

## 石英纤维缎纹织物的剪切变形实验研究

邓金海, 陈利, 孙 绯, 吕 燕

(天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

**摘 要:** 在改进像框实验的基础上, 对5枚缎纹和8枚缎纹石英纤维机织物的剪切性能进行实验观察, 分析不同组织结构、经纬纱密度对织物剪切性能的影响. 研究发现: 在相同结构参数条件下, 8枚缎纹织物比5枚缎纹织物更容易发生剪切变形; 织物组织结构相同时, 经纬纱密度越大, 织物越不容易产生剪切变形. 基于缎纹织物的单胞模型预测了5枚缎纹和8枚缎纹石英纤维机织物的锁紧角, 预测结果与实验值基本一致.

**关键词:** 像框实验; 石英纤维; 剪切变形; 锁紧角; 织物组织

**中图分类号:** TS101.923.1; TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-024X(2013)06-0019-04

### Experimental research on shear deformation of quartz fiber satin fabrics

DENG Jin-hai, CHEN Li, SUN Fei, LÜ Yan

(Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials of Ministry of Education, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Based on the modified experiments for picture-frame, the in-plane shear properties of the 5 h-satin and 8 h-satin of quartz fiber fabrics are studied. The effects of fabric architecture and yarn density on shear properties of fabrics are analyzed. The results show that 8 h-satin fabrics are easier to form shear deformation than 5 h-satin when other conditions are the same. The fabrics are not easier to form shear deformation when the yarn density increases with the same fabric structure. Based on the satin fabric unit cell model, the locking angles of the 5 h-satin and 8 h-satin fabrics are predicted, the predicted values show good agreement with the experimental ones.

**Key words:** picture-frame experiment; quartz fiber; shear deformation; locking angle; fabric structure

二维机织物作为层合复合材料的增强体, 由于其良好的面内性能和一体化的机械织造技术, 在航空航天、军事工业、交通等领域应用广泛. 剪切变形是复合材料增强体在成型过程中最容易发生的一种变形, 不仅有纤维束绕交织点转动, 还有纱线交织点之间的摩擦, 纱线的滑移、挤压等. 像框实验是目前表征织物剪切变形的最主要方法<sup>[1-5]</sup>. 像框实验是 McGuinness 等<sup>[6]</sup>为研究复合材料层间剪切性能的流变行为而首先使用的. 像框是由4根刚性连杆构成的一个正方形框, 在对角线方向受拉力后, 以恒定速度向相反方向运动, 使织物产生剪切变形. 不少研究机构都对像框做了改进, 如: Chen 等<sup>[7]</sup>在像框底部增加了由连杆机构组成的扩大框, 可以放大载荷力; Hivet 等<sup>[8]</sup>在像框下面安置一个摄像机, 方便拍摄试样的剪切过程; 张一帆等<sup>[9]</sup>在像框2个相邻臂上增加定位条, 保证相邻臂垂直. 同样

在试样方面也有一些改进, 比如 Zhu 等<sup>[10]</sup>移除了试样所有的边缘松散纱线, 以消除试样边缘纱线产生的剪切力的影响; Akkerman 等<sup>[5]</sup>移除了临近试样中心区域的一些纱线, 防止测试时发生起皱. 本文在像框测试方法的基础上, 改进实验装置, 完善实验方法, 测试不同结构的石英纤维织物的剪切性能, 以分析影响其剪切性能的因素, 为石英纤维缎纹织物的成型性能提供理论依据.

### 1 实验部分

#### 1.1 试样制备

采用石英纤维以多臂二维织机织造了经纬纱细度 58 tex、2种经纱密度、2种纬纱密度、2种组织结构的缎纹织物. 在 VHX-1000 显微镜下拍摄了每种织物试样

收稿日期: 2013-07-04 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072175)

第一作者: 邓金海(1988—), 男, 硕士研究生

通信作者: 陈利(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: chenli@tjpu.edu.cn

的表面图像,如图 1 所示.并利用该显微镜自带的 VHX-1000 software 软件测量出每个试样的结构参数,如表 1 所示.

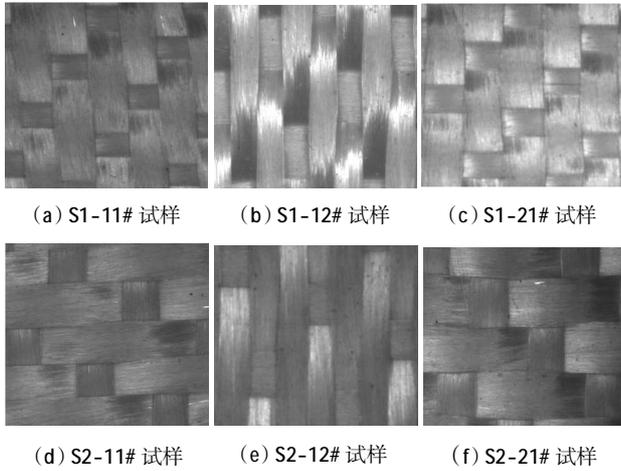


图 1 织物表面形态

Fig.1 Fabric surface morphology

表 1 织物参数规格

Tab.1 Fabric parameters

试样	织物结构	纱线密度/ (根·(10 cm) <sup>-1</sup> )		纱线宽度/ $\mu\text{m}$		纱线间距/ $\mu\text{m}$	
		经纱	纬纱	经纱	纬纱	经纱	纬纱
S1-11	5 枚缎纹	280	200	347	420	8.5	70
S1-12	5 枚缎纹	280	160	350	500	10.0	90
S1-21	5 枚缎纹	360	200	270	405	6.0	65
S2-11	8 枚缎纹	280	200	350	410	11.0	85
S2-12	8 枚缎纹	280	160	346	510	14.0	106
S2-21	8 枚缎纹	360	200	272	390	7.0	75

### 1.2 像框实验改进

像框剪切实验在日本岛津公司的 AG-250KNE 型万能材料试验机上进行.像框夹具下端固定,上端拉伸,拉伸速率为 5 mm/min,载荷传感器量程为 5 kN.改进的像框实验如图 2 所示.

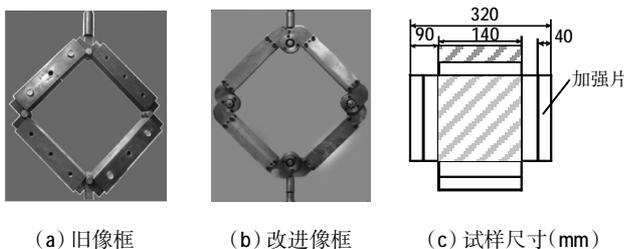


图 2 改进的像框实验

Fig.2 Modified picture-frame experiment

像框实验主要从以下几个方面进行改进:

(1) 4 个连杆铰接处采用滚动轴承代替原来的轴

承连接,这样可以大大减少实验过程中的摩擦影响;

(2) 将原来以多个螺栓穿过压片夹紧试样的方式改为两端各两个螺栓夹紧压片,保证试样受力均匀,装卸方便;

(3) 每个相框连杆上相同的位置各开一个长度 140 mm、宽度 40 mm、深 30 mm 的槽,以这种方式夹持织物,保证织物的经纬纱方向与相框连杆平行.

## 2 结果与讨论

### 2.1 织物组织对剪切性能的影响

图 3 所示为经纬纱密度为 360 根/(10 cm)×200 根/(10 cm)的 8 枚缎纹、5 枚缎纹的剪切曲线,明显可以看出,在相同的剪切角下 8 枚缎纹更容易发生剪切变形.

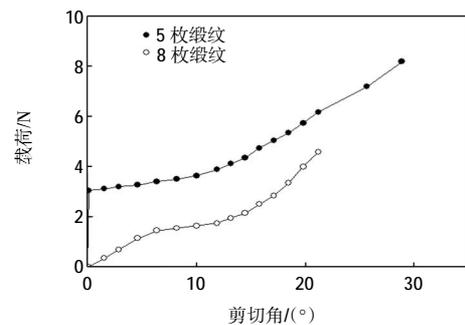


图 3 同种密度不同组织的剪切性能曲线

Fig.3 Shear performance curves of different fabric structures with same density

Liu<sup>[11]</sup>等建立模型分析了机织物中纤维束交织处正压力的分布状态,得出正压力在纤维束交织弯曲部分分布大,在平缓的地方分布很小,甚至可以忽略.8 枚缎纹与 5 枚缎纹相比,纱线交织数较少,因此,8 枚缎纹在剪切过程中纱线旋转受到的摩擦力就小.织物的单细胞模型如图 4 所示.

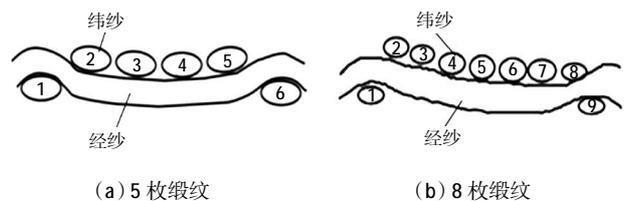


图 4 缎纹织物单胞

Fig.4 Satin fabric unit cell

从织物结构看,织物中的浮长线越长,纱线的屈曲率越小,浮长线处直接接触并挤压的纱线根数越多,直接接触纱线间的挤压要比交织处纱线的挤压更

容易.如图4(a)所示,在经纱和纬纱相交处,2个相邻的纬纱(图中1和2)通过经纱相互挤压,还需要克服经纱弯曲变形所需的力;在非交织区域,相邻纱线(图中2和3)可以直接接触并互相挤压,变形过程中承受的剪切载荷较小.纱线的屈曲率越小,织物结构就越松散,挤压时就会有更多的空间来满足剪切变形.由图4可以明显看出,8枚缎纹的浮长线比5枚缎纹长,纱线的屈曲率更小,因此,8枚缎纹织物更容易发生剪切变形.

## 2.2 织物经纬纱排列密度对织物剪切性能的影响

同种组织条件下,相同经密(纬密)不同纬密(经密)织物的剪切性能曲线分别如图5、图6所示.

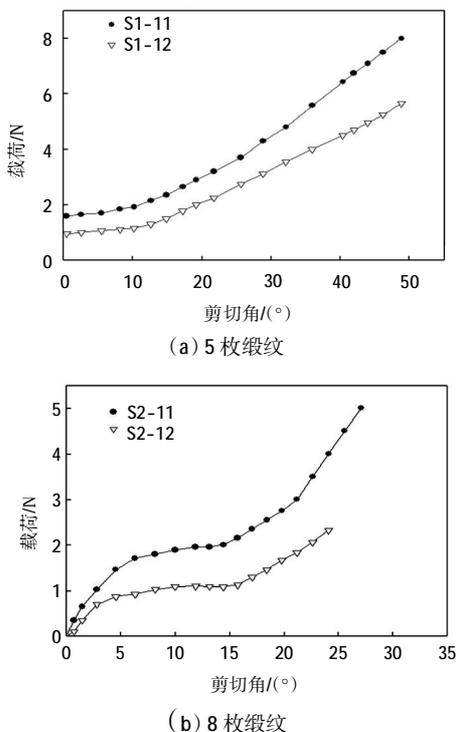


图5 同种组织相同经密不同纬密的剪切性能曲线

Fig.5 Shear performance curves of different weft densities with same warp density and fabric structure

由图5可以看出,在织物组织和经纱密度相同时,纬纱密度越大,织物越不容易发生剪切变形;同样,由图6可以看出,纬纱密度相同时,经纱密度越大,织物越不容易发生剪切变形.

首先,从织物剪切变形的过程来讲,织物在发生剪切变形时,先是纤维束的滑移和绕着交织点的转动,这时织物只需克服纱线间的摩擦力;随着剪切变形的增加,纤维束间的间距减小,直至发生挤压变形,此时除克服纤维束间摩擦力外还需克服纤维束变形所产生的弹力.所以当织物经纬纱密度越大,织物纱

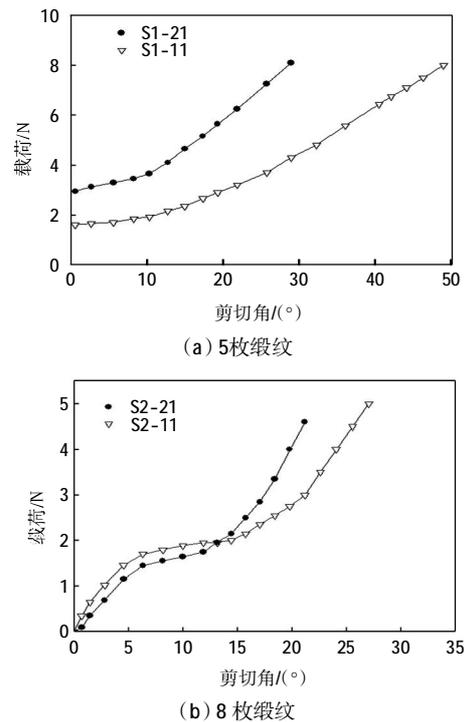


图6 同种组织相同纬密不同经密的剪切性能曲线

Fig.6 Shear performance curves of different warp densities with same weft density and fabric structure

线就越多,纤维束间的间距就越小,所需的载荷就越大,故织物越不容易发生剪切变形.

其次,在织物尺寸及其他结构相同的条件下,织物纱线越多,其经纬纱交织的次数就越多,在变形的过程中,纱线要发生旋转就会产生摩擦力,经纬纱交织的次数越多,其旋转时需要克服的摩擦力就越多.所以织物中纱线密度越大,所需载荷就越大,纱线变形的空间就越少,到达锁紧角的时间就越短.

## 2.3 缎纹织物锁紧角的预测

织物的剪切变形是有一定范围限制的.随着剪切变形的增加,织物中经纬纱线的夹角变小,纤维束间的间距也逐渐减少,当到达一定限度后织物就会发生“锁定”现象,即此时纤维束间间隙为零,此时织物中经纱和纬纱的夹角定义为织物的锁紧角 $\theta$ .通常,织物紧密程度越高,则锁紧角越大,织物越容易起皱.

织物的剪切角 $\gamma$ 和纱线间夹角 $\theta$ 的关系为

$$\gamma + \theta = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

织物的锁紧角是挤压阶段开始的判断标志,因此,这个角度的预测对缎纹织物剪切性能的研究具有重要意义.

图7所示为8枚缎纹织物单胞在剪切过程中的变化.

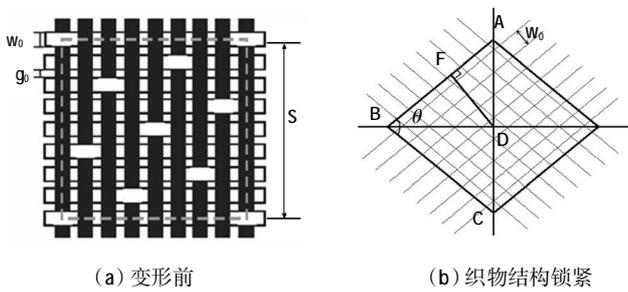


图 7 缎纹织物单胞结构图

Fig.7 Satin fabric unit cell

从图 7 所给的织物单胞变化的几何关系可知:

$$\begin{cases} \sin\left(\frac{\theta_L}{2}\right) = \frac{AD}{AB} \\ \cos\left(\frac{\theta_L}{2}\right) = \frac{DF}{AD} \end{cases} \quad (2)$$

进而得到:

$$\sin\left(\frac{\theta_L}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta_L}{2}\right) = \frac{nw_0/2}{S} \quad (3)$$

$$\theta_L = \arcsin \frac{nw_0}{S} \quad (4)$$

式中: $\theta_L$  为锁紧角; $S$  为织物单胞长度; $w_0$  为纤维束的初始宽度; $g_0$  为纤维束间的初始间距。则缎纹织物的单胞长度  $S$  为:

$$S = nw_0 + ng_0 \quad (5)$$

式中: $n$  为织物组织单胞循环数,8 枚缎纹  $n = 8$ ,5 枚缎纹  $n = 5$ 。表 2 给出了缎纹织物的预测值,可以看出,实测值和预测值吻合较好。

表 2 缎纹织物锁紧角预测值和实验值比较

Tab.2 Comparison between predict and experiment values of satin fabrics lock angle (°)

试样	实验值	预测值
S1-11	77.01	77.44
S1-12	76.85	76.46
S1-21	77.85	78.03
S2-11	74.84	75.81
S2-12	73.50	73.96
S2-21	76.70	77.13

### 3 结 论

(1) 石英纤维缎纹织物的剪切性能与织物组织、经纬纱密度密切相关;其他条件相同时,8 枚缎纹织物比 5 枚缎纹织物更容易发生剪切变形;在织物组织

相同的情况下,经纬纱密度越大,织物越不容易发生剪切变形。

(2) 织物交织点数越密集,织物越不容易发生剪切变形;织物中纤维束间距越大,纱线屈曲率越低,织物越容易产生剪切变形。

(3) 基于缎纹织物的单胞结构,预测了 5 枚缎纹和 8 枚缎纹的锁紧角,所得结果与实测值基本一致。

### 参考文献:

- [1] LIU Lu, CHEN Julie, LI Xiang, et al. Two-dimensional macro-mechanics shear models of woven fabrics[J]. Composites: Part A, 2005, 36: 105-114.
- [2] SUN Huiyu, PAN Ning. Shear deformation analysis for woven fabrics[J]. Composite Structures, 2005, 67: 317-322.
- [3] 林国昌, 万志敏, 杜星文. 机织物剪切行为研究[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 1005-1008.
- [4] JEAN Launay A, GILLER Hivet A, AHN V Duong. Experimental analysis of the influence of tensions in plane shear behaviour of woven composite reinforcements[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68: 506-515.
- [5] CAO J, AKKERMAN R, BOISSE B P. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results[J]. Composites: Part A, 2008, 39: 1037-1053.
- [6] MCGUINNESS G B, CMÓ Brádaigh. Development of rheological models for forming flows and picture-farme shear testing of fabric reinforced thermoplastic sheets[J]. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1997, 73: 1-28.
- [7] LIU L, CHEN J. A solid mechanics shear model of commingled glass/polypropylene woven fabrics[C]//Third MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics. Massachusetts: [s.n.], 2005: 237-241.
- [8] DUMONT F, HIVET G, ROTINAT R, et al. Field measurements for shear tests on woven reinforcements[J]. Mécanique Ind, 2003(4): 627-635.
- [9] 张一帆, 陈利, 孙绯. 预定型机织物剪切变形实验研究[J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 29-34.
- [10] ZHU B, YU T X, TAO X M. An experimental study of in-plane large shear deformation of woven fabric composite [J]. Composite Science and Technology, 2007, 67: 252-261.
- [11] LIU Lu, CHEN J, JENNIFER L. Modeling of fiction and shear in thermostamping of composites partIII[J]. Journal of Composite Materials, 2004, 38(21): 1931-1947.