

2.5D 机织复合材料压缩性能实验与数值模拟

卢子兴^{*1}, 周原¹, 冯志海², 杨云华², 纪高宁²

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 先进功能复合材料技术国防科技重点实验室, 北京 100076)

摘 要: 为了研究 2.5D 机织复合材料的压缩损伤和失效机制, 验证双尺度渐进损伤有限元数值模拟方法的有效性, 对这类复合材料分别沿经纱方向和纬纱方向进行了准静态压缩实验, 获得了其相应的应力-应变曲线, 并测定了材料的初始弹性模量和极限强度。在此基础上, 利用双尺度渐进损伤有限元数值方法模拟分析了材料的压缩应力-应变响应和损伤演化行为, 取得了与实验吻合较好的模拟结果。结果表明: 2.5D 机织复合材料在纬向压缩下的主要失效模式是纬纱的轴向压溃与断裂, 可获得相对较高的压缩强度; 但在经向压缩下, 经纱因弯曲会承受附加弯矩作用, 从而对周围基体造成挤压, 故在经纱轴向断裂之前容易出现经纱之间基体的压溃和纱线之间的分层开裂, 使强度降低, 不利于发挥纤维的承载优势。

关键词: 2.5D 机织复合材料; 力学性能; 压缩实验; 数值模拟; 渐进损伤

中图分类号: TB330.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2015)01-0150-10

2.5D 机织复合材料是一类新型的纺织类复合材料^[1]。在国外, 法国的 SEP (Division of Snecma, Bordeaux, France) 最早提出了 2.5D 织物的概念, 并将其用于 SiC 基陶瓷复合材料的制备。当时的 2.5D 织物主要是在数层堆叠的平纹机织物基础上增加层间联锁的纱线, 以提高材料的抗分层性能^[2-3]。21 世纪初, 国内的学者提出了一种新的 2.5D 机织形式, 其中纬纱呈平行直线排列, 而经纱在厚度方向上与不同层的纬纱进行交织互锁, 从而使材料厚度方向和层间的性能得到增强, 并易于制造异型件^[4-5]。因此, 该类 2.5D 机织复合材料得到了学者们的广泛关注和研究。Ma 等^[6-7]和矫桂琼等^[8-9]对 SiC 基 2.5D 复合材料的拉伸性能进行了实验测试和分析。针对树脂基 2.5D 复合材料, 曹海建等^[10]在显微镜观测基础上建立了其典型的单胞模型, 并验证了机织结构与其力学性能的关系。郑君等^[11-13]利用理论分析方法预测了材料的弹性性能, 并建立了材料在纬向拉伸过程中的初始屈服准则。董伟锋等^[14]和张立泉等^[15]预测了 2.5D 机织复合材料的弹性性能, 并对材料的面内拉伸强度进行了实验测试。杨振宇等^[5]在 2.5D 机织复合材料的弹性

性能预测方面也进行了类似的工作。王新峰等^[16]利用刚度折减法对 2.5D 机织复合材料在经向和纬向拉伸载荷下的损伤过程进行了有限元分析, 并与实验结果进行了对比。Lu 等^[17]也对 2.5D 机织复合材料的拉伸应力-应变响应进行了模拟, 并预测了材料的偏轴拉伸性能。然而, 现有对 2.5D 机织复合材料的研究主要集中在弹性性能和拉伸力学响应方面, 对 2.5D 机织复合材料的压缩性能和压缩破坏模式的研究还鲜有报道。

本文主要对 2.5D 机织复合材料沿经纱方向和纬纱方向的压缩力学性能进行了实验测试, 并利用双尺度的渐进损伤模拟方法研究了材料在经纱方向和纬纱方向上的压缩应力-应变响应和损伤演化行为, 分析了材料损伤演化模式与宏观压缩力学响应之间的关系。该双尺度的渐进损伤模拟主要分 2 步进行: 首先, 建立了具有纤维单丝随机排布特征的纱线束单胞模型, 并利用该模型计算得到纱线束的等效刚度和强度性能; 其次, 建立了 2.5D 机织复合材料的单胞模型, 并以上一步计算得到的纱线束性能作为输入参数, 利用渐进损伤模拟方法研究材料在压缩载荷作用下的力学响应和损伤行为。

收稿日期: 2013-12-18; **录用日期:** 2014-03-10; **网络出版时间:** 2014-03-31 17:08

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/10.13801/j.cnki.fhclxb.20140331.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(11072015, 11272030)

通讯作者: 卢子兴, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料结构强度。 E-mail: luzixing@buaa.edu.cn

引用格式: 卢子兴, 周原, 冯志海, 等. 2.5D 机织复合材料压缩性能实验与数值模拟[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 150-159. Lu Z X, Zhou Y, Feng Z H, et al. Experiment and numerical simulation on compressive properties of 2.5D woven fabric composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(1): 150-159.

1 实验

2.5D 机织复合材料压缩试件采用国产 MT300 碳纤维为增强相, 环氧树脂为基体, 由航天材料及工艺研究所制备并加工。2.5D 织物的经纱密度为 8 根/cm, 纬纱密度为 4 根/cm, 纤维体积分数为 48%, 经显微观察统计发现经纱倾角在 $16^\circ \sim 20^\circ$ 之间。

压缩实验按照国家标准 GB/T 1448—2005^[18] 执行。2.5D 机织形式如图 1(a) 所示, 压缩试件的尺寸如图 1(b) 所示。压缩实验在 HT-2402SERIES 实验机(台湾宏达公司)上进行, 试件装载如图 1(c) 所示, 加载速率为 1 mm/min。经向和纬向压缩实验保证每组不少于 5 个有效测试试样。

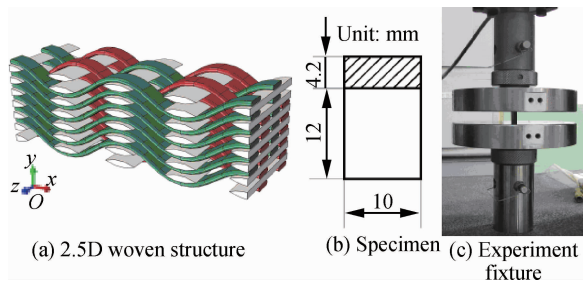


图 1 2.5D 机织复合材料及压缩实验条件

Fig. 1 2.5D woven fabric composites and compression experiment conditions

2 单胞模型

2.1 纱线束单胞模型

纱线束看作是由纤维、基体及其之间的界面相组成的单向复合材料。为满足纤维单丝在纱线束中的随机排布特征及单胞模型在边界上的周期可重复要求, 引入碰撞循环算法^[19]来建立纱线束单胞模型: 给予初始规则排布的纤维单丝随机的初速度, 让其按照一定的时间步长运动。当任意两纤维发生碰撞后, 交换法向速度而切向速度不变。同时, 当纤维移出单胞边界时, 其可从对应的边界返回单胞, 这样在满足周期性的同时, 保证了纤维的总数不变, 易于控制纱线束的敛集率^[20]。建立的敛集率为 0.75 的纱线束单胞模型如图 2(a) 所示。

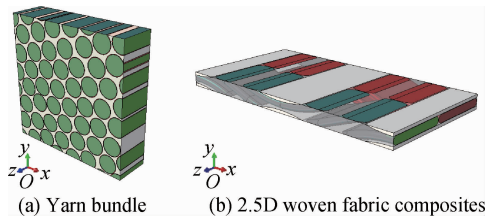


图 2 纱线束和 2.5D 机织复合材料的单胞模型

Fig. 2 Single cell models of yarn bundle and 2.5D woven fabric composites

2.2 2.5D 机织复合材料的单胞模型

2.5D 机织复合材料的单胞模型如图 2(b) 所示。基于已有的显微观测结果, 假设纬纱沿直线平行排布, 经纱在与纬纱的交织区域为圆弧段, 而在非交织区域由于机织过程中的提紧作用而保持为直线段。考虑到纱线之间的相互挤压作用, 假设经纱横截面为跑道形, 而纬纱横截面为双凸透镜形。单胞尺寸可由机织参数得到, 而纱线束截面尺寸可由显微观测得到, 单胞中其余参数由式(1)~式(4)计算:

$$f = \frac{1}{2}(L_y - b - d) \quad (1)$$

$$R = \frac{a^2 + b^2}{4b} \quad (2)$$

$$L = \sqrt{\frac{1}{4}L_x^2 + (2R - b - L_y)^2 - (2R + d + 2f)^2} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi = \arcsin(\frac{L_x}{2X}) - \arcsin(\frac{L}{X}) \\ X = \sqrt{(2R + d + 2f)^2 + L^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: f 为纱线之间的间隙; L_x 、 L_y 和 L_z 分别为单胞在 3 个方向上的尺寸; R 为纬纱截面圆弧半径; L 和 φ 为经纱直线段的长度和倾角; a 、 b 、 c 、 d 为纱线的截面尺寸, 2.5D 机织复合材料单胞模型参数示意图如图 3 所示。

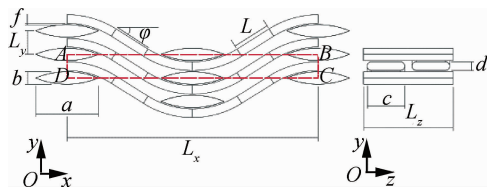


图 3 2.5D 机织复合材料单胞模型参数示意图

Fig. 3 Schematic of parameters in single cell of 2.5D woven fabric composites

3 渐进损伤模型

为了模拟材料在受载过程中的损伤扩展, 引入渐进损伤模型。典型的渐进损伤模拟包含 3 个基本步骤: 应力模拟、损伤模拟与材料的性能退化^[21]。其中, 应力模拟涉及损伤前后材料本构模型的建立; 损伤模拟中需要选择能准确判断受载过程中主要损伤模式的强度准则; 在材料性能退化部分, 则需要利用相应的损伤演化模型描述材料从初始损伤萌生到最终失效整个过程中的性能衰减规律。

3.1 强度准则

在拉伸或压缩载荷作用下, 机织类复合材料中纱线的主要失效模式分为以下 3 类: 横向基体开裂、

纵向纤维断裂和纤维与基体之间的剪切脱粘^[22]。Hashin 失效准则^[23]能够有效地判断和区分这 3 类失效模式。同时,大量改进型的 Hashin 失效准则被提出并广泛用于复合材料的强度预测^[24-26]。采用一类形式上统一的改进型三维 Hashin 失效准则作为纱线束的强度准则^[27]:

1 方向纤维拉伸断裂与纤维-基体剪切的失效函数为($\sigma_{11} \geq 0$)

$$\phi_{1T} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1T}} \right)^2 + a_{1T} \left[\frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a_s\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a_sS_{12}^4} \right]^2 + a_{1T} \left[\frac{\frac{\tau_{13}^2}{2G_{13}} + \frac{3}{4}a_s\tau_{13}^4}{\frac{S_{13}^2}{2G_{13}} + \frac{3}{4}a_sS_{13}^4} \right]^2 \geq 1 \quad (5)$$

1 方向纤维压缩失效与纤维-基体剪切的失效函数为($\sigma_{11} < 0$)

$$\phi_{1C} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1C}} \right)^2 + a_{1C} \left[\frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a_s\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a_sS_{12}^4} \right]^2 + a_{1C} \left[\frac{\frac{\tau_{13}^2}{2G_{13}} + \frac{3}{4}a_s\tau_{13}^4}{\frac{S_{13}^2}{2G_{13}} + \frac{3}{4}a_sS_{13}^4} \right]^2 \geq 1 \quad (6)$$

2 方向基体拉伸开裂的失效函数为($\sigma_{22} \geq 0$)

$$\phi_{2T} = \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{2T}} \right)^2 + a_{2T} \left[\frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a_s\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a_sS_{12}^4} \right]^2 + a_{2T} \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}} \right)^2 \geq 1 \quad (7)$$

2 方向基体压缩开裂的失效函数为($\sigma_{22} < 0$)

$$\phi_{2C} = \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{2C}} \right)^2 + a_{2C} \left[\frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a_s\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}a_sS_{12}^4} \right]^2 + a_{2C} \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}} \right)^2 \geq 1 \quad (8)$$

3 方向基体拉伸开裂的失效函数为($\sigma_{33} \geq 0$)

$$\phi_{3T} = \left(\frac{\sigma_{33}}{X_{3T}} \right)^2 + a_{3T} \left[\frac{\frac{\tau_{13}^2}{2G_{13}} + \frac{3}{4}a_s\tau_{13}^4}{\frac{S_{13}^2}{2G_{13}} + \frac{3}{4}a_sS_{13}^4} \right]^2 + a_{3T} \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}} \right)^2 \geq 1 \quad (9)$$

3 方向基体压缩开裂的失效函数为($\sigma_{33} < 0$)

$$\phi_{3C} = \left(\frac{\sigma_{33}}{X_{3C}} \right)^2 + a_{3C} \left[\frac{\frac{\tau_{13}^2}{2G_{13}} + \frac{3}{4}a_s\tau_{13}^4}{\frac{S_{13}^2}{2G_{13}} + \frac{3}{4}a_sS_{13}^4} \right]^2 + a_{3C} \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}} \right)^2 \geq 1 \quad (10)$$

式中: σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 、 τ_{12} 、 τ_{23} 和 τ_{13} 为纱线材料坐标系下的应力分量,纱线束坐标系示意图如图 4 所示; G_{12} 和 G_{13} 为剪切模量; X_{1T} 、 X_{2T} 、 X_{3T} 、 X_{1C} 、 X_{2C} 、 X_{3C} 、 S_{12} 、 S_{13} 和 S_{23} 分别为纱线在 3 个方向上的拉伸、压缩与剪切的强度; a_{1T} 、 a_{1C} 、 a_{2T} 、 a_{2C} 、 a_{3T} 和 a_{3C} 为 6 种失效模式下的剪切贡献因子; a_s 为剪切非线性因子。

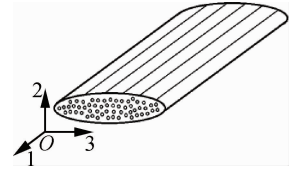


图 4 纱线束坐标系示意图

Fig. 4 Schematic of coordinate system of yarn bundle

当剪切贡献因子和剪切非线性因子取不同的值时,上述强度准则可以退化到任意一类改进型的三维 Hashin 准则或最大应力准则^[27],故非常便于编程计算和工程应用。考虑到纱线以外的树脂基体为各向同性材料,故采用最大主应力准则判断基体材料的失效。

3.2 损伤演化模型

在初始损伤发生后,复合材料的内部损伤呈现出区域化的特点。作为复合材料中的主承载组分,纱线的性能衰减对整个复合材料的应力-应变响应与极限强度有着极其重要的影响。为了实现更好的模拟效果,采用 Fang 等^[28]提出的损伤演化模型,取代经典的直接刚度折减法来控制纱线的性能衰减。在该演化模型中,单元的损伤程度由损伤演化方程控制。为了减轻计算结果对网格划分的依赖,单元特征长度 l 被引入到等效位移的定义中:

$$X_{eq}^{i,k} = l \sqrt{\epsilon_{ii}^2 + \alpha_{i,k} \sum_{j=1, j \neq i}^3 \epsilon_{ij}^2} \quad (i, j = 1, 2, 3; k = T, C) \quad (11)$$

式中: ϵ_{ii} 和 ϵ_{ij} 为应变分量。

而各种失效模式下的损伤演化方程通过该等效位移来定义,即有

$$D_I = \frac{X_{eq}^{If} (X_{eq}^I - X_{eq}^{I0})}{X_{eq}^I (X_{eq}^{If} - X_{eq}^{I0})} \quad (I=1T, 1C, 2T, 2C, 3T, 3C) \quad (12)$$

式中: D_I 为不同失效模式下的损伤变量; X_{eq}^I 为失效模式 I 中的等效位移; X_{eq}^{I0} 和 X_{eq}^{If} 分别为失效模式 I 中初始失效与完全失效时所对应的等效位移。为了进一步改善数值计算的收敛性, 引入 Duvaut-Lions 粘性模型^[29]:

$$\dot{d}_I^v = \frac{1}{\eta} (D_I - d_I^v) \quad (I=1T, 1C, 2T, 2C, 3T, 3C) \quad (13)$$

式中: η 为粘滞系数; d_I^v 为不同失效模式下粘性正则化后的损伤变量。

最终, 各个方向的损伤变量定义为

$$d_1 = \begin{cases} d_{1T}^v, & \text{if } \sigma_{11} \geq 0 \\ d_{1C}^v, & \text{if } \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad d_2 = \begin{cases} d_{2T}^v, & \text{if } \sigma_{22} \geq 0 \\ d_{2C}^v, & \text{if } \sigma_{22} < 0 \end{cases} \quad d_3 = \begin{cases} d_{3T}^v, & \text{if } \sigma_{33} \geq 0 \\ d_{3C}^v, & \text{if } \sigma_{33} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

3.3 损伤模型

纱线损伤后的刚度矩阵可以写为

$$\mathbf{C}(\mathbf{D}) = \begin{bmatrix} b_1^2 Q_{11} & b_1 b_2 Q_{12} & b_1 b_3 Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & b_2^2 Q_{22} & b_2 b_3 Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & b_3^2 Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & b_{12} Q_{44} & 0 & 0 \\ & & & & b_{13} Q_{55} & 0 \\ & & & & & b_{23} Q_{66} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: $Q_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, 6)$ 为未损伤的刚度矩阵分量, 且

$$b_1 = 1 - d_1, \quad b_2 = 1 - d_2, \quad b_3 = 1 - d_3,$$

$$b_{12} = \left(\frac{2(1-d_1)(1-d_2)}{2-d_1-d_2} \right)^2,$$

$$b_{13} = \left(\frac{2(1-d_1)(1-d_3)}{2-d_1-d_3} \right)^2,$$

$$b_{23} = \left(\frac{2(1-d_2)(1-d_3)}{2-d_2-d_3} \right)^2.$$

为了在刚度矩阵中包含剪切非线性效应, 将剪切非线性本构关系^[30]线性化为

$$\begin{cases} \sigma_{12}^{(i+1)} = (1-d_{12}) G_{12} \gamma_{12}^{(i+1)} \\ \sigma_{13}^{(i+1)} = (1-d_{13}) G_{13} \gamma_{13}^{(i+1)} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\gamma_{12}^{(i+1)}$ 和 $\gamma_{13}^{(i+1)}$ 为第 $i+1$ 步的剪应变。

当考虑剪切非线性时, d_{12} 和 d_{13} 计算公式为

$$d_{12} = \frac{3a_s G_{12} (\sigma_{12}^{(i)})^2 - 2a_s (\sigma_{12}^{(i)})^3 / \gamma_{12}^{(i)}}{1 + 3a_s G_{12} (\sigma_{12}^{(i)})^2} \quad (17)$$

$$d_{13} = \frac{3a_s G_{13} (\sigma_{13}^{(i)})^2 - 2a_s (\sigma_{13}^{(i)})^3 / \gamma_{13}^{(i)}}{1 + 3a_s G_{13} (\sigma_{13}^{(i)})^2} \quad (18)$$

式中: 上角标 (i) 表示第 i 步的计算结果。当不考虑剪切非线性时, $d_{12} = d_{13} = 0$ 。

最终刚度矩阵分量 Q_{44} 和 Q_{55} 可以写为

$$\begin{cases} Q_{44} = (1-d_{12}) G_{12} \\ Q_{55} = (1-d_{13}) G_{13} \end{cases} \quad (19)$$

而纱线的切线刚度写为

$$\mathbf{C}_T = \mathbf{C}(\mathbf{D}) + \left(\sum_I \frac{\partial \mathbf{C}(\mathbf{D})}{\partial d_I^v} \frac{\partial d_I^v}{\partial \mathbf{D}_I} \frac{\partial \mathbf{D}_I}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \right) : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (20)$$

由于基体并不是复合材料中的主承载者, 为了提高计算效率, 基体材料失效后的性能衰减采用直接刚度折减法, 即当基体材料出现失效后, 其对应的弹性模量与剪切模量被折减到某一小值 (1%)。渐进损伤模型通过商用有限元软件 ABAQUS 中的用户材料子程序模块 UMAT 来实现。在模拟过程中, 单胞模型上施加周期性边界条件, 以保证边界上位移场和应力场的周期连续性^[27]。

4 结果与讨论

4.1 压缩实验结果

2.5D 机织复合材料纬向和经向压缩应力-应变曲线分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示。可以看出, 同一方向不同试件之间的测试结果重复性较好, 说明了测试结果的有效性。纬向压缩应力-应变曲线在达到极限强度之前均保持较好的线性, 在达到极限强度之后, 表现出明显的脆性断裂特征; 经向压缩应力-应变曲线在应力水平较低时保持较好的线性特征, 在接近极限强度时出现一定的波折或非线性, 而在达到极限强度之后则呈现出阶梯状下降或明显的平台区。

由于经纱密度高于纬纱密度, 因此经纱的体积含量和经纱方向的压缩模量均高于纬纱方向的, 但经纱方向的压缩强度却低于纬纱方向的压缩强度, 这主要是由 2 个方向的压缩破坏机制不同造成的。2.5D 机织复合材料纬向和经向压缩的典型破坏区形貌分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示。

由图 6 可以看出, 纬向压缩的主要破坏模式是纬纱的压溃及纬纱纤维的断裂。经向压缩的主要破坏模式是不同层经纱之间以及经纱和纬纱之间基体的破坏 (分层开裂), 而分层开裂在经纱和纬纱的交

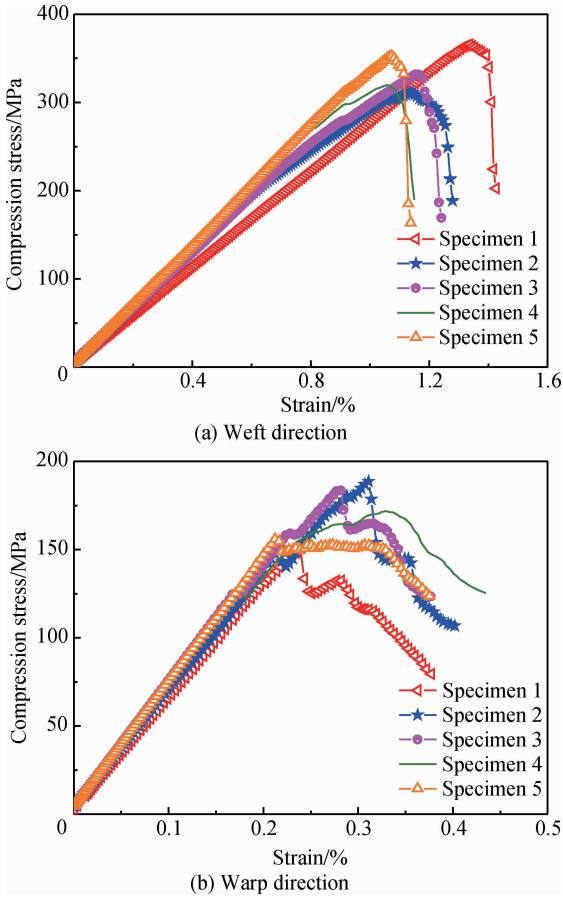


图 5 2.5D 机织复合材料纬向和经向压缩应力-应变曲线
Fig. 5 Compression stress-strain curves of 2.5D woven fabric composites in weft and warp direction

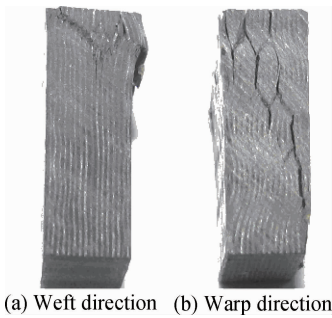


图 6 2.5D 机织复合材料纬向和经向压缩的典型破坏区形貌
Fig. 6 Typical morphologies of compressive failure zone of 2.5D woven fabric composites in weft and warp direction

织区域最为明显。经纱损伤只在部分经纱中出现，而其余经纱则保持了较高的完整性。

4.2 纬向压缩模拟结果

利用 2.1 节中建立的纱线束单胞模型，分别计算了纱线束的等效弹性性能和强度性能参数。纤维单丝和基体的力学性能如表 1 所示，计算得到的纱线束等效性能如表 2 所示。在纱线束强度

表 1 纤维单丝和基体的力学性能
Table 1 Mechanical properties of fiber monofilament and matrix

Mechanical property		Fiber mono-filament	Matrix
Elastic modulus/ GPa	Longitudinal E_1	238	4.18
	Transverse E_2	22	4.18
Poisson's ratio	Longitudinal ν_{12}	0.12	0.34
	Transverse ν_{23}	0.42	0.34
Shear modulus/ GPa	Longitudinal G_{12}	4.80	1.56
	Transverse G_{23}	7.75	1.56
Tensile strength X_T /MPa		3 790	47.5
Compressive strength X_C /MPa		3 032	250
Shear strength S /MPa			50

表 2 纱线束等效性能
Table 2 Effective properties of yarn bundle

E_1 /GPa	E_2 /GPa	G_{12} /GPa	G_{23} /GPa	ν_{12}	ν_{23}
164	13.18	3.53	4.66	0.19	0.41
X_{1T} /MPa	X_{2T} /MPa	X_{1C} /MPa	X_{2C} /MPa	S_{12} /MPa	S_{23} /MPa
2 632.4	38.2	2 015.3	144.66	39.04	38.57

性能计算中，纤维单丝采用最大应力准则判断失效。

利用表 2 中纱线束的等效性能和 2.5D 机织复合材料的单胞模型，基于第 3 节描述的渐进损伤模型，模拟了 2.5D 机织复合材料纬向压缩应力-应变曲线，并与实验曲线进行对比，如图 7 所示。计算中，取剪切贡献因子 $a_{1T} = a_{1C} = a_{2T} = a_{2C} = a_{3T} = a_{3C} = 1$ ，剪切非线性因子 $a_s = 0$ ，粘滞系数 $\eta = 0.001$ 。图 7 中 A、B、C 三点分别标示出基体、纱线 3 方向（面内方向）及纱线纵向的初始损伤位置，模拟中纱线 2 方向（面外方向）没有明显的损伤出现。2.5D 机织复合材料纬向压缩渐进损伤过程如图 8 所示。

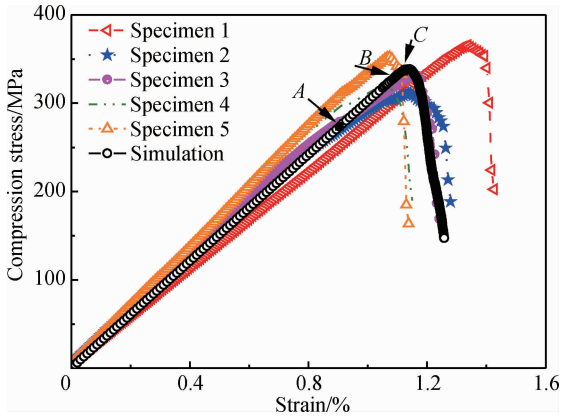


图 7 2.5D 机织复合材料纬向压缩应力-应变曲线
Fig. 7 Compression stress-strain curves of 2.5D woven fabric composites in weft direction

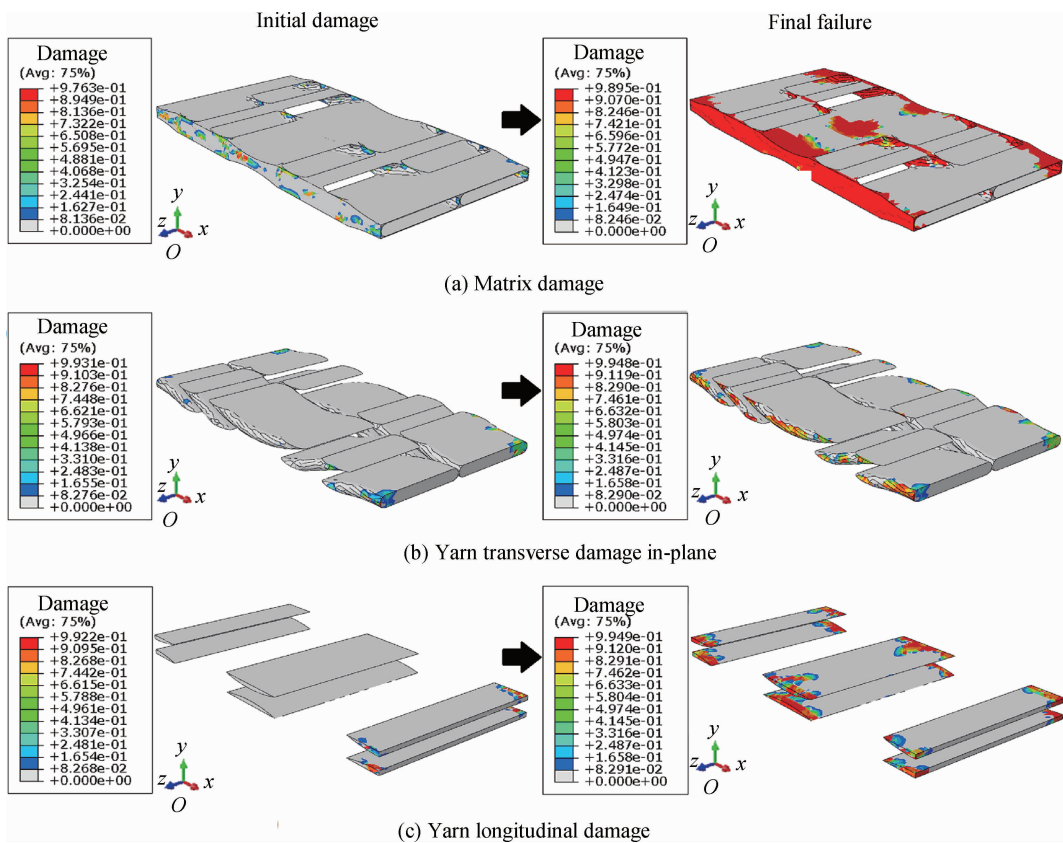


图 8 2.5D 机织复合材料纬向压缩渐进损伤过程

Fig. 8 Progressive damage process of 2.5D woven fabric composites under weft directional compression

结合图 7 和图 8 可以看出, 2.5D 机织复合材料在纬向压缩过程中, 基体损伤首先出现在同层相邻经纱间的基体区域(见图 8(a)中初期损伤), 并逐渐沿经纱方向扩展。随着压缩载荷的进一步增加, 面内横向损伤主要出现在经纱的边缘区域(见图 8(b)中初期损伤), 并沿着经纱扩展。随后, 纬纱出现纱线纵向损伤(见图 8(c)中初期损伤), 并迅速沿纬纱横截面方向扩展, 这使得纬向压缩应力-应变曲线达到峰值并迅速下降。因此, 2.5D 机织复合材料纬向压缩的最终失效模式为纬纱的纵向压缩断裂失效, 这与纬向压缩的实验结果是一致的。在压缩应力-应变曲线达到峰值以后, 同层相邻经纱间的基体都出现了较为严重的压缩失效(见图 8(a)中最终失效)。经纱边缘区域的面内横向损伤程度也有所加深, 但损伤区域并未向经纱内部扩展(见图 8(b)中最终失效)。而纱线的纵向压缩失效区域则贯穿整个纬纱横截面(见图 8(c)中最终失效), 使材料失去了承载能力。

4.3 经向压缩模拟结果

2.5D 机织复合材料经向压缩应力-应变曲线如图 9 所示。图中 A、B、C、D、E 各点分别标识出基体、经纱 3 方向(面内方向)、经纱 2 方向(面外方向)、纬纱 2 方向(面外方向)及经纱纵向的初始损伤位置。2.5D 机织复合材料经向压缩渐进损伤过程如图 10 所示。

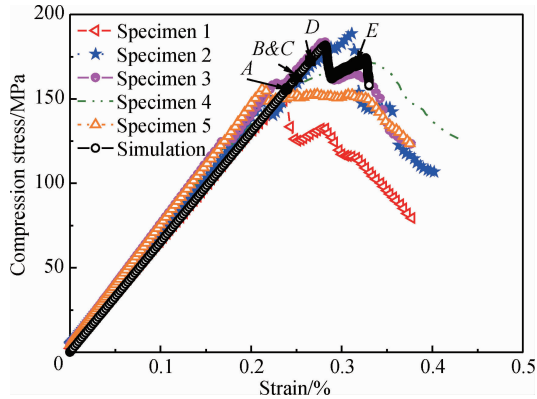


图 9 2.5D 机织复合材料经向压缩应力-应变曲线

Fig. 9 Compression stress-strain curves of 2.5D woven fabric composites in warp direction

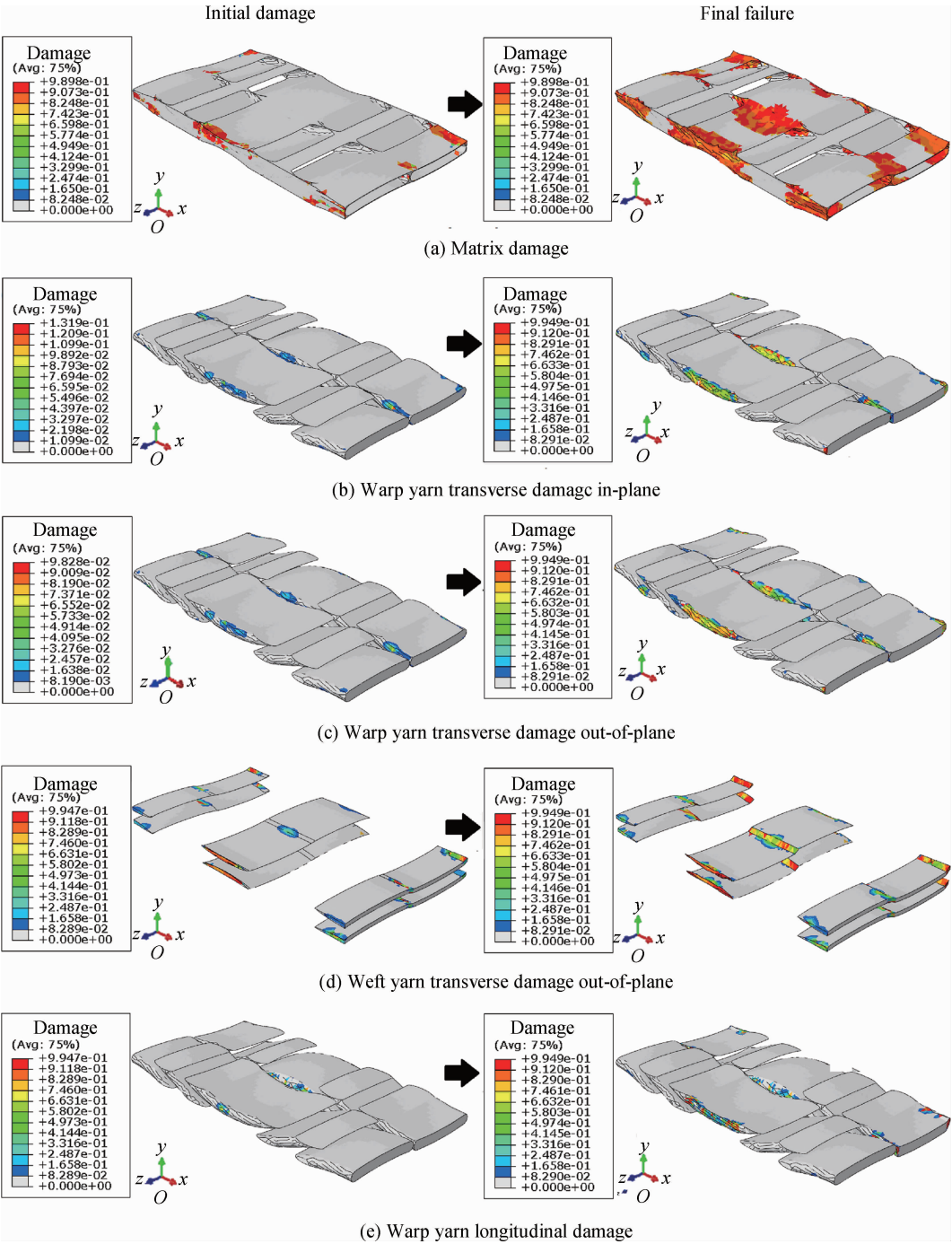


图 10 2.5D 机织复合材料经向压缩渐进损伤过程

Fig. 10 Progressive damage process of 2.5D woven fabric composites under warp directional compression

2.5D 机织复合材料在经向压缩过程中,由于经纱为弯曲纱,其轴线并不沿外载荷方向,因此不同于纬向压缩,在经向压缩载荷下经纱上会有附加弯矩的作用,从而对周围的基体造成挤压。同时,由于经纱沿纬纱横截面短轴对称,如图 3 左图所示,因此对一根经纱而言,其根部(纬纱横截面短轴处)所受弯矩最大,对周围基体的挤压也最为严重。

结合图 9 和图 10 可以看出,在经向压缩载荷作用下,由于经纱和周围基体的相互挤压,基体损伤和经纱横向损伤(面内方向和面外方向)先后出现在经纱和纬纱的交织区域附近(见图 10(a)~图 10(c)初期损伤)。另一方面,由于同一层经纱沿纬纱方向反对称排布(见图 1(a)),因此在经向外载荷作用下,同一层的相邻经纱对同一根纬纱的作用力方向相

反,使纬纱产生面外方向的翘曲,从而在同层相邻经纱之间的纬纱区域出现了面外方向的横向损伤(见图 10(d)初期损伤)。随着外载荷的逐渐增加,经纱与周围基体的挤压更加严重,基体损伤和经纱的横向挤压损伤均沿着经纱表面方向扩展,损伤程度也逐渐加深,最终在经纱和纬纱之间的基体区域以及不同层经纱之间的基体区域出现了基体失效(见图 10(a)最终失效,对应于实验中的分层开裂),在经纱边缘区域也出现了较为严重的横向损伤(见图 10(b)和图 10(c)最终失效),致使应力-应变曲线达到峰值后而出现下降。此时,纬纱的面外翘曲和面外横向损伤程度也有所加深(见

图 10(d)最终失效)。但由于此时经纱的纵向失效还不太严重(见图 10(e)初期损伤),因此材料还能保持一定的承载能力,随后经纱纵向损伤不断扩展(见图 10(e)最终失效),并使应力-应变曲线呈现阶梯状下降。综上所述,2.5D 机织复合材料的经向压缩失效机制较为复杂,是基体失效(分层开裂)、纱线横向损伤和经纱纵向损伤相互耦合、共同作用的结果。2.5D 机织复合材料压缩模量和压缩强度模拟结果与实验结果的比较如表 3 所示。结合图 7、图 9 和表 3 可以看出,本文中的模拟结果与实验结果吻合较好,进一步证明了模拟方法的有效性。

表 3 2.5D 机织复合材料压缩模量和压缩强度模拟结果与实验结果的比较

Table 3 Comparison of simulation and test results in compression modulus and compression strength of 2.5D woven fabric composites

Result	Weft direction		Warp direction	
	Initial modulus/GPa	Maximum stress/MPa	Initial modulus/GPa	Maximum stress/MPa
Experiment	31.5±2.2	336.1±20.3	68.3±2.8	170.2±14.8
Simulation	30.2	338.7	65.2	181.7
Error/%	-4.1	0.8	-4.5	6.7

5 结 论

通过对 2.5D 机织复合材料沿经纱方向和纬纱方向进行压缩实验,得到了相应的应力-应变曲线,并测定了材料的初始弹性模量和压缩极限强度。同时,利用双尺度的渐进损伤数值模拟方法模拟了纬向和经向的压缩应力-应变行为,研究了材料的压缩损伤和失效机制。得到的主要结论如下:

(1) 数值模拟曲线与压缩实验曲线吻合较好,这不仅证明了数值模拟方法的有效性,也增强了实验结果的可信性。

(2) 在纬向压缩下,2.5D 机织复合材料的主要失效模式是纬纱的轴向压溃与断裂,能够获得相对较高的压缩强度。

(3) 在经向压缩下,2.5D 机织复合材料中经纱因弯曲会承受附加弯矩作用,从而对周围基体造成挤压,在经纱轴向断裂之前容易出现经纱之间基体的压溃和纱线之间的分层开裂,使强度降低,不利于发挥纤维的承载优势。

参考文献:

[1] Dong W F, Xiao J, Li Y. Finite element analysis of the tensile properties of 2.5 D braided composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 457(1): 199-204.

[2] Boitier G, Vicens J, Chermant J L. Microstructure and creep of 2.5D C_f-SiC composites[J]. Journal of the European Ce-

ramic Society, 1998, 18(13): 1835-1843.

[3] Boitier G, Vicens J, Chermant J L. Understanding the creep behavior of a 2.5D C_f-SiC composite-III. From mesoscale to nanoscale microstructural and morphological investigation towards creep mechanism[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 313(1): 53-63.

[4] Li J, Xu B, Feng Z H. Properties of 2.5D braided quartz/phenolic composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002(1): 35-37 (in Chinese).

李杰, 许斌, 冯志海. 2.5D 石英/酚醛复合材料的性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2002(1): 35-37.

[5] Yang Z Y, Feng X, Su Z, et al. Meso-structure and elastic properties of 2.5D braided composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2010(2): 67-71 (in Chinese).

杨振宇, 俸翔, 苏洲, 等. 2.5D 编织复合材料微观结构及弹性性能[J]. 宇航材料工艺, 2010(2): 67-71.

[6] Ma J Q, Xu Y D, Zhang L T, et al. Microstructure characterization and tensile behavior of 2.5D C/SiC composites fabricated by chemical vapor infiltration[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(11): 1967-1971.

[7] Ma J Q, Xu Y D, Zhang L T, et al. Preparation and mechanical properties of C/SiC composites with carbon fiber woven preform[J]. Materials Letters, 2007, 61(2): 312-315.

[8] Tao Y Q, Jiao G Q, Wang B, et al. Experiment study and stress-strain behavior theoretical simulation on the load speed behavior of 2D and 2.5D ceramic matrix composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2009, 27(1): 12-16 (in Chinese).

陶永强, 矫桂琼, 王波, 等. 2D 和 2.5D 编织陶瓷基复合材料

- 加载速率效应和应力-应变行为模拟[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(1): 12-16.
- [9] Chang Y J, Jiao G Q, Tao Y Q, et al. Damage behavior of 2.5-C/SiC composite under tensile loading[J]. Journal of Inorganic Materials, 2008, 23(3): 509-514 (in Chinese).
常岩军, 矫桂琼, 陶永强, 等. 2.5D C/SiC 复合材料的拉伸损伤研究[J]. 无机材料学报, 2008, 23(3): 509-514.
- [10] Cao H J, Qian K, Sheng D X. Geometry model and experimental verification of 2.5D woven composites[J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(5): 58-62 (in Chinese).
曹海建, 钱坤, 盛东晓. 2.5 维机织复合材料的几何结构模型与验证[J]. 纺织学报, 2009, 30(5): 58-62.
- [11] Zheng J, Wen W D, Cui H T, et al. Geometric model of 2.5 dimensional woven structures[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2): 143-148 (in Chinese).
郑君, 温卫东, 崔海涛, 等. 2.5 维机织结构复合材料的几何模型[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 143-148.
- [12] Zheng J, Wen W D, Cui H T, et al. Elastic property prediction of 2.5 dimensional woven structures[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 2031-2035 (in Chinese).
郑君, 温卫东, 崔海涛, 等. 2.5 维机织结构复合材料的弹性性能预测[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2031-2035.
- [13] Zheng J, Wen W D, Cui H T, et al. Original yield of 2.5D woven composites loaded in weft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 254-258 (in Chinese).
郑君, 温卫东, 崔海涛, 等. 2.5 维机织复合材料纬向拉伸过程初始屈服准则[J]. 航空学报, 2009, 30(2): 254-258.
- [14] Dong W F, Zhang J Z, Xiao J. Finite element analysis of the elastic properties of 2.5D woven composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(Suppl. 2): 9-14 (in Chinese).
董伟锋, 张建钟, 肖军. 2.5D 机织复合材料弹性性能的有限元分析[J]. 材料工程, 2009(增刊 2): 9-14.
- [15] Zhang L Q, Jiang Y, Guo H W, et al. Analysis and demonstration of elastic properties of 2.5D braided composites[J]. Fiber Glass, 2006(4): 1-3 (in Chinese).
张立泉, 蒋云, 郭洪伟, 等. 编织复合材料弹性性能的分析 and 实验验证[J]. 玻璃纤维, 2006(4): 1-3.
- [16] Wang X F, Chen G J, Zhou G M. Progressive failure analysis of 3-D woven composites under tensile condition[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(1): 1-7 (in Chinese).
王新峰, 陈国军, 周光明. 三维机织复合材料拉伸损伤[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 1-7.
- [17] Lu Z X, Zhou Y, Yang Z Y, et al. Multi-scale finite element analysis of 2.5D woven fabric composites under on-axis and off-axis tension[J]. Computational Materials Science, 2013, 79: 485-494.
- [18] The Fiber Reinforced Plastic Standardization Technical Committee. GB/T 1448—2005 Fiber-reinforced plastics composites—Determination of compressive properties[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2005 (in Chinese).
全国纤维增强塑料标准化技术委员会. GB/T 1448—2005 纤维增强塑料压缩性能实验方法[S]. 北京: 中国质检出版社, 2005.
- [19] Kushch V I, Shmegeera S V, Mishnaevsky J L. Meso cell model of fiber reinforced composite: interface stress statistics and debonding paths[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(9): 2758-2784.
- [20] Lu Z X, Xia B, Yang Z Y. Investigation on the tensile properties of three-dimensional full five-directional braided composites[J]. Computational Materials Science, 2013, 77: 445-455.
- [21] Tserpes K I, Labeas G, Papanikos P, et al. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2002, 33(7): 521-529.
- [22] Chang F K, Chang K Y. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(9): 834-855.
- [23] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2): 329-334.
- [24] Tserpes K I, Papanikos P, Kermanidis T H. A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials, 2001, 24(10): 663-675.
- [25] Matzenmiller A, Lubliner J, Taylor R L. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites[J]. Mechanics of Materials, 1995, 20(2): 125-152.
- [26] Chang F K, Richard A S. Failure strength of nonlinearly elastic composite laminates containing a pin loaded hole[J]. Journal of Composite Materials, 1984, 18(5): 464-477.
- [27] Zhou Y, Lu Z X, Yang Z Y. Progressive damage analysis and strength prediction of 2D plain weave composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 47: 220-229.
- [28] Fang G D, Liang J, Wang B L. Progressive damage and nonlinear analysis of 3D four-directional braided composites under unidirectional tension[J]. Composite Structures, 2009, 89(1): 126-133.
- [29] Duvaut G, Lions J L, John C W. Inequalities in mechanics and physics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1976.
- [30] Hahn H T, Tsai S W. Nonlinear elastic behavior of unidirectional composite laminate[J]. Journal of Composite Materials, 1973, 7(1): 102-110.

Experiment and numerical simulation on compressive properties of 2.5D woven fabric composites

LU Zixing^{*1}, ZHOU Yuan¹, FENG Zhihai², YANG Yunhua², JI Gaoning²

(1. School of Aeronautics Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: To investigate the damage and failure mechanisms of 2.5D woven fabric composites under compression, and verify the effectiveness of the finite element numerical simulation method with a two-scale, progressive damage model, quasi-static compression experiments were conducted on both warp and weft directional specimens to obtain the corresponding stress-strain curves. And the initial elastic modulus and ultimate strength of materials were measured. On this basis, the compressive stress-strain responses and the damage evolution behavior were simulated using the two-scale, progressive damage finite element numerical method. The results from both experiment and simulation show good agreements, and indicate that the main failure mode of 2.5D woven fabric composites in weft directional compression is the axial crush and fracture of weft yarns, from which relatively higher strength is obtained. Meanwhile, additional bending moment is added to the warp yarn under warp directional compression due to bending, which causes extrusion on surrounding matrix. Therefore, matrix fracture and delamination cracking between neighboring warp yarns easily occur before the axial fracture of warp yarns, which are not conducive to utilize the advantage of fibers in bearing load, and result in relatively lower strength.

Keywords: 2.5D woven fabric composites; mechanical property; compression experiment; numerical simulation; progressive damage