

# 间隙率对三轴向机织复合材料弹性性能的影响

Effect of Gap Ratio on Elastic Properties  
of Triaxial Weave Fabric Composites

白江波<sup>1,2</sup>, 熊峻江<sup>1</sup>, 高军鹏<sup>2</sup>, 益小苏<sup>2</sup>

(1 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191;

2 北京航空材料研究院 先进复合材料国家重点实验室, 北京 100095)

BAI Jiang-bo<sup>1,2</sup>, XIONG Jun-jiang<sup>1</sup>, GAO Jun-peng<sup>2</sup>, YI Xiao-su<sup>2</sup>

(1 School of Transportation Science and Engineering, Beihang University,

Beijing 100191, China; 2 Science and Technology on Advanced Composites

Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 采用有限元分析方法研究了间隙率对三轴向机织复合材料弹性性能的影响。首先, 根据三轴向机织复合材料几何构型和基本参数, 建立了三轴向机织复合材料的面密度和单胞特征边长与间隙率之间的关系; 然后, 建立了三轴向机织复合材料的有限元模型, 利用该模型预测了拉伸、压缩和剪切刚度并与文献的实验结果进行了对比, 证明了模型的有效性; 最后, 分析了间隙率对弹性性能的影响。研究发现, 拉伸、压缩和剪切刚度随间隙率的增加而显著下降, 而比刚度和泊松比随间隙率的增加变化较小。

**关键词:** 三轴向机织复合材料; 间隙率; 弹性性能; 拉伸刚度; 压缩刚度; 剪切刚度; 比刚度

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.03.003

**中图分类号:** TB332; V258 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)03-0014-07

**Abstract:** The effect of gap ratio on elastic properties of triaxial weave fabric (TWF) composites was numerically investigated by FEA method. Firstly, based on geometry construction and basic parameters of TWF composites, the relationship was determined between both surface density and feature length of representative unit cell and gap ratio. Secondly, the FEA model of TWF composites was established for predicting tension, compression and tear stiffnesses. The predicted results correlate well with experiments of the literature. Finally, the effect of the gap ratio on elastic properties of TWF composites was analyzed. It is found that the tension, compression and tear stiffnesses significantly decrease with the increasing of gap ratio, while the specific stiffness and Poisson's ratio change insignificantly.

**Key words:** triaxial weave fabric (TWF) composite; gap ratio; elastic property; tension stiffness; compression stiffness; tear stiffness; specific stiffness

先进复合材料由于具有高的比刚度和比强度, 以及性能的可设计性, 因此在减重需求迫切的航空航天领域正得到日益广泛的研究和应用<sup>[1]</sup>。纺织复合材料属于结构型材料, 可根据工程应用需求, 对其微观结构进行设计, 从而实现材料的宏观性能指标。纺织复合材料的弹性性能参数对于复合材料结构设计非常关键, 因此, 国内外很多研究人员开展了这方面的工作<sup>[2-6]</sup>。王瑞等<sup>[3]</sup>利用细观力学的代表体积元法建立了用于预测平纹织物复合材料弹性模量的解析模型, 分析了细观结构与宏观性能之间的关系, 通过该方法

预测结果与实验结果吻合良好。Xiong 等<sup>[7,8]</sup>将平纹机织复合材料经纬两个方向弯曲的纤维束抽象为正弦曲梁模型, 更加接近材料的真实构型, 基于能量法预测了拉伸和压缩弹性模量, 与实验结果吻合良好。Nguyen 等<sup>[9]</sup>提出了一种预测碳纤维平纹机织复合材料剪切模量的解析模型, 将纤维束简化梁单元, 预测了织物的初始滑移区、弹性变形范围和剪切模量, 与实验结果吻合良好。李典森等<sup>[10]</sup>在四步法方型三维机织复合材料细观结构单胞模型的基础上, 将纱线横截简化为六边形面, 建立了实体有限元模型, 预测了材料的

弹性常数,并分析了编织角和纤维体积含量对弹性常数的影响规律,预测结果与实验结果吻合良好。Chaphalkar 等<sup>[11]</sup>基于经典层合板理论,提出了一种预测斜纹织物复合材料的拉伸和剪切模量的解析模型,预测结果与实验结果吻合良好。Kueh 等<sup>[12]</sup>基于连续基尔霍夫板理论建立了单层三轴向机织复合材料的线弹性响应模型,通过横观各向同性的三维梁构建了单胞模型,利用有限元方法得到单胞的等效平板刚度矩阵(ABD 矩阵),再利用刚度矩阵推算出面内拉伸、压缩和剪切等弹性性能,并与实验结果进行比较,二者吻合良好。Aoki 等<sup>[13]</sup>采用与 Kueh 等<sup>[12]</sup>类似的方法,基于有限元分析基础上建立了三轴向机织复合材料的半解析模型,区别在于 Aoki 等通过实体单元建模,预测了三点弯曲和纯弯曲的弹性性能,以及热膨胀系数,与实验结果吻合良好。Kueh 等<sup>[14]</sup>进一步提出了三轴向机织复合材料超弹性应变能密度函数公式,该能量函数由基体、纤维束和相互作用三部分组成,表现出非线性的应力-应变响应,并且进行了实验验证,结果吻合良好。Zhao 等<sup>[15]</sup>采用有限元和实验方法研究了三轴向机织复合材料承受单一拉伸载荷的渐进失效过程,分别采用最大应力准则、霍夫曼准则和蔡-吴准则预测了失效过程,与实验结果吻合良好。

从以上论述可知,已有文献针对纺织复合材料弹性性能开展了解析、有限元和实验方法的研究。其中三轴向机织复合材料,由于由三个方向(0°,60°和120°)纤维束编织而成,可通过树脂预浸并固化,形成具有一定刚度的二维单层机织复合材料结构,因此,这种结构在宏观尺度上的力学性能表现为准各向同性,所以在超低面密度复合材料结构中有很大的应用潜力。本工作对三轴向机织复合材料首先进行了几何构型分析,在此基础上建立了拉伸/压缩和剪切的有限元分析模型,将有限元预测的结果与文献中的实验结果

进行了对比,结果吻合良好,证明了模型的有效性,并且进一步研究了间隙率对三轴向机织复合材料弹性性能的影响,可为三轴向机织复合材料在工程应用中的超轻量化设计提供参考。

1 几何构型及基本参数

三轴向机织复合材料是由三个方向的纤维束编织而成。为便于对比分析和保证基本材料参数的可靠性,本工作分析时使用纤维束材料及其参数和几何构型形式与 Kueh 等<sup>[12]</sup>的研究报告一致,如表 1 和表 2 所示。所有模型中丝束的宽度不变,即 0.9mm,丝束的厚度为  $h$ 。取出一个单胞(如图 1 所示),单胞边长分别为  $a$  和  $b$ ,由中性轴组成的正六边形(虚线部分)特征边长为  $L$ ,通过几何关系可知:

$$\begin{cases} a = 2L \\ b = 2\sqrt{3}L \end{cases} \tag{1}$$

三轴向机织复合材料的间隙率  $k$  定义为单胞间隙面积比单胞总面积,可表示为

$$k = \frac{A_{\text{gap}}^{\text{T}}}{A_{\text{total}}^{\text{T}}} \tag{2}$$

式中: $A_{\text{gap}}^{\text{T}}$ 为单胞间隙面积, $A_{\text{total}}^{\text{T}}$ 为单胞总面积,分别可以表示为

$$\begin{cases} A_{\text{total}}^{\text{T}} = 4\sqrt{3}L^2 \\ A_{\text{gap}}^{\text{T}} = 4\sqrt{3}L^2 - (10.8L - 5.62) \end{cases} \tag{3}$$

将式(3)代入式(2),可得

$$L = \frac{10.8 + \sqrt{116.64 - 155.74(1 - k)}}{13.856(1 - k)} \tag{4}$$

一个单胞的纤维面密度为

$$\rho_{\Lambda} = \frac{1.599 \times 12L \times 0.9 \times h \times 10^{-3}}{4\sqrt{3}L^2 \times 10^{-6}} \tag{5}$$

表 1 纤维与基体材料性能

Table 1 Fibre and matrix properties

Material	Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Longitudinal modulus $E_1/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	Transverse modulus $E_2/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	Shear modulus $G_{12}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	Poisson's ratio $\nu_{12}$	Volume fraction/%
T300 fibre	1760	233000	23100	8963	0.2	65
Hexcel 8552 matrix	1301	4670	4670	1704	0.37	35

表 2 纤维束材料性能

Table 2 Tow material properties

Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Longitudinal modulus $E_1/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	Transverse modulus $E_2 = E_3/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	Shear modulus $G_{12} = G_{13}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	Shear modulus $G_{23}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	Poisson's ratio $\nu_{12} = \nu_{13}$
1599	153085	12873	4408	4384	0.26

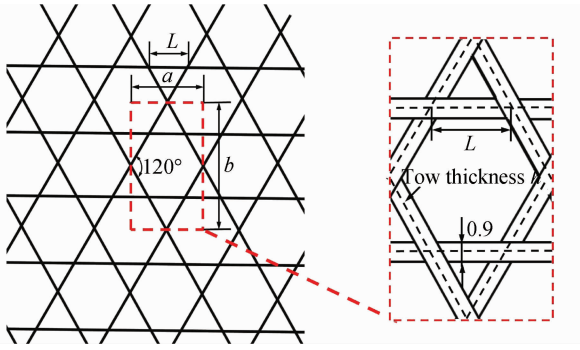


图1 三轴向机织复合材料几何构型及单元几何参数

Fig. 1 Geometry construction and basic parameters of TWF composites

将式(5)进一步整理,可得

$$\rho_A = \frac{2492.6h}{L} \quad (6)$$

将式(4)代入式(6),得

$$\rho_A = \frac{34537.4656 \times (1-k)h}{10.8 + \sqrt{116.64 - 155.74(1-k)}} \quad (7)$$

式(4)和式(7)建立了三轴向机织复合材料单元中性轴组成的正六边形特征边长  $L$  和面密度  $\rho_A$  与间隙率  $k$  之间的关系,在不同纤维束厚度下的关系如图2厚度时面密度与间隙率之间的关系,同时需要指出当

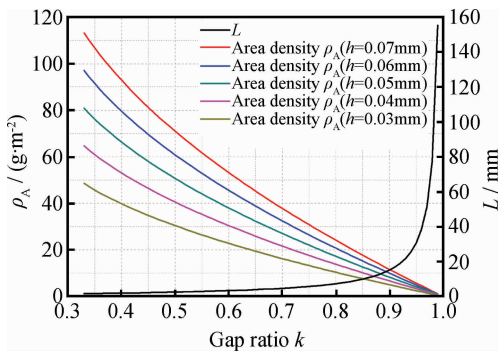


图2 面密度  $\rho_A$  与边长  $L$  随间隙率  $k$  的变化

Fig. 2 Surface density  $\rho_A$  and feature length  $L$  with increase of gap ratio  $k$

丝束宽度一定,最小间隙率极限值为  $1/3$ ,即间隙率的取值范围为  $k \in (1/3, 1)$ ,这是由三轴向机织复合材料的几何构型决定的。

## 2 计算模型及有效性验证

### 2.1 计算模型

在前面的几何构型的基础之上,采用有限元方法研究了间隙率改变时对三轴向机织复合材料的拉伸刚度、压缩刚度、剪切刚度和泊松比等面内弹性性能和比刚度的影响,采用商用软件 ANSYS 中的实体单元进行建模和分析。

为了尽可能减少边界条件对分析结果的影响,所有分析模型均采用三胞模型(如图3所示)。对于  $0^\circ$  拉伸/压缩模型(如图3(a)所示):约束端约束  $x$  向自由度,并且在约束端选择一个关键点约束所有自由度;在加载端施加位移载荷  $u_x$ ;计算分析后可得到约束端的支反力合力  $F_x$  及  $y$  向位移  $u_y$ 。 $0^\circ$  拉伸/压缩刚度和泊松比可表示为

$$\begin{cases} S_x = \frac{aF_x}{3bu_x} \\ v_{xy} = -\frac{au_y}{3bu_x} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中为区别拉伸和压缩刚度,  $S_{tx}$  和  $S_{cx}$  分别表示拉伸和压缩刚度;比刚度只需用相应刚度除以面密度即可。

对于  $90^\circ$  拉伸/压缩模型(如图3(b)所示):约束端约束  $y$  向自由度,并且在约束端选择一个关键点约束所有自由度;在加载端施加位移载荷  $u_y$ ;计算分析后可得到约束端的支反力合力  $F_y$  及  $x$  向位移  $u_x$ 。 $90^\circ$  拉伸/压缩刚度表示为

$$S_y = \frac{bF_y}{3au_y} \quad (9)$$

式(9)中为区别拉伸和压缩刚度,  $S_{ty}$  和  $S_{cy}$  分别表示拉伸和压缩刚度;比刚度只需用相应刚度除以面密

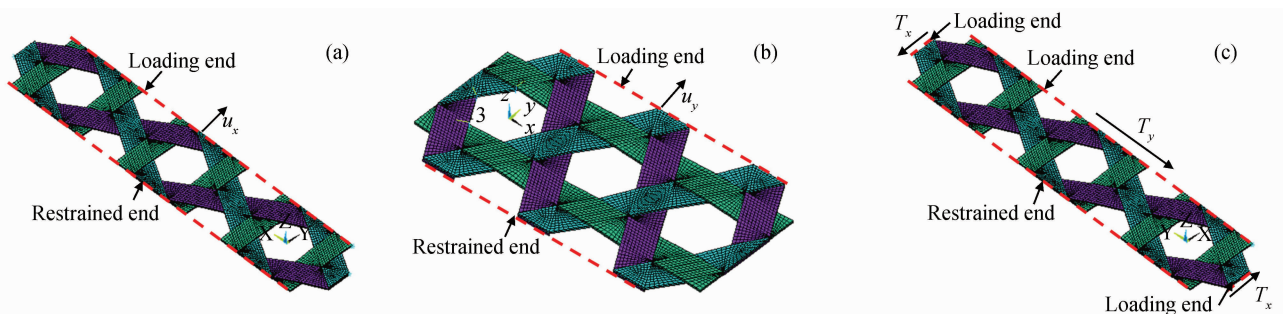


图3 有限元模型 (a)拉伸模型;(b)压缩模型;(c)剪切模型

Fig. 3 FEA models (a) tension/compression model of  $0^\circ$  direction; (b) tension/compression model of  $90^\circ$  direction; (c) tear model

度即可。

对于剪切模型(如图 3(c)所示):约束端约束全部自由度,加载端(三个端面)先分别进行节点耦合,形成刚性端面,在大加载端面约束所有转动自由度和  $z$  向自由度并在中心耦合节点施加一个  $y$  向力  $T_y$ ,在两个小端面分别施加一对相反的  $x$  向力  $T_x$ ,可形成剪切受力状态,根据力矩平衡可得

$$T_y a = T_x 3b \quad (10)$$

将式(1)代入式(10)中,可得

$$T_y = 3\sqrt{3}T_x \quad (11)$$

计算分析后可得到大加载端在  $y$  向位移  $u_y$ ,剪切应变可近似表示为

$$\gamma_{xy} = \frac{u_y}{a} \quad (12)$$

剪切刚度可表示为

$$S_{xy} = \frac{T_y}{3b\gamma_{xy}} \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)中,可得

$$S_{xy} = \frac{aT_y}{3bu_y} \quad (14)$$

### 2.2 有效性验证

为了验证上述模型的有效性,根据 Kueh 等<sup>[12]</sup>的研究报告几何参数(纤维束宽度为 0.9mm,厚度为 0.07mm;纤维束之间搭接比较致密,三角形间隙非常小)和材料参数(如表 1 和表 2 所示)建模,并且与他们实验测定的结果进行了对比。由于三轴向机织复合材料一定会存在三角形的间隙(如图 4 所示),只有当完全没有三角形的间隙时它的间隙率  $k$  才为 1/3,但实际情况下这是不可能的,所以建模时将  $k$  取 0.34 来进行近似。各刚度分析模型的变形位移云图如图 5 所示,有限元分析结果与 Kueh 等<sup>[12]</sup>的研究报告的实验结果对比情况如表 3 所示,由表 3 可知,有限元分析与实验吻合的很好,证明前面建立的分析模型是有效的。

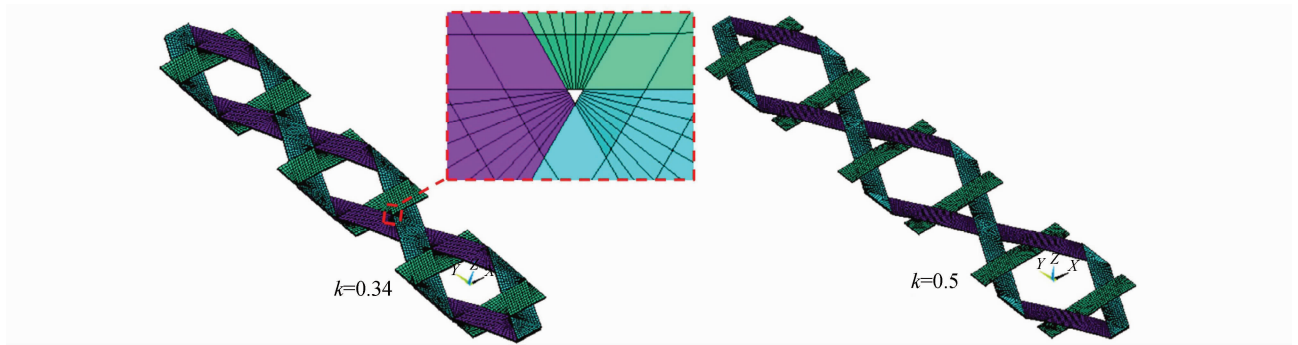


图 4 三轴向机织复合材料三胞模型

Fig. 4 Three representative unit cell model of TWF

表 3 预测与实验结果

Table 3 Predicted and measured results

Properties	Extensional stiffness $S_{tx}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	Compression stiffness $S_{tx}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	Extensional stiffness $S_{cy}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	Compression stiffness $S_{cy}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	Shear stiffness $S_{xy}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	Poisson's ratio $\nu_{xy}$
Prediction	2237.3	2237.3	1536.7	1536.7	702	0.531
Measurement <sup>[12]</sup>	2111.2	2244.5	N/A	N/A	777.1	0.6
Relative deviation	6.00%	0.30%	N/A	N/A	9.70%	11.50%

### 3 间隙率对弹性性能的影响

在前面 2.2 节证明了分析模型的有效性之后,下面进一步分析三轴向机织复合材料的面内刚度随间隙率的变化。仍然使用 Kueh 等<sup>[12]</sup>的研究报告中的材料参数,纤维束宽度固定为 0.9mm,厚度固定为 0.06mm。图 7 至图 12 给出了  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向拉伸/压缩刚度、剪切刚度和泊松比以及比刚度随间隙率  $k$  的

变化,图 6 给出了当  $h=0.06, k=0.5$  时,各刚度分析模型的变形位移云图,可知:(1) $0^\circ$  方向拉伸刚度和压缩刚度相等, $90^\circ$  方向拉伸刚度和压缩刚度也相等;(2) $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向拉伸/压缩刚度以及剪切刚度随  $k$  的增加而减小,泊松比随  $k$  的增加略微增加(几乎不变);(3) $0^\circ$  方向比拉伸/压缩刚度随  $k$  的增加而略微增加, $90^\circ$  方向比拉伸/压缩刚度随  $k$  的增加而略微减小,比剪切刚度随  $k$  的增加几乎不变。

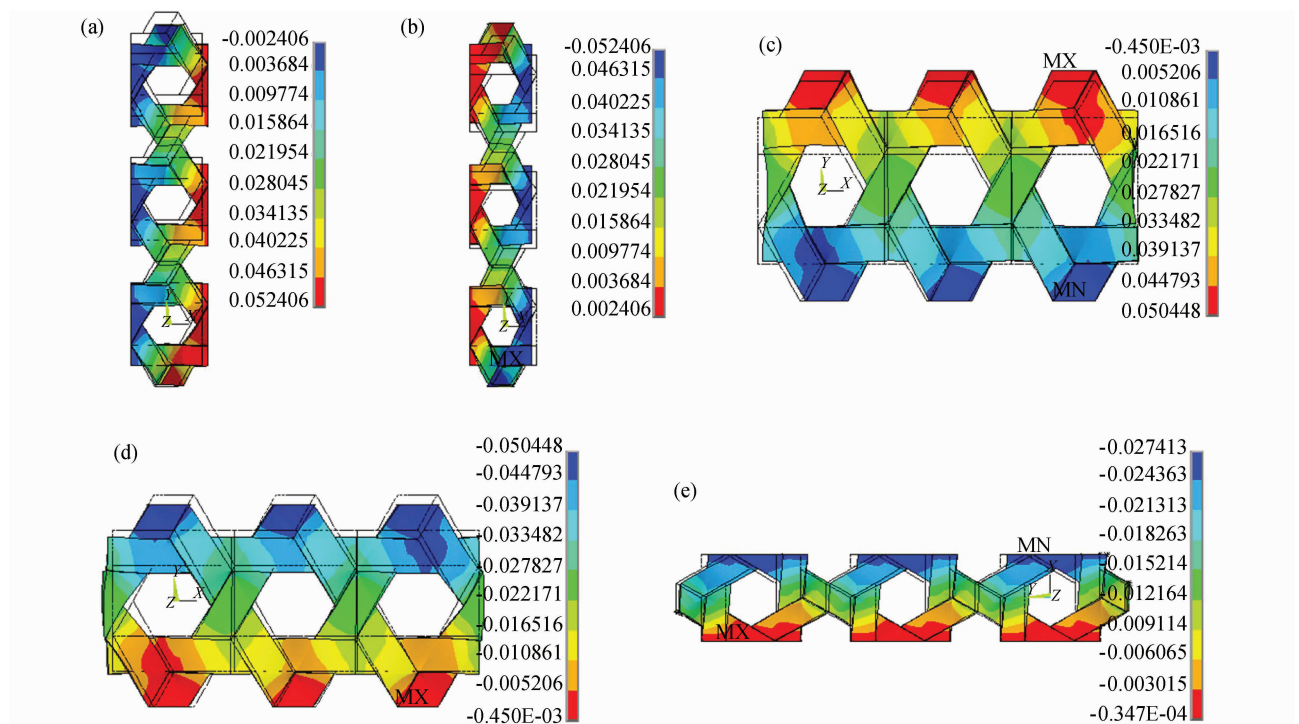


图 5 当  $h=0.07$  且  $k=0.34$  时各刚度分析模型的变形位移云图

(a)0°方向拉伸变形;(b)0°方向压缩变形;(c)90°方向拉伸变形;(d)90°方向压缩变形;(e)剪切变形

Fig. 5 Deformation distribution of stiffness analysis models with  $h=0.07$  and  $k=0.34$

(a)tension deformation of 0°diretion;(b)compression deformation of 0°diretion;  
(d)compression deformation of 90°diretion;(e)tear deformation

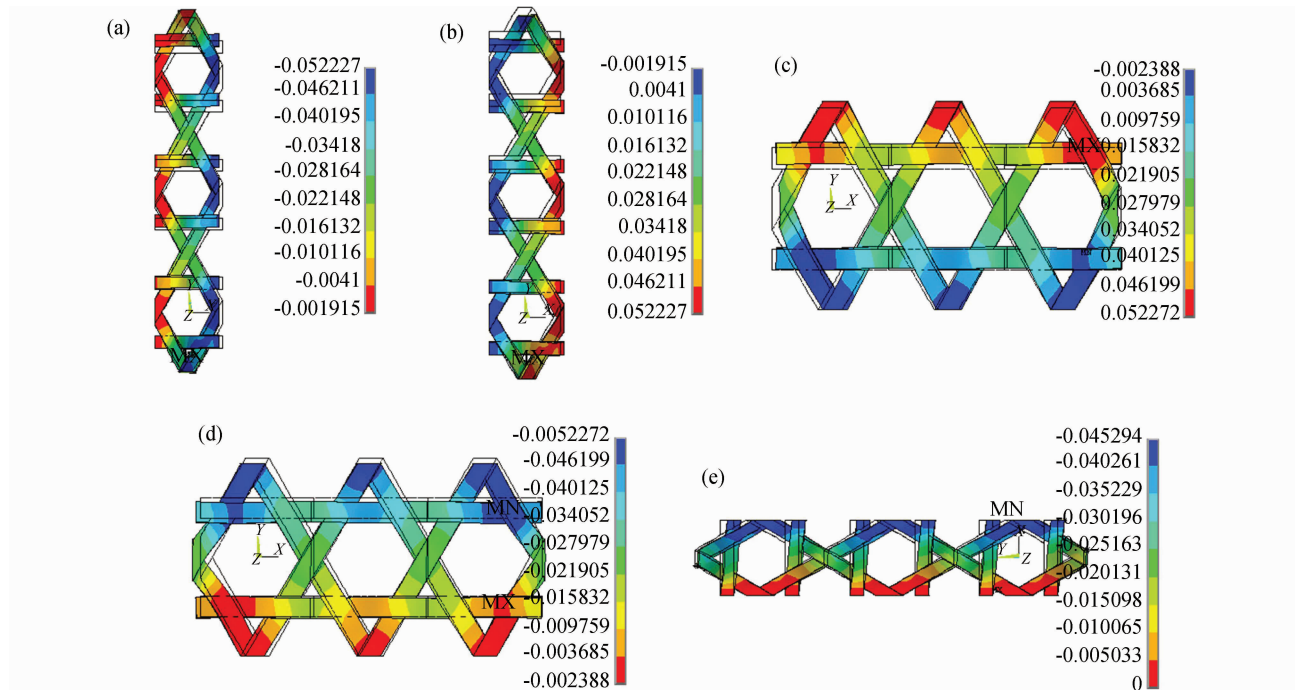


图 6 当  $h=0.06$  且  $k=0.5$  时各刚度分析模型的变形位移云图

(a)0°方向拉伸变形;(b)0°方向压缩变形;(c)90°方向拉伸变形;(d)90°方向压缩变形;(e)剪切变形

Fig. 6 Deformation distribution of stiffness analysis models with  $h=0.06$  and  $k=0.5$

(a)tension deformation of 0°direction;(b)compression deformation of 0°direction;(c)tension deformation of  
90°direction;(d)compression deformation of 90°direction;(e)tear deformation



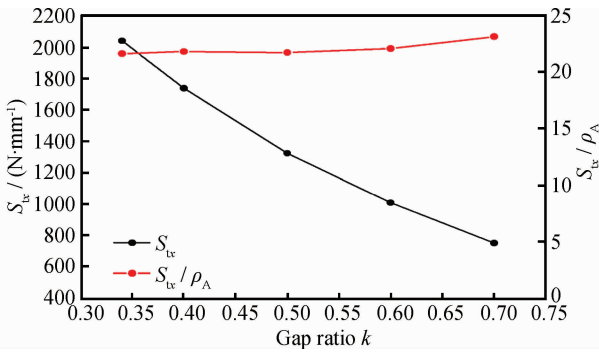


图7 0°方向拉伸刚度  $S_{tx}$  与比刚度  $S_{tx}/\rho_A$  随间隙率  $k$  的变化

Fig. 7 Tension stiffness of 0° direction  $S_{tx}$  and specific stiffness  $S_{tx}/\rho_A$  with increase of gap ratio  $k$

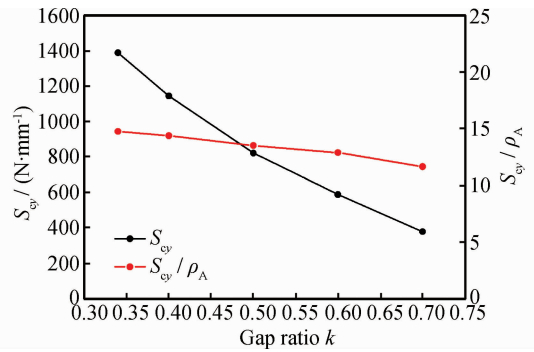


图10 90°方向压缩刚度  $S_{cy}$  与比刚度  $S_{cy}/\rho_A$  随间隙率  $k$  的变化

Fig. 10 Compression stiffness of 90° direction  $S_{cy}$  and specific stiffness  $S_{cy}/\rho_A$  with increase of gap ratio  $k$

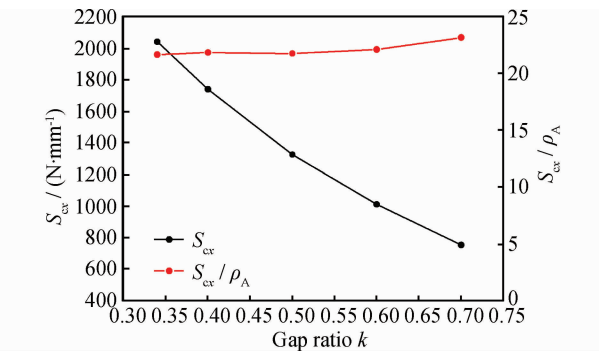


图8 0°方向压缩刚度  $S_{cx}$  与比刚度  $S_{cx}/\rho_A$  随间隙率  $k$  的变化

Fig. 8 Compression stiffness of 0° direction  $S_{cx}$  and specific stiffness  $S_{cx}/\rho_A$  with increase of gap ratio  $k$

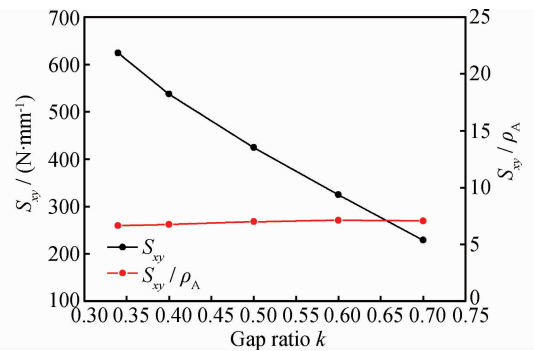


图11 剪切刚度  $S_{xy}$  与比刚度  $S_{xy}/\rho_A$  随间隙率  $k$  的变化

Fig. 11 Tear stiffness  $S_{xy}$  and specific stiffness  $S_{xy}/\rho_A$  with increase of gap ratio  $k$

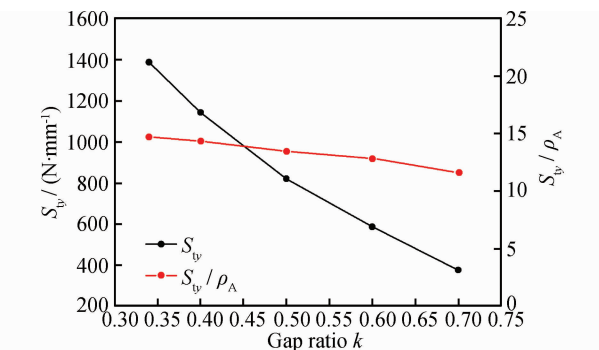


图9 90°方向拉伸刚度  $S_{ty}$  与比刚度  $S_{ty}/\rho_A$  随间隙率  $k$  的变化

Fig. 9 Tension stiffness of 90° direction  $S_{ty}$  and specific stiffness  $S_{ty}/\rho_A$  with increase of gap ratio  $k$

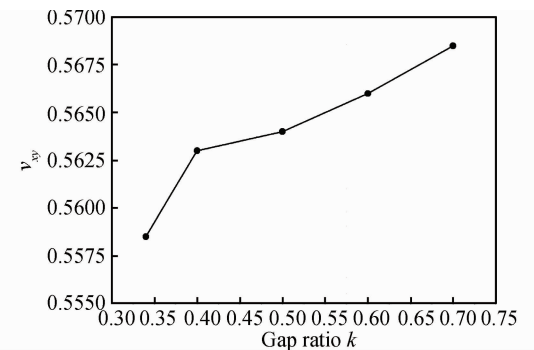


图12 泊松比  $\nu_{xy}$  随间隙率  $k$  的变化

Fig. 12 Poisson's ratio  $\nu_{xy}$  with increase of gap ratio  $k$

## 4 结论

(1) 根据三轴向机织复合材料几何构型, 建立了三轴向机织复合材料的面密度和单胞特征边长与间隙率之间的关系。

(2) 建立了三轴向机织复合材料拉伸、压缩和剪切的有限元计算模型, 并将预测的拉伸刚度、压缩刚度、剪切刚度和泊松比与实验结果进行了比较, 吻合良好。

(3) 分析了间隙率改变时对三轴向机织复合材料的拉伸刚度、压缩刚度、剪切刚度和泊松比和比刚度的影响, 发现刚度随间隙率的增加而显著下降, 而比刚度和泊松比随间隙率的增加变化较小。

## 参考文献

- [1] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001. 11.
- [2] 易洪雷, 丁辛. 三维机织复合材料的弹性性能预报模型[J]. 力学学报, 2003, 35(5): 570—577.  
YI H L, DING X. A model to predict elastic properties of 3D woven composites[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(5): 570—577.
- [3] 王瑞, 王建坤, 武玲. 平纹织物复合材料的弹性模量预测[J]. 复合材料学报, 2002, 19(1): 90—94.  
WANG R, WANG J K, WU L. Prediction for elastic properties of plain weave fabric composites[J]. Acta Materialia Composite Sinica, 2002, 19(1): 90—94.
- [4] CALLUS P J, MOURITZ A P, BANNISTER M K, et al. Tensile properties and failure mechanisms of 3D woven GRP composites[J]. Composites: Part A, 1999, 30(11): 1277—1287.
- [5] SHENG S Z, HOA S V. Three dimensional micro-mechanical modeling of woven fabric composites[J]. J Compos Mater, 2003, 37(9): 763—89.
- [6] KING M J, JEARANAISILAWONG P, SOCRATE S. A continuum constitutive model for the mechanical behavior of woven fabrics[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(13): 3867—3896.
- [7] XIONG J J, SHENOI R A, CHENG X. A modified micromechanical curved beam analytical model to predict the tension modulus of 2D plain weave fabric composites[J]. Composites: Part B, 2009(40): 776—783.
- [8] CHENG X, XIONG J J. A novel analytical model for predicting the compression modulus of 2D PWF composites[J]. Composite Structures, 2009, 88(2): 296—303.
- [9] NGUYEN M, HERSZBERG I, PATON R. The shear properties of woven carbon fabric[J]. Composite Structures, 1999, 47(1—4): 767—779.
- [10] 李典森, 卢子兴, 蔺晓明, 等. 三维四向编织复合材料弹性性能  
的有限元预报[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 828—832.  
LI D S, LU Z X, LIN X M, et al. Finite element prediction of elastic properties of three dimensional and four directional braided composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(7): 828—832.
- [11] CHAPHALKAR P, KELKAR A. Classical laminate theory model for twill weave fabric composites[J]. Composites: Part A, 2001, 32(9): 1281—1289.
- [12] KUEH A B H, PELLEGRINO S. Triaxial weave fabric composites[R]. European Space Contractor Report, Department of Engineering, University of Cambridge, 30 June 2007.
- [13] AOKI T, YOSHIDA K, WATANABE A. Feasibility study of triaxially-woven fabric composite for deployable structures[C]// 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 23—26 April 2007, Honolulu, Hawaii. AIAA 2007—1811.
- [14] KUEH A B H. Fitting-free hyperelastic strain energy formulation for triaxial weave fabric composites[J]. Mechanics of Materials, 2012, 47(4): 11—23.
- [15] ZHAO Q, HOA S V, OUELLETTE P. Progressive failure of triaxial woven fabric (TWF) composites with open holes[J]. Composite Structures, 2004, 65(3—4): 419—431.

**基金项目:** 国家 973 基金 (2010CB631100); 国家自然科学基金 (51075019); 航空科学基金 (20095251024)

**收稿日期:** 2012-07-23; **修订日期:** 2013-08-14

**作者简介:** 白江波 (1984—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为复合材料结构设计, 联系地址: 北京航空航天大学交通科学与工程学院飞行器适航工程系 (100191), E-mail: bai\_jiangbo@163.com

**通讯作者:** 熊峻江 (1966—), 男, 教授, 博士, 主要从事疲劳断裂可靠性, 联系地址: 北京航空航天大学交通科学与工程学院飞行器适航工程系 (100191), E-mail: jjxiong@buaa.edu.cn

\*\*\*\*\*

(上接第 13 页)

LI Zhen-rong, TIAN Su-gui, ZHAO Zhong-gang, et al. Creep behavior and fracture mechanism of HCR GH4169 superalloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(5): 71—76.

**基金项目:** 国家自然科学基金 (50775182); 西北工业大学研究生创业种子基金 (Z2012040)

**收稿日期:** 2012-09-24; **修订日期:** 2013-05-02

**作者简介:** 薛红前 (1967—), 男, 教授, 博士, 从事结构材料疲劳、断裂、装配与连接技术方面的研究, 联系地址: 陕西省西安市碑林区西北工业大学友谊校区航空楼 B619 室 (710072), E-mail: xuedang@nwpu.edu.cn