复合材料学报 第17卷 第2期 5月 2000年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 17 No. 2 May 2000

文章编号: 1000-3851(2000)02-0066-04

三维四向编织复合材料剪切性能的数值预报

刘振国, 卢子兴, 陆 萌, 麦汉超, 冯志海*

(北京航空航天大学 固体所, 北京 100083) (* 北京材料工艺研究所, 北京 100076)

摘 要: 应用三维四向编织复合材料的参数化建模技术, 在"米"字型枝状体胞计算模型基础上, 讨论了该材料在剪切变形中体胞的边界条件, 较为真实地模拟了该材料的细观结构, 进一步对该材料的剪切模量进行了数值预报; 最后通过结果的分析, 总结了剪切模量随不同编织角及纤维体积含量的变化关系。

关键词: 复合材料; 三维编织; 剪切模量; 数值预报

中图分类号: TB330.1; V258.3 **文献标识码**: A

NUMERICAL PREDICTION OF THE LONGITUDINAL AND TRANSVERSAL MODULI OF THREE DIMENSIONAL AND 4-STEP BRAIDED COMPOSITES

LIU Zhen-guo, LU Zi-xing, LU Meng, MA I Han-chao, FENG Zhi-hai*

(Institute of Composites Mechanics, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083)

(* Aerospace Research Institute of Material and Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract: Shear properties of the composite is studied by using the parameterized modeling technology for three dimensionally and 4-step braided composites and based on the "米"-type model of a representative unit cell presented for FEM numerical prediction. First, the boundary conditions of the unit cell are discussed under shear deformation. Then, the shear moduli of the composite are predicted by FEM calculation. Finally, the relations of the shear moduli varying with different braiding angles and fiber volume fractions are concluded by analysis for the results.

Key words: fiber reinforced composites; shear modulus; numerical simulation; three dimensional braiding

常规层板复合材料由于存在层间不匹配, 因此在结构应用中层间剪切破坏或分层为其主要的破坏形式, 也是其致命的弱点之一。类似的问题在其它一些复合方式中也大量存在, 并因此影响了这类复合材料在工程结构中的更广泛应用。编织复合材料作为一种先进的纤维复合材料, 是将高强高模的纤维束通过编织技术构成二维或三维的网格预制件, 再充填以基体材料复合而成的高度完整的结构。通过适当调整编织工艺参数, 可以改变包括厚度方向在内的刚度和强度的高低; 此外, 该材料还因具有近净截面形状制造、高冲击韧性、高抗损伤能力及可设计性好等诸多优点而引起工业界和学术界的广泛关注, 开展了大量的研究并已在航空航天及军工等高科技领域得到应用, 在民用领域也具有广阔的应用前景。

对于多维多向编织复合材料的力学性能研究, 目前主要有以经典的层板理论为基础的研究方法, 如 Chou 等[1]、Wu[2]、Kalidindi 等[3]及 Sun[4]等的工作, 这些工作体现了理论上的继承性和完整性, 且通过引入适当的参数还可进一步得到如双模量、损伤、失效破坏等材料性能; 此外, 随着计算机技术的普及进步, 有限元理论的发展完善, 应用有限元方法对复合材料的力学性能进行数值预报的工作也越来越多, 如文献[5]对单向复合材料的性能进行了预报, 文献[6]中 Mohajerjasbi 对三维编织复合材料的有限元计算模型进行了研究, 并且在文献[7]中预报了其热膨胀系数。文献[8]中在对三维四向编织复合材料有限元计算模型的研究基础上, 对其纵(轴)向及横向弹性性能进行了数值预报。

本文作者在"米"字型枝状体胞模型基础上进一

收稿日期: 1998-10-08; **收修改稿日期**: 1998-11-30
作者介绍: 刘振国(1962), 男, 博士, 副教授, 从事复合材料结构力学的研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

步对三维四向编织复合材料的剪切性能进行了数值预报, 并进而讨论了编织工艺参数对剪切性能的影响。这不仅对该材料在结构中应用的优化设计提供依据, 也将对该材料其它方面力学性能的分析奠定基础。

1 模型概述

"米"字型枝状体胞模型(见图 1)是根据三维四向四步法(1×1 编织方式)编织复合材料的内部结构及其代表性体积元(RVE)的确定提出的。文献[8]中应用此模型预报了该材料的纵向及横向的弹性模量, 与实验结果符合较好。但如何用此模型来预报剪切模量还需做进一步的研究。由于这方面的研究工作有限, 目前尚无实验结果可对比。

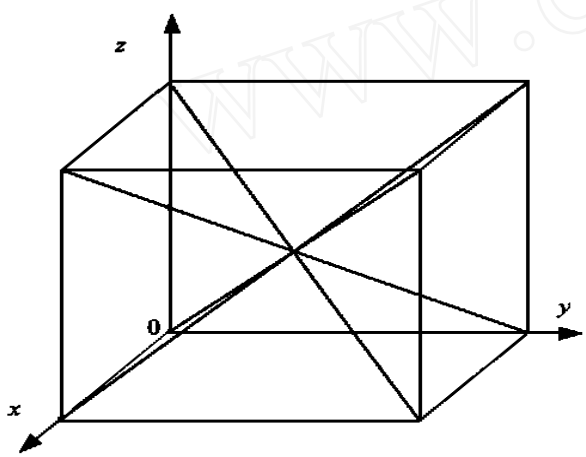

图 1 典型体胞模型

Fig. 1 Model of the representative volume cell

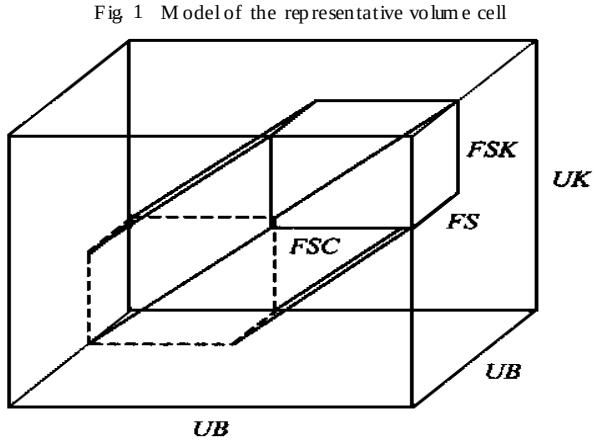

图 2 体胞中纤维束的几何模型(四根中的一根)

Fig. 2 Geometric model of the fiber bundle in the volume cell (one of the four)

图 1 所示的体胞中共有四根纤维束分别连接四个对角, 为尽可能模拟圆形截面的编织纱纤维束, 并考虑到有限元建模的需要, 这里将纤维束的截面取为正六边形, 每束纤维在体胞角点处与各面相交的部分的尺寸为 FSC, FSC, FSK (见图 2)。实际上具有一定体积的纤维束不可能直线连接体胞的四个对角, 但很多实验研究表明编织纱在编织物内基本是沿直线走向, 因而本模型中设定纤维束仍直线穿过对角并在体胞中心形成理想交叉, 即无体积堆积。这样由编织工艺参数可确定体胞及编织纱的尺寸为(参见文献[8]):

$$FSC = \frac{FSA}{\sqrt{2}\cos\theta}, \quad FSK = \frac{FSA}{\sin\theta} \tag{1}$$

$$UB = \frac{FSC}{X}, \quad UH = \frac{FSK}{X} \tag{2}$$

这里, X 满足方程:

$$\frac{\pi}{2\sqrt{3}}\left[1 - (2X + 1)(1 - X)^2\right] = V_f \tag{3}$$

这样即可分别纤维束和基体来划分有限元网格, 建模工作结束。

2 剪切模量的数值预报

对于层板理论的预报工作, 一般是根据等应力或等应变假设来进行分析, 因而只能给出模量的上限或下限。而有限元预报中要具体设定体胞各面上节点的受力、位移及其约束, 因而只要所设接近实际情况时有限元预报的结果往往更精确和接近实际。

计算剪切模量所需的边界条件与计算纵向、横向弹性模量的边界条件有很大区别。首先, 在剪切变形过程中, 体胞将不再具有空间的对称性, 但还具有空间的周期性; 其次, 即使在材料主轴方向, 三个剪切模量与其它弹性模量之间的相互关系也很难确定, 因此在有限元计算中需逐个确定。下面以 G_{yz} 为例加以讨论。

2.1 G_{yz} 的确定:

设 z 为轴向, x-y 平面为材料的各向同性面。对

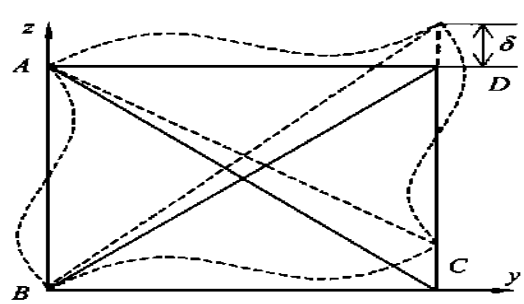

图 3 剪切作用下体胞的变形

Fig. 3 Defomation of volume cell under shear

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　本文所用碳纤维和树脂基体的弹性性能

Table 1　Elastic characteristics of the carbon fiber and resin matrix used in this paper

	E_1/GPa	E_2/GPa	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	μ_{12}	μ_{23}
T300 碳纤维	220	13.8	9.0	4.8	0.2	0.25
TDE-85 树脂	4.5	4.5			0.34	0.34

于图 3 所示体胞, 当受到剪切作用时, 体胞除产生纯剪切变形外, 原体胞的各个面(AB, BC, CD, DA)还会产生翘曲变形。

由图 3 可知, 宏观的剪切变形(平均应变)及相应的平均剪应力为:

$$\overline{\gamma_{yz}} = \delta/UB \quad , \quad \overline{\tau_{yz}} = (\sum F_z)/UB^2 \tag{4}$$

因此,

$$\overline{G_{yz}} = \frac{\overline{\tau_{yz}}}{\overline{\gamma_{yz}}} = \frac{\sum F_z}{UB \cdot \delta} \tag{5}$$

各面的翘曲使得 G_{yz} 与各面为平面的假定(经典理论)时的结果不同。考虑到整体在剪切变形过程中, 各体胞仍会保持空间的周期性, 而且相邻体胞在其分界面上应保持位移连续, 因此对每个体胞而言, 设位移为(u, v, w), 应有:

$$v\big|_{y=y_B} = v\big|_{y=y_C}; \quad w\big|_{z=z_B} = w\big|_{z=z_A} \tag{6}$$

而在垂直于 x 方向的两个体胞表面仍保持为平截面。基于前面的讨论, 将 $y = y_B$ 面的四个角点做固定铰约束, 设 $y = y_C$ 面的四个角点以 z 向位移 δ, 然后通过计算得到 $y = y_C$ 面上所有节点的 z 向节点力之和 $\sum F_z$, 这样, 通过公式(5)即可确定 G_{yz}, G_{xy} 和 G_{zx} 也如此类似加以确定。

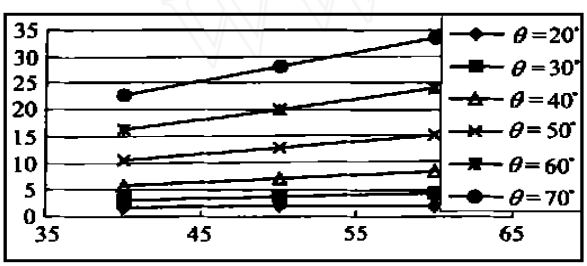

图 4　G_{xy} 随体积含量的变化

Fig. 4　Variation of G_{xy} with volume fraction

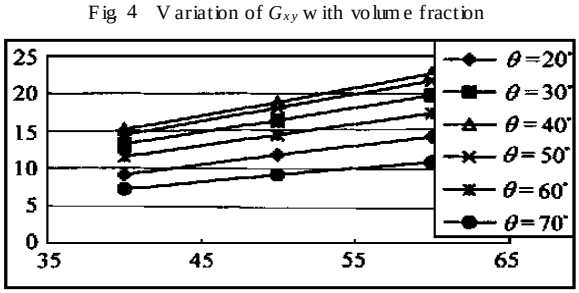

图 5　G_{zx} 随体积含量的变化

Fig. 5　Variation of G_{zx} with volume fraction

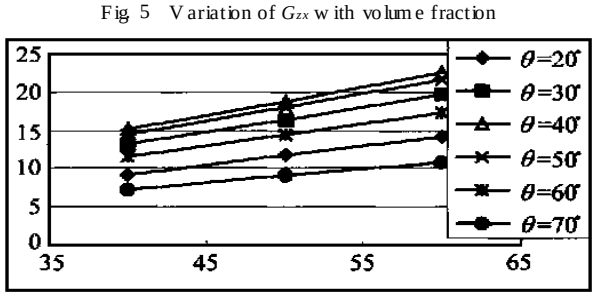

图 6　G_{yz} 随体积含量的变化

Fig. 6　Variation of G_{yz} with volume fraction

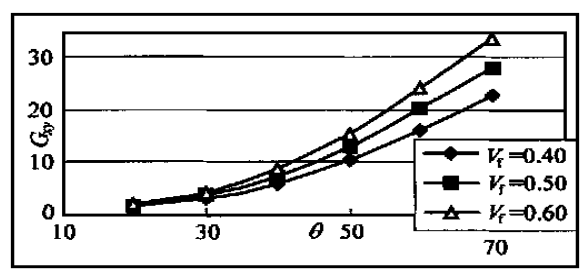

图 7　G_{xy} 随编织角的变化

Fig. 7　Variation of G_{xy} with braiding angle

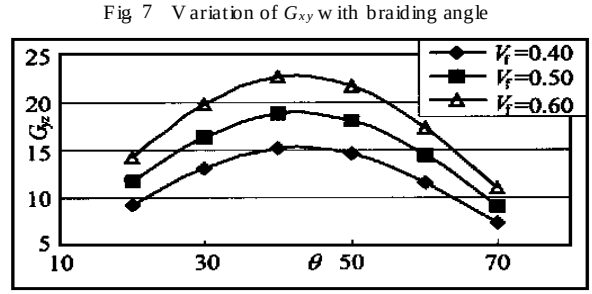

图 8　G_{zx} 随编织角的变化

Fig. 8　Variation of G_{zx} with braiding angle

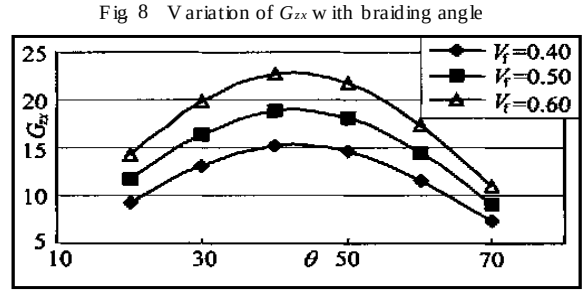

图 9　G_{yz} 随编织角的变化

Fig. 9　Variation of G_{yz} with braiding angle

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为了进一步分析编织工艺参数对三维编织复合材料剪切模量的影响, 本文分别对不同的编织角和纤维体积含量的情况进行了预报。其中编织纱选用 T300 碳纤维, 基体材料为 TDE-85 环氧树脂, 它们的基本性能见表 1。图 4～图 6 显示的 G_{xy}, G_{zx}, G_{yz} 随体积含量变化的关系曲线, 图 7～图 9 显示的 G_{xy}, G_{zx}, G_{yz} 随编织角变化的关系曲线。

由上述分析及预报结果可得如下结论:

(1) 由图 4～图 6 可知, 三维编织复合材料的三个剪切模量一般随纤维体积含量(V_f)的增加而呈线性增大的趋势;

(2) 尽管纤维和基体的剪切模量均较低, 但经过三维编织复合后的剪切模量一般均大于单体(纤维、基体)的剪切模量, 说明剪切模量有了很大的改善;

(3) 剪切模量随编织角 θ 的变化比较特殊, 其中 G_{xy} 随 θ 的增加而迅速增大, 而 G_{yz} 和 G_{zx} 则在编织角 θ 较小时随 θ 的增加而增大, 但在 θ 角较大时却随 θ 的增加而减小;

(4) 结合文献[8]中对三维编织复合材料纵、横向弹性模量的研究结果可知: 编织角的增加使得纵向的弹性模量迅速减小。因此, 三维编织复合材料的剪切模量的提高是以纵向弹性模量的降低为代价的。

3 结 论

在"米"字型枝状体胞模型基础上, 对三维编织复合材料的剪切模量进行了数值预报。结果表明, 剪切模量随纤维体积含量的增加基本呈线性增加, G_{xy} 随 θ 的增加而迅速增大, 而 G_{yz} 和 G_{zx} 则在编织角 θ 较小时随 θ 的增加而增大, 但在 θ 角较大时却随 θ 的增加而减小。这些结果将对该材料的工程应用及材料的优化设计具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] Yang JennMing, Chou TsuWei. Fiber inclination model of three dimensional textile structural composites[J]. *Journal of Composites Materials*, 1986, 20(5): 472～484.

[2] Wu D L. Three-cell model and 5D braided structural composites [J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(3): 225～233.

[3] Kalidindi S R, Abusafieh A. Longitudinal and transverse moduli and strength of low angel 3-D braided composites[J]. *J of Composite Materials*, 1996, 30(8): 885～905.

[4] Sun H Y, Qiao X. Prediction of the mechanical properties of three-dimensionally braided composites [J]. *Composites Science and Technology*, 1997, 57(6): 623～629.

[5] Sun C T, Vaidya R S. Prediction of composite properties from a representative volume element[J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(3): 171～179.

[6] Mohajerjasbi S. Fiber architecture of three-dimensional braided composites[J]. *AIAA Journal*, 1998, 36(4): 613～617.

[7] Mohajerjasbi S. Prediction for coefficients of thermal expansion of three-dimensional braided composites [J]. *AIAA Journal*, 1997, 35(1): 141～144.

[8] 刘振国, 陆 萌, 麦汉超, 等. 三维四向编织复合材料纵、横向弹性模量数值预报[J]. 北航学报, 2000, 26(2): 182～185.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net