第 38 卷 第 4 期 力 学 进 展 Vol. 38 No. 4
2008 年 7 月 25 日 ADVANCES IN MECHANICS July 25, 2008

译 文

对二维编织复合材料弹性、热、强度及失效分析模型的评论*

Levent Onal Sabit Adanur

Department of Textile Engineering, Auburn University, 115 Textile Building, Auburn, AL 36849

摘 要 纺织结构作为聚合物复合材料的增强相在许多工业应用中变得非常重要, 例如在航海与航空领域中, 由于其刚度及强度与其重量的高比值而倍受欢迎. 由于工业及工程应用的需求, 研究纺织复合材料的弹性性质及失效行为变得非常重要. 这篇文章重点评论了关于二维编织复合材料弹性、热、强度及失效分析的数值及解析模型, 给出了主要的建模技术及方法. 同时也简单给出了编织复合材料从最初的一维模型到最近三维模型的发展. 本文的目的不是对所论模型的数学方法进行详细分析, 而是告知研究者关于先前工作的主要思想. 这篇评论总共引用了 122 篇文献.

关键词 二维编织复合材料, 纺织结构, 力学性能, 建模分析

1 引言

聚合物基复合材料对迎接未来工业设计中遇到的挑战, 提供了不可否认的希望. 纤维增强复合材料作为轻质结构复合材料被广泛的应用到汽车、航海、飞行器及土木工程. 其优异的力学特性及高效增强相材料的低造价、易操作的特性确保了其在工业领域的地位 [1~4]. 就结构设计而言, 纺织复合材料的特性表征非常重要. 然而复合材料的各向异性及非均匀性影响了对其力学性能的预测.

复合材料力学已广泛采用了连续介质力学方法及离散方法. 这些方法已经被用来研究和预测纤维/基体复合材料的力学行为 [5]. 先前研究者的工作正是为简化问题作了很多假设, 这些假设能使结构得以推广, 但得到的结果有点并不真实, 实验结果及理论预测之间存在明显差异. 相关的方法包括多种近似混合律、圆柱形及六边形模型, 以及单一边界法 [6]. 然而, 由于实验测试力学特性费财费力, 最终还是求助于建模或其它预测手段. 建模是一种花费适当、且非常有效的方法, 能够预测织物的重量、体积分数、编织结构、纱线的皱曲及组分的特性.

复合材料的研究经历了从单向复合材料到三维编织物增强复合材料的过程. 最早的研究起始于 20 世纪 60 年代. Shaffer[7] 的工作基于最理想的模型, 即整个材料层由树脂和纤维的矩形条带所充满. Hashin 及 Shtrickman[8] 运用变分法, 发展了一种求得复合弹性材料等效模量的上下限值的方法. 接着, Hashin 及 Rosen[9] 用变分法推导了纤维呈六角排列或随机排列的复合材料有效弹性模量上下限及其表达式. Chen 及 Cheng[10] 利用了无穷级数解, 例如 Fourier 方法及最小二乘法中的加权误差平方和, 研究了纤维六角排列的情况. Whitney[11] 考虑了纤丝的各向异性, 并假设它是以纤维丝轴为弹性对称轴的横观各向同性材料.

2 编织布

编织就是两种组分互相正交地交织在一起. 经线是平行编织布边的纱线系统, 纬线就是垂直

收稿日期: 2007-09-23, 修回日期: 2007-11-30

*Applied Mechanics Reviews 惠允版权翻译此文 (Published with kind permission from Applied Mechanics Reviews, Volume 60 © 2007 by ASME, http://www.asme.org) 关键词是译者注

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

于经线沿布料宽度方向的纱线 [12]. 在编织纤维结构中, 单位编织物内等效纱线直径及长度对于编织物建模非常重要. 平纹、斜纹及缎纹是复合材料中通常应用的 3 种基本编织法, 如图 1 所示. 平纹编织布是编织复合材料中最常用的基本且平衡的增强体. 斜纹编织具有比较松弛的交织, 编织物的特征是有对角斜线. 缎纹编织具有很好的悬垂性, 表面光滑且厚度最小 [13].

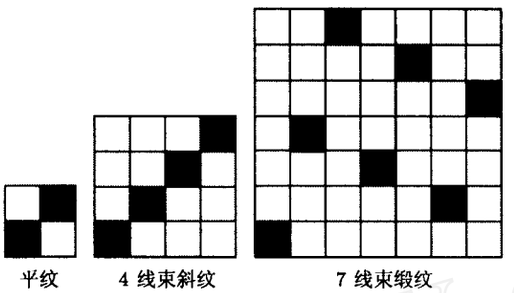


图 1　一些基本编织法的示意图

用作复合材料增强相的编织物可以分类为二维及三维结构. 在二维结构中, 织物的厚度相对于平面尺寸很小. 二维纤维编织物一般为各向异性, 面内剪切抗力较差, 由于组分交错点处纱线皱曲或呈波状, 织物的模量比纤维材料小的多 [14]. 在复合材料结构中, 等效热性能及热力学特性依赖于编织类型、组分材料的性质、纤维的体积分数 [15].

在三维编织物结构中, 平面外的特性与平面内的特性一样重要, 不能象二维结构中那样被忽略. 关于三维结构的建模研究不在该评论范围之内.

一般而言, 纤维编织物的力学特性依赖于编织参数, 如纱线尺寸、纱线间距、编织结构、及板层参数, 如铺叠顺序和铺设角度.

3　目标及方法

对于二维结构, 尤其是纤维编织复合材料, 人们公认, 由于其经线及纬线的存在, 比单向复合材料具有更好的稳定性. 这些组分在编织物平面内提供了平衡的特性. 这些优点使得编织纤维复合材料在设计应用中日益得到重视, 并引起对编织复合材料力学特性研究的注意. 主要建模方法从一开始就得到重视. 本文将按照弹性、热性能及强度/失效分析的顺序评论. 另外, 弹性分析分为解析方法和数值方法两个部分. 这篇评论目的是归纳编织纤维增强复合材料的研究进展, 为进一步改进建模向研究者提供背景信息.

4　模型评价

已经有很多不同的方法用来预测复合材料的力学特性. 在 20 世纪 60 年代, 应用了圣维南原理及与最小二乘法相关的不同方法 [7~10]. 基本层合板理论和数值方法, 尤其是有限元及有限差分法, 是建模中常用 3 种选择, 这些都能在文献中找到.

基本模型为编织布单层的弹性性质提供了简单预报. 每一个单层可以被建模为单向结构、直纤维束网络、弹性基础上的一系列弯曲梁, 以及均匀的各向异性材料 [16].

最近 20 年, 更多的计算机相容的技术被用来预测复合材料的力学特性. 有限元方法因其灵活的计算能力, 吸引了更多的注意. 对于一个受约束的弹性或非弹性固体, 它是得到其应力应变关系最普遍的工具. 有限元方法很容易用于几乎所有层次组分形成的固体结构. 计算机的能力可以克服基体的复杂性, 所以很容易产生三维模型. 有限元法用于纺织品增强复合材料的最标准步骤为: (1) 根据体胞定义纺织复合材料的结构, 并利用有限元分析体胞; (2) 根据体胞重新组合整个几何形状以便预测力学性能.

主要建立在数学理论上的均质法, 在研究复合材料的细观结构时非常有用. 均匀化求解一般包含两个部分. 均质部分代表具有相对均匀的周期性非均质材料, 第 2 部分代表由于局部非规则引起的干扰. 在 Lene 及 Leguillon[17], Lene[18], 及 Jonsson[19] 应用的均质理论方法中, 对于具有周期性细观结构的复合材料来说, 控制其力学特性的体胞的建模, 需通过两个长度上的场变量渐近展开来创立. Babuska[20] 及 Benssaussen 等人 [21] 发表了均质法的基本原则. 均质模型可以建立在解析及数值方法基础上; 增强相、基体和最终编织复合材料的弹性性质之间的关系可以通过一种解析方法很容易建模. 另外一些均质化概念可以根据层合板理论和能量法通过数值方法得到 [22,23]. Cox 及 Flanagan[24] 在一篇关于用于编织复合材料的解析方法评论中描述了能量方法的基本知识. 还有几位研究者一直致力于应用解析方法模拟编织布的波纹度 [25~27]、面内和离面的特性 [23,24]. 一些学者利用有限元将解析模型融于计算软件. 那

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

些模型使得实际结构设计及断裂损伤研究成为可能 [28,29].

数学的均匀化来自于偏微分方程组 [20,30~34]. 这个方法的基础是引进一个描述细观结构的特性参数; 由于材料中的周期性并非是必然的, 运用非线性问题的求解方法是可行的, 这个方法也可应用到非线性问题中.

5 弹性性质的分析

5.1 解析方法

解析方法预测编织复合材料性质起源于 20 世纪 70 年代. Halpin 等人 [35] 采用了层板类比法预测了二维及三维复合材料的弹性刚度. 编织物单层的体胞中的经线及纬线被模拟为角铺设薄层板, 由它铺叠形成平衡、对称的层合板. 对编织布复合材料单层板的理论结果在定性程度上是正确的.

Ishikawa 及 Chou[26] 拓展了编织复合材料的解析模型框架, 他们利用层合板理论来确定编织布增强复合材料的力学特性; 就基本编织结构平面性质的 3 种不同假设, 提出了 3 个分析模型, 分别为马赛克模型 [3,26,36], 纤维波形形状模型 [3,37], 及桥联模型 [37]. 马赛克模型将编织布复合材料处理成非对称的正交铺层层合板的组合 (如图 2 所示). 无论正交铺层的单片是否在等应变或等应力条件下, 总能预测到马赛克模型刚度的取值范围. 这是一个一维模型, 忽略了编织线的连续性及组合时对应力的干扰. 等应变条件依赖于板层中面内常应变状态假设, 而等应力条件则认为中面上是常应力状态. 经典的板层理论的应用在此模型中具有重要价值. 复合材料的横向尺寸必须远小于平面内的尺寸. 并联模型给出刚度常数的上限, 而串联模型给出其下限.

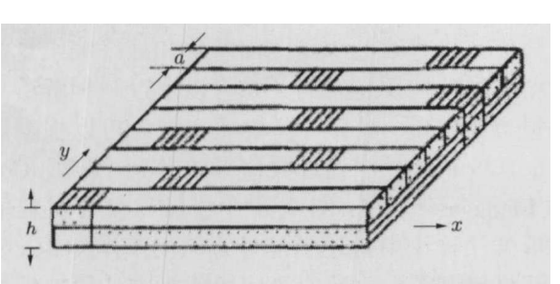


图 2 一个 8 线束缎纹的马赛克模型示意图 [26]

在马赛克模型中没有考虑的纤维连续性在纤维波状模型中得到了考虑. 但在这个模型中仍然没有考虑结构内横向载荷的影响. 串联模型的另一种方法是, 对编织布复合材料纱线束方向条带的弹性和弯褶行为的模拟; 体胞模型 (如图 3 所示) 将结构理想化为 3 个部分: 直线正交区, 波状正交区和纯基体区域. 尽管纤维波状模型是比马赛克模型前进一步, 但仍然只适用于直线区域. 经典层板理论在纤维波状区中, 适用于线束方向条带内每个无限小薄片. 纤维波状模型主要适用于平纹编织结构. 作者认为对于编织布单层, 存在拉伸及弯曲的耦合. 若允许弯曲的存在, 可以求得刚度的下限, 而上限必须要求曲率为零时才能得到. 这与 Whitcomb 等人 [38] 利用有限元方法的结论一致. 这就证实了纤维波状模型 [39] 一定程度上与卷曲纤维理论相似 [40].

为了克服马赛克模型及纤维波状模型中的缺点, 提出了桥联模型, 这种模型特别适用于缎纹编织, 因为存在非交织区. 交织区可分割成几个区域. 图 4 给出了桥联模型的概念, 其中体胞确定为六面体形状. 体胞包含一个交织区域及周围的区域. 模型中的 4 个区域包括直纬线区和可视为正交层合板的层片区. 第 5 个区域为含有波状纬线的交织结构. 这个模型是马赛克模型与波状模型按不同方法的组合, 彼此分开成为一个二维模型. 然而, 它只考虑了经线方向的波状及纱线的连续性. 文献 [37] 曾经提到: 波状模型比桥联模型能更好的表征平纹编织结构, 因为平纹编织里几乎没有直纤束存在. 用以上 3 个解析模型得到的纤维复合材料的弹性模量在文献 [41] 中分别与实验结果进行了比较.

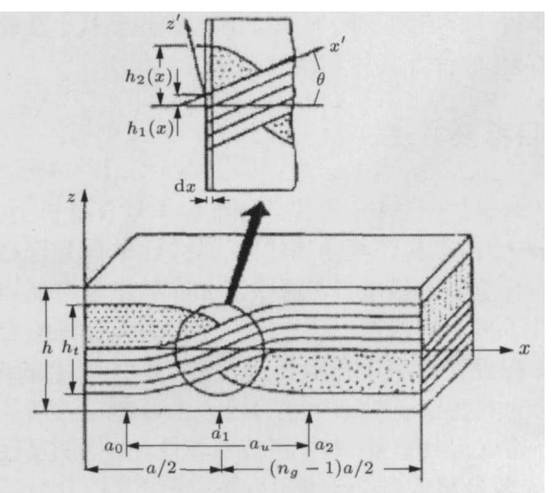


图 3 纤维波状模型示意图 [26]

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

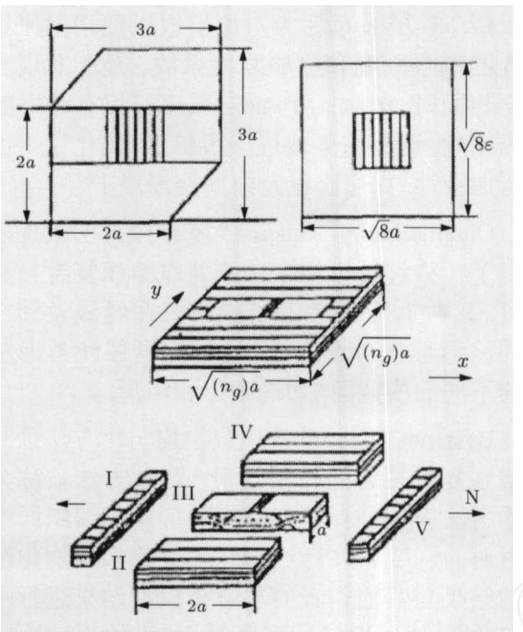


图 4　桥联模型示意图 [37]

Naik 及 Shembekar[42~44] 为二维平纹编织结构提出了一种皱褶模型，它是 Ishikama 及 Chou 的一维模型 [3,26,36,37] 的拓展. 他们的工作分为 3 个部分发表. 第 1 部分给出了平纹编织布单层片的分析，在分析中考虑了不同的参数，例如纱线粗度、纱线波状长度、纱线在经纬方向上的连续性、纱线真实的横截面形状，以及相邻纱线的间距等. 该模型的体胞由 5 个单独的部分组成，如图 5 所示. 有两种方法将离散的部分组装起来：串联 - 并联模型及并联 - 串联模型. 并将这些模型得到的弹性常数预测结果进行了相互比较. 第 2 部分给出了编织布层合板复合材料的弹性分析，主要考虑了不同的铺层顺序，发现铺层顺序可影响弹性性质. 应用适当的纱线波状形和板层厚度，编织布板层的整体纤维体积分数与正交层合板的情况非常接近. 第 3 部分讲述了受单向拉伸载荷作用的、两个方向正交的平纹编织布复合材料的层合板设计；研究了相邻纱线间距及不同单层数的铺层顺序对编织层合板弹性常数的影响，发现组分之间最优间隙依赖于纤维编织结构及材料系统.

作为文献 [42,44] 的进一步发展，Naik 及 Ganesh[45] 考虑了组分主方向上纱线的波形形状及连续性，并考虑了相邻纱线束间隙，经向和纬向纱线的不同材料，以及包括横截面形状在内的纱线的几何性质. 提出了两种 “精细化模型”：切片列阵模型及单元列阵模型. 从这些理想化的模型中可以得到纤维体积分数及弹性常数. 文献 [46, 47] 将纤维看成横观各向同性体，其性能可用复合圆柱体组合模型计算. 将体胞分成几个切片进行分析，这些切片是真实的褶皱部分的理想化形式，真实区域被转化成包含基体的 4 层层合板. 为了克服切片列阵模型的局限性，例如当离轴角较大会造成结果失配，提出了单元列阵模型. 在这种模型中，体胞被分为无限小厚度的 3 个单元，而不是切片列阵模型中的 4 个单元. 因为存在局部偏轴角，经线及纬线的弹性常数要进行转换. 报导认为，精细化模型的结果与实验结果吻合很好.

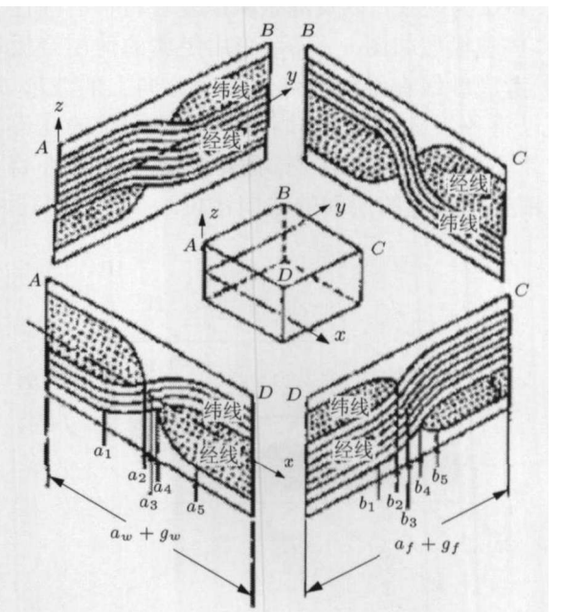


图 5　平纹编织单层板的单胞图，沿 x 与 y 轴进行了次分割 [42]

Jortner[48] 对碳/碳平纹编织复合材料提出了一种简单的模型，计算由于层片间嵌入产生的刚度改变. 在这个模型中，4 层布中几个基本铺层顺序的理想化处理，用正弦线代替表纱线. 将这些正弦线分为数个单元，通过体积加权刚度平均方法，得到等效弹性性质. 这个方法的缺点是理想化纤维结构过于简单化，限制了对局部效应，如纱线束横截面形状的研究，从而不能为强度分析提供足够的信息.

作为编织复合材料热弹性分析工作 [49] 的进一步发展，Naik[50] 发现皱曲角度随着间距相同时的纱线尺寸、纱线捆绑密度及整个纤维体积分数的增加而增大. 而纱线尺寸对平面轴向的剪切模量及泊松比似乎没有影响.

Falzon 等人 [51] 利用经典层合板理论，借助层

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

合技术建立了一个分析材料密实问题的方法. 虽然该模型的基础是 Ishikawa 及 Chou[3,26,36] 的纤维波状模型, 却应用于经线及纬线两个方向, 这与 Naik 及 Shembekar[42,43] 的方法有些相似, 却忽略了单层间的嵌入. 该分析仅仅对曲褶角小于 20° 时有效. 由该模型产生的数值结果分别与实验结果及其它解析方法的结果进行了比较.

Scida 等人 [52] 提出了一种称作 MESOTEX 的细观力学模型, 它与 Ganesh 及 Naik 的模型 [53,55] 相似, 并且采用混杂原理将该模型扩展到其它编织复合材料. 该模型的目的是预测无混杂编织 (平纹, 斜纹与缎纹), 以及混杂编织复合材料的弹性行为, 体胞模型如图 6 所示. 应用经典的薄层合板理论, 考虑纱线在经线及纬线两个方向上的波形, 就可以将各组分材料 (树脂, 经纱和纬纱) 的几何参数及力学参数一并考虑, 而不致疏于考虑在将几层铺叠时出现的层间的横向错位.

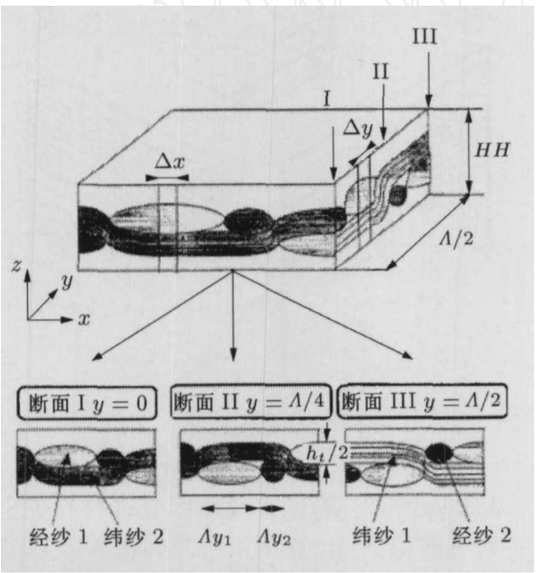


图 6 一个 2/2 线束斜纹编织物的体胞, 它沿 y 轴分割成 3 个子断面 [52]

Vandeurzen 等人在两篇文献中进行了三维编织复合材料的细观力学分析 [13,56]. 对编织物进行了几何分析 [13] 后, 作者利用细观力学与离散方法确定均匀化刚度参数 [56]. 构建了一个复杂体胞单元的新几何概念, 它包括由 108 个矩形宏观体胞组成的体胞库, 用此体胞单元预测了最重要的复合材料性能. 每一个宏观单元细分为细观单元. 基于宏观及细观单元的数学描述进行了弹性分析. 新模型能够精确地预测刚度矩阵及剪切模量.

Stewart 等人 [57] 研究了玻璃/碳缎纹布层间混杂编织复合材料平面内的性质. 他们首先研究了单层混杂缎纹编织板层的力学特性, 然后拓展到板层. 板层被考虑为对称层板以便消除刚度矩阵内的偶合刚度和弯曲刚度系数. 最终发现当各板层相同时, 0°/45°/0° 铺层顺序层板有最好的平面内刚度. 这些结果被进一步扩展, 优化了平面内及弯曲特性, 如层合板及中间层厚度 [58].

Chaphalkar 和 Kelkar[59] 基于经典的板层理论提出了一种解析模型来预测斜纹编织复合材料的刚度, 这种新方法考虑了纱线束在经线及纬线方向的波形形状与连续性, 这种模型还能考虑纱线束的不同的横截面, 如椭圆形和矩形.

Bystrom 等人 [30] 应用数学均匀化方法预测纤维增强复合材料的弹性性质. 这种方法被称为多次均匀法. 作者将均匀法修改, 应用到编织纤维复合材料的刚度矩阵 [31] 计算中, 并将多次均匀法得到的结果与其他作者的半解析模型结果进行了比较 [28,54]. 通过比较, 预测了纱线束的弹性性质及编织复合材料的宏观弹性性质. 关于半解析模型与多次均匀法得到的结果差异也有相应的报导.

Hoftsee 等人 [60] 在他们 3 篇文章的第 1 部分给出了平纹编织纤维的几何描述, 在成形过程中, 编织布已经受了平面内剪切变形. 接着给出了相对简单的几何分析, 并考虑了在拉伸、压缩下纤维的强化效应. 作者利用这些几何关系结合编织布的动态垂挂行为模拟, 来确定垂挂变形状态下布料的织构, 以确定受剪变形下的局部刚度矩阵 [61]. 最后, 进行了实验验证, 对含有剪切变形的试样, 在纱线束和偏斜方向上进行测量, 将预测结果与测量结果进行了比较 [62].

在层合板复合材料结构的优化设计中, 确定纤维取向是一个重要的问题. Grediac 在文 [63] 中对多层薄编织复合材料的刚度进行优化设计. 在设计过程中考虑了平面内弯曲及耦合的弹性性质. 从优化程序中, 得到了优化力学特性所必需的铺层顺序.

Reissner 混合变分原理是预测纤维复合材料应力场的一种解析方法. Roy 及 Sinh[64,65] 将这种方法应用到编织布复合材料. 第 1 部分给出了结构几何分析的数学公式. 在一个代表性体积单元中 (如图 7 所示) 分析了体胞经线及纬线方向的应力分布. 由此方法得到的结果进一步得到了有限元结果的证实. 根据比较, 剪切应力的连续性只是通过罚函数法得到. 然而, 子区域内的应力并不连续, 那里厚度很小.

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

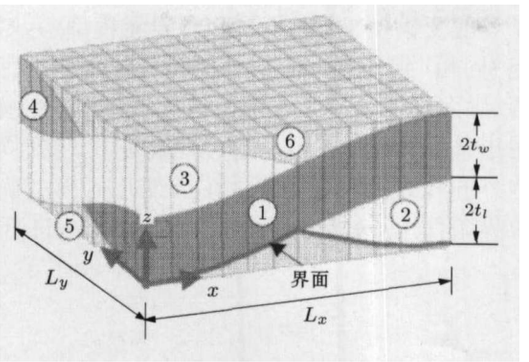


图 7 具有 6 个子区域的平纹编织复合材料代表性体元 [65]

5.2 数值方法

因为利用解析方法预测纺织复合材料的弹性常数时, 求解一些复杂的方程存在一定的困难, 数值方法得到了应用. 在数值方法中, 广泛采用有限元方法来分析纺织品增强复合材料. Zhang 及 Harding[66] 采用有限元方法结合应变能等效原理, 对平纹编织单板层弹性常数进行了细观力学分析. 对平纹布, 纤维波状模型仅用于一个方向. 数值与实验结果的对比显示纤维波状模型能够扩展到二维情况.

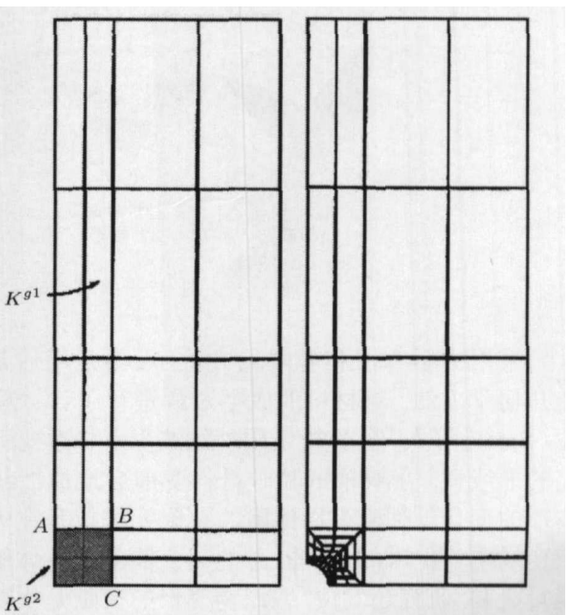
Whitcomb[67] 对整体及局部有限元分析发展了一种迭代代数方法. 该文描述的分析形式利用了具有适当的边界条件的整体及局部网格 (如图 8 所示), 但由于整体及局部模型刚度矩阵的差异, 此模型存在一定的局限性.

Foye[68] 提出了一种体胞连续模型, 在有限元解中考虑了一种虚位移的概念. 有限元由非均匀六面体单元组成. 虽然该方法成功地减少了单元的数量, 但非均匀解存在一定的局限性. 另外, 该模型需要很高的计算机存储及很长的计算时间.

对有限元方法预测编织复合材料力学特性的适用性, Woo 及 Whitcomb[69] 进行了研究. 然后将他们的二维模型拓展到三维模型 [70]. 宏观单元通过细化为更小的区域来计算刚度矩阵. 节点位移当作体胞次模型的边界条件. 尽管节省了大量计算, 整体与局部区域边界上仍然存在差异.

Chapman 及 Whitcomb[71] 利用常用的有限元方法研究了平纹编织复合材料体胞内的应力分布. 在适当的周期性边界条件下, 他们通过分析一个很小的几何断面探讨了体胞的对称性. 提出了两种方法确定纤维束内材料取向, 通过收敛性研究确定单元的个数. 图 9 给出了收敛性研究中所用的网格. 尽管利用了修正的 Tsai Hill 准则, 失效应力的预测并没有显式地给出.

Whitcomb 等人 [38] 利用有限元方法对编织纤维复合材料进行了数值研究, 结论是上限值较为合理, 对于多层板情况, 理想对称层合板的问题则非常精确. 这个发现与 Ishikawa 及 Chou[37] 的结果非常一致. Whitcomb 等人的另一个发现是, 当考虑 8 层或更多层时, 刚度将随层数的增加而增加.



(a) 包含两种不同有限元网格的整体 / 局部分析板材模型

(b) 局部精细化的整体模型 [67]

图 8[67]

当纤维的刚度与复合材料的刚度存在很大的差异时, 应用体胞连续模型 (UCCM) 会出现数学上的不稳定性 [68]. 为解决这个缺点引起的精确性问题, Gowayed 等人 [72] 利用他们的编织物几何模型 [73] 结合均匀化方法对 UCCM 模型进行了修正. 该编织物几何模型在有限元解的框架下, 在次单元层次上均匀化了材料. 因此修正的体胞连续模型与编织物几何模型相结合, 确保了对复杂的编织物性能的精确描述. 修正方法的结果与 5 线束缎纹编织及三维正交编织材料的实验结果进行了比较, 然而, 只有平面内性质的预测结果与实验结果得到很好的吻合.

Glaessgen 等人 [74] 利用 I-DEAS 几何有限元

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

建模软件, 对承载后纺织复合材料应力 - 应变状态的分析方法进行了评估, 该方法为理解平纹编织复合材料的位移、应变、应力及失效参数提供了物理基础. 但是他们没有将结果与他人模型结果进行比较.

为了研究平纹编织复合材料在平面内受拉伸荷载时的弹性性质和应力分布, Ito 和 Chou[75] 提出了等应变模型、挠曲模型和有限元模型, 并对从体胞 (同相) 到任意相的层合板的各种织构进行了分析, 进而构建了一个二维几何模型. 等应变模型应用于体胞, 随后应用板层模型将它扩展到同相体胞外和任意相的层合板. 在二维几何模型确定的边界条件下, 对其分析结果用有限元法进行了评估.

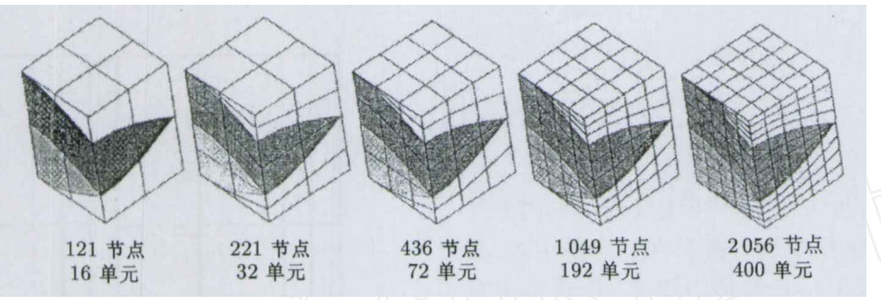


图 9 平纹编织复合材料体胞的有限元网格 [71]

采用力学方法和有限元方法, 而不是用通常的几何学方法, 对材料的成型过程进行了计算模拟. Boisse 等人 [76] 分析了因纱线波形形状改变引起的非线性, 在双轴试验时材料变形会造成纱线波形的变化. 对编织物体胞的有限元模拟是在大应变场中 (图 10) 进行的, 总的畸变能就是各体胞能量之和. 研究还发现, 编织物变形的贡献是次要的, 而纱线波形改变的影响才是主要的.

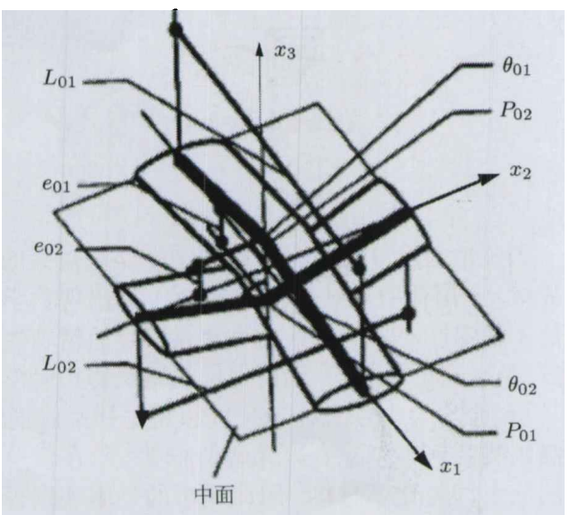


图 10 编织物体胞有限元模拟的 1/4 基本网格模型 [76]

为了预测编织物体胞的线弹性性质, Tan 等人 [77] 提出了一种多尺度三维模型方法, 该方法对理论分析和有限元分析都非常有用; 这种模型包括宏观胞元块体, 又将其分为一些细观胞元块体, 他们对平纹编织材料, 斜纹编织材料和缎纹编织材料分别定义了这种宏观和细观块体, 这种方法对分析纯拉伸和剪切响应是有效的. 这个建模方法的可用性, 针对每个单一编织方式, 应用理论和有限元法进行了证实. 并且各结果间有较好的相关性.

Tan 等人 [78] 比较了分别从试验和数值方法中得到的碳/环氧编织复合材料的弹性常数, 他们针对弹性常数和失效强度提出了两种模型, 一种是针对弹性常数的三维有限元模型, 该模型是正弦纱线模型, 图 11 给出了该模型体胞的三维有限元分析网格; 另一种是称作正弦梁模型的失效强度解析模型. 研究的结果表明失效强度和纤维体积分数紧密相关, 材料的力学性质与材料整体纤维体积分数相关. 作者用有限元法仅仅分析了单个体胞的几何性质, 并未用有限元法确定材料的失效行为.

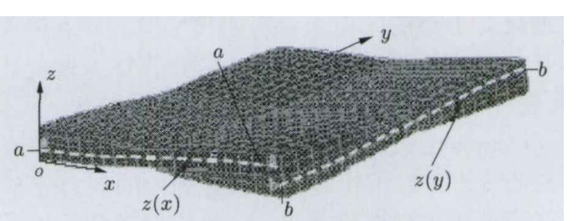


图 11 平纹编织体胞的三维有限元网格 (模型中去除了基体)[78]

整体/局部混合方法对研究复杂结构的应力分布是一种非常有效的方法. 这个方法可用来检

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

验次结构、混合技术以及确切的范围. Haryadi 等人 [79] 用这种方法计算了带微小裂纹的简支复合材料板的静态响应, 利用 Ritz 方法以及整体观点计算了结构的响应, 将局部方法用于裂纹附近的离散为有限元网格的小区域.

Tabiei 和 Jiang[80] 提出了一个简单的模型, 这种模型是界面上有非线性单元的编织材料的二维模型的延伸; 对具有非线性应力 - 应变关系的编织材料, 开发了一个细观复合材料模型, 并借助 ABAQUS 程序进行了非线性有限元结构分析. 为了得到有效的应力 - 应变关系, 将代表性的体胞分解为许多子体胞, 并假设每个子体胞内的应力是均匀分布的 (图 12). 数值模拟还包含了剪切的非线性, 但这个观点并未被试验所证实.

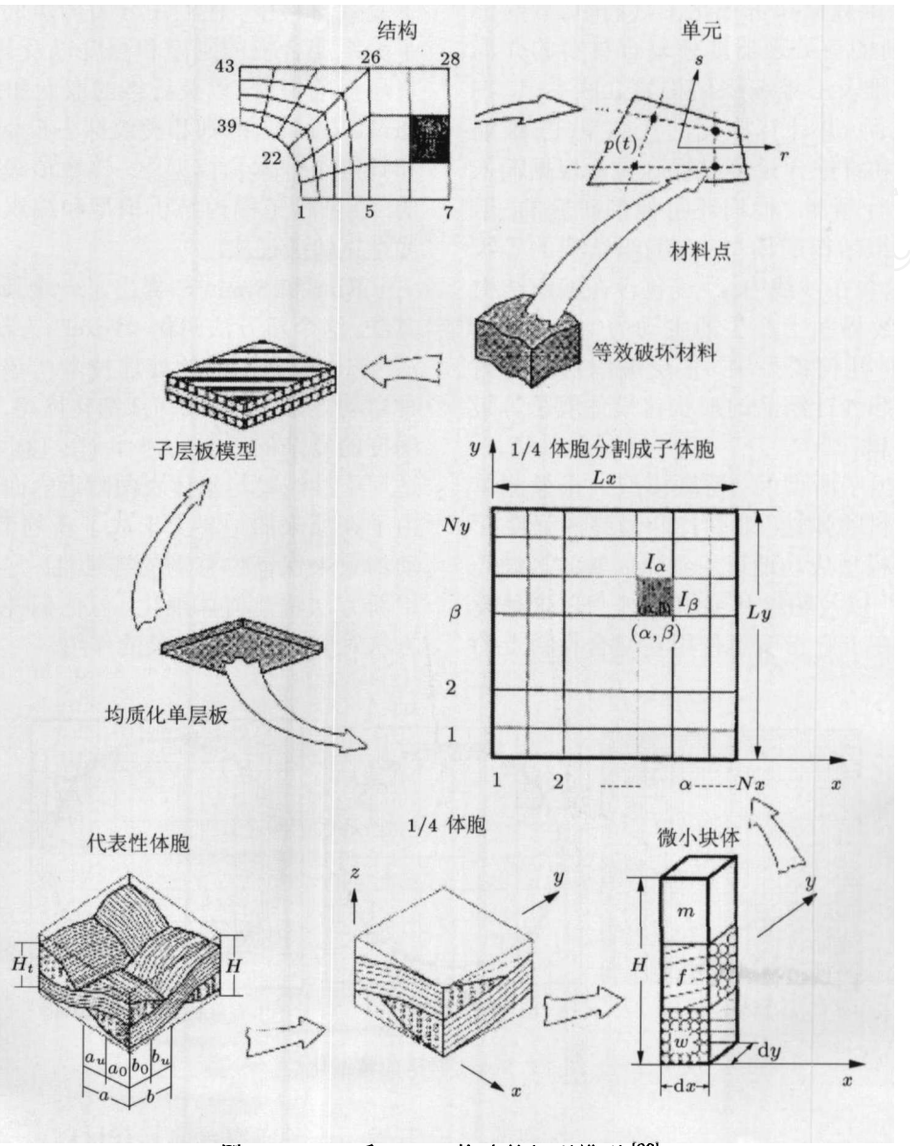


图 12　Tabiei 和 Jiang 构建的细观模型 [80]

Jiang 等人 [81] 运用均匀化方法建立了对平纹编织复合材料进行局部/整体分析的本构方程组, 并从一种较新颖的细观力学方法中得到了编织复合材料的有效工程常数. 将平纹编织复合材料中的代表性体胞分割为许多更微小的子胞群, 得到了每个子体胞的应力 - 应变关系. 因此, 根据平均应变能够得到整体的平均应力. 为了工程常数的需要, 数值结果可从整体的平均应力中得到, 并将这个数值结果与其他的数值结果进行了比较.

Mehrabadi 和 Cowin[82] 研究了线性胡克定律的各向异性形式, 发现每个弹性对称体的特征张量的最大数目是 6 个. Bejan 和 Patresu[83] 用 Bor-

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

land C3.1 语言计算了这种弹性张量的分量, 应用开尔文公式的张量形式得到了刚度矩阵或柔度矩阵的特征值和特征向量, 这种方法被用于平纹编织的单层板.

Lomov 等人 [84] 开发了一个描述二维和三维纤维编织材料内部几何结构的数学模型, 此模型被用来作为体胞几何的前处理器, 以利用最小能量原理建立复合材料介观力学模型. CETKA-KUL 软件使纤维数据和可视化工具简单, 并易于操作; 编织材料的前处理器能使复合材料的介观力学模型和二维及三维编织结构建立联系, 以刻画胞元的横截面, 并计算胞元的孔隙率. 三维编织材料的厚度和纤维含量可以很容易地根据输入的纱线数据进行预测. 他们还将他们研究的, 用于文 [85] 的针织结构的模型. 在编织结构的等级顺序中, 纤维包含在纱线中, 纱线包含在编织结构中. 在相邻纱线界面上产生的主动力 (压力和弯矩) 包含在这种几何模型中. 多层编织材料的内部几何模型和纬纱针织品的形状建模体现了等级顺序的一般思想.

Huang 提出了所谓的 "桥联模型" 来预测单向编织复合材料的弹性, 非弹性和最终的强度行为 [86~88], 这种模型成功地运用到无曲皱的多轴经线针织结构 [89] 以及纺织和编织材料 [90]; 这种模型的引人之处在于它指明了作用在复合材料上的总载荷和在纤维/基体组分材料上产生的应力之间的明确关系. 纱线的椭圆型横截面和网状纱线的正弦波形被组合到几何模型中, 来描述存在或不存在纱线间隙的编织材料; 若所有的力都作用在同一平面内, Huang 提出的细观力学模型 (桥联模型) 就无须重复迭代.

Carvelli 和 Poggi[91] 用三维有限元模型, 将周期性材料的均匀化理论运用到单向复合材料和编织复合材料中; 他们用分为两步的数值模型预测了编织层合板的刚度和强度以及其他的性质, 如单层板的厚度, 以及纤维的取向和纤维体积分数. Druker-Prager 准则和裂纹抹去模型被应用于基体和纤维组分本构模型中; 该数值模型已被文献中的, 在弹性范围内解析模型和编织复合材料的非线性试验所证实.

Kim 和 Swan[92] 提出了一个新的三维有限元方法, 这个新方法叫作 "Voxel" 方法, 即三维像素法, 它来源于图像的处理技术. 该方法提供了一种自动方法, 来生成局部细化网格, 用以描述高精确度的复杂的三维几何体 (图 13); 这种方法尤其适用于纱线股与基体表面附近六面体单元的细化. 由于在原来的边界上形成了新的节点, 必须运用动约束来保证位移场的连续性; 尽管作者建议使用新方法将几何体细化, 但他们并未论及这种新方法对应力 - 应变结果的作用.

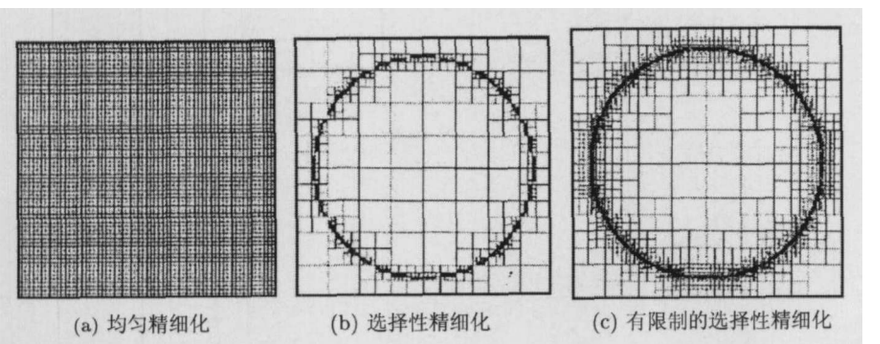


图 13 Voxel 网格的精细化

6 热分析

Rayleigh[93] 和 Maxwell[94] 是最早从事多向材料热传导率研究的两个人. Springer 和 Tsai[95] 最早研究了编织复合材料. 1967 年, Springer 和 Tsai 介绍了一种研究单向复合材料的热传导率的模型; 在这种复合材料中, 纤维以正方形和六边形的序列排列. 1981 年, Han 和 Costner[96] 用有限差分法开发了一种研究单向复合材料和层合板复合材料的模型. Ishikawa 和 Chou 使用他们以前的解析模型 [26,36,37] 验证了平纹编织材料和缎纹编织材料平面内的热膨胀和热弯曲系数 [97].

Kabelka[98] 提出了一种方法来评估平纹编织复合材料的弹性和热力学性能, 在他的二维模型中, 用正弦函数表示经线和纬线方向的波形形状, 但他并未考虑纱线股的实际横截面形状. 一旦经

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

线和纬线的弯曲性质在常应力条件下得以评估，那么经典的板层理论就可以用来估计材料整体的性质.

Naik 和 Ganesh 预测了 3 种理想化的层板的热膨胀系数[99]，预测的解析结果证实了试验值. 作者分析了平纹编织材料层合板中织物几何形状的效应，并解释了织物几何参数对编织复合材料层合板的热弹性行为的重要性.

Naik 和 Ganesh[49] 运用封闭的解析法研究了二维正交平纹编织层板的热弹性性质；在分析中，考虑了纱线的皱曲、经线和纬线的连续性、纱线的实际横截面形状和编织几何、纤维体积分数和相邻纱线间可能的空隙等因素，应用具有串联方式的单元列阵模型得到了研究结果[45].

Sankar 和 Marrey[100] 用体胞的有限元分析法研究了薄纺织复合材料板和梁的应力梯度效应，他们计算了模型的弯曲刚度和热膨胀系数，并且指出梁/板的刚度和热属性不可能从材料的等效热弹性常数和梁/板的厚度预测.

Gowayed 等人[101] 开发了一种模型来预测二维和三维编织复合材料在稳定热传导条件下的热传导系数，编织结构的几何特性用有限元法进行了分析. 图 14 显示了长方体单元的细观层次的均匀化. 所谓的图解积分数值分析法 (GINA) 是一种计算机算法，在研究中被用来做理论分析，理论结果已被试验证实. 作者在更进一步的研究中，研究了纤维类型和纤维体积分数对平纹编织和三维编织复合材料的热传导率的影响[102].

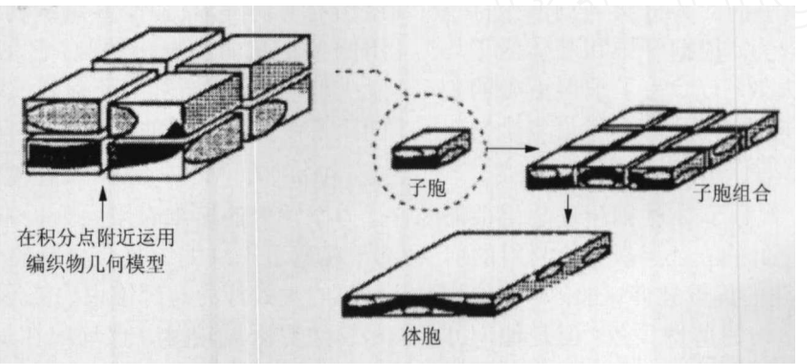


图 14　采用刚度平均化方法的六面体单元的细观层次的均匀化[101]

Dasgupta 等人[103] 用有限元和热阻网络对周期性体胞进行力学分析，得到了平纹编织纤维增强复合材料层板的有效热属性和热力学性能. 文章的开始中有一个对二尺度渐近均匀化方案的评论，并将它运用到理论研究中. 为确定材料的一组完整的正交性能参数，用三维有限元分析法为体胞定义了一个合适的边界条件；研究发现在层合板的热传导性能中树脂的传导率是主要的成分.

和 Naik 和 Ganesh[53~55] 的方法有差别，Sankar 和 Murrey 为性质优越的增强相材料提出了选择平均法[104]，使用更真实的等应变和等应力假设解决了存在的问题；该方法能够预测纺织复合材料的等效三维弹性常数和有效热膨胀系数. 每一个体胞可沿边界分成许多薄片 (介观尺度)，每一个薄片又被进一步分成单元 (细观尺度). 在等应力和等应变条件下，从均匀介质中可得到刚度系数；作为一种不同的方法，用选择平均法，而不是用连续的刚度性能参数，如杨氏模量，剪切模量等，来计算板结构的刚度性能 (文献 [105] 中定义的 $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{D}$ 矩阵). 虽然对基于有限元的细观力学法和解析法进行了比较，然而，当这些模型应用于非弹性变形时仍存在着较大的局限性.

7　强度/失效分析

Ishikawa 和 Chou 用最大应变失效准则来确定编织复合材料的最初失效点[37]，他们在研究中忽略了失效区域附近的复杂的应力、应变场.

由作用在单向层合板上的剪力引起的非线性引起了早期研究者们的注意[106~109]. Ishikawa 和 Chou[110] 研究了编织复合材料的非线性行为. 在这种方法中考虑了 3 种非线性类型，它们分别是纬线的剪切变形、纯基体区的拉伸变形和经纱区的横向裂纹. 用纤维波状模型和桥联模型来分析织物复合材料的非线性弹性性质，研究发现，纬线的剪切变形比纯基体区的拉伸变形对复合材料的非线性性质有更重要的作用. 在桥联模型的运用中，

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

几何重复长度对膝状应力和应变有逐渐重要的作用.

Karayaka 和 Kurath[28] 用均匀化模型分析了纺织物复合材料的弹性性能和失效行为; 这种方法直接用于确定复合材料纤维交织区的三维应力. 三维体胞是由理想的子胞群聚集而成. 代表性体胞被认为是均匀化的单向复合材料和交错复合材料的组合体, 这种组合体由平面基体区, 联同面内的与纤维交错区组成; 在这种模型中考虑了不规则错位的织物层, 特别是, 这种方法在实际运用中给出了精确的结果.

Dow 和 Rammath[111] 用有限元法开发了一个强度分析模型, 并假设基体和纤维先、后失效. 他们认为在基体失效后, 基体对复合材料强度的贡献大大的降低. 纱线中的应力分解为局部坐标下的纤维应力和基体应力. 根据纤维和基体的平均应力预测了材料的失效行为. 为了求得正确的判断, 对于强度分析和应力分布, 应当考虑复合材料中裂纹和纱线束粘结的作用.

Naik 和 Ganesh 预测了 3 种铺层理想层板的剪切模量 [112], 为了更好的表征层板复合材料的剪力, 他们建议做带斜角的偏轴拉伸试验. 尽管他们预测了给定的编织结构的剪切失效, 但是他们并未研究纤维结构改变效应对失效强度与失效顺序的影响.

Ganesh 和 Naik[53,55] 分 3 部分研究了受单向拉伸荷载作用的平纹编织复合层板的失效行为. 第 1 部分是定义了二维正交平纹编织层板的几何模型的数学表达式, 应用几何模型开发了预测热应力行为的解析模型, 在这个模型中考虑了纱线束的实际横截面形状、相邻纱线束间可能存在的空隙、纱线束的波形形状以及经线和纬线的连续性. 第 2 部分集中研究解析模型, 来预测二维正交平纹编织材料层板在单轴静拉力作用下的应力 - 应变发展, 直到材料最终失效的历史, 包括所有的中间阶段, 如经线横向失效, 纬线的横向剪切失效和纯基体块的失效. 为预测应力 - 应变行为考虑了材料和几何的非线性, 预测结果与试验结果有很好的相关性. 第 3 部分研究了织物几何形状效应对二维正交平纹编织复合层板失效行为的影响. Ganesh 和 Naik 提出的解析模型对多向增强复合材料同样有效.

Naik 扩展了文献 [49,112] 中的方法, 来预测平纹编织复合材料的压缩强度 [113], 这种模型依赖于对弯曲梁/拱的分析. 根据对编织复合材料不同失效模态的评价, 经线的剪切失效或由弯曲应力引起的压缩失效继续到层合板的最终失效.

Kurashiki 等人 [114] 用有限元分析对 Naik 和 Shembekar[44] 分析的情况进行了研究, 他们评价了平纹编织复合材料的应力 - 应变响应, 考虑了损伤的发展, 并计及编织材料中层间的相移位存在与否. 作者的研究结论是, 由层间相移位引起的杨氏模量的改变是很小的. 这个结论和 Naik 和 Shembekar 的研究与 Woo 和 Whitcomb[115] 的研究有差异, Woo 和 Whitcomb 报告, 由于两层之间的这个相移位, 杨氏模量从 23 GPa 增加到 29 GPa.

一般而言, 几何模型描述编织结构的无变形状态, 这里, 在复合材料压模中编织布处于面内剪切变形状态. McBride 和 Chen[116] 通过考虑编织结构的剪切变形, 对平纹编织物进行了建模研究. 用四条正弦曲线表示体胞, 它允许结构在屈曲前发生剪切变形. 研究中还提到, 纱线的高度和纱线间距不受剪切变形的水平的影响.

Woo 和 Whitcomb[70] 在对编织复合材料进行力学评价的三维有限元分析中还包含了失效分析; 观察了平纹编织复合材料的失效行为. 结论是材料的失效行为与纤维束的波形度有密切的关系. 尽管边界区域较薄并仅局限在最外层, 但内部的应力水平仍比自由表面附近的应力要高.

Vandeurzen 等人扩展了他们的细观力学分析方法来模拟应力场 [117], 新的细观力学模型可以很好的解释编织物的几何形状、纱线间的相互作用和基体的分布. 随后制定了用包含多级分解方案的过程和多步均匀化过程的路线图, 来得到编织复合材料直接了当的应力分析模型. 此方法联合修改的 Tsai ~ Hill 失效准则预测了初始破坏, 并且根据破坏的子胞刚度衰减法预测了损伤的影响 [118]. 作为参数分析结果, 作者得出结论, 这种方法对编织物的几何形状很敏感.

Ito 和 Chou 用有限元模型对在平面内受拉伸荷载作用的平纹编织复合材料的弹性性能和应力分布进行了研究. 对复合材料单层板来说, 拉/弯耦合效应是重要的; 等应变模型用来预测平纹编织复合材料的杨氏模量和应力分布, 等应变模型的铺层构型示于图 15; 提出弯曲模型用来评估纱线的局部弯曲效应. 作者将他们的二维几何模型扩展为三维, 并且用它分析了平纹编织结构, 以便得到一个较新的失效力学机理 [119]. 他们应用了最大应力理论. 用等应变模型来预测在各种层叠顺序下的弹性

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

性能, 应力分布和强度. 作者还指出了波形比对复合材料拉伸行为的重要性. 他们分析的不足之处在于不能分析复合编织材料的失效模态.

Scida 等人 [120] 提出了一个预测编织复合材料在拉伸荷载下的失效强度的模型. 他们通过计算变换的刚度矩阵重新定义了以前的刚度模型.

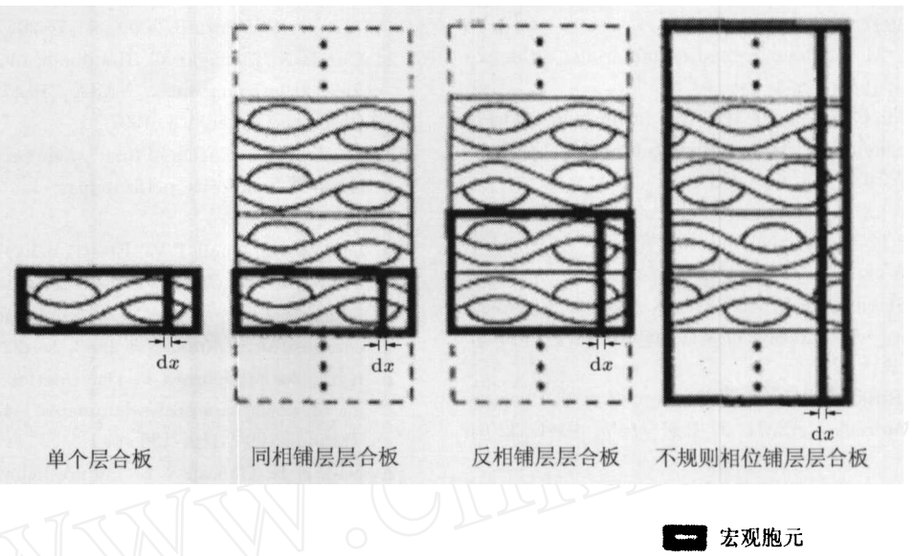


图 15　单层板铺层构型: 同相铺层层合板和不规则相位铺层层合板材料 [119]

Hoftsee 等人除了进行弹性分析外, 还试验观测了纱线束方向的最终拉伸强度, 研究发现剪切变形的存在对强度分析没有太大影响 [121].

Naik 等人 [122] 开发了一个解析模型, 来分析受正轴向单轴荷载下平纹编织增强环氧树脂复合材料的压缩行为; 该模型考虑了经线、纬线和基体的分布对压缩行为的影响, 将弹性基础上曲梁的模型用于这个分析. 作者计算了整个复合材料上的应力状态, 并研究了受面内压缩荷载时的失效机理. 但是, 这种解析模型仅仅是针对具有理想直线排列的和桥联构型的平纹编织复合材料所建立的, 将理论值和试验结果做了比较, 发现试验结果比理论值高些.

8 结束语

编织复合材料在高级复合材料技术领域的实际应用越来越广泛, 用解析法和数值法来预测编织复合材料的力学性质是一种低成本且有效的方法, 这种方法研究者们已研究了 30 多年. 结构的复杂性使得用解析法对编织复合材料的结构建模很困难. 因此, 使用象有限元方法的数值方法来对诸如弹性、热、强度和失效等各种情况进行分析. 一般而言, 每一种建模都从定义体胞开始, 用解析法数学地描述体胞的性质.

与仅用来描述专门的编织类型的解析法不同, 数值方法 (尤其是有限元法) 可以较容易地被用于不同的几何体; 用于预测复合材料力学性质的各种模型, 因它们所得解的精确性的不同而有差异. 单个模型的规范总是对复合材料力学的某一特性是强有力的. 该文的评论试图为理解模型的性质提供一个有用的工具, 并为评价纺织复合材料力学发展提供一个编年史.

尽管采用更现实的方式为分析纺织复合材料作出了各种努力, 但在试验值和预测值之间仍存在着差异. 今后研究的总趋势倾向于以计算机为基础的有限元法和解析模型的方法, 来提供更精确、更合理的结果; 对分析变形后增强相所作的努力正得到更好的近似解. 因此, 有必要改进当前的近似解, 使之提高到更可靠的水平.

致谢: 作者感谢 NSF 专项及 Auburn 大学运输重点项目对本工作的支持, 同时感谢 Peter Schwartz 博士对工作的录入.

参考文献

1 Kaw A K. Mechanics of Composite Materials. Boca Raton: CRC, FL, 1997

2 Smith L W, Swanson S R. Micromechanics parameters controlling the strength of braided composites. *Compos Sci Technol*, 1995, 54: 177~184

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

3 Ishikawa T, Chou T W. One dimensional micromechanical analysis of woven fabric composites. *AIAA J*, 1983, 21: 1714~1721

4 Schwartz M M. Composite Materials-Properties, Nondestructive Testing and Repair. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1997

5 Chamis C C. Mechanics of composite materials. *J Compos Technol Res*, 1989, 11: 3~14

6 Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three dimensional textile structural composites. *Compos Sci Technol*, 1986, 20: 472~483

7 Shaffer B W. Stress-strain relations of reinforced plastic parallel and normal to their internal filaments. *AIAA J*, 1964, 2: 348

8 Hashin Z, Shtrickman S. Note on a variational approach to the theory of composite elastic materials. *J Franklin Inst*, 1961, 271: 336

9 Hashin Z, Rosen B W. The elastic moduli of fiber reinforced materials. *ASME J Appl Mech*, 1964, 32(6): 223~232

10 Chen C H, Cheng S. Mechanical properties of fiber reinforced composites. *J Compos Mater*, 1967, 1: 30~41

11 Whitney J M. Elastic moduli of unidirectional composites with anisotropic filaments. *J Compos Mater*, 1967, 1: 188~193

12 Adanur S. Handbook of Weaving, Technomic, Lancaster, PA, 2001

13 Vandeurzen P H, Ivens J, Verpoest I. A three dimensional micromechanical, analysis of woven fabric composites: i. geometric analysis. *Compos Sci Technol*, 1996, 56: 1304~1315

14 Adanur S. Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles. Technomic, Lancaster, PA, 1995

15 Dasgupta A, Agarwal R K, Bhandarkar S M. Three- dimensional modeling of woven fabric composites for effective thermomechanical and thermal properties. *Compos Sci Technol*, 1996, 56: 209~223

16 Raju I S, Foye R L, Avva V S. A review of the analytical methods for fabric and textile composites. In: Proceedings of the Indo-US Workshop on Composites for Aerospace Application: Part 1 Bangalore, 1990. 129~159

17 Lene F, Leguillon D. Homogenized constitutive law for a partially cohesive composite material. *Int J Solids Struct*, 1982, 18: 443~458

18 Lene F. Damage constitutive relations for composite materials. *Eng Fract Mech*, 1986, 25: 713~728

19 Jansson S. Homogenized nonlinear constitutive properties and local stress concentrations for composites with periodic internal structure. *Int J Solids Struct*, 1992, 29: 2181~2200

20 Babuska I. Homogenization and its Application, Mathematical and Computational Problems. In: Numerical Solutions of Partial Differential Equations, III. New York: Academic, 1976. 89

21 Benssaussen A, Lion J L, Papanicaulau G. Asymptotic Analysis for Periodic Structures. North Holland: Amsterdam, 1978

22 Tabiei A, Jiang Y. Woven fabric composite material with material nonlinearity for nonlinear finite element simulation. *Int J Solids Struct*, 1999, 36: 2757~2771

23 Bystrom J, Jekabsons N, Varna J. An Evaluation of different models of elastic properties of woven composites. *Composites, Part B*, 2000, 31: 7~20

24 Cox B N, Flanagan G. Handbook of analytical methods for textile composites. NASA CR 4570, NASA Langley Research Center, VA, 1997

25 Liu D, Xu L. Effects of fiber waviness and bonding conditions on composite performance. In: ICCM 10, Vol. IV, 1997. 277~283

26 Ishikawa T, Chou T W. Elastic behavior of woven hybrid composites. *J Compos Mater*, 1982, 16: 2~19

27 Ishikawa T, Chou T W. Thermoplastic analysis of hybrid composites. *J Mater Sci*, 1983, 18: 2260~2268

28 Karayaka M, Kurath P. Deformation and failure behavior of woven composite laminates. *ASME J Eng Mater Technol*, 1994, 119: 136~142

29 Naik N K, Ganesh V K. Failure behavior of plane weave fabric laminates under on-axis uniaxial tensile loading-analytical predictions. *J Compos Mater*, 1996, 30: 1776~1821

30 Bystrom J, Jekabsons N, Persson L E, Varna J. Using reiterated homogenization of stiffness computation of woven composites. In: Proceedings of ICCE/5, Las Vegas, NV, 1998. 133~134

31 Dasgupta A, Bhandarkar S M. Effective thermomechanical behavior of plain weave fabric-reinforced composites using homogenization theory. *ASME J Eng Mater Technol*, 1994, 116: 99~115

32 Braides A, Defranceschi A. Homogenization of Multiple Integrals. Oxford: Oxford University Press, 1998

33 Jikov V V, Kozlov S M, Oleinik O A. Homogenization of Differential Operators and Integral Functions. Berlin: Springer, 1994

34 Persson L E, Persson L, Svanstedt N, Wyller J. The Homogenization Method: An Introduction. Studentlitteratur, Lund, Sweden, 1993

35 Halpin J C, Jerine K, Whitney J M. The laminate analogy for 2- and 3-dimensional composites. *J Compos Mater*, 1971, 5: 36~49

36 Ishikawa T. Anti-symmetric elastic properties of composite plates of sateen weave cloth. National Aerospace Lab, Tokyo, Report No. NAL-TR-649T, 1981

37 Ishikawa T, Chou T W. Stiffness and strength behavior of woven fabric composites. *J Mater Sci*, 1982, 17: 3211~3220

38 Whitcomb J, Kondagunta G, Woo K. Boundary effects in woven composites. *J Compos Mater*, 1995, 29: 507~524

39 Bogdanovic A E, Pastore C M. Material smart analysis of textile reinforced structures. *Compos Sci Technol*, 1996, 56: 291~309

40 Roze A V, Zhigun I G. Three dimensionally reinforced woven materials: 2. Experimental study. *Polymer Mechanics*, 1970, 6(2): 311~318

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

41 Ishikawa T, Matsushima M, Hayashi Y. Experimental confirmation of the theory of elastic moduli of fabric composites. *J Mater Sci*, 1985, 19: 443~458

42 Naik N K, Shembekar P S. Elastic behavior of woven fabric composites i —— lamina analysis. *J Compos Mater*, 1992, 26: 2196~2225

43 Naik N K, Shembekar P S. Elastic behavior of woven fabric composites ii —— laminate analysis. *J Compos Mater*, 1992, 26: 2226~2246

44 Naik N K, Shembekar P S. Elastic behavior of woven fabric composites iii —— laminate design. *J Compos Mater*, 1992, 26: 2522~2541

45 Naik N K, Ganesh V K. Prediction of on-axis elastic properties of plain weave fabric composites. *Compos Sci Technol*, 1992, 45: 135~152

46 Hashin Z. Theory of fiber reinforced materials. NASA-CR-1974, 1972

47 Hashin Z. Analysis of composite materials —— A survey. *ASME J Appl Mech*, 1983, 50: 481~505

48 Jortner J. Fabric nesting and some effects on constitutive behavior of plain-weave cloth-reinforced laminates. In: Proceedings of the 6th Japan/US Conference on Composite Materials, 1993, 464~473

49 Naik N K, Ganesh V K. An Analytical method for plain weave fabric composites. *Composites*, 1995, 26: 281~287

50 Naik N K. Analysis of Woven and Braided Fabric Reinforced Composites, Composite Materials: Testing and Design. In: Deo R B, Saff C R, eds. ASTM STP 1274, 1996. 239~263

51 Falzon P J, Herzberg I, Karbhari V M. Effects of compaction on the stiffness and strength of plain weave fabric rtm composites. *J Compos Mater*, 1996, 30: 1210~1247

52 Scida D, Aboura Z, Benzegagh M L, Bocherens E. Prediction of elastic behavior of hybrid and non-hybrid woven composites. *Compos Sci Technol*, 1997, 57: 1727~1740

53 Ganesh V K, Naik N K. Failure behavior of plainweave fabric laminates under on-axis uniaxial tensile loading: I —— laminate geometry. *J Compos Mater*, 1996, 30: 1748~1778

54 Ganesh V K, Naik N K. Failure behavior of plain weave fabric laminates under on-axis uniaxial tensile loading: II —— analytical predictions. *J Compos Mater*, 1996, 30: 1779~1822

55 Ganesh V K, Naik N K. Failure behavior of plainweave fabric laminates under on-axis uniaxial tensile loading: IIII —— effect of fabric geometry. *J Compos Mater*, 1996, 30: 1822~1856

56 Vandeurzen P, Ivens J, Verpoest I. A three dimensional micromechanical analysis of woven fabric composites: ii. Elastic analysis. *Compos Sci Technol*, 1996, 56: 1317~1327

57 Stewart R W, Verijenko V E, Adali S. Analysis of the in-plane properties of hybrid glass/carbon woven fabric composites. *Compos Struct*, 1997, 39: 319~328

58 Stewart R W, Verijenko V E, Adali S. Optimization of inplane and bending properties of woven fabric laminate configurations. In: Proceedings of ICCM, Australia, 1997-07-14~18. Gold Coast, 1997

59 Chaphalkar P, Kelkar A D. Classical laminate theory model for twill weave fabric composites. *Composites, Part A*, 2001, 32: 1281~1289

60 Hoftsee J, de Boer H, van Keulen F. Elastic stiffness analysis of a thermoformed plain weave fabric composite, part i: Geometry. *Compos Sci Technol*, 2000, 60: 1041~1053

61 Hoftsee J, de Boer H, van Keulen F. Elastic stiffness analysis of a thermoformed plain weave fabric composite, part ii: Analytical models. *Compos Sci Technol*, 2000, 60: 1249~1261

62 Hoftsee J, de Boer H, van Keulen F. Elastic stiffness analysis of a thermoformed plain weave fabric composite, part iii: Experimental verification. *Compos Sci Technol*, 2002, 62: 401~418

63 Grediac M. On the stiffness design of thin woven composites. *Compos Struct*, 2001, 51: 245~255

64 Roy A K, Sinh S. Development of a three-dimensional mixed variational model for woven composites. i. Mathematical formulation. *Int J Solids Struct*, 2001, 38(34-35): 5935~5947

65 Sinh S, Roy A K. Development of a three-dimensional mixed variational model for woven composites. II. Numerical solution and validation. *Int J Solids Struct*, 2001, 38(34-35): 5949~5962

66 Zhang Y C, Harding J. A numerical micromechanics analysis of the mechanical properties of a plain weave composites. *Comput Struct*, 1990, 36: 839~844

67 Whitcomb J D. Iterative global/local finite element analysis. *Comput Struct*, 1991, 40(4): 1027~1031

68 Foye R L. Fiber Tex '90'. In: Buckley J, ed, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, May, 1992. 45~53

69 Woo K, Whitcomb J D. Global/local finite element analysis for textile composites. *J Compos Mater*, 1994, 28: 1305~1321

70 Woo K, Whitcomb J D. Three dimensional failure analysis of plain weave textile composites using a global/local finite element method. *J Compos Mater*, 1996, 30: 984~1003

71 Chapman C, Whitcomb J D. Effect of assumed tow architecture, on predicted moduli and stresses in plain weave composites. *J Compos Mater*, 1995, 29: 2134~2159

72 Gowayed Y A, Pastore C, Howarth C S. Modification and application of a unit-cell continuum model to predict the elastic properties of textile composites. *Composites, Part A*, 1996, 27: 149~155

73 Pastore C, 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 Compos Technol Res*, 1994, 16: 32~36

74 Glaessgen E H, Pastore C M, Griffin O H, Birger A. Geometrical and finite element modeling of textile composites. *Composites, Part B*, 1996, 27: 43~50

75 Ito M, Chou T W. Elastic moduli and stress field of plain weave composites under tensile loading. *Compos Sci Technol*, 1997, 57: 787~800

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

76 Boisse P, Borr M, Buet K, Cherouat A. Finite element simulations of textile composite forming including the biaxial fabric behavior. *Composites, Part B*, 1997, 28: 453~464

77 Tan P, Tong L, Steven G P. A three-dimensional modeling technique for predicting the linear elastic property of opened-packing woven fabric unit cells. *Comput Struct*, 1997, 38: 261~271

78 Tan P, Tong L, Steven G P. Micromechanic models for the elastic constants and failure strengths of plain weave composites. *Comput Struct*, 1999, 47: 797~804

79 Haryadi S G, Kapania R K, Haftka R T. Global/local analysis of composite plates with cracks. *Composites, Part B*, 1998, 29: 271~276

80 Tabiei A, Jiang Y. Woven fabric composite material with material nonlinearity for nonlinear finite element simulation. *Int J Solids Struct*, 1999, 36: 2757~2771

81 Jiang Y, Tabiei A, Simitses G J. A novel micromechanics-based approach to the derivation of constitutive equations for local global analysis of a plain weave fabric composite. *Compos Sci Technol*, 2000, 60: 1825~1833

82 Mehrabadi M M, Cowin S C. Eigentensors of linear anisotropic elastic materials. *Q J Mech Appl Math*, 1990, 43: 15~41

83 Bejan L, Patresu V F. Eigensensitives for anisotropic materials with woven composite applications. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2000, 187: 161~171

84 Lomov S M, Gusakov A V, Huysmans G, et al. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models for woven composites. *Compos Sci Technol*, 2000, 60: 2083~2095

85 Lomov S M, Huysmans G, Verpoest I. Hierarchy of textile structures and architecture of fabric geometric models. *Text Res J*, 2001, 71(6): 534~543

86 Huang Z M. A unified micromechanical model for the mechanical properties of two constituent composite materials, part I: Elastic behavior. *J Thermoplastic Compos Mater*, 2000, 13(4): 252~271

87 Huang Z M. A unified micromechanical model for the mechanical properties of two constituent composite materials, part II: Plastic behavior. *J Thermoplastic Compos Mater*, 2000, 13(5): 344~362

88 Huang Z M. A unified micromechanical model for the mechanical properties of two constituent composite materials, part III: Strength behavior. *J Thermoplastic Compos Mater*, 2001, 14(1): 54~69

89 Huang Z M, Ramakrishna S, Zhang Y Z, Tay A A O. Prediction of tensile strength of multilayer knitted-fabric-reinforced laminated composites. *J Thermoplastic Compos Mater*, 2001, 14: 70~83

90 Huang Z M. The mechanical properties of composite reinforced with woven and braided fabrics. *Compos Sci Technol*, 2000, 60: 479~498

91 Carvelli V, Poggi C. A homogenization procedure for the numerical analysis of fabric composites. *Composites, Part A*, 2001, 32: 1425~1432

92 Kim H K, Swan C C. Voxel-based meshing and unit-cell analysis of textile composite. *Int J Numer Methods Eng*, 2003, 56: 977~1006

93 Rayleigh L. On the interface of obstacles arranged in rectangular order upon properties of the medium. *Philos Mag*, 1894, 34: 481~502

94 Maxwell T A. A Treatize on Electricity and Magnetism, Vol. 1. Oxford: Oxford University Press, 1904, 440

95 Springer S, Tsai S. Thermal conductivity of unidirectional materials. *J Compos Mater*, 1967, 1: 2~17

96 Han L, Costner A. Effective thermal conductivities of fibrous composites. *ASME J Heat Transfer*, 1981, 103: 387~392

97 Ishikawa T, Chou T W. In-plane thermal expansion and thermal bending coefficients of fabric composites. *J Compos Mater*, 1983, 17: 92~104

98 Kabelka J. Prediction of the Thermal Properties of Fiber Resin Composites, Developments of Reinforced Plastics, 3rd, ed. In: Pritchard G, ed. London: Elsevier Applied Science, 167~202. 1984

99 Naik N K, Ganesh V K. Thermal expansion coefficients of plain weave fabric laminates. *Compos Sci Technol*, 1994, 51: 387~408

100 Sankar B V, Marrey R A. A unit cell model of textile composite beams of predicting stiffness properties. *Compos Sci Technol*, 1993, 49: 61~69

101 Gowayed Y, Hwang J C, Chapman D. Thermal conductivity of textile composites with arbitrary preform structures. *J Compos Technol Res*, 1995, 17(1): 56~62

102 Gowayed Y, Hwang J C. Thermal conductivity of composite materials made from plain weaves and 3d weaves. *Composites Eng*, 1995, 5(9): 1177~1186

103 Dasgupta A, Agarwal R K, Bhandarkar S M. Three- dimensional modeling of woven fabric composites for effective thermomechanical and thermal properties. *Compos Sci Technol*, 1996, 56: 209~223

104 Sankar B V, Murrey R V. Analytical method for micromechanics of textile composites. *Compos Sci Technol*, 1997, 57: 703~713

105 Jones R M. Mechanics of Composite Materials, Script Book, Washington, DC, 1975

106 Petit P H, Waddoups M E. A method of predicting the nonlinear behavior of laminated composites. *J Compos Mater*, 1969, 3: 2~19

107 Hahn H T, Tsai S W. Nonlinear elastic behavior of unidirectional composite laminae. *J Compos Mater*, 1973, 7: 102~118

108 Hahn H T. Nonlinear behavior of laminated composites. *J Compos Mater*, 1973, 7: 257~271

109 Sandhu R S. Nonlinear behavior of unidirectional and angle ply laminates. *J Aircr*, 1976, 13: 104~111

110 Ishikawa T, Chou T W. Nonlinear behavior of woven fabric composites. *J Compos Mater*, 1983, 17: 399~413

111 Dow N F, Rammath V. Analysis of woven fabrics for reinforced composite materials. NASA-CR 191422, 1993

112 Naik N K, Ganesh V K. Failure behavior of plain weave fabric laminates under in-plane shear loading. *J Compos Technol Res*, 1994, 16: 3~20

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

113 Kumar R S, Naik N K. Prediction of compressive strength of plain weave fabric composites. In: Proceedings of ICCM10, Australia, 1997, Vol. IV. 333~340

114 Kurashiki T, Zako M, Verpoest I. Damage development of woven fabric composite considering effect of mismatch of lay-up. In: Proceedings of the 10th European Conference on Composite Materials, Bruges, Belgium, 2002

115 Woo K, Whitcomb J D. Effects of fiber tow misalignment on the engineering properties of plain weave textile composite. *Comput Struct*, 1997, 37: 343~355

116 McBride T M, Chen J. Unit-cell geometry in plain weave fabrics during shearing deformations. *Compos Sci Technol*, 1997, 57: 345~351

117 Vandeurzen Ph, Ivens J, Verpoest I. Micro-stress analysis of woven fabric composites by multilevel decomposition. *J Compos Mater*, 1998, 32: 623~651

118 Vandeurtzen P, Ivens J, Verpoest I. An analytical method for the failure process in woven fabric composites. In: Proceedings of the 8th European Conference on Composite Materials, Naples, Italy, 1998

119 Ito M, Chou T W. An analytical and experimental study of strength and failure behavior of plain weave composites. *J Compos Mater*, 1998, 32: 2~30

120 Scida D, Aboura Z, Benzeggagh M L, Bocherens E. A micromechanics model for 3D elasticity and failure of woven-fiber composite materials. *Compos Sci Technol*, 1999, 59: 505~517

121 Hoftsee J, van Keulen F. The effect of simple shear on stiffness and strength of fabric laminates. In: Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials, Paris, France, 1999

122 Naik N K, Tiwari S I, Kumar R S. An analytical model for compressive strength of plain weave fabric composites. *Compos Sci Technol*, 2003, 63: 609~625

(中国科学院力学研究所 陈少华 彭志龙 译自
Modeling of elastic, thermal and strength/failure analysis of two-dimensional woven composites —— a review. *Applied Mechanics Reviews*, 2007, 60: 37~49)
中国科学院力学研究所 张双寅 校)

MODELING OF ELASTIC, THERMAL AND STRENGTH/ FAILURE ANALYSIS OF TWO-DIMENSIONAL WOVEN COMPOSITES —— A REVIEW

Levent Onal　　Sabit Adanur

Department of Textile Engineering, Auburn University, 115 Textile Building, Auburn, AL 36849

Abstract The usage of textile structures as a reinforcement for polymer composites became essen- tial in many industrial applications in, for example, the marine and aerospace industries because of their favorable stiffness and strength to weight ratio. Determination of elastic properties and failure behavior of textile reinforced composites is vital for industrial design and engineering applications. This paper aims to present a review of numerical and analytical models for elastic, thermal, and strength/failure analysis of 2D reinforced woven composites. Major modeling techniques and approaches are presented. A state of the art review of woven fabric composites is presented starting from earlier one- dimensional models to recent three-dimensional models. The intention is not to give a detailed analysis of the mathematical approaches to the models discussed, but rather to inform researchers about the main ideas of previous works. This review article cites 122 references.

Keywords two dimensional woven composites, textile structures, mechanical properties, modeling

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