复合材料学报 第23卷 第6期 12月 2006年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 6 December 2006

文章编号: 1000-3851(2006)06-0168-06

三维编织复合材料弹性性能的表面胞体效应

蔺晓明, 刘振国, 卢子兴*
(北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100083)

摘 要: 在作者已有的内胞模型基础上, 结合陈利等的面胞纱线走向及 Chou 等对表面纤维束截面形状的描述, 建立了由面胞和内胞组合的有限元分析模型, 比较真实地模拟了三维四向编织复合材料的真实结构。通过有限元计算预测了其弹性性能, 并同实验结果进行了比较, 分析讨论了三维四向编织复合材料的面胞对整体弹性性能的影响。研究结果证明了面胞在三维四向编织复合材料弹性性能有限元预测中的重要性。

关键词: 复合材料; 三维编织; 几何模型; 弹性性能
中图分类号: TB330.1 **文献标识码**: A

Effect of surface cell on elastic properties of 3D braiding composites

LIN Xiaoming, LIU Zhenguo, LU Zixing*
(Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Base on the model of the author's interior cell, the fiber trace of Chen's surface cell and the section shape of the bundle described by Chou, et al, a new combined model including surface cells and interior cells is proposed. This model can simulate the structure of the three-dimensional four-step braided composites accurately. On the basis of this model, the elastic properties of three-dimensional four-step braided composites are predicted through the finite element calculation. By comparing the theoretical prediction with the experimental data, the influence of the surface cells on the whole elastic properties was discussed. The result indicates that the surface cells are important for predicting the elastic properties of three-dimensional four-step braided composites.

Keywords: composites; 3D braiding; geometrical model; elastic properties

三维编织复合材料以整体编织预成型件为增强材料, 整体上显著地提高了材料的强度和刚度, 而且比一般复合材料具有明显的可设计性和较好的综合性能指标, 使这类材料在航空、航天等领域得到了广泛的应用。

研究编织复合材料力学性能的主要目的是为工程设计和分析提供必要的基础。但从目前的技术水平来看, 编织复合材料的研制成本较高, 研制周期也较长, 因此在材料研制和结构设计初期有效地进行材料性能的理论预报对材料的优化设计十分重要。国外 Frank 等[1]在实验观察基础上建立了确定三维编织复合材料几何尺寸的理论框架, 并用几何模型预估编织复合材料的模量。后来, Chou 等[2]提出了纤维倾斜模型, 用倾斜层板的集合来描述编织复合材料的力学特性。国内吴德隆等[3]提出了三细胞模型, 预测了编织结构复合材料的弹性模量和泊松比等力学性能。陈利等[4]基于变分原理, 用有限多相元法来预测三维编织复合材料的有效性能。刘振国等[5,6]对三维四向编织复合材料的参数化建模技术进行了研究, 提出了一种"米"字形体胞有限元计算模型, 数值预报了三维四向编织复合材料的有效弹性模量。最近, 杨振宇等[7]又提出了一种十分接近三维编织复合材料真实结构的有限元实体模型, 数值预报了三维四向编织复合材料的弹性性能。但是, 目前研究的大部分分析模型与编织复合材料的实际结构相差较大, 在对三维编织复合材料的弹性性能预测时还存在较大的误差, 模型的结构和理论预测所用的方法有待进一步改进。相对而言, 将实体模型作为分析模型, 可以更加准确地反映三维编织物的空间实际结构。本文在作者已有的

收稿日期: 2005-12-19; **收修改稿日期**: 2006-03-28
基金项目: 航空科学基金资助项目(04B51045); 北京市教育委员会共建项目建设计划资助(XK100060522)
通讯作者: 卢子兴, 教授, 主要研究方向为复合材料力学、泡沫材料力学 E-mail: luzixing@buaa.edu.cn

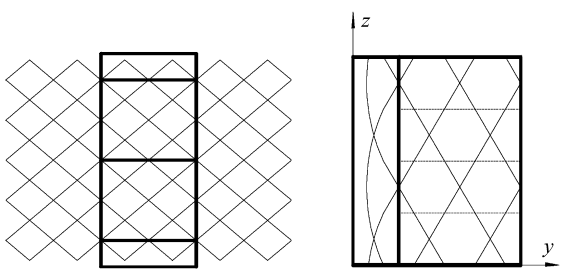
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

内胞模型[7]的基础上，结合陈利等的面胞纱线走向[8]及 Chou 等对表面纤维束截面形状的描述[9]，建立了由面胞和内胞组合的实体模型。然后通过有限元模型的加载计算，对三维四向编织复合材料的弹性性能进行了理论预测，讨论了组合的实体模型中面胞含量对整体弹性性能的影响，并与实验结果[5]进行了比较。

1 胞体几何模型的选取

三维四向编织复合材料的方型编织过程完成后的纱线轨迹的水平投影如图 1(a)所示，图中的细实线为纱线轨迹，粗实线为内胞和面胞的取法。按照三细胞模型，整个三维编织物是由 3 种单元胞体组成的。由于角胞在整个编织物中的比例相对较少，对弹性性能的影响很小，且考虑到建立实体模型的复杂性，在选取和建立内胞和面胞组合模型时，没有考虑角胞的影响。

为了使胞体模型尽量与实际情况接近，纱线在内胞和面胞的分界面上必须保持连续性。如图 1(b) 所示，纱线从内胞穿出进入到面胞，经过 4 个编织步后重新进入内胞，图中细实线为纱线轨迹，粗实线为胞体边框，虚线为编织步的分割线，整个胞体的高度为一个编织花节长度 h。



(a) The choice of the surface cell and the interior cell (b) Trace of fiber in the surface cell and the interior cell

图 1 纱线运动轨迹及模型取法

Fig. 1 Trace of fiber and the choice of the model

内部胞体内的纱线走向如图 2 所示。实际编织件经过打紧工序后，面胞中的编织纱线应为螺旋线形状[8](见图 3(a))，但为了方便实体模型的建立，对面胞中的螺旋线部分的纱线用 3 段直线进行了近似模拟(见图 3(b))，图中 θ 为内部编织角，β 为表面编织角，β 与 θ 的关系为[10]

$$\beta = \arctan(\pi\tan\theta/12) \tag{1}$$

为了能够理论预测面胞含量对三维编织物整体弹性性能的影响，需要建立不同的模型来进行计算。共建立了 4 个组合模型，分别称为一阶组合模型，二阶组合模型，三阶组合模型和四阶组合模型(图 4 给出了一阶组合模型和二阶组合模型的示意图)。一阶组合模型是由 1 个内胞和 2 个面胞组成的；二阶组合模型是由 2 个内胞和 2 个面胞组成的；三阶组合模型和四阶组合模型依此类推。通过建立这样的模型，胞体之间互相接触的面可以完全由胞体之间相互约束，不需象内胞那样通过假设来施加约束，因而使这些接触面上的约束更加符合实际情况。

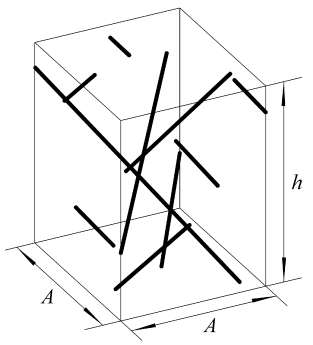
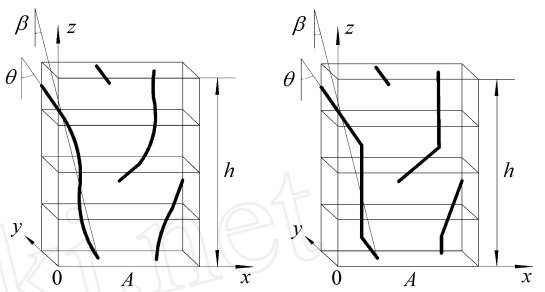


图 2 内部胞体内的纱线走向

Fig. 2 Trace of the fiber in the interior cell



(a) With helical yarns (b) With simulative yarns

图 3 表面胞体内纱线走向的简化

Fig. 3 Simplification for trace of the fiber in the surface cell

2 有限元分析模型及网格划分

几何模型确定后，需要根据几何模型的尺寸及纱线的空间走向建立实体模型，即有限元分析模型。但在建立实体模型前，还需作以下假设：(1) 经过挤压成型的编织复合材料的相邻纤维束保持紧密接触，且截面面积保持不变；(2) 内胞中纤维束截面形状保持为六边形[7]，而面胞中纤维束截面形状保持为五边形[9](见图 5)；(3) 所有的纤维束具有相同的特性。

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

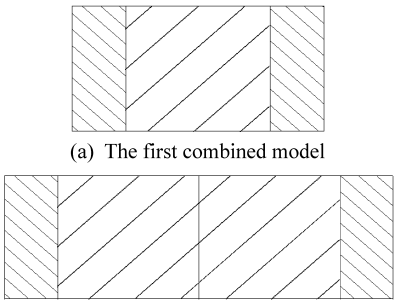


图 4　有限元分析模型示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the finite element model

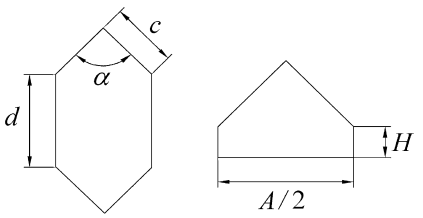


图 5　纤维束截面形状

Fig. 5　The section shape of the bundle

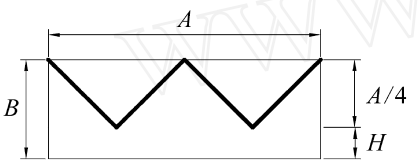


图 6　表面胞体的顶面视图

Fig. 6　Plan view of the surface cell

图 6 为面胞几何模型的顶面投影，粗实线为纱线轨迹，根据胞体内纱线的几何关系和以上的假设，经过计算可得胞体的尺寸：

$$A = \phi\sqrt{4\pi N_f/\kappa\cos\theta} \tag{2}$$

$$B = H + A/4 \tag{3}$$

$$h = \sqrt{2}A/\tan\theta \tag{4}$$

纤维束截面形状各参数的表达式为[11]

$$c = A\sqrt{1+\cos^2\theta}/4\sqrt{2} \tag{5}$$

$$d = A\cos\theta/2\sqrt{2} \tag{6}$$

$$\alpha = 2\arcsin\left(1/\sqrt{1+\cos^2\theta}\right) \tag{7}$$

$$H = A\left(\sqrt{3}-1\right)/8 \tag{8}$$

其中：N_f 为纤维单丝数；ϕ 为纤维单丝直径；κ 为纤维束的敛集率。

在表面胞体的实体模型中，纤维束从内部以六边形的截面形状穿出，与表面胞体的五边形截面形状的纤维束进行衔接。通过有限元软件，先将两不同形状的纤维束相贯，再通过重叠的命令对其进行重叠，重叠完后将多余部分去除，然后将剩下部分进行处理，将其建成一个整体即可(见图 7)。

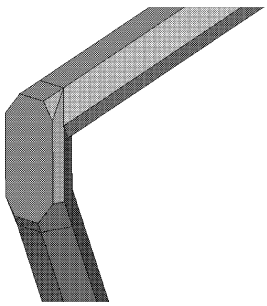
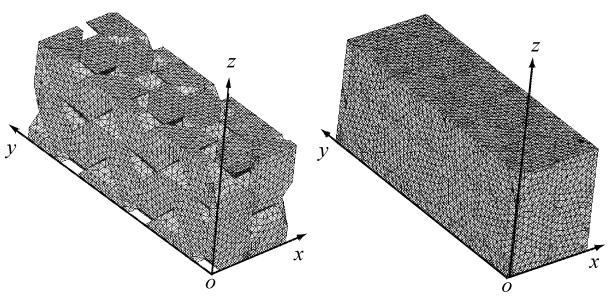


图 7　内、外纤维束的衔接

Fig. 7　Connection of the interior fiber and the surface fiber

在有限元软件中，根据几何模型，通过点到线，线到面，然后面到体的方式便可以建立胞体的实体模型。图 8 所示为内部编织角为 40°时的二阶实体组合模型的有限元网格划分情况。可见，所建立的实体模型在 z 方向和 x 方向上是周期性连续的，所以进行网格划分时必须保证 z 方向和 x 方向上各自所对应的两个面的网格划分完全相同，即保证其上面的节点是一一对应的，用面网格拷贝的方式加以实现。在 y 方向上，虽然面部胞体没有周期性，但也要保证其对应的两面的网格划分完全相同，以利于计算完毕后，后处理过程中的应力、应变的统计计算。



(a) Meshes of the fibers　　(b) Meshes of the whole model

图 8　实体模型的有限元网格划分

Fig. 8　The finite element meshes of the physical model

3　载荷及约束

在载荷及约束的施加方式上，借鉴了文献[7]对内胞的载荷及约束的施加方式，但也有一定的区别。计算求解 z 方向的杨氏模量及泊松比时，由于所取的实体模型仅在 z 方向和 x 方向上是周期性连

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

续的, 所以在 z 方向的加载方式及 z 方向和 x 方向上对应两面的约束方式同内胞是相同的, 但在 y 方向上, 由于对应的两面皆为自由面, 所以不施加任何约束。计算求解 x 方向的杨氏模量及泊松比时, 对于载荷及约束的处理方式同求解 z 方向的杨氏模量时是完全相同的,只不过将耦合位移载荷施加到了 x 方向对应的两面上而已。计算求解 y 方向的杨氏模量及泊松比时, y 方向对应的两面不存在变形相同的问题, 加载时用耦合位移载荷已经不能近似模拟真实的加载与变形情况。在现实的拉伸实验中, 要对试件在 y 方向上的两端用夹具夹紧后进行拉伸, y 方向上两面应基本上保持原来的平面状态。在有限元软件中, 将 y 方向上其中一个面上的所有节点的 y 方向的位移约束住, 然后在对应的另一面上的节点上施加绝对的位移载荷, 对 y 方向上对应两面上节点的另两个方向的位移不做任何处理, 使其保持自由状态。对 z 方向和 x 方向上的约束处理与内胞的处理方式相同。这样可以基本模拟真实的加载与变形情况。

计算求解各方向的剪切模量时, 由于实体模型在 z 方向和 x 方向上仍然保持空间上的周期性与连续性, 在 y 方向仍保持自由变形, 所以采用了与求解杨氏模量时相同的方法处理边界条件, 并施加剪切位移载荷。

4 计算结果

实体模型中的基体为环氧树脂, 纤维束为炭纤维和环氧树脂复合的多边形柱体, 纤维束的参数及树脂和炭纤维的参数与文献[7]中的数值相同。本文中计算了内胞纤维体积分数为 55 %时实体模型的弹性模量随编织角变化的规律, 及内部编织角为 40 时实体模型的弹性模量随纤维体积含量变化的规律(图 9 和图 10) 。

由图 9 和图 10 可见: (1) 纵向杨氏模量 E_z 随

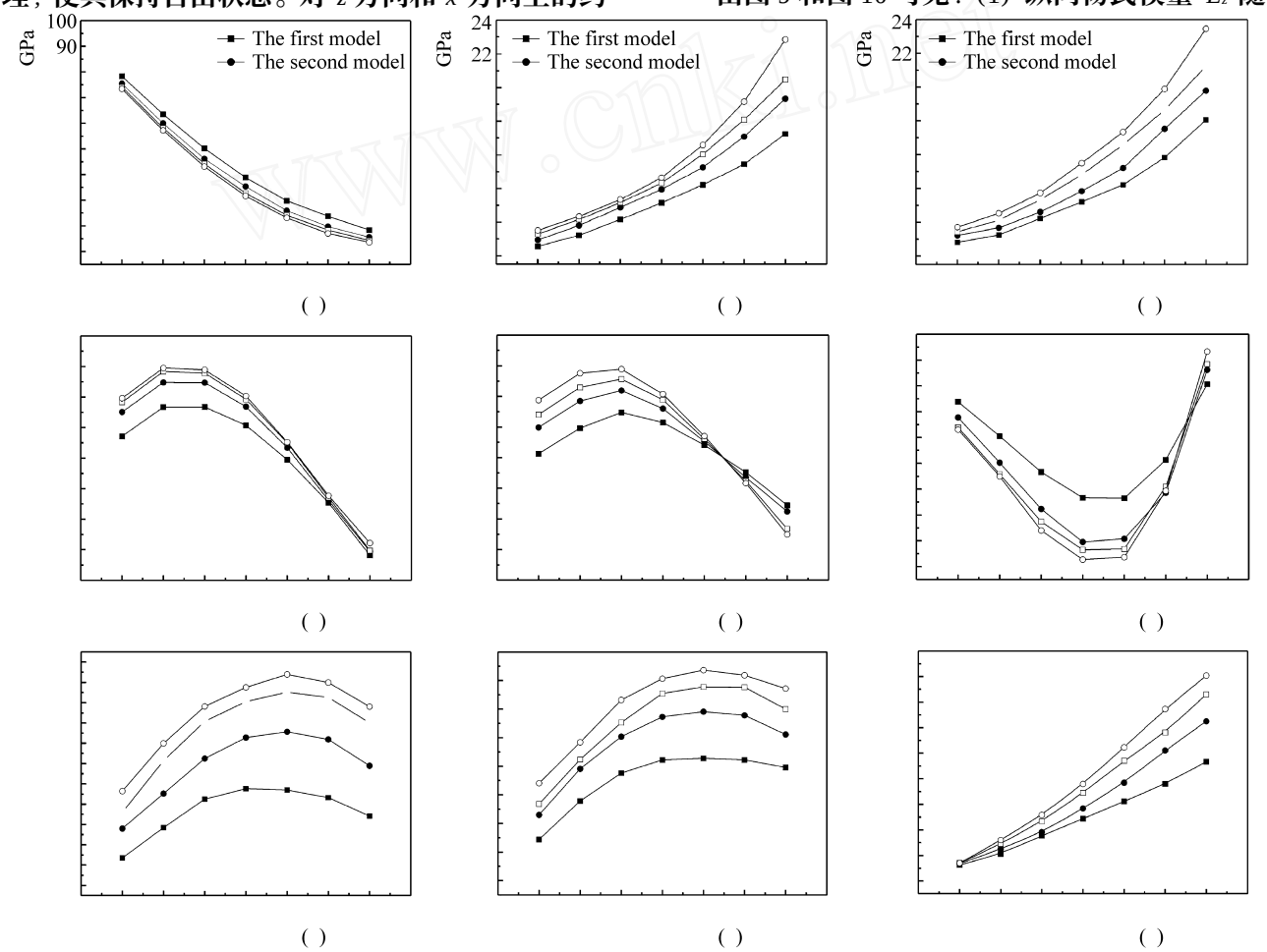


图 9 炭纤维/ 环氧树脂复合材料的弹性性能随编织角的变化(炭纤维体积含量为 55 %)

Fig. 9 Elastic properties of carbon fiber/ epoxy composite with different braiding angles (carbon fiber volume fraction is 55 %)

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

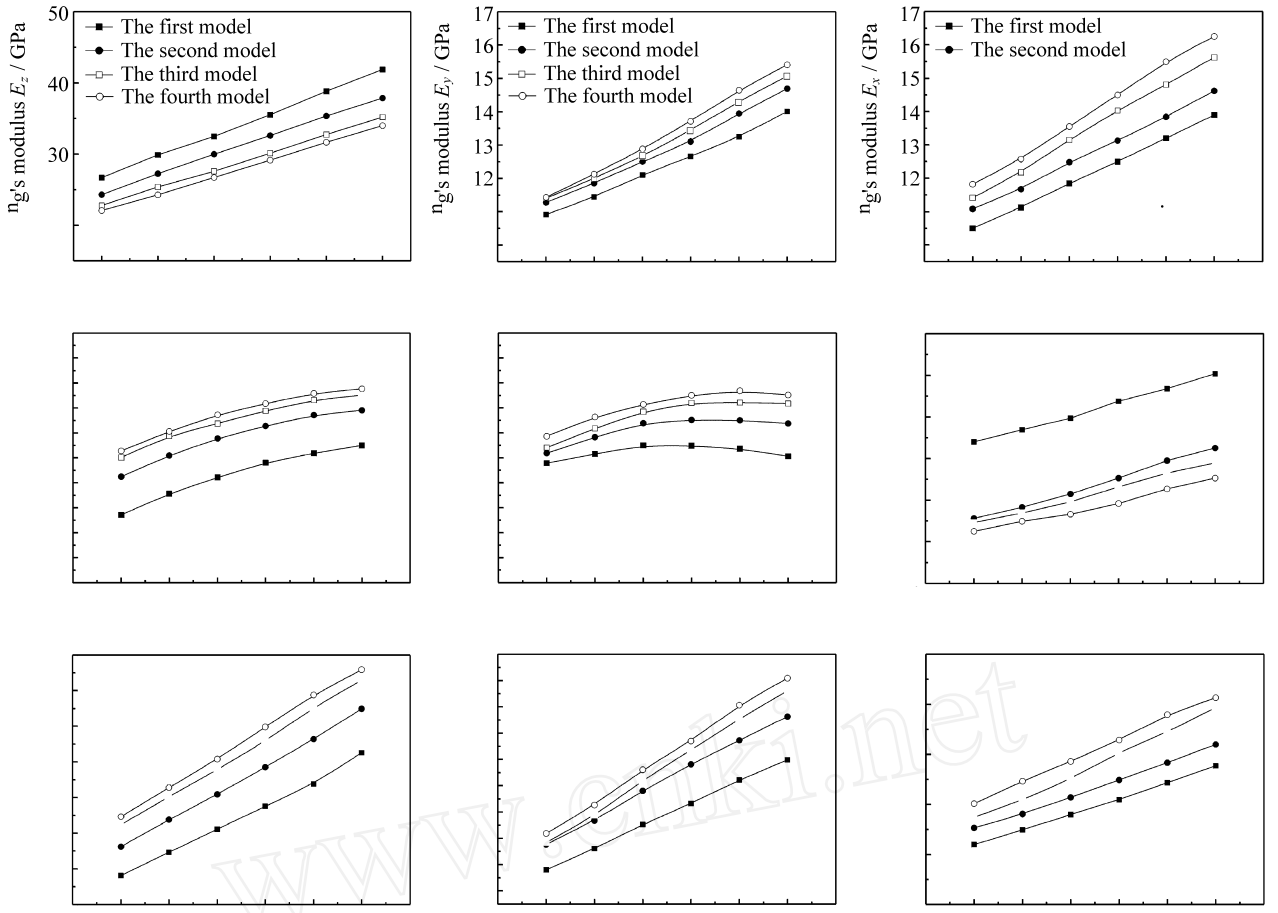


图 10　炭纤维/环氧树脂复合材料的弹性性能随纤维体积含量的变化(内部编织角为 40°)

Fig. 10　Elastic properties of carbon fiber/epoxy composite with different carbon fiber volume fractions (θ= 40°)

编织角的增加而减小，随纤维体积分数的增加而增大，且随着内胞数量的增加而减小，这说明面胞在纵向上对整个模型的杨氏模量起到了增强作用。横向杨氏模量 E_x 和 E_y 随编织角的增加而增大，随纤维体积含量的增加也增大，且随着内胞数量的增加而减小，这说明面胞在横向上对整个模型的杨氏模量起到了削弱作用。在同一阶模型中 E_x 和 E_y 之间的差别并不是很大，说明同一阶模型中的面胞在 x 和 y 两个方向上对整体杨氏模量的影响基本上是相同的。(2) 纵向泊松比 μ_{zx} 和 μ_{zy} 随编织角的增加先增大后减小，随纤维体积含量的增加而增大。在一阶模型和二阶模型中 μ_{zx} 和 μ_{zy} 之间差别较大，但随着内胞数量的增加，它们之间的差别越来越小，这说明面胞对于整个模型的泊松比 μ_{zx} 和 μ_{zy} 的影响是不同的。横向泊松比 μ_{xy} 随编织角的增加先减小后增大，随纤维体积含量的增加而增大。(3) 纵向剪切模量 G_{zx} 和 G_{zy} 随编织角的增加先增大后减小，随纤维体积含量的增加而增大，但从整体上来看 G_{zx} 和 G_{zy} 之间差别较大，这可能和编织纱线在表面部分弯曲后重新回到内胞有关。由于弯曲的影响，使得在内胞与面胞接触的部分主要是纤维束和基体相接的过渡区，造成了 G_{zy} 比 G_{zx} 小很多的情况。横向剪切模量 G_{xy} 随编织角的增加而增大，也随纤维体积含量的增加而增大。从整体上看，随着内胞数量的增加，面胞的影响越来越小，内胞逐渐起主导作用。

此外，针对实验中所用试件的各参数建立了相对应的实体模型并进行了计算，同实验结果进行比较。图 11 中给出了编织复合材料试件的理论预测结果与实验值的对比。图 11(a) 为 3 种试件的轴向杨氏模量 E_z 同实验值的比较；图 11(b) 为试件 1 和试件 2 的泊松比 μ_{zx} 和 μ_{zy} 同实验值的比较。

若 N 为实体模型的阶次，则纵向模量随模型阶次的变化如图中曲线所示；而平行于水平轴的各

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

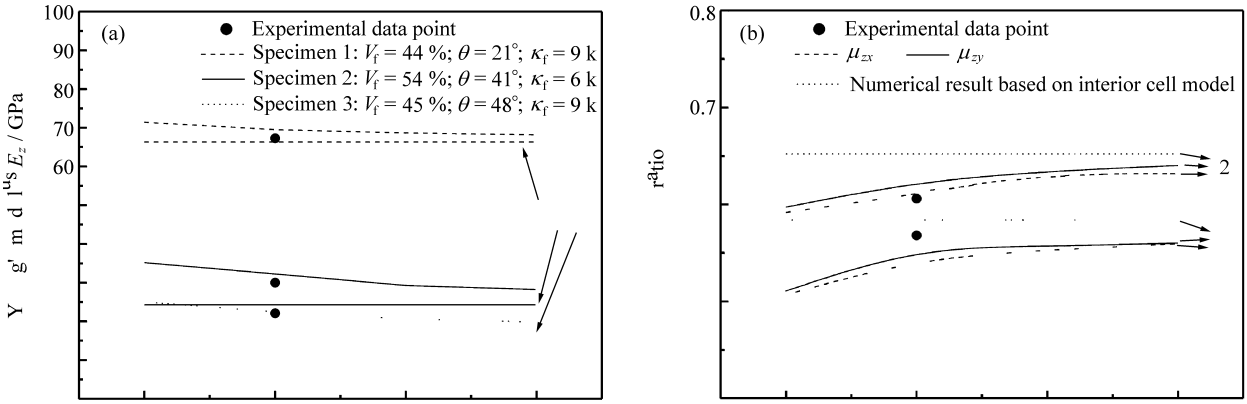


图 11 炭纤维/环氧树脂复合材料的弹性性能的数值结果同实验值的比较

Fig. 11 The comparison in carbon fiber/epoxy composite elastic properties between numerical result and experimental data

直线则代表了由内胞计算的结果。图中所示实验点对应的试件与本文中所建立的二阶模型是互相对应的。从图 11 可以看出，随着组合模型中内胞数量的增加，数值计算的结果逐渐趋于平缓。显然，如果模型阶次 N 再增加(即内胞所占的比例更高)，则组合实体模型的计算结果会更接近内胞模型的计算结果。图 11(a)中由数值计算结果与实验值的比较可以看出，组合实体模型的计算值比实验值略微偏大，但多数情况(编织角较大时)比内胞模型的计算值更接近实验结果。计算结果偏高的原因可能与组合模型中对面胞纤维的假设及胞体边界条件的近似处理有关。由图 11(b)可以看出，表面胞体对 μ_{zx} 和 μ_{zy} 的影响基本相同，μ_{zx} 和 μ_{zy} 之间的差别很小；组合模型的计算结果同实验值的差别也很小。

5 结 论

综上所述，三维编织复合材料的面胞对整体编织件的弹性性能确实存在较大影响，特别当面胞在整体编织件中所占的比例较大时，这种影响是不可忽略的，此时仅用内胞模型来预测整体编织件的弹性性能将会产生较大的误差。此外，本文中所建立的组合实体模型的计算结果与编织试件的实验值相比误差较小，误差都在 10 %之内，这一方面证明了本文中所建组合实体模型的有效性，另一方面也说明该组合实体模型更适合于预测编织试件的弹性行为。因此，本文中所建模型比较真实地模拟了三维四向编织复合材料试件的细观结构，这对于进一步预测这类材料的其他力学性能具有十分重要的意义。

参考文献：

[1] Ko F K, Pastore C M. Structure and properties of an integrated 3-D fabric for structural composite [C] // Recent Advances in Composites in the United States and Japan [R]: ASTM STP 864. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1985: 428 - 439.

[2] Yang J M, Chou T W. Fiber inclination model of three dimensional textile structural composites [J]. Journal of Composites Material, 1986, 20(5): 472 - 484.

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

[4] Chen L, Tao X M, Choy C L. Mechanical analysis of 3-D braided composites by the finite multiphase element method [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(16): 2383 - 2391.

[5] 刘振国，陆 萌，麦汉超，等. 三维四向编织复合材料弹性模量数值预报 [J]. 北京航空航天大学学报，2000，26(2)：182 - 185.
Liu Zhenguo, Lu Meng, Mai Hanchao, et al. Numerical prediction of moduli of 3-D and 4-step braided composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(2): 182 - 185.

[6] 刘振国，卢子兴，陆 萌，等. 三维四向编织复合材料剪切性能的数值预报 [J]. 复合材料学报，2000，17(2)：66 - 69.
Liu Zhenguo, Lu Zixing, Lu Meng, et al. Numerical prediction of the longitudinal and transversal moduli of three dimensional and 4-step braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(2): 66 - 69.

[7] 杨振宇，卢子兴，刘振国，等. 三维四向编织复合材料力学性能的有限元分析 [J]. 复合材料学报，2005，22(5)：155 - 161.
Yang Zhenyu, Lu Zixing, Liu Zhenguo, et al. Finite element analysis of the mechanical properties of 3-D braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 155 - 161.

[8] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided performs [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(3): 391 - 404.

[9] Byun Joon-Hyung, Chou Tsu-Wei. Process-microstructure relationships of 2-step and 4-step braided composites [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(3), 235 - 251.

[10] 陈 利，李嘉禄，李学明，等. 三维方形编织预制件的纱线编织结构 [J]. 复合材料学报，2000，17(3)：1 - 5.
Chen Li, Li Jialu, Li Xueming, et al. Yarn architecture of 3-D rectangular braided preforms [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(3): 1 - 5.

[11] 杨振宇. 三维编织复合材料弹性性能研究 [D]. 北京：北京航空航天大学，2004.
Yang Zhenyu. Investigation into the elastic properties of 3-D braided composites [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.

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