

基于X射线原位拉伸的三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料的微观损伤演化

钱震 曹宇 周耀忠 蔡宏祥 赵欣 王鹏 侯敏 陈炳斌 牛波 张亚运 龙东辉

Micro-fracture behaviors of 3D needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composites based on in-situ X-ray

QIAN Zhen, CAO Yu, ZHOU Yaozhong, CAI Hongxiang, ZHAO Xin, WANG Peng, HOU Min, CHEN Bingbin, NIU Bo, ZHANG Yayun, LONG Donghui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

连续石墨纤维增强铝基复合材料准静态拉伸损伤演化与断裂力学行为

Damage evolution and fracture behaviors of continuous graphite fiber reinforced aluminium matrix composites subjected to quasi-static tensile loading

复合材料学报. 2020, 37(4): 907–918 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190726.001>

三维角联锁机织铝基复合材料面内拉伸力学行为与失效机制

Mechanical behavior and failure mechanism of the 3D angle interlocking woven reinforced aluminum matrix composites under in-plane tensile loading

复合材料学报. 2021, 38(9): 2997–3007 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.007>

有机相对骨组织力学性能影响的有限元分析

Finite element analysis on the effect of organic phase on mechanical properties of bone tissue

复合材料学报. 2018, 35(1): 238–243 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170412.006>

基于面-内胞模型的三维四向编织复合材料渐进损伤数值模拟

Progressive damage simulation of 3D four-directional braided composites based on surface-interior unit-cells models

复合材料学报. 2021, 38(2): 545–556 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200609.001>

非热压罐工艺模具对复合材料加筋壁板固化变形影响的有限元分析

FEM analysis of the mold influence on curing deformation of stiffened composite panel in the out-of-autoclave process

复合材料学报. 2018, 35(2): 347–355 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170412.005>

陶瓷基复合材料三维有效应力强度失效模型

Effective stress based three-dimensional strength failure model for ceramic matrix composites

复合材料学报. 2019, 36(12): 2912–2919 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190408.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

基于 X 射线原位拉伸的三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料的微观损伤演化



分享本文

钱震¹, 曹宇¹, 周耀忠², 蔡宏祥¹, 赵欣², 王鹏¹, 侯敏²,
陈炳斌¹, 牛波¹, 张亚运¹, 龙东辉^{*1}

(1. 华东理工大学 化工学院, 上海 200237; 2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)

摘要: 纤维布/网胎交替叠层针刺是一种低成本、易成型的立体织物制造技术, 但是针刺的随机性会给材料的损伤演化、力学分析和性能预测带来极大的挑战。本文以纤维布/网胎交替叠层针刺增强的纳米孔树脂基防隔热复合材料为例, 采用原位拉伸 X 射线 Micro-CT 技术, 揭示了复合材料在轴向拉伸载荷下的损伤演化过程。并采用纤维中心线自动跟踪算法对采集的三维图形数据化处理, 量化分析了纤维在拉伸过程中的角度偏转。最后基于 Micro-CT 重构的三维结构, 建立了高精度的有限元分析模型, 并进行了轴向拉伸行为分析。结果表明: 复合材料中的损伤始于材料的最外层, 其中网胎层中的微裂纹主要产生于针刺位点处的局部富树脂区域, 而纤维布层中的微裂纹主要源于纤维束中紧密排布的纤维之间; 纤维布可以通过阻隔裂纹向材料内部继续扩展的方式, 提升材料的韧性; 在轴向拉伸载荷下, 材料中的纤维会一致地向外部发生偏转, 表现出负泊松比的性质, 避免了断口处的“颈缩”现象; 有限元分析与实验结果吻合良好。本文的研究方法和结果可为三维复杂结构材料的微观断裂分析、性能预测与结构优化提供参考。

关键词: 原位 Micro-CT 技术; 损伤演化; 针刺纤维预制体; 有限元分析; 纳米孔树脂

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)08-4460-11

Micro-fracture behaviors of 3D needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composites based on in-situ X-ray

QIAN Zhen¹, CAO Yu¹, ZHOU Yaozhong², CAI Hongxiang¹, ZHAO Xin², WANG Peng¹, HOU Min²,
CHEN Bingbin¹, NIU Bo¹, ZHANG Yayun¹, LONG Donghui^{*1}

(1. School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Beijing Xinhang Mechanics & Electricity Equipment CO., LTD., Beijing 100074, China)

Abstract: Alternately stacking needling technology is a straight forward way to prepare three-dimensional (3D) fabrics, but randomly needling process will bring great challenges to the damage evolution, mechanical analysis and property prediction. In this paper, the damage evolution of nanoporous phenolic composites reinforced by alternately stacking fiber felt and woven fabric was revealed by in-situ X-ray Micro-CT device. And the angle deflections of fiber were described quantitatively under the loading of axial tensile by automatic tracing of microtubule centerlines. Finally, based on the 3D reconstructed structure, a high-precision finite element analysis model was established, and the axial tension mechanical behavior analysis was carried out. The results show that the damage in composite starts from the outmost layer where the microcracks in the fiber felt mainly originate from the resin-rich zone in the needling area, while the microcracks in the woven fabric are among filaments in fiber bundle. Besides, the woven fabric can improve the toughness of composite by preventing the microcrack expanding into the

收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-10-14; 录用日期: 2022-10-17; 网络首发时间: 2022-10-17 10:41:16

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221014.005>

基金项目: 国家自然科学基金 (22078100; 52102098); 中国博士后科学基金 (2022 M711140)

National Natural Science Foundation of China (22078100; 52102098); Postdoctoral Science Foundation of China (2022 M711140)

通信作者: 龙东辉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为热防护材料与技术 E-mail: longdh@ecust.edu.cn

引用格式: 钱震, 曹宇, 周耀忠, 等. 基于 X 射线原位拉伸的三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料的微观损伤演化 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4460-4470.

QIAN Zhen, CAO Yu, ZHOU Yaozhong, et al. Micro-fracture behaviors of 3D needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composites based on in-situ X-ray[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4460-4470(in Chinese).

inner. The fibers in composite will consistently deflect to the outside, showing the property of negative Poisson's ratio, avoiding the "neck contraction" phenomenon at the fracture. The finite element analysis agrees with the results of experiments. The methods and results in this paper can provide a precious reference for microscopic fracture analysis, property prediction and structural optimization of complex 3D composite.

Keywords: in-situ Micro-CT; damage evolution; needling fabric; finite element analysis; nanoporous resin

酚醛树脂基复合材料具有轻质、热导率低、耐烧蚀等优点,被广泛应用于空天飞行器的热防护系统中^[1-2]。早期的 2D 碳/酚醛复合材料虽然能够有效抵御深空探测任务中高热流对表面的冲刷,但是其整体密度和热导率偏大,防隔热效率不高^[3]; 90 年代以轻质-抗烧蚀为目标发展的酚醛浸渍碳烧蚀材料 (Phenolic impregnated carbon ablator, PICA), 由于采用多孔酚醛基体浸渍短切纤维的结构形式,导致其力学性能偏低,仅适用于低剪切、中-低热流环境^[4]; 而进入 21 世纪以来,三维机织织物得到广泛发展^[5],使酚醛复合材料在保证力学性能和抗烧蚀能力的同时,具备良好的隔热性能。但是 3D 机织织物的构造复杂、制备周期长、生产成本低,难以大规模成型,亟需一种简单的三维织物制造工艺进行替代。

针刺技术用于制备三维结构非织造材料,具有成本较低、易成型的优势^[6]。通过引入空间内随机分布的短切纤维(即网胎纤维毡),能够有效切断纤维的热传导并降低材料的密度;进一步,通过引入纤维布可以在不影响材料在厚度方向的隔热性基础上,大幅提高复合材料的力学强度;而采用纤维网胎和纤维布逐层交替针刺的方案,可以避免材料性能的极化现象。采用这种纤维预制体形式来增强纳米孔结构酚醛树脂,可以保证复合材料在较低密度和热导率的情况下,兼备优异的力学性能。但是,纤维针刺工艺在制备预制体时,会对纤维的位置、取向和排布产生一定的影响,甚至造成一定程度的纤维损伤,从而在预制体内部形成缺陷,导致复合材料的提前失效^[7]。因此,量化针刺复合材料中的纤维结构,并分析其不同应力作用下的损伤演化过程,对进一步优化其结构具有重要意义。

基于宏观力学和数字散斑相关法 (Digital image correlation, DIC) 的实验方法,仅能体现材料表面的应变,无法揭示多层材料内部的结构演化过程^[8]; 有限元分析 (Finite element analysis, FEA) 方法则受限于极度复杂的针刺工艺,仅能将模型进行多重简化,无法以高精度的形式再现针刺纤维的特异性结构,使复合材料模拟结果的准

确性大打折扣^[9]。X 射线断层扫描 (Computed tomography, CT) 技术能够全面地探测各种材料内部的微观形貌,是目前研究材料损伤演化最直接有效的方法之一^[10]。通过对采集的数据图形进行处理,可以完整地获取基体和增强体的形态、大小、位置和取向等信息,进一步可以将纤维相提取并重构,为有限元模型的建立和分析提供了一种可行的方式。

本文采用原位加载 X 射线 Micro-CT 技术对高强度纳米孔树脂基防隔热复合材料 (IPC-90)^[11] 的轴向拉伸损伤演化进行了跟踪探测,获得了纤维与基体在不同力学阶段时对应的形态演化规律,系统地研究了纤维布和纤维网胎层中微观裂纹的起源、扩展及最终材料的断裂方式。通过图像降噪-阈值分割等相关处理^[12],对不同载荷阶段下的纤维进行提取,获得相关的信息,并构建出高精度的有限元分析模型。采用 Abaqus 软件进一步详细地分析了复合材料在拉伸过程中的应力、应变演化机制。此系列方法能够全方位立体化地展现 IPC-90 的损伤-断裂机制;量化分析纤维在轴向拉伸载荷作用下的迁移转变过程;直观形象地体现复合材料中基体-增强体的力学行为差异,对分析复杂三维结构复合材料的力学损伤行为、高精度有限元分析模型的构建、材料性能的预测与优化具有重要意义。

1 实验材料及方法

1.1 复合材料制备

采用自研的杂化酚醛树脂溶胶 (PF-45) 和商品级石英纤维预制体为原材料,并采用溶胶-凝胶-常压干燥的工艺制备了高强度纳米孔树脂基防隔热复合材料 (IPC-90)^[11],最后将其加工成试样形状 (图 1(a))。其中,纤维预制体中的网胎纤维和机织平纹纤维布的面密度分别为 40 g/m² 和 220 g/m²;纤维布均沿正交方向堆叠;采用深度为 4 mm、密度为 16 针/cm² 的针刺工艺,将纤维进行叠层针刺,直至预制体的体积密度达到 0.45 g/cm³。

1.2 原位 Micro-CT 试验方案

采用工业 Micro-CT (Xradia520 Versa, Zeiss)

跟踪检测了 IPC-90 在拉伸过程中的三维微结构演变, 实验装置如图 1(b) 所示。将中间平行、截面尺寸为 4 mm×1.5 mm×1.5 mm (长×宽×高) 的骨状拉伸试样 (沿平纹纤维布正交方向) 放置于微型力学试机 (CT5000, Deben, 5 kN) 上, X 射线源和探测器分别放置在两侧。

实验前对 IPC-90 骨状样品进行预拉伸实验, 获得相应的位移-载荷曲线, 为正式实验的力学阶段提供参考^[13]。拉伸加载共分为原始阶段 (0 N)、弹性阶段 (193 N)、屈服阶段 (417 N)、断裂点 (643 N) 和断裂后 (35 N) 5 个阶段进行, 加载速率

为 0.1 mm/min。在相应的阶段进行 X 射线扫描时, 保持样品位移恒定不变, 扫描时间为 4.5 h, 体素分辨率为 2 μm。

1.3 三维重构

采用 Avizo 软件对采集的二维 CT 切片图像进行降噪处理, 提高图像的对比度, 同时平滑和抑制拍摄过程中的噪声干扰。采用二值化阈值分割技术, 对图像的灰度值进行识别, 将 IPC-90 复合材料中的基体和纤维进行区分。采用纤维中心线自动跟踪算法对纤维的中心线进行提取并重构^[14-16], 获取纤维的取向信息。

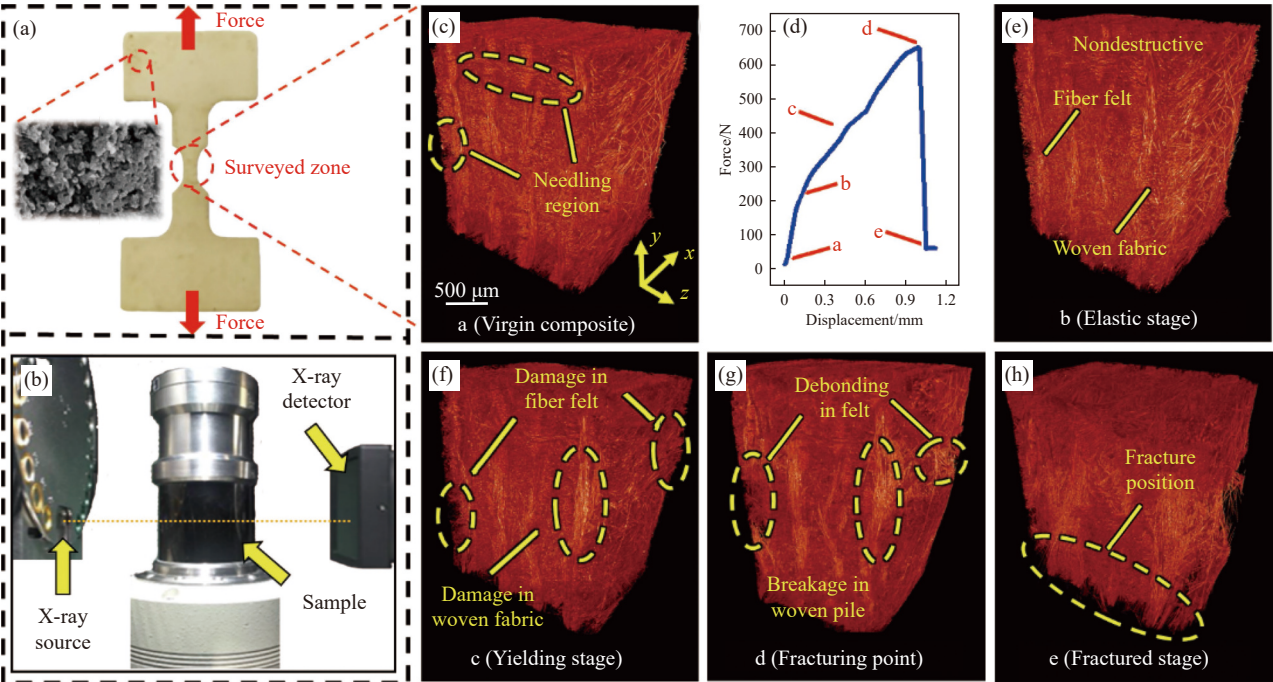


图1 (a) 试样结构示意图; (b) 原位拉伸 X 射线断层扫描装置; 三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料的原始三维结构 (c)、面内拉伸预实验的位移-载荷曲线 (d) 和不同应变下对应的三维微结构 ((e)-(h))

Fig. 1 (a) Shape of in-situ tensile specimen; (b) Diagram of in-situ X-ray CT setup and test; Virgin 3D microstructure of composite (c), displacement vs. load curve of composite in-plane tensile pre-test (d) and corresponding 3D microstructure ((e)-(h)) of needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composites under various strains

1.4 有限元模型构建与分析

局部截取原始材料中包含纤维布、纤维网胎和针刺区域的图像, 将其导入到 Abaqus 软件建立代表性体积单元 (Representative volume element, RVE), 其中增强体和基体的性质参数如表 1 所示。

其中, RVE 单元的选取基于两要素: (1) RVE 单元需要包含纤维布层和纤维网胎层两个连续的、较完整的层间结构单元, 即纤维布层中要包含机织纤维束的编织结构, 纤维网胎层中要包含足够多的短切纤维; (2) RVE 单元中, 网胎层和纤维布层

表 1 有限元模拟中采用的增强体和基体的物理性质参数

Table 1 Physical property parameters of reinforcement and matrix in finite element analysis

Material	Model	Density/(g·cm ⁻³)	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio
Quartz fiber	Elastic	2.28	72	0.22
Phenolic matrix	Elastic	0.67	1	0.30

中均要包含针刺位点。

基于以上两点,在图像中截取到的 RVE 单元实际尺寸大小为 1.5 mm×1.3 mm×0.7 mm,能够代表针刺过程在纤维布和网胎纤维中的典型结构。网格尺寸过大会导致针刺位点处的纤维结构失真,不能够真实地反映针刺纤维的特异性;而网格尺寸过小则会使网格的数量陡增,超过计算机的资源调度极限。因此本文采用大规模六面体体素网格对 RVE 单元进行网格划分,同时考虑到针刺过程主要影响纤维在 z 方向上的分布,进一步对 RVE 模型在 x、y 和 z 方向上分别均匀布点 150 个、150 个和 200 个,共计 450 万个网格,每个网格具体实际尺寸为 10 μm×8.67 μm×3.5 μm。

采用 Dirichlet 边界条件对模型进行 y 方向的拉伸加载(3%应变),分别对复合材料中增强体和基体在拉伸过程中的应力-应变进行分析,进一步揭示 IPC-90 的断裂演化机制;不考虑纤维之间的摩擦作用;纤维与基体之间的作用视为完美界面(即 tie 连接)。

2 结果与讨论

2.1 基于 Micro-CT 的三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料损伤演化分析

采用如图 1(a) 所示的骨状试样和图 1(b) 所示的原位加载 X 射线 Micro-CT 设备对 IPC-90 复合材料的力学损伤演化进行分析。根据预实验中载荷-位移曲线(图 1(d)),将试样在拉伸载荷下的力学行为分为 5 个阶段:a(原始阶段)、b(弹性阶段)、c(屈服阶段)、d(断裂点)、e(断裂后),并在图中所示位点处对试样进行 X 射线扫描,观察内部纤维的三维结构演化过程。

复合材料在拉伸测试前的三维结构如图 1(c) 所示,其结构由高密度的平面机织层和低密度的网胎层相互堆叠而成。针刺工艺在网胎层中会形成较明显的针刺孔,在针刺孔周围,分布在 x-y 平面的短切纤维被部分引入到 z 方向,在层间形成关联,构成结构稳定的三维织物。在弹性阶段(图 1(e)),位移-荷载曲线呈线性变化,纤维结构与原始结构相比没有出现明显改变,说明在弹性范围内复合材料具有非损伤的可逆性变化。随着拉伸荷载的增大,位移-荷载曲线的斜率逐渐减小,试样逐渐进入屈服阶段(图 1(e)、图 1(f))。在这个转变过程中,复合材料的损伤主要出现在最外层的纤维网胎中,表现为原本紧密交织在一起的短

切纤维渐渐松散,针刺孔处的缺陷位点进一步扩大。而在外层纤维布中,纤维束则出现整体向外扩展的趋势,材料内层基本没有出现损伤。该现象说明在屈服阶段的中期,外层网胎的损伤已经扩展到临近的纤维布层,而纤维布则可以通过自身的损伤,吸收来自外层网胎的能量,阻碍破坏向材料内部继续扩展^[17]。在复合材料断裂点处(图 1(g)),网胎层中的短切纤维均沿着载荷方向(即 y 轴)发生偏转,重新定向和排列,而纤维布层中的纤维束则开始出现断裂;在复合材料断裂之后(图 1(h)),断口处的纤维网胎层中依然残留着一些松散的短纤维,而纤维布层中的纤维束则一分为二。这说明短纤维伴随着材料的失效仅会发生位移和偏转,自身不会发生断裂,而纤维布层的断裂则是长纤维束自身直接发生结构失效^[18-19]。

为了进一步揭示复合材料在拉伸应力下的损伤过程,分别从 x-y 和 y-z 平面截取同位置、不同阶段的 2D 图像进行分析,如图 2 所示。原始材料中,树脂较紧密地连接着 IPC-90 的多层结构,不存在明显的基体内部缺陷(图 2(f)),说明材料的制备具有良好的工艺性;针刺过程形成的“V”型缺陷会在网胎层和纤维布层中分别形成椭圆状(图 2(a))和裂缝状空隙(图 2(k)),与基体复合后会在针刺区域出现局部富树脂现象。在弹性阶段内(图 2(b)、图 2(g)、图 2(i)),树脂和纤维的形态、排布与原始材料中的基本一致,没有出现可见性损伤,仅仅发生略微的位置偏移。

在屈服阶段,复合材料中的基体开始出现不可逆性损伤,纤维也发生较大的取向变化(图 2(h))。纤维网胎层中主要表现为针刺处富树脂区内形成微裂纹,并沿着与载荷垂直的方向扩展(图 2(c));而纤维布层则表现为纤维束与树脂基体“脱粘”,形成较大面积的层间裂纹区域(图 2(m))^[20]。随着两端位移的继续增大,材料到达了断裂阶段(图 2(i)):网胎层基体中的微裂纹逐渐沿 z 轴方向贯穿(图 2(d)),在纤维布处终止,意味着纤维布有效阻隔了裂纹向下一层网胎的扩展,延缓了材料的力学失效;而在纤维布层中,连续的长纤维束开始出现明显的断裂(图 2(n))。材料断裂后,可以看到材料在中轴附近分为两段(图 2(j)):网胎层中的短纤维主要在基体的裂纹中以“纤维拔出”的形式进行破坏(图 2(e)),而纤维布层则几乎脱离基体,以载荷方向上纤维束大范围断裂而破坏(图 2(o)),结合材料在位移-荷载曲线中失效时出

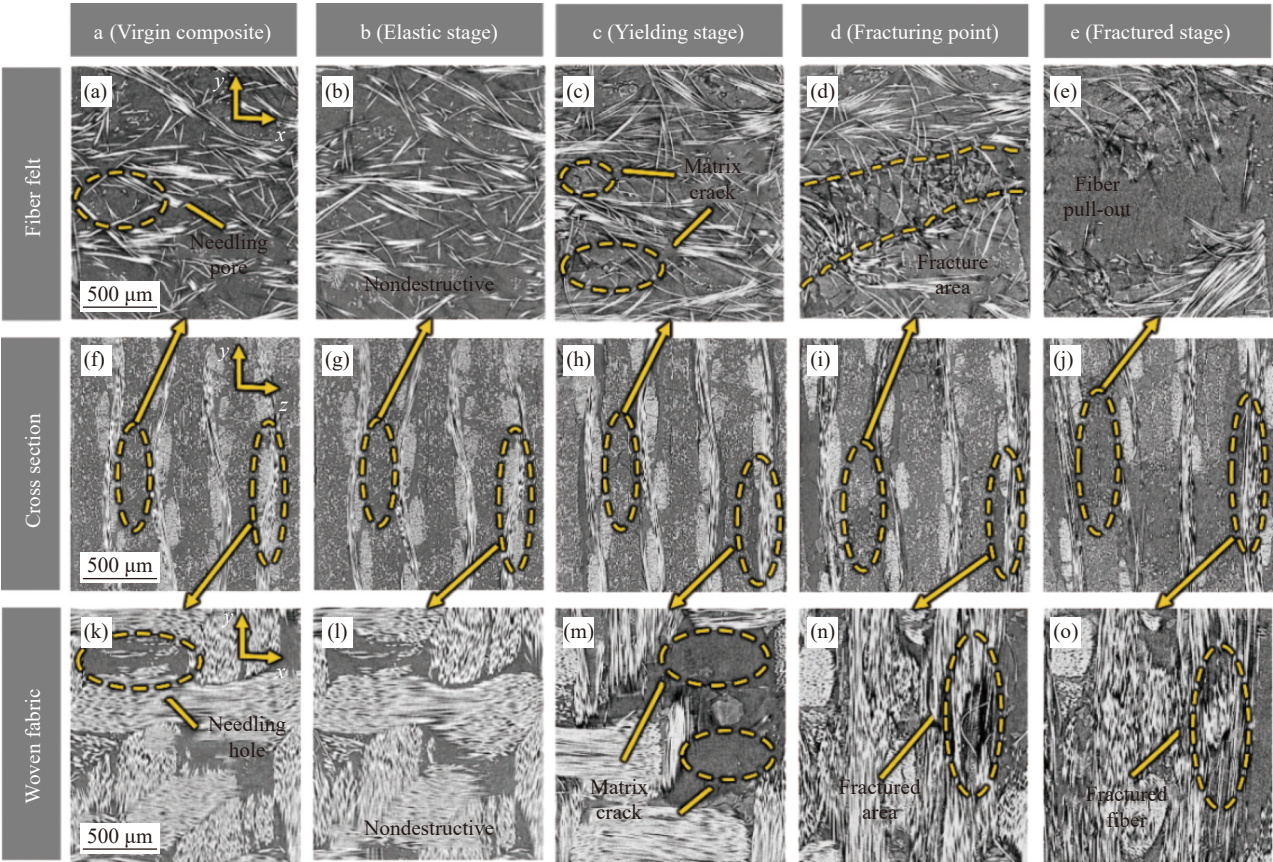


图2 三维针刺预制体增强纳米孔酚醛在不同拉伸阶段下的二维切片结构：
(a)~(e)) x-y 平面内网胎纤维；(f)~(j)) 复合材料的 y-z 截面；(k)~(o)) x-y 平面内纤维布

Fig. 2 2D slices of needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composites at different tensile stages:
((a)~(e)) Slices of fiber felt in x-y plane; ((f)~(j)) Cross section of composite in y-z plane; ((k)~(o)) Slices of woven fabric in x-y plane

现的载荷“断崖式”下降，进一步证实了纤维布对复合材料力学性能的重要贡献。

2.2 图像的识别与重构

采用X射线拍摄样品时，设备常常会受到外界的干扰，导致图形在成像和传输时形成噪点；另一方面，受限于设备自身有限的分辨率，纤维在充盈的基体中往往不能形成界限清晰的轮廓，导致在阈值分割时，计算机不能对图像“灰度”进行精准识别^[21]。因此将图形“降噪处理”对于纤维的后续提取、识别和重构具有非常重要的意义。对X射线拍摄的三维图形进行降噪处理，并采用二值化阈值分割对复合材料的灰度进行识别，提取复合材料中的纤维相；最后采用纤维中心线自动跟踪算法对圆柱状的纤维进行重构，可以将三维图形数据化，为纤维的信息提取提供了有效途径。

考虑到损伤主要从材料的外部开始，因此不仅仅需要对材料的整体进行分析，更要详细地量

化外层网胎和纤维布的结构演变。经过上述处理后，得到了材料整体、外层网胎和纤维布的图像如图3所示。对比图1中拍摄的图像，可以看到重构的图像不仅能够良好地反映纤维的结构特点，还能够使纤维间的界限更加清晰，单根纤维的形态和走势更加明朗，针刺周围的孔隙更加细节。通过对比不同力学阶段下的针刺孔可以发现：针刺孔长轴与载荷垂直时，针刺孔会延载荷方向逐渐扩张；与载荷平行时则会逐渐缩小。

对于短纤维增强材料而言，纤维取向分布(Fiber orientation distribution, FOD)是其主要特征之一，决定了材料的微观结构和性能^[22-23]。FOD可采用中心球坐标进行描述，如图4所示。其中 φ 为纤维中心线在x-y平面内的投影与x轴的夹角， θ 为纤维中心线与x-y平面的夹角^[22, 24]。根据单根纤维球坐标的角度函数，对图3中重构的纤维角度进行数据统计，可以量化纤维在拉伸过程中的方向偏转，进而更加细致地对材料的损伤

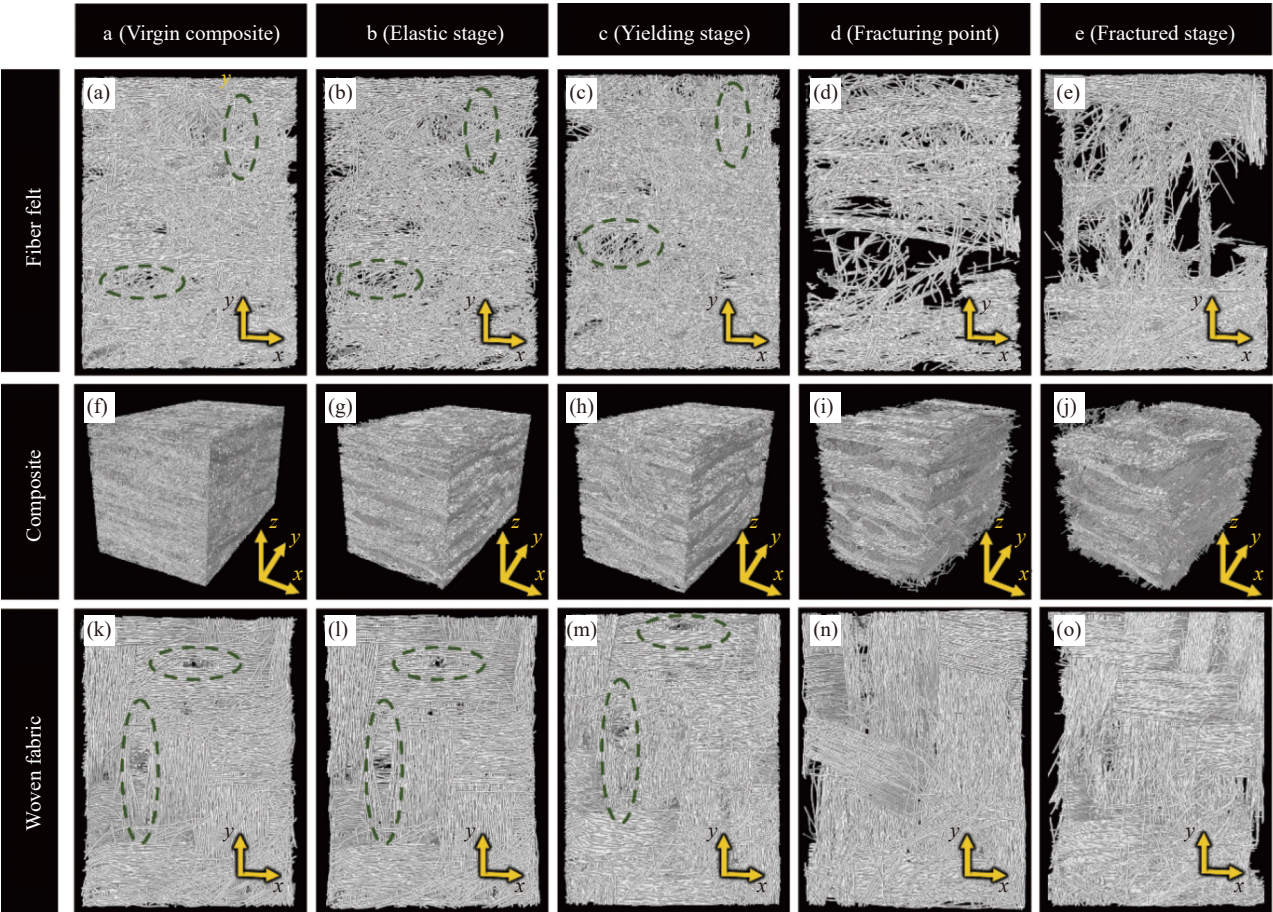
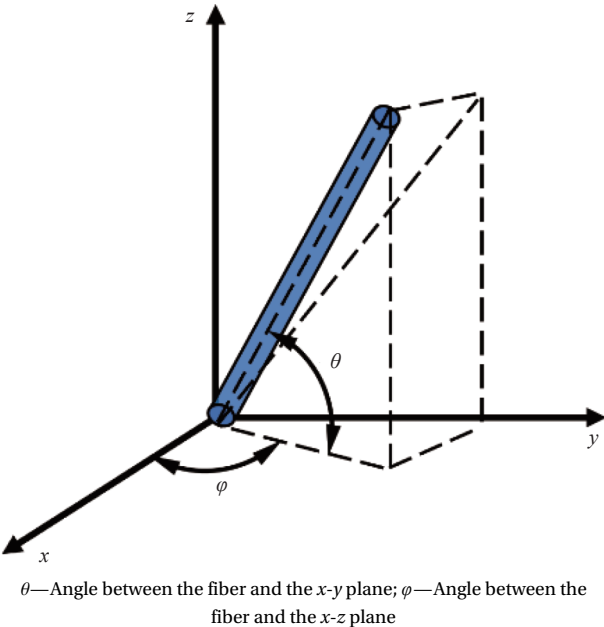


图3 基于不同力学阶段的 Micro-CT 图像重构的三维针刺预制体增强纳米孔酚醛的纤维相：
((a)~(e)) x-y 平面内网胎纤维；((f)~(j)) 复合材料的整体结构；((k)~(o)) x-y 平面内纤维布

Fig. 3 Fiber phase reconstructed based on Micro-CT images in different stages of needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composites:
((a)-(e)) Fiber felt in x-y plane; ((f)-(j)) Overall of composite; ((k)-(o)) Woven fabric in x-y plane



θ—Angle between the fiber and the x-y plane; φ—Angle between the fiber and the x-z plane

图4 三维空间内纤维取向分布(FOD)的球坐标示意图
Fig. 4 Diagram of spherical polar coordinates of fiber orientation distribution (FOD) in 3D

演化机制进行分析，结果如图5所示。

复合材料在测试前(图5(a))，预制体纤维在x-y面内主要分布于0°、90°、180°、270°和360°的正交方向，在其他方向也有少量的均匀分布，这主要是由于纤维布的机织密度(220 g/m²)大于短切纤维的堆积密度(80 g/m²)，使纤维布的取向占据了主导地位；在z方向上有少量的纤维穿插在层间，增强了材料的层间关联。单独地对网胎纤维(图5(f))和纤维布(图5(k))进行分析还可以发现：针刺过程不仅仅会使纤维在z方向上发生偏转，还会对其在x-y面内的分布产生一定的影响。

在轴向载荷的作用下，复合材料中的纤维在z轴方向上统一地偏向与力垂直的方向(z轴)，出现了“负泊松比”现象(泊松比为-0.23)，避免了材料在拉伸时在断口处的“颈缩”。在x-y平面内，网胎层中的纤维还会转向与力平行的方向(0°、180°和360°)；而纤维布中的纤维由于其自身具有

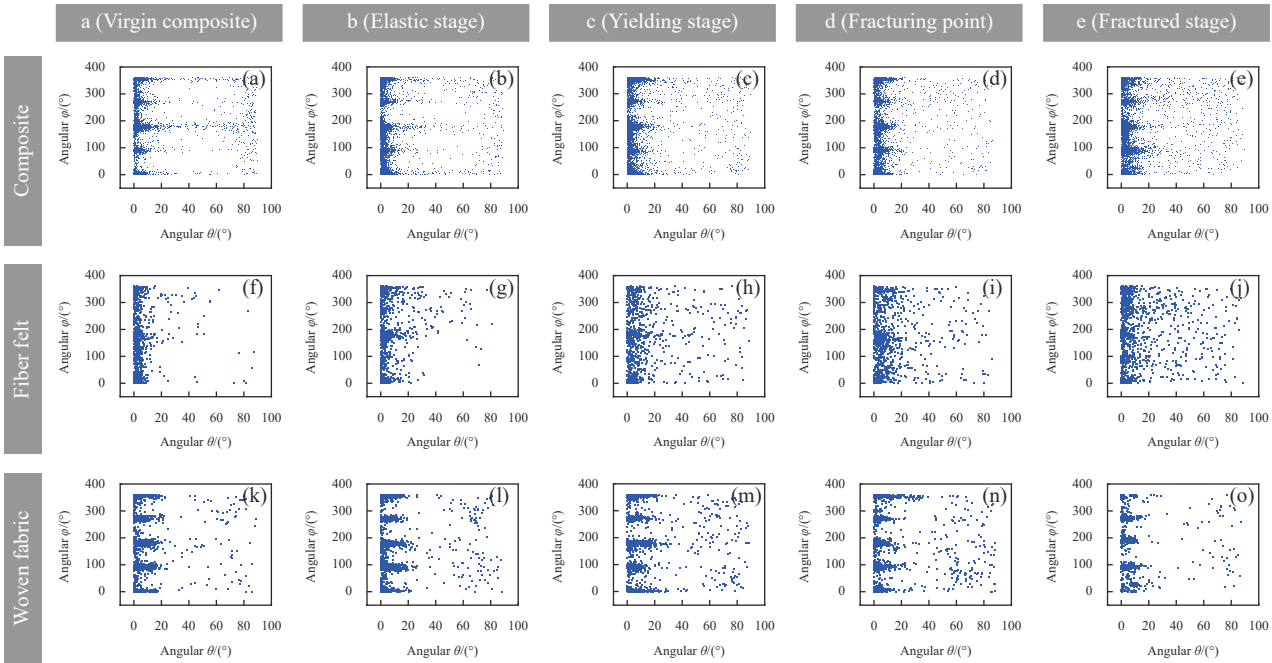


图5 重构纤维相的空间角度分布: ((a)~(e)) 复合材料中纤维的整体角度分布; ((f)~(j)) 外层网胎中的纤维角度分布; ((k)~(o)) 外层纤维布中的纤维角度分布

Fig. 5 Spatial angle distribution of reconstructed fiber phase: ((a)~(e)) Overall angle distribution of fiber in composite; ((f)~(j)) Fiber angle distribution in outer fiber felt; ((k)~(o)) Fiber angle distribution in outer woven fabric

特定的方向，且以纤维束的形式存在，纤维间的偏转会相互制约，因此在整体上，其分布没有发生明显改变^[25]。

2.3 三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料有限元模型建立与分析

基于以上结果可知，IPC-90 复合材料复杂的损伤演化与断裂方式归因于其具有两种不同结构形式的纤维，它们之间不仅仅存在尺寸、方位和排布的差异，同时还对树脂基体的破坏形式产生

了较大影响。为了形象地展现网胎纤维和纤维布中基体与纤维的应力、应变差异，本文在原始材料中，选取了具有典型针刺连接的相邻两层结构作为研究对象，对其进行阈值分割、纤维重构和表面化处理，生成了高还原度的图形，最后采用 Abaqus 软件对其进行 FEA 模型建立、网格划分、边界设定和载荷加载，结果如图 6 所示。可以看到，无论是在以正交纤维束形式出现的纤维布层(图 6(a)~6(d))，还是在以短切纤维随机分布的网

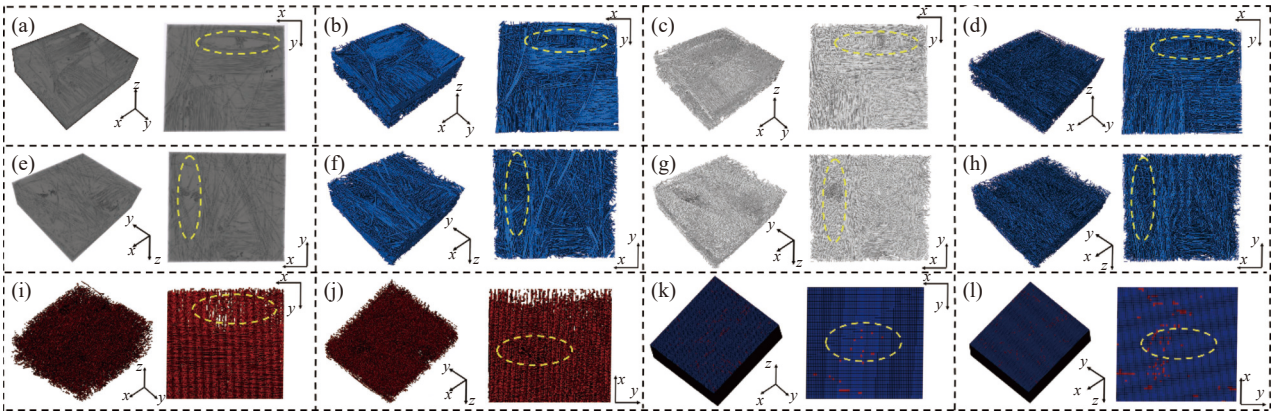


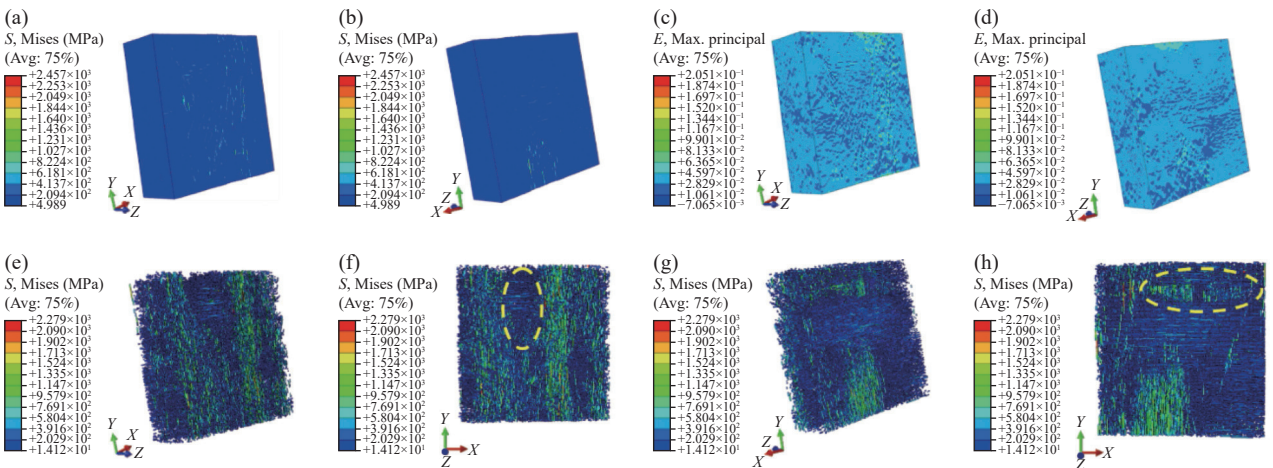
图6 三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料高精度有限元模型的构建: ((a)~(d)) 纤维布中纤维相的提取、重构与转换; ((e)~(h)) 网胎层中纤维相的提取、重构与转换; ((i)~(l)) Abaqus 高精度有限元的构建与网格划分

Fig. 6 Construction of high-precision finite element model of needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composites: ((a)~(d)) Extraction, reconstruction and conversion of fiber phase in woven fabric; ((e)~(h)) Extraction, reconstruction and conversion of fiber phase in fiber felt; ((i)~(l)) Construction and meshing of high-precision finite element model in Abaqus

胎层(图 6(e)-6(h))，针刺处的纤维偏转和复杂的形态结构与实际拍摄得到的图像基本一致，因此该系列处理可以较好地保留针刺工艺的特异性。进一步地，将处理后的图形导入到 Abaqus 中后，模型依然可以较好地表达针刺带来的局部纤维缺陷和纤维偏转(图 6(i)-6(j))。网格划分对有限元分析过程的计算效率和计算精度有较大影响，综合考虑极其复杂的针刺结构与有限的计算机资源的矛盾，本文采用六面体体素网格对有限元模型进行网格划分(图 6(k)、图 6(l))^[26-27]，最终建立高保

真的 FEA 模型。与单纯地采用商业有限元软件建立的模型相比，该方法不仅避免了对针刺工艺的多重假设，还能够将针刺过程带入到层间的纤维以高还原度的方式再现，为材料性能的精准分析与预测提供了保障^[28]。

采用 Dirichlet 边界条件对 FEA 模型在 y 方向施加 3% 的应变，并进行计算与分析，结果如图 7 和图 8 所示。复合材料中的应力主要由纤维承载，树脂基体在其中仅起到传递的作用(图 7(a)、7(b))；由于树脂脆弱的力学性质，导致复合材料内部的



S—Stress in the composite; E—Strain in the composite

图 7 三维针刺预制体增强纳米孔酚醛复合材料的高精度有限元分析结果：纤维网胎面 (a) 与纤维布面 (b) 的应力分布云图；纤维网胎面 (c) 与纤维布面 (d) 的应变分布云图；网胎纤维 ((e)-(f)) 和纤维布 ((g)-(h)) 的应力分布云图

Fig. 7 Finite element analysis results of needle punching fabric reinforced nanoporous phenolic composite: Stress contour of fiber felt surface (a) and woven fabric surface (b); Strain contour of fiber felt surface (c) and woven fabric surface (d); Stress contour of fiber felt ((e)-(f)) and woven fabric ((g)-(h))

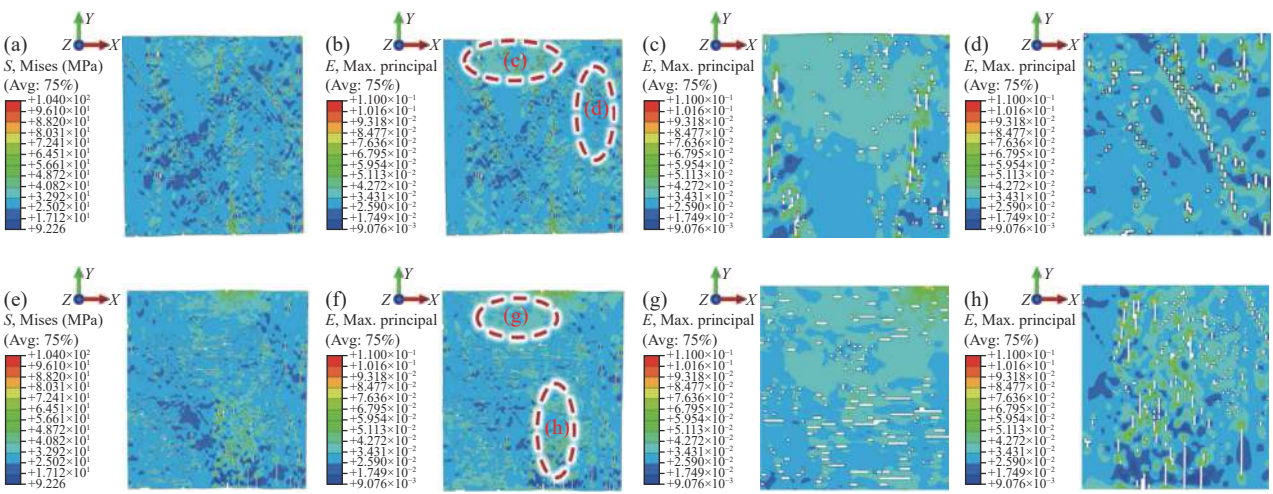


图 8 纤维网胎层中的应力分布云图 (a) 和应变分布云图 (b)；纤维网胎层中针刺位点 (c) 和纤维附近基体 (d) 的局部应变云图；纤维布中的应力分布云图 (e) 和应变分布云图 (f)；纤维布中针刺位点 (g) 和纤维附近基体 (h) 的局部应变云图

Fig. 8 Stress contour (a) and strain contour (b) of fiber felt layer; Local strain contour of needling point (c) and the matrix surrounding fiber (d) in fiber felt; Stress contour (e) and strain contour (f) of woven fabric layer; Local strain contour of needling point (g) and the matrix surrounding fiber (h) in woven fabric

应变集中在基体当中(图 7(c)、7(d))。将纤维相和基体相单独进行分析还可以发现:机织纤维束与短切纤维中的应力主要集中分布在与载荷方向平行的纤维中(图 7(e)~7(g)),这说明纤维取向与载荷方向对纤维增强复合材料的力学性能具有重要意义;针刺过程会通过干扰纤维的排布进而对复合材料的力学产生较大的影响(图 7(f)~7(h))。

而基体中的应变在纤维布层和纤维网胎层中则略有不同:在纤维网胎中,基体的应变主要集中在针刺位点(图 8(a)~图 8(d));而在纤维布中,基体的应变则主要集中在纤维束中密集排布的纤维之间(图 8(e)~图 8(h))。该模拟结果表明:网胎纤维中的裂纹会萌生于针刺处富树脂区域;而纤维布中的损伤则会优先发生在纤维之间,而由于纤维束中纤维排布较紧密,损伤会更易联结在一起,进而形成树脂整体脱粘现象,此分析与 X 射线 Micro-CT 中的实验现象吻合良好。为了进一步验证 FEA 结果的精度,应力-应变曲线被导出与实际的测试结果进行对比,结果如图 9 所示。根据图像中的曲线,计算得到材料的弹性模量的值为 6.96 GPa,与实际值相差为 5.8% (6.58 GPa)。

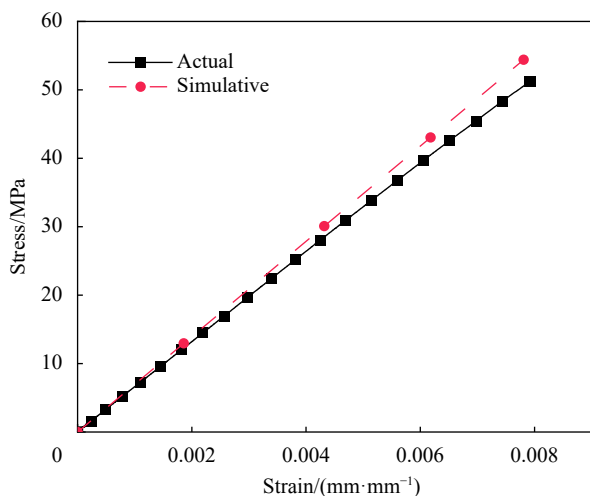


图 9 高强度纳米孔树脂基防隔热复合材料 (IPC-90) 的应力-应变曲线
Fig. 9 Stress-strain curves of high strength nanoporous resin-based thermal insulation composite (IPC-90)

3 结论

基于 X 射线断层扫描 (CT) 原位拉伸试验,对网胎纤维/纤维布叠层针刺预制体增强高强度纳米孔防隔热一体化复合材料 (IPC-90) 进行了损伤演化分析,定量地对预制体中纤维在载荷作用下的偏转进行了详细阐述。同时基于实际拍摄的 3D

复合材料结构,建立了高还原度的有限元模型进行力学分析,系统地揭示了复合材料的微观断裂机制,主要结论如下:

(1) 轴向拉伸过程中,网胎层中的微裂纹产生于针刺位点的富树脂区域,而纤维布中的微裂纹则始于纤维束间紧密排布纤维的间隙当中。随着载荷的增加,网胎层中的微裂纹沿着与载荷垂直的方向扩展,并在纤维布处终止;而在纤维布层中,纤维间的微裂纹很快联结在一起,导致纤维束与树脂直接“脱粘”。在断裂阶段,网胎层的破坏主要以“纤维拔出”的形式存在;而纤维布则是纤维束自身的断裂,同时伴随着应力的“断崖式”下降,这说明纤维布对于材料力学强度的决定性作用;

(2) 基于 Micro-CT 技术和一系列后处理,可以良好地再现针刺纤维复杂的三维结构,进而可以跟踪统计纤维的取向变化。结果表明:在轴向拉伸过程中,IPC-90 中的纤维会统一地转向材料外部,出现负的泊松比,能够避免断口处的“颈缩”现象;网胎层中的纤维还会向与力的平行方向发生偏移;

(3) 采用图像处理-模型建立-有限元分析的联合建模方式,能够建立并分析高精度的针刺纤维有限元分析 (Finite element analysis, FEA) 模型,并与实际现象和结果吻合良好。该方法不仅可以真实地反映针刺预制体纤维的特异性结构,还可以有效地回避常规模型在构建时做出的多重假设,为材料的性能预测、行为分析和优化设计提供了新的方法。

参考文献:

- [1] 董彦芝,刘峰,杨昌昊,等.探月工程三期月地高速再入返回飞行器防热系统设计与验证[J].中国科学:技术科学,2015,45(2): 151-159.
DONG Yanzhi, LIU Feng, YANG Changhao, et al. Design and verification of the TPS of the circumlunar free return and reentry flight vehicle for the 3rd phase of Chinese lunar exploration program[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(2): 151-159(in Chinese).
- [2] NATALI M, KENNY J M, TORRE L. Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices: A review[J]. Progress in Materials Science, 2016, 84: 192-275.
- [3] CSP A, PRB B. Characterization of mechanical and thermal properties of high strength glass epoxy and rayon carbon

- phenolic composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(13): 26898-26903.
- [4] TRAN H, JOHNSON C, RASKY D, et al. Phenolic impregnated carbon ablators (PICA) for discovery class missions[C]//31st Thermophysics Conference. New Orleans: AIAA, 1996.
- [5] MUÑOZ R, MARTÍNEZ V, SKET F, et al. Mechanical behavior and failure micromechanisms of hybrid 3D woven composites in tension[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 59: 93-104.
- [6] 张鸿宇, 钱震, 牛波, 等. 低密度纤维增强酚醛气凝胶复合材料的力学特性及断裂机制[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(8): 3663-3673.
- ZHANG Hongyu, QIAN Zhen, NIU Bo, et al. Mechanical properties and fracture mechanisms of low-density fiber preforms reinforced phenolic aerogel composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(8): 3663-3673(in Chinese).
- [7] 谢军波. 针刺预制体工艺参数建模及复合材料本构关系研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- XIE Junbo. Parametric modeling of needling process and constitutive relationship of needled composite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [8] MCCORMICK N, LORD J. Digital image correlation[J]. *Materials Today*, 2010, 13(12): 52-54.
- [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] ZW A, SW B, GK A, et al. In-situ synchrotron X-ray tomography investigation on damage mechanism of an extruded magnesium alloy in uniaxial low-cycle fatigue with ratchetting[J]. *Acta Materialia*, 2021, 211: 116881.
- [11] 钱震, 张鸿宇, 张琪凯, 等. 高强度-中密度纳米孔树脂基防隔热复合材料的制备与性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 83-95.
- QIAN Zhen, ZHANG Hongyu, ZHANG Qikai, et al. Preparation and properties of high strength-medium density nanoporous resin-based ablation/insulation integrated composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(1): 83-95(in Chinese).
- [12] BLANC R, WESTENBERGER P. Comparison of fiber orientation analysis methods in Avizo[C]//7th Conference on Industrial Computed Tomography. Leuven: Belgium, 2017.
- [13] 刘海龙, 张大旭, 祁荷音, 等. 基于X射线CT原位试验的平纹SiC/SiC复合材料拉伸损伤演化[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(10): 1074-1083.
- LIU Hailong, ZHANG Daxu, QI Heyin, et al. Tensile damage evolution of plain weave SiC/SiC composites based on in-situ X-ray CT tests[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(10): 1074-1083(in Chinese).
- [14] NIU B, ZHANG H Y, QIAN Z, 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.
- [15] RIGORT A, GÜNTHER D, HEGERL R, et al. Automated segmentation of electron tomograms for a quantitative description of actin filament networks[J]. *Journal of Structural Biology*, 2012, 177(1): 135-144.
- [16] WEBER B, GREENAN G, PROHASKA S, et al. Automated tracing of microtubules in electron tomograms of plastic embedded samples of *Caenorhabditis elegans* embryos[J]. *Journal of Structural Biology*, 2012, 178(2): 129-138.
- [17] MIAO M, GLASSEY H E, RASTOGI M. An experimental study of the needled nonwoven process: Part III: Fiber damage due to needling[J]. *Textile Research Journal*, 2004, 74(6): 485-490.
- [18] 邱爽, 周金宇. 不同应力水平对碳纤维复合材料疲劳剩余刚度的影响[J]. *航空材料学报*, 2018, 38(2): 110-117.
- QIU Shuang, ZHOU Jinyu. Effect of different stress levels on fatigue residual stiffness of carbon fiber reinforced composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2018, 38(2): 110-117(in Chinese).
- [19] GE L, LI H, ZHONG J, et al. Micro-CT based trans-scale damage analysis of 3D braided composites with pore defects[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 211: 108830.
- [20] 龙舒畅. 纤维增强复合材料的非线性动力本构与冲击损伤破坏行为[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- LONG Shuchang. Nonlinear dynamic constitutive and impact damage of carbon fiber reinforced polymer composites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018(in Chinese).
- [21] 黄新波, 高玉蕊, 张烨, 等. 基于联合分量灰度化算法和深度学习的玻璃绝缘子目标识别算法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(4): 203-209.
- HUANG Xinbo, GAO Yuhuan, ZHANG Ye, et al. Gray image recognition algorithm based on improved multi-scale sampling algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(4): 203-209(in Chinese).
- [22] KARAMOV R, MARTULLI L M, KERSCHBAUM M, et al. Micro-CT based structure tensor analysis of fibre orientation in random fibre composites versus high-fidelity fibre identification methods[J]. *Composite Structures*, 2020, 235: 111818.
- [23] MOUHIMID B, IMAD A, BENSEDDIQ N, et al. An experimental analysis of fracture mechanisms of short glass fibre reinforced polyamide 6, 6 (SGFR-PA66)[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(15-16): 2521-2526.

[24]

WANG P, WEN J, LEI H, et al. Morphology characterization and in-situ three-dimensional strain field monitor of short carbon fiber-reinforced polymer composites under tension[J]. [Composite Structures](#), 2021, 262: 113634.

[25]

欧阳利军, 许峰, 高皖扬, 等. 玄武岩纤维布约束高温损伤混凝土方柱轴压力学性能试验[J]. [复合材料学报](#), 2019, 36(2): 469-481.
OUYANG Lijun, XU Feng, GAO Wanyang, et al. Axial compressive behavior of basalt fiber reinforced polymer-confined damaged concrete after exposed to elevated temperatures[J]. [Acta Materiae Compositae Sinica](#), 2019, 36(2): 469-481(in Chinese).

[26]

SHEFELBINE S J, SIMON U, CLAES L, et al. Prediction of fracture callus mechanical properties using micro-CT images and voxel-based finite element analysis[J]. [Bone](#), 2005, 36(3): 480-488.

[27]

LENGSFELD M, SCHMITT J, ALTER P, et al. Comparison of geometry-based and CT voxel-based finite element modeling and experimental validation[J]. [Medical Engineering & Physics](#), 1998, 20(7): 515-522.

[28]

JIA Y, LIAO D, CUI H, et al. Modelling the needling effect on the stress concentrations of laminated C/C composites[J]. [Materials & Design](#), 2016, 104: 19-26.