复合材料学报 第21卷 第4期 8月 2004年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 21 No. 4 August 2004

文章编号: 1000-3851(2004)04-0152-05

编织复合材料弹性性能的细观分析及试验研究

王立朋, 燕 瑛*
(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 基于细观分析与体积平均法建立了二维编织/RTM 复合材料刚度的理论分析方法, 该分析方法针对工程应用, 具有计算量较小、计算精度高等优点, 完成了相应的软件分析工具, 并在此基础上对编织复合材料的弹性性能进行分析研究, 得到了结构参数对编织复合材料整体力学性能的影响。通过与实验数据的对比表明, 分析结果精度高, 能够满足工程结构设计和理论分析的需要, 为二维编织复合材料的设计、分析和减少试验件提供了理论分析方法。

关键词: 编织复合材料; 弹性性能; 体积平均法; 二维二轴结构
中图分类号: TB333 **文献标识码:** A

MICRO ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE ELASTIC PROPERTIES OF BRAIDED COMPOSITES STRUCTURE

WANG Lipeng, YAN Ying*
(School of Aeronautics Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An analysis model based on the microstructure and the stiffness averaging method is established to predict the elastic constants of 2-D braided composites. The computer software based on the model of the 2-D biaxial braided composite was compiled. The elastic performances of braided composites were studied, and many useful results that can be used in structures designing were obtained. The effects of braiding structure parameters on the elastic properties of composites were also analyzed. Comparing the relevant predictions with the experimental results validates the model presented. The comparison shows that there is good agreement for the elastic properties and it can be used in the engineering design.

Keywords: braided composites; elastic properties; averaging method in volume; 2-D biaxial structure

近年来, 各种结构形式的纺织结构复合材料得到了长足发展。其中二维二轴编织复合材料 (如图1所示) 具有制造工艺自动化水平高, 纤维弯曲扭曲程度小, 纤维性能保持率高等优点, 其优越性已引起国内外的极大关注。材料的弹性常数是结构设计中必不可少的设计参数, 对于各向异性且结构各异的编织结构复合材料来说, 用实验的方法分别测量不同编织结构的各个弹性常数非常困难且不经济。用理论分析的方法, 根据纺织结构的本构关系通过计算获得纺织复合材料的弹性性能的研究已经取得了一定的进展[1~8], 但国内外对二维二轴编织复合材料理论分析的研究还很少, 本文作者基于体积平均法建立了分析二维二轴编织结构复合材料弹性性能的模型, 通过与试验数据的对比表明, 分析结果精度高, 能够满足工程结构设计和理论分析的需要。

1 分析模型

1.1 细观几何结构

根据编织结构形式的不同, 二轴编织有1×1和2×2等多种不同结构, 所谓的1×1结构就是+[和-[编织纱束每隔一束就交叉一次, 2×2结构如图1所示, 纱束间每隔两束交叉一次, 3×3以及其他形式的编织结构比较少见。由于编织纱束的循环交叉, 编织织物具有最小的重复结构单元, 即基本单元, 如

收稿日期: 2003-05-29; 收修改稿日期: 2003-09-01
基金项目: 国家自然科学基金项目(50073002)
通讯作者: 燕 瑛, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料力学分析与结构设计 E-mail: yingyanfao@buaa.edu.on

图1 中的菱形黑框所示, 图2 显示了这种基本单元的结构形式, 其中图 2(a) 为 1×1 结构, 图 2(b) 为 2×2 结构, 基本单元是体积平均法分析的基础。

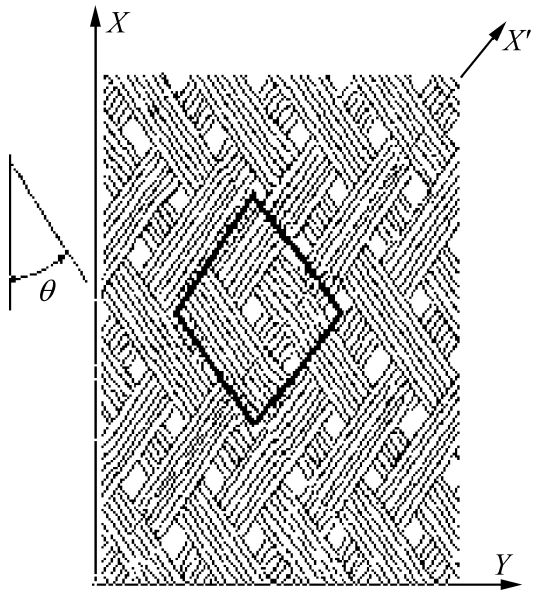

图 1 二维二轴编织复合材料

Fig. 1 2-D biaxial braided composites

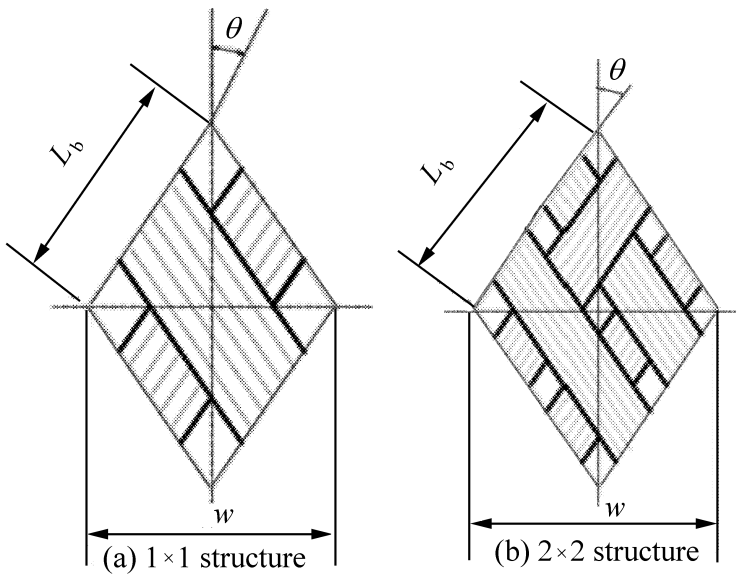

图 2 二轴编织结构基本单元

Fig. 2 Unit cell of biaxial braided structure

因为 1×1 结构和 2×2 结构很相似, 以下仅对 2×2结构进行分析, 在此基础上, 可以很容易地推导出 1×1 等结构的分析公式。

本文中对二维二轴编织复合材料的细观几何结构做如下假设:

(1) 编织纱束的的横截面为理想的跑道轨迹, 即两端为半圆形, 中间为长方形, 如图 3 所示;

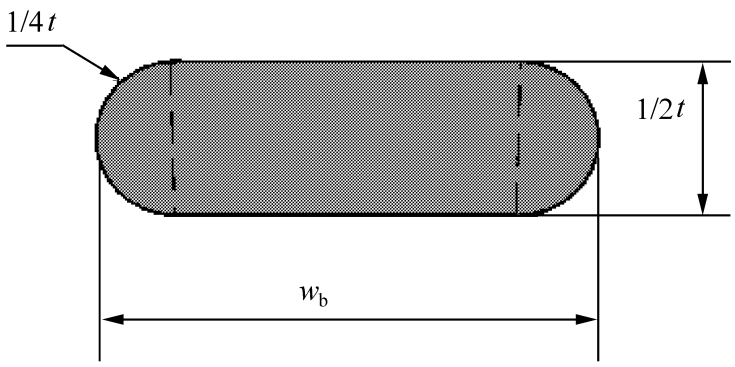

图 3 编织纱束横截面

Fig. 3 Cross-section of braided yarn

(2) ±[编织纤维束的横截面尺寸相同, 宽为 w_b, 截面高为 1/ 2t, t 为编织复合材料的单层厚度;

(3) 因为当编织角不是45 时编织纱束都不是正交的, 在这种情况下, 在沿着纱束方向的剖面上纱束两端的半圆形变成了椭圆形, 如图 4 所示。

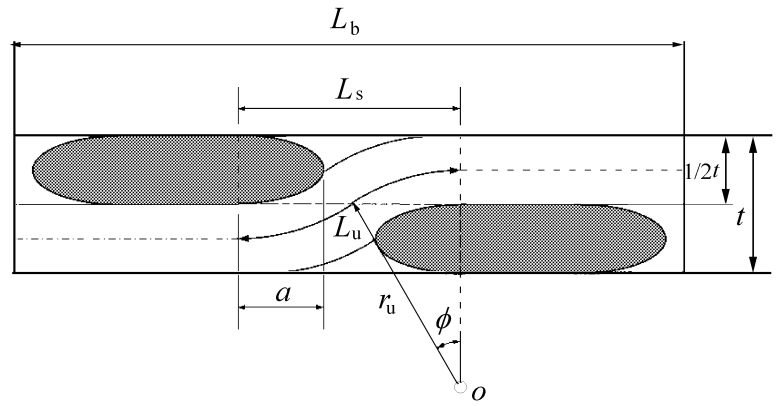

图 4 二轴编织结构沿纱束方向剖面示意图 (2×2)

Fig. 4 Schematic section in yarn direction of biaxial braided structure (2×2)

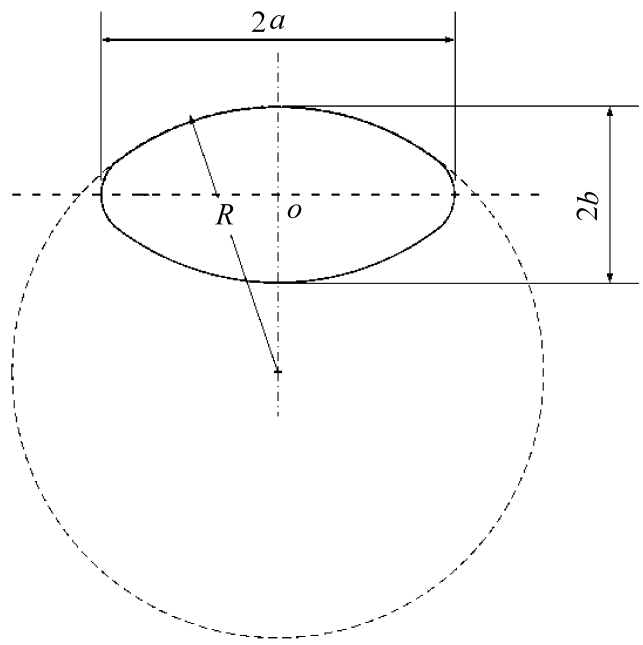

图 5 四心法椭圆

Fig. 5 Ellipse of four-focuses method

其长半轴和短半轴 a, b 分别为

$$a = \frac{t}{4\sin 2[}; \quad b = t/4 \tag{1}$$

为了简化计算, 假设这种椭圆是由不同曲率的四段圆弧拼接而成的, 即几何学上的 “四心法 ” 椭圆, 如图 5 所示, 其大圆弧的半径 R 为

$$R = \frac{(a^2 + b^2) + (a - b)\sqrt{a^2 + b^2}}{2b} \tag{2}$$

假设纱线的弯曲部分与椭圆的大圆弧部分相切, 这样就得到纱束中线弯曲部分的弯曲半径

$$r_u = R + 1/4t \tag{3}$$

纱束弯曲部分是由两段弯曲半径为 r_u 的相切圆弧连接而得, 切点在该编织层的中面上, 图 4 中的各个几何参数分别由如下公式求得:

$$L_s = \frac{1}{2}\sqrt{16r_u^2 - (4r_u - t)^2} \tag{4}$$

$$O = \arcsin\frac{L_s}{2r_u} \tag{5}$$

$$L_u = 2r_u O \tag{6}$$

$$L_b = \frac{2w_b - t}{\sin 2[} + 2L_s \tag{7}$$

横截面积 A 为

$$A = \frac{1}{2}w_b t + \frac{1}{16}\pi^2 - \frac{1}{4}t^2 \tag{8}$$

基本单元内纤维束的体积

$$V_b = 4A(L_b - L_s + L_u) \tag{9}$$

基本单元的体积

$$V = 2L_b^2\sin[\cos[\tag{10}$$

纤维体积含量

$$V_f = \frac{V_b}{V}] \tag{11}$$

其中，] 为基本单元中浸脂纤维束的纤维体积含量。注意，图2（b）中的纤维束有两种弯曲形式，一种如图4在中间弯曲，另一种在两段弯曲，呈“〔”形，二者弯曲部分所占比例完全相同。

1.2　单层厚度的确定

从上面的分析可以看出，编织复合材料每单层的厚度，是计算其弹性性能的必要参数，这个参数可以从材料制成品直接测量得出。在制造和工程计算中，也可采用下面的方法计算：

纤维体积还可以表示为

$$V_{fib} = \frac{4CN L_b \wedge}{d} \tag{12}$$

式中

$$C = \frac{L_b - L_s + L_u}{L_b} \tag{13}$$

C 表示纤维的弯曲率；∧为纤维线密度，单位是 (g/m)；d 是纤维密度，单位是 (g/cm^3)；N 为每束纤维束中纤维的股数，通常编织所用的纤维束都是合股的，如选用的纤维每股为6 K，而编织时所用的纤维束是 12 K，则 N = 2，表示纤维束是 2 股合股，相应的纤维密度∧取的是 6 K 纤维束的线密度。

复合材料的纤维体积含量表示为

$$V_f = \frac{V_{fib}}{2L_b^2 t\sin[\cos[} \tag{14}$$

根据式(12)、式(14)可以求得

$$t = \frac{2CN\wedge}{V_f L_b d\sin[\cos[} \tag{15}$$

其中纱线的弯曲率 C 仍然是未知的，可用如下的迭代过程计算求出：

(1) 首先假设 C = 1.0，代入式(15)计算出厚度 t 的估算值；

(2) 按照式(1)到式(6)依次计算 a，b，r_u，L_s，O，L_u 的值；

(3) 根据公式(13)计算纱线的当前弯曲率 C′。

将计算结果与 C 相比较，如果误差较大，则用 C′代替 C 返回式(1)重新计算，直到得到满意结果为止。

1.3　体积平均法

直纤维束的弹性常数由细观力学的方法得出[9]，注意公式中的体积百分含量要由本文中的浸脂纤维束的纤维体积含量] 代替，由这些弹性常数可以计算出直纤维束的柔度矩阵，本文作者根据体积平均法计算出纱束的等效柔度矩阵，首先需要分别计算弯曲部分与直线部分在纱束中所占的体积分数。

弯曲部分的体积含量

$$V_u = \frac{L_u}{L_b - L_s + L_u} \tag{16}$$

相应的直线部分的体积含量为(1.0 - V_u)。

纱束弯曲部分的等效柔度矩阵 S^u 用积分方法算出，直线部分的柔度矩阵 S^l 也就是直纤维束的柔度矩阵，于是根据体积平均法可以求出纱束整体沿着图 1 中 X 方向的等效柔度矩阵 S^b，其中

$$S_{ij}^b = S_{ij}^u V_s + S_{ij}^l(1.0 - V_s)(i, j = 1 \sim 6) \tag{17}$$

根据坐标转换公式将纱束等效柔度矩阵 S^u 转换成±[编织纱束沿编织方向，即图1 中X 方向的柔度矩阵 S^+、S^-，并求逆得出±[编织纱束的等效刚度矩阵 C^+、C^-，最后根据体积平均法计算出二维二轴编织复合材料的整体刚度矩阵 C，即

$$C_{ij} = C_{ij}^+\frac{V_{fib}}{2V} + C_{ij}^-\frac{V_{fib}}{2V} + C_{ij}^m\left(1 - \frac{V_{fib}}{V}\right)$$

$$(i, j = 1 \sim 6) \tag{18}$$

其中 C^m 为基体材料刚度矩阵。

求出它的逆阵即整体等效柔度矩阵 S，最后根据等效柔度矩阵 S 计算出需要的二维二轴编织复合材料的 9 个弹性常数。

2　试验研究概况

本试验研究对两种编织复合材料进行了拉伸试验，试件由 24 K 每股的 T700 碳纤维编织物和双马来酰亚胺 (BMI) 制成，两种不同结构的几何参数如

表 1 所示, 其编号中 "M" 表示编织纱束大小中等(Middle), "2"表示二轴, 另外的两位数字表示编织角度。纤维体积含量为(60±2)%, 对于拉伸试验件粘贴加强片, 拉伸试验采用NASA CR 4751 进行, 所有拉伸试验均在MTS-880 电液伺服试验机 50 kN 和500 kN 材料试验机上完成, 试验条件为干态室温即温度为(23±2)℃, 相对湿度为(50±5)%, 每种试件各 6 个, 北京航空材料研究院测试了两种二维二轴编织复合材料的弹性模量[10]。

表 1 二轴编织结构的几何参数

Table 1 Geometric parameters of 2-D braided structure

Architecture code	Braided angle/ (°)	Width of unit cell/ mm	Thickness / mm	Fiber volume fraction
M230	30	13.96	0.542	0.55
M260	60	8.06	0.963	0.55

3 结果与分析讨论

二轴编织复合材料面内各个方向的的弹性模量的计算值与试验值的对比如图 6、图 7 所示。

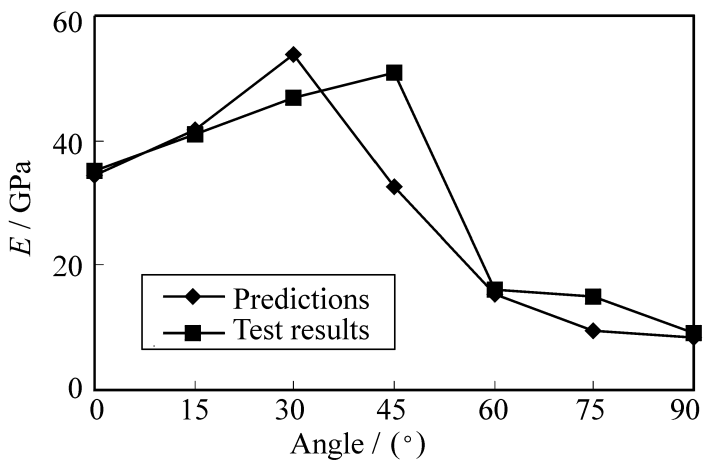

图 6 30 编织试件弹性模量计算值与试验值的对比

Fig. 6 Comparison of Young's module between the model predictions and the test results of 30 °braided specimen

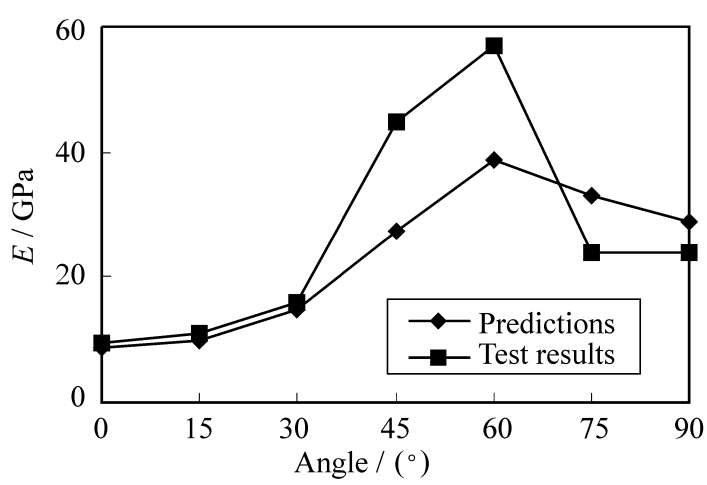

图 7 60 编织试件弹性模量计算值与试验值的对比

Fig. 7 Comparison of Young's module between the model predictions and the test results of 60 °braided specimen

可以看出, 对于这两个编织结构在大多数角度上, 弹性模量的计算值与试验值符合得很好, 尤其是在理论研究和结构分析中应用最为广泛的面内1、2 两个方向上的弹性模量, 说明该模型可以用于估算二轴编织复合材料在这两个主要方向上弹性性能参数。在偏离轴向角度较大的方向上存在较大的误差, 这是由于在这些方向上存在较大的耦合效应, 实际上作为准各向同性的二维编织复合材料, 其力学性能是由面内1、2 两个主要方向的力学性能参数确定的, 其他角度只能作为参考。

本文中对编织复合材料进行了弹性性能分析以确定不同的制造参数的影响。分析的两个主要参数分别是: 纤维体积百分含量和编织角。

在分析研究中通过保持其他参数不变, 调整已知编织复合材料试件基本单元的厚度来协调不同的纤维体积含量。如果已知编织试件的厚度和纤维体积含量分别是 t 和 V_f, 当调整纤维体积含量为 V_f' 时, 其厚度相应地变化为 $t' = V_f / V_f' t$。

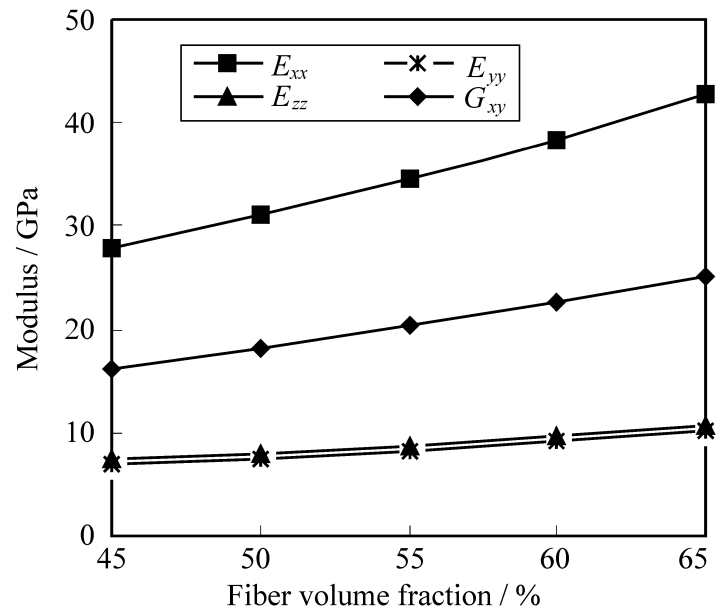

图 8 纤维体积含量的影响

Fig. 8 Influence of fiber volume fraction

按照上式逐渐地将试件 "M230"的纤维体积百分含量从45% 变化到65%, 而保持其他参数不变, 相应的各个弹性常数的变化趋势如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 编织复合材料各个方向的弹性模量以及剪切模量都随着纤维体积含量的增加而增加, 其中, 编织轴向的弹性模量和编织平面内的剪切模量变化比较明显, 而另外两个方向的弹性模量的增加量则不是很明显。

编织角的变化引起的变动比较复杂, 在本文中, 假设基本单元的y 向宽度w(如图2 所示) 保持不变, 其他参数按照前文分析协调变动, 分析结果如图 9 所示。

从图9 可以看出, 编织角越大, 轴向弹性模量越

小，而垂直轴向方向的弹性模量恰好与之相反，在编织角 25～75 范围内着两个方向的弹性模量最大值可以达到最小值的 5 倍之多，这是符合复合材料力学性质的一般规律的，厚度方向的弹性模量和编织品面内的剪切模量随编织角的变化并不明显。

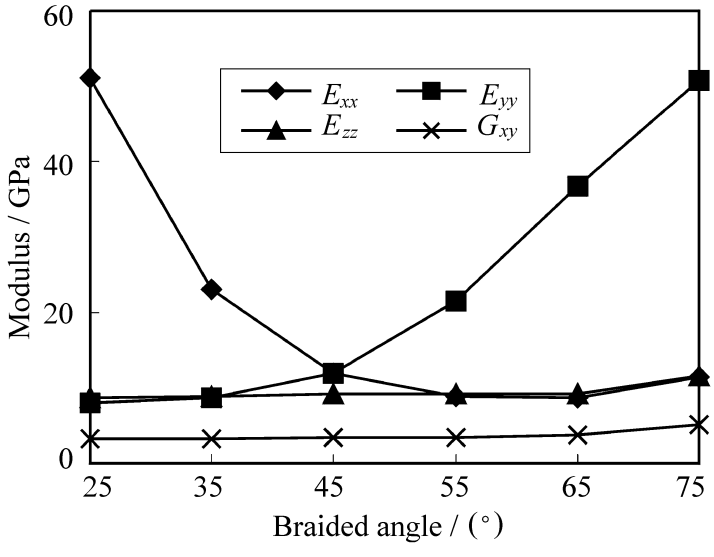

图 9　弹性常数随编织角的变化

Fig. 9　Influence of braided angle

4　结　论

基于体积平均法，将编织结构复合材料的宏观力学性能与编织细观结构相联系，建立了分析二维二轴编织结构复合材料弹性性能的力学模型。将该模型的计算结果与试验分析结果进行对比表明，计算结果与试验值相符，说明这个模型可以广泛地应用于这种结构复合材料的力学性能分析和结构设计指导。通过该模型还分析了材料的基本结构参数对整体弹性性能的影响，以便为复合材料的结构设计提供理论上的指导依据。

参考文献:

[1]　Byun J H. The analytical characterization of 2-D braided textile composites [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 705- 716.

[2]　燕　瑛，楼　畅，成传贤，等. 纺织复合材料力学性能的细观分析与实验研究 [J]. 复合材料学报，2001，18(2): 109-113.

[3]　李嘉禄，孙　颖. 二步法方型编织复合材料的细观结构 [J]. 复合材料学报，2002，19(4): 69- 75.

[4]　杨连贺. 3-D 机织复合材料弹性性能研究 [J]. 天津纺织工业学院学报. 1998，17(4): 1- 48.

[5]　王　瑞，王建坤，武　玲. 平纹织物复合材料的弹性模量预测 [J]. 复合材料学报. 2002，9(1): 90- 94.

[6]　Yang J M, Chou T W. Thermo-elastic analysis of triaxial woven fabric composites [A]. In: Chou T W, Ko F R, eds. Textile structural composites materials, series 3 [M]. Amsterdam: Elsevier, 1998. 122- 144.

[7]　Masters J E, Foye R L, Pastore C M, et al. Mechanical properties of triaxially braided composites: experimental and analytical results [J]. J Compo Technol Res, 1993, 15(2): 112- 122.

[8]　Naik R A, Ifju P G, Masters J E. Effect of fiber architecture parameters on deformation field and elastic moduli of 2-D braided composite [J]. Journal of Composite Materials, 1994, 28(7): 22- 32.

[9]　Chou T W. Microstructural design of fibrous composites [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 30-40.

[10]　李小刚. 编织复合材料成型工艺与性能研究 [D]. 北京: 北京航空材料研究院，2001. 65- 66.