

机织结构预成型体本构关系和剪切性能

张一帆¹ 陈利¹ 李金超¹ 李姗姗¹ 潘宁^{1,2}

(1 天津工业大学,天津 300160)

(2 Biological and Agricultural Engineerings Department, University of California, Davis. California 95616. U. S. A.)

文 摘 综述了国内外纺织预成型体的剪切性能及其本构关系的研究进展。在简要介绍机织预成型体的分类及其结构和特性的基础上,从实验方法、本构关系以及变形模拟等方面概述了纺织预成型体剪切性能的研究进展,对比分析了纺织预成型体剪切性能测试方法,描述了纺织预成型体剪切变形的几何非线性和材料非线性特征,总结了纺织预成型体的本构模型以及可成型性数值模拟方面的研究成果,并提出了目前存在的问题和今后的发展方向。

关键词 纺织预成型体,剪切性能,本构关系,织物成型性

Constitutive Relationships and Shear Properties of Woven Preforms

Zhang Yifan¹ Chen Li¹ Li Jinchao¹ Li Shanshan¹ Pan Ning^{1,2}

(1 Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

(2 Biological and Agricultural Engineerings Department, University of California, Davis. California 95616. U. S. A.)

Abstract This paper reviews the researches on the constitutive relationships and shear performances of woven preforms. Firstly, the classifications of the woven preforms are introduced, and the structures and properties of 3D woven preforms are analyzed. Then, the recent progresses of research related to the woven preforms are reviewed from the viewpoints of experimental method, constitutive theory and deformation simulation. The typical non-linear characteristics of the textile preforms are described, several models of constitutive relationship of woven preforms are introduced, and the progresses on the simulation of the fabric formability are reviewed. Finally, the existing problems and the investigation tendency of 3D textile preforms are proposed.

Key words Textile preform, Shear properties, Constitutive relationships, Fabric formability

1 引言

纺织结构预成型体类似于建筑物中的钢结构框架,是复合材料的增强结构骨架。通过各种方式获得的纺织结构预成型体具有广谱的孔隙结构形貌、可大范围调节的纤维取向分布,使得最终复合材料的结构性能具有可设计性。同时,纺织结构预成型体在整体上由结构单元在二维和三维方向上重复排列组成,不仅从结构上增强了复合材料,而且还能实现复合材料的近净成型。

机织结构预成型体根据成型方法和织物厚度方向的尺寸分为二维机织结构和三维机织结构。采用多层经纱技术制成的、织物厚度为三根以上纱线厚度

的预成型体为三维机织结构。采用二维机织结构预成型体制成的层合复合材料在厚度方向上缺乏纤维增强,分层失效是其主要的破坏形式^[1-3]。

三维机织技术可以近净形制备形状复杂、不同尺寸的异形构件,实现结构的一体化设计,减少零配件数量,保证结构的整体性^[4],可以显著提高复合材料的性能(图1)。采用三维机织结构增强的树脂基复合材料的冲击损伤面积是二维机织层合复合材料的1/10。采用三维机织结构增强的碳基复合材料的拉伸强度是纯石墨材料的5-8倍。

纺织结构预成型体作为复合材料结构的中间体,对复合材料的成型和树脂渗透有着极其重要的影响。

收稿日期:2009-12-16;修回日期:2010-03-09

基金项目:天津市应用基础及前沿技术研究计划(08JCZDJC24400)

作者简介:张一帆,1983年出生,博士研究生,主要从事先进纺织复合材料研究。E-mail:zhangyifan1228@hotmail.com

在复合材料成型过程中,纺织结构预成型体可能处于复杂的三维应力状态。铺放、模压、剪裁等操作使得预成型体产生了有效的变形,导致织物结构内编织紧度、纤维取向以及纤维分布等的变化(图2),从而影响复合材料的可成型性、树脂的渗透性能以及最终复合材料产品的力学性能等。

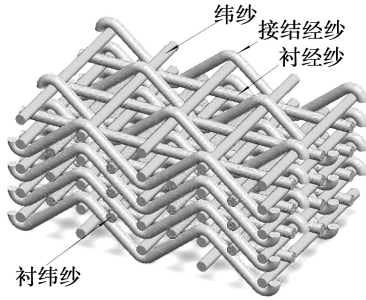


图1 典型3D机织预成型体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D woven preform

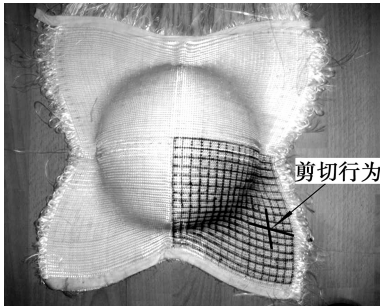


图2 三维机织物半球成型

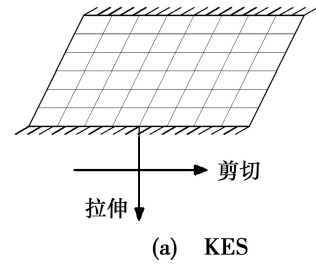
Fig. 2 Hemisphere moulding of 3D woven fabric

2 预成型体的剪切性能

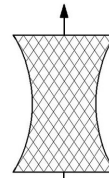
2.1 实验方法

目前对于预成型体剪切实验尚无统一的实验标准,各个实验室的测试结果有较大的差距。由 Kawabata^[5]提出的织物风格测试系统(KES-F),织物试样尺寸为200 mm×50 mm,试样两端被夹,并沿相反的方向运动,织物在受到剪切力作用的同时也受到轴向拉力的作用[图3(a)]。织物面内不能产生纯剪切。第二种是FAST^[6-7]测试方法(又称为偏轴拉伸方法),拉力作用在与经纬纱成 $\pm 45^\circ$ 的方向[图3(b)]。变形过程中,织物面内受到非均匀分布的剪切力作用。第三种是像框测试方法,像框实验是Mc Guinness等^[6-7]在研究复合材料层间剪切性能的流变行为时首先使用的。像框由4根刚性连杆构成一个正方形框,装卡的试样织物沿经纬向平行于边框,尺寸一般为200 mm×200 mm。测试时,沿像框对角线方向作用拉力,并以恒定的速度运动[图3(c)],使织物面内产生纯剪切,而在织物经纬方向上不会产生伸长或压缩。

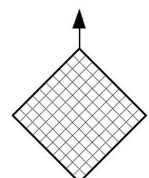
目前,像框剪切实验更多地应用于研究纺织预成型体的剪切性能。与其他两种剪切实验相比,像框实验能够对试件产生均匀的剪切,而且由于结构与受力对称,容易进行分析,非常适合于织物的均匀剪切^[8]。



(a) KES



(b) FAST



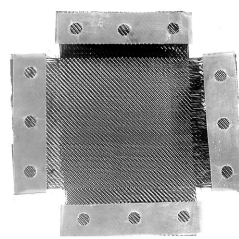
(c) 像框

图3 织物剪切实验方法

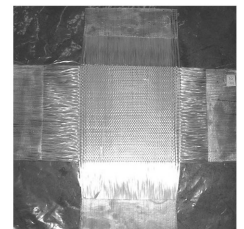
Fig. 3 Experimental methods of fabric shearing

随着对实验方法研究的不断深入,像框实验方法也得到了不断的完善:

- (1) 将织物的四角剪掉,保证像框臂绕铰链自由转动,避免铰链处织物受到挤压而产生折皱^[9];
- (2) 去掉部分边界纱线,防止在边框附近织物受到挤压而产生局部折皱(图4);
- (3) 在像框两个相邻臂上增加定位条,保证相邻臂垂直^[10-13];
- (4) 在试样的四个夹持部位贴上加片,保证织物受力均匀,易于夹持^[14](图4)。



(a) 2D



(b) 3D

图4 织物试样

Fig. 4 Sample of woven fabric

如图5所示,从像框实验结果载荷(F)和对角线位移(L)关系曲线中可以看出,经过改进,同组试样间的实验误差明显减小。

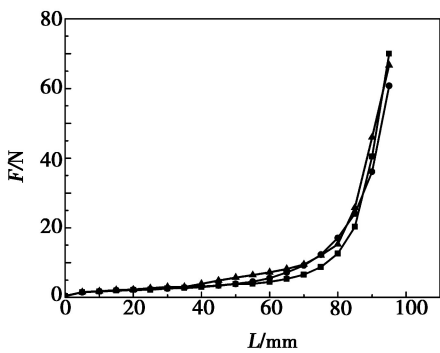


图5 碳纤维平纹织物剪切载荷—位移曲线

Fig. 5 Curves of shear load-displacement of carbon plain fabrics

2.2 像框实验装置

大多数学者都采用像框剪切实验装置研究预成型体的剪切性能(图6)。不同的实验室和课题组采用的像框装置略有差异。Cao等^[15]在总结比较了7个实验室的像框装置的基础上认为:虽然各个实验室的装置有所差别,但是实验操作过程和实验结果的处理方法基本相同,像框剪切实验是研究织物变形的一种有效方法。

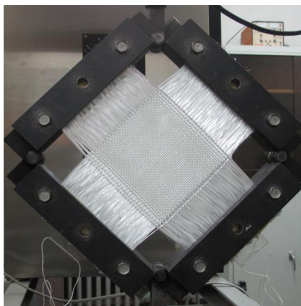


图6 像框实验装置

Fig. 6 Experimental setup of picture frame

实验过程中,织物被正确地安装在夹具上,确保夹持部分对织物是刚性夹持,不产生滑移。在织物装卡过程中,为了保证织物平整,需对织物施加一定的预应力。Launay等^[16]比较了施加不同初始拉应力对织物剪切性能的影响。初始拉应力的施加增加了织物的剪切变形阻力,特别是对剪切初始阶段的影响比较明显。施加20 N初始拉力的织物的剪切载荷是未施加初始拉力织物的2倍。

2.3 试样准备

各个实验室所采用的像框装置的尺寸有所差别,试样大小也有差异。需要一种标准化的方法来衡量实验结果。文献[15-17]对试样的标准化方法做了阐述,通过公式(1)对织物受到的剪切载荷标准化:

$$F_{\text{normalized}} = F_s \frac{L_{\text{frame}}}{L_{\text{fabric}}^2} \quad (1)$$

式中, $F_{\text{normalized}}$ 为标准化后织物受到的剪切力, F_s 为织物受到的剪切力, L_{frame} 为像框的长度, L_{fabric} 为织物发生剪切变形区域的长度。

2.4 剪切实验现象及结果分析

目前对于预成型体剪切性能的研究大都集中于二维织物。Lindberg^[18]、Chen^[19]、Peng等^[20]对织物的剪切行为进行了研究,在实验基础上,分阶段对织物的剪切变形进行了分析,如图7所示。在剪切(I)阶段,像框装置对织物的剪切力小于织物交织点处的摩擦力,纱线非交织部分发生弹性弯曲,剪切载荷线性增加。在剪切(II)阶段,剪切力克服了交织点处的静摩擦力,纱线在交织点处发生刚性转动。剪切力主要用于抵消交织点的经纱和纬纱之间的转动摩擦力和挤压力。随着转动角度增加,纱线交织面积逐渐增大,纱线间的间隙逐渐减少,直至发生经纱与经纱间或纬纱与纬纱间的挤压,此时经纬纱间的夹角定义为织物的“锁紧角”。在剪切(III)阶段,纱线间发生相互挤压,纱线的宽度不断减小,挤压刚度迅速增加,导致剪切载荷迅速增大。在剪切(IV)阶段,纱线的挤压达到极限,织物开始局部产生折皱,此时,经纬纱线间的夹角定义为织物的“起折角”。Long^[21]、Prodromou^[22]以及文献[23]都对织物的“锁紧角”进行了实验测量和分析。

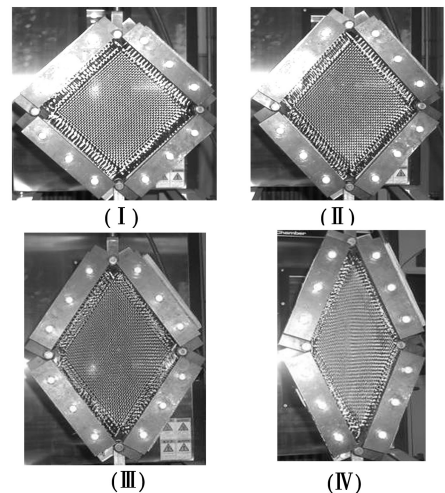


图7 剪切变形的不同阶段

Fig. 7 Stages of shear deformation

文献[24]对三维机织物的剪切性能进行实验研究,并分析了织物层数、经纬纱密度等因素对织物剪切性能的影响。图8为不同层数三维机织物的剪切性能曲线。随着织物层数的增加,织物交织的次数增多,变形所需载荷增大,变形也就越困难。在织物尺

寸及结构相同的条件下, 织物密度越大, 经纬纱线在单位面积内的交织次数增多, 变形过程中纱线受到的转动阻力就会增加, 同时, 纱线间的挤压也会增加, 导致织物变形困难, 变形所需的剪切载荷增大。

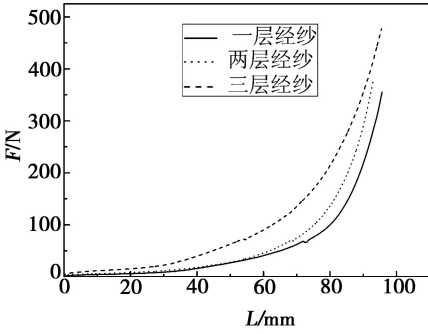


图8 不同层数3D机织物剪切载荷—位移曲线

Fig. 8 Curves of shear load-displacement of 3D woven fabrics with different layers

3 预成型体的本构关系

织物本构的研究目前还没有一种完全成熟的理论应用于实践中, 而且研究也多集中于平面织物。

3.1 非正交本构模型

Peng^[25-26]等提出了基于几何大变形的非正交本构模型。该模型基于平纹机织物, 将织物剪切变形假设为0厚度纱线的平面旋转大变形, 即忽略纱线的厚度和织物中纱线的相互交织(图9)。

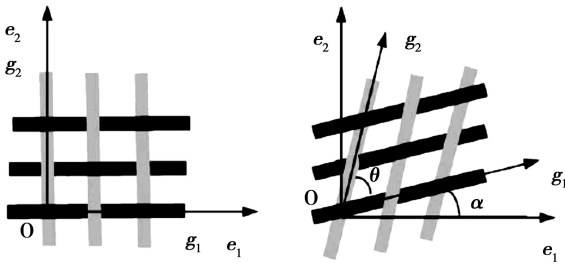


图9 平纹织物剪切变形示意图

Fig. 9 Schematic of plain fabric with shear behavior

为了模拟织物剪切变形过程中纱线间的相互旋转, 建立了单位向量坐标系 $\{g_i\}$ 和 $\{e_i\}$, 其中 $\{e_i\}$ 为空间直角坐标系, $\{g_i\}$ 为固定在材料上的局部坐标系, 在剪切过程中随着经纬向纱线旋转, g_1 和 g_2 不再保持垂直, 坐标系 $\{g_i\}$ 和 $\{e_i\}$ 间的转换矩阵 $[P_i^j]$ 为:

$$[P_i^j] = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ \cos(\alpha + \theta) & \sin(\alpha + \theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

在偏轴拉伸实验的基础上, 基于织物正应力和剪应力不耦合的假设, 织物的本构关系可以表示为应力增量和应变增量之间的关系:

$$\begin{Bmatrix} d\tilde{\tau}^{11} \\ d\tilde{\tau}^{22} \\ d\tilde{\tau}^{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{D}^{11}(\varepsilon) & \tilde{D}^{12}(\varepsilon) & 0 \\ \tilde{D}^{12}(\varepsilon) & \tilde{D}^{22}(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{D}^{33}(\varepsilon) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\tilde{\varepsilon}_{11} \\ d\tilde{\varepsilon}_{22} \\ d\tilde{\varepsilon}_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中, \tilde{D}^{11} 、 \tilde{D}^{12} 、 \tilde{D}^{22} 表示材料沿纱线方向的拉伸特性, 都可以表示为 Green-Lagrange 应变的函数。作者通过有限元模拟的方法, 证明了 Green-Lagrange 应变可以表示非正交状态下沿纱线方向上织物的实际应变。在织物拉伸试验的基础上, 织物的拉伸模量可以表示为:

$$\tilde{D}^{ii} = \begin{cases} 0.1 & (\varepsilon_i < 0) \\ \frac{2000}{1 + \exp[-600(\varepsilon_i - 0.01)]} & (0 \leq \varepsilon_i < 0.022) \\ 1200 & (\varepsilon_i \geq 0.022) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $i = 1, 2$, ε_i 为 Green-Lagrange 应变。考虑到经纬纱间有相互交织, 假设 \tilde{D}^{12} 为一个较小的值:

$$\tilde{D}^{12} = 0.02 \min(\tilde{D}^{11}, \tilde{D}^{22}) \quad (5)$$

通过实验以及有限元模拟得到玻璃纤维/聚丙烯平纹织物的刚度系数 \tilde{D}^{33} :

$$\tilde{D}^{33} = 5.027 |\gamma_{12}|^3 - 1.21 |\gamma_{12}|^2 + 0.194 |\gamma_{12}| + 0.075 \quad (6)$$

由两个坐标系的转换关系, 可以得到在笛卡尔坐标系下的应力增量、应变增量以及刚度矩阵为:

$$\{d\tau\} = [T_1]^T \{d\tilde{\tau}\} \quad (7)$$

$$\{d\varepsilon\} = [T_1] \{d\tilde{\varepsilon}\} \quad (8)$$

$$[D] = [T_1]^T [\tilde{D}] [T_1] \quad (9)$$

其中:

$$[T_1] = \begin{bmatrix} (P_1^1)^2 & (P_1^2)^2 & P_1^1 P_1^2 \\ (P_2^1)^2 & (P_2^2)^2 & P_2^1 P_2^2 \\ 2P_1^1 P_1^2 & 2P_2^1 P_2^2 & (P_2^1 P_1^1 + P_1^1 P_2^2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

上述材料模量和转换矩阵都是应变的函数, 该模型同时考虑了几何非线性和材料非线性。但该本构方程还不能作为一般的公式进行推广, 所有的材料模量都依赖于实验测试和拟合, 缺乏理论依据和物理背景。

3.2 织物细观本构模型

Zhang 等^[27-33]基于织物力学, 对初始斜交异性本构理论做了研究, 提出了织物的剪切变形是通过纱线间的挤压来实现的, 采用纱线间的挤压刚度表示织物的剪切刚度, 织物的本构方程为:

$$\begin{bmatrix} T_W \\ T_F \\ T_{WF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & -\frac{1}{4}B_{CC} \\ B_{12} & B_{22} & -\frac{1}{4}B_{CC} \\ 0 & 0 & \frac{3}{4}B_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_W \\ E_F \\ E_{WF} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, B_{CC} 为单胞的挤压弹性模量, $3B_{CC}/4$ 为单胞的剪切模量。基于该本构方程,成功地模拟了机织物的屈曲现象。

3.3 基于连续介质理论的本构模型

P. Boisse 课题组^[34-38],基于连续介质理论,将率本构方程用于模拟织物的变形,即应力率和应变率间的关系:

$$\underline{\underline{\sigma}}^{\nabla} = \underline{\underline{C}} \cdot \underline{\underline{D}} \quad (12)$$

式中, $\underline{\underline{\sigma}}^{\nabla}$ 为 Cauchy 应力率张量, $\underline{\underline{D}}$ 为应变率张量, $\underline{\underline{C}}$ 为本构张量,其方向由纱线轴向决定。

建立了 GN 坐标系 $\{e_{\alpha}\}$ 和材料坐标系 $\{f_{\alpha}\}$,初始状态时两个坐标系中两个方向互相垂直,变形后, GN 坐标系保持垂直,发生了一定的旋转,材料坐标方向与纱线轴向相同。

GN 坐标系随着织物变形发生旋转:

$$\underline{e}_{\alpha} = \underline{R} \cdot \underline{e}_{\alpha}^0 \quad (13)$$

式中, \underline{R} 为旋转张量,由变形梯度来表示。

变形后的纤维方向由变形梯度表示为:

$$\underline{f}_{\alpha} = \frac{\underline{F} \cdot \underline{f}_{\alpha}^0}{\|\underline{F} \cdot \underline{f}_{\alpha}^0\|} \quad (14)$$

坐标系 $\{e_{\alpha}\}$ 和 $\{f_{\alpha}\}$ 两个方向的转换矩阵分别为

$[T_1]$ 和 $[T_2]$:

$$[T_1]_{(e,f_1)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[T_1]_{(e,f_2)} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

纱线的应变增量就可以表示为:

$$[d\varepsilon]_{f_1} = [T_1]^T [d\varepsilon]_e [T_1] \quad (17)$$

$$[d\varepsilon]_{f_2} = [T_2]^T [d\varepsilon]_e [T_2] \quad (18)$$

因此,织物的应力增量—应变增量的关系就可以通过本构张量 $[\underline{\underline{C}}_r]$ 表示^[39]:

$$\begin{bmatrix} d\sigma_{11}^f \\ d\sigma_{22}^f \\ d\sigma_{12}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_{11}^f \\ d\varepsilon_{22}^f \\ d\varepsilon_{12}^f \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} d\sigma_{11}^f \\ d\sigma_{22}^f \\ d\sigma_{12}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\varepsilon_{11}^f \\ d\varepsilon_{22}^f \\ d\varepsilon_{12}^f \end{bmatrix} \quad (20)$$

利用 Huges-Winget 方程,将本构方程表示为包含时间增量的形式:

$$[\sigma^{n+1}]_{f_1^{n+1}} = [\sigma^n]_{f_1^n} + [C^{n+1/2}]_{f_1^{n+1/2}} [\Delta\varepsilon]_{f_1^{n+1/2}} \quad (21)$$

$$[\sigma^{n+1}]_{f_2^{n+1}} = [\sigma^n]_{f_2^n} + [C^{n+1/2}]_{f_2^{n+1/2}} [\Delta\varepsilon]_{f_2^{n+1/2}} \quad (22)$$

因此,在 GN 坐标系中的本构关系为:

$$[\sigma]_e = [T_1] [\sigma]_{f_1} [T_1]^T + [T_2] [\sigma]_{f_2} [T_2]^T \quad (23)$$

4 有限元模拟

Lin 等^[40]建立了预成型体代表性单元的有限元模型,基于运动学原理以及 TEXGEN 几何模型,模拟了平纹织物的剪切变形,得到了剪切载荷—剪切角曲线,比较了在两种边界条件下剪切模拟结果。

如图 10 所示,平纹织物单胞有限元模型,基于文献 [41] 推导出的材料模型,可以得到输入的材料参数,采用 4 节点四面体单元划分网格。所施加的边界条件分别为:(1)相邻单胞的位移相等;(2)加在每个单胞相反方向上的牵引力相等。从图 10 中给出了两种不同周期性的边界条件下的模拟结果与实验结果比较,发现第二种边界条件下的模拟结果跟实际实验结果更接近(图 11)。

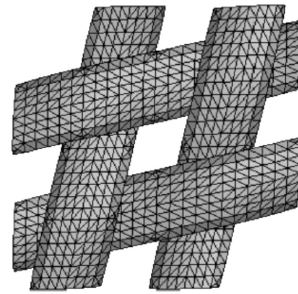


图 10 剪切变形单元

Fig. 10 Deformed unit cell

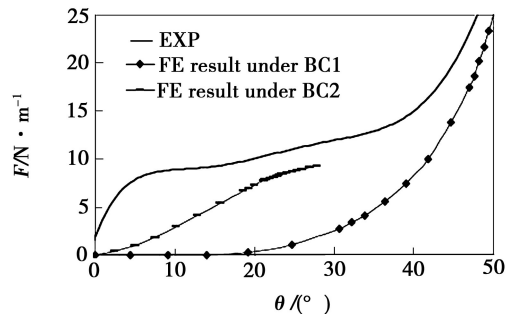


图 11 两种边界条件下模拟结果和实验结果的比较

Fig. 11 Comparison between experimental data with results under two boundary conditions

P. Boisse 等^[35,42-43]在研究二维织物的基础上,开展了三维预成型体的变形模拟。基于虚功原理,假设织物在成型过程中产生的变形主要是由于纱线受到拉伸引起的,平衡表达式可以表示为:

$$W_{int}^s(\eta) + W_{int}^0(\eta) - W_{ext}(\eta) = -W_{acc}(\eta) \quad (24)$$

式中, W_{int}^s 、 W_{int}^0 分别代表内部拉伸虚功和其他虚功, W_{ext} 、 W_{acc} 分别为外部载荷虚功和由加速产生的虚功。采用六面体单元,建立角联锁预成型体单胞,将纱线理想为杆,通过变形前后节点位置的变化表示织物单胞形状以及纱线位置的改变(图 12)。基于本构方程(12),模拟了角联锁织物的剪切变形和半球变形(图 13),与实验相比,模拟结果较好。

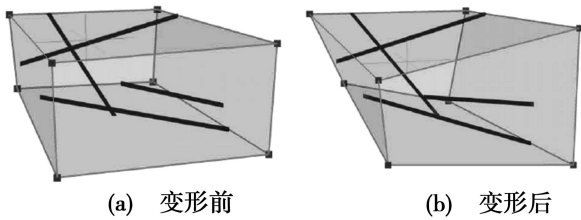


图 12 变形前后单胞形状

Fig. 12 Unit cell before and after deformation

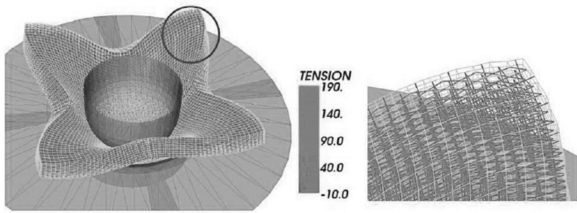


图 13 三维角联锁织物半球成型模拟

Fig. 13 Simulation of hemispherical deep drawing of thick interlock perform

5 结语

纺织预成型体的成型性研究已经取得了很多有启发性的结论。大部分的本构模型和计算机模拟是基于织物的几何变形以及纱线的弹性行为,在弹性理论的基础上推演而得。少数模型考虑了材料大变形,纱线的结构以及织物中的交织结构等的影响。主要的研究工作仍集中于二维织物的成型与模拟。

三维纺织预成型体由于其优异的层间性能在高性能复合材料的制备过程中得到了广泛的应用。但是由于三维织物结构复杂,在复成型过程中变形不易控制。随着三维纺织复合材料的应用领域不断扩大,三维纺织预成型体的变形特性和可成型性能逐渐引起人们的重视。

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
<http://www.yhclgy.com> 宇航材料工艺 2010年 第4期

[2] 张艳明,邱冠雄. 二维纺织复合材料成型研究[J]. 产业用纺织品,2005(2):21-27
 [3] 朱波,余同希,陶肖明. 机织复合材料的本构关系与成形性研究[J]. 力学进展,2004,34(3):327-340
 [4] 陈利. 三维纺织技术在航空航天领域的应用[J]. 航空制造技术,2008(4):45-47
 [5] Kabatawa S, Niwa M, Kawai H. The finite deformation theory of plain-weave fabrics Part II: the uniaxial deformation theory [J]. J. Text Inst., 1973,64(2):47-61
 [6] Mc Guinness G B, CMÓ Brádaigh. Development of rheological models for forming flows and picture-frame shear testing of fabric reinforced thermoplastic sheets [J]. J Non-Newtonian Fluid Mech., 1997,73:1-28
 [7] McGuinness G B, CMÓ Brádaigh. Characterization of thermoplastics composite melts in rhombus-shear: the picture frame experiment [J]. Composites Part A:1998,19A:115-132
 [8] 林国昌. 织物/粘性树脂复合材料本构行为研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文,2007
 [9] Liu L, Chen Julie, Gorczyca Jennifer, et al. Modeling of friction and shear in thermostamping process Part II [J]. Journal of Composite Material. 2004,38:1931-1947
 [10] 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, 2007,67:252-261
 [11] Nestor T A, Brádaigh CMÓ. Experimental investigation of the intraply shear mechanism in thermoplastic composites sheet forming [J]. Advance Engineer Material, 1995,99(1):19-35
 [12] Mohammed U, Lekakou C, Dong L, et al. Shear deformation and micromechanics of woven fabrics [J]. Composites Part A, 2000,31:299-308
 [13] Nguyen M, Herszberg I, Paton R. The shear properties of woven carbon fabric [J]. Composite Structure, 1999,47:767-779
 [14] 张一帆,陈利,孙绯,等. 预成型机织物剪切变形实验研究 [J]. 复合材料学报,2009,26(3):29-33
 [15] Cao J, Akkerman R, Boisse P, et al. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results [J]. Composites Part A, 2008,39:1037-1053
 [16] Launay J, Hivet G, Duong A V, et al. Experimental analysis of in plane shear behavior of woven composite reinforcements [J]. Composites Science and Technology, 2008,68: 506-515
 [17] Peng X Q, Xue P, Cao J, et al. Normalization in picture frame tests of composite materials: length or area [C]. // Proceedings of the 5th International ESAFORM Conference on Material Forming, Krakow, Poland, 2002:287-290
 [18] Lindberg J, Behre B, Dahlberg B. Shearing and buckling of various commercial fabrics [J]. Textile Research Journal, 1961, 31:99-122
 [19] Lussier D, Chen J. Shear frame standardization for stamping woven fabric composites [C]. // 32th international SAMPE tech-

nical conference, Boston, USA, 2000:150-160

[20] Peng X Q, Cao J, Chen J. Experimental and numerical analysis on normalization of picture frame tests for composite materials [J]. Composites Science and Technology, 2004, 64: 11-21

[21] Long A, Robitaille F, Souter B, et al. Permeability prediction for sheared, compacted textiles during liquid composite moulding [C]. Proceedings of ICCM-13, Beijing, China, 2001:636-640

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

[23] 张一帆, 陈利, 孙绯, 等. 预定型平纹织物剪切变形研究 [C]. //第十五届全国复合材料学术会议, 北京, 2008:1413-1417

[24] 李姗姗, 陈利, 焦亚男. 2.5D 维机织物剪切性能实验研究 [J]. 材料工程, 2009(增刊): 56-59

[25] Peng X Q, Cao J. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics [J]. Composites Part A, 2005, 36: 859-874

[26] Peng X Q, Cao J, Chen J L. Integrated micro/ macro-mechanical model of woven fabric composites under large deformation [J]. Composite Structures, 2005, 70: 69-80

[27] 张义同, 谢宇新. 变形构形下织物的细观线性本构方程 [J]. 天津大学学报, 2003(3): 271-275

[28] 张义同. 大变形初始斜交异性本构方程 [J]. 固体力学学报, 2000(4): 345-349

[29] 张义同, 王亮. 织物的膜理论 [J]. 天津大学学报, 2004, 37(7): 614-619

[30] 张义同, 杨海元, 张敬宇. 一种大变形曲壳单元 [J]. 力学学报, 1990, 22(2): 200-205

[31] 张义同. 近代织物力学和稳定性分析理论 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 3-20

[32] Zhang Y T, Xu J F. The buckling analysis of woven fabric subjected to uniaxial tension along any direction [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2002, 23(5): 597-605

[33] Zhang Y T, Xu J F. Buckling analysis of woven fabric

under simple shear along any direction [J]. Textile Research Journal, 2002, 72(2): 147-152

[34] Badel P, Vidal-Sallé E, Maire E, et al. Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68: 2433-2440

[35] De Luycker, F Morestin, P Boisse, et al. Simulation of 3D interlock composite performing [J]. Composite Structures, 2009, 88: 615-623

[36] Badel P, Vidal-Salle E, Boisse P. Large deformation analysis of fibrous materials using rate constitutive equations [J]. Computers, 2008, 86: 1164-1175

[37] Boisse P, Zouari B, Daniel J. Importance of in-plane shear rigidity in finite element analyses of woven fabric composite performing [J]. Composites Part A, 2006, 37: 2201-2212

[38] Boisse P. Meso-macro approach for composites forming simulation. Journal of Material Science, 2006, 41: 6591-6598

[39] Schnur D S, Zabarans N. An inverse method for determining elastic material properties and a material interface. Int J Numer Methods Eng., 1992, 33: 2039-2057

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

[41] Sherburn M. Geometric and mechanical modelling of textiles [D]. PhD Thesis of Nottingham University, 2007

[42] Boubakar M L, Boisse P, Gelin J C. Numerical implementation of orthotropic plasticity for sheet metal forming analysis [J]. Journal of Material Process Technology, 1997, 65: 143-152

[43] Boisse P, Gasser A, Hagege B, et al. Analysis of the mechanical behavior of woven fibrous material using virtual tests at the unit cell level [J]. Journal of Material Science, 2005, 40: 5955-5962

(编辑 任涛)