

国产 F-12 芳纶织物面内剪切性能

罗锡林¹, 谭惠丰^{*1}, 武国军², 王思明¹

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080; 2. 中国航天科工集团第六研究院 46 所, 呼和浩特 010010)

摘要: 对国产 F-12 芳纶织物的剪切性能进行了研究, 通过像框剪切试验和偏轴拉伸试验对其进行了测试, 设计了相应的像框剪切夹具, 利用数字图像相关方法 (DIC) 采集织物加载过程的变形场, 获得了剪切载荷-剪切角度的变化曲线和剪切锁紧角, 通过正则化处理对两种测试结果进行了对比分析; 利用数值方法对织物剪切性能进行了计算, 建立了一种非正交各向异性的杆-壳模型用于模拟织物剪切变形, 编制了 VUMAT 子程序用于计算纱线方向的改变和应力更新, 通过与试验结果的对比验证了计算模型的准确性。结果表明: 织物的剪切行为具有明显的非线性特征, 试样夹持部分的结构形式会对试验结果产生影响, 未抽丝试样的剪切载荷明显大于抽丝试样的剪切载荷, 二者的剪切锁紧角近似相等; 正则化处理后, 相框剪切的剪切载荷大于偏轴拉伸的剪切载荷, 而锁紧角小于偏轴拉伸的锁紧角; 试验结果与仿真结果对比, 仿真结果与试验结果吻合较好。

关键词: F-12 芳纶织物; 像框剪切试验; 偏轴拉伸; 有限元分析; 非正交各向异性

中图分类号: TB382 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)03-0591-08

Experimental investigation of in-plane shear performance for F-12 aramid fabric

LUO Xilin¹, TAN Huifeng^{*1}, WU Guojun², WANG Siming¹

(1. Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. China Aerospace Science & Industry Corp The Sixth Academy 46 Institute, Hohhot 010010, China)

Abstract: The in-plane shear performance for F-12 aramid fabric was investigated. The picture frame test and bias-tensile test were conducted. A new picture clamp was designed. The deformation field of fabric during the test was measured by digital image correlation (DIC) technique. The shear force vs. shear angle curves and the locked angle were obtained. Normalized method was used to compare the two experimental results. Then, numerical method was used to compute the shear characters. A non-orthogonal anisotropic truss-shell model was established to simulate the bias-tensile test. A user defined material subroutine was developed to calculate the direction of the yarns and stress updated. To verify the validity of the model, the simulated results were compared with experimental results. The test results show that the shear performance of the fabric is non-linear. The clamping arm can affect the test results. The force of no silts sample is larger than that of infinite slits sample. The locked angles of these two samples are equal. After normalized, the force of picture frame test is larger than that of bias-tensile test, while the locked angle is smaller. The FEM results agree well with experimental results.

Keywords: F-12 aramid fabric; picture frame test; bias-tensile test; finite element analysis; non-orthogonal anisotropy model

高性能芳纶纤维具有比强度高、比模量大、耐冲击等特点, 在防弹衣、飞机部件、导弹壳体、飞艇囊体等方面有着广泛应用。织物既是材料也是结

构, 其力学性能不仅由组成的纤维决定, 还受到编织工艺及结构形式的影响, 往往表现出很强的非线性。由于织物的剪切性能是影响织物成型性能的关键

收稿日期: 2017-03-07; 录用日期: 2017-05-10; 网络出版时间: 2017-06-01 16:03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170601.1603.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金创新群体科学基金(11421091); 中央高校基本科研业务专项资金(HIT.MKSTISP.2016.09)

通讯作者: 谭惠丰, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为柔性复合材料及大型空间展开机构 E-mail: tanhf@hit.edu.cn

引用格式: 罗锡林, 谭惠丰, 武国军, 等. 国产 F-12 芳纶织物面内剪切性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 591-598.

LUO Xilin, TAN Huifeng, WU Guojun, et al. Experimental investigation of in-plane shear performance for F-12 aramid fabric[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(3): 591-598 (in Chinese).

键因素，因此国内外很多学者对其进行了研究，目前研究的重点主要集中在剪切载荷与剪切角的非线性关系以及剪切极限变形的表征^[1-2]。

试验技术是研究织物剪切性能最直观和最有效的途径，主要有 KES(Kawabata 评估系统)剪切试验、偏轴拉伸和像框试验三种试验方法。KES 试验系统的试样不是受到纯剪切作用^[3]，通常只用于表征服装面料在小应变时的剪切行为。偏轴拉伸是测试织物剪切性能最容易实现的手段，试验假设纤维不能伸长并且纱线间只发生纯转动，结果显示试样不同的区域会发生不同程度的剪切变形^[4-5]。像框剪切试验是测量工程织物大应变时剪切性能最常用的方法，试验是对一个由四根连杆通过铰接而成的方形框架在对角线方向施加方向相反的载荷，使其反向运动，夹持在连杆上的试样就会发生纯面内剪切变形。Zhu 等^[6]利用像框剪切研究了 Kevlar-49 织物的剪切性能，包括试样尺寸和预载荷对结果的影响，利用图像相关技术测得了试样全场变形。Zhu 等^[7]对玻纤织物的大剪切变形性能进行了研究，改进了像框夹具，对测试过程中的锁紧角以及纱线截面形状变化进行了分析。综上所述，测试织物剪切性能的方法很多，然而织物材料的剪切测试至今仍未形成统一的试验标准，Cao 等^[8]曾做过统计，即使对同一种材料的剪切性能进行测试，不同的实验室测得的结果都会存在较大差异。

有限元模拟是研究织物剪切性能又一种常用的方法。织物材料具有明显的多尺度特性，细观胞元模型^[1]和宏观非正交本构模型^[9]作为两种有效的手段常用于模拟织物剪切，其中，细观模型能够直观地揭示变形机制，然而其模型复杂，计算耗时较长；宏观模型可以方便简单地处理几何模型和接触，但是难以考虑织物的结构形式、纱线截面变化及纱线间相互作用，织物材料受到剪切、悬垂等载荷时，纱线方向会随着剪切载荷发生变化，不再保持垂直，常规的正交模型不再适用，因此需要在当前的材料坐标系下定义材料常数，并且纱线本身复杂的力学特性也应在模型中得到体现。

国产 F-12 芳纶织物材料已经在导弹壳体和浮空器蒙皮材料上得到应用，人们往往只关心其拉伸性能而忽视剪切性能，其实剪切性能对复合材料成型以及数值计算都有较大的影响^[10]。因此，本文

通过试验和仿真的方法对国产 F-12 芳纶织物的剪切性能进行了较为系统的研究，首先对织物进行了像框剪切试验和偏轴拉伸试验，通过正则化处理对两种试验结果进行了对比，利用数字图像相关法测试织物的变形，得到了相应的剪切载荷与剪切角的变化曲线和剪切锁紧角，并且研究了试样夹持部分的结构形式对剪切性能的影响；另外，本文建立了织物的非正交各向异性有限元分析模型，对织物受剪切载荷作用时进行模拟，通过与试验结果的对比验证了分析模型的有效性。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本研究使用的 F-12 芳纶织物是由航天科工六院 46 所提供，F-12 纤维的密度为 $1.44 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ ，抗拉强度为 $4.35 \sim 4.67 \text{ GPa}$ ，是 Kevlar-49 的 1.69 倍，弹性模量为 $135 \sim 180 \text{ GPa}$ ，伸长率为 $3.5\% \sim 4.5\%$ ^[11]。织物的编织密度约为 16 根纱线/厘米，纱线的线密度为 0.023 g/m ，织物的面密度约为 60.2 g/m^2 。图 1 为国产 F-12 芳纶织物宏观和微观形貌，表 1 给出了织物的材料性能和胞元尺寸。

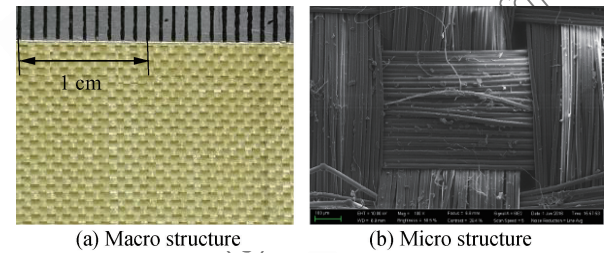


图 1 F-12 芳纶织物宏观和微观形貌
Fig. 1 Macro and micro-structure of F-12 aramid fabric

表 1 F-12 芳纶织物材料性能和几何参数
Table 1 Material properties and geometry parameter for F-12 fabric

Properties	Values
Yarn count(warp/weft)/(yarn·cm ⁻¹)	16
Yarn linear density(warp/weft)/(g·m ⁻¹)	0.023
Fiber density/(g·cm ⁻³)	1.44—1.45
Yarn spacing/mm	0.3
Yarn width/mm	0.45
Fabric thickness/mm	0.13
Areal density/(g·cm ⁻²)	60.2

1.2 试 验

试验均是在美国英斯特朗公司的拉伸试验机上进行，试验机型号为 Instron5965，试样的变形通过数字图像相关(DIC)技术获得，DIC 技术是通过测

试试样变形前后的散斑变化从而获取试样表面的位移和应变, 使用的是美国 GIS 公司的 VIC-3D 设备。

1.2.1 丝束拉伸试验

丝束的材料性能对于织物性能的分析极其重要, 纱线力学性能的确定既可以通过微观尺度的理论推导获取, 也可以通过单轴拉伸纤维丝束来获得。文献[12]中指出使用引伸计和夹持端位移测得

的 Kevlar-49 丝束应变误差在 2% 以内, 因此, 本研究直接采用拉伸试验机夹持端位移来计算应变, 将得到的参数代入数值模型中进行计算。纤维束的横截面积是通过纤维束的线密度与体密度的比值得到^[13], 本研究中的纱线横截面积为 $16 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ 。试样均是从织物中直接抽取得到, 尺寸长 250 mm, 在试样的两端粘贴有 30 mm×50 mm 的铝片, 如图 3 所示。

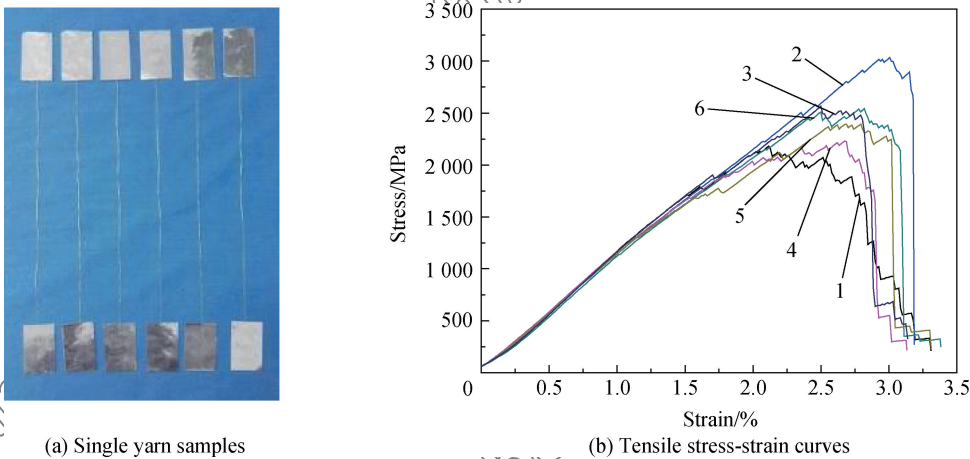


图 2 F-12 芳纶纱线单束试样及其拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Single yarn specimens of F-12 aramid fiber and tensile stress-strain curves

1.2.2 像框试验

本研究设计了一种像框剪切试验夹具, 该夹具主要包括四根具有滑动槽的刚性连杆和一个扩大器, 连杆之间以及扩大器之间都是铰接, 如图 3 所示, 通过拉伸试验机对连杆上一个角点以及扩大器上与之相对的另一个角点上施加位移载荷, 使原来的正方形像框逐渐变成菱形, 夹具通过螺栓对矩形铁块施加压力来夹紧织物, 织物夹持部分不需要开孔, 也不会在安装试样时发生局部剪切变形。

从剪切试验可以直接获得载荷-位移曲线, 本研究通过 DIC 技术来获取试验机每一个采集的载

荷所对应的坐标和变形场, 剪切角则是在试样未变形时的图像中心取三个垂直的点, 通过三个点的坐标变化计算而得。

试样形状如图 4 所示, 为十字形试样, 中心区域为 127 mm×127 mm, 四个夹持臂长 65 mm。为了研究夹持部分的结构形式对织物剪切性能的影响, 本研究设计了两种试样形式, 如图 5 所示, 图 5(a)为未抽丝试样, 图 5(b)为抽丝试样, 主要区别在于抽丝试样抽取了试样夹持臂中与夹持杆平行的纱线, 这里称之为无关纱线。

1.2.3 偏轴拉伸试验

偏轴拉伸试验中试样的经纬纱方向与拉伸载荷方向成 $\pm 45^\circ$, 试样的尺寸需要满足长宽比大于 2, 本试验中试样的尺寸为 300 mm×50 mm, 试样两端粘贴有 50 mm×50 mm×0.2 mm 的薄铝片, 起到增强作用, 避免加载过程中试样在夹具内破坏。试样的测试原理如图 6 所示。

2 数值模拟

织物材料由于各纱线的纤维之间以及纱线与纱线之间的相互作用, 其力学行为非常复杂。文献

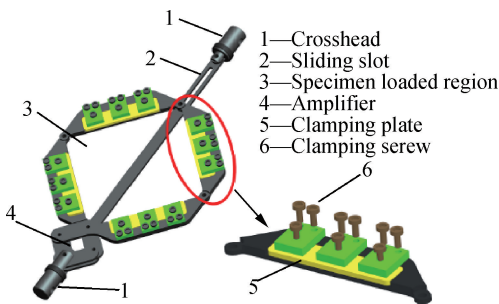


图 3 像框剪切试验夹具

Fig. 3 Picture frame clamp

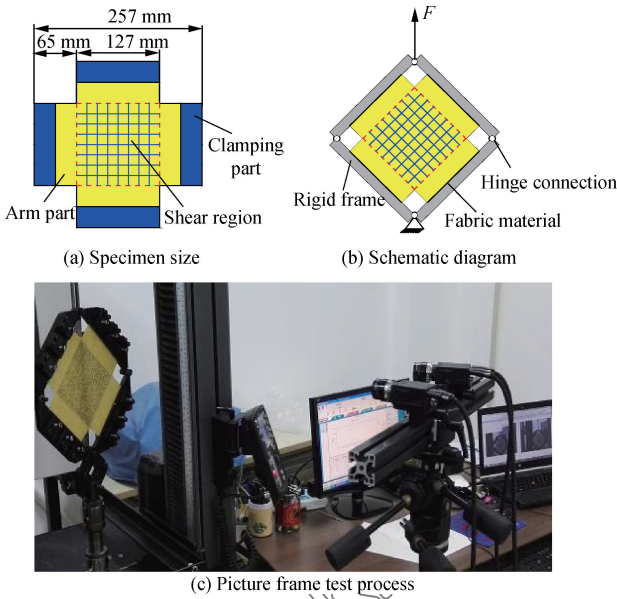


图 4 F-12 芳纶织物像框剪切试样尺寸及测试过程
Fig. 4 Picture frame specimen size of F-12 aramid fabric and test process

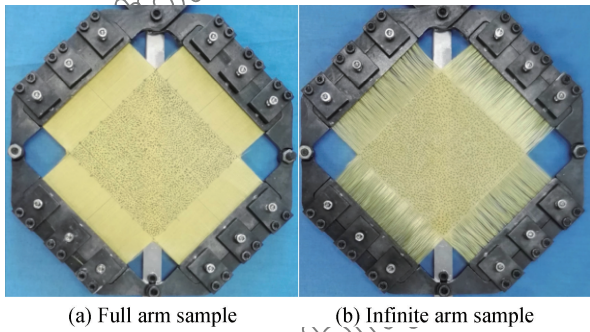


图 5 F-12 芳纶织物像框剪切试样
Fig. 5 Picture frame specimen of F-12 aramid fabric

[14]提出了一种离散有限元算法,通过建立一种杆-壳模型对织物的剪切行为进行模拟,其中杆单元模拟纱线,壳单元模拟纱线间的摩擦关系。本研究在此基础上编制了用户子程序,通过试验获得模型的材料参数,将子程序集成到有限元分析软件中进行计算,通过偏轴拉伸算例对建立的有限元模型进行验证。

杆-壳模型的原理如图 7 所示, e_i 表示局部正交坐标系, g_i 始终沿纱线方向,为非正交坐标系,二者的关系为

$$g_i = Fg_i^0 = Fe_i^0 \quad (1)$$

式中, F 为变形梯度张量。

本文使用 ABAQUS/Explicit 进行分析,有限元模型网格数与试样尺寸直接相关,因为一根纱线

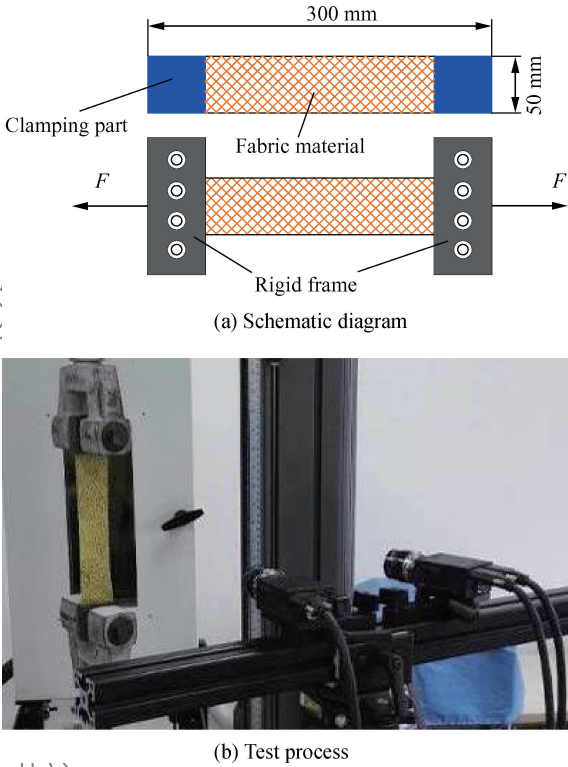


图 6 F-12 芳纶织物偏轴拉伸试样尺寸及试验过程
Fig. 6 Bias-tensile specimen size of F-12 aramid fabric and test process

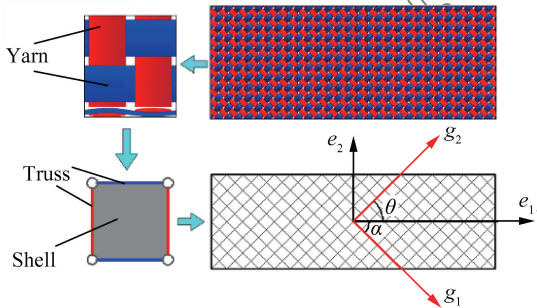


图 7 杆-壳模型原理
Fig. 7 Principle of truss-shell model

代表一个杆单元,如果按照试样尺寸建立每一根纱线的模型,计算量将非常巨大,所以本文在宽度方向建立了十根纱线,长宽比为 4,根据编织密度可以算出试样的尺寸,然后用正则化处理与试验结果进行对比。

壳单元采用 S4R 进行离散,杆单元采用 T3D2,整个模型一共有 732 个壳单元和 1 560 个杆单元,采用一端固支一端施加位移载荷进行加载。材料模型通过 VUMAT 子程序进行定义,按照用户自己定义的本构模型进行应力更新,应力计算采用增量形式通过数值积分的方法进行。织

物剪切主要涉及纱线大转动, 需要用到非线性分析。本研究使用 Green-Naghdi 率进行应力更新, 公式如下:

$$\sigma_i^{t+1} = \sigma_i^t + \Delta\sigma_i^{t+1}$$
$$\Delta\sigma_i^{t+1} = C_{ij} \Delta\epsilon_j^{t+1/2}$$

(2)

式(2)中的 $\Delta\epsilon_j^{t+1/2}$ 是应变增量的中值, 通过应变率增量积分而得。该值从 ABAQUS 求解器中获得, 通过 VUMAT 进行调用, 然后再返回相应的应力增量至求解器, 其计算框图见图 8。应力的更新是在单元的局部坐标系下进行, 也就是随单元转动的共旋坐标系。

对于杆单元, 式(2)可以简化为

$$\Delta\sigma_1^{t+1} = C_{11}(\epsilon_1) \Delta\epsilon_1^{t+1/2}$$

(3)

式中, $C_{11}(\epsilon_1)$ 可以通过丝束拉伸曲线拟合得到, 本文中 $C_{11}(\epsilon_1) = 100 \text{ GPa}$ 。

对于壳单元, 在每一个时间增量 t , 织物剪切本构可以表示为

$$[\Delta\sigma^4]_{t+1} = C_{sh}(\gamma_4^1) [\Delta\gamma_4]_{t+1/2}$$

(4)

$$[\Delta\gamma_4]_{t+1/2} = 2[\Delta\epsilon_4]_{t+1/2}$$

(5)

应变增量是 e_i 下的表达式, 而应力增量是在 g_i 坐标系下, 因此在子程序返回给求解器时, 需要转换到 e_i 坐标系下, 转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\sigma_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \cos^2(\alpha + \theta) & 2\cos\alpha\cos(\alpha + \theta) \\ \sin^2\alpha & \sin^2(\alpha + \theta) & 2\sin\alpha\sin(\alpha + \theta) \\ \sin\alpha\cos\alpha & \sin(\alpha + \theta)\cos(\alpha + \theta) & \sin(2\alpha + \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\sigma^1 \\ \Delta\sigma^2 \\ \Delta\sigma^4 \end{bmatrix}$$

(6)

3 结果与讨论

3.1 F-12 芳纶织物剪切性能

图 9 为像框剪切试验载荷随剪切角度的变化曲线。可以看出, 织物剪切变形具有很强的非线性, 试验结果具有很好的重复性, 说明试验夹具设计合理, 织物性能分布均匀。还可以看出, 剪切变形可以分为三个阶段: (1)初始变形阶段载荷与变形呈线性关系, 此时纱线间的剪切载荷小于交叉点间的静摩擦阻力, 纱线之间未发生相对运动; (2)随着剪切角度增大, 剪切载荷上升较为平缓, 此时经纬纱交叉点的转动超过了静摩擦阻力, 纱线之间发生纯转动^[15]; (3)剪切载荷有一个明显的上升趋势, 主要是由于纤维束接触发生挤压, 从而提高了剪切阻力。其中, 从第二阶段过渡到第三阶段时主要判断依据是纱线是否发生挤压, 通常称此时的剪切角度为锁紧角, 由于相邻纱线的挤压, 剪切刚度会明显增加, 当纱线间角度超过锁紧角时, 织物会出现

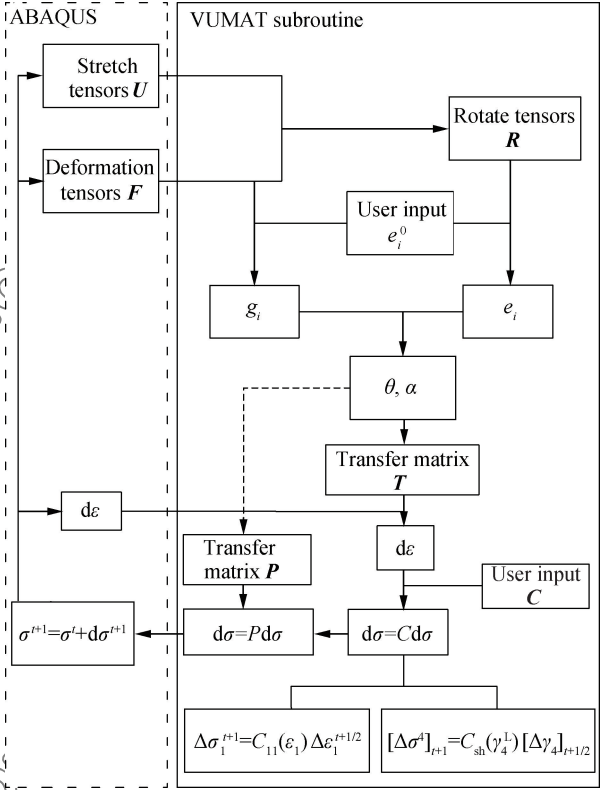


图 8 VUMAT 计算框图

Fig. 8 Calculating frame of VUMAT

褶皱。

图 9(a)是抽丝试样的试验曲线, 图 9(b)是未抽丝试样的试验曲线。可以看出, 支撑臂的结构形式会影响到测试结果, 未抽丝试样的锁紧角与抽丝试样的锁紧角相等, 然而剪切载荷明显大于抽丝试样的剪切载荷, 说明此时的剪切载荷不仅是试样中心所受的载荷, 夹持臂部分也会承受一定的剪切载荷; 抽丝试样的试验曲线表现得更加平缓, 而未抽丝试样剪切角超过锁紧角后, 曲线斜率变化更加突然, 说明其非线性效果更为显著。

图 10 为偏轴拉伸试验的载荷随剪切角度的变化曲线, 试验曲线与像框剪切试验结果并不相同。可以看出, 试样的变形只有后两个阶段, 而且曲线的拐点出现的角度大于像框剪切试验, 从试验过程可知, 当剪切角为 22°时, 试样开始出现褶皱, 而此时剪切锁紧角为 57°。

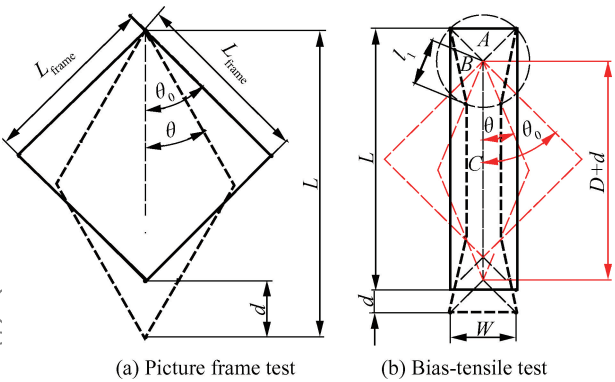
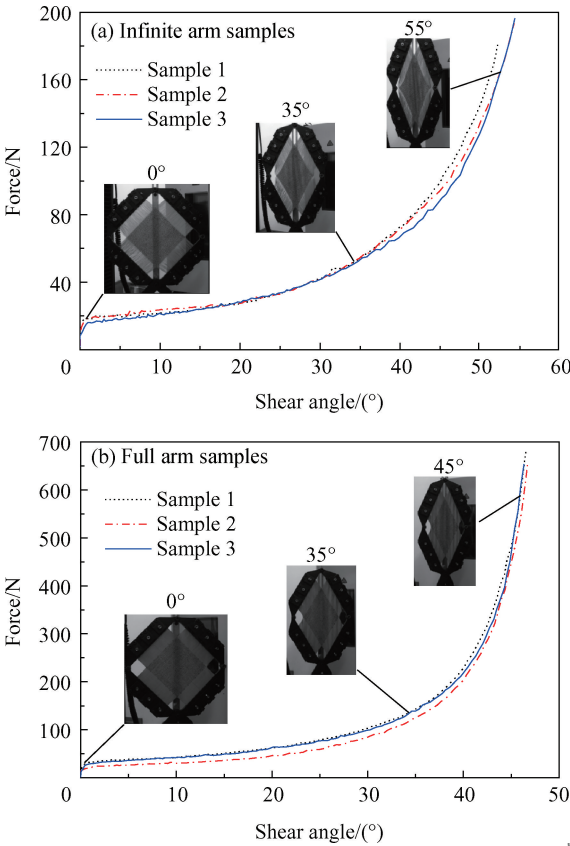


图 11 像框剪切与偏轴拉伸试验前后试样几何形状的变化
Fig. 11 Geometry change before and after test of picture frame test and bias tensile test

结果进行比较, 通常需要将剪切载荷进行正则化处理^[16]。

像框剪切试验的正则化处理的推导过程如下:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\theta = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{\sqrt{2}L_{\text{frame}} + d}{2L_{\text{frame}}}\right) \quad (7)$$

$$F_{\text{sh}}(\gamma) = \frac{F}{2\cos(\pi/4 - \gamma/2)} \quad (8)$$

$$F_{\text{normalized}} = \frac{L_{\text{frame}}}{L_{\text{fabric}}^2} F_{\text{sh}}(\gamma) \quad (9)$$

式中: γ 是剪切角; L_{frame} 是像框夹具的边长; L_{fabric} 是试样边长; F 是拉伸载荷; F_{sh} 是剪切载荷; $F_{\text{normalized}}$ 是正则化剪切载荷; d 是位移。本研究中, 像框夹具夹持长度 $L_{\text{frame}} = 203 \text{ mm}$, 试样边长 $L_{\text{fabric}} = 127 \text{ mm}$ 。

偏轴拉伸试验的正则化处理的推导过程如下:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\theta = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{D+d}{\sqrt{2}D}\right) \quad (10)$$

$$D = L - W \quad (11)$$

$$F_{\text{sh}}(\gamma) = \frac{1}{(2D-W)\cos\gamma} \left[\frac{FD}{W} \left(\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) - \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right) - W\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) F_{\text{sh}}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right] \quad (12)$$

式中: γ 是剪切角; L 是试样长度; W 是试样宽度; F 是拉伸载荷; F_{sh} 是正则化剪切载荷; d 是位移。

从 3.1 节可知, 像框剪切试验中只有抽丝试样才能真正反映织物的剪切性能, 因此以下的对比结果均是取自抽丝试样。图 12 为像框剪切和偏轴拉伸正则化以后的对比结果。可以看出, 像框剪切试验的载荷大于偏轴拉伸的结果, 这是由于柔软的织物安装到夹具上时, 难以保证所有纱线同时与像框平行, 一部分纱线必然会存在一定的偏斜, 从而使

图 9 F-12 芳纶织物像框剪切载荷-剪切角曲线
Fig. 9 Picture frame force vs. shear angle curves of F-12 aramid fabric Infinite arm samples Full arm samples

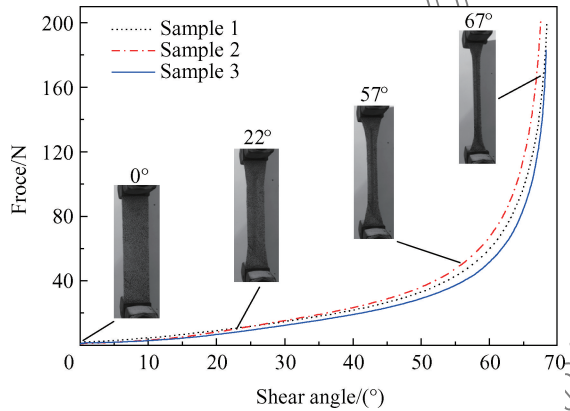


图 10 F-12 芳纶织物偏轴拉伸载荷-剪切角曲线
Fig. 10 Bias-tensile force vs. shear angle curves of F-12 aramid fabric

3.2 F-12 芳纶织物正则化结果对比

图 11 为像框剪切和偏轴拉伸试验变形前后的几何关系, 包括剪切角、试样几何尺寸和夹具位移之间的关系, 通过这些几何关系和受力分析可以将载荷-位移曲线转换成载荷与剪切角度的关系。为了消除试样尺寸以及试验方法的差异, 便于对试验

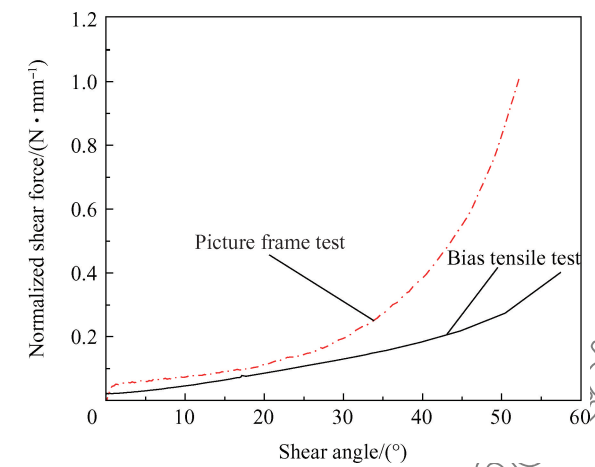


图 12 F-12 芳纶织物像框剪切和偏轴拉伸正则化结果对比
Fig. 12 Comparison of normalized shear force vs. shear angle for picture frame test and bias-tensile test of F-12 aramid fabric

纱线伸长, 而拉伸会引起剪切载荷上升^[17], 另外像框剪切的边界夹持也会使织物并不处于纯剪切状态, 导致测得的结果偏大; 而偏轴拉伸试验中也存在拉剪耦合效应, 其测试结果并不能反映真实的材料性能, 这样也会导致两种试验结果存在偏差。

3.3 F-12 芳纶织物数值模拟结果

根据实验结果, 可以拟合出织物像框剪切的剪切应力与应变的关系, 见下式, 然后将其代入程序中计算。

$$C_{sh}(\gamma_4) = 8.18|\gamma_4|^3 - 4.92|\gamma_4|^2 + 2.16|\gamma_4| + 0.938 \quad (13)$$

图 13 为纯剪切变形区对应剪切角约为 42.3°左右的变形云图。可以看出, 试样可以划分成三个区域, 与理论分析结果一致。图 14 为模拟的载荷-角度曲线与试验曲线结果对比, 通过对比曲线可以发现, 数值模型计算结果与剪切试验所得结果无论在趋势上还是数值上都能够较好吻合。由于 F-12 芳纶织物编织密度较大, 纤维之间的空隙很小, 纤维之间的压力会阻止滑动的发生, 因此模型中纱线之间是铰接的, 没有考虑纱线间的滑动。分析结果表

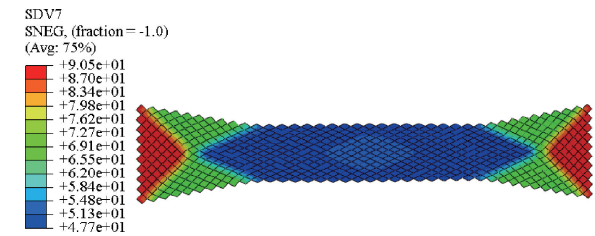


图 13 F-12 芳纶织物偏轴拉伸有限元计算纱线夹角云图
Fig. 13 Bias tensile FEA result of angles between warp yarn and weft yarn of F-12 aramid fabric

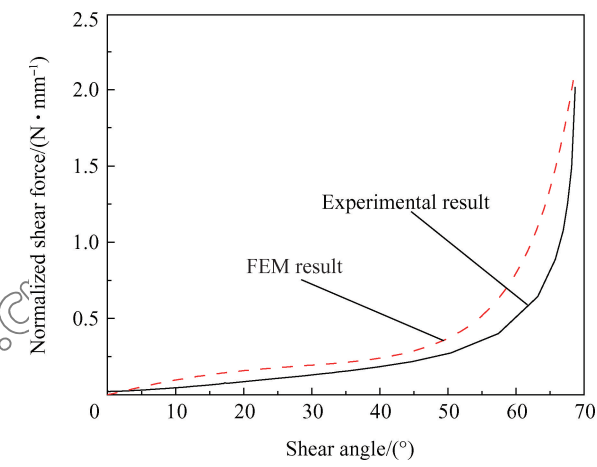


图 14 F-12 芳纶织物偏轴拉伸试验结果与有限元结果对比
Fig. 14 Comparison between experimental result and FEA result on bias tensile of F-12 aramid fabric

明, 本研究的模型能够用于模拟织物剪切变形。

4 结 论

(1) 像框剪切试验中, F-12 芳纶织物剪切变形可以分为明显的三个阶段, 并且, 试样夹持部分的结构形式能够影响到试验结果, 未抽丝试样的剪切载荷明显大于抽丝试样的结果, 未抽丝试样的非线性更显著。因此, 为得到试样中心区域的试验结果, 需要抽取夹持部分中的无关纱线。

(2) F-12 芳纶织物在偏轴试验中, 变形分为两个阶段, 在剪切锁紧角之前会发生面外变形。正则化处理的结果显示, 像框剪切试验的锁紧角小于偏轴拉伸的试验结果, 而载荷大于偏轴拉伸的值, 两种试验结果存在偏差。

(3) 有限元分析结果与试验值吻合较好, 说明本文所建立的非正交各向异性的数值模型能够准确模拟织物的剪切变形。

参考文献:

[1] 谭惠丰, 刘羽熙, 刘宇艳, 等. 临近空间飞艇蒙皮材料研究进展和需求分析[J]. 复合材料学报, 2012, 29(6): 1-8.
TAN H F, LIU Y X, LIU Y Y, et al. Research progress and requirement analysis of envelop materials for near space airship[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(6): 1-8 (in Chinese).
[2] LIN H, CLIFFORD M J, LONG A C, et al. Finite element modelling of fabric shear[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2008, 17(1): 015008.
[3] HU J L, ZHANG Y T. The KES shear test for fabrics[J]. Textile Research Journal, 1997, 67(9): 654-664.

- [4] BOISSE P, HAMILA N, GUZMAN-MALDONADO E, et al. The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepregs: A review[J]. *International Journal of Material Forming*, 2017, 10(4): 473-492.
- [5] D'AGOSTINO M V, GIORGIO I, GRECO L, et al. Continuum and discrete models for structures including (quasi-) in-extensible elasticae with a view to the design and modeling of composite reinforcements[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2015, 59: 1-17.
- [6] ZHU D J, MOBASHER B, VAIDYA A, et al. Mechanical behaviors of Kevlar 49 fabric subjected to uniaxial, biaxial tension and in-plane large shear deformation[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 74: 121-130.
- [7] ZHU B, YU T X, TAO X M. An experimental study of in-plane large shear deformation of woven fabric composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(2): 252-261.
- [8] CAO J, AKKERMAN R, BOISSE P, et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(6): 1037-1053.
- [9] PENG X Q, CAO J. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(6): 859-874.
- [10] LI L, ZHAO Y, CHEN Y, et al. In-plane shear investigation of biaxial carbon non-crimp fabrics with experimental tests and finite element modeling[J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 757-765.
- [11] ZHANG S, HE G, LIANG G, et al. Comparison of F-12 aramid fiber with domestic aramid fiber III on surface feature[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(7): 2104-2109.
- [12] 朱德举, 欧云福. 标距和应变率对 Kevlar 49 单束拉伸力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(2): 225-233.
- ZHU D J, OU Y F. Effect of gauge length and strain rate on tensile mechanical properties of Kevlar 49 single yarn[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(2): 225-233 (in Chinese).
- [13] ZHU D, MOBASHER B, RAJAN S D. Dynamic tensile testing of Kevlar 49 fabrics[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 23(3): 230-239.
- [14] JAUFFRÈS D, SHERWOOD J A, MORRIS C D, et al. Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven-fabric reinforcement forming[J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3(2): 1205-1216.
- [15] JEARANAISILAWONG P. Investigation of deformation and failure mechanisms in woven and nonwoven fabrics under quasi-static loading conditions[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [16] HARRISON P, CLIFFORD M J, LONG A C. Shear characterisation of viscous woven textile composites: A comparison between picture frame and bias extension experiments[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(10): 1453-1465.
- [17] LAUNAY J, HIVET G, DUONG A V, et al. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(2): 506-515.