复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第27卷 第2期 4月 2010年
Vol. 27 No. 2 April 2010

文章编号：1000-3851(2010)02-0154-07

预定型平纹织物的剪切模型

陈 利*[1]，张一帆[1]，孙 飞[1]，孙 颖[1]，李艳亮[2]，唐邦铭[2]，梁子青[2]

（1. 天津工业大学 复合材料研究所，先进纺织复合材料教育部重点实验室，天津 300160；
2. 北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室，北京 100095）

摘 要： 预定型织物是一种用于纺织复合材料液态成型的新型材料，可以提高复合材料构件的形状精度和尺寸精度。由于织物中存在定型剂，使织物材料的性能发生改变。基于像框剪切试验，建立预定型平纹织物剪切变形的理论模型。与干态织物相比，重点分析了预定型织物中纱线的弯曲刚度和纱线摩擦系数的变化对剪切性能的影响；同时模型中考虑了剪切过程中纱线轴向力的变化对剪切性能的影响。另外，利用立式显微镜观察了在纱线挤压阶段纱线宽度变化的规律，考虑了定型剂和织物结构对纱线宽度变化的影响。根据平衡方程得到预定型平纹织物的剪切模型，通过与试验结果比较，该模型可以较好地预测预定型平纹织物的剪切变形性能。

关键词： 像框试验；平纹预定型碳纤维织物；纱线轴向力；剪切变形；摩擦；挤压

中图分类号： TB332；TB330.1 **文献标志码：** A

Shear model of tackified plain fabrics

CHEN Li*[1], ZHANG Yifan[1], SUN Fei[1], SUN Ying[1], LI Yanliang[2], TANG Bangming[2], LIANG Ziqing[2]

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Institute of Textile Composites, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2. National Key Laboratory of Advanced Composites, Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095, China)

Abstract: Tackified fabric is the material which is used in liquid composite molding, and it can improve the shape precision and dimension precision of the composite component. The property of the fabric is changed due to the tackifier. Based on the picture frame experiment, a theoretical model was built. The effects of the bending rigidity and friction coefficient of tackified yarn on the shear behavior were analysed in the article, and the axial force of yarn during the shear process was considered in the model. In addition, the variation of width of tackified yarn during the shear loading was observed by the microscope, and the influence of tackifier and fabric architecture was considered. An shear model was derived from the equilibrium equation. The results show that the model can predict the shear performance of the tackified plain fabric well.

Keywords: picture frame experiment; plain tackified carbon fabric; axial force of yarn; shear deformation; friction; compression

在先进复合材料的低成本技术方面，以RTM、RFI等为代表的液态成型技术是当前国际研究与发展的主流。欧洲A380和美国Boeing 787飞机都已大量使用了RTM、RFI技术。随着RTM、RFI等液态成型技术的逐渐成熟，人们发现降低装配成本、铺层成本等都可以获得更大的低成本空间，一体化技术应运而生[1-2]，其关键技术包括预成型技术和预定型技术等。

预成型技术是采用纺织工艺将增强纤维编织成制件的近净体增强结构，但其成本较为昂贵。预定型技术是近年来发展起来的一种新的预成型体制备技术，借助特殊的定型材料将干态二维织物定型成制件的近净体增强结构。二维织物由于其成本低、尺寸不受限制而广泛地应用到复合材料中，定型剂

收稿日期： 2009-04-14；**收修改稿日期：** 2009-11-05
基金项目： 天津市应用基础及前沿技术研究计划(08JCZDJC24400)；国家自然科学基金(A020309)；先进复合材料国防重点实验室基金(9140C440203060C44)
通讯作者： 陈 利，教授，主要从事先进纺织复合材料研究工作 E-mail：chenli@tjpu.edu.cn

的加入会改变织物内部以及表面的状态，引起纤维物性和织物力性的变化，从而影响织物的剪切变形能力和可成型性能。因此，研究预定型织物剪切变形性能具有重要的学术意义和工程实用价值。

在织物剪切变形性能研究方面，研究人员已经做了很多工作，McBride 和 Chen[3]假设纱线厚度在剪切过程中不发生变化，建立典型的平纹织物单胞，将交织纱线的弯曲路径假设为正弦、余弦曲线，建立单胞模型预测了平纹织物的剪切性能，该模型被广泛地接受。近来，Cao 等人[4]总结和比较了各个实验室的织物剪切试验方法及试验结果，分析了试验结果产生差距的原因，提出了标准化各个实验室测试结果的方法。Zhu 等人[5]通过改进像框剪切试验，对平纹织物的剪切变形进行了研究，观察了剪切过程中织物的状态，纱线的宽度、厚度的变化，以及织物细观结构的变化。在试验观察的基础上，文献[6]利用能量平衡方法建立理论模型，预测了平纹织物的剪切性能和起折角度，将织物的剪切变形能量分为剪切过程中的摩擦消耗和纱线的横向挤压消耗，横向挤压力是通过 U 型槽中的纱线压缩试验获得。Wang 等[7]对预浸机织物的剪切性能进行了分析，根据预浸织物的特点以及大变形理论，利用张量方法得到了预浸织物的本构方程。对于织物剪切变形的分析，同样是分析了摩擦和侧向挤压的影响。Lin 等[8]基于 TexGen 建立的模型以及纱线的本构方程，考虑了摩擦和挤压力作用下织物的剪切变形，忽略纱线间的滑移，建立有限元模型预测了平纹织物的剪切性能。

到目前为止，所建立的理论模型大多集中于干态织物和预浸织物的变形能力，而对于预定型机织物的剪切变形研究还未见有报道。本文作者在前人工作的基础上，建立了预定型平纹织物的剪切变形分析模型，并重点考虑了纱线轴向力和定型剂对织物剪切性能的影响。

1　预定型织物

预定型织物不同于干态织物和预浸织物，它是由通过在织物上涂敷一定含量的定型剂制备而成。预定型织物中定型剂的含量通常小于 10%，它的作用是对织物中的纤维起到一定的粘结作用，以保持织物的形态。从定型剂处理的织物纤维电镜照片(图 1)中可以清晰地看到，定型剂颗粒均匀地分布在纤维间，使纤维彼此相互粘结，增加了纱线的抗弯刚度，降低了织物的变形能力，同时使织物交织点处的纱线相互粘结在一起，以保持织物的形态。但是，定型剂产生的这种纱线和纱线、纤维和纤维之间的粘结力相对较弱。这种弱的粘结力使得织物既能保持其形态，又能在外力作用下发生一定的变形，满足结构件铺敷成型的工艺要求。

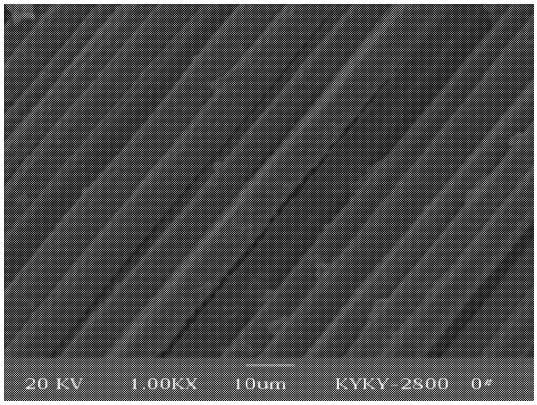


图 1　预定型织物中纤维的表面形貌

Fig. 1　Surface morphology of tackified fiber

2　像框剪切试验

像框剪切试验是研究织物剪切性能一种有效的试验方法。图 2 是试验所使用的像框装置，其尺寸为 200 mm×200 mm，织物发生纯剪切变形的有效区域为 160 mm×160 mm。根据像框几何变形与运动关系可得

$$\gamma+\theta=\pi/2 \tag{1}$$

$$\cos(\theta/2)=\delta/(2L)+\cos(\pi/4) \tag{2}$$

$$\delta=\delta'-2(L'-L)(\delta'/2L') \tag{3}$$

式中：δ 为预定型织物对角线方向发生的位移；δ' 为像框对角线方向发生的位移；γ 为预定型织物的剪切角；θ 为经纬向纱线间的夹角；L 为织物有效区域的边长；L' 为像框的边框长度。

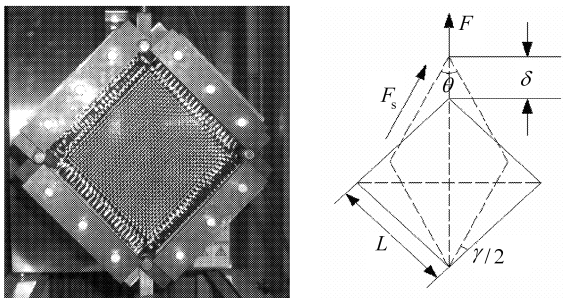


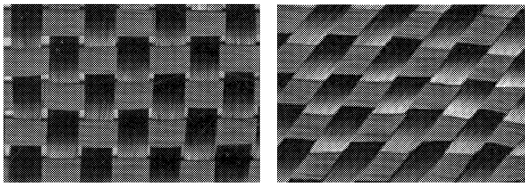
图 2　像框剪切试验

Fig. 2　Photo and schematic diagram of picture frame

作用在织物上的剪切力 F_s 与拉伸载荷 F 的关系为

$$F_s = F/[2\cos(\theta/2)] \tag{4}$$

预定型织物是在干态织物上按一定比例涂敷定型剂而制成。本研究中干态织物选用 T700－12K 碳纤维平纹织物，定型剂为北京航空材料研究院提供的 ES－T321 环氧定型剂。预定型平纹织物在像框剪切变形过程中的交织结构变化如图 3 所示。未发生变形前(图 3(a))，经纱和纬纱线相互垂直，纱线间有孔隙；当织物发生剪切时，织物中孔隙减少直至消除，此时相邻纱线接触并开始产生挤压(图 3(b))。



(a) Before deformation　　(b) After deformation

图 3　预定型平纹织物细观结构

Fig. 3　Mesoscopic of tackified plain fabric

3　剪切模型

3.1　基本假设

类似于干态平纹织物，预定型平纹织物的剪切变形可分为 3 个阶段。第 1 阶段为弹性变形阶段，此时织物所受剪切力小于交织点处的摩擦阻力；第 2 阶段为纱线转动阶段，此时织物中的纱线绕交织点转动；当纱线转动至相互挤紧时，织物剪切过程进入第 3 阶段，即纱线挤压阶段。此时纱线锁紧，相互挤压直至产生折皱。织物中相邻纱线相互接触时经纬纱线间的夹角[9]称为织物锁紧角。

为了预测预定型织物的载荷-剪切角曲线，建立如下假设：(1) 定型剂在纱线中分布均匀；(2) 忽略经纱和纬纱在剪切过程中的相对滑移；(3) 纱线在长度方向上没有伸长；(4) 织物在剪切过程中的厚度不变。

3.2　纱线交织点的摩擦阻力

纱线间的摩擦阻力是影响织物剪切过程中纱线转动的主要因素。织物中经纱和纬纱相互交织，纱线有弯曲波动，交织点处会产生正压力，进而产生摩擦阻力以抵抗织物的剪切变形。Nguyen 等[10]从梁的弯曲变形理论，将纱线假设为一端固支、一端滚动支撑的梁，定义了一个集中力作为交织点处的正压力。Lin 等[11]在同样假设的基础上，将集中力改为均匀分布的线力，得到了交织点处的正压力。另外，在实际生产和试验过程中，纱线还会受到轴向力的作用，而且纱线的轴向力对交织点处的正压力有较大的影响。Launay 等人[12]通过实验研究了纱线轴向力对织物性能的影响，比较了纱线在有轴向力和没有轴向力情况下织物的剪切性能，发现试验结果有很大差异，证明了纱线的轴向力对织物剪切性能有很大的影响。

基于 Potluri 等[13]拍摄的机织物纱线横截面和纱线弯曲状态的照片(图 4(a))，建立交织点的单元模型。如图 4(b)所示，假设正压力 q 均匀地分布在接触面上，纱线的宽度为 b，即经纬纱线的初始接触长度，相邻纱线间的距离为 $2a$，纱线的厚度为 T。另外，纱线还受到轴向力 F_i 的作用。因此，根据织物交织点单元的受力情况，预定型纱线的挠度曲线微分方程为

$$B\frac{\mathrm{d}^2 w(x)}{\mathrm{d}x^2} = F_i w(x) - M(x) \tag{5}$$

式中：$M(x)$为纱线的弯曲方程；$w(x)$为纱线的挠度曲线方程；B 为预定型纱线的弯曲刚度。

交织点处的初始正压力 q_0 可以表示为

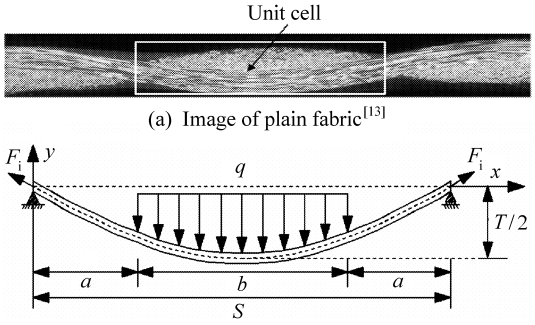
$$q_0 = \frac{2Bk^4 h}{2\cosh(ka)\cosh(kS/2) - (a^2k^2 - S^2k^2/4 + 2)} \tag{6}$$

式中：

$$k^2 = F_i/B \tag{7}$$

$$S = b + 2a \tag{8}$$

纱线弯曲的最大挠度为纱线厚度的一半，即纱线弯曲的最大挠度为 $h = T/2$。



(b) Unit cell of cross point of tackified fabric

图 4　预定型平纹织物的交织点单元模型

Fig. 4　Unit cell of cross point of plain tackified fabric

另外，在剪切过程中，经纬纱线的接触面不断

变大，正压力的分布范围也逐渐变大，基于纱线厚度不变的假设，即保持纱线变形前后的挠度曲线的最大挠度相同，通过计算得到在变形后纱线弯曲形态的挠度曲线方程，发现变形前后纱线的弯曲形态发生改变(图 5)，纱线有伸长的趋势。由于织物端部被像框夹持，纱线的轴向内应力 F_i 会随着剪切逐渐增大，织点处的正压力也会逐渐增加。

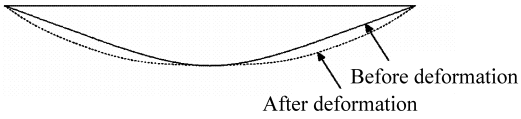


图 5　纱线弯曲变形状态

Fig. 5　Bending deformation of yarn

假设织物发生剪切变形前纱线弯曲的挠度曲线方程为 $w_b(x)$，变形后的挠度曲线方程为 $w_a(x)$，因此，剪切过程中，纱线受到的轴向拉力方程可以表示为

$$F_i = E_i \cdot A \cdot \frac{\int_0^S \left(\sqrt{1+w_a'(x)^2} - \sqrt{1+w_b'(x)^2}\right)\mathrm{d}x}{\int_0^S \sqrt{1+w_b'(x)^2}\,\mathrm{d}x} \tag{9}$$

式中：E_i 为纱线的弹性模量，通过拉伸试验测得为 70 GPa；A 为纱线的横截面面积。

基于方程(5)和(9)可以得到剪切过程中的正压力 q 和轴向力 F_i。假设摩擦均匀地分布在经纬纱线的交织面上，交织点处的摩擦集度可以表示为

$$F_p = \mu\left[q + \frac{F_i \sin(T/S)}{D}\right] \tag{10}$$

式中：μ 为纱线的摩擦系数，通过纱线抽出试验获得[3, 11]；D 为交织面面积，其可以表示为

$$D = b^2/\sin\theta \tag{11}$$

如图 6 所示，剪切过程中，经纬纱线交织面变为一个菱形。将其放在一个极坐标系 OBC 中研究，摩擦力 F_p 均匀地分布在交织面上，则交织点处摩擦力矩为

$$M_p = 4\int_0^{\pi/2}\int_0^{b/2\cos(\theta/2-\varphi)} F_p R^2\,\mathrm{d}R\,\mathrm{d}\varphi \tag{12}$$

3.3　单胞模型

图 7 给出了预定型平纹织物单胞。M_s 为单胞受到的剪切力矩，M_f 为单胞的摩擦力矩，M_c 为单胞中纱线间侧向挤压力矩。因此，单胞的平衡方程可以表示为

$$\sum M = M_s - M_f - M_c = 0 \tag{13}$$

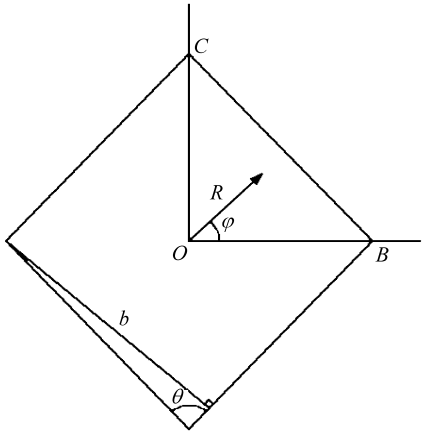


图 6　经纬纱线交织区域

Fig. 6　Cross area of warp and weft

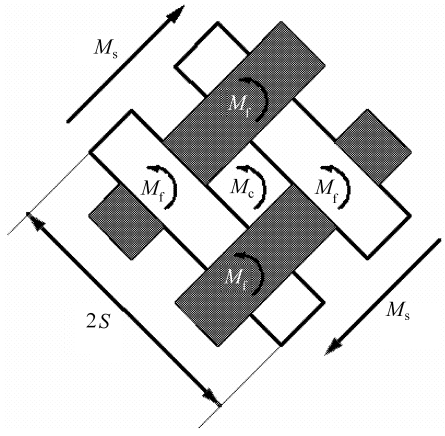


图 7　预定型平纹织物单胞

Fig. 7　Unit cell of tackified plain fabric

在剪切过程中，作用在单胞上的剪切力为

$$f_s = F_s \cdot \frac{2S}{L} \tag{14}$$

$L/2S$ 为沿方形试样边方向上单胞的个数。

因此，单胞受到的剪切力的力矩为

$$M_s = 2 f_s S \sin\theta \tag{15}$$

3.4　弹性变形阶段分析

剪切初始阶段，剪切力很小不足以克服经纬纱线交织点处的摩擦力，剪切变形是一个弹性变形阶段。剪切力会引起纱线非接触区域的纱线发生小角度偏转。

如图 8 所示，纱线在 2 个交织点间发生小角度的偏移。由于发生剪切的角度较小，作用在每根纱线上的剪切力为 $f_s/2$，根据织物弹性阶段变形的特点，在 A、B 两点处应该满足转角为 0 的边界条件，B 点有大小为 M_0 的弯矩：

$$M_0 = f_s \cdot S \tag{16}$$

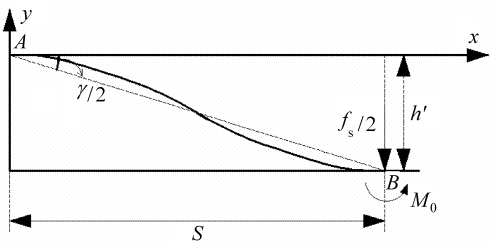


图 8　织物交织单胞初始变形状态示意图

Fig. 8　Schematic diagram of unit cell at initial stage

基于上面的分析，可以得到单根纱线受到的剪切力为 $f_s/2$ 和变形最大位移 h' 的关系：

$$f_s=-24Bh'/S^3 \tag{17}$$

剪切角和变形位移的关系为

$$\tan(\gamma/2)=-h'/S \tag{18}$$

由公式(17)和(18)可得

$$f_s=24B\tan(\gamma/2)/S^2 \tag{19}$$

预定型织物受到的剪切力大于交织点处的摩擦力时，纱线开始绕交织点发生转动。因此，初始阶段的剪切角最大值由交织点处的剪切力矩和最大摩擦力矩确定。

在弹性变形阶段，织物几乎没有发生转动，因此，交织点处的摩擦力矩可用公式(9)来表示，其中面积即为初始状态时的面积。

交织点处的剪切力矩为

$$M_{is}=(f_s/2)\cdot S \tag{20}$$

由力矩平衡可得初始阶段最大剪切角为

$$\gamma=2\arctan\left\{\frac{f_p/S}{48B}[\sqrt{2}+\ln(\sqrt{2}+1)]\right\} \tag{21}$$

3.5　纱线转动阶段分析

在纱线转动阶段，经纱和纬纱绕交织点开始旋转，交织面积逐渐变大。基于上面的分析，转动阶段的摩擦力矩即为公式(12)中给出的。因此，预定型平纹织物单胞的摩擦力矩可以表示为

$$M_f=4M_p \tag{22}$$

3.6　纱线挤压阶段分析

预定型机织物在达到结构锁紧后，即相邻的纱线相互接触。在纱线挤压阶段，纱线间的挤压力成为抵抗剪切变形的主要载荷。

如图 9 所示，相邻纱线间的侧向挤压发生在交织点处。剪切过程中，纱线间相互挤压，纱线的宽度明显减小，纱线转动时，经向纱线 B 和 C 通过与其相交织的纬向纱线 D 对经向纱线 A 施加压应力 σ_2。

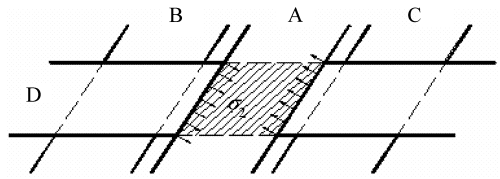


图 9　织物交织点的挤压

Fig. 9　Compression at cross point

对于预定型织物，纱线间的挤压刚度与普通织物相比明显变大。在纱线挤压阶段，纱线的宽度逐渐减小，而预定型织物由于纱线的横向刚度变大，挤压过程中宽度减小、速度变慢，纱线间的挤压载荷增大。因此，本文作者利用立式电子显微镜观察了预定型织物中纱线宽度在剪切过程中的变化，基于普通织物中纱线宽度的变化规律[14]，加入织物的屈曲率和定型剂浓度 2 个影响因素，拟合出预定型纱线宽度变化的方程：

$$b'=b(\cos\gamma)^{mC-n\lambda} \tag{23}$$

式中：C 为织物的屈曲率，其值为 0.6447%，用来反映织物的结构和紧度；λ 为所加定型剂的质量浓度；m 和 n 为拟合系数(见表 1)。加入定型剂后，纱线的横向刚度变大，纱线的宽度减小、速度变慢。

表 1　预定型织物纱线宽度变化拟合系数

Table 1　Width variation's fitting value of tackified yarn

No.	Tackifier concentration/%	Fitting value	
		m	n
P1	0.0	137.68	0.00
P2	4.5	137.68	44.84
P3	8.0	137.68	46.40
P4	15.0	137.68	45.55

Cai 和 Gutowski[14-15] 建立的纱线弹性模型，得到了纱线的柔度系数：

$$S_{11}=4V_a/(\pi EV_f) \tag{24}$$

$$S_{22}=\frac{\beta^4}{3\pi E}\left(\sqrt{\frac{V_a}{V_f}}-1\right)^4 \tag{25}$$

$$S_{12}=-\frac{16}{\pi^3}\frac{\beta^2}{E}\sqrt{\frac{V_a}{V_f}}\left(\sqrt{\frac{V_a}{V_f}}-1\right)^3 \tag{26}$$

式中：V_a 为预定型纱线最大纤维体积含量；V_f 为剪切过程中的纤维体积含量；E 为碳纤维的弹性模量；β 是一个经验常数，对于碳纤维一般取 300～350[14]。

预定型纱线发生侧向挤压的过程中，纱线的截面会发生变化。将预定型纱线看作是横观各向同性

材料，即可得到横向挤压刚度：

$$C_{22} = S_{11}/(S_{11}S_{22} - S_{12}^2) \tag{27}$$

对于定型剂含量不同的预定型纱线，定型剂在纱线中所占据的体积也不同，因此，预定型纱线能够达到的最大纤维体积含量就不同。通过假设纱线在达到最大纤维体积含量时的堆积方式为四方堆积同时，定型剂均匀地分布在每根纤维表面。

预定型纱线最大纤维体积含量可以表示为

$$V_a = \frac{\pi^2 d^2 \rho'}{16M + 4\pi\rho' d'^2} \tag{28}$$

式中：ρ'为定型剂的密度，大小为 1.178 g/cm^3；d 为纤维直径；M 为单位长度纱线上所加定型剂的质量。

挤压过程中预定型纱线宽度不断减小，纱线的横向挤压应变 ε_2 可以表示为

$$\varepsilon_2 = \frac{b' - b}{b} \tag{29}$$

纱线间的挤压力为

$$F_c = \sigma_2 \cdot T \cdot S \tag{30}$$

图 10 是一个交织点处受到相邻纱线挤压应力的状态，挤压力对交织点的力矩 M_2 为

$$M_2 = 2\int_{(\sin\gamma-1)S/2}^{(\sin\gamma+1)S/2} F_c \cdot x\mathrm{d}x = S^2 F_c \sin\gamma \tag{31}$$

预定型平纹织物在每个交织点都会发生侧向挤压，单胞受到的挤压力矩为

$$M_c = 4M_2 \tag{32}$$

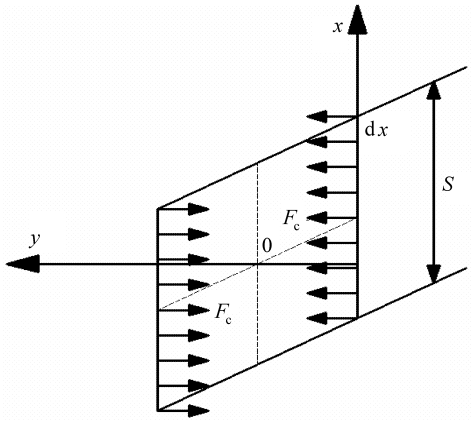


图 10　交织点处的挤压力分布

Fig. 10　Distribution of compression at cross point

3.7　模型验证

3.7.1　预定型纱线性能参数

与干态织物相比，预定型织物中的纱线弯曲刚度和横向挤压刚度都变大，纱线变硬，难于变形。本文中通过自制的试验测试得到纱线的弯曲刚度(图 11)。将纱线拉伸测试仪改造，左端的拉伸仪将纱线固定，同时向下运动，则右端会给纱线一个向上的力使其发生弯曲变形；右端的天平可定义测量纱线弯曲受到的载荷，左端改造的拉伸试验仪可以读出纱线发生弯曲的位移，即可以知道纱线发生弯曲时的挠度，通过梁弯曲变形计算公式可以得到纱线的弯曲刚度。图 12 中给出定型剂浓度和纱线的弯曲刚度曲线。弯曲刚度接近于线性的增长过程，定型剂浓度为 15 wt%时纱线的弯曲刚度约为普通纱线的 8 倍。

另外，定型剂的加入使得纱线保持一种弯曲的状态，不易发生相对转动；利用纱线抽出试验，测量纱线的摩擦系数。从图 12 可以看出预定型纱线摩擦系数与干态纱线相比略有增加。

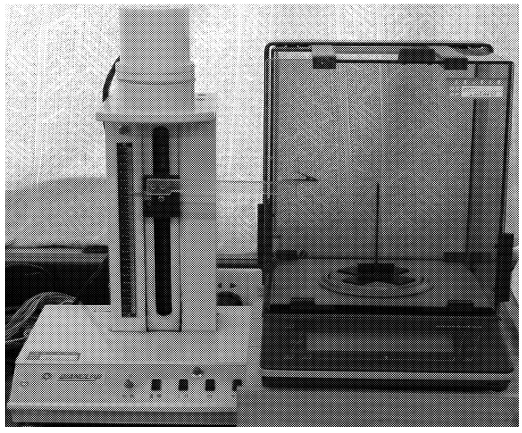


图 11　纱线弯曲刚度测试仪器

Fig. 11　Equipment of bending rigidity of yarn

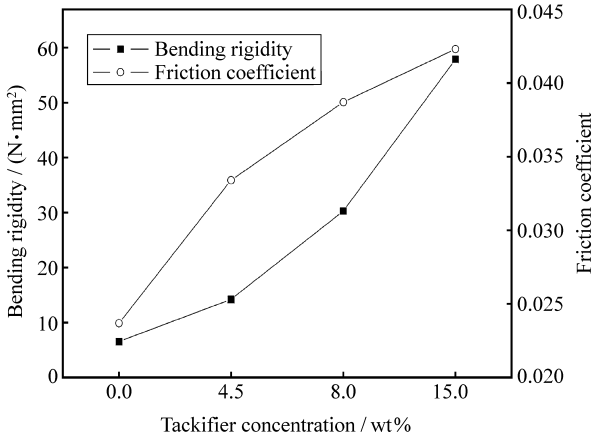


图 12　纱线的弯曲刚度和摩擦系数

Fig. 12　Bending rigidity and friction coefficient of yarn

3.7.2　预定型织物剪切模型验证

由预定型平纹织物单胞的平衡方程可得到预定型织物剪切变形过程中载荷-剪切角的关系。表 2 中给出了预定型织物及纱线的参数。将模型的预测值和像框剪切试验值进行比较。从图 13 可以看出，试验曲线和预测曲线吻合较好。该曲线整体呈非线性的状态，初始阶段大致呈线性特征，非线性是由于纱线的摩擦、纱线受到的轴向力和相互间的挤压引起的。

表 2　预定型织物及纱线的参数

Table 2　Parameter of tackified fabric and tackified yarn

No.	Width of yarn/mm	Density of fabric/ (tows·cm^{-1})	Thickness of yarn/mm
P1	3	3	0.38
P2	3	3	0.38
P3	3	3	0.38
P4	3	3	0.38

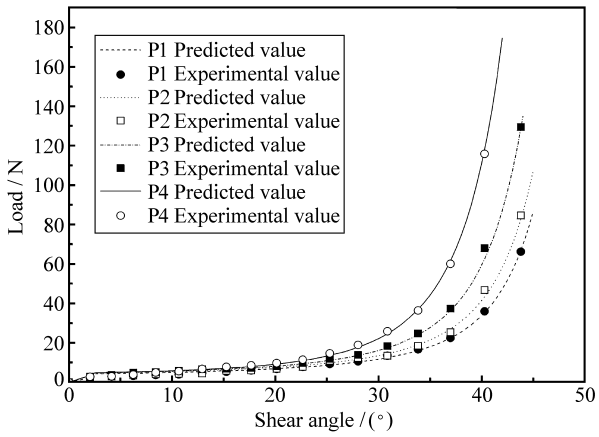


图 13　预定型平纹织物试验值和预测值比较

Fig. 13　Comparison between experimental value and predicted value of plain tackified fabric

4　结　论

（1）根据预定型平纹织物剪切变形的特点，可以将预定型机织物的剪切行为分为 3 个不同的阶段进行分析和模拟。

（2）根据预定型纱线弯曲变形特征，建立了其弯曲模型，剪切过程中经纬向纱线的接触面积不断变大，纱线间的摩擦力也不断变大，同时剪切过程中纱线受到轴向的内应力，对预定型织物的剪切性能有很大的影响。基于摩擦力均匀分布在交织面的假设，模拟了剪切过程中经纬纱线的摩擦力矩。同时利用纱线抽出试验验证了预定型织物中纱线的摩擦系数略有增加。

（3）通过对不同定型剂含量纱线宽度变化的观察，建立了纱线的宽度变化模型。假设纱线挤压变形后的排列方式，计算得到不同定型剂含量的纱线所能达到的最大纤维体积含量和不同定型剂浓度的纱线挤压过程中受到的挤压力。建立预定型织物单胞的力矩平衡方程，得出其剪切性能曲线，与像框剪切试验结果比较，该模型可以较好地模拟预定型平纹织物的剪切变形性能。

参考文献：

[1]　益小苏. 先进复合材料技术研究与发展 [M]. 北京：国防工业出版社，2006：99-107.

[2]　安学锋，张　明，益小苏. 液态成型用增韧-预定型双功能增强织物研究 [C]// 第十五届全国复合材料学术会议论文集. 北京：国防工业出版社，2008：483-486.
An Xuefeng, Zhang Ming, Yi Xiaosu. Toughening - tackifying bi - function reinforcing fabrics for liquid composite molding [C]// The 15th National Conference on Composite Materials. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 483-486.

[3]　McBride T M, Chen J. Unit cell geometry in plain weave fabrics during shear deformations [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(3): 345-351.

[4]　Cao J, Akkerman R, Boisse P, et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results [J]. Composites Part A, 2008, 39(6): 1037-1053.

[5]　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.

[6]　Zhu B, Yu T X, Teng J, et al. Theoretical modeling of large shear deformation and wrinkling of plain woven composite [J]. Journal of Composite Material, 2009, 43(2): 125-138.

[7]　Wang Wei, Du Xingwen. The analytical model of shear properties of the pre-impregnated woven fabric composite [J]. Journal of Elastomers and Plastics, 2009, 41(2): 105-117.

[8]　Lin Hua, Clifford J Mike, Long C Andrew, et al. Finite element modelling of fabric shear [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2009, 17(1): 1-16.

[9]　Prodromou A G, Chen J. On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms [J]. Composites Part A, 1997, 28(5): 491-503.

[10]　Nguyen M, Herszberg I, Paton R. The shear properties of woven carbon fabrics [J]. Composite Structures, 1999, 47(1/4): 767-779.

[11]　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.
Lin Guochang, Wan Zhimin, Du Xingwen. Research on shear behavior for woven fabrics [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 1005-1008.

[12]　Launay J, Hiveta G, Duong A V, et al. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcetnents [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(2): 506-515.

[13]　Potluri P, Parklar I, Ramgulam R B, et al. Analysis of tow deformations in textile preforms subjected to forming forces [J]. Composites Part A, 2006, 66(2): 297-305.

[14]　Cai Z, Gutowski T G. The 3D deformation behavior of a lubricated fiber bundle [J]. Journal of Composite Material, 1992, 26(8): 1207-1237.

[15]　Gutowski. 先进复合材料制造技术 [M]. 李宏运，译. 北京：化学工业出版社，2004：87-103.