

文章编号: 1000-6893(2007)04-1005-04

机织织物剪切行为研究

林国昌, 万志敏, 杜星文

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

Research on the Shear Behavior for Woven Fabrics

LIN Guo-chang, WAN Zhi-min, DU Xing-wen

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

摘要: 研究了平纹碳纤维机织织物的剪切行为。研究发现, 织物的分阶段剪切行为与织物的细观结构有关, 不同的剪切阶段具有不同的剪切机理, 通过 XL T-3400 连续变体式显微镜和像框实验结果对不同剪切阶段的剪切机理进行了分析。通过纱线抽出实验获得了织物中纱线之间的摩擦系数, 将纱线当作一个悬臂梁安装, 通过此方法获得了纱线的抗弯刚度, 由这两个实验导出了摩擦力矩。利用像框剪切实验以及力矩平衡, 建立了平纹织物初始剪切阶段载荷-剪切角的关系模型。实验结果表明, 此模型可以很好地模拟剪切角度超过 0.05 rad 之后的织物初始剪切行为。

关键词: 织物; 剪切机理; 纱线抽出; 像框剪切实验; 力矩平衡

中图分类号: V258; TB330.1 **文献标识码:** A

Abstract: The shear behavior of plain carbon woven fabric was studied. The results show that the staged shear behavior of fabric is related to its mesoscopic structure and there is different shear mechanisms at different shear stage. From the results of the XL T-3400 serial variant microscope and picture frame experiment, the shear mechanisms at different stages are analyzed. The coefficient of yarn friction was obtained by yarn pull-out experiment and a yarn from the plain fabric was installed as a cantilever and the bending rigidity was measured in this way, from which the friction moment was obtained. Through the picture frame experiment and moment balance, a load-shear angle model was derived for plain fabric at the beginning of the shear stage. The experiments results show that the model can simulate the beginning shear stage for plain fabric well after the shear angle is over 0.05 radian.

Key words: fabric; shear mechanism; yarn pull-out; picture frame experiment; moment balance

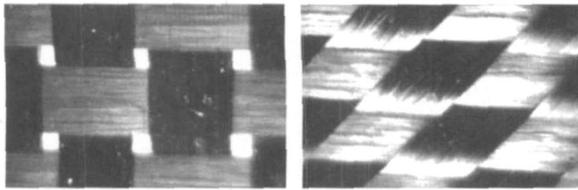
剪切变形是织物最常见的变形行为, 在剪切变形过程中, 经纱与纬纱之间角度发生改变, 从而使织物具有剪切大变形的特点。Mack 和 Taylor^[1] 首先研究了织物的剪切行为, 他们将织物模拟为铰接的网格, 纱线可以在交叉处转动。Grosberg 和 Park^[2] 将纱线理想为梁结构, 建立了一个预测织物初始剪切行为的模型, 该模型没有考虑纱线的波动, 理论求解表达式不便于实际应用。Kawabata 等人^[3] 使用了一个线性近似方法来获得剪切力和剪切角之间的关系, 但是模型中的所有系数都需要由实验来确定。为了解释织物的剪切大变形, Yu 等人^[4] 建立了一个非正交本构模型。在他们的模型中, 单胞中对角线上假设有一根弹簧, 其刚度系数需要通过实验确定。目前来看, 对织物的剪切性能建模研究还不够充分, 多数模型中的参数需要通

过剪切实验来获得。本文通过像框剪切实验研究了平纹碳纤维机织织物的剪切性能, 建立了一个预测织物剪切初始阶段载荷-剪切角的模型。模型中考虑了纱线波动产生的正压力, 利用简支梁模拟了纱线波动并给出了正压力, 利用纱线抽出实验给出了纱线之间的摩擦系数。

1 织物细观结构与剪切机理

织物的剪切行为具有明显的阶段性, 这与织物的细观结构有直接关系。图 1 是利用 XL T-3400 连续变体式显微镜获得的正交机织碳纤维织物细观结构图。由图 1(a) 可以看出, 未变形前, 织物中经纱与纬纱彼此正交, 同时, 在纱线之间还存在一定孔隙, 其大小与织物的机织结构有关。当织物发生剪切并达到某个临界角度时, 织物中孔隙被填满, 相邻纱线之间将发生接触并挤压(图 1(b) 所示), 这个临界角度称为织物剪切锁定角。

收稿日期: 2006-05-17; 修订日期: 2006-08-17
基金项目: 国防预研基金
通讯作者: 林国昌 E-mail: lingc@hit.edu.cn



(a) 变形前 (b) 变形后

图1 平纹碳纤维织物微观结构

Fig. 1 Mesoscopic structure of plain carbon fabric

图2是通过像框实验获得的平纹碳纤维机织织物载荷-位移曲线。从图上可以看出,曲线明显分为3个区域。在第1区域(0~35 mm之间),纱线在交叉点处发生转动,载荷主要用于抵消交叉点处的摩擦力,纱线间的孔隙逐渐被填满,这一阶段称为剪切初始阶段;第2区域(35~50 mm之间),织物剪切达到锁定角,纱线间的孔隙被填满(如图1(b)所示),相邻纱线通过挤压抵抗外力,载荷逐渐增加,这一阶段称为挤压阶段;第3区域(超过50 mm之后),相邻纱线进一步挤压,载荷急剧增加直至碳纤维织物最终发生屈曲,这一阶段称为屈曲阶段。因此,通过对织物特有的微观结构和剪切曲线研究,可以很好地解释织物在不同阶段的剪切机理。

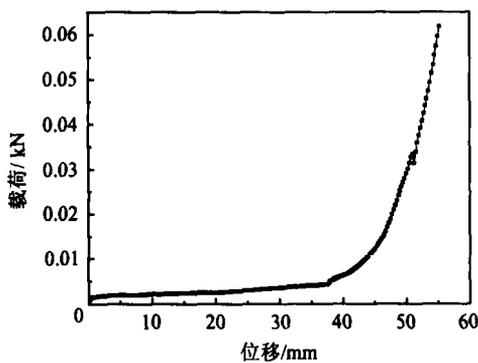


图2 平纹碳纤维织物像框剪切时的载荷-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves of plain carbon fabric at picture frame experiment

2 像框剪切实验

像框剪切实验是研究织物剪切性能的一种常用方法,多数学者借助像框实验研究了织物的剪切性能^[5,6]。图3是本文使用的像框剪切实验装置,其尺寸为25 cm × 25 cm,下端固定,上端可以向上拉伸移动。像框装置4个角采用滚动轴承设计,其空拉载荷在10⁻⁴ kN左右,所以对实验结果影响甚微。试样尺寸与像框装置尺寸相同,但是在4个角上分别剪去一部分,防止剪切初始阶段就发生屈曲变形。像框剪切实验在Instron5566

电子万能拉伸实验机上进行,拉伸速率为10 mm/min,采用100 N的力传感器。图4是像框实验的几何形状,下端固支,上端可以沿拉伸方向移动。位移和载荷P在像框上端的十字头处测量。图4中:γ为剪切角;θ为像框装置臂与拉伸方向夹角;L为像框装置臂长;F_s为载荷P沿像框臂方向分解的剪切力。根据几何关系,剪切角γ和位移δ的关系为

$$\cos \gamma = \delta / 2L + \cos (\theta / 4) \quad (1)$$

$$\delta = 2L (\cos \gamma - \cos (\theta / 4)) \quad (2)$$



图3 像框实验装置

Fig. 3 Picture frame experiment setup

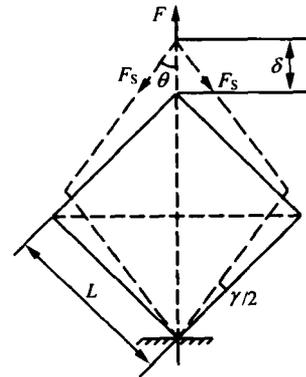


图4 像框实验的几何形状

Fig. 4 Geometry of the picture frame experiment

3 纱线抽出实验

纱线抽出实验是为了测量织物中经纱与纬纱之间的摩擦系数,一根长度为6 cm的纱线从织物中抽出。抽出实验在Instron5566电子万能拉伸实验机上进行,抽出速率为30 mm/min。图5是典型的纱线抽出曲线。每次纱线从与之垂直的纱线中抽出,其载荷便下降一定值,则摩擦系数μ可通过选择抽出实验曲线上的两个峰值获得^[7]

$$\mu = \frac{\ln (P_i / P_j)}{N_{ij}} \quad (3)$$

式中:P_i和P_j分别为第i和第j个峰上的载荷;N_{ij}为i和j两个峰之间的峰个数;α为接触角,此角

度覆盖经纱与纬纱的接触面。利用 XL T-3400 连续变体式显微镜拍摄 约为 2.79 rad。从图 5 中分别若干个峰值载荷, 根据式(3)得摩擦系数 μ 的平均值为 0.038 1。

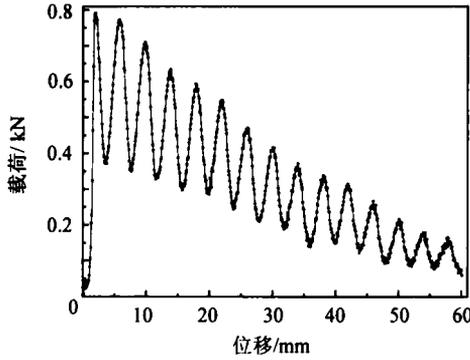


图 5 纱线抽出实验图

Fig. 5 Curve of pull-out testing of plain fabric

4 正压力

在机织物中, 纱线的波动将在交叉点产生正压力, 从而将产生抵抗剪力的摩擦力。Nguyen^[8]通过实验和理论分析初步地给出了这种正压力的定义。从结构角度来看, Katabawa 等人^[9]将纱线理想为两端固支在墙上梁单元。但是, 如果这样的话, 就不能满足织物在纯剪切在变形过程中纱线不能伸长的假设, 因此, M. Nguyen^[8]将纱线理想为一端固支, 一端滚动支撑, 假设纱线中心处承受集中载荷。但是, 纱线交叉处不是点接触, 而通常是线接触, 因此 M. Nguyen 假设的点接触力并不适合实际情况。本文将其设为线接触, 并假设正压力在接触面上平均分布, 如图 6, 则正压力为

$$N = \frac{2.048 EI h}{19 P_Y^4} \quad (4)$$

式中: P_Y 为图 6 中纱线的长度; h 为纱线交叉处最高点的挠度。 P_Y 和 h 都可通过变体显微镜测量。假设正压力 N 不随剪切改变而改变, 根据 J. Page^[10]的研究, N 与织物的织造角 有关, 而剪切过程中, 织造角 几乎不变, 因此, 正压力 N 可以看做是定值。

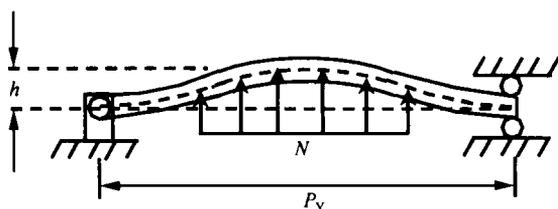


图 6 织物中纱线理想弯曲模型

Fig. 6 Idealized bending of a yarn in fabric

5 摩擦力矩与力矩平衡

一旦获得正压力 N , 在经纱与纬纱的每个交叉点上的总摩擦力 F_F 为

$$F_F = \mu N \quad (5)$$

图 7(b) 是图 7(a) 中某个经纬纱交叉面, A 是交叉面面积, W 是纱线宽度。从图 7(b) 中取出三

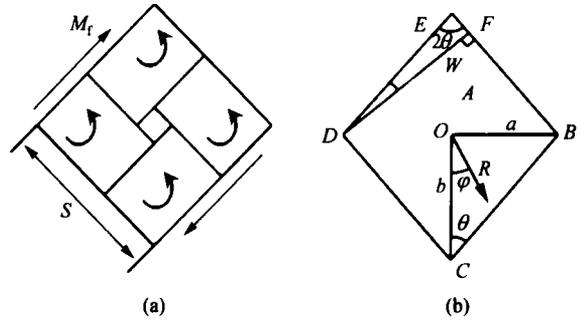


图 7 织物单元与经纬纱线交叉面

Fig. 7 Unit cell and crossover area of weft and warp

角形 OBC 在极坐标中进行研究。将摩擦力 F_F 在交叉面 A 上平均化为单位面积上的摩擦力, 则摩擦力矩为

$$M_F = 4 \int_0^{W/2 \cos(\theta)} \int_0^{W/2 \cos(\theta)} \frac{F_F}{A} R^2 dR d\theta \quad (6)$$

经纬纱线交叉面的面积 A 随着剪切角变化而变化, 可以表示为

$$A = W^2 / \cos \theta \quad (7)$$

将式(5)和式(7)代入到式(6)中, 得

$$M_F = \frac{1.024 \mu E I h W \cos \theta}{57 P_Y^4} \int_0^{W/2 \cos(\theta)} \int_0^{W/2 \cos(\theta)} \frac{d}{\cos^3(\theta)} \quad (8)$$

由图 4 所示, 沿着像框臂的剪切力 F_s 可用下面的平衡方程获得

$$F_s = P/2 \cdot \cos \theta \quad (9)$$

由于假设应力和应变是均匀地分布于织物中, 因此施加在织物单胞边长上的剪力为

$$f_s = \frac{F_s}{L/S} = \frac{PS}{2L \cos \theta} \quad (10)$$

式中: L/S 为单胞的个数。

单胞边长上的剪力 f_s 的力矩 M_f (图 7(a)) 为

$$M_f = \frac{PS^2}{L} \sin \left[\frac{\theta}{4} - \frac{\theta}{2} \right] \quad (11)$$

根据力矩平衡, 剪力 f_s 的力矩 M_f 和单胞中经纬纱线之间的摩擦力矩 M_F 相等 (如图 7(a)), 有

$$M_0 = M_f - 4M_F = 0 \quad (12)$$

将式(8)和式(11)代入到式(12)得

$$P = \frac{4.096\mu EI h L W \cos}{57 P_Y^4 S^2 \sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2} \right)} \sqrt{\frac{d}{\cos^3 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2} \right)}} \quad (13)$$

式(13)便是平纹碳纤维机织织物剪切初始阶段载荷-剪切角关系模型。

将 $\mu = 0.0381$, $L = 250$ mm, $h = 0.075$ mm 和 $P_Y = 8.4$ mm 代入到式(13), 纱线的抗弯刚度 EI 是通过将纱线当做 1 个悬臂梁安装。纱线总长为 22.5 mm, 纱线上悬挂 1 个重量为 0.065 g 的载荷。使用 1 个游标尺测量了 3 个位置上的挠度, 由此计算出 EI , 并取平均值为 0.8726 N·mm²。

图 8 是利用式(13)获得的平纹碳纤维织物载荷-剪切角的理论预测曲线与实验曲线对比。从图上可以看出, 在 0.05 rad 之前, 实验结果与理论曲线之间偏差较大, 这是因为在此阶段, 织物的剪切机理与 0.05 rad 之后的剪切机理有所不同。在 0.05 rad 之前, 剪切角较小, 纱线在交叉点处没有发生转动, 而是发生弯曲, 以此来抵抗外力, P. Grosberg 和 B. J. Park^[11] 已经详细地研究了这一阶段织物的剪切性能。由于这一阶段的剪切角很小, 因此本文的预测模型没有考虑这一阶段, 导致与实验结果有一定偏差。

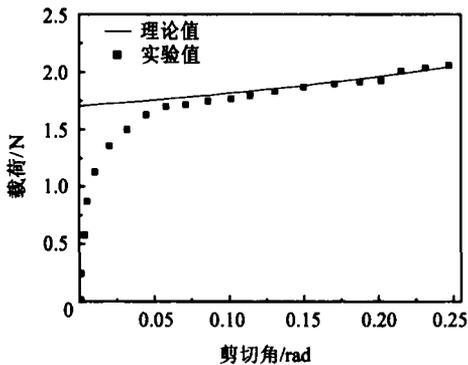


图 8 平纹碳纤维织物载荷-剪切角曲线

Fig. 8 Load vs shear angle for plain carbon fabric

6 结论

(1) 平纹织物初始剪切阶段纱线通过在交叉点处的转动摩擦来抵抗外力。

(2) 建立了织物中纱线理想弯曲模型, 通过此模型预测了织物中经纬纱线之间由于纱线波动产生的正压力。

(3) 建立了织物载荷-剪切角模型。通过与实验结果比较, 此模型可以很好地模拟 0.05 rad 之后的平纹织物的初始剪切阶段变形。

参考文献

- [1] Mack C, Taylor H M. The fitting of woven cloth to surfaces[J]. J Text Inst, 1956, 47:477-489.
- [2] Grosberg P, Park B J. The mechanical properties of woven fabrics, Part V: The initial modulus and the frictional restraint in shearing of plain weave fabrics[J]. Text Res J, 1966, 32:420-431.
- [3] Kawabata S, Niwa M, Kawai H. The finite deformation theory of plain-weave fabrics. Part III. The shear-deformation theory[J]. J Textile Inst, 1973, 64(2):62-85.
- [4] Yu W R, Pourboghrat F, Chung K, et al. Nonorthogonal constitutive equation for woven fabric reinforced thermoplastic composites[J]. Compos Part A, 2002, 33:1095-1105.
- [5] Peng X Q, Cao J. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics[J]. Composites: Part A, 2005, 36(6):859-874.
- [6] Liu L, Chen J, Xiang L, et al. Two-dimensional macro-mechanics shear models of woven fabrics[J]. Composites: Part A, 2005, 36:105-114.
- [7] Prodromou A G, Chen J. On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing), 1997, 28:491-503.
- [8] Nguyen M, Herszberg I, Paton R. The shear properties of woven carbon fabric[J]. Composite Structures, 1999, 47(1-4):767-779.
- [9] Kawabata S, Niwa M, Kawai H. The finite deformation theory of plain-weave fabrics Part III: The shear-deformation theory[J]. J Text Inst, 1973, 64(2):62-85.
- [10] Page J, Wang J. Prediction of shear force and an analysis of yarn slippage for a plain-weave carbon fabric in a bias extension state[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(6):977-986.
- [11] Grosberg P, Park B J. The mechanical properties of woven fabrics, Part V: The initial modulus and the frictional restraint in shearing of plain weave fabrics[J]. Text Res J, 1966, 3(5):420-431.

作者简介:



林国昌(1977 -) 男, 博士研究生。主要研究方向: 织物本构。

Tel: 0451-86402366

E-mail: lingc@hit.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐)