

文章编号: 1000-3851(2004)02-0001-07

三维编织复合材料力学行为研究进展

卢子兴¹, 杨振宇¹, 李仲平²

(1. 北京航空航天大学 固体力学研究所, 北京 100083; 2. 航天材料工艺研究所, 北京 100076)

摘要: 对三维编织复合材料的细观结构几何模型和力学性能的研究进展进行了综述。重点介绍近几年该领域的研究成果和作者的一些研究工作, 其中包括三维编织复合材料力学性能的实验研究和理论研究。在理论研究方面, 介绍了弹性应变能法、纤维倾斜模型、三细胞模型和有限元模型等工作。最后, 对未来的研究趋势进行了展望。

关键词: 编织复合材料; 力学性能; 几何模型; 模量; 强度

中图分类号: TB330.1 文献标识码: A

DEVELOPMENT OF INVESTIGATION INTO MECHANICAL BEHAVIOUR OF THREE DIMENSIONAL BRAIDED COMPOSITES

LU Zixing¹, YANG Zhenyu¹, LI Zhongping²

(1. Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Institute of Space Material Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: A review of studies on the mechanical properties and microscopic geometric models of three dimensional braided composites is given in this paper. The emphasis is placed on the recent developments of mechanical properties of three dimensional braided composites and author's works in this field, in which the experimental and theoretical investigations into three dimensional braided composites are included. In theoretical investigations, elastic strain energy method, fiber inclination model, three cells model and finite element model etc. are introduced. Some future investigating trends are also presented.

Key words: braided composites; mechanical properties; geometric models; modulus; strength

三维编织复合材料以整体编织预成型件作为增强材料, 不需缝合和机械加工, 具有明显的性能可设计性, 且具有良好的综合性能指标, 如较高的强度、刚度和较好的抗冲击性、耐烧蚀性等, 所以受到工程界的普遍关注, 成为航空、航天领域的重要结构材料, 并在交通、建筑领域及体育用品和医疗器械等方面得到了广泛应用^[1]。为了更好地开发和利用三维编织复合材料, 国内外在近 20 余年中对这类新型复合材料的细观结构与宏观力学性能之间的关系进行了研究和探索, 取得了一些突出的成就, 并逐渐发展成为力学和材料领域的一个热门研究方向。为使人们更加清楚地了解该领域的工作, 本文中将对三维多向编织复合材料的细观结构几何模型和力学性能的

研究进展进行简要综述, 重点介绍近几年的工作和作者的一些研究成果, 并对未来的研究趋势进行展望。

1 三维编织复合材料细观结构几何模型的研究

为了较准确地预测三维编织复合材料的宏观力学性能, 需要正确地描述其细观结构的几何特性, 了解材料中纤维束的走向、交织方式及其截面形状。自 20 世纪 80 年代以来, 人们对此进行了大量的研究, 建立了不同细观结构的三维编织复合材料的单元胞体模型。例如, Ko 和 Pastore^[2] 研究了三维编织物中的一段纤维束片段, 分析了其细观结构, 从而提出了

一种三维编织复合材料单元胞体的织物几何模型 (FGM)。Ma 和 Yang 等^[3]进一步提出将四步编织预成型复合材料的单元胞体结构看成是由三根相互正交的纱线和四根对角纱线所组成，并将基线和对角纱线在浸胶固化后看成是“复合材料杆”，针对这些纱线的相互作用建立了三维四步编织复合材料细观分析的模型。与此同时，Yang 等^[4]又提出了纤维倾斜模型 (Fiber Inclination Model)，其单元胞体同样由四根纤维束沿对角线方向镶嵌在长方体的基体中，并以层板理论为基础，不考虑间隙基体，将三维编织复合材料同一胞体中平行于相同对角线方向的纤维束视为单向层板。

进入 90 年代后，人们开始对三维编织复合材料的成型、编织程序、纤维在编织过程中的走向等进行了更加深入的研究，得到了更为完善、合理的编织复合材料细观模型。其中 Du 和 Ko^[5]介绍了四种不同的三维编织复合材料的编织方式，通过单元胞体的方法建立了三维编织的几何实体模型，给出了纤维编织角和纤维体积含量与关键编织参数间的关系。Wang 等^[6, 7]则详细分析了三维四步 1×1 编织过程，给出了纤维束在编织过程中的运行方式以及纤维束之间的相互关系，提出了用控制体的方法来表征纤维束的拓扑结构。Byun 和 Chou^[8]则全面地研究了三维二步和三维四步法编织复合材料的细观结构，分析了单元胞体的几何模型，确定了关键的编织参数、纤维束挤压的限制性几何条件和纤维的取向及体积含量等微结构特性。Soheil^[9]也研究了三维编织复合材料的细观结构，分别对内部、表面、角上的纤维结构进行了讨论，将内部的结构分为两种不同结构的组合，并对表面、角上的纤维结构的影响进行了分析。Pandey 和 Hahn^[10]则通过 CAD 建模来描述三维编织纤维复合材料的代表性单元体，生动地再现了复合材料的内部复杂结构。而 Sun 等^[11]进一步提出基于 CAD 的新颖建模方法，为有限元计算建立输入模型提供了一种手段。

在国内，吴德隆^[12]最早提出了以四步法为基础的三细胞模型，它包括可重复的基元、面元和柱元。陈利等^[13, 14]采用控制体积单元法和实验相结合的方法，根据编织运动规律，将预制件分为三个区域，识别了局部的单胞模型，同时考虑了编织纱线的填充因子，分析了编织工艺参数之间的关系。庞宝君等^[15]则以四向编织复合材料为对象，从几何上建立了材料单胞的组织结构模型，讨论了单胞的内部纤

维束在空间上的分布规律，并进行了细观上的实验验证。韩其睿等^[16]也根据三维四步法的编织工艺过程，建立了三维编织结构的单元体模型，考虑了纤维的宏观尺寸，并推导出相关参数之间的数学关系。李嘉禄等^[17]则研究了三维编织复合材料中纤维束横截面形状，这为真实模拟纤维束的特征提供了依据。梁军等^[18]、徐孝诚等^[19]和杨振宇等^[20]则对四步法 1×1 编织过程及编织结构进行了详细的几何学分析，进一步完善了吴德隆的三细胞模型。

总之，对三维编织复合材料细观结构及其几何模型的研究，经历了从单纯的“米”字型胞体到包括体元、面元、角元三类胞体的演变，改进后的模型更加真实地反映了三维编织复合材料的细观结构。

2 三维编织复合材料力学性能的研究进展

2.1 三维编织复合材料力学性能的实验研究

80 年代，Macander 等^[21]通过实验研究了树脂基多向编织纤维增强复合材料的力学性能。他们考虑了各种参量对复合材料力学性能的影响，其中包括编织模式、纱线粗细、边界条件等对拉伸、压缩、弯曲和层间剪切力学性能的影响。Ko^[22]为了验证三维编织复合材料力学性能的理论预测结果，对三维编织石墨/环氧树脂复合材料进行了拉伸实验。通过观察失效模式，发现三维编织复合材料的失效是由于近似垂直于加载方向失效面上的纤维断裂而引起的。Yau 等^[23]则对三维编织复合材料 I 型梁进行了四点弯曲和轴向压缩的实验，他们在弯曲实验中观察到在初始失效之前其应力与应变间呈线性关系。Surya 等^[24]实验研究了三维编织碳/环氧树脂复合材料的弹性模量和强度随纤维体积含量和编织角的变化规律。实验所用试件的材料参数为：纤维体积含量 20% ~ 45%，编织角 0° ~ 30°。他们将实验测得的模量与现有的平均应变和平均应力模型的预测结果进行了比较，结果表明：平均应变和平均应力的加权平均模型给出的结果最为接近实验数据。Shivakumar 等^[25]进一步研究了三维编织复合材料的压缩强度和失效机制。结果表明：压缩强度对轴向纱的错排非常敏感，而对偏轴纱却不太敏感。

除了三维编织复合材料的准静态实验研究外，近来也有一些对三维编织复合材料动态实验的报道。Majidi 和 Chou^[26]研究了三维编织和单向 FP/AL-Li 复合材料的冲击力学行为。实验所用三维编织复合材料和单向复合材料纤维的平均体积分数分

别为 17% 和 34%。他们采用落体冲击实验得到的实验结果表明: 在损伤产生和发展的过程中, 三维编织复合材料比单向复合材料可以吸收更多的能量和表现出更大的弯曲变形。唐国翌等^[27]通过光学显微镜和扫描电镜分析了三维编织复合材料的宏观和微观断裂形态, 结果表明: 其形态随加载率而变化, 当减小编织角时, 拉伸强度会有明显的提高, 断裂过程依赖于应力传递的方式。通过爆炸冲击实验, 他们发现三维编织复合材料具有很强的能量吸收能力和很高的损伤容限。破坏形态表明: 纤维之间的树脂上留有裂纹扩展的痕迹, 宏观裂纹的扩展路径主要是在编织纱线中和沿着纤维束界面的方向。

相对于国外, 国内的实验研究起步较晚, 直到 90 年代后期才出现大量的报道。李嘉禄等^[28]对三种不同编织结构的三维多向编织复合材料(有轴向增强和无轴向增强两种)的力学性能进行了实验研究, 主要讨论了材料的拉伸强度、刚度和弯曲强度、刚度性能。结果表明: 通过加入轴向非编织增强纤维, 使编织复合材料的拉伸强度和模量、弯曲强度和模量都有了较大的改善, 并且发现三维多向编织复合材料的应力-应变曲线呈双线性的特征。孙慧玉等^[29]通过实验测定了有切割边、无切割边和中央钻孔的三维编织复合材料试件的拉伸性能, 对比了受切割和未切割纤维对于试件侧边拉伸应变的影响, 并且简单讨论了拉伸失效的机理。通过实验发现, 受切割和钻孔试件的拉伸性能低于未做处理试件的性能, 受切割侧边试件的拉伸应变高于未切割侧边的拉伸应变。此外, 他们还对三维编织复合材料的孔边应力集中现象进行了讨论, 结果发现三维编织复合材料的孔边应力集中系数要比传统层板复合材料和金属材料的低。卢子兴等^[30, 31]分别针对三维四向和五向编织复合材料进行了拉伸实验和弯曲实验, 从宏观角度研究了它们的力学行为, 获得了这些材料的主要力学性能参数及变形、破坏规律, 还分析了轴向纤维的加入、纤维体积含量及纤维束的粗细对编织复合材料宏观力学性能的影响。此外, 还对拉伸试件断口和弯曲试件断口进行了扫描电镜分析, 从细观角度对编织复合材料的拉伸破坏机制和弯曲破坏机制进行了研究。最近, 卢子兴等^[32]又通过三维四向编织复合材料的宏观压缩实验, 研究了这类材料的抗压力学性能; 同时, 为认识这类材料的压缩失效机理, 对压缩试件的破坏断口进行了扫描电镜分析。实验结果表明: 纵向压缩模量比横向压缩模量大得多,

且影响纵向压缩力学性能的主要参数是材料的编织角; 随编织角的变化, 复合材料的纵向压缩破坏机理发生了变化; 编织角较小时, 材料表现为脆性特征, 当编织角大于某个角度, 材料的应力-应变曲线趋于非线性, 延性增加, 更多地表现为塑性破坏特征。此外, 横向压缩的破坏与纵向压缩的破坏机理明显不同。

在所有测定复合材料力学性能的简单应力实验中, 剪切实验是最困难的实验之一。庞宝君等^[33]设计了纯剪切实验所需要的夹具, 并验证了其有效性, 得到了三维四向碳/环氧编织复合材料剪切弹性模量的一些实验数据, 探讨了四向编织复合材料的剪切弹性模量随编织角的变化趋势。之后, 他们^[34]又对三维四向编织碳/环氧复合材料进行了拉伸和压缩实验, 得到了应力-应变曲线和压缩试件的表面云纹干涉图, 从断口照片分析了材料的破坏模式, 以及编织角对材料破坏模式的影响, 并且分析了循环加载、卸载的应力-应变曲线规律。此外, 杨红娜等^[35]研究了不同编织角的三维编织碳和铺层碳/环氧复合材料的压缩性能, 分析了不同结构复合材料的压缩破坏模式及机理。郑锡涛等^[36]通过单向拉伸试验和三点弯曲试验, 对相同编织角的三维四向和五向编织复合材料的拉伸模量和强度进行了比较, 两项性能都是后者更加优越。王波等^[37]也通过不同三维编织复合材料的拉伸和压缩实验, 得到了拉伸和压缩的失效规律以及两种材料的拉伸和压缩强度。

2.2 三维编织复合材料力学性能的理论研究

由于三维编织复合材料微观结构的复杂性, 使力学性能的理论预测工作变得十分困难。近些年来国内外的学者在理论研究上也取得了一定成果。下面简单介绍其中的一些代表性工作。

2.2.1 弹性应变能法

Ma 和 Yang 等^[3]以四步法编织复合材料为研究对象, 在纤维单元胞体结构概念和能量法的基础上, 提出了一种研究三维编织复合材料的方法——弹性应变能法。他们将单元细胞结构($P_a \times P_b \times P_c$)看成是由三根相互正交的纱线和四根对角纱线所组成(见图 1)。这些纱线的几何“交织”点为单细胞的中心点, 针对这些纱线的相互作用来建立分析模型。根据他们做出的假设, 可求出单胞内各复合材料杆在交织力作用下的拉伸、压缩及弯曲应变能, 然后根据卡氏定理, 可以导出其弹性模量和泊松比, 并用纤

维体积比和纤维束的取向函数来表示。

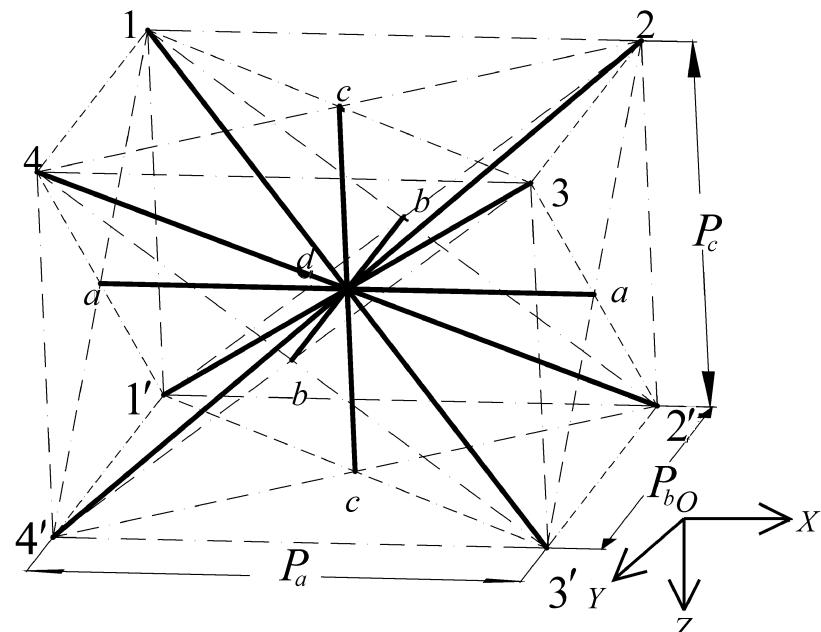


图 1 三维编织复合材料的单细胞结构

Fig. 1 The unit-cell model structure
of 3-D braided composites

2.2.2 纤维倾斜模型

Yang 等^[4]以经典的层板理论为基础, 提出了纤维倾斜模型。他们认为在单元胞体内纤维束沿长方体的 4 个对角线方向排列如图 2 所示, 在注入基体后形成一个薄的斜板, 4 个倾斜的单向薄板形成一个单元胞体如图 3 所示。对此模型, 他们做了如下假设:(1) 复合材料内纤维段均平行于矩形体胞单元的对角线方向, 加注基体后形成一个斜板; (2) 在一个斜板内的纤维束被认为是理想化的直线, 并且是单向的, 纤维在单胞边界处转向引起的弯曲和纤维束之间的相互作用忽略不计; (3) 图 3 所示的四向编织复合材料单胞看作是由四个单向斜板的集合组成的, 单向斜板之间的相互作用忽略不计。各斜板的方向由斜板内的纤维束方向唯一确定, 各斜板的厚度相同, 斜板纤维所占体积分数与整体材料纤维体积分数相同。

在此基础上, 利用经典层合板理论可以导出层合板的局部刚度矩阵为

$$\begin{aligned} & [A_{ij}(x), B_{ij}(x), D_{ij}(x)] \\ & = \sum_{m=1}^n h_m Q_{ij}([_T, [u] [1, z, z^2]] dz \quad (1) \end{aligned}$$

其中: Q_{ij} 为第 m 个单向斜板的刚度系数; ($h_m - h_{m-1}$) 为第 m 个斜板的厚度。对方程(1) 的局部刚度矩阵 $A_{ij}(x)$, $B_{ij}(x)$ 和 $D_{ij}(x)$ 求逆可得到层板的局部柔度矩阵 $A_{ij}(x)$, $B_{ij}(x)$ 和 $D_{ij}(x)$ 。在单元内取平均则得到单细胞的平均柔度矩阵: $A_{ij}(x)$, $B_{ij}(x)$ 和 $D_{ij}(x)$, 进而得到材料的弹性常数。

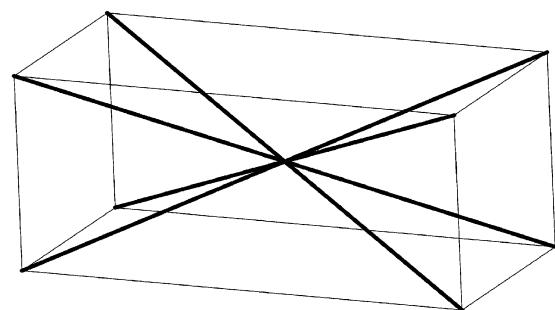


图 2 单元胞体模型

Fig. 2 Unit cell model

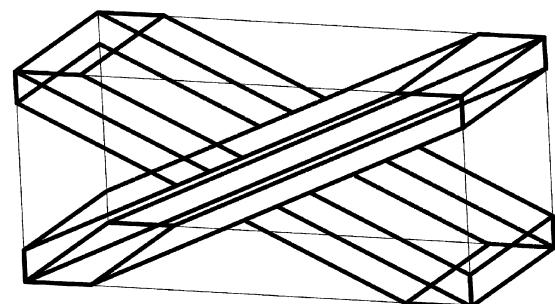


图 3 简化后的层板模型

Fig. 3 Laminate model after simplifying

2.2.3 三细胞模型

吴德隆^[12]以四步法编织五向复合材料为对象, 将复合材料看作由位于结构内部的基元、结构边界表面的面元和结构角点上的角元组成(见图 4)。分析中采用了如下假设: (1) 每个细胞中纺线都具有相同的横截面积; (2) 对每根纺线而言, 纤维体积含量相同, 故可以看作横观各向同性材料; (3) 每类细胞的体积含量等于它的细胞个数与纺线长度之积。根据这些假设可以得到编织复合材料的总刚度矩阵和总柔度矩阵为

$$\begin{aligned} [C] &= \sum_{i=1}^3 K_i [C]_i \quad (i = B, F, R(R)); \\ [S] &= [C]^{-1} \quad (2) \end{aligned}$$

式中: $K_i = V_i / V$; $V = \sum_{i=1}^3 V_i$ 。工程弹性常数可以从刚度矩阵或柔度矩阵中求出。

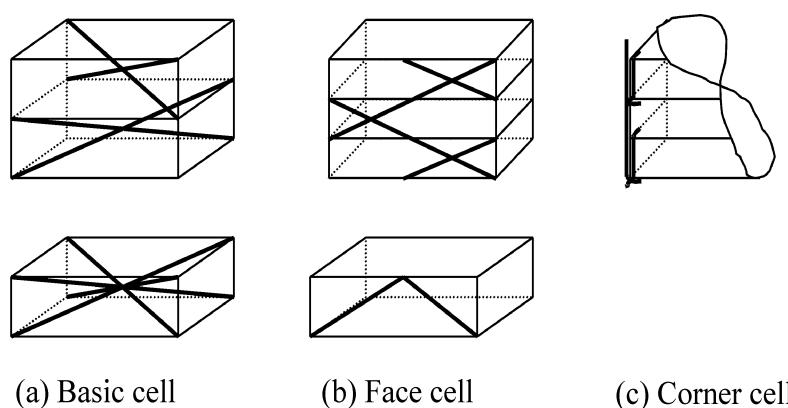


图 4 三细胞模型

Fig. 4 Three-cell model

2.2.4 有限元模型

随着对三维编织复合材料研究的不断深入, 计算机辅助的有限元分析手段也被引入到编织复合材料的性能研究中来。Lei 等^[38]建立了三维桁架结构的有限元胞体模型。他们通过计算机辅助几何建模来定义三维编织复合材料中纤维的空间几何结构。在有限元模型中, 用梁单元模拟纤维束, 而基体简化为杆单元。通过杆单元连接一组特定的纤维束, 限制它们之间的自由旋转和变形, 来体现与纤维间的相互作用。该有限元模型虽然在一定程度上反映了复合材料中纤维束的交织情况, 但对纤维束和基体的受力与变形方式以及它们之间的相互作用的处理过于简化。刘振国等^[39]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”字型体胞的有限元计算模型, 较为真实地模拟了该材料的细观结构。在此基础上, 讨论了相应的边界条件和约束条件并应用有限元方法计算了编织复合材料的纵向和横向弹性模量及泊松比, 计算结果与实验数据符合得较好。此外, 基于相同的计算模型, 他们^[40]还讨论了该材料在剪切变形中体胞的边界条件, 并对材料的剪切模量进行了数值预报, 描述了剪切模量随不同编织角和纤维体积含量的变化关系。陈利等^[13]基于变分原理, 提出用有限多相单元法来预测三维编织复合材料的有效弹性性能。Tang 等^[41~43]从三维编织复合材料的细观结构入手, 建立了纤维体积分量模型, 模拟了三维编织结构。在此基础上通过数值仿真和数学建模预测了三维编织复合材料的拉伸和剪切模量, 并采用一种非线性有限元法模拟分析了三维编织复合材料的变形, 与实验结果和其它现有模型的数据进行了比较, 得到了很好的支持。此外, 冯森林等^[44]提出用一种非协调位移有限元法并结合均匀化理论来研究三维四步压电编织复合材料的有效弹性性能。

应该说有限元法是一种很有效的研究方法, 但这依赖于计算模型的正确建立, 并且模型也要尽可能地模拟材料内部的真实结构。此外, 边界条件的确定也是一个十分重要的因素, 这将对最后的计算结果产生明显的影响。

2.2.5 三维编织复合材料的强度和损伤

由于三维编织复合材料具有不同于一般层板复合材料的复杂独特结构, 所以, 对其强度性能的研究就更加困难, 目前还没有很好地建立这种材料的强度失效准则。因此, 三维编织复合材料的强度预报仍

是国际上公认的难题。孙慧玉等^[45, 46]以“纤维倾斜模型”为基础, 得到了三维编织结构复合材料的有效弹性模量, 并采用蔡-胡多项式失效准则, 预测了三维编织复合材料的强度性能。但是, 编织复合材料正是为了克服层板复合材料易分层的缺点而引入的, 所以用层板理论来研究编织复合材料的强度, 其计算结果势必将削弱其性能。庞宝君等^[47]则针对三维多向编织复合材料, 在已建立的几何模型及材料有效弹性模量细观计算力学分析方法的基础上, 将 Murakami 几何损伤理论应用于纤维束的细观损伤分析中, 建立了三维多向编织复合材料非线性本构数值模拟及损伤分析的细观计算力学方法。此外, 卢子兴等^[48]在实验研究和有限元分析的基础上, 基于工程观点提出了一种经验性强度失效判据, 并且利用刚度预测的模型和有限元分析的结果, 进一步提出了强度预报的方法。

2.2.6 其它

梁军等^[49]通过采用细观力学的 Eshelby 和 Mori-Tanaka 理论对三维编织复合材料进行了细观分析, 然后与刚度平均化方法相结合, 对含圆币型基体微裂纹的三维编织复合材料弹性常数进行了理论预报, 分析了纤维体积含量、裂纹密度、编织特征对参数变化的影响。陈作荣^[50]分析了三维四步矩形编织过程纤维束的运动及其交织方式, 提出了三维四步矩形编织复合材料的一种代表性单元体, 即三维实体单元胞体几何模型。该模型考虑了纤维束在内部、边界及边角的不同交织方式, 保证了纤维束在整个编织过程中的连续性, 并且基于理想界面的均匀化等效方法分析了三维实体单元胞体几何模型, 研究了三维四步矩形编织复合材料的等效弹性性能与纤维体积比、编织角、纤维束横截面形状变化之间的关系。冯森林等^[51]基于参数渐近展开和摄动方法的均匀化理论与有限元方法的结合, 来数值模拟三维编织复合材料的弹性本构关系。此外, Pastore 和 Gowayed^[52]使用宏观力学和刚度平均技术, 将纤维的几何结构和增强复合材料的材料性能与总体刚度矩阵联系起来, 得到了自适应纤维几何模型, 通过与实验对比证明了其有效性。

3 结束语

综上所述, 人们对三维编织复合材料力学性能的实验研究还很不充分, 与材料制备工艺和材料使用过程有关的力学问题还远没有解决。例如, 在编织复合材料制备过程中实际纤维和基体界面间总会产

生缺陷,材料中也会存在气孔,它们对编织复合材料的力学性能的影响尚不清楚。另外,现有实验研究主要是关于静态力学性能的,很少考虑复杂加载和动态加载条件的影响,也没有考虑极端温度环境和时间因素的影响。因此,研究编织复合材料的蠕变问题、疲劳问题、脆韧性转变问题和动态失效及其本构关系等问题具有重要的学术价值和工程应用前景。此外,对三维编织复合材料强度性能的研究还有待于深化,需要找到一种更符合三维编织复合材料特性的强度预测方法。上述结果表明:有限元模型分析编织复合材料的等效弹性性能虽然是一种非常有效的数值分析方法,但如何给定合适的边界条件,使其能模拟代表性单元体的实际变形与受力,是需进一步深入研究的问题。特别是三维编织复合材料的非线性行为的研究比较困难,尽管已有工作涉及这一问题,但还不够深入,尚需做更多的工作。

参考文献:

- [1] 吴德隆,沈怀荣. 纺织结构复合材料的力学性能 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998.
- [2] Ko F K, Pastore C M. Structure and properties of integrated 3-D fabric for structural composites [A]. In: Vinson J R, Taya M, eds. Recent Advances in Composites in the United States and Japan [C]. Philadelphia: American Society for Testing Material, 1985. 428- 439.
- [3] Ma C L, Yang J M, Chou T W. Elastic stiffness of three-dimensional braided textile structural composites [A]. In: Whitney J M, ed. Composite Materials: Testing and Design [C]. Philadelphia: American Society for Testing Material, 1986. 404- 421.
- [4] Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three-dimensional textile structural composite [J]. Journal of Composite Materials, 1986, 20(5): 472- 484.
- [5] Du Guangwu, Ko F K. Unit cell geometry of 3-D braided structures [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12(7): 752- 768.
- [6] Wang Y Q, Wang A S D. Microstructure/ property relationships in three-dimensionally braided fiber composites [J]. Composites Science and Technology, 1995, 53: 213- 232.
- [7] Wang Y Q, Wang A S D. On the topological yarn structure of 3-D rectangular and tubular braided performs [J]. Composites Science and Technology, 1994, 51: 575- 586.
- [8] Byun J H, Chou T W. Process-microstructure relationships of 2-step and 4-step braided composites [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56: 235- 251.
- [9] Mohajerjashi S. More on the fiber architecture of 3-D braided composites [R]. AIAA- 97- 1404. New York: AIAA, 1997.
- [10] Pandev 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.
- [11] Sun W, Lin F, Hu X. Computer-aided design and modeling of composite unit cells [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61: 289- 299.
- [12] 吴德隆, 郝照平. 五向编织结构复合材料的分析模型 [J]. 宇航学报, 1993, (3): 13- 16.
- [13] 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.
- [14] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided performs [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59: 391- 404.
- [15] 庞宝君, 杜善义, 韩杰才. 三维四向编织复合材料微观组织及分析模型 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(3): 135- 139.
- [16] 韩其睿, 李嘉禄, 李学明. 复合材料三维编织结构的单元体模型 [J]. 复合材料学报, 1996, 13(3): 76- 80.
- [17] 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.
- [18] 梁 军, 陈晓峰, 庞宝君, 等. 多向编织复合材料的力学性能研究 [J]. 力学进展, 1999, 29(2): 197- 210.
- [19] 徐孝诚, 孙德海. 三维编织复合材料微观结构的几何学分析 [J]. 强度与环境, 1999, (2): 3743.
- [20] 杨振宇, 卢子兴. 三维四向编织复合材料弹性性能的理论预测 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 134- 141.
- [21] Macander A B, Crane R M, Camponeschi E T, et al. Fabrication and mechanical properties of multi-dimensionally (X-D) braided composite materials [A]. In: Whitney J M, ed. Composite Materials: Testing and Design (7th conf) [C]. Philadelphia: STP893, ASTM, 1986. 422- 443.
- [22] Ko F K. Tensile strength and modulus of a three-dimensional braid composite [A]. In: Whitney J M, ed. Composite Materials: Testing and Design [C]. Philadelphia: American Society for Testing Material, 1986. 392- 403.
- [23] Yau S S, Chou T W, Ko F K. Flexural and axial compressive failures of three-dimensionally braided composite -beams [J]. Composites, 1986, 17(3): 227- 232.
- [24] Surya R K, Abdell A. Longitudinal and transverse moduli and strengths of low angle 3-D braided composites [J]. Journal of Composite Materials, 1996, 30(8): 885- 905.
- [25] Shivakumar K N, Emehel T C, Avva V S, et al. Compression strength and failure mechanisms of 3-D textile composites [R]. AIAA- 95- 1159. New York: AIAA, 1995.
- [26] Majidi A P, Yang J M, Chou T W. Mechanical behavior of three dimensional braided metal-matrix composites [A]. In: Testing, Technology of Metal-Matrix Composites [C]. Philadelphia: ASTM, 1988. 31- 36.
- [27] Tang G Y, Yan Y J, Chen X H. Dynamic damage and fracture mechanism of three-dimensional braided carbon fiber/ epoxy resin composites [J]. Materials and Design, 2001, (22):

- 21- 25.
- [28] 李嘉禄, 肖丽华, 董孚允. 立体多向编织结构对复合材料性能的影响 [J]. 复合材料学报, 1996, 13(3): 71- 75.
- [29] 孙慧玉, 吴长春. 纺织结构复合材料力学性能的实验研究 [J]. 实验力学, 1997, 12(3): 335- 341.
- [30] 卢子兴, 寇长河, 冯志海, 等. 编织复合材料拉伸力学性能的研究 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(3): 129- 134.
- [31] 卢子兴, 刘振国, 寇长河, 等. 三维编织复合材料的弯曲实验及其失效分析 [A]. 见: 王玉林. 第十二届复合材料学术会议论文集 [C]. 天津: 天津大学出版社, 2002. 1070- 1073.
- [32] 卢子兴, 胡奇. 三维编织复合材料压缩力学性能的实验研究 [J]. 复合材料学报, 2003, 20(6): 67- 72.
- [33] 庞宝君, 杜善义, 严勇, 等. 三维四向碳/环氧编织复合材料剪切力学性能实验研究 [J]. 实验力学, 1999, 14(2): 209- 215.
- [34] 庞宝君, 杜善义, 韩杰才, 等. 三维四向编织碳/环氧复合材料实验研究 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(4): 136- 141.
- [35] 杨红娜, 李嘉禄, 黄航. 三维编织复合材料性能研究 [A]. 见: 王玉林. 第十二届复合材料学术会议论文集 [C]. 天津: 天津大学出版社, 2002. 1097- 1099.
- [36] 郑锡涛, 郭稳学, 盛国柱, 等. 三维编织复合材料力学性能试验研究 [A]. 见: 王玉林. 第十二届复合材料学术会议论文集 [C]. 天津: 天津大学出版社, 2002. 1108- 1111.
- [37] 王波, 矫桂琼, 陶亮, 等. 三维编织复合材料拉压性能的实验研究 [J]. 实验力学, 2002, 17(3): 302- 306.
- [38] Lei C, Cai Y J, Ko F K. Finite element analysis of 3-D braided composites [J]. Advances in Engineering Software, 1992, 14: 187- 194.
- [39] 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, 2(26): 182- 185.
- [40] 刘振国, 卢子兴, 陆萌. 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.
- [41] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials : Fabric structure and fiber volume fraction [J]. Composite Structures, 2000, 49: 451- 459.
- [42] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials : Predictions of the elastic moduli [J]. Composite Structures, 2001, 51: 451- 457.
- [43] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials : Nonlinear finite element deformation analysis [J]. Composite Structures, 2001, 51: 451- 457.
- [44] Feng M L, Wu C C. A study of three-dimensional four-step braided piezo-ceramic composites by the homogenization method [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61: 1899- 1898.
- [45] Sun H Y, Qiao X. Prediction of the mechanical properties of three dimensionally braided composites [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57: 623- 629.
- [46] 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.
- [47] 庞宝君, 杜善义, 韩杰才, 等. 三维多向编织复合材料非线性行为的细观数值模拟 [J]. 复合材料学报, 2000, 17(1): 98- 102.
- [48] 卢子兴, 刘振国, 麦汉超, 等. 三维编织复合材料强度的数值预报 [J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 563- 565.
- [49] 梁军, 杜善义, 韩杰才. 一种含特定微裂纹缺陷三维编织复合材料弹性常数预报方法 [J]. 复合材料学报, 1997, 14(1): 101- 107.
- [50] 陈作荣. 三维编织复合材料弹性性能及周期性 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
- [51] 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.
- [52] Pastore C M, Gowayed Y A. A self-consistent fabric geometry model: Modification and application of a fabric geometry model to predict the elastic properties of textile composites [J]. Journal of Composites Technology and Research, 1994, 16(1): 32- 36.