

# 多层多向织物复合材料力学性能分析

张一帆 马明 陈利

(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)

**文 摘** 基于多层多向织物复合材料的细观结构,将多层多向复合材料中不同走向的纤维束看作单向复合材料,将具有不同材料主分的单向复合材料的刚度矩阵通过体积平均得到单层复合材料的刚度矩阵,再基于层合板理论通过各单层复合材料刚度得到多层多向立体织物复合材料的总体刚度矩阵,从而得到其工程弹性常数。基于所得的复合材料总体刚度矩阵,利用 ANSYS 对多层多向复合材料和层合复合材料的变形进行了模拟。通过对比模拟结果发现,多层多向复合材料具有更好的面内性能,多层多向复合材料的最大应力值约为层合复合材料的 1/2。

**关键词** 多层多向立体织物,层合板理论,剪切性能

## Mechanical Properties of Composites Reinforced by Multi-Ply Multi-Axial Preforms

Zhang Yifan Ma Ming Chen Li

(Ministry of Education Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials,  
Institute of Composite Materials, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

**Abstract** Based on the meso-structure of multi-ply multi-axial three-dimensional(3D) composite materials, the different directional fiber bundles were regarded as the unidirectional composite materials. The stiffness matrix of unidirectional composite materials was calculated by using the volume average method, and then the stiffness matrix of multi-ply multi-axial 3D composite materials was obtained by the classical laminate theory. On the basis of total stiffness matrix, the deformation of multi-ply multi-axial 3D composite materials and laminated composite materials were simulated by software of ANSYS. By comparing the simulation results, it can be obtained that the multi-ply multi-axial 3D composites has the better in-plane property than laminated composites, and the maximum stress value of multi-ply multi-axial 3D composites is about half of the laminated composites.

**Key words** Multi-ply multi-axial preforms, Classical laminate theory, Shear properties

### 0 引言

近年来,新结构立体织物研究十分活跃,多层多向织物得到迅速发展。Anahara 等<sup>[1]</sup>设计的一个五轴织机,斜向纱( $\pm 45^\circ$ )放在一个螺旋轴系统上,使经纱、斜向纱和纬纱用穿过厚度的纱线连锁在一起。Ruzand 等<sup>[2]</sup>用浮纹织造原理修改标准织机,开发出多层斜交织物,在织物的上下表面引入了斜向纱线。Mood<sup>[3]</sup>提出一种多轴织造方法,它利用一个分裂箱和提花机的机理控制斜纱的引入,可织造具有独特性能的多轴向织物。Uchida 等<sup>[4]</sup>发明了一种五轴织物的制备方法,斜向纱由水平放置的导向链牵引,每次

运动一个斜向纱位置,纬纱引入固定的梭口中,法向纱将所有的纱线层捆绑在一起。多层多向立体织物在原有的织物结构中增加了 $\pm 45^\circ$ 的斜向纱线层,显著提高了复合材料面内剪切性能,在结构复合材料特别是 C/C 耐热结构复合材料领域具有广泛的应用前景。本文基于立体织物加工过程分析,建立了织物的细观结构模型,并基于经典层板理论,建立了多层多向织物增强复合材料的力学性能的预报方法。

### 1 多层多向立体织物结构

多层多向立体织物的交织结构取决于织物成型

收稿日期: 2012-08-28

作者简介: 张一帆,1983 年出生,博士研究生,主要从事编织复合材料的研究。E-mail: zhangyifan1228@hotmail.com

工艺过程。两种新的成型工艺已经被应用于多层多向织物的制备:其一是在正交三向织物成型工艺的基础上,通过特殊的斜向携纱机构携带斜向纱线运动,斜向纱线每次运动一个纱线位置,法向纱贯穿所有纱层,并将各层纱线捆绑在一起,形成整体织物;其二是采用铺纱置换方法,将钢针排列成矩阵形式,在间隙中铺放纱线,达到设计要求后再用纱线将钢针置换,形成多层多向立体织物,其结构如图1所示。织物中包含0°经纱、90°纬纱、+45°斜向纱线、-45°斜向纱线和法向纱线等五个纱线系统,各层的位置可以根据材料的最终性能要求设计。多层多向织物由于引入了斜向纱线系统,显著提高织物抗面内剪切变形性能,使织物整体结构更加稳定,增强的复合材料具有优良的抗剪性能。

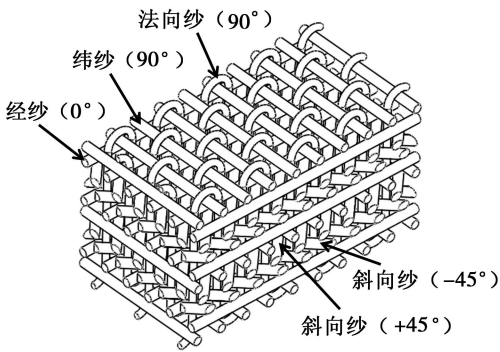


图1 多层多向立体织物结构图

Fig.1 Structure schematic diagram of multi-ply multi-axial preforms

## 2 叠层板模型

多层多向织物增强复合材料沿厚度方向类似于传统的铺层结构复合材料,分别由经纱层(0°)、纬纱层(90°)、+45°斜向纱线层和-45°斜向纱线层交替叠合而成。不同于传统铺层复合材料,多层多向织物增强复合材料引入了贯穿厚度方向法向纱线。法向纱线将所有的纱线层捆绑在一起,增强了材料的层间性能。从立体织物成形过程中的纤维集合体形态演变角度分析,多层多向织物增强复合材料的结构与性能将涉及纱线、单向纱线层、整体织物等三个层次。

### 2.1 浸胶纱线

多层多向织物增强复合材料中的纱线在浸渍基体材料后可以看作是单向纤维复合材料,具有横观各向同性。基于细观力学理论,浸胶纱线的弹性常数可通过增强纤维和基体的性能以及纱线中纤维填充系数导出<sup>[5]</sup>:

$$E_1 = E_{f11} V_f + E_m V_m \quad (1)$$

$$E_2 = E_3 = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f}(1 - E_m/E_{f22})} \quad (2)$$

$$G_{12} = G_{13} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f}(1 - G_m/G_{f12})} \quad (3)$$

$$G_{23} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f}(1 - G_m/G_{f23})} \quad (4)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = V_f \nu_{f12} + V_m \nu_m \quad (5)$$

$$\nu_{23} = \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \quad (6)$$

式中, $E_{11}$ 、 $E_{22}$ 分别为浸胶纱线的纵向模量和横向模量, $G_{12}$ 为轴向剪切模量, $G_{23}$ 为横向剪切模量, $\nu_{12}$ 为纵向泊松比, $\nu_{23}$ 为横向泊松比; $E_m$ 、 $G_m$ 和 $\nu_m$ 分别为基体的弹性模量、剪切模量和泊松比; $E_{f11}$ 、 $E_{f22}$ 分别为纤维的纵向和横向模量; $G_{f12}$ 、 $G_{f23}$ 分别为纤维的轴向和横向剪切模量; $\nu_{f12}$ 为纤维纵向泊松比; $V_f$ 为纱线中纤维填充系数, $V_m$ 为纱线中基体体积分数。其中,基体为各向同性材料,剪切模量 $G_m$ 可以表示为:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (7)$$

浸胶纱线的应力—应变关系可以表示为:

$$\{\varepsilon\} = [S]_y \{\sigma\} \quad (8)$$

式中, $[S]_y$ 为浸胶纱线的柔度矩阵,求逆即可得到刚度矩阵 $[C]_y$ 。

### 2.2 单层复合材料板

多层多向织物复合材料类似于层合复合材料,每一种取向的纱线层对应为一种取向的单层板。由于复合材料存在不同取向的组分层,决定了层合结构的厚度方向具有宏观非均质性<sup>[6-8]</sup>。

如图1所示,多层多向织物复合材料含有5种取向的纱线,即4种面内取向纱线和z向的法向纱线。沿厚度方向,将每种面内取向的纱线层假设为一个单层板。但由于法向纱线的存在,该单层板的性能不同于传统的单层板,如图2所示。

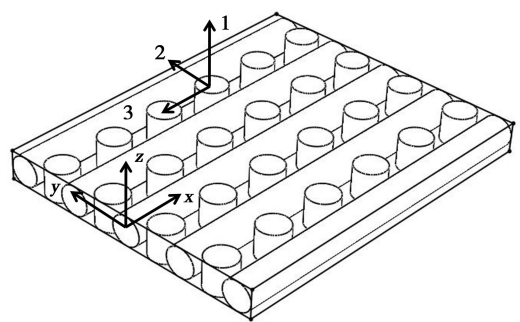


图2 0°单层板结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of 0° single layer

图2中0°单向板由0°纱线层、z向纱线和纯基体组成。z向纱线在单层板坐标系中的刚度矩阵为：

$$[C]_z = [T_\sigma] [C]_y [T_\sigma]^T \quad (9)$$

式中,  $[T_\sigma]$  为应力转换矩阵。

单层板的刚度特性可由下式获得：

$$[C]_0 = V_0 [C]_y + V_z [C]_z + V_m [C]_m \quad (10)$$

式中,  $[C]_0$ 、 $[C]_y$ 、 $[C]_z$  和  $[C]_m$  分别为0°单层板、浸胶纱线、z向纱线和基体材料的刚度矩阵； $V_y$ 、 $V_z$  和  $V_m$  分别为0°浸胶纱线、z向纱线和基体材料的纤维体积分数。

多层多向织物复合材料中的90°单层板、+45°单层板和-45°单层板的刚度矩阵可由0°单层板的刚度矩阵按照纤维取向转换获得。

$$[C]_k = [T_\sigma]_k [C]_0 [T_\sigma]_k^T \quad (11)$$

### 2.3 多层多向织物复合材料

对于多层多向织物复合材料薄板可以利用经典的层板理论,按照单层板的叠层顺序层合即能够得到多层多向织物复合材料的性能。取复合材料板的中面为参考平面,建立材料的整体坐标系。图1所示立体织物的纱线叠层顺序为0°/90°/±45°交替排列。各单层板处于平面应力状态,柔度矩阵退化为二维形式：

$$[S]_k = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix}_k \quad (12)$$

各单层板的折减刚度为各单层板二维柔度矩阵

$[S]_k$  求逆得出

$$[\bar{Q}]_k = [S]_k^{-1} \quad (13)$$

基于经典层合板理论,多层多向织物复合材料的

刚度矩阵可以表示为：

$$\begin{cases} A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ C_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{cases} \quad (14)$$

### 3 模拟计算

基于多层多向织物复合材料的刚度矩阵,本节主要对复合材料的面内性能进行分析。采用有限元 ANSYS 计算一定静载荷作用下多层多向织物复合材料的面内力学性能,同时为织物结构的设计提供依据<sup>[9-10]</sup>。

由 ANSYS 创建平板几何模型并进行有限元分析

的前处理,选用 SHELL181 单元。前处理工作包括有网格的划分、单元材料定义(单向复合材料工程常数)、单元的物理特性定义、载荷和位移边界条件施加(平板下端固定,在上端施加水平拉伸力)等。模拟采用复合材料中常见的 T300 碳纤维和环氧树脂,表1给出了两种材料的性能参数。

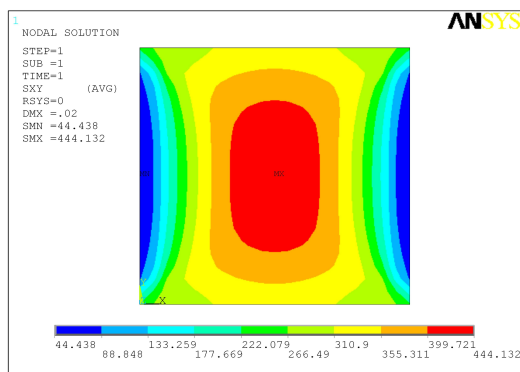
多层多向织物复合材料选用层数为24层,层纱角度顺序为90°/0°/45°/-45°交替排列。单层的尺寸为100 mm×100 mm,单层厚度0.4 mm。另外,与0°/90°正交层合板的面内性能进行了比较。

通过计算可以得到多层多向复合材料和正交层合复合材料面内xy方向的应力云图和应变云图,如图3和图4所示。

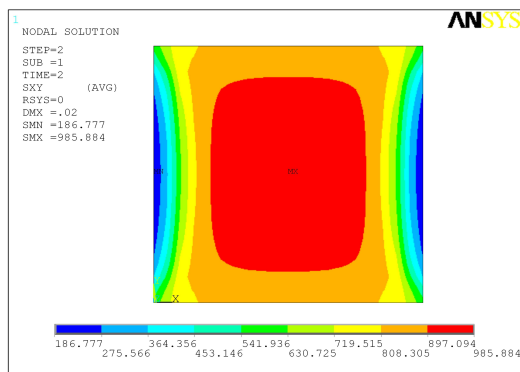
表1 组分材料性能

Tab.1 Properties of the constituents

materials	$E_1$ /GPa	$E_2$ /GPa	$G_{12}$ /GPa	$G_{23}$ /GPa	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$
carbon fiber T300	220	13.8	9	4.8	0.20	0.25
epoxy resin	4.5	-	-	-	0.34	0.34



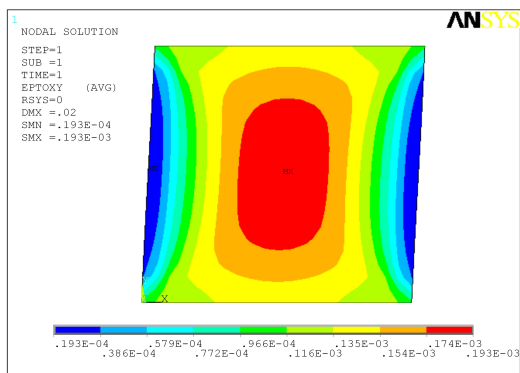
(a) 多层多向复合材料



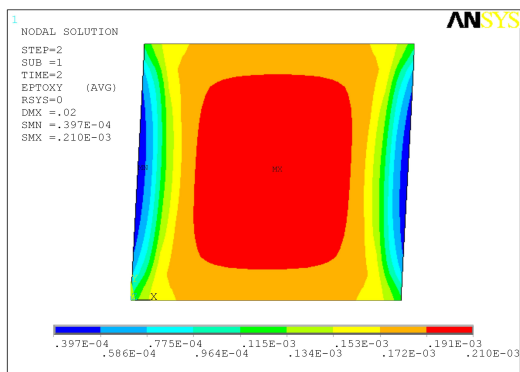
(b) 正交层合板材料

图3 两种复合材料的剪切应力云图

Fig.3 Shear stress nephograms of the two composite materials



(a) 多层多向复合材料



(b) 正交层合板材料

图4 两种复合材料的剪切应变云图

Fig. 4 Shear strain nephograms of the two composite materials

从图3中可以看出,多层多向复合材料受到的最大应力要远远小于正交层合板,最大应力约为正交层合板的1/2,而且正交层合板的高应力区域面积也要大于多层多向复合材料。因此,正交层合板材料更容易在中间区域发生破坏。

从图4中可以看出,在中心区域发生的变形最大,说明多层多向复合材料沿 $\pm 45^\circ$ 方向的纱层对复合材料的变形起到了重要作用。多层多向复合材料的最大应变为 $0.193 \times 10^{-3}$ ,小于正交层合板复合材料;而且,大应变区域的面积也要小于层合复合材料。这些都充分的表明了多层多向复合材料具有更优异的面内力学性能。

#### 4 结论

以多层多向复合材料单胞模型为基础,采用细观

力学的分析方法并结合层合板理论,计算了多层多向复合材料的刚度,并在此基础上,利用有限元软件对多层多向复合材料的面内性能做了模拟。结果表明, $\pm 45^\circ$ 纱层以及法向纱线对复合材料的弹性性能有重要的影响,最大应力约为正交层合板的1/2,高应力区面积以及最大变形区域的面积也要远远小于正交层合板。通过有限元的模拟验证了基于细观结构和层板理论的弹性性能预报方法的可行性,同时为多层多向复合材料结构设计提供了依据。

#### 参考文献

- [1] Anahara M, Yasui Y. Three dimensional fabric and method for producing the same[P]. US Patent, 5137058, 1992
- [2] Ruzand J M, Guenot G. Multiaxial three-dimensional fabric and process for its manufacture[P]. International Patent, WO 94/20658, 1994
- [3] Mood G L. Multiaxial yarn structure and weaving method[P]. US Patent, 5540260, 1996
- [4] Uchida H, Yamamoto T, Takashima H, et al. Three dimensional weaving machine[P]. US Patent, 6003563, 1999
- [5] Chamis C C. Mechanics of composite materials: past, present and future[J]. Composite Technology Research, 1989, 11:3-14
- [6] 矫桂琼,贾普荣. 复合材料力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008
- [7] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided preform[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(3):391-404
- [8] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials II: Prediction of the elastic moduli[J]. Composite Structures, 2001, 51: 451-457
- [9] 李典森,卢子兴,陈利,等. 三维六向编织复合材料弹性性能理论预测[J]. 复合材料学报,2006(4):112-118
- [10] Li D S, Fang D N, Jiang N, et al. Finite element modeling of mechanical properties of 3D five-directional rectangular braided composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(6): 1373-1385

(编辑 任涛)