

# 三维编织复合材料的力学性能研究现状

## Progressing in the Study on Mechanical Properties of the 3D Braided Composites

张美忠, 李贺军, 李克智

(西北工业大学超高温复合材料实验室, 西安 710072)

ZHANG Mei-zhong, LI He-jun, LI Ke-zhi

(Super High Temperature Composites Key Laboratory,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**摘要:** 对近年来关于三维编织复合材料力学性能的研究方法和内容进行了综述。归纳出三类主要研究方法: 实验研究、细观结构力学模型研究、数值仿真研究。实验研究集中于测试各种编织参数和载荷对其力学性能指标的影响。细观结构力学模型研究主要是通过三维编织体的拓扑结构建立力学分析模型, 主要是“米”字枝状模型、纤维倾斜模型和3细胞模型。数值仿真研究是基于材料的线弹性力学, 利用有限元分析法对其力学性能进行数值仿真。本工作对当前研究的关键问题进行了分析, 就今后的研究工作发表了一些看法。

**关键词:** 三维编织复合材料; 建模; 数值仿真; 力学性能

**中图分类号:** TB332    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381 (2004) 02-0044-05

**Abstract:** Recent developments on mechanical behaviors of 3D braided composites were reviewed. It was summarized that experiment, micro-structure modeling and numerical simulation are the mainly investigative methods. Experiment investigations concentrated on testing the mechanical properties of 3D braided composites with different braiding parameters and load. Micro-structure modeling based on the yarn topology in the preform, such as “米” type model, fiber inclination model and 3 cell model, were applied successively. Numerical simulation carried out by means of the finite element analysis, which is based on the line elastic mechanical properties of 3D braided composites. However, further work still is required before the mechanical properties are properly predicted. Some suggestions for future investigations were also made in this paper.

**Key words:** 3D braided composites; modeling; numerical simulation; mechanical properties

三维编织复合材料是一种新的网状结构复合材料, 是20世纪80年代随着三维整体编织高新纺织技术的出现而产生的。它不但克服了传统的层板复合材料分层、开裂敏感和损伤扩展快, 垂直结构方向强度低, 抗冲击损伤性能差的缺点, 而且拥有良好的可设计性、整体异形性及净截面制造等优点。因此, 在结构材料领域中受到极大的关注。

力学性能是三维编织复合材料研究的主要方面之一。目前, 对其力学性能的研究主要有三种方法: 实验研究, 细观结构力学模型研究, 数值仿真研究。研究表明, 材质相同的三维编织复合材料, 其力学性能与增强体的编织参数和纤维体积百分数密切相关。面内力学性能较纤维体积含量相同的二维层合板低; 应力-应变表现为非线性。

本工作从力学性能研究的角度, 反映这方面的研究趋势和新的进展; 探讨这三种研究方法及其内容之间的内在联系, 提出了一些看法和建议, 以利于下一

步研究工作的深入开展。

### 1 三维编织复合材料力学性能的实验研究

三维编织复合材料力学实验研究, 主要是通过现有的仪器和手段揭示其力学性能特点。从20世纪80年代起, 就有许多国内外学者对其力学性能进行实验研究<sup>[1-10]</sup>。

Surya R. Kakidindi<sup>[2]</sup>等人在对石墨纤维树脂基三维编织复合材料的纵、横向模量和强度实验研究过程中, 发现其应力-应变曲线为非线性。从实际应用角度看, 三维编织复合材料比材质相同的单向纤维增强复合材料有更好的抗破坏能力。其压缩应力-应变对比曲线如图1所示。

唐国翌等<sup>[6]</sup>在碳纤维树脂基三维编织复合材料的实验研究过程中, 发现随编织角减小, 弹性模量和抗拉强度都明显增大, 纤维与树脂间界面的粘结强度

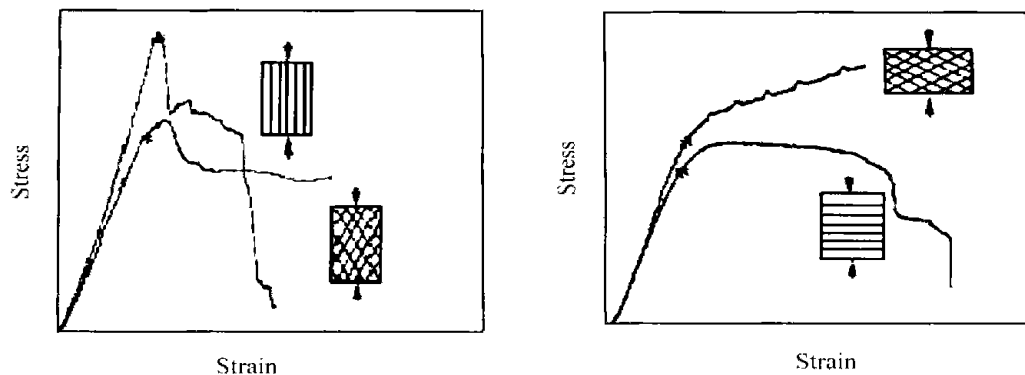


图1 压缩应力-应变对比曲线图

Fig. 1 Typical measured stress-strain curves for the 3-D braided and unidirectional composites

提高,脆性增大。在断裂过程中碳纤维多呈脆性断裂特征,断裂起源于纤维表面的薄弱处。刘谦等<sup>[7]</sup>在拉伸实验研究过程中,发现碳纤维树脂基三维编织复合材料的应力-应变曲线呈双线性,曲线的初始和最后阶段为线性。随纤维体积分数和纤维束细度的增大,拉伸模量和断裂强度增大,但随表面编织角的增大,破坏应力和拉伸弹性模量减小。拉伸断裂过程中没有屈服点产生,表现为脆性材料。当材料破坏时,纤维为脆性断裂;纤维间基体有很大的塑性变形。对此材料,杨朝坤<sup>[8]</sup>发现在编织角一定的前提下,拉伸模量随着纤维体积分数的增加而变大;拉伸断裂应变随编织角的增加而增加。在纤维体积含量一定的情况下,编织角越大,编织复合材料的拉伸模量和压缩模量越小,其应力-应变越表现出非线性;编织角越小,拉伸应力-应变曲线越接近于线性。随纤维体积含量及表面编织角的增加弯曲模量和弯曲强度会增加,但逐渐达到上限而趋于极限值。其内部的应变场在微观上表现为非均匀性。

对碳化硅/碳化硅陶瓷基三维编织复合材料,徐永东<sup>[9]</sup>等发现其有优异的韧性和金属材料类似的非灾难性的断裂特性。韩红梅<sup>[10]</sup>在碳/碳三维编织复合材料的拉伸、弯曲以及拉-拉疲劳实验研究中,除发现拉伸破坏属典型的脆性断裂和应力-应变表现为非线性外,还发现在拉-拉循环载荷作用后,不仅没有降低材料的静强度,反而使之提高,图2为疲劳循环加载前后试样的静拉伸载荷-位移曲线。

从实验研究可知,三维编织复合材料的应力-应变表现为非线性;当材料拉伸时,表现为脆性断裂;在拉-拉循环载荷作用后,其静强度反而提高。更重要的是发现通过改变编织角和纤维体积百分数,可控制其模量和断裂强度。因此,只要合理设计编织体,就能使三维编织复合材料的力学性能达到一定的使用要求。20世纪80年代末,国内外学者开始在实验研究的基础上,分析三维编织体中纱线的拓扑结构,建立细

观结构力学模型用以预测力学性能。

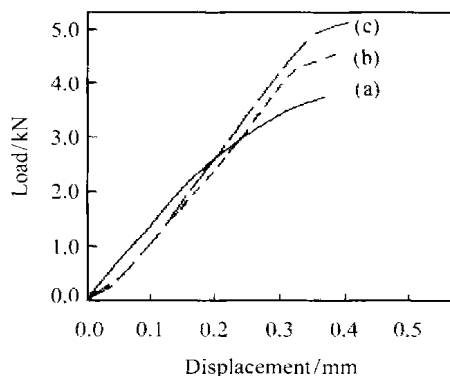


图2 疲劳循环对拉伸曲线的影响

 (a) 原始拉伸; (b)  $3 \times 10^4$  次循环后拉伸;  
(c)  $6 \times 10^4$  次循环后拉伸

 Fig. 2 Effect of tension-tension cyclic load on tensile load-displacement curve of 3D C/C composite  
(a) static tension of original sample; (b) static tension after 30000cycles; (c) static tension after 60000 cycles

## 2 细观结构力学模型

在20世纪80年代初,Chou<sup>[11]</sup>开始对机织物复合材料用马赛克模型、纤维弯曲模型和桥连模型建立力学分析模型,应用经典层合板理论来计算基本的力学性能和弹性常数。由于结构和工艺的不同,传统的机织物模型显然不太适合三维编织体。20世纪80年代末,许多中外学者根据三维编织体中纱线的拓扑结构,提出几种典型的力学模型。

### 2.1 取向平均模型

在1986年,K.Ko<sup>[11]</sup>根据纱线在三维编织体中的走向,首先对三维编织体建立了一个简单的单胞模型。认为在单胞内所有纱线与 $z$ 轴的夹角 $\theta$ 即为纱线的方向角。对于给定线密度的编织体,用 $\sigma_f = \sigma_y \cos^2 \theta$ 来预测其拉伸应力。其中 $\sigma_y$ 是纱线的拉伸应力。

## 2.2 “米”字枝状模型

Ma<sup>[12]</sup>等人建立了一个由四根纱组成的平行六面体作为理想模型。并作了五点假设: (1) 复合材料的强度和刚度主要来自这4根纱; (2) 4根纱为线弹性, 在外加载荷下截面为圆形; (3) 这4根纱都有弯曲、拉伸、压缩刚度; (4) 在交叉处有挤压力, 但可以被压缩也可没有被压缩; (5) 若在交叉区被压缩弯曲后, 纱线半径与纱线其他片段一样。用能量的方法研究了三维编织体的弹性性能。通过把单胞中所有的纱都投影到六面体的六个相互垂直的面上的方法, 分别计算出沿  $x, y, z$  方向上的纤维体积百分数和单位长度弯曲应变能、拉伸应变能和压缩应变能。利用 Castigliano 理论, 计算出应变; 再根据外加的合力计算出杨氏弹性模量和泊松比, 用于预测应力。庞宝君<sup>[13]</sup>建立了与 Ma<sup>[12]</sup>类似的单胞结构模型, 但认为可用 19 根纤维来表示单胞中的纤维束方向及位置, 其单胞如图 3 所示。图中只表示占纤维体积百分数主要部分的 7 根纤维, 并假设: (1) 纤维束为圆截面, 与基体复合后纤维束仍保持为圆柱状; (2) 纤维束之间没有间隙地紧密相切。

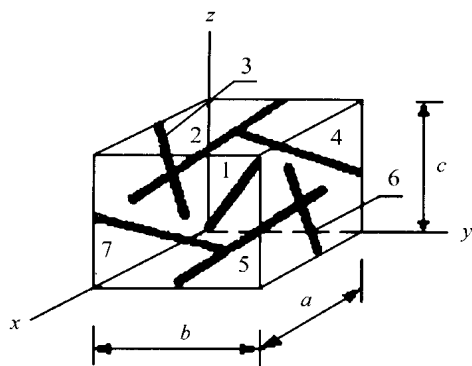


图3 单胞中主要纤维束的位置和方向

Fig. 3 Location and orientation of fiber rods

## 2.3 纤维倾斜模型

Jenn-ming Yang<sup>[14]</sup>在 Ko 理想单胞基础上, 用修改后的经典层板理论对三维编织体建立了纤维倾斜模型。认为理想单胞由一个六面体以及四层对角面组成, 纤维在各顶点转折, 以“Z”字型在整个编织物的长度方向延伸, 并作了3点假定: (1) 在浸渍基体后, 认为一个单胞中平行于对角线的所有纱线是一个层; (2) 纤维在同一层内是直的单向的, 由一个方向对角线转为另一方向对角线的弯曲与互锁被忽略不计; (3) 认为单胞由四单向倾斜层组成, 四层的交叉区域被忽略, 每一层只有一种纤维取向且厚度相同。运用了 Ishikawa<sup>[11, 15-20]</sup>对二维二向织物热弹性建模的方法, 来求解弹性系数和力学参数。对四层层板组成的

单胞, 在忽略纤维交叉处相互作用力的基础上, 分别计算出每一层单位厚度的拉伸刚度矩阵, 通过对其中有关的力学参数坐标转换; 计算出单胞拉伸刚度矩阵、抗弯曲刚度矩阵、韧性刚度矩阵。经典的层板理论的本构方程为:

$$\begin{bmatrix} N_i \\ M_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij} & B_{ij} \\ B_{ij} & D_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_j \\ \chi_j \end{bmatrix}$$

由此方程计算出应力和力矩。孙慧玉在“纤维倾斜模型”基础上发展了新的力学模型<sup>[21]</sup>, 利用三维应力-应变, 对每一单向层合板进行分析, 得到每一单向复合材料层片的刚度矩阵。在单胞的长度方向积分和平均, 得到编织结构复合材料的有效弹性模量。采用蔡-胡多项式失效准则, 来预测其强度性能。

## 2.4 3 细胞模型

1993 年, 吴德隆提出了 3 cells 模型<sup>[22]</sup>。在发展原有模型的同时, 提出三维编织体表面, 边角的细胞模型。使得描述编织体的单胞更加全面、具体, 预测的力学结果与实际更加接近。提出内部基元 (B.C)、边界面元 (F.C)、角点角元 (R.C) 3 细胞模型, 认为每一类细胞模型中的纱线是一单向复合材料, 并作 3 点假设: (1) 每个细胞中纱线具有相同横截面; (2) 每根纱线纤维体积含量相同; (3) 每类细胞的体积含量等于细胞个数与纱线长度之积。通过纱线与参数坐标系之间方向余弦, 用坐标系的转换关系, 描写刚度矩阵和柔度矩阵。从三类细胞的体积比, 推得复合材料的总刚度和总柔度矩阵, 工程弹性常数可从矩阵中求得。

## 2.5 加权平均模型

Surya R. Kalidindi<sup>[3]</sup>提出加权平均模型 (Weighted Average Model)。把等应变模型和等应力模型建立的刚度矩阵进行加权平均得出其刚度矩阵。

随着三维编织体结构研究的深入, 建立的模型也越来越完善。在材料领域, 用现有成熟的有限元软件和求解方法来仿真纺织复合材料力学性能成了一种趋势。对于机织物增强复合材料, 用有限元方法来预测其力学性能已逐渐完善<sup>[23-26]</sup>。20 世纪 90 年代, 三维编织复合材料力学性能的有限元数值仿真研究也开始展开。

## 3 三维编织复合材料力学性能的数值仿真

目前对材料力学性能的数值仿真主要是有限元分析法。对于三维编织复合材料而言, 由于其内部结构的复杂性以及计算机容量的限制, 通常不可能把整体结构作为对象进行分析, 而只能取其具有代表性的体积单元 (RVE) ——体胞为具体对象。R. Pandey<sup>[27]</sup>于 1995 年建立了 4 步编织法体元代表 (RVEs) 的

CAD 模型,形象地描绘出内部 3 种位置的两种纱线曲率和编制速度的体元;国内的研究者<sup>[28-30]</sup>为更确切建立体元所作的大量研究,为用有限元法对三维编织复合材料力学性能进行数值仿真奠定了基础。

当今用有限元方法对三维编织复合材料力学性能进行数值仿真的研究不多。L. Chen<sup>[31]</sup>在其建立的三细胞模型基础上,用有限多相元(FMEM)对三维编织复合材料力学性能进行了数值仿真。Z. X. Tang<sup>[32]</sup>通过非线性有限元对三维编织复合材料的变形分析。对其拉伸和弯曲性能进行了数值仿真。

刘振国<sup>[33,34]</sup>在 Ma<sup>[12]</sup>的“米”字型模型基础上,利用参数化建模技术,对三维四向编织复合材料进行有限元分析。作者根据体胞自身对称性及空间上具有的周期性分布特点,分别对基体和纤维划分单元网格,确定其边界条件,对其弹性模量和剪切性能进行了数值仿真。庞宝君等<sup>[35]</sup>在已建立的三维多向编织复合材料单胞模型<sup>[13]</sup>的基础上,采用规则的八节点体单元对其整个单胞进行剖分。对基体单元和纤维束单元分别采用各向同性及正交异性材料本构关系,利用他建立的包含两种介质单元即所谓混合单元的刚度矩阵分析方法,计算实际单元近似刚度矩阵。在线弹性基础上,按复合材料的有效模量理论,在单胞上加入均匀边界条件,使得在统计材料内产生统计均匀场。在求得单胞应力、应变场基础上,按体积平均原则,计算平均应力和平均应变,继而求出复合材料的有效模量。以碳/环氧四向编织复合材料为例,对其有效弹性模量进行了数值仿真。

冯森林<sup>[36]</sup>为避开众多编织复合材料参数对有限元分析带来的困难,提出小参数渐近展开和摄动方法的均匀化理论与有限元方法结合起来应用的方法。对复合材料等效弹性模量的数值研究进行了首次尝试。

## 4 现状分析与展望

三维编织复合材料的优良品质,近年来引起了力学和材料科学研究者的高度重视。由于三维编织复合材料的工艺和结构非常复杂,现在对其力学性能的研究仍然是以实验为主。但在实验研究方面材料品种单一,绝大部分是玻璃纤维/树脂基复合材料。新型材料如碳纤维增强碳基、陶瓷基、金属基三维编织复合材料结合编织参数的实验研究很少,数据单一。这限制了新型三维编织复合材料的应用和力学性能数值仿真的发展。今后,扩展三维编织复合材料力学性能数据库,挖掘新型三维编织复合材料特有力学性能将是三维编织复合材料力学性能实验研究的主要方向。

实验研究是材料研究必不可少的手段,但由于三维编织复合材料的增强体主要用两步法和四步法编

织,所以许多编织纤维偏离了承载方向,且有严重的卷曲变形。因此弹性性能和强度受编织角、编织式样和纱线的尺寸的影响。在三维编织复合材料小试件测试时发现,力学性能受边界条件影响。从整体构件中切出试件,损伤纱线的连续性。为保证安全可靠就应进行全尺寸试验,但试验费用高。新型三维编织复合材料(如碳/碳复合材料)制备工艺复杂,所需时间长,进展速度缓慢,严重地阻碍它的应用。因此,研究材料的细观结构力学模型,以期仿真其力学性能,是发展的必然趋势。

现有的力学模型在一定程度上能预测其力学性能。但上述模型基本上都忽略了单胞内纱线的走向以及屈曲程度,浸渍基体后截面形状的改变,纱线在交叉处的应力等因素。三维编织体复合材料的力学性能不仅是基体和纱线类型、纤维体积百分数和编织角,而且是纱线的取向、以及基体和纱线界面结合力的函数。纱线的空间取向是受织物参数如纱线间挤压程度,线密度(纱的尺寸)、预制体中的数量等影响的。而这些参数的获得,必须做大量的实验。复合材料加工过程中,纱线变形带有随机性,要求有一定量的样本,这就加大了难度。因此需采用一些能快速捕捉和提取三维编织复合材料结构中纱线截面与屈曲形状变化特征的分析工具,如文献[28, 29]所描述的图形图像工具,这是建模研究延伸出来的另一研究领域,这方面的研究现在较少,以后将是材料细观研究的主要方面。只有搞清楚这些特征才能建立更合理的、接近实际的模型,才能有效的采用有限元方法和现有的软件,利用计算机快速地对三维复合材料力学性能进行仿真。

有限元分析法可以得到结构内各处的应力分布,克服了层合板理论只能计算面内性质,能量法只适于分析纺织物性能的局限性。但当今用有限元法对三维编织复合材料的研究,只是基于其线性关系的本构行为。而三维编织复合材料是典型的非线性行为,其非线性包含有几何非线性和材料非线性,为更准确地分析三维编织复合材料力学行为,应当考虑其非线性。Z. X. Tang<sup>[32]</sup>的研究虽然已涉及到非线性,但由于非线性比线性更复杂、困难,其研究还不够深入、全面。今后还有待于提出更为有效的有限元分析法。以期达到真实的仿真结果。

## 参考文献

- [1] KO F K. Tensile Strength and Modulus of a Three-dimensional Braid Composite, Composite Materials: Testing and Design (Seventh Conference) [C]. ASTM STP893. WHITNEY J M, Ed. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, 392-403.

- [ 2 ] MACANDER A B, CRANE R M, CAMPONESCHI E T. Fabrication and Mechanical Properties of Multidimensionally (X-D) Braided Composite Materials [ A ] . Composite Material: Testing and Design (Seventh Conference) [ C ] . ASTM STP 893, WHITNEY J M, Ed. American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1986, 422- 443.
- [ 3 ] SURYA R, KALIDINDI A, Abusafieh. Longitudinal and Transverse Moduli and Strengths of Low Angle 3-D Braided Composites [ J ] . Journal of Composite Materials, 1996, 30 (8): 885- 905.
- [ 4 ] TANG Z X, POSTLE R. Mechanics of Three-dimensional Braided Structures for Composite Materials-part : Fabric Structure and Fibre Volume Fraction[ J ] . Composite Structures 2000, 49 : 451- 459.
- [ 5 ] TANG Z X, POSTLE R. Mechanics of Three-dimensional Braided Structures for Composite Materials-part : Prediction of the Elastic Moduli[ J ] . Composite Structures 2001, 51: 451 - 457.
- [ 6 ] 唐国翌, 闫允杰, 陈锡花, 等. 多向编织碳纤维复合材料的断裂及微观形貌 [ J ] . 清华大学学报 ( 自然科学版 ), 1999, 39 (10): 4- 7.
- [ 7 ] 刘谦, 李嘉禄, 李学明. 三维编织工艺参数对复合材料拉伸性能的影响 [ J ] . 宇航材料工艺, 2000, 1: 55- 58.
- [ 8 ] 杨朝坤. 编织结构复合材料力学性能的测试与分析 [ J ] . 玻璃钢/ 复合材料, 2002, 3: 11- 14.
- [ 9 ] 徐永东, 成来飞, 张立同. 三维碳化硅/ 碳化硅陶瓷基编织体复合材料 [ J ] . 无机材料学报, 2001, 16 (2): 344- 348.
- [ 10 ] 韩红梅. 碳/ 碳复合材料的力学性能及损伤演变研究 [ D ] . 西安: 西北工业大学, 2002.
- [ 11 ] ISHIKAWA T, CHOU T W. Stiffness and Strength Behavior of Woven Fabric Composites [ J ] . Journal of Materials Science, 1982, 17: 3211- 3220.
- [ 12 ] MA C L, YANG J M, CHOU T W. Elastic Stiffness of Three-Dimensional Braided Textile Structural Composites [ A ] . Composite Material: Testing and Design (Seventh Conference) [ C ] . ASTM STP 893, WHITNEY J M, Ed. American Society for Testing and Material, Philadelphia, 1986, 404- 421.
- [ 13 ] 庞宝君, 杜善义, 王铎等. 三维多向编织复合材料分析模型 [ J ] . 哈尔滨工业大学学报, 1996, 28 (6): 1- 6.
- [ 14 ] YANG J M, MA C L, CHOU T W. Fiber Inclination Model of Three-dimensional Textile Structural Composites [ J ] . Journal of Composite Materials, 1986, 20: 472- 484.
- [ 15 ] ISHIKAWA T. Anti-Symmetric Elastic Properties of Composite Plates of Satin Weave Cloth [ J ] . Fiber Science and Technology, 1981, 15: 127- 145.
- [ 16 ] ISHIKAWA T, CHOU T W. One-Dimensional Micromechanical Analysis of Woven Fabric Composites [ J ] . AIAA Journal, 1983, 21: 1714- 1721.
- [ 17 ] ISHIKAWA T, CHOU T W. Stiffness and Strength Properties of Weaven Fabric Composites[ J ] . Journal of Materials Science, 1982, 17: 3211- 3220.
- [ 18 ] ISHIKAWA T, CHOU T W. In-plane Thermal Expansion and Thermal Bending Coefficients of Fabric Composites[ J ] . Journal of Composite Materials, 1983, 17: 92- 94.
- [ 19 ] ISHIKAWA T, CHOU T W. Elastic Behavior of Woven Hybrid Fabric Composites[ J ] . Journal of Materials Science, 1982, 16: 2- 19.
- [ 20 ] ISHIKAWA T, CHOU T W. Thermoelastic Analysis of Hybrid Fabric Composites [ J ] . Journal of Materials Science, 1983, 18: 2260- 2268.
- [ 21 ] 孙慧玉, 吴长春, 卞恩荣. 三维编织复合材料面内刚度和强度性能研究 [ J ] . 复合材料学报, 1998, 15 (4): 102- 106.
- [ 22 ] WU D L. Three-cell Model and 5D Braided Structural Composites [ J ] . Composites Science Technology, 1996, 56: 225- 253.
- [ 23 ] TAN P, TONG L Y, STEVEN G P. Micromechanics Models for the Elastic Constants and Failure Strengths of Plain Weave Composites [ J ] . Composite Structures, 1999, 7: 797- 804.
- [ 24 ] TAN P, TONG L Y, STEVEN G P. Behavior of 3D Orthogonal Woven CFRP Composites. Part : FEA and Analytical Modeling Approachs [ J ] . Composite: Part A, 2000, 31: 273 - 281.
- [ 25 ] TAN P, TONG L, STEVEN G P. A Three-dimensional Modelling Technique for Predicting the Linear Elastic Property of Opened-packing Woven Fabric Unit Cells [ J ] . Composite Structures, 1997, 38 (1-4): 261- 271.
- [ 26 ] IVELIN L ALA T. Three-dimensional Computational Micromechanical Model for Woven Fabric Composites[ J ] . Composite Structures, 2001, 54: 489- 496.
- [ 27 ] PANDEY R, HAHN H T. Visualization of Representative Volume Elements For Three-Dimensional Four-step Braided Composites [ J ] . Composites Science and Technology, 1996, 56: 161 - 170.
- [ 28 ] 孙义林, 黄小平, 徐宁光, 等. 三维编织结构的计算机图形显示 [ J ] . 中国图象图形学报, 2000, 5 (A): 443- 446.
- [ 29 ] 李嘉禄, 刘谦. 三维编织复合材料中纤维束横截面形状的研究 [ J ] . 复合材料学报, 2001, 18 (2): 9- 13.
- [ 30 ] 黄小平, 孙良新, 徐孝诚. 复合材料三维四向矩形编织物角柱结构的研究 [ J ] . 复合材料学报, 2001, 8 (4): 11- 16.
- [ 31 ] 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: 2383- 2391.
- [ 32 ] TANG Z X, POSTLE R. Mechanics of Three-dimensional Braided Structures for Composite Materials-part : Nonlinear Finite Element Deformation Analysis [ J ] . Composites Structures, 2001, 51: 451- 457.
- [ 33 ] 刘振国, 陆萌, 麦汉超. 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.
- [ 34 ] 刘振国, 陆萌, 麦汉超, 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.
- [ 35 ] 庞宝君, 曾涛, 杜善义. 三维多向编织复合材料有效弹性模量的细观计算力学分析 [ J ] . 计算力学学报, 2001, 18 (2): 231 - 234.
- [ 36 ] 冯森林, 吴长春, 孙慧玉. 三维均匀化方法预测编织复合材料等效弹性模量 [ J ] . 材料科学与工程, 2001, 19 (3): 34- 37.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50072019; 50172039)

收稿日期: 2003-06-26; 修订日期: 2003-11-10

作者简介: 张美忠 (1971-) 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事碳/碳复合材料力学性能及预制体结构研究, 联系地址: 西北工业大学超高温复合材料实验室 (710072)。