窝夹层结构复合材料的性能研究[D]. 西北工业大学, 2002.

[9] AUSIELLO P, APICELLA A, DAVIDSON C L. Effect of adhesive layer properties on stress distribution in composite restorations—a 3D finite element analysis[J]. *Dental Materials*, 2002, 18(4): 295-303.

[10] AUSIELLO P, RENGO S, DAVIDSON C L, et al. Stress distributions in adhesively cemented ceramic and resin-composite Class II inlay restorations; a 3D-FEA study[J]. *Dental Materials*, 2004, 20(9): 862-872.

[11] AUSIELLO P, APICELLA A, DAVIDSON C L, et al. 3D-finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar, restored with adhesive resin-based composites[J]. *Journal of Biomechanics*, 2001, 34(10): 1269-1277.

[12] LI W, SWAIN M V, Li Q, et al. Towards automated 3D finite element modeling of direct fiber reinforced composite dental bridge[J]. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2005, 74(1): 520-528.

[13] GENOVESE K, LAMBERTI L, PAPPALLETTERE C. Finite element analysis of a new customized composite post system for endodontically treated teeth[J]. *Journal of Biomechanics*, 2005, 38(12): 2375-2389.

[14] HOU T Y, WU X H. A multiscale finite element method for elliptic problems in composite materials and porous media[J]. *Journal of Computational Physics*, 1997, 134(1): 169-189.

[15] HA S K, KEILERS C, CHANG F K. Finite element analysis of composite structures containing distributed piezoceramic sensors and actuators[J]. *AIAA Journal*, 1992, 30(3): 772-780.

[16] 马雷雷, 田伟, 冯兆行, 等. 三维纺织复合材料准静态拉伸实验的有限元模拟[J]. *浙江理工大学学报*, 2010(3): 383-386.