

针刺/缝合多尺度联锁复合材料II型层间力学行为

苏星兆 陈小明 郑宏伟 吴凯杰 辛世纪 郭东升

Mode II interlaminar mechanical behavior of needled/stitched multiscale interlocking composites

SU Xingzhao, CHEN Xiaoming, ZHENG Hongwei, WU Kaijie, XIN Shiji, GUO Dongsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230711.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Z-pin/缝合对复合材料T型接头剪切承载能力的影响

Effect of Z-pin/stitching on the shear carrying capacity of composite T-joints

复合材料学报. 2018, 35(4): 834–842 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170702.002>

缝合夹层结构复合材料树脂传递模塑成型工艺充模仿真

Filling simulation of stitched sandwich composite by resin transfer molding process

复合材料学报. 2018, 35(12): 3342–3349 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180207.004>

低温环境下测试复合材料 I 型层间断裂韧性的简易方法

A simple method for determining mode I interlaminar fracture toughness of composite at low temperature

复合材料学报. 2019, 36(5): 1210–1215 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180725.004>

织物增强相对复合材料冲击压缩性质的影响

Effects of fabric reinforcement on impact compressive property of composites

复合材料学报. 2019, 36(1): 122–132 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180502.003>

薄层化碳布缝合碳/碳复合材料制备与性能

Preparation and properties of spreading carbon cloth stitched C/C composites

复合材料学报. 2021, 38(4): 1210–1222 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200713.005>

单向连续碳纤维-玻璃纤维层间混杂增强环氧树脂基复合材料的力学性能

Mechanical properties of unidirectional carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites in interlaminar layer

复合材料学报. 2018, 35(7): 1857–1863 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180402.003>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230711.001

针刺/缝合多尺度联锁复合材料 II 型层间力学行为



分享本文

苏星兆^{2,3}, 陈小明^{*1,2,3}, 郑宏伟^{2,3}, 吴凯杰^{1,2}, 辛世纪^{2,3}, 郭东升^{1,2}(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387;
3. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387)

摘要: 针刺/缝合多尺度联锁复合材料具有优异的层间性能, 在航天热结构复合材料中得到越来越多的应用, 然而, 缝合工艺对于针刺复合材料双切口层间剪切 (DNS) 性能的影响还不清楚。以石英缎纹密布、石英斜纹半切布为原料, 设计制备了 3 种缝合矩阵、4 种缝合纤维束的石英纤维增强树脂基针刺/缝合多尺度联锁复合材料, 测试并分析了复合材料的 DNS 性能。采用 Micro-CT 对织物内部结构进行表征, 同时通过扫描电镜 (SEM) 观察试样断口形貌, 阐明层间增强机制。使用内聚力模型 (Cohesive zone model, CZM) 结合 Abaqus 软件进一步探究针刺/缝合多尺度联锁复合材料的 DNS 行为, 预测材料的极限破坏强度。研究结果表明: 缝合工艺的引入极大地改善了复合材料的层间性能, 其 DNS 的破坏载荷最大可达到 32.73 MPa, 相比针刺复合材料提升了 86.46%。针刺/缝合多尺度联锁复合材料 DNS 的主要破坏方式是基体开裂、纤维束的脆性断裂和拔出。同时, 模拟结果和针刺/缝合多尺度联锁复合材料的 DNS 实验结果吻合较好, 误差最大不超过 8%, 证明本文建立的内聚力模型能够有效预测针刺/缝合多尺度联锁复合材料的层间剪切性能。

关键词: 针刺; 缝合; 织物; 复合材料; II 型层间力学性能; 内聚力模型**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)03-1567-10

Mode II interlaminar mechanical behavior of needled/stitched multiscale interlocking composites

SU Xingzhao^{2,3}, CHEN Xiaoming^{*1,2,3}, ZHENG Hongwei^{2,3}, WU Kaijie^{1,2}, XIN Shiji^{2,3}, GUO Dongsheng^{1,2}

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials of Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Needled/stitched multi-scale interlocking composites have excellent interlaminar properties and are increasingly used in aerospace thermal structure composites. However, the effect of stitch technology on double incision interlaminar shear (DNS) performance of needle composites remains unclear. Using quartz satin fabric and quartz twill half-cut fabric as materials, quartz fiber-reinforced resin-based needle/stitch multi-scale interlocking composites with three kinds of stitch pattern and four kinds of stitch fiber bundles were designed and prepared. The DNS performance of the composite was tested and analyzed. The internal structure of the fabric was characterized by micro-CT, and the fracture morphology of the sample was observed by scanning electron microscopy (SEM) to clarify the mechanism of interlayer strengthening. The DNS behavior of needled/stitched multi-scale interlocking composites was further investigated by cohesive zone model (CZM) and Abaqus software, and the ultimate failure strength was predicted. The results show that the introduction of stitch technology greatly

收稿日期: 2023-05-05; 修回日期: 2023-06-10; 录用日期: 2023-06-28; 网络首发时间: 2023-07-11 14:49:11

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230711.001>**基金项目:** 先进功能复合材料技术重点实验室基金 (6142906210406); 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目 (P2022-B-IV-014-001)

Key Laboratory of Advanced Functional Composite Technology (6142906210406); Aero Engine and Gas Turbine Basic Science Center Project (P2022-B-IV-014-001)

通信作者: 陈小明, 博士, 高级实验师, 研究方向为纺织复合材料结构与性能 E-mail: chenxiaoming@tiangong.edu.cn**引用格式:** 苏星兆, 陈小明, 郑宏伟, 等. 针刺/缝合多尺度联锁复合材料 II 型层间力学行为 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1567-1576.

SU Xingzhao, CHEN Xiaoming, ZHENG Hongwei, et al. Mode II interlaminar mechanical behavior of needled/stitched multiscale interlocking composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1567-1576(in Chinese).

improves the interlamellar properties of the composite, and the maximum failure load of DNS reaches 32.73 MPa, which is 86.46% higher than that of the needled composite. The main failure modes of multi-scale interlocking composite DNS are matrix cracking, brittle fracture and pulling out of fiber bundle. At the same time, the simulation results are in good agreement with the DNS experimental results of needled/stitched multi-scale interlocking composites, and the maximum error is less than 8%, which proves that the cohesion model established in this paper can effectively predict the interlaminar shear performance of needled/stitched multi-scale interlocking composites.

Keywords: needling; stitching; preform; composite; interlaminar mechanical properties of mode II; CZM

三维针刺复合材料生产具有自动化程度高、成型工艺相对简单^[1-4]等优点, 现已在航空航天、轨道交通、汽车和国防等领域得到越来越广泛的应用^[5-8]。

近年来, 为满足不同应用场景下对三维针刺复合材料力学性能的要求^[9-10], 研究人员提出了各种类型的针刺织物结构, 主要包括网胎层合针刺织物结构^[11-13], 该结构由短纤维组成, 常常应用于飞行器热防护材料, 起到隔热作用; 此外, 网胎和编织布层合针刺织物结构^[14-18]常用于超高温环境, 起到热防护作用, 如火箭发动机喷管、喉衬、飞机刹车盘^[19]等。在上述织物结构中, 使用网胎进行层间加强, 由于网胎是无序短纤维的集合体, 非常蓬松, 针刺过程中刺针钩住并带入厚度方向的纤维数量有限, 导致复合材料的层间性能相对薄弱, 难以满足高超声速飞行器结构功能一体化部件力学性能要求。Yao 等^[20-21]提出了一种新型无网胎针刺织物结构, 大大地提高了针刺织物的体积密度, 增加了织物及复合材料的力学性能, 可有望满足高超声速飞行器的发展需求。Xue 等^[22]提出一种采用“n”型路径拼接工艺制备针刺/缝合耦合织物及其复合材料, 探究 C_f/SiC-Al 复合材料的压缩破坏行为, 阐明了压缩损伤演化机制。最近, Chen 等^[23]提出了一种新型针刺/簇绒耦合织物结构, 并探究了复合材料的 I 型层间性能。然而, 目前缝合工艺对于针刺结构复合材料双切口层间剪切 (DNS) 性能的影响还不清楚, 有待研究。

本文提出针刺/缝合多尺度联锁复合材料, 探究了其双切口层间剪切行为。设计制备了针刺/缝合多尺度联锁织物及复合材料, 采用 Micro-CT 对

其结构进行了表征, 通过 DNS 实验探讨了针刺/缝合多尺度联锁复合材料的双切口层间剪切, 研究了缝合工艺对针刺复合材料双切口层间剪切的影响, 采用 SEM 观察了试样断口损伤形貌, 揭示了复合材料 DNS 的破坏失效机制。此外, 构建了三内聚带模型对双切口层间剪切进行数值模拟, 进一步阐明了针刺/缝合多尺度联锁复合材料的层间强化机制。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

实验材料包括石英缎纹基布、石英斜纹半切布、石英缝合纱线和环氧树脂 (TDE-86)。石英缎纹基布、石英缝合纱线由湖北菲利华石英玻璃股份有限公司提供。石英斜纹半切布由天津工业大学复合材料研究院提供。环氧树脂 (TDE-86) 由天津津东化工复合材料有限公司提供。半切布是经自动化裁床将布的经纱或纬纱等间距裁剪而得, 由于只切断了经纱或纬纱的一个方向, 故称之为半切。半切布是长短纤维的有序集合体。缝合纱线是由线密度为 50 tex 的石英纤维加捻而成。实验材料属性如表 1 所示。

1.2 针刺/缝合多尺度联锁复合材料制备

针刺/缝合多尺度联锁复合材料的实验参数设置如表 2 所示, 设计了 4 组不同参数的试件组合进行测试, 每组 5 个试样, 并以传统针刺复合材料作对照组。研究了缝合纤维束的线密度、缝合矩阵对双切口层间剪切的影响。

针刺/缝合多尺度联锁织物的制备过程如图 1(a) 所示。首先使用 Autocad 和 Lectra 数控裁床对半切布进行轨迹设计和裁剪, Lectra 数控裁床由天津工业大学复合材料研究院提供。其次, 使用针

表 1 原材料属性
Table 1 Material parameters

Material	Structure	Density	Thickness/mm	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa
Quartz base cloth	Satin	460 g/m ²	0.5	217.57	26.71
Quartz half cut cloth	Twill	285 g/m ²	0.4	208.50	21.72
Quartz yarn	—	50 tex	—	600.00	78.00

表 2 实验参数
Table 2 Experimental parameters

Sample	Fabric structure	Volume of stitched fiber bundle/tex	Stitch spacing/mm	Stitch pattern/stitch
1 [#]	Needled	—	—	—
2 [#]	Needled/Stitched	50×1	4	2×2
3 [#]	Needled/Stitched	50×2	4	1×2
4 [#]	Needled/Stitched	50×4	—	1×1
5 [#]	Needled/Stitched	50×8	—	1×1

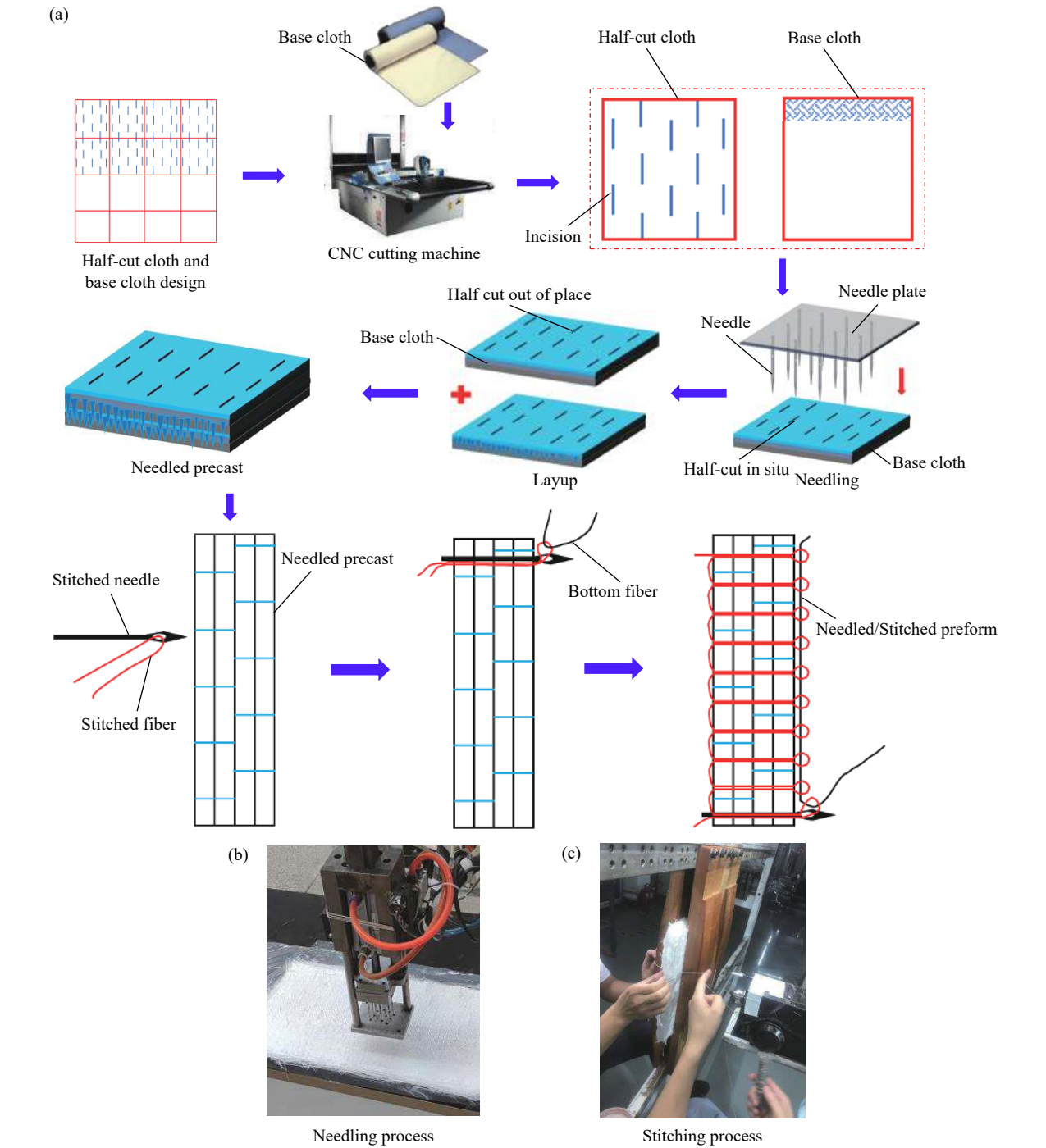
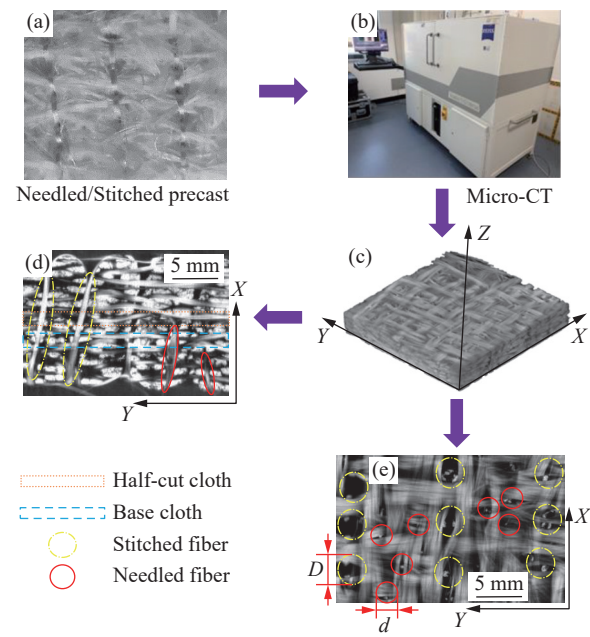


图 1 针刺/缝合多尺度连锁织物制备流程图
Fig. 1 Schematic of needled/stitched dual-scale interlocking preform manufacturing process

刺机器人^[24-25]制备针刺织物，针刺深度为 20 mm，针刺密度为 20 针/cm²。两层基布和一层半切布组成一个单元层，每两个单元层刺一遍，共刺两次，针刺过程如图 1(b) 所示。针刺完成后，采用缝合设备对织物进行缝制，缝合过程如图 1(c) 所示，所制备的针刺/缝合多尺度连锁织物结构如图 1(a) 中末尾图所示，图中织物铺层单元层间的短线段代表针刺纤维束，贯穿织物全厚度且连续缝合的长线条代表缝合纱线。最后，使用树脂传递成型 (Resin transfer molding, RTM) 工艺将制备完成的针刺/缝合多尺度连锁织物复合为石英纤维增强树脂基复合材料。

1.3 针刺/缝合多尺度连锁织物的结构表征

表征过程和结果如图 2 所示。先将图 2(a) 所示制备的针刺/缝合多尺度连锁织物裁剪为 25×25 mm² 的试样；使用如图 2(b) 所示的 Micro-CT (Zeiss Xradia 510 versa, 德国) 将试件先经四周不同角度成像，然后对扫描到的每张图片进行重建处理，生成图 2(c) 所示三维图像。



D—Diameter of stitched fiber; d—Diameter of needed fiber

图 2 针刺/缝合多尺度连锁织物 CT 表征过程与结果

Fig. 2 Process and results of CT characterization of needed/stitched composite

如图 2(d) 所示，从 YZ 截面能够清晰的看到基布层、半切布层、针刺纤维束和缝合纤维束的分布，基布和缝合纱线密度较高且分布均匀，CT 截面呈高亮状态。针刺纤维束实现了层间连接，而缝合纤维束实现了织物整个厚度的有效连接。

如图 2(e) 所示，从 XY 截面能够看到，针刺纤维束和缝合纤维束截面呈近乎圆形分布，缝合纱线挤压基布使基布面内纤维向两侧产生张裂变形，而针刺也导致了基布纱线的损伤。

根据 Micro-CT 图像，出于后期有限元建模简化模型考虑，将纤维束统一作圆柱形处理，且实验中针刺纤维束与缝合纤维束的直径均利用 Image-Pro Plus 软件测量，以保证数据误差的一致性，测量结果如图 3 所示，针刺纤维束的直径为 0.208 mm，而缝合纱线线密度为 100 tex 的纤维束直径为 0.487 mm，是针刺纤维束的 2.3 倍多，相比直径值增加了 134%，这是缘于缝合纱线纤维束的直径相对半切布针刺形成的纤维束具有更大的直径，同时也说明刺针将半切布的纤维束有效带入了层间，将使针刺/缝合多尺度连锁复合材料的层间性能大大提升。此外，由缝合纤维束线密度为 100 tex 的直径可推算知，缝合纤维束线密度为 50 tex、200 tex 和 400 tex 的直径分别为 0.243、0.974 和 1.948 mm。

1.4 针刺/缝合多尺度连锁复合材料 DNS 实验

根据实验标准 ASTM D3846-08^[26]，进行 DNS 实验来测试试件的 II 型层间剪切性能。DNS 试样的尺寸为 75 mm×10 mm×4 mm，两切口的槽宽为 1.5 mm，槽间距为 6.5 mm，切口深度加工至试样的中间平面处。使用黑色和白色手摇自动喷漆在试样长度方向的侧面均匀地喷上一层薄斑，喷漆由广东三和化工科技有限公司提供。使用日本岛津 AG-250 KNE 万能试验机进行复合材料的 DNS 实验，实验测试加载速率设置为 0.05 mm/min，试样的设计如图 4(a) 所示，DNS 实验过程如图 4(b) 所示，实验过程使用非接触式全场应

变测量系统 (ARAMIS, GOM, Germany) 记录全实验过程。以获得各点的位移与载荷来计算临界能量释放率 (G_{IIC})，进一步分析试件断裂形貌，揭示针刺/缝合多尺度连锁复合材料的失效模式、破坏机制和层间强化机制。

1.5 针刺/缝合多尺度连锁复合材料 Cohesive 模型

内聚力模型 (Cohesive zone mode, CZM)^[27] 是用来描述界面力学行为的一种模型。本文提出采用双内聚力模型来模拟针刺复合材料和针刺/缝合多尺度连锁复合材料的 DNS 层间剪切行为，预测材料的极限破坏强度。使用牵引-分离定律 (TSL) 来定义内聚力单元，同时来求解裂纹的产生与扩展，该定律主要由 3 个参数定义，包括内聚刚度 (K_{II})、剪切应力 (T_{II}) 和临界断裂能 (G_{II})。图 5 展

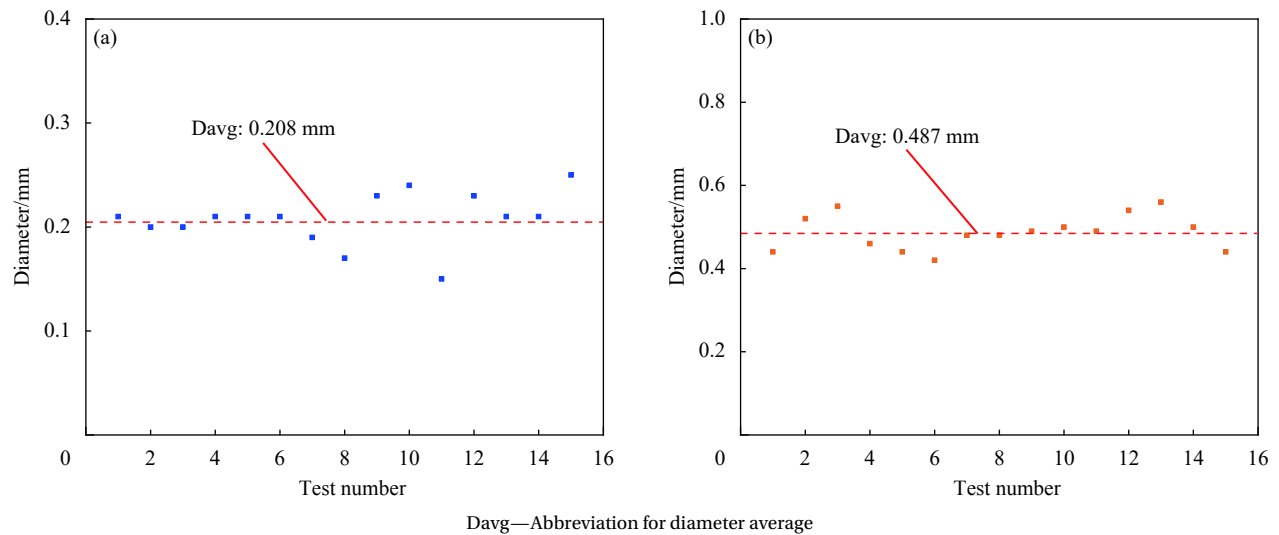
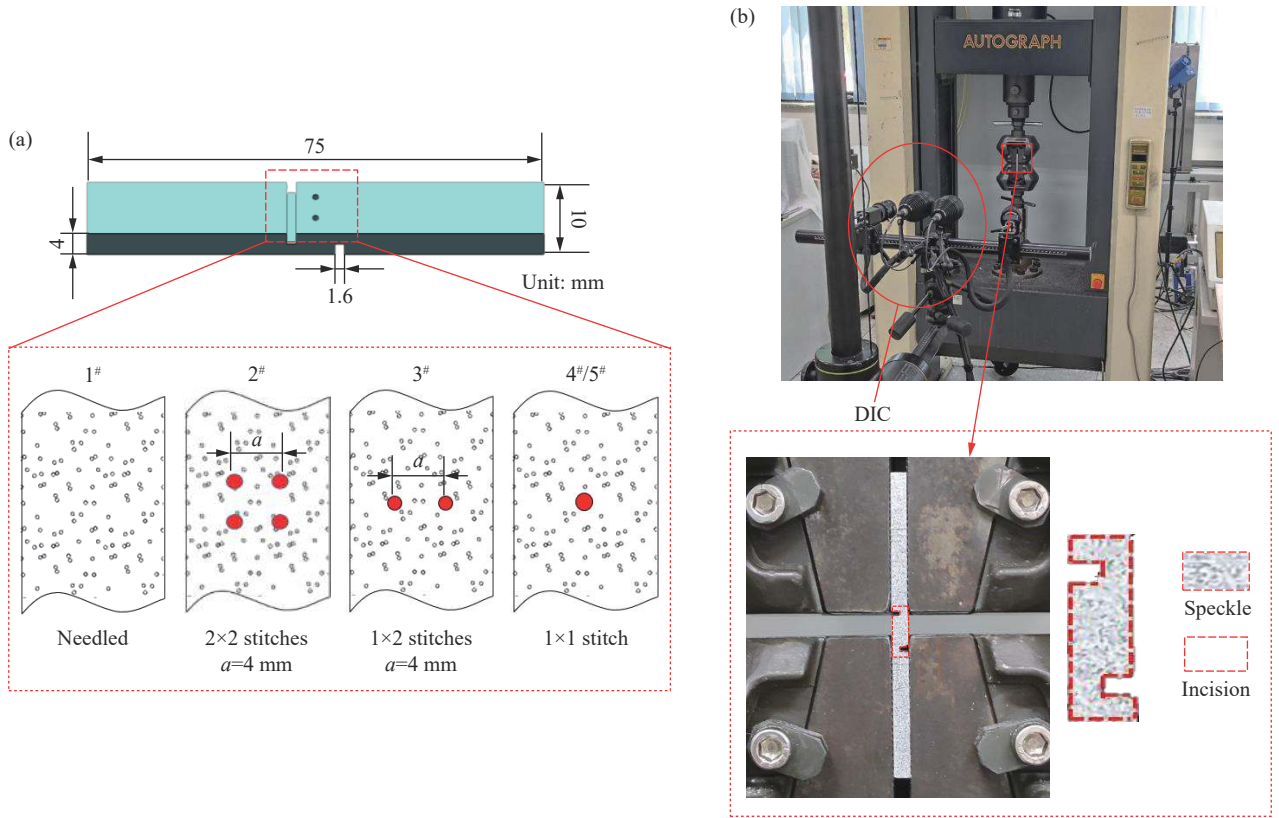


图 3 纤维束直径: (a) 针刺纤维束; (b) 线密度为 100 tex 缝合纤维束

Fig. 3 Diameter of fiber bundle: (a) Needled fiber bundle; (b) Stitched fiber bundle with a linear density of 100 tex



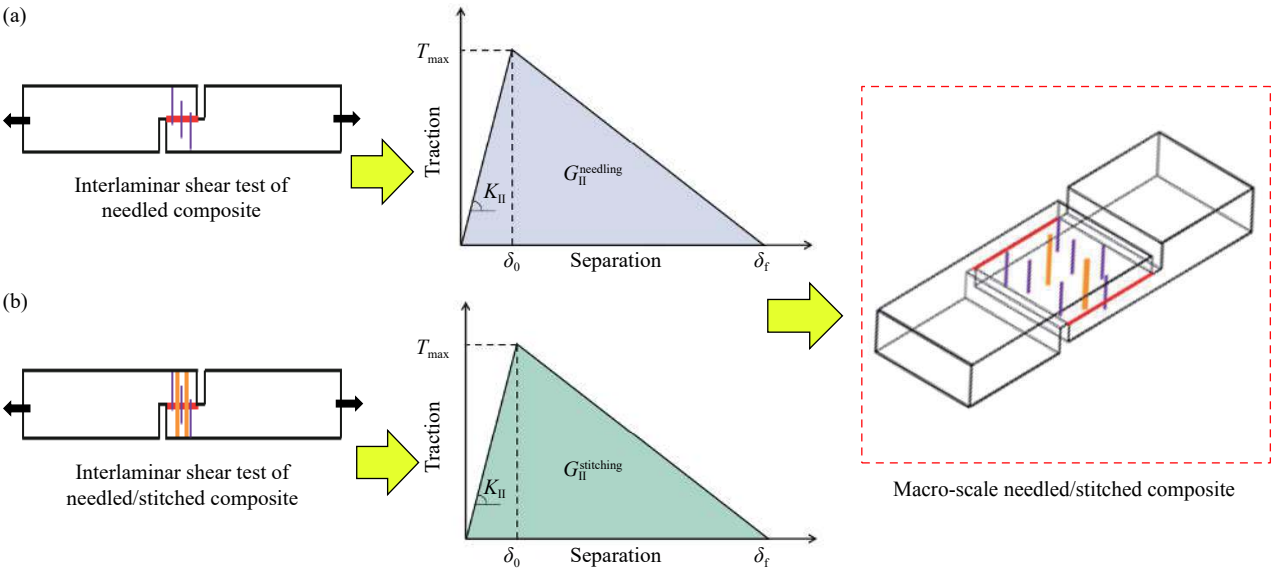
a —Stitch spacing; DIC—Digital image correlation method

图 4 DNS 实验: (a) 试样; (b) 实验过程示意图

Fig. 4 DNS experiment: (a) Sample; (b) Schematic diagram of the experimental process

示了 3 个参数之间的关系，图中纵坐标和横坐标分别代表应力与位移，载荷上升段的斜率表示粘结单元的刚度，三角形面积为材料破坏时的 G_{IIC} ， δ_0 和 δ_f 分别代表试样发生损伤和失效时的位移。基于针刺复合材料和针刺/缝合多尺度联锁复合材

料的 DNS 实验结果，分别得到了界面树脂、针刺纤维束和缝合纤维束的 Cohesive 单元参数，这些参数分别用于模拟针刺复合材料和针刺/缝合多尺度联锁复合材料的 DNS 测试。层间树脂和纤维束的剪切应力 T_{II} 、内聚刚度 K_{II} 和临界断裂能 G_{II} 分



T_{max} —Maximum shear stress; K_{II} —Cohesive stiffness; $G_{II}^{needling}$ —Critical fracture energy of needling composite; $G_{II}^{stitching}$ —Critical fracture energy of stitching composite; δ_0 —Displacement of the specimen damaged; δ_f —Displacement of the specimen failure

图 5 DNS 数值模拟示意图: (a) 针刺复合材料; (b) 针刺/缝合多尺度连锁复合材料

Fig. 5 Schematic diagram of DNS numerical simulation: (a) Needled composite; (b) Needled/stitched composite

别由以下各式计算 [28]:

$$T_{II} = \frac{P_{max}}{AL} \tag{1}$$

$$T'_{II} = \frac{4(P'_{max} - P_{max})}{\pi d^2} \tag{2}$$

$$K_{II} = \frac{T_{II}}{\delta_0} \tag{3}$$

$$G_{II} = \frac{T_{II}\delta_f}{2} \tag{4}$$

式中: T_{II} 为针刺纤维束剪切应力; T'_{II} 为缝合纤维束剪切应力; P_{max} 为针刺复合材料层间剪切实验的最大破坏载荷; P'_{max} 是多尺度连锁复合材料层间剪切实验的最大破坏载荷; K_{II} 为内聚刚度; G_{II} 为临界断裂能; A 为试样双切口间距 (6.5 mm); L 为试样的宽度 (10 mm); d 为针刺纤维束和缝合纤维束的直径, 由 Micro-CT 获取的图像借助软件 Image Pro Plus 经测量计算而得。

图 5 为 DNS 实验的 Cohesive 模拟方案示意图, 在 Abaqus 中创建好模型后定义材料属性。将所求内聚参数 K_{II} 、 T_{II} 、 G_{II} 输入数据表中对针刺复合材料基体、多尺度连锁复合材料基体、针刺纤维束和缝合纤维束进行定义。表 3 给出了层间树脂、针刺纤维束与缝合纤维束的内聚单元参数。

1.6 针刺/缝合多尺度连锁复合材料的有限元模型

所使用的有限元模拟软件为 Abaqus。使用八节点三维键合单元 (COH3 D8) 对界面树脂粘合层、针刺纤维束粘合层和缝合纤维束粘合层分别进行

定义; 同时使用八节点线性六面体单元 (C3 D8 R) 对试样基体、针刺纤维束及缝合纤维束分别进行定义, 同时在有限元模型试样中间界面处定义 0.1 mm 的 Cohesive 单元层。出于提高实验效率, 采用 Abaqus 建立半对称模型, 有限元模型及网格划分如图 6 所示, 本实验为了有限元模拟简化模型, 对针刺/缝合复合材料的纤维束统一采用圆柱形模型, 且针刺纤维束和缝合纤维束的直径由 1.3 部分中的结构表征得到, 针刺纤维束直径为 0.208 mm, 缝合纤维束直径分别为 0.487、0.243、0.974 和 1.948 mm。使用通用的静态分析方法, 设置总时间为 1, 对模型施加边界条件, 固定试样的下端, 在上端施加位移载荷边界条件来模拟 DNS 实验过程。

表 3 材料力学性能参数

Table 3 Mechanical properties of material

Material	T_{II} /MPa	K_{II} /(N·mm ⁻³)	G_{II} /(N·mm ⁻¹)
TDE-86 resin	14	1 700	1
Needled fiber	485	1 729	50
Stitched fiber	762	1 839	162

Notes: T_{II} —Sheer stress; G_{II} —Critical fracture energy.

2 结果与讨论

2.1 针刺/缝合多尺度连锁复合材料 DNS 实验结果与分析

图 7 为针刺/缝合多尺度连锁复合材料 DNS 实验中不同缝合参数下的载荷-位移曲线。图中所

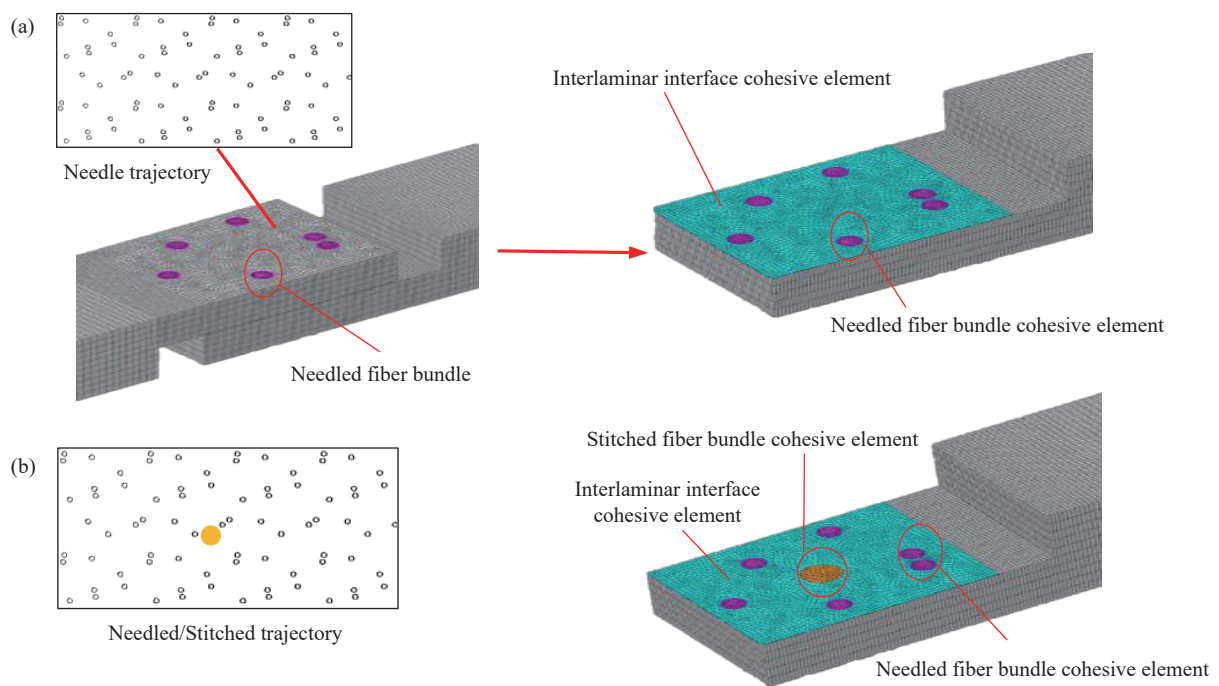


图 6 有限元模型与网格划分: (a) 针刺复合材料; (b) 针刺/缝合多尺度联锁复合材料

Fig. 6 Finite element model and meshing: (a) Needled composite; (b) Needled/stitched composite

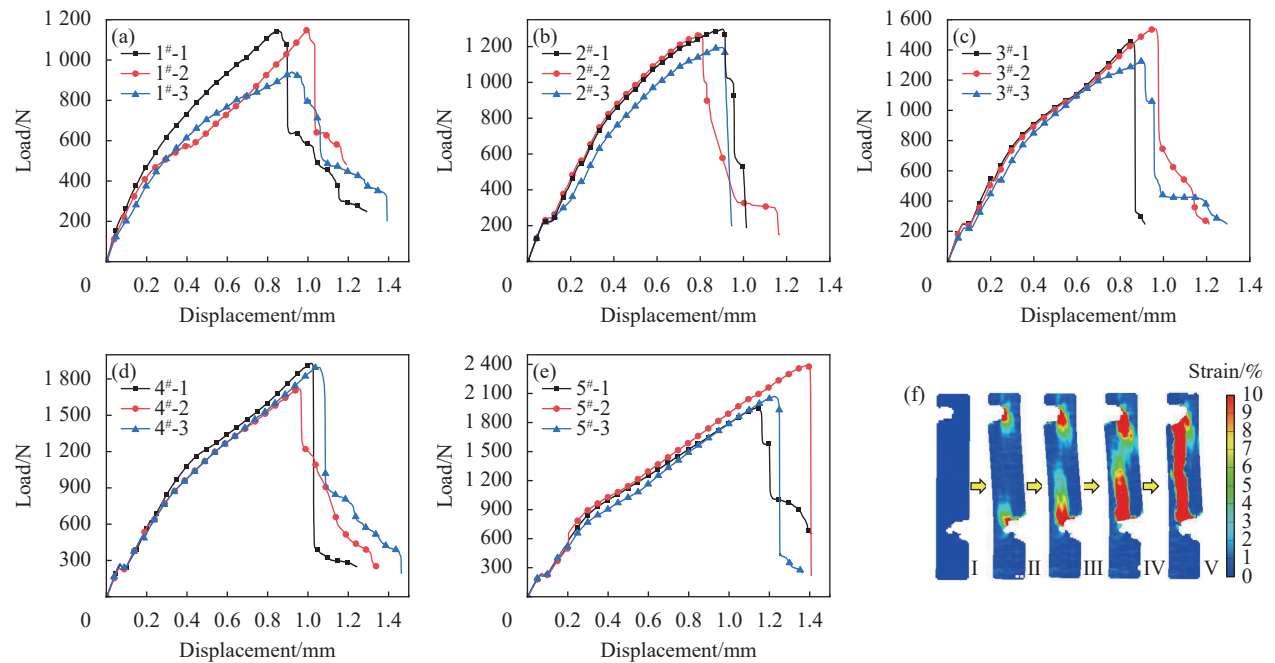


图 7 DNS 的载荷-位移曲线: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]; (d) 4[#]; (e) 5[#]; (f) 实验应变云图

Fig. 7 Load-displacement curves of DNS: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]; (d) 4[#]; (e) 5[#]; (f) Experimental strain nephogram

有 DNS 实验曲线变化呈相似趋势。曲线图中从点 I 到点 II，试样开始产生应变集中区，该阶段由针刺纤维束和树脂基体承受载荷。点 II 到点 IV，随着位移的增加，缝合纤维束开始受力，破坏开始在试件两切口中间处发生，树脂局部开裂试样内部产生裂缝，应变区域逐步向内扩展变得更加明显。从点 IV 到点 V，由于位移进一步加大，针刺

纤维束和缝合纤维束逐渐达到最大破坏载荷，造成纤维断裂或从基体中拔出，高应变区越来越大，逐渐达到试样的全部长度，试件即将失效。此外，从失效前的应变云图可以看到，云图上集中了大量的应变集中区，其中，应变值最高的区域即为试样发生断裂的位置。相比于传统针刺复合材料，针刺/缝合多尺度联锁复合材料的实验曲

线明显高于传统针刺复合材料，最大失效载荷提升 20.28%~86.46%。

图 8 为针刺/缝合多尺度联锁复合材料 DNS 实验中不同缝合参数下的最大失效载荷对比。结果表明，缝合纤维植入量和缝合矩阵都对试件的最大失效载荷产生较大影响。如图 8(a) 所示，在缝合矩阵一定下，缝合纤维植入量越大，最大失效载荷越高，相比传统针刺复合材料最大可提升 86.46%，这是由于在同一区域相同数量的缝合孔下，单个缝合孔中植入的纤维量越大，其对试样整体的束缚力就越强，即为最大失效载荷越高；如图 8(b) 所示，在纤维植入量一定下，缝合矩阵越小，最大失效载荷越高，相比传统针刺复合材料最大可提升 55.68%，这是缘于缝合纤维束是否

为同时断裂导致，1×1 stitche 的缝合纤维束为一次性直接产生破坏；而 2×2 stitches 和 1×2 stitches 的缝合纤维束在缝合或复合时容易发生倾斜和弯曲，从而使纤维束非一次性断裂，所需破坏载荷要小于 1×1 stitche；此外，由载荷-位移曲线图亦能看出 2×2 stitches 和 1×2 stitches 的曲线相对 1×1 stitche 比较平缓。故缝合矩阵越小其最大失效载荷越高。使用 SEM 观察的 DNS 试样典型断口形貌，观察结果如图 9 所示，针刺/缝合复合材料有大量纤维束断裂拔出，且直径明显大于传统针刺复合材料，这也是其层间性能提高的最主要原因。图上还可以看出，双切口层间剪切典型的破坏模式为基体开裂、纤维束的脆性断裂和拔出，阐明了层间增强机制。

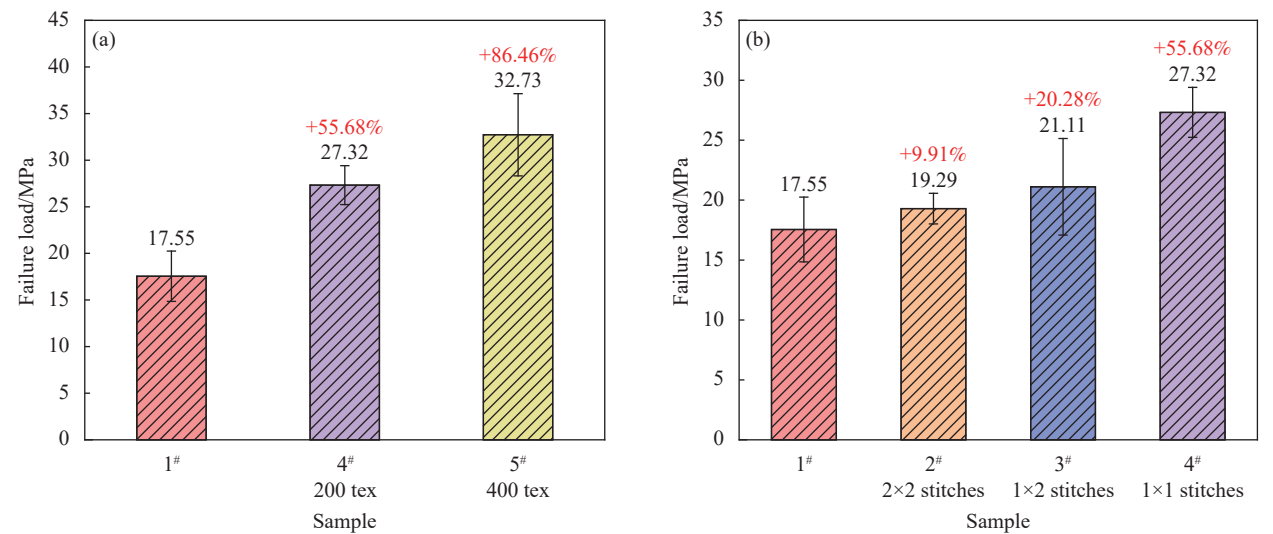


图 8 DNS 的强度对比: (a) 不同缝合纤维植入量; (b) 不同缝合矩阵

Fig. 8 Intensity comparison of DNS: (a) Different volume of stitched fiber bundle; (b) Different stitch pattern

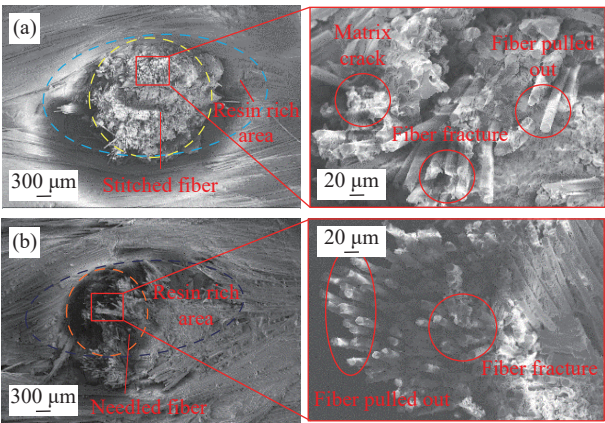


图 9 DNS 实验典型断裂形貌: (a) 多尺度联锁复合材料; (b) 针刺复合材料

Fig. 9 Typical fracture morphology of DNS experiment: (a) Needled/stitched composite; (b) Needled composite

2.2 DNS 模拟结果与分析

有限元模拟结果和实验位移-载荷曲线对比如图 10 所示。可以看出，模拟结果和针刺/缝合多尺度联锁复合材料的 DNS 实验结果吻合较好，应变云图模拟结果与实验云图也比较接近。表 4 为 DNS 实验与有限元模拟的最大破坏载荷对比。可以看出，层间剪切的误差率最大不超过 8%，证明了运用内聚力模型来模拟预测针刺/缝合多尺度联锁复合材料的层间剪切强度可行性。

3 结论

提出一种针刺/缝合多尺度联锁针刺织物及其复合材料，并对其进行了结构表征和双切口层间剪切 (DNS) 性能测试，研究结果表明：

(1) 与传统针刺复合材料相比，针刺/缝合多尺度连锁复合材料的 DNS 性能提升明显，引入缝合工艺使 DNS 的最大破坏载荷提升了 86.46%；

(2) 缝合纤维束含量和缝合矩阵是影响复合材料 DNS 性能的重要因素，缝合纤维束含量由 200 tex 增加至 400 tex 可使 DNS 性能由 55.68% 增加到 86.46%；缝合矩阵由 2×2 stitches 减小至 1×1 stitch 可使 DNS 性能由 9.91% 增加到 55.68%；

(3) DNS 实验表明，针刺/缝合多尺度连锁复合材料的典型破坏模式为基体开裂、纤维束的脆性断裂和拔出；

(4) 应用内聚力模型对针刺/缝合多尺度连锁复合材料进行 DNS 实验有限元分析，模拟结果和针刺/缝合多尺度连锁复合材料的 DNS 实验结果吻合较好，误差最大不超过 8%，说明预测模型是可靠的，可用于指导织物成型工艺设计。

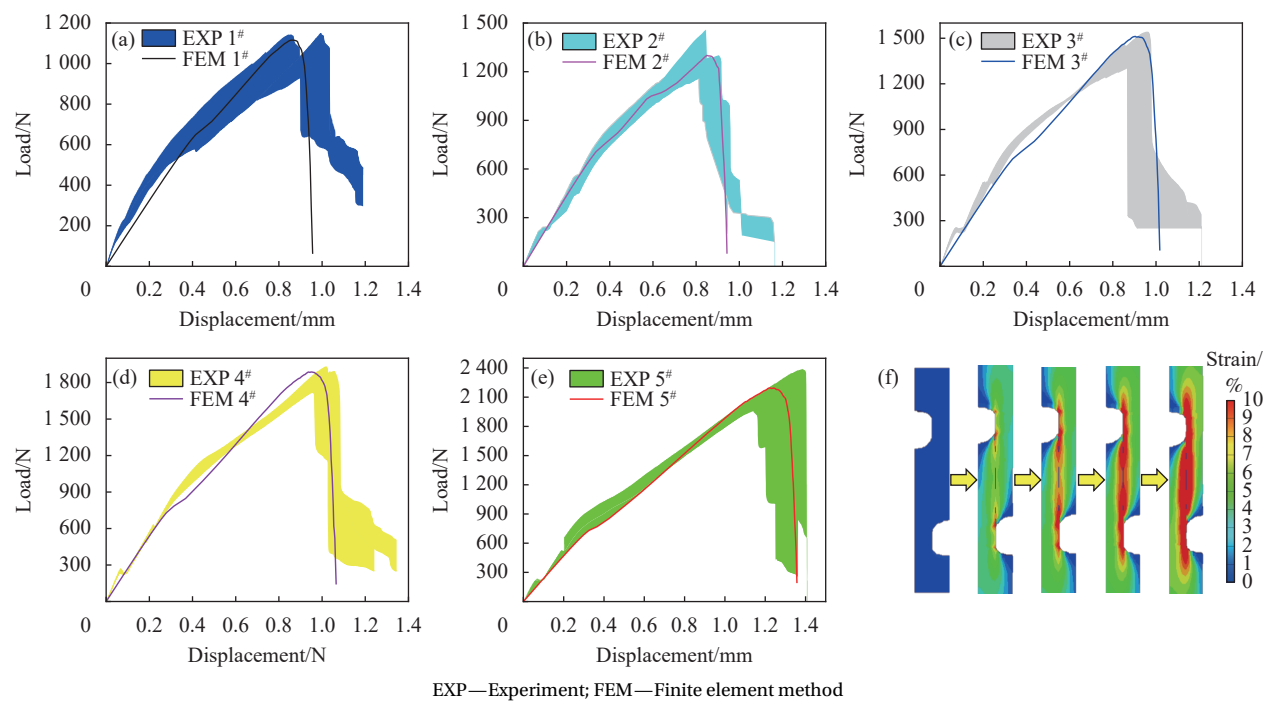


图 10 实验与模拟的 DNS 载荷-位移曲线对比: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]; (d) 4[#]; (e) 5[#]; (f) 有限元模拟应变云图

Fig. 10 DNS load-displacement curve comparison between EXP and FEM: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]; (d) 4[#]; (e) 5[#]; (f) Finite element simulation strain nephogram

表 4 实验与有限元的 DNS 最大破坏载荷对比			
Table 4 Comparison of DNS maximum failure load between experiment and FEM			
Sample	EXP/N	FEM/N	Error rate/%
1 [#] (Needled)	1 123.33	1 115.48	0.70
2 [#] (Needled/Stitched 200 tex 2×2 stitches)	1 254.64	1 300.54	3.66
3 [#] (Needled/Stitched 200 tex 1×2 stitches)	1 451.25	1 512.00	4.18
4 [#] (Needled/Stitched 200 tex 1×1 stitch)	1 748.75	1 887.07	7.91
5 [#] (Needled/Stitched 400 tex 1×1 stitch)	2 094.58	2 194.91	4.79

参考文献：

[1] LIM H J, CHOI H, LEE M J, et al. An efficient multi-scale model for needle-punched C_f/SiC_m composite materials with experimental validation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 217: 108890.

[2] XIE W, YANG F, MENG S, et al. Perforation of needle-punched carbon-carbon composites during high-temperature and high-velocity ballistic impacts[J]. *Composite Structures*, 2020, 245: 112224.

[3] HAN M, ZHOU C, ZHANG H. A mesoscale beam-spring combined mechanical model of needle-punched carbon/carbon composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 168(10): 371-380.

[4] 陈小明, 李晨阳, 李皎, 等. 三维针刺技术研究进展[J]. *纺织学报*, 2021, 42(5): 185-192.

CHEN Xiaoming, LI Chenyang, LI Jiao, et al. Research progress of 3D needling[J]. *Journal of Textile Research*, 2021,

- 42(5): 185-192(in Chinese).
- [5] SHARMA A, PATNAIK A. Experimental investigation on mechanical and thermal properties of marble dust particulate-filled needle-punched nonwoven jute fiber/epoxy composite[J]. *Jom*, 2018, 70(7): 1284-1288.
 - [6] SHARMA A, CHOUDHARY M, AGARWAL P, et al. Effect of micro-sized marble dust on mechanical and thermo-mechanical properties of needle-punched nonwoven jute fiber reinforced polymer composites[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(2): 881-898.
 - [7] CHEN X, CHEN L, ZHANG C, et al. Three-dimensional needle-punching for composites—A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 85: 12-30.
 - [8] 焦浩文, 陈冰, 左彬. C/SiC复合材料的制备及加工技术研究进展[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(1): 19-34.
JIAO Haowen, CHEN Bing, ZUO Bin. Research progress in preparation and processing technology of C/SiC composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(1): 19-34(in Chinese).
 - [9] 张鹏飞, 张立同, 殷小玮, 等. 三维针刺碳毡增强碳/氮化硼复合材料的力学和介电性能[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(4): 15-20.
ZHANG Pengfei, ZHANG Litong, YIN Xiaowei, et al. Mechanical and dielectric properties of carbon/boron nitride composites reinforced by three-dimensional needled carbon felt[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(4): 15-20(in Chinese).
 - [10] 陈国耀, 黄丰, 杨振宇, 等. 三维针刺复合材料参数化建模及力学性能仿真[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4459-4470.
CHEN Guoyao, HUANG Feng, YANG Zhenyu, et al. Parametric modeling and mechanical properties simulation of three-dimensional needled composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4459-4470(in Chinese).
 - [11] LU L, FAN W, MENG X, et al. Modal analysis of 3D needled waste cotton fiber/epoxy composites with experimental and numerical methods[J]. *Textile Research Journal*, 2021, 91(3-4): 358-372.
 - [12] ZHAO W, YU R, DONG W, et al. The influence of long carbon fiber and its orientation on the properties of three-dimensional needle-punched CF/PEEK composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 203: 108565.
 - [13] DONG Y, SHI X, ZHANG Z, et al. In-situ bending behavior and failure characterization of 3D needle-punched C/SiC composites[J]. *Materials Today Communications*, 2017, 13: 378-385.
 - [14] XIE J, CHEN X, ZHANG Y. Experimental and numerical investigation of the needling process for quartz fibers[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 165: 115-123.
 - [15] JIN X C, HOU C, LI C L, et al. Strain rate effect on mechanical properties of 3D needle-punched C/C composites at different temperatures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160: 140-146.
 - [16] JIA Y Z, LIAO D M, CUI H, et al. Modelling the needling effect on the stress concentrations of laminated C/C composites[J]. *Materials & Design*, 2016, 104: 19-26.
 - [17] SONG L, LI J, ZHAO Y, et al. Effect of prefabricated structure on thermal conductivity of acupuncture quartz fiber/epoxy composites[J]. *Journal of Composites*, 2016, 5: 955-961.
 - [18] ZHENG J, LI H, CUI H, et al. Study on the correlation between the tensile strength of C/C composites and the parameters of needle punching[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2017, 11: 30-36.
 - [19] 吴小军, 杨杰, 郑蕊, 等. 烧蚀型面结构对CVI+HPIC工艺制备针刺C/C喉衬等离子烧蚀性能的影响[J]. *无机材料学报*, 2020, 35(6): 654-660.
WU Xiaojun, YANG Jie, ZHENG Rui, et al. Effect of ablative surface structure on plasma ablative properties of needled C/C throat lining prepared by CVI+HPIC process[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2020, 35(6): 654-660(in Chinese).
 - [20] YAO T, CHEN X, LI J, et al. Significantly improve the inter-layer and in-plane properties of needled fabrics by novel none-felt needling technology[J]. *Composite Structures*, 2021, 274: 114303.
 - [21] YAO T, CHEN X, LI J, et al. Experimental and numerical study of interlaminar shear property and failure mechanism of none-felt needled composites[J]. *Composite Structures*, 2022, 290: 115507.
 - [22] XUE L, CHEN Z, LIAO J, et al. Compressive strength and damage mechanisms of 3D needle-punched C_f/SiC-Al composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 156934.
 - [23] CHEN X M, ZHENG H W, WEI Y Y, et al. Effect of tufting on the interlaminar bonding behavior of needled composite[J]. *Polymer Composites*, 2022, 44(1): 229-240.
 - [24] CHEN X, ZHAO Y, ZHANG C. Robot needle-punching for manufacturing composite preforms[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 50: 132-139.
 - [25] CHEN X, ZHANG Y, XIE J. Robot needle-punching path planning for complex surface preforms[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 52: 24-34.
 - [26] American Society for Testing and Materials. Standard test method for in-plane shear strength of reinforced plastics: ASTM D3846-08(2015)[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
 - [27] ALMANSOUR F A, DHAKAL H N, ZHANG Z Y, et al. Effect of hybridization on the mode II fracture toughness properties of flax/vinyl ester composites[J]. *Polymer Composites*, 2017, 38(8): 1732-1740.
 - [28] TAPULLIMA J, SONG S H, KWEON J H, et al. Characterization of mode II specimen using I-fiber stitching process[J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112863.