

引用格式: 朱昭君, 陈福振, 尹泉雄, 等. 三维针刺复合材料精细化结构重构方法及力学性能预测[J]. 航空材料学报, 2026, 46(2): 47-59.

ZHU Zhaojun, CHEN Fuzhen, YIN Xiaoxiong, et al. Reconstruction method of microstructure and mechanical properties simulation of three-dimensional needling composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(2): 47-59.

三维针刺复合材料精细化结构重构 方法及力学性能预测

朱昭君^{1*}, 陈福振², 尹泉雄¹, 李瑞锋³

(1. 郑州航空工业管理学院 航空发动机学院, 郑州 450046; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710012; 3. 内蒙动力机械研究所, 呼和浩特 010010)

摘要: 采用原位拉伸 X 射线 micro-CT 技术和图像分析及精细化结构重构方法, 量化描述三维针刺复合材料纤维以及裂纹精细化结构, 建立针刺纤维束等纤维结构的重构模型, 提出三维针刺复合材料微细宏观有限元模型建模方法, 并应用于三维针刺复合材料拉伸力学性能仿真分析。结果表明: 拉伸载荷下三维针刺复合材料断裂位置出现纤维整体断裂, 编织层承担较多的拉伸载荷, 断裂纤维数量高于其他铺层纤维。通过 ABAQUS 用户子程序 UMAT 的二次开发和工艺参数化建模算法, 在周期性单胞有限元分析中调用典型代表性单元模型进行细观渐进损伤分析, 实现宏观尺度之间工艺参数传递, 并且与实验进行对比, 预测的拉伸模量数值大于实验结果, 误差为 10.1%。本研究方法和结果可以为材料针刺工艺参数化建模和工艺设计及力学分析研究提供依据。

关键词: 三维针刺复合材料; 精细化结构重构方法; 原位 X 射线 micro-CT 技术; 弹性模量; 拉伸强度

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000150

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000150

中图分类号: V258; TB332

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)02-0047-13

Reconstruction method of microstructure and mechanical properties simulation of three-dimensional needling composites

ZHU Zhaojun^{1*}, CHEN Fuzhen², YIN Xiaoxiong¹, LI Ruifeng³

(1. School of Aero Engine, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Power and Energy, Northwestern polytechnical university, Xi'an 710012, China; 3. Inner Mongolia Institute of Dynamical Machinery, Huhhot 010010, China)

Abstract: The *in-situ* tensile X-ray micro-CT technology, image analysis and fine structure reconstruction method are used to complete the quantitative description of complex geometric structures such as fiber and crack of three-dimensional needling composites. The reconstruction model of fibre structures such as needling fiber bundle is established. A multi-scale finite element modeling method for three-dimensional needling composites is proposed and applied to the simulation and analysis of tensile mechanical properties. The results show that the three-dimensional needling composites fracture location under tensile loading shows overall fibre fracture, and woven layer bears more tensile load and has a higher number of broken fibers than other layers. The user subroutine UMAT in ABAQUS software and the method of process parametric modelling, representative volume element is used in unit cell analysis to carry out meso-progressive damage analysis, the process parameter transfer between macro and micro scales is achieved and the predicted value of the tensile modulus is greater than the experimental result, with an error of 9.2%. The research method and results of this paper can provide the basis for the parametric modelling of material needling process and the research of process design and mechanical analysis.

Key words: three-dimensional needling composite; reconstruction methods for refined structure; X-ray *in-situ* micro-CT; elastic modulus; tensile strength

三维针刺复合材料具有可设计性强、多尺度特征显著、成本低和抗烧蚀性能高的特点,在固体发动机喷管具有广阔的应用前景。依据实际应用需求三维针刺复合材料铺层种类类型较多,有网胎纤维层、编织纤维束层、单向纤维层等,制备中采用针刺对铺层交替针刺,形成层间针刺纤维束,提高层间力学性能。针刺技术也改变了铺层原有纤维的分布方向,针刺部位存在针刺孔、断裂纤维等十分复杂的微细观结构。研究表明复合材料力学性能与铺层微细观结构有直接的关联^[1-4],现今针刺工艺对复合材料微细观结构对应性影响尚不清晰,只局限于特定针刺工艺下材料可以满足实际应用,对于针刺工艺对材料宏观力学性能影响机制尚不明确。因此,实现针刺部位精细化结构的准确描述,建立三维针刺复合材料的多尺度参数化有限元模型,并预测材料的刚度和拉伸强度,对于明确针刺工艺对复合材料宏观力学性能的影响关联机制,研究多尺度损伤具有重要的意义。

在复合材料微细观结构表征方面,传统的测试方法和设备主要有超声检测技术、红外成像技术、扫描电子显微镜等。上述技术存在对于试件表面检测盲区及对小尺寸结构成像检测灵敏度低的局限性。应用微观 X 射线计算机断层扫描(micro X-ray computed tomography, micro-CT)可以获得复合材料高精度图像,结合力学实验装置和图像处理方法可以研究复合材料组分形貌和失效损伤演化过程。Naouar 等^[1]采用 micro-CT 研究了碳纤维织物复合材料细观建模方法,应用结构张量法和纹理分析法重构了复合材料预制体和基体结构。Liu 等^[2]基于 micro-CT 扫描图像并且重构三维五向编织复合材料,提了构建基准模型方法,在与函数拟合后建立纤维束细观模型。Raul 等^[3]基于 micro-CT 图像重构三维编织材料几何模型,设置成像精度为 2 mm,研究施加冲击载荷后基体裂纹扩展模式。有学者^[4-10]采用原位拉伸实验和 micro-CT 技术,研究三维编织复合材料在力学载荷下的纤维和界面的损伤演化过程。研究结果较多基于扫描二维图像分析裂纹生成扩展模式,对于纤维等精细化结构损伤演化过程预测计算等方面还不够深入。也有学者^[11-14]基于 micro-CT 图像,结合提出的模型重构编织复合材料细观尺度模型,对纤维束几何参数进行统计分析。

三维针刺复合材料的针刺纤维束、针刺孔和纤维等结构在二维成像图像中形貌特征不同,仅通过大量二维图像分析较难确定三维针刺深度、针刺的布针距离等针刺工艺参数与材料微细观结构对应性。因此重构材料的真实三维几何结构,确定纤维等精细化结构参数类型和参数的量化方法,可用于分析纤维以及铺层在力学载荷下变形演化过程,进一步提取精细化结构参数,建立复合材料多尺度有限元模型,用于力学性能预测和失效机理研究^[15-22]。

本工作采用原位 micro-CT 技术完成材料高精度扫描和拉伸实验,基于纤维参数得出针刺纤维束、铺层纤维的重构模型,研究多个力学测试阶段下纤维数量以及裂纹随载荷变化规律,得出铺层纤维断裂比、裂纹体积等数据,从微细观层面揭示材料的失效机理和多尺度损伤研究方法。基于多尺度研究方法,并以纤维表征数据为基础,提出复合材料通用多尺度有限元模型建模方法,建立针刺单元单胞有限元模型,基于多尺度损伤强度研究方法,对复合材料弹性性能和拉伸强度进行预测。并与实验数据对比验证模型的有效性,实现三维针刺复合材料拉伸强度的预测,分析不同针刺结构强度演化规律,揭示细观失效机理。

1 实验材料和方法

实验采用三维针刺复合材料,其铺层类型包括单向纤维层、网胎层和编织层三类,针刺密度为 20 针/cm³。按照 micro-CT 成像要求制备成测试试件,尺寸如图 1 所示,其中试件中部为扫描段,扫描段横截面尺寸为 3 mm×3 mm×2 mm。采用高精度工业 micro-CT(XLAB-2000X)对拉伸过程中多个阶段对应的结构演化过程进行跟踪成像。样品台设定的步长为 0.3(°)/张,样品台旋转 360°,分别获取测试段内部长×宽×高的切片数量为 1200 张。定义测试段沿 y 方向为重构图像法线方向和拉伸方向,如图 1 所示,组分相铺层设定为 X-Z 方向即为二维扫描切片面内方向。

实验前通过对试件进行预拉伸实验以及查阅相关文献^[9]确定基本力学性能,为实验拉伸载荷提供参考。拉伸载荷包含初始阶段 0 N,弹性阶段(127 N),屈服阶段(342 N)和断裂点(485 N)。加载速率为 0.1 mm/min,在上述对应的力学阶段进行

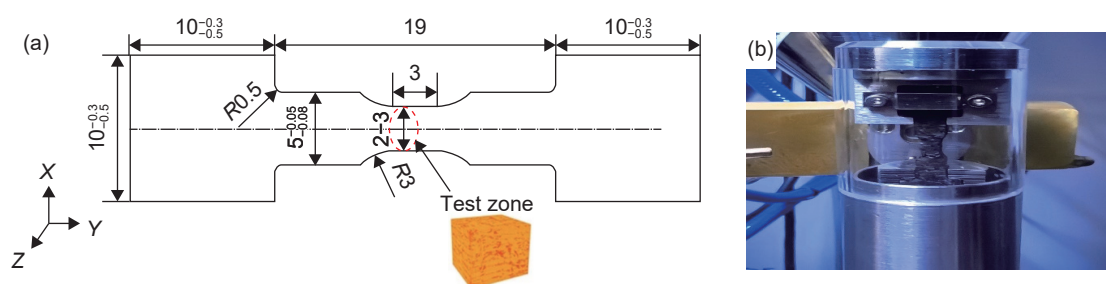


图1 实验测试试件 (a)尺寸图; (b)实物图

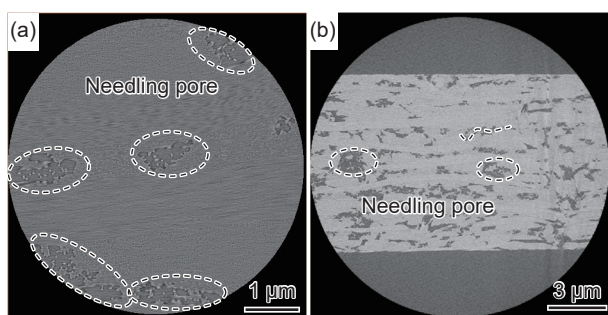
Fig. 1 Micro X-ray test specimens (a) specimen size chart; (b) specimen schematic diagram

扫描,保持对应阶段位移恒定不变获取切片图像。

2 结果与分析

2.1 二维图像数据及分析

图2为典型不同空间分辨率切片图像。当设置空间分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ 时,如图2(a)所示,扫描时间约2.5 h,可以清晰观测到存在多处针刺孔,针刺孔形貌为不规则形状。当设置空间分辨率为 $3\ \mu\text{m}$,扫描时间约1.25 h;可以观测到材料纤维束和铺层的结构,图像中深色区域是密度较低的孔隙、裂纹及针刺结构,主要出现在针刺部位和铺层之间的界面,本工作主要研究材料精细化结构以及力学性能,因此设置原位拉伸实验空间分辨率为 $3\ \mu\text{m}$,确定切片图像为灰度类型。

图2 不同空间分辨率切片图像 (a)空间分辨率 $1\ \mu\text{m}$;
(b)空间分辨率 $3\ \mu\text{m}$ Fig. 2 Image of different spatial resolution (a) spatial resolution in $1\ \mu\text{m}$; (b) spatial resolution in $3\ \mu\text{m}$

2.2 纤维几何模型及纤维参数研究方法

应用阈值化分割方法,经过统计切片结构阈值分布特征,确定纤维结构阈值数值为 $155\sim 255$ 。切片图像在成像和传输过程中会存在一定程度的噪点,纤维在充盈的基体中较难形成界限清晰的轮廓,相邻纤维之间存在边缘粘连现象。针对沿拉伸方向相邻图像之间截面的位移,应用序列图像配准算法可以实现纤维二维转换模型构建,将图像转换

至空间图像。设定圆柱体为纤维匹配基本单元,定义圆柱体中轴线向量为纤维增长路径,建立纤维三维几何模型如图3(a)所示,纤维三维几何模型可以清晰表征微观纤维,通过定义纤维参数类型,可以对铺层的纤维实现参数量化,掌握针刺工艺对结构的影响。量化数据可以用于研究在力学载荷下纤维变形演化规律,从微观层面揭示失效机理。

纤维参数主要有:(1)纤维分布角度(θ, α)函数,其中 θ 代表纤维与拉伸方向夹角, α 表示在铺层面内与 x 轴夹角;(2)纤维等效长度(equivalent fiber length);(3)纤维弯曲度(tortuosity);(4)纤维等效面积(equivalent fiber area)和纤维半径(diameter)。选择纤维分布角度(θ, α)函数和纤维等效长度,可以分别得出针刺纤维束三维几何模型(图3(b))、单向铺层纤维几何模型(图3(c)和图3(d))。

2.3 拉伸载荷下微细观结构重构及量化

原位拉伸应力-应变曲线如图4(a)所示,为初始、弹性、屈服和断裂4个力学阶段。拉伸强度预测值为 $56.7\ \text{MPa}$,为了进一步揭示纤维在拉伸载荷下的损伤过程,同时由于材料内部微细观结构差异较大,依据拉伸位移结果计算切片范围,选取在整个过程中同一段材料进行分析。图4(b)为整个实验过程中材料纤维数量演变过程,在弹性阶段($127\ \text{N}$)向屈服阶段($332\ \text{N}$)变化过程中,认为长度较短的针刺纤维束逐渐断裂,整体纤维出现数量减少的现象;屈服阶段($332\ \text{N}$)向断裂阶段($485\ \text{N}$)变化过程中,由于纤维在拉伸作用下发生取向变化同时基体出现断裂损伤,编织层和网胎层纤维数量在断裂阶段出现大范围断裂;在断裂阶段($485\ \text{N}$)纤维数量最多,其中编织层中的长纤维出现显著断裂,对复合材料承担较多的拉伸载荷。

裂纹是针刺材料制备中无法避免的一类缺陷,微小尺寸裂纹通过扫描电镜等观测仪器较难获取其随载荷增加的变化规律。通过膜增强图像处理

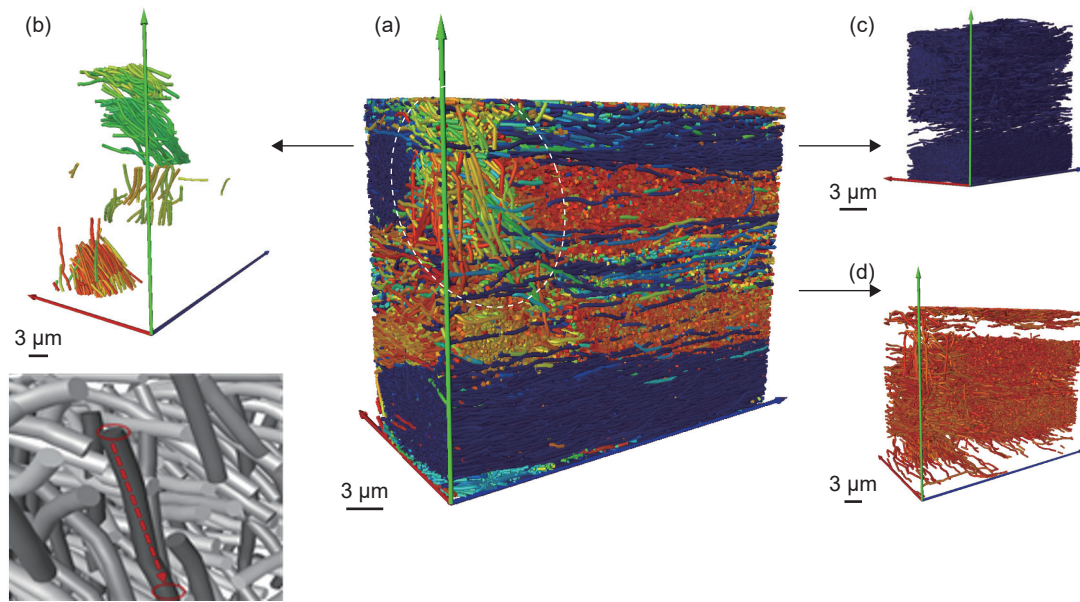


图3 纤维几何模型及纤维参数 (a)纤维几何模型; (b)针刺纤维束模型; (c)90°单向纤维模型; (d)-90°单向纤维模型
Fig. 3 Geometric model and parameters of fiber (a) geometric model of fiber; (b) model of needing bundle; (c) model of 90° unidirectional fiber; (d) model of -90° unidirectional fiber

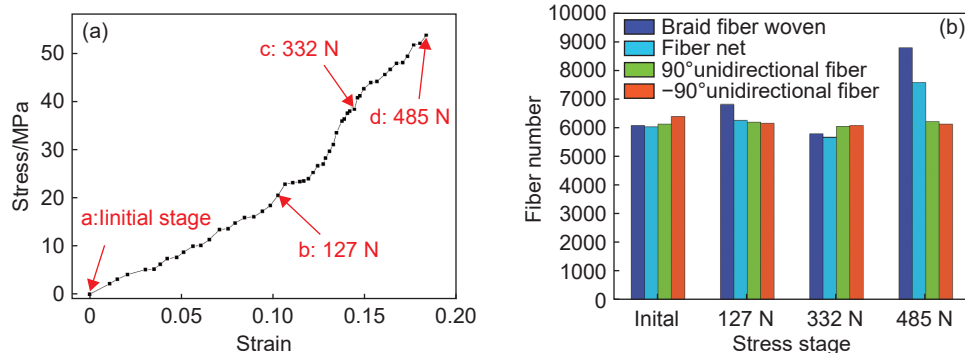


图4 拉伸实验结果 (a)拉伸应力-应变曲线; (b)纤维数量演化规律

Fig. 4 Results of tensile test (a) tensile stress-strain curves; (b) law of fiber quantity evolution

方法, 设定裂纹是一类膜结构, 完整识别裂纹位置并提取裂纹结构。重构同一测试段材料的多阶段三维几何重构模型, 量化在不同力学阶段的裂纹数量及体积数值变化过程, 可以有效描述材料微细观失效机理。

图5(a)是初始阶段裂纹几何重构模型, 量化计算可知较大体积集中在 $0.0019 \sim 0.0025 \text{ mm}^3$ 范围内; 初始裂纹整体分布较均匀。图5(b)为试件断口 SEM 形貌, 图中标注处表明 90°单向纤维层和编织层纤维束发生分离式破坏性断裂, 铺层之间界面断裂破坏。图5(c)为裂纹重构模型在不同力学阶段的数量和体积演化规律, 弹性阶段(127 N)逐渐到达屈服阶段(332 N)后, 网胎层损伤扩展到相邻界面, 相邻裂纹出现连通现象, 裂纹数量减少, 表明纤维在拉伸作用下发生取向变化引起裂纹的汇

聚和体积增大, 较大的体积集中在 $0.0031 \sim 0.0042 \text{ mm}^3$ 区间; 直至在断裂阶段(485 N)试件破坏, 裂纹数量和最大体积迅速增大, 裂纹数量是初始阶段的 1.425 倍。断裂处的体积达到 0.01 mm^3 。通过建立裂纹三维重构模型, 可以量化得出断裂位置的裂纹体积从初始阶段到断裂阶段体积增大了 34%。图5(d)是裂纹几何模型、纤维几何模型和试件断裂处重构模型, 表明在单向纤维层裂纹呈现贯穿状, 在断裂阶段贯穿状裂纹的扩展是引起材料失效破坏的原因。

3 有限元模型

在实现三维针刺复合材料精细化结构描述和表征后, 可知材料的有限元模型具有工艺参数层次

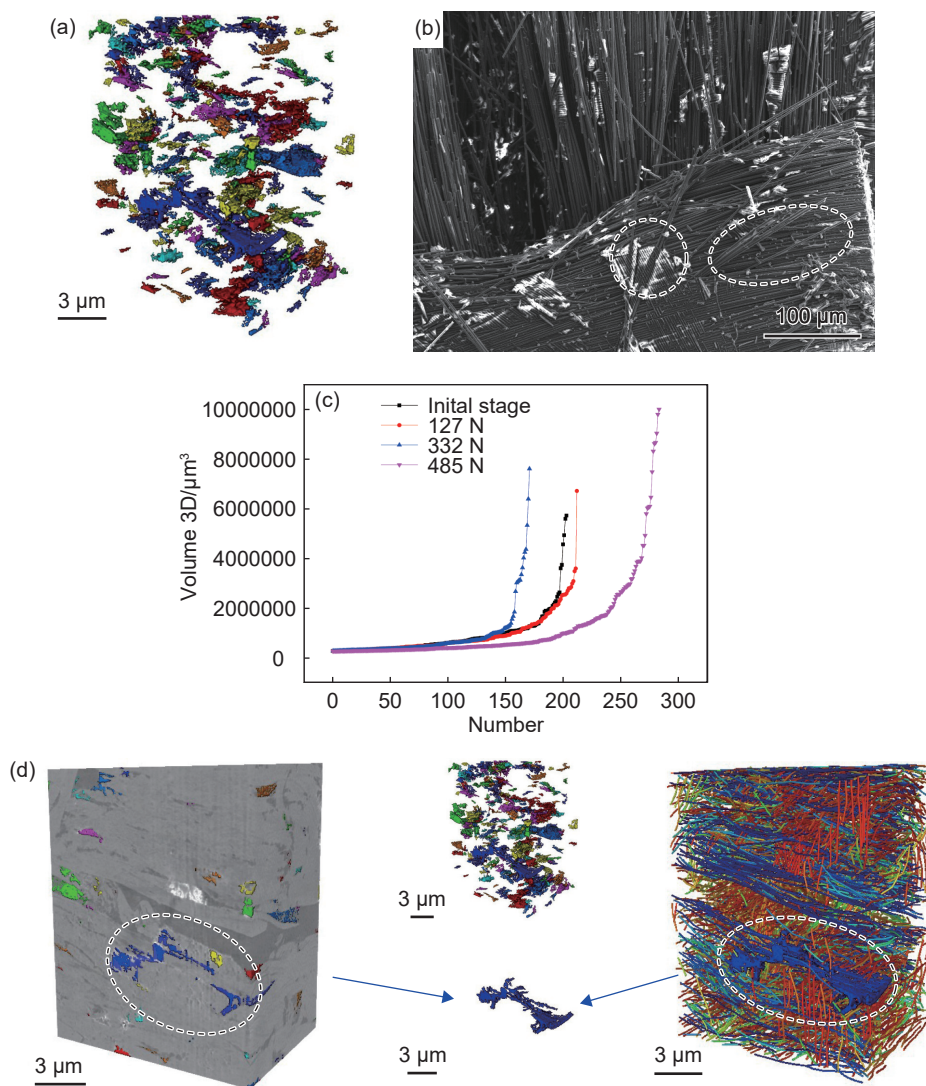


图 5 裂纹重构模型以及量化方法 (a) 初始阶段裂纹重构模型; (b) 试件断口 SEM 形貌; (c) 裂纹体积及数量演化过程; (d) 断裂阶段重构模型

Fig. 5 Method of crack quantization and crack change with load (a) crack model in the initial stage; (b) SEM morphology of fracture surface; (c) law of crack volume and number; (d) fracture stage reconstruction model

化的特征。纤维束的弹性性能可以作为输入计算编织层的弹性性能。编织层、单向纤维层和网胎层的弹性性能可以作为输入计算典型代表性单元弹性性能,最后结合针刺工艺参数对复合材料宏观结构建模,赋予典型代表性单元的材料属性,结合不同的强度准则,得到宏观模型的强度性能。其中纤维束弯曲路径、针刺孔直径、铺层纤维体积分量和铺层尺寸等数据取表征实验结果。整体研究方法如图 6 所示。

针刺纤维束、编织层内纤维束、网胎层和单向纤维铺层设定为纤维体积含量不同的有限元模型,建立的单胞如图 7(a)所示。编织层中纤维束在针刺工艺下横截面积和路径发生变化(图 7(b)),通过提取纤维路径节点坐标,建立纤维束路径函数如式(1)所示,纤维束中心弯曲路径由多个横截面的

中心点来确定。本工作通过 Python 语言编写纤维束程序,在有限元软件 Abaqus 2021 软件中调用,实现的编织层单胞模型如图 7(c)和(d)所示。

$$\begin{cases} x = \begin{cases} \left(\frac{\alpha}{2} + \Delta x\right) \cos(2\pi t) + \Delta x, & (0.25 \leq t \leq 0.75) \\ \left(\frac{\alpha}{2} - \Delta x\right) \cos(2\pi t) + \Delta x, & (t < 0.25 \text{ or } t > 0.75) \end{cases} \\ y = \begin{cases} \frac{\lambda}{2} (\sin(2\pi t))^\gamma, & (0 \leq t \leq 0.5) \\ -\frac{\lambda}{2} (-\sin(2\pi t))^\gamma, & (0.5 \leq t \leq 1) \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: γ 为横截面变量,如图 7(b)所示,当 $\gamma=1$ 时截面为椭圆形; (α, λ) 为横截面宽度和高度变量; Δx 为横截面沿路径水平方向的偏移量; t 为横截面不同位置角度参数,当 $t=0$ 时角度为 0° ,当 $t=1$ 时角度为 180° ; (x, y) 为横截面上各点的坐标值变量。

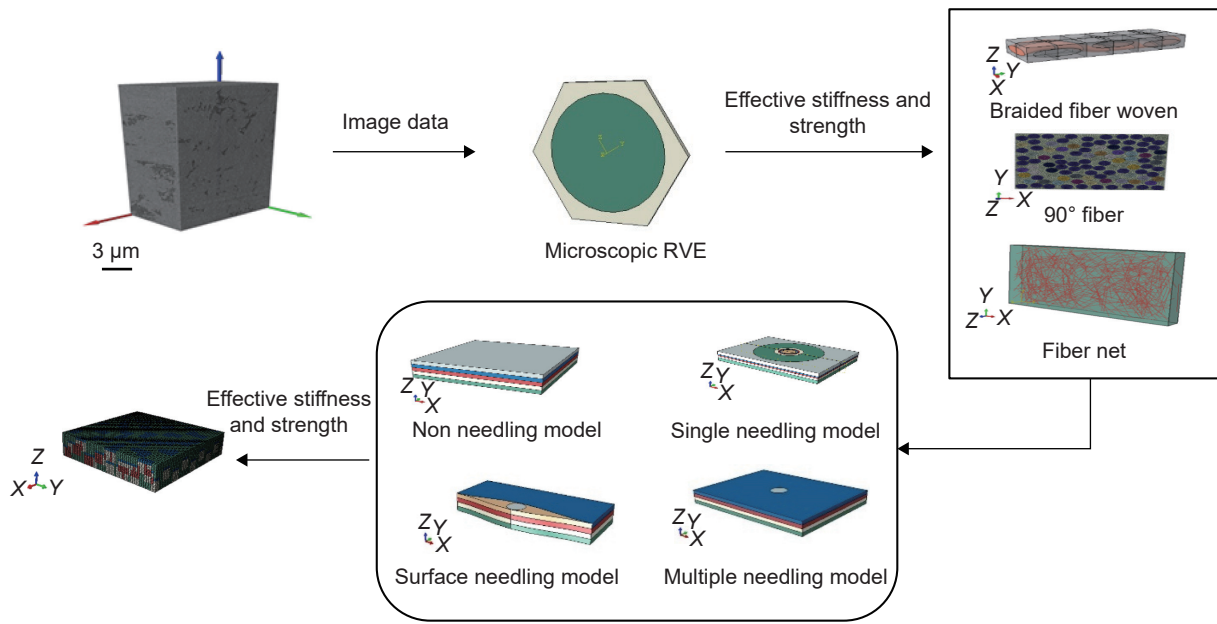


图6 层次化模型及参数计算方法

Fig. 6 Hierarchical modeling and calculation process of process parameters

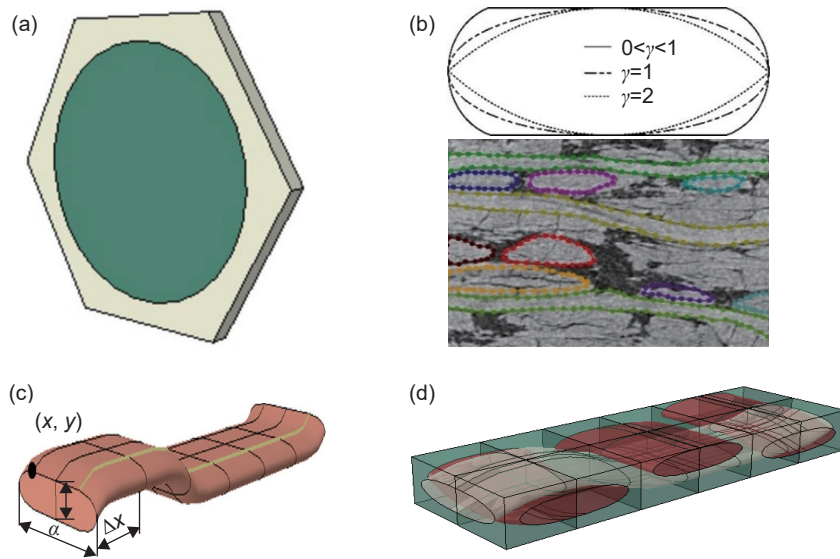


图7 材料单元模型 (a)单向纤维层和针刺纤维束单元; (b)纤维束截面参数和路径确定方法; (c)纤维束; (d)编织层纤维束单元

Fig. 7 Component unit cells (a) unidirectional fiber layer and needling fiber bundle cells; (b) fiber bundle section parameters and fiber determination paths; (c) fiber bundle; (d) braided bundle cells

当采用有限元模型来预测网胎层单元模型的刚度和强度时,纤维模型不能简化为梁单元或者杆单元,需要建成三维实体单元,并设定纤维的真实直径,单元模型中纤维分布方向不能通过压缩干纤维织物得到。纤维的真实直径较小,显性建出所有纤维后较难生成可用的网格,纤维网格尺寸较小,基体体积相对很大,会导致结构网格数量庞大。因此,本工作对于网胎层模型的刚度和强度通过文献介绍的求解解析解方法计算完成^[23-25],利用正交性封闭近似修正模型(IBOF)简化纤维在真实三维模

型分布四阶张量,计算出任一单向分布纤维的等效力学性能,其次再计算网胎层模型内部完整任意方向纤维等效性能。

三维针刺复合材料铺层经过多次针刺,针刺孔在铺层内密集分布,某些位置被针刺一次,某些位置重复针刺。参考文献[8-9]将材料的全部结构归类为4种典型局部代表性单元,包括:(1)无针刺单元,包含基本铺层;(2)重复针刺单元,认为具有不同针刺纤维束含量的特征;(3)表层针刺单元,认为针刺使表层铺层纤维取向弯曲,弯曲路径的数值采

用三角函数来描述, 如式(2)所示, 式中: η 取 $[0\sim 1]$ 之间的任意数值; (4) 单独针刺单元, 针刺纤维使得纤维纵向偏转, 铺层在厚度方向变形可以通过式(3)表示, 式中: η 取在 $[0\sim 1]$ 之间的任意数值; D 为纤维直径; L 为单元长度; W 为单元宽度; H 为单元高度。对于上述典型局部纤维单元模型, 基于 Python 语言编写算法文件在有限元软件 Abaqus 调用, 实现典型局部代表性单元模型的建立, 如图 8 所示。

$$\begin{cases} x = \frac{L}{2}\eta \\ y = \frac{1}{2}\left[\frac{D}{2} + \left(\frac{D}{2}\right)/20\right] \cdot \left[\cos\left(\pi x / \left(\frac{L}{2}\right)\right) + 1\right] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = \frac{D}{2} + \left(\frac{L}{2} - \frac{D}{2}\right)\eta \\ y = H \cdot \sin\left[\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{x - D/2}{L/2}\right)^2\right] \end{cases} \quad (3)$$

为了更加接近真实针刺达到一定的针刺密度, 需要对同一铺层多次针刺, 每次针刺前需要设置一定的布针方式。采用的布针形式如表 1 所示。考虑针刺孔具有随机性分布特征, 建立的复合材料单元需要完整的针刺特征结构, 并同时考虑到计算效率, 本工作设定的复合材料单元几何尺寸为 $48\text{ mm} \times 48\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 实现针刺过程模拟出的第一层针迹如图 9(a) 所示, 建立的材料周期性单元如图 9(b) 所示。

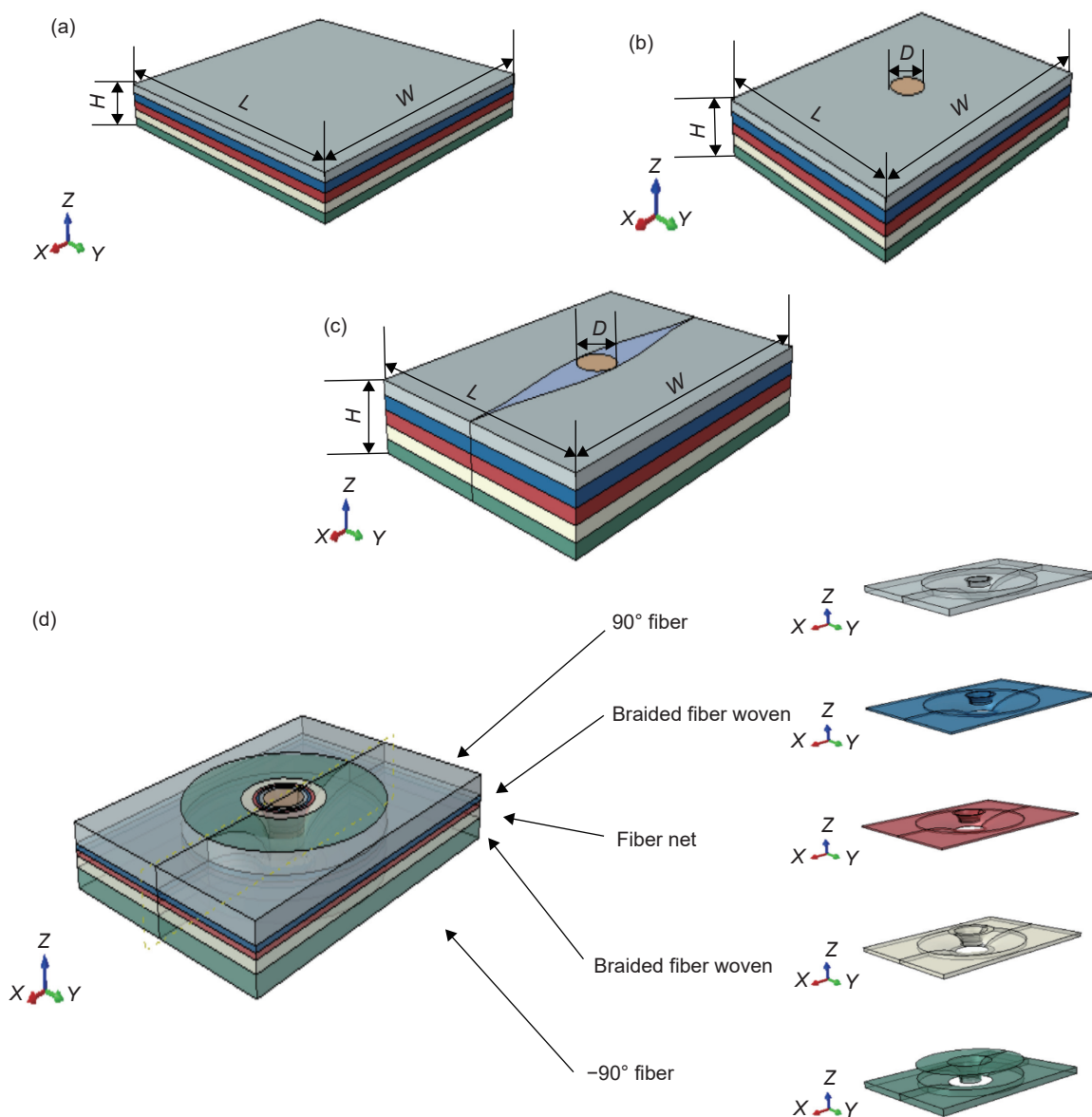


图 8 典型局部代表性单元 (a) 无针刺单元; (b) 重复针刺单元; (c) 表层针刺单元; (d) 单独针刺单元
 Fig. 8 Representative elementary volume (a) non needling model; (b) multiple needling model; (c) surface needling model; (d) single needling model

从表 3 弹性性能预测结果可知,网胎层满足横观各向同性;针刺对单胞的应力应变分布有影响,在针刺部位存在较大的应力,无针刺单元整体面内性能最高,重复针刺单元面内性能最低。本工作预测得出的弹性模量为 62.4 Pa 高于实验值 56.7 GPa,二者相差 10.1%,原因是有限元模型计算过程中未考虑材料基体和界面存在的孔隙等缺陷,导致基体弹性模量预测值偏高。

3.2 损伤演化模型以及强度预测

三维针刺复合材料微细观结构复杂,损伤形式多变相互关联耦合,目前还没有形成统一的损伤失效判据。因此,对于三维针刺复合材料强度预测采用渐进损伤有限元分析方法,基体和纤维采用最大主应力强度准则作为初始损伤判据,纤维束采用文献 [25] 中的方法,区分不同的失效模式,具体见式(4)。

$$\left\{ \begin{aligned} f_1 &= \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right) + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \\ f_2 &= \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 \\ f_3 &= \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \\ f_4 &= \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_c} \right) + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: X_T , Y_T 和 Y_C 分别为纤维束纵向拉伸强度、横向拉伸强度、横向压缩强度; S_{12} 和 S_{23} 为纤维束纵向和横向剪切强度; σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} , σ_{12} , σ_{13} 和 σ_{23} 为纤维束正应力和切应力分量; f_1 为沿纵向拉伸-剪切失效判据; f_2 为沿纵向压缩失效判据; f_3 为横向拉伸-剪切失效判据; f_4 为横向压缩-剪切失效判据。由于纤维束的刚度退化模式复杂,与失效破坏模式有关,采用渐进变化的折减因子模拟纤维束刚度的折减,定义纤维束损伤演化过程的损伤因子 T_i 为指数函数模型,损伤因子 T_i 与纤维束不同失效状态相对应,损伤变量 ω 取值在 0~1 之间,与损伤因子 T_i 相关,如式(5)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} T_i &= 1 - \exp \left[\frac{1 - f_i^m}{m} \right] \\ \omega_1 &= \max(T_1, T_2) \\ \omega_2 &= \omega_3 = \omega_6 = \max(T_3, T_4) \\ \omega_4 &= \omega_5 = \max(T_1, T_2, T_3, T_4) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中: f_i 为式(4)中对应纤维束的失效判据; m 为损伤退化参数,通过本工作的原位拉伸实验拟合应力-应变曲线得出。针对不同的失效准则计算损伤因子,从而得出不同损伤状态下的损伤变量;上述分析渐进损伤过程基于 Fortran 语言编写 UMAT 子程序,用 Abaqus 软件来预测三维针刺复合材料拉伸损伤失效行为。模型应用拉伸应变模

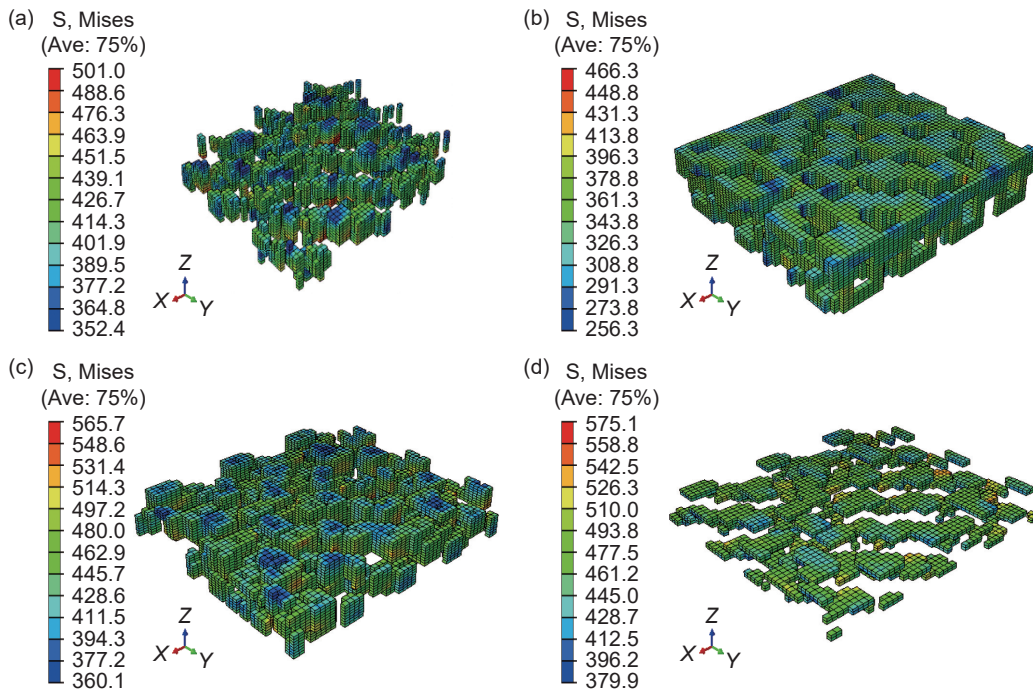


图 10 拉伸应变 $\varepsilon=1\%$ 下各局部单元应力分布 (a)重复针刺单元; (b)无针刺单元; (c)单独针刺单元; (d)表面针刺单元

Fig. 10 Stress distribution in different model with tensile strain $\varepsilon=1\%$ (a) multiple needling model; (b) non needling model; (c) single needling model; (d) surface needling model

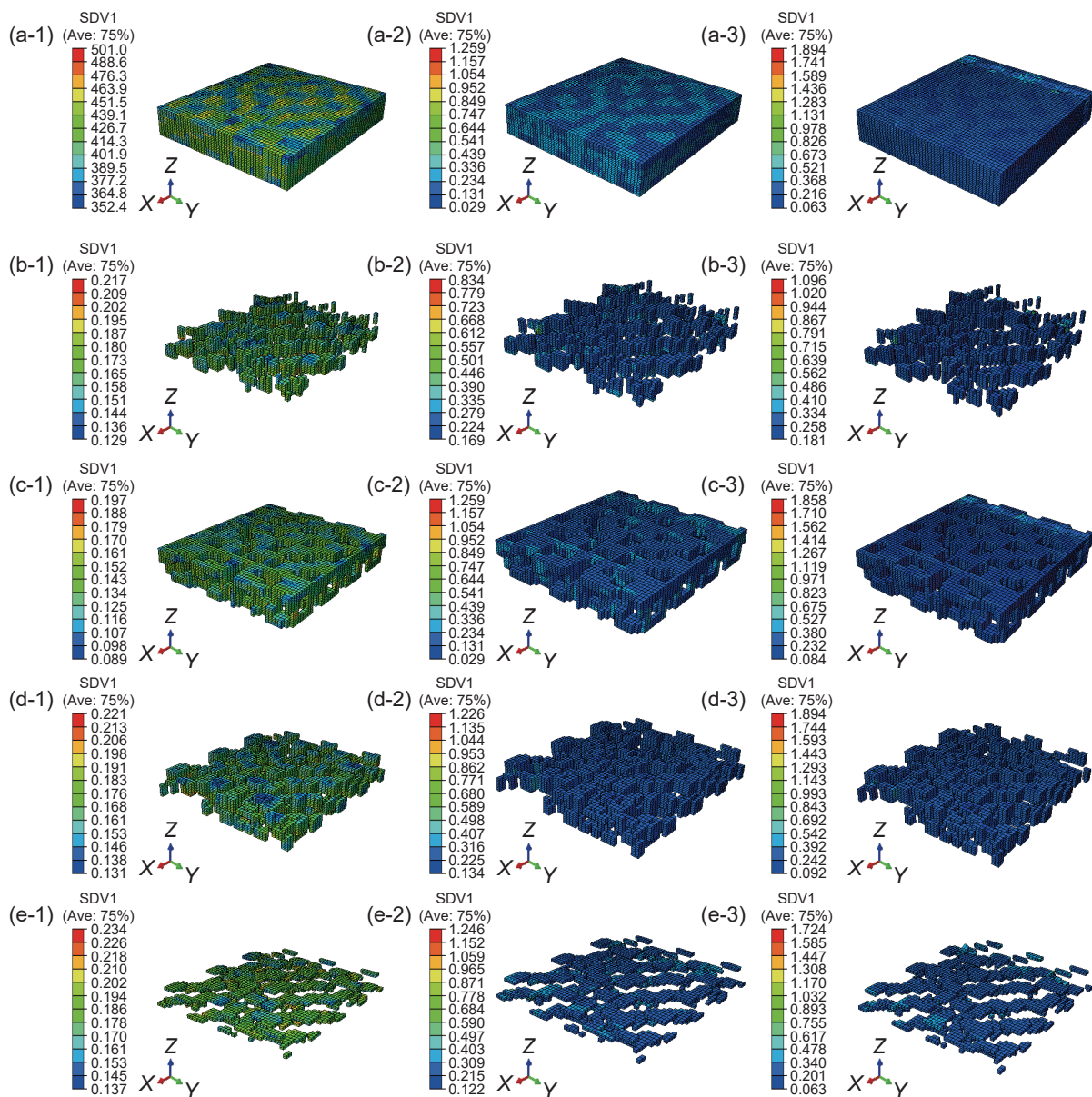


图 11 不同拉伸应变下损伤变量演化规律 SDV1 演化 (a)单胞;(b)重复针刺单元;(c)无针刺单元;(d)单独针刺单元;(e)表面针刺单元;(1) $\varepsilon=1\%$;(2) $\varepsilon=1.6\%$;(3) $\varepsilon=2\%$

Fig. 11 Damage evolution of different tensile strain loads (a) unit cells; (b) multiple needling model; (c) non needling model; (d) single needling model; (e) surface needling model; (1) $\varepsilon=1\%$; (2) $\varepsilon=1.6\%$; (3) $\varepsilon=2\%$

拟轴向拉伸的载荷工况, 应变 ε 分别为 1%、1.6%、2%, 损伤演化过程变化如图 10 和图 11 所示。

图 10 为在横向拉伸应变 $\varepsilon=1\%$ 下不同单元应力分布, 表面针刺单元最大应力为 575.1 MPa, 其次单独针刺单元最大应力为 565.7 MPa, 最大应力数值大于重复针刺单元和无针刺单元的最大应力。从最大应力数值结果可知在拉伸载荷增加的初期, 针刺工艺首先对材料面内纤维损伤较大, 逐步扩大到单独针刺单元, 相比较无针刺单元存在应力集中程度较低。

SDV (solution dependent variable) 数值表示材

料单元在载荷施加过程内损伤状态, 是含损伤的均匀化刚度矩阵中刚度分量与未受载荷初始均匀化刚度矩阵中刚度分量的比值, 0 表示没有损伤, 1 表示完全损伤。本工作开发的 UMAT 程序中, SDV1 代表沿拉伸方向损伤状态变量。图 11 每行分别为单胞、重复针刺单元、无针刺单元、单独针刺单元、表面针刺单元计算结果随拉伸应变增加损伤分布结果。由图中可知, 随着横向拉伸应变逐渐增加, 针刺部位附近存在应力集中, 不同局部单元损伤演变表现出不同的模式。在 $\varepsilon=1\%$ 应变下, 图 11(a-1)~(e-1) 可知, 材料处于弹性阶段中几类典型单元均

没有出现损伤,损伤最早会发生在表面针刺单元和单独针刺单元;在 $\varepsilon=1.6\%$ 应变下,图11(a-2)~(e-2)可知,每类单元均逐渐出现损伤,同时无针刺单元损伤迅速增大,分析原因是基体承担较多载荷,同时基体强度较低。在 $\varepsilon=2\%$ 应变下,由图11(a-3)~(e-3)可知,在单胞和4类典型局部单元均出现较多损伤部分,大量的破坏断裂,界面已经出现分层开裂,其中图11(d-3)单独针刺单元累积损伤显著大于其他单元,说明材料横向拉伸强度主要由单独针刺单元控制。

图12(a-1)~(a-3)为重复针刺单元在针刺方

向损伤SDV5演化情况,对比重复针刺单元沿拉伸方向损伤图(图11(b-1)~(b-3))可知,由于材料具有典型的泊松效应,重复针刺单元在针刺方向累积失效单元数量显著增多,预测结果验证了重复针刺区域会导致材料面内刚度和强度的降低。图12(b-1)~(b-3)为单胞有限元模型的刚度SDV10衰减结果,材料单胞模型刚度的下降是纤维和基体在多种损伤模式累加效果的反映,在应变逐渐增加到 $\varepsilon=2\%$ 过程中,材料失去承载能力的单元逐渐增多,在图12(b-3)的标示处单胞单元变形较大,表现出断裂的趋势。

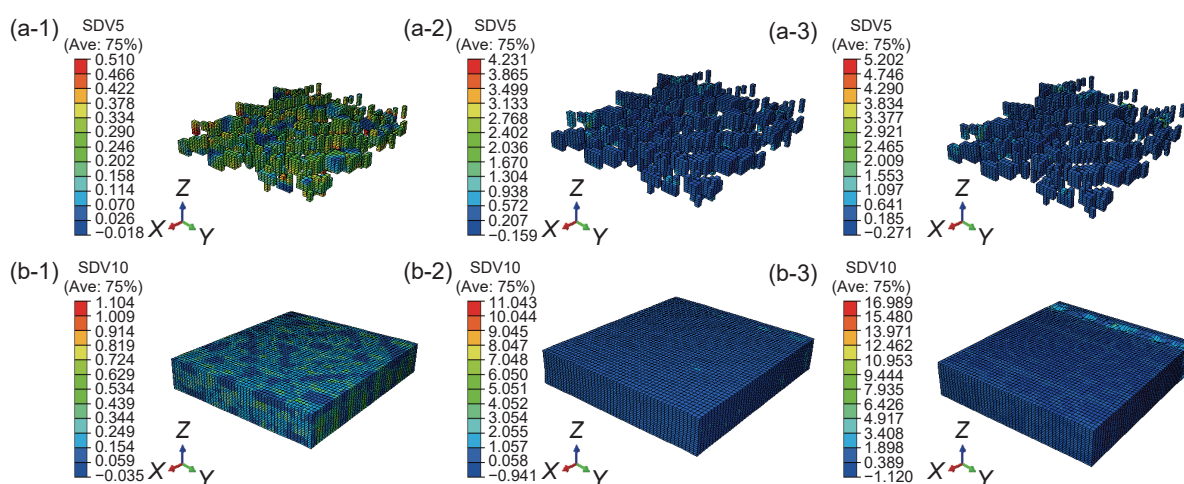


图12 不同拉伸应变下损伤变量演化规律 (a)重复针刺单元损伤变量SDV5演化;(b)单胞损伤变量SDV10演化;(1) $\varepsilon=1\%$;(2) $\varepsilon=1.6\%$;(3) $\varepsilon=2\%$

Fig. 12 Damage evolution of different tensile strain loads (a) multiple needling model SDV5 damage evolution; (b) unit cells SDV10 damage evolution; (1) $\varepsilon=1\%$; (2) $\varepsilon=1.6\%$; (3) $\varepsilon=2\%$

4 结论

(1)通过阈值分割、膜增强、纤维基本单元提取等图像分析方法,建立材料以及铺层的纤维重构模型,真实再现材料内部纤维、裂纹等精细化结构真实形貌。量化描述纤维数量和裂纹在拉伸应变下的演变数据,形成对材料完整成熟的表征方法。

(2)在拉伸应变下试件断口参差不齐,纤维被拔出断裂,通过图像处理和重构几何模型等方法得出纤维数量等参数的变化规律,结果表明在不同力学阶段编织层和网胎层纤维相比较单向层纤维数量增加较多,反映针刺工艺对复合材料铺层纤维的损伤程度差异性较大。通过建立裂纹三维重构模型,量化得到断裂位置的裂纹体积在初始阶段到断裂阶段体积增大了34%。

(3)多尺度有限元方法结合渐进损伤模型,可

以准确模拟局部典型单元和单胞拉伸渐进失效过程。横向拉伸应变增加过程中,由于针刺工艺显著影响表面针刺单元和单独针刺单元损伤逐渐累积,在应变大于2%后,沿加载方向4类典型局部针刺单元发生大量失效部分,结合实验现象表明针刺纤维束断裂后,材料继续承载能力迅速下降,刚度退化明显。通过对比拉伸强度的预测数值,与实验误差为10.1%,验证了本工作建立的单胞模型和强度预测方法的适用性。

参考文献:

- [1] NAOUAR N, VASIUKOV D, PARK C H, et al. Meso-FE modelling of textile composites and X-ray tomography [J]. Journal Material Science, 2020, 55: 16969-16989.
- [2] LIU X D, ZHANG D T, SUN J, et al. Refine reconstruction and verification of meso-scale modeling of three dimensional five-directional braided composites from X-

- ray computed tomography data[J]. *Composite Structures*, 2020, 256: 113136.
- [3] RAUL M, ROCIO S, FEDERICO S, et al. Influence of hybridisation on energy absorption of 3D woven composites under low-velocity impact loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 165: 1-21.
- [4] BARBURSKI M, STRAUMIT I, ZHANG X, et al. Micro-CT analysis of internal structure of sheared textile composite reinforcement[J]. *Composites Part A*, 2015, 73: 45-54.
- [5] XU F, SUN L, ZHU L, et al. X-ray 3D microscopy analysis of fracture mechanisms for 3D orthogonal woven glass/epoxy composites with drilled and moulded in holes[J]. *Composites Part B*, 2018, 133: 193-202.
- [6] MOHAMMADREZA A, MAZIAR R, TIM B, et al. Mechanical and tribological properties of a novel hydrogel composite reinforced by three-dimensional woven textiles as a functional synthetic cartilage[J]. *Composites Part A*, 2018, 115: 123-133.
- [7] PETER J C, JOHN F, CHRIS D, et al. Modeling as-manufactured fiber-reinforced microstructures based on X-ray microcomputed tomography[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 214, 109004: 1-11.
- [8] 刘昱, 王荣桥, 胡殿印, 等. 针刺复合材料层次化建模及弹性性能预测[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(2): 107-119.
- LIU Y, WANG R Q, HU D Y, et al. Hierarchical modeling and elastic property prediction of the needled composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(2): 107-119.
- [9] XIE J, LIANG J, FANG G, et al. Effect of needling parameters on the effective properties of 3D needled C/C-SiC composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 117: 69-77.
- [10] NIU B, ZHANG H Y, ZHEN Q, et al. Micro fracture behaviors of needled short-chopped fiber reinforced phenolic aerogel composites based on *in-situ* X-ray micro CT[J]. *Composites Communications*, 2022, 33: 101224.
- [11] GE L, LI H M, ZHONG J H, et al. Micro-CT based trans-scale damage analysis of 3D braided composites with pore defects[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 211: 108830.
- [12] YUN F J, GUO Q Y, JIN K D, et al. Adopting traditional image algorithms and deep learning to build the finite model of a 2.5D composite based on X-Ray computed tomography[J]. *Composite Structures*, 2021, 114440: 1-9.
- [13] HUANG W, CAUSSE P, BRAILOVSKI V, et al. Reconstruction of mesostructural material twin models of engineering textiles based on micro-CT aided geometric modeling[J]. *Composites Part A*, 2019, 124: 105481.
- [14] GIGLIOTTI M, PANNIER Y, GONZALEZ R A, et al. X-ray micro computed tomography characterization of cracks induced by thermal cycling in non-crimp 3D orthogonal woven composite materials with porosity[J]. *Composites Part A*, 2018, 112: 100-110.
- [15] 朱昭君, 王学仁, 强洪夫. 温度参数下轴编 C/C 复合材料的超高温热结构性能分析[J]. *推进技术*, 2022, 43(6): 290-299.
- ZHU Z J, WANG X R, QIANG H F. Analysis of ultra high temperature thermo-structural characteristics of four-directional carbon/carbon composites with temperature parameter[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6): 290-299.
- [16] 戚云超, 方国东, 梁军, 等. 三维针刺 C/C-SiC 复合材料预制体工艺参数优化[J]. *材料工程*, 2020, 48(1): 27-33.
- QI Y C, FANG G D, LIANG J, et al. Optimization of process parameters of three-dimensional needled preforms for C/C-SiC composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(1): 27-33.
- [17] SUN R J, GUO L C, LI Z X, et al. A novel approach to assessing yarn/matrix (or yarn/yarn) *in situ* interfacial strength in 3D woven composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 213: 108893.
- [18] YANG Z, JIAO Y N, XIE J B, et al. Modeling of 3D woven fibre structures by numerical simulation of the weaving process[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 108679: 1-10.
- [19] GREENA S D, MATVEEV M Y, LONG A C, et al. Mechanical modelling of 3D woven composites considering realistic unit cell geometry[J]. *Composite Structures*, 2014, 118: 284-293.
- [20] MONICA J E, KRISTINE M J, ANDERS B D, et al. Individual fibre segmentation from 3D X-ray computed tomography for characterising the fibre orientation in unidirectional composite materials[J]. *Composites Part A*, 2017, 97: 83-92.
- [21] UPADHYAY S, SMITH A, VANDEPITTE D, et al. Deep-learning versus greyscale segmentation of voids in X-ray computed tomography images of filament-wound composites[J]. *Composites Part A*, 2024, 177: 107937.
- [22] 成博, 弓站朋, 邓俊楷, 等. 针刺 C/C 复合材料拉伸强度预测的深度学习模型[J]. *固体火箭技术*, 2022, 45(6): 851-859.
- CHENG B, GONG Z P, DENG J K, et al. Deep learning

- prediction model for tensile strength of needle-punched C/C composites[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2022, 45(6): 851-859.
- [23] DU H C, TAI H K. Invariant-based optimal fitting closure approximation for the numerical prediction of flow-induced fiber orientation[J]. *Journal of Rheology*, 2001: 169-194.
- [24] SURESH G A, CHARLES L T. The use of tensors to describe and predict fiber orientation in short fiber composites[J]. *Journal of Rheology*, 1987: 751-784.
- [25] YU J, ZHOU C, ZHANG H. A micro-image based reconstructed finite element model of needle-punched C/C composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 153: 48-61.
-
- 收稿日期: 2024-09-30; 录用日期: 2025-01-08
基金项目: 国家自然科学基金(12272321); 河南省高等学校重点科研项目(26A590006, 23A590004)
通讯作者: 朱昭君(1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为飞行器结构飞行力学和复合材料多尺度设计及力学, 联系地址: 河南省郑州市郑东新区文苑西路 15 号(450046), E-mail: zhuzhaojun.2009@163.com

(本文责编: 张 琴)