

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.016

基于有限元模拟的纤维流铺层对黄麻/聚丙烯 复合材料力学性能的影响

王庆涛¹, 马云龙¹, 王建刚², 王春红¹, 钱晓明¹, 邓辉¹, 王立晶¹

(1. 天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 绍兴市质量技术监督检测院, 浙江绍兴 312366)

摘要: 为提升黄麻/聚丙烯(PP)非织造复合材料的力学性能,设计了一种新型连续纤维流铺排成型系统,将该系统制备的黄麻纤维增强铺层网作为非织造复合材料的加强层,叠放于黄麻/PP非织造纤维网的上、中、下层,经热压后制成纤维流铺层加强黄麻/PP非织造复合材料。结合力学性能测试及有限元模拟分析,分析纤维流铺层加强方式以及不同铺层位置对复合材料力学性能的影响并解析其损伤机理,并探讨有限元模拟软件对复合材料力学性能模拟结果的准确性。结果表明,加强层铺放在复合材料上层时,复合材料的弯曲性能和拉伸性能最好。当加强层在上、中、下层时,复合材料的弯曲强度较无加强层分别提高了110.30%,39.44%,76.97%;其拉伸强度较无加强层分别提高了39.33%,12.55%,39.33%。利用有限元分析软件建立模型进行模拟分析,结果表明,当加强层在复合材料的上、中、下层时,模拟数据与实际测试数据的相对误差分别为11.73%, -11.37%, 4.37%,与实验数据基本相吻合。最后结合应力云图对不同加强层位置的复合材料损伤机理进行了分析。纤维流铺层方式显著提升了复合材料的弯曲性能,为天然纤维增强树脂基非织造复合材料提供了一种新的铺层加强方式。

关键词: 纤维流铺层;黄麻纤维;非织造复合材料;力学性能;有限元模拟;损伤机理

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0124-09

Effects of fiber flow lay-up on mechanical properties of jute/polypropylene composites based on finite element simulation

WANG Qingtao¹, MA Yunlong¹, WANG Jiangang², WANG Chunhong¹, QIAN Xiaoming¹, DENG Hui¹, WANG Lijing¹

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Shaoxing City Quality and Technical Supervision and Testing Institute, Shaoxing 312366, China)

Abstract : In order to improve the mechanical properties of jute/polypropylene (PP) nonwoven composites, a new continuous fiber lay-up forming system was designed and used to prepare the jute fiber reinforced lay-up net as the reinforcement layer of the nonwoven composites, which was stacked on the upper, middle and lower layers of jute/PP nonwoven fiber net. Then the fiber flow lay-up reinforced jute/PP nonwoven composites were made by hot pressing. Based on the mechanical properties tests and finite element simulation analysis, the influences of the fiber flow lay-up reinforcement method and different reinforcement layer positions on mechanical properties of the composites were analyzed, the damage mechanism was also analyzed, and the accuracy of the finite element simulation software in simulating the mechanical properties of the composites was explored. The results show that the composite has the best flexural and tensile properties when the reinforcement layer is placed on the upper layer of the composite. When the reinforcement layer is on the upper, middle and lower layers, compared with the composite without reinforcement layer, the flexural strength increases by 110.30%, 39.44% and 76.97% respectively, and the tensile strength increases by 39.33%, 12.55% and 39.33% respectively. The finite element analysis software was used to establish the model for simulation analysis. The results

基金项目: 中国纺织工业联合会科技指导性计划项目(2024008)

通信作者: 王建刚,高级工程师,研究方向为纺织品和纺织化学品质量技术基础和有害化学品的检测

收稿日期: 2025-07-08

引用格式: 王庆涛,马云龙,王建刚,等.基于有限元模拟的纤维流铺层对黄麻/聚丙烯复合材料力学性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(10):124-132.

WANG Qingtao, MA Yunlong, WANG Jiangang, et al. Effects of fiber flow lay-up on mechanical properties of jute/polypropylene composites based on finite element simulation[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 124-132.

show that when the reinforcement layer is placed on the upper, middle and lower layers of the composite, the relative error between the simulated data and the actual test data is 11.73%, -11.37% and 4.37% respectively, which indicates the simulated data are basically consistent with the experimental data. At last, the damage mechanisms of the composites with different reinforcement layer positions were analyzed by combining the stress cloud diagram. This fiber flow lay-up method significantly improves the flexural performances of the composites and provides a new reinforcement lay-up method for natural fiber reinforced resin nonwoven composites.

Keywords : fiber flow lay-up ; jute fiber ; non-woven composite ; mechanical property ; finite element simulation ; damage mechanism

目前,碳纤维与玻璃纤维发展迅速,在高端科技领域中得到广泛应用^[1-2],但是在碳纤维、玻璃纤维大规模占领市场的同时,其回收利用率则相对较低^[3]。天然植物纤维复合材料在某些领域可以替代玻璃纤维或碳纤维等高性能纤维^[4-5]。天然植物纤维具有可用性高、力学性能好、密度低、可回收性和环保性优异等特点,广泛应用于制备植物纤维增强复合材料^[6-7]。在众多的聚合物中,聚丙烯(PP)纤维具有密度小、价格低、力学性能好并且可回收利用等优点^[8-9]。黄麻/PP纤维制备的复合材料密度低、耐冲击性好、吸声性能好。为促进汽车的轻量化,可将其大量应用于汽车内饰领域^[10-11]。

黄麻纤维在黄麻/PP非织造复合材料中作为增强相,存在一定程度的纤维分布不均匀且取向分布不均匀的现象,会导致复合材料存在局部力学性能较差的缺陷。为了提高黄麻纤维增强复合材料的力学性能,国内外的许多学者作出了研究。Wang等^[12]使用氨基硅油对黄麻纤维进行改性,在提升复合材料热稳定性的同时也提升了其力学性能;Sever等^[13]采用g-甲基丙烯酸酰氧基丙基三甲氧基硅烷对碱处理过的黄麻纤维织物进行了二次处理,增强黄麻与聚酯之间的结合力,进而提升复合材料的力学性能;Swain等^[14]将黄麻纤维经过化学改性(包括丝光处理和苯甲酰化处理),以增强纤维与基体之间的界面结合,从而大幅提升复合材料的力学性能。对于非织造复合材料,可以根据不同的应用需求,改变纤维网的铺层方向、堆叠顺序或是不同结构对其性能进行优化^[15]。Zhao等^[16]首次提出在铺层过程中将短纤维分布在预浸料表面以提高层间韧性;李苏文等^[17]将黄麻织造成纱罗网格织物作为增强体,当该织物铺放在上层时复合材料弯曲强度相比于未带有加强层的复合材料提高了19.28%,弯曲模量提高了24.12%。表明复合型增强结构可以提高复合材料的力学性能,同时还避免了化学试剂对环境的

污染。

笔者探究了自制连续纤维流铺层装置铺制的加强层对非织造复合材料力学性能的影响,通过仿真模拟,可以了解材料的受力分布情况。选择黄麻纤维和PP纤维作为原料,制备了黄麻/PP非织造复合材料,利用连续纤维流铺排成型系统铺排出非织造复合材料加强层,探究新的铺层方式和不同的加强位置对复合材料结构和力学性能的影响。然后,通过有限元仿真模拟软件,模拟出非织造复合材料在受到拉伸、弯曲时的整体受力情况,分析了复合材料弯曲失效机理,从而为黄麻纤维增强PP复合材料的研发和应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

黄麻纤维:长度60~75 mm,直径150~300 μm ,濉溪县蕴丰麻纺有限公司;

PP纤维:长度51 mm,6D,寿光永旭防水材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

小型和毛机:XFH,青岛市胶南针织机械厂;

梳理机:天津工业大学自制;

小型数字式并条试验机:DSDr-01,天津华凯嘉诚科技有限公司;

连续纤维流铺排成型系统:天津工业大学自制;

针刺机:RSZ-80(预刺机、主刺机),天津华凯嘉诚科技有限公司;

塑料制品液压机:Y/TD71-45A,天津市天锻压力机有限公司;

万能强力机:Instron5969,美国Instron公司;

超景深三维显微镜:Z16APOA,德国徕卡微系统有限公司;

台式扫描电子显微镜(SEM):Phenom XL,荷兰Phenom-World公司;

显微计算机断层扫描(CT)设备:N70,比利时NEOSCAN公司。

1.3 连续纤维流铺排成型系统设计

连续纤维流铺排成型系统是在结合气流成网技术和梳理成网技术基础上,根据非织造产品纤网成型的发展现状及趋势,结合短纤维的特性,借鉴复合材料快速成型技术的操作逻辑所开发出的一种新型成网系统^[18]。如图1所示,该成网系统可以实现不同种类的纤维在线连续铺排成型,一定程度上可生产具有立体结构纤维网,同时由于引入了可移动喷嘴的机械结构,使得该系统可以进行单层或多层的短纤复合纤维网的铺设工作。此装置通过借鉴传统梳理成网技术以及气流成网技术,将梳理机各机构简化缩小,保留喂入罗拉、转移辊、锡林等关键结构部件,实现纤维的快速梳理与混合,然后通过喷嘴集束,并经负压吸风装置将纤维吸附于铺网帘子上,同时控制喷嘴按 X 、 Y 、 Z 三轴方向运动,将纤维以预置轨迹完成铺排。

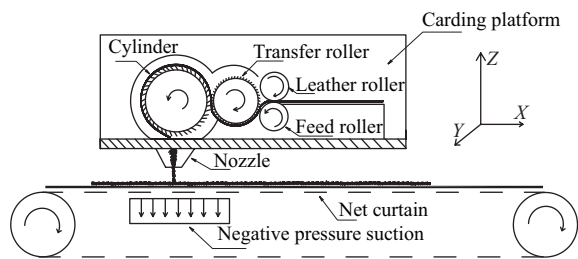


图1 连续纤维流铺排成型系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of continuous fiber flow lay-up molding system

1.4 复合材料的制备

1.4.1 制备非织造纤维网

对黄麻纤维和PP纤维进行开松,将开松后的PP纤维与黄麻纤维按质量比为6:4进行混合,将混合纤维团开松两遍,保证纤维混合均匀。将开松混合后的纤维团梳理成纤维网,裁剪为30 cm×30 cm的样品。

1.4.2 制备增强铺层网

将开松过的PP纤维和黄麻纤维按照质量比为2:8进行混合,再次开松后梳理成网,将纤维网制成黄麻/PP粗条。图2为连续纤维流铺排成型系统实物图,将粗条压入连续纤维流铺排成型系统的喂入罗拉,粗条经过梳理后进入纤维喷嘴中被脱网帘下的风机牢牢吸附在脱网帘的表面,为保证复合材料横向和纵向的强度一致,将增强铺层网按“井”字进行铺层。

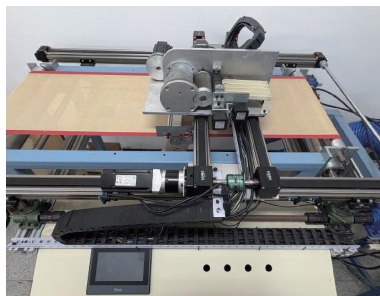


图2 连续纤维流铺排成型系统实物图

Fig. 2 Physical picture of continuous fiber flow lay-up forming system

1.4.3 制备黄麻/PP复合毡

按照图3所示,将黄麻纤维增强铺层网分别置于黄麻/PP非织造纤维网的第一层和第2层、第4层和第5层、第7层和第8层的中间。即在8层普通非织造纤维网中加1层增强铺层网,共计9层,进行一次预刺后正反面各主刺一次,确保纤维间充分抱合,从而制得以增强铺层网作为加强层的黄麻/PP复合毡。

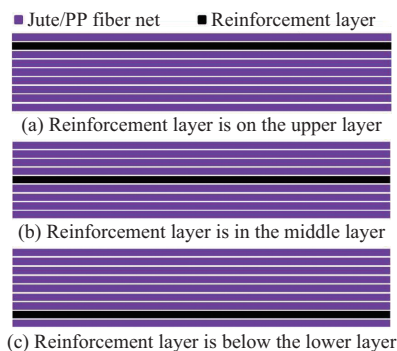


图3 黄麻纤维增强铺层网(加强层)不同铺层位置设计

Fig. 3 Design of different laying layers of jute fiber reinforced lay-up net (reinforcement layer)

1.4.4 制备复合材料

将黄麻/PP复合毡热压成复合材料。第一步:将上下模具升温至80℃后将复合毡放入模具,上下模具间压力为5 MPa,保持60 min,将黄麻/PP复合毡中的水分完全去除;第二步:将上下模温度升至150℃并保持5 MPa的压力,保持5 min后卸压1 min,将压力再次提升至5 MPa,保持4 min,循环3次,降低成品中各纤维间的孔隙;第三步:将温度提升至180℃,压力调至15 MPa保持10 min。图4为复合材料的制备流程图。

1.5 测试与表征

在万能强力机上对试样进行三点弯曲加载试验,测试参照ASTM D790-10,加载速度为2 mm/min,每5个样品取平均值,记录位移-载荷曲线,按标准中

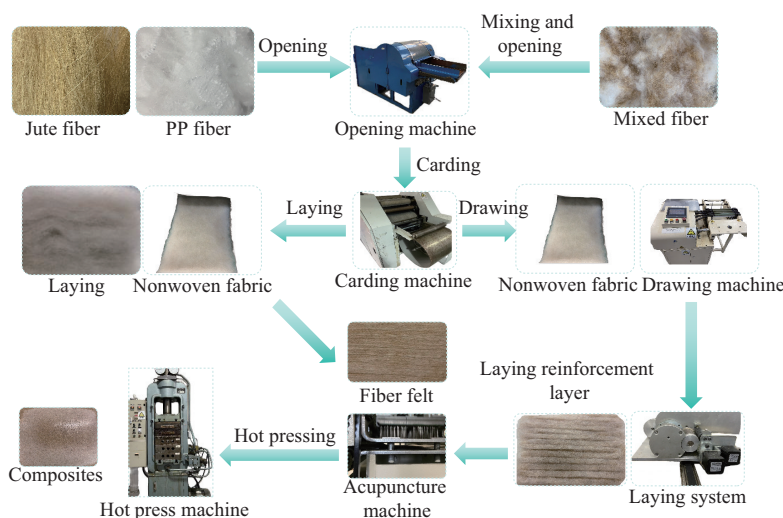


图4 复合材料制作流程图

Fig. 4 Flow chart of composite preparation

公式计算弯曲强度。

在万能强力机上对试样进行拉伸加载试验,测试参照 GB/T 1447-2005,加载速率为 5 mm/min,每 5 个样品取平均值,记录位移-载荷曲线,按标准中公式计算拉伸强度。

采用台式 SEM 观察复合材料断面及其界面结合状态;采用超景深三维显微镜探究非织造复合材料的横截面形貌;采用 CT 扫描复合材料查看内部断裂情况以及复合材料内部孔隙情况。

2 有限元仿真模拟

通过万能强力机的力学性能测试,将得出的数据进行整理并应用到有限元模拟中,其中无加强层的黄麻/PP 非织造复合材料的拉伸弹性模量为 2 752 MPa,泊松比为 0.38,由单独加强层组成的复合材料的拉伸弹性模量为 5 638 MPa,泊松比为 0.35。

根据所裁剪出的复合材料的样品具体尺寸参数(60 mm×12.7 mm×2.5 mm)构建模型。加强层经热压后与整体复合材料相连接,认定经热压后的加强层为一块 60 mm×12.7 mm×0.28 mm (复合材料由 9 层铺制,厚度取平均值)的复合材料模型,将加强层模型按对应位置插入整体模型中。加载模具半径为 5 mm。建模结果如图 5 所示。

3 结果与讨论

3.1 力学性能分析

3.1.1 弯曲性能分析

图 6 为无加强层及各加强层位置对应的复合材料弯曲应力-应变曲线,图 7 为计算得到的弯曲性能数据。从图 7 可以看出未经加强的复合材料的弯曲性能

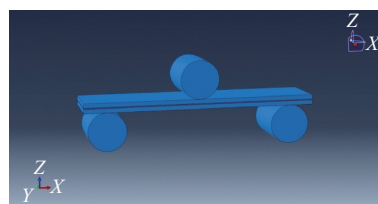


图5 非织造复合材料弯曲性能测试仿真建模

Fig. 5 Simulation modeling of flexural performance test of nonwoven composites

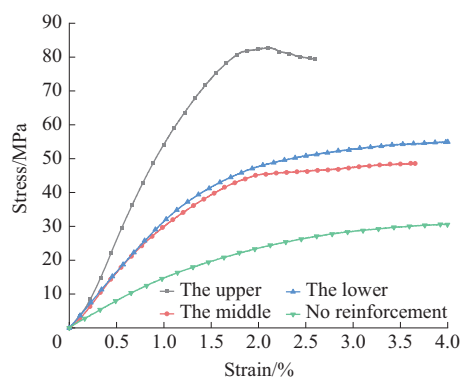


图6 不同加强层位置与无加强层黄麻/PP非织造复合材料的弯曲应力-应变曲线

Fig. 6 Flexural stress-strain curves of jute/PP nonwoven composites with different reinforcement layer positions or without reinforcement layer

远低于经纤维流加强的复合材料的弯曲性能。未经加强的复合材料弯曲强度为 32.05 MPa,当加强层位于上、中、下层时,复合材料的弯曲强度分别是 67.40, 44.69, 56.72 MPa,与未经加强的复合材料相比分别提高了 110.30%, 39.44%, 76.97%;未经加强的复合材料的弯曲模量为 2.21 GPa,加强层位于上、中、下层时,复合材料的弯曲模量分别为 4.70, 2.82, 2.81 GPa,与未经加强的复合材料相比分别提高了 112.67%,

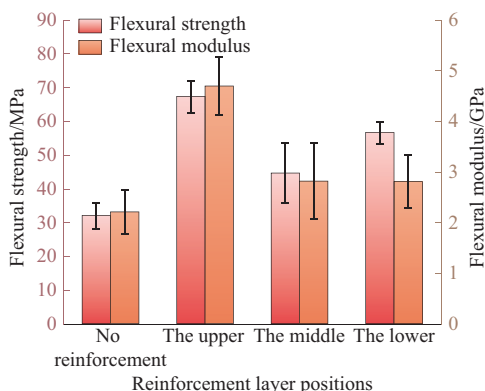


图7 不同加强层位置与无加强层黄麻/PP非织造复合材料的弯曲性能
Fig. 7 Flexural properties of jute/PP nonwoven composites with different reinforcement layer positions or without reinforcement layer

27.60%, 27.15%。当加强层在非织造复合材料的上层时,测试样品的弯曲模量明显大于加强层在中、下层的测试样品,在应力失效前的同一应变情况下应力明显高于加强层在中、下层的测试样品,直到应力失效后加强层在上层的试验样品的应力出现明显下降趋势。当加强层在非织造复合材料的中、下层时,应力-应变曲线分为两个上升阶段:在第一阶段中,曲线的斜率相同,曲线斜率大,为快速上升阶段,复合材料表面并未发生损伤;第二阶段,曲线斜率趋于平缓,在夹具的持续压弯下逐步向最大承受载荷逼近,此时复合材料发生塑性变形,下表面开裂,复合材料表面和加强层共同承受夹具的压力且发生不可恢复的损伤,且后半段曲线相差不多,试验样品的弯曲性能差异不明显,但比无加强层试验样品的弯曲性能好。

利用 Abaqus 软件对非织造复合材料弯曲性能进行仿真模拟,获得了模拟载荷-位移曲线和弯曲应力数据,并与实际曲线和应力数据进行了对比,结果见图8和表1。结合表1可以直观地看到,当加强层在上层时,通过 Abaqus 模拟出的弯曲应力为 84.29 MPa,与实际测试弯曲应力存在 11.73% 的相对误差;加强层在中层时,模拟弯曲应力为 47.93 MPa,与实际测试弯曲应力存在 -11.37% 的相对误差;加强层在下层时,模拟弯曲应力为 63.02 MPa,与实际测试弯曲应力存在 4.37% 的相对误差;无加强层的模拟弯曲应力为 30.67 MPa,与实际测试弯曲应力存在 -9.02% 的相对误差。图8a中的实际载荷-位移曲线在达到最大值后明显下降,是因为复合材料发生严重的断裂损伤,失效行为明显,而模拟曲线由于没有添加断裂损伤模块并未发生明显的下降,在达到最大载荷后曲线继续平缓地延长。加强层在

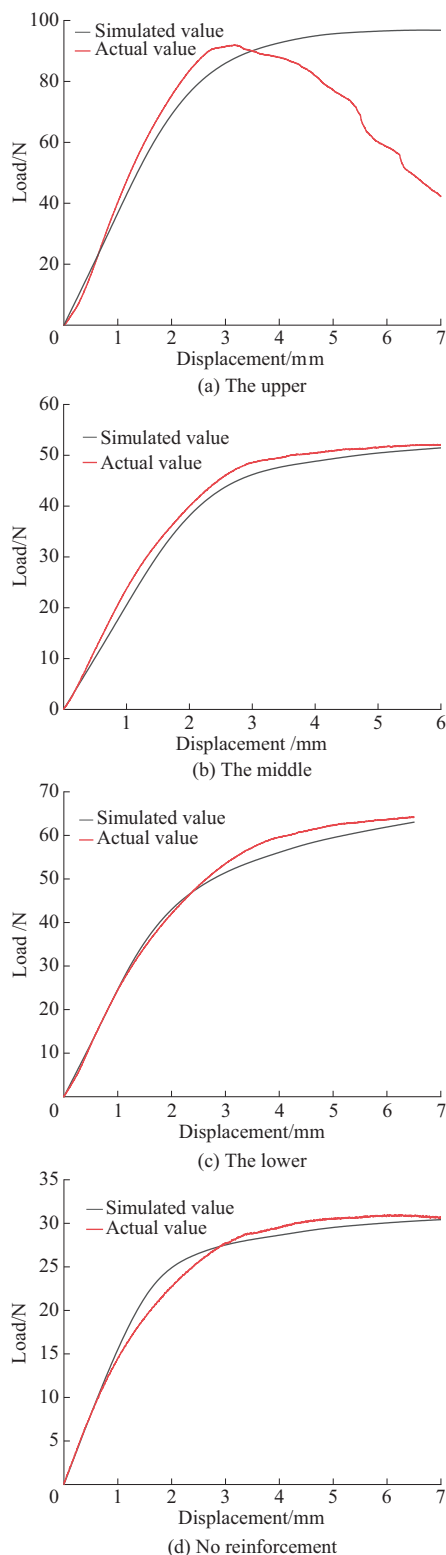


图8 黄麻/PP非织造复合材料有限元模拟与实际测试的载荷-位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of load-displacement curves between finite element simulation and actual test of jute/PP nonwoven composites

中、下层以及无加强层时,模拟与实际测试的载荷-位移曲线基本吻合。

表1 黄麻/PP非织造复合材料实际测试与仿真模拟弯曲应力的数据对比
Tab. 1 Data comparison between actual flexural stress and simulated flexural stress of jute/PP nonwoven composites

Reinforcement layer position	Actual stress value/MPa	Simulated stress value/MPa	Relative error/%
The upper	75.44	84.29	11.73
The middle	54.08	47.93	-11.37
The lower	60.38	63.02	4.37
No reinforcement	33.71	30.67	-9.02

3.1.2 拉伸性能分析

图9为无加强层及各加强层位置对应的复合材料拉伸应力-应变曲线,图10为计算得到的拉伸性能数据,从图10可以很直观地看出未经加强的黄麻/PP复合材料的拉伸性能均低于加强的复合材料的拉伸性能。未经加强的复合材料的拉伸强度为20.72 MPa,加强层位于上、中、下层时,复合材料的拉伸强度分别是28.87,23.32,28.87 MPa(下层与上层的数值相同),与未经加强的复合材料相比分别提高了39.33%,12.55%,39.33%;未经加强的复合材料的拉伸弹性模量为2.39 GPa,当加强层位于上、中、

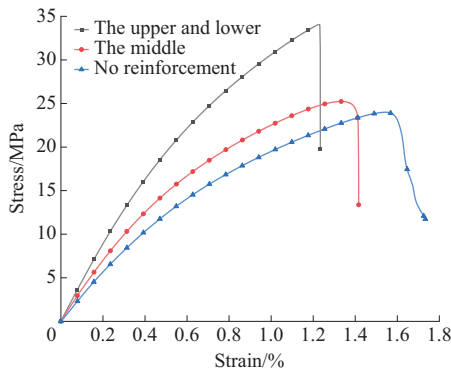


图9 不同加强层位置与无加强层黄麻/PP非织造复合材料的拉伸应力-应变曲线

Fig. 9 Tensile stress-strain curves of jute/PP nonwoven composites with different reinforcement layer positions or without reinforcement layer

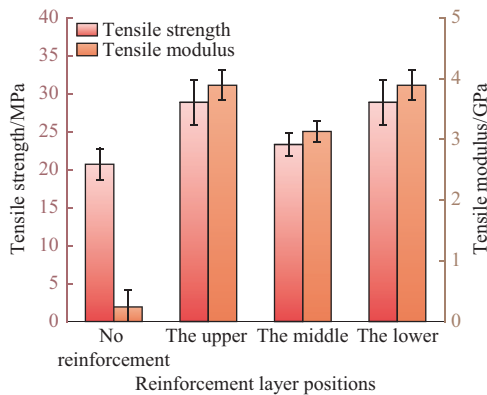


图10 不同加强层位置与无加强层黄麻/PP非织造复合材料的拉伸性能
Fig. 10 Tensile properties of jute/PP nonwoven composites with different reinforcement layer positions or without reinforcement layer

下层时,复合材料的拉伸弹性模量分别为3.89,3.13,3.89 GPa,与未经加强的复合材料相比分别提高了62.76%,30.96%,62.76%。

3.2 SEM表征结果分析

为观察复合材料的断裂形式,将拉伸断裂后的样品进行喷金处理,然后采用SEM观察断面形貌。图11为加强层在中层时的复合材料的断面SEM照片。在图11a中可以观察到复合材料存在两种断裂方式,一种是纤维抽拔断裂,抽拔断裂表明增强体和基体间的界面结合较差;另一种是增强体与树脂基体在同一平面同时断裂,相比纤维抽拔断裂,这种断裂方式形成的断面更加平滑。在图11b中可以观察到纤维抽拔后在断面留下的孔洞,同时还可以观察到PP纤维热熔后,在高压环境下与黄麻纤维紧密贴合,表明树脂能够完全浸润纤维增强体。

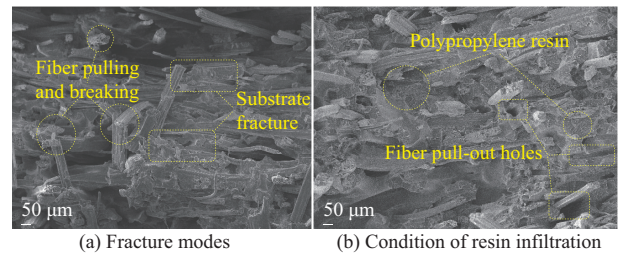


图11 复合材料断面SEM照片

Fig. 11 SEM photos of composite fracture surface

3.3 超景深显微镜表征结果分析

图12为加强层在不同位置时的复合材料的弯曲断面形貌。复合材料样品的厚度为2.5 mm左右,当加载头向下施加压力时,样品向下凹陷,随着加载头不断下压,弯曲角度也变大,因为厚度的差异,

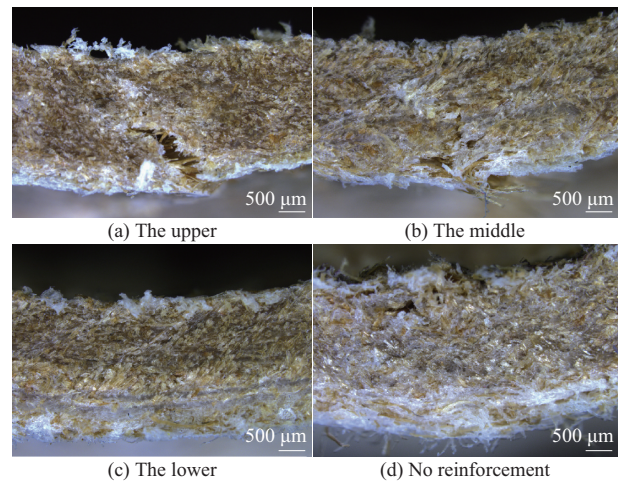


图12 不同加强层位置的黄麻/PP非织造复合材料弯曲断面图

Fig. 12 Bending section diagram of jute/PP nonwoven composites with different reinforcement layer positions

样品的下表面受到拉伸力的作用,上表面受到挤压作用。随着纤维流加强层铺放的位置不同,样品所展现的断裂损伤也不同。图12a为加强层在上层时复合材料的侧面断裂图。在压力作用下,因材料存在厚度差,复合材料的上表面和加强层承受压应力,下表面承受拉应力,拥有加强层的非织造网经针刺热压后的材料整体模量提升,刚度变大,在拉伸应力集中处下表面发生断裂损伤,裂痕从下表面一直延伸到中间位置,此时弯曲程度过大,加强层由最初的承担压应力转为承担拉应力,发生缓慢的断裂,起到一定的缓冲作用。图12b为加强层在中层的复合材料侧面断裂图。与图12a相同,复合材料的上、下表面分别承担压应力和拉应力,不同的是加强层处于中层,既承担部分拉应力也承担部分压应力,当下表面发生断裂损伤后应力迅速集中到加强层,起到缓冲作用。图12c为加强层在下层的复合材料侧面断裂图。上、下表面分别承担压应力和拉应力,加强层承受大部分的拉应力,可以看到复合材料下表面并未发生明显的断裂损伤,利用超景深三维显微镜对其下表面进行观察,仅表层PP树脂发生了一些破碎损伤。图12d为无加强层的复合材料侧面断裂图,与图12c相同,样品的下表面并未发生明显的断裂损伤,仅表层树脂出现了破碎损伤,不同的是上表面在挤压的作用下出现了断裂破损。

3.4 CT表征结果分析

黄麻/PP非织造复合材料以热塑性树脂PP纤维和黄麻纤维经混合梳理后针刺、热压而成,热塑性树脂纤维经热熔后流动性差,内部存在较多的微小孔隙或孔洞,经Avizo软件对孔隙和裂缝进行三维重构后,弯曲测试后出现的裂缝与复合材料中的孔隙重合且混杂在一起,无法精确表征。因此仅选用经重构后的原3D立体图的内部横截面进行表征。

图13为复合材料经拉伸测试后的CT重构3D图像的横截面。图13a为加强层在上或下层时的横截面CT图像,从图中可明显观察到被黄框选中的断口并没有和左端的断口处在同一水平线,而且黄框中的位置正是加强层所在的上/下层,在拉伸断裂过程中,左侧部分在拉应力的作用下先行断裂,而加强层所在的上/下层并未同时断裂,而是在受到更大的载荷后才发生断裂,故而可以认为加强层在复合材料拉伸断裂过程中起到了强化和缓冲的作用;图13b为加强层在中层时的CT图像,断口为左低右高的斜线,在右端黄框内有类似崩裂的较为疏松的

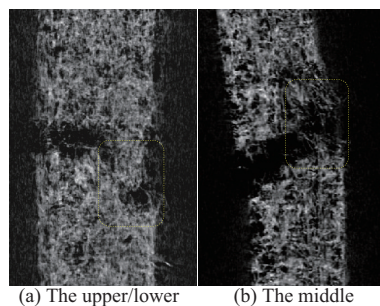


图13 不同加强层位置的黄麻/PP非织造复合材料拉伸测试后的CT截面图

Fig. 13 CT section diagram of jute/PP nonwoven composites with different reinforcement layer positions after tensile test

部位,这是复合材料在断裂过程中发生了局部的纤维增强体抽拔断裂,同时也是梳理过程中对PP纤维树脂梳理不均匀导致局部纤维树脂过少,在热压后复合材料局部没有树脂基体的浸润进而使材料性能下降、易发生纤维抽拔断裂。此样品是在右侧先产生裂缝后,随着夹具的不断拉伸,裂缝逐渐向左端扩大,最后致使断口呈现出左低右高的现象。纤维分布不均匀是此类非织造复合材料需改进的一点。

图14为复合材料经弯曲测试后的CT重构3D图像的横截面。图14a为加强层在上层时的CT图像,裂缝从下底开始逐渐向上底延伸,当延伸到即将接触上底时不再延伸,此时弯曲载荷达到最大值;图14b为加强层在中层时的CT图像,同图14a,裂缝从下底一直延伸到中层,不同的是可以在中层观察到一条很明显的由蓝框标注的裂缝,这是在加载头不断向下挤压复合材料时层间内部产生相对位移后产生的隔层;图14c为加强层在下层时的CT图像,在图中并未观察到明显的裂缝,与在超景深显微镜中观察到的内容相符合。

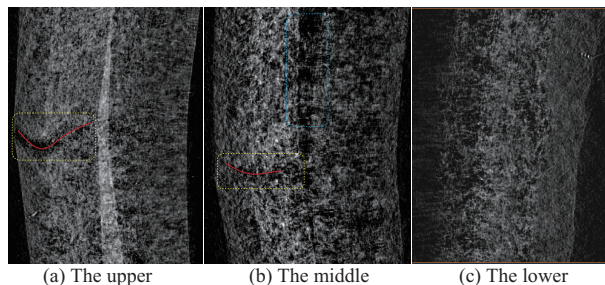


图14 不同加强层位置的黄麻/PP非织造复合材料弯曲测试后的CT截面图

Fig. 14 CT section diagram of jute/PP nonwoven composites with different reinforcement layer positions after flexural test

3.5 有限元模拟表征结果分析

图15、图16为加强层在黄麻/PP非织造复合材

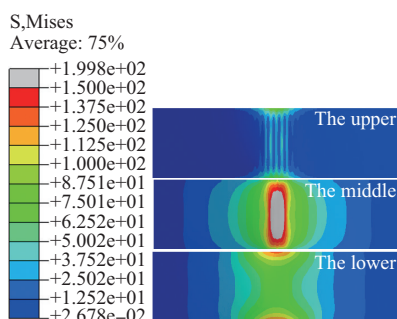


图15 加强层在不同位置时所受应力云图

Fig. 15 Stress cloud diagram of reinforcement layer at different positions

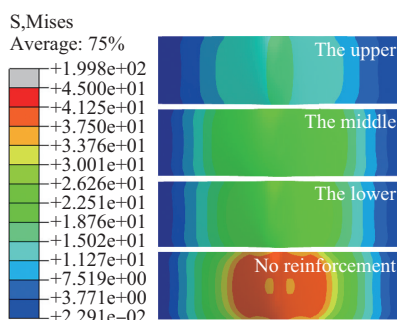


图16 不同加强层位置的复合材料整体所受应力云图

Fig. 16 Stress cloud diagram of composite with different reinforcement layer positions

料中不同位置时的应力云图和复合材料整体的应力云图。结合图15以及图16的应力云图大小范围及Mises应力数值可以看出,复合材料的主要承力部件是加强层,说明加强层能够增强复合材料的弯曲性能。加强层铺放在复合材料的上层时,应力集中不明显,下层应力集中现象与上层相差不大,但比上层应力集中现象明显,而中层的应力尤为集中,明显大于铺放在上、下层的应力。同时观察复合材料整体所受应力发现,无加强层的整体应力相对集中,中、下层的应力集中面积相差不大,但小于无加强层的应力面积,上层应力集中最小。因此得出当加强层铺放在上层时复合材料弯曲性能最好。

图17为加强层在黄麻/PP非织造复合材料发生弯曲形变且达到最大载荷时所承受的拉应力,图18为加强层在黄麻/PP非织造复合材料发生弯曲形变且达到最大载荷时所承受的压应力。结合两图可以看出当复合材料达到最大形变时,加强层从下层到上层所承受的拉应力由中间集中位置分散至复合材料的两端,这是因为当复合材料受到同等程度的弯曲时,下表面承受主要的拉应力,上表面承受主要的压应力,与此同时复合材料的层间也发生了极其微小的剪切滑移。由图17和图18可知,位于

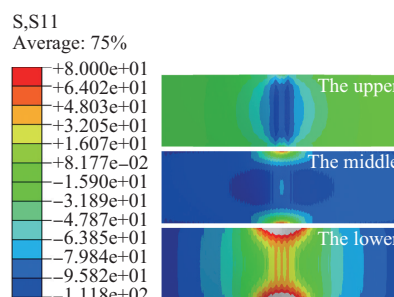


图17 加强层在不同位置时所受拉应力云图

Fig. 17 Tensile stress cloud diagram of reinforcement layer at different positions

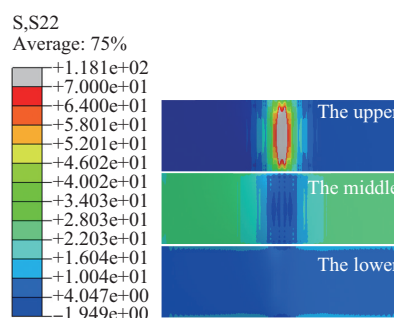


图18 加强层在不同位置时所受压应力云图

Fig. 18 Compression stress cloud diagram of reinforcement layer at different positions

上层的加强层所承受的拉应力较小但承受的压应力远大于加强层在中、下层的压应力。中间层处于整体复合材料的中间位置,其所受拉应力与压应力都处于一个相对平均位置。加强层位于下层时所受到的拉应力更加集中且比位于上、中层时的应力面积大,但所承受的压应力要远小于位于上、中层时所承受的压应力。

4 结论与展望

通过对连续纤维流铺层增强黄麻/PP非织造复合材料的力学性能的测试以及有限元建模分析,探究了新型铺层方式对复合材料拉伸性能和弯曲性能的影响,得出以下结论。

(1)加强层在复合材料的上、中、下层时,复合材料的弯曲强度比无加强层的分别提高了110.30%, 39.44%, 76.97%, 弯曲模量分别提高了112.67%, 27.60%, 27.15%;材料的拉伸强度分别提高了39.33%, 12.55%, 39.33%, 拉伸弹性模量分别提高了62.76%, 30.96%, 62.76%。

(2)经有限元软件模拟分析后,模拟数据与实验数据高度吻合,模拟结果也表明当加强层在复合材料的上层时复合材料力学性能最优。

(3)对于复合材料中各部分所承受的载荷,分析

应力云图得出:当加强层在上层时,主要承受压应力,未受到集中的拉应力而不易开裂,材料可在微小的弯曲变形时承受更大载荷;相反,当加强层在下层时,加强层主要承受拉应力,下表面易开裂导致失效。当加强层铺放在不同位置时,材料所承受的最大应力不同,其材料断面也呈现不同的形态。

后续实验设想置换更多的加强层,分析加强层的树脂纤维与黄麻纤维的最佳配比。在有限元模拟方面会对拉伸断裂进行模拟,探讨在拉伸断裂过程中加强层的应力变化以及加强作用。

参考文献

- [1] 王峰,庞宝琳,胡溯,等.湿法与干喷湿法制备的碳纤维对复合材料性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(8):76-82.
WANG Feng, PANG Baolin, HU Su, et al. Effects of carbon fibers prepared by wet spinning and dry-jet wet spinning on properties of composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 76-82.
- [2] 喻九阳,张天义,刘博文,等.短切玻璃纤维复合材料有限元模拟及其随机分布快速生成算法[J].塑料科技,2025,53(3):121-128.
YU Jiuyang, ZHANG Tianyi, LIU Bowen, et al. Finite element simulation of short-chopped glass fiber composites and a fast generation algorithm for their random distribution[J]. Plastics Science and Technology, 2025, 53(3):121-128.
- [3] 段珍华,张伟,朱庆平,等.退役风机叶片的回收与资源化应用研究进展[J].硅酸盐通报,2025,44(4):1 267-1 275.
DUAN Zhenhua, ZHANG Wei, ZHU Zeping, et al. Research progress on recycling and resource application of retired wind turbine blades[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(4): 1 267-1 275.
- [4] 王春红,鹿超.植物纤维增强绿色复合材料在建筑应用中的性能研究[J].纺织导报,2019(S1):90-94.
WANG Chunhong, LU Chao. Study on performance of NFPR in building application[J]. China Textile Leader, 2019(S1):90-94.
- [5] 李智鑫,张才前.纤维增强聚丙烯复合材料研究进展[J].纺织科技进展,2021(6):6-9,52.
LI Zhixin, ZHANG Caiqian. Research progress of fiber-reinforced polypropylene composites[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2021(6):6-9, 52.
- [6] 吴帅,吴华伟,王春红,等.纱罗网格织物增强PP/黄麻复合材料力学性能[J].工程塑料应用,2022,50(3):1-7,24.
WU Shuai, WU Huawei, WANG Chunhong, et al. Mechanical properties of leno mesh fabric reinforced PP/jute composite[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):1-7, 24.
- [7] 周勇,孙筱辰,张兴卫,等.非织造黄麻纤维复合材料的制备与吸声性能研究[J].功能材料,2016,47(11):11 131-11 135,11 140.
ZHOU Yong, SUN Xiaochen, ZHANG Xingwei, et al. Research on the preparation and sound absorption performance of non-woven jute fiber composite materials[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(11):11 131-11 135, 11 140.
- [8] YE H Z, ZHANG Y, YU Z M, et al. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the morphology and mechanical properties of metakaolin-based geopolymers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 173:10-16.
- [9] 赵金豹.非织造布专用聚丙烯纤维的结构与性能研究[J].上海塑料,2023,51(5):39-42.
ZHAO Jinbao. Study on characterization and industrial application of non-woven fabric grade polypropylene[J]. Shanghai Plastics, 2023, 51(5):39-42.
- [10] SHI Y C, GUAN J P, WU J N, et al. Spray-free polypropylene composites reinforced by coupling agent treated jute fiber[J]. Polymer Composites, 2021, 42(10):5 455-5 464.
- [11] 张萌,冯冰涛,王晓珂,等.天然纤维增强热塑性复合材料制备与应用研究进展[J].工程塑料应用,2023,51(10):179-185.
ZHANG Meng, FENG Bingtao, WANG Xiaoke, et al. Research progress in preparation and application of natural fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(10):179-185.
- [12] WANG Y, DU T Q, MA W K, et al. Research on mechanics and acoustic properties of Jute fiber composite material[J]. Heliyon, 2024, 10(13). DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e33869.
- [13] SEVER K, SARIKANAT M, SEKI Y, et al. The mechanical properties of γ -methacryloxypropyltrimethoxy silane-treated jute/polyester composites[J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(15): 1 913-1 924.
- [14] SWAIN P T R, BISWAS S. A comparative analysis of physico-mechanical, water absorption, and morphological behaviour of surface modified woven jute fiber composites[J]. Polymer Composites, 2018, 39(8):2 952-2 960.
- [15] 伍悦明,吴铠,王萍,等.芳纶平纹机织/非织造混杂结构复合材料低速冲击性能的有限元分析[J].产业用纺织品,2023,41(6):30-41.
WU Yueyue, WU Kai, WANG Ping, et al. Finite element analysis of low-velocity impact properties of aramid plain woven/nonwoven hybrid structural composites[J]. Technical Textiles, 2023, 41(6):30-41.
- [16] ZHAO L J, ZHANG F P, HU X Z, et al. Study on interlaminar shear and damage behavior of carbon fiber composites with short fiber interleaves: 2. Micro-mechanical simulation[J]. Advanced Materials Research, 2008, 41-42:341-347.
- [17] 李苏文,吴华伟,王春红,等.纱罗网格织物铺层位置对聚丙烯/黄麻复合材料弯曲性能影响及有限元模拟[J].工程塑料应用,2022,50(11):67-73.
LI Suwen, WU Huawei, WANG Chunhong, et al. Influences of placement position of leno mesh fabric on flexural properties of PP/jute composite and finite element simulation[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(11):67-73.
- [18] 钱晓明,王庆涛,邓辉.一种连续纤维流铺排成型系统:CN110512356B[P]. 2021-08-24.
QIAN Xiaoming, WANG Qingtao, DENG Hui. A continuous fiber flow lay-up forming system:CN110512356B[P]. 2021-08-24.