

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.011

短碳纤维增强塑料同质点阵夹芯板的连接性能及失效模式

何浪¹, 陈占春¹, 谷祥¹, 刘江林^{1,2}, 梁建国^{1,2}

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心, 太原 030024)

摘要: 短碳纤维增强热塑性塑料(SCFRP)同质点阵夹芯结构以其制备周期短、性能优良等优点备受关注,但其实际应用仍受其连接性能和失效模式不明确带来的限制。为解决这个问题,通过直接复合压缩成型工艺制备具有不同纤维质量分数(20%~40%)、厚度梯度(2~4 mm)的SCFRP面板和30%纤维质量分数的点阵芯子,进一步装配成同质点阵夹芯板,采用万能试验机进行法向拉脱试验和面内剪切试验,通过与传统异质点阵夹芯板对比分析该同质点阵夹芯板连接性能和失效模式。结果表明,SCFRP同质点阵夹芯板在失效模式上呈现出优越性,其法向拉脱失效模式为镶嵌件下表面直接脱黏,面内剪切失效模式为两个镶嵌件陆续脱黏,未出现其他额外损伤。与传统异质点阵夹芯板相比,SCFRP同质点阵夹芯板连接性能得到提升,当纤维质量分数为40%、面板厚度为3 mm时,法向拉脱失效载荷约为5.65 kN,提高了88.3%;当纤维质量分数为30%、面板厚度为3 mm时,面内剪切失效载荷约为5 kN,极限载荷约为7.04 kN,提高了29.2%,面内剪切失效刚度约为2.64 kN/mm,提高了175%。上述结果表明,SCFRP同质点阵夹芯板在连接性能和失效模式方面表现出优越性,其连接性能和失效模式的阐明为其在航空航天等领域的工程化应用提供了支持。

关键词: 直接复合压缩成型;短碳纤维增强热塑性塑料;点阵夹芯板;连接性能;失效模式

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0078-10

Connection properties and failure modes of short carbon fiber reinforced plastic homogeneous lattice sandwich panels

HE Lang¹, CHEN Zhanchun¹, GU Xiang¹, LIU Jianglin^{1,2}, LIANG Jianguo^{1,2}

(1. College of Mechanical, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Short carbon fiber reinforced thermoplastic (SCFRP) homogeneous lattice core structures have attracted much attention due to their short preparation cycle and excellent performance, but their practical applications are still limited by the uncertainty brought about by their connection properties and failure modes. To solve this problem, SCFRP panels with different fiber mass fractions (20%–40%), thickness gradients (2–4 mm) and lattice cores with 30% fiber mass fraction were prepared by direct composite compression molding process, and further assembled into homogeneous lattice sandwich panels. The normal pull-out test and in-plane shear test were performed using the universal testing machine to analyze the connection performance and failure modes of the homogeneous lattice sandwich panels by comparing with the traditional heterogeneous lattice sandwich panels. The results show that SCFRP homogeneous lattice sandwich panel shows superiority in failure mode, its normal pull-out failure mode is direct debonding of the lower surface of the insert, and the in-plane shear failure mode is debonding of two inserts one after another without other additional damage. The connectivity performance is improved compared with the traditional heterogeneous lattice sandwich panels. When the fiber mass fraction is 40% and the panel thickness is 3 mm, the normal pull-out failure load is about 5.65 kN, which is 88.3% higher. When the fiber mass fraction is 30% and the panel thickness is 3 mm, the in-plane shear failure load is about 5 kN, the ultimate load is about 7.04 kN, which is 29.2% higher, and the in-plane shear stiffness is about 2.64 kN/mm, which is 175% higher. The above results show that SCFRP homogeneous lattice sandwich panels exhibit superiority in connection performance and failure

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075361,52075359),国家重点研发计划项目(2018YFA0707300),山西省科技重大专项(20201102003),山西浙大新材料与化工研究院技术开发项目(2022SX-TD021)

通信作者: 刘江林,博士,副教授,博士生导师,研究方向为碳纤维复合材料

收稿日期: 2025-07-20

引用格式: 何浪,陈占春,谷祥,等.短碳纤维增强塑料同质点阵夹芯板的连接性能及失效模式[J].工程塑料应用,2025,53(9):78–87.

HE Lang, CHEN Zhanchun, GU Xiang, et al. Connection properties and failure modes of short carbon fiber reinforced plastic homogeneous lattice sandwich panels[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 78–87.

modes, and the elucidation of their connection performance and failure modes supports their engineering applications in aerospace and other fields.

Keywords : direct composite compression molding ; short carbon fiber reinforced thermoplastic ; lattice sandwich panel ; connection property ; failure mode

点阵芯子作为一种桁架拓扑结构,其结构简单性能优良,在实际工程中应用广泛^[1-2],从泡沫、蜂窝、折叠、波纹、褶皱芯子等结构中脱颖而出^[3-5],在实际工程中应用广泛,被认为是夹芯结构中极具应用前景的一种^[6-7]。点阵芯子常用的材料有铝合金、不锈钢、树脂、短碳纤维增强塑料(SCFRP)等^[8-12],其中 SCFRP 具有良好的加工性能和极高的成型效率,可以快速制造各种具有复杂几何形状制件,是制作点阵芯子的理想材料^[13-15]。Zhao 等^[16]通过制备 SCFRP 金字塔形点阵芯子测试其压缩性能,并与铝合金、聚乳酸(PLA)、长纤维增强复合材料(CCFRP)等材料制备的常见轻质结构的比强度进行对比,结果显示尽管 SCFRP 点阵结构的比强度不高于 CCFRP,但与金属、树脂相比仍具有较大优势,且在制备时间上以极高的效率远胜于其他材料,使得其具备极高的应用价值。而直接复合压缩成型(DCCM)工艺以生产周期短、制造成本低、易于加工复杂部件的特点完美契合点阵夹芯结构的制备需求,为点阵夹芯结构进一步走向工程应用提供了有力支持^[17-18]。

夹芯结构在集中载荷的作用下容易发生提前失效导致无法发挥其性能优势,失效主要以面芯间剥离破坏为主,最直接的解决思路是在连接处采取局部增强措施,将集中载荷均匀地扩散到面板上,而应用最广泛的即是采用镶嵌件连接。此前对镶嵌件连接的研究主要集中在蜂窝夹芯板和泡沫夹芯板等传统夹芯结构上^[19-23]。在点阵夹芯板方面, Qi 等^[11]通过对层合板面板、铝合金嵌锁点阵芯子组成的异质点阵夹芯板设计镶嵌件,并对异质夹芯板施加法向拉脱载荷和面内剪切载荷,确定了其连接失效模式,即承受法向拉脱载荷时点阵上节点率先脱黏,镶嵌件下表面再次脱黏失效;承受面内剪切载荷时,其中一个镶嵌件下表面脱黏,对应上板通孔处出现挤压损伤和破坏。Qi 等^[24]还通过法向拉脱载荷条件下仿真结果进行可靠性分析,得出夹芯板在拉脱载荷情况下各个因素对连接性能的敏感性,其中对面板的敏感性最高^[24]。但异质夹芯板各构件之间的力学特性尤其是刚度差异较大,这将导

致面芯连接由于刚度失配更易于发生提前失效。而使用同一种材料的 SCFRP 同质点阵夹芯板可以避免这一问题。由于同质点阵夹芯板作为一种新型的夹芯结构,测试它的连接性能及失效模式是其实现工程应用的必经之路,须通过连接性能测试证明其工程适用性,避免突发性失效。

为解决这一问题,笔者通过 DCCM 工艺制备不同纤维质量分数、厚度的 SCFRP 复合材料,测试其拉伸、抗挤压、弯曲性能。并通过使用相同胶黏剂、点阵芯子、镶嵌件组成 SCFRP 同质点阵夹芯板对其施加法向拉脱载荷和面内剪切载荷,探索 SCFRP 同质点阵夹芯板的连接失效模式和最优连接性能对应的面板材料参数,并通过与传统异质点阵夹芯板对比确定其优越性,这对 SCFRP 同质点阵夹芯板实现工程应用具有实际意义。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维(CF):SYT49S-12K,中复神鹰碳纤维股份有限公司;

尼龙 6 (PA6):B3SPA6,德国巴斯夫股份公司;

铝合金:2A12-T4,苏州铝诚金属材料有限公司;

环氧结构胶:DP-460,上海明尼苏达矿业制造特殊材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:KTE-T-36B,南京科尔克挤出装备有限公司;

液压机:YQ32-400T,山东儒工数控机床有限公司;

流体冲击机:M100-1313,上海福祿超高压水射流技术有限公司;

电子万能材料试验机:INSTRON5969,美国 ITW 集团英斯特朗公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):Gemini 300,德国蔡司集团。

1.3 SCFRP 同质点阵夹芯板制备

图 1 为 SCFRP 同质点阵夹芯板的制备流程,将 PA6 与 CF 加入双螺杆挤出机中混炼挤出熔融态的 SCFRP 坯料,如图 1a 所示,其中螺杆转速为

160 r/min, PA6 进料速率为 2.5 Hz, 双螺杆挤出机温度根据螺杆不同区段的作用设置, 温度范围为 230~250 °C。CF 通过纤维喂料口进入双螺杆挤出机, 改变 CF 股数可以得到 20%, 30%, 40% 三种不同纤维质量分数的坯料(对应 CF 股数分别为 2 股、3 股、5 股)。将坯料放入图 1c 所示的模具中压缩成型, 如图 1b 所示, 上、下模具的温度保持在 180 °C, 液压机系统压力设置为 10 MPa, 保压时间 5 min, 得到图 1d 所示的面板及点阵芯子结构。使用三种不同纤维含量 SCFRP 制备面板, 其中采用 30% 纤维质量分数的复合材料制备 2, 3, 4 mm 三种厚度的面板; 点阵芯子采用纤维质量分数 30% 的复合材料制备。

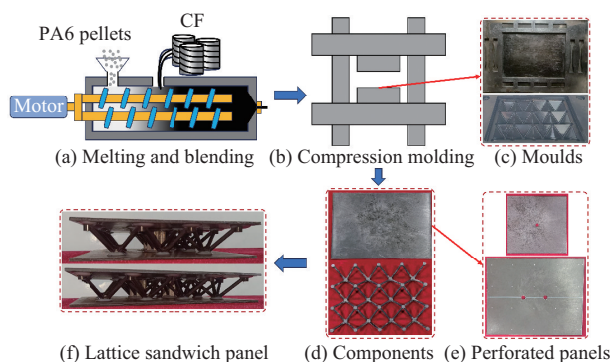


图 1 SCFRP 同质点阵夹芯板的制备流程

Fig. 1 Preparation process of SCFRP homogeneous lattice sandwich panel

图 2 为点阵芯子单胞结构图, 点阵单胞由 4 个杆件和 5 个节点组成。其中杆件的长度 $l=39.3$ mm, 杆件与底面夹角 $\omega=37^\circ$, 杆件外径 $d=5$ mm, 节点高度 $h=6.5$ mm, 节点直径 $\Phi=8.5$ mm, 点阵芯子高度 $H=30$ mm。

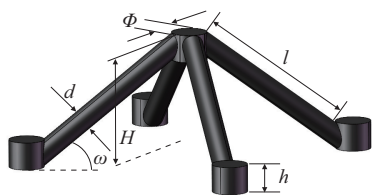
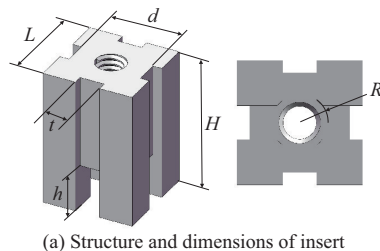


图 2 点阵芯子单胞结构图

Fig. 2 Lattice core single-cell structure

在 GE 设计的四棱柱镶嵌件基础上进行适应性调整, 使用 2A12-T4 铝合金制备, 如图 3a 所示。镶嵌件高度 $H=30$ mm 与点阵芯子高度相同, 可直接与上、下面板黏接。镶嵌件边长 $L=20$ mm, 中心开 M8 螺纹孔, 用于连接固定。四周加工宽度 $t=5.4$ mm 的槽口, 略大于芯子杆件的外径, $d=16$ mm, 一般螺纹

孔最小壁厚应不小于螺纹直径的 1/3, 此处选择壁厚为 4 mm, 保证结构强度的同时减轻镶嵌件质量。底部同样切割出宽度为 $t=5.4$ mm 的十字形槽, 同时切割出半径 $R=4.5$ mm 的圆, 切割高度 $h=9.5$ mm, 保证镶嵌件可以与芯子节点组合到一起且不会被杆件阻隔。



(a) Structure and dimensions of insert



(b) Assembly of insert with lattice core

图 3 镶嵌件结构及与点阵芯子嵌锁组装图

Fig. 3 Structure of insert and assembly with lattice core

使用流体冲击机将面板切割至合适尺寸, 并在上面板连接镶嵌件螺纹孔对应位置切割出直径为 8.5 mm 的通孔用于螺纹连接, 如图 1e 所示。将制备得到的上下面板、点阵芯子和镶嵌件进行组装, 组装流程如下: 首先将镶嵌件扩孔十字槽对准芯子节点进行安装形成嵌锁结构, 如图 3b 所示; 其次使用环氧结构胶将点阵芯子下节点、镶嵌件下表面与下面板进行胶黏连接; 然后将上面板通孔对准镶嵌件螺纹孔, 将芯子上节点、镶嵌件上表面与上面板胶黏连接。环氧结构胶在室温条件下静置 4 h 完成胶黏固化, 组装完成的点阵夹芯板如图 1f 所示。

1.4 测试与表征

根据 GB/T 1040.2-2022 制备不同纤维含量的拉伸试样, 如图 4 所示, 标距长度为 80 mm, 采用 30% 纤维质量分数的试件制备 2, 3, 4 mm 三种厚度的拉伸试样。室温下采用电子万能材料试验机进行拉伸试验, 拉伸速率为 10 mm/min。每个试件的

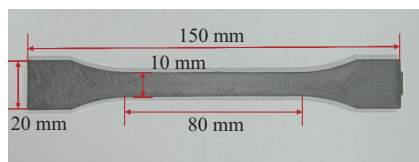


图 4 拉伸试样

Fig. 4 Tensile sample

数据点取五个试样测试的平均值。试样喷金后使用FESEM进行扫描分析,观察断面的纤维取向、分布情况。

根据ESA PSS-03-1202-1987给出的对于蜂窝夹芯结构镶嵌件连接拉脱性能测试方案,采用类似的方式表征点阵夹芯板法向拉脱连接性能。法向拉脱试验夹具和载荷设置如图5a、图5b所示。试件尺寸为200 mm×200 mm,包含3×3个单胞,中心预埋镶嵌件。卡具由两块10 mm厚的45号钢板构成,用四根M20的螺栓连接。卡具下部连接至试验机底座并固定,上板切割出直径为130 mm的圆孔提供限位约束。通过M8螺栓将U形拉伸块固定至试件表面,然后将拉伸块安装至电子万能材料试验机,拉伸速率为1 mm/min。图5a中的 F_1 为镶嵌件向上运动对面板造成的压力, F_2, F_3 为黏接界面传递的法向力。同时单独对面板进行法向拉脱载荷的测试,以得到面板自身的抗弯曲性能,如图5c所示,拉伸速率同样为1 mm/min,抗弯曲载荷数据以拉脱位移达3 mm时记录。

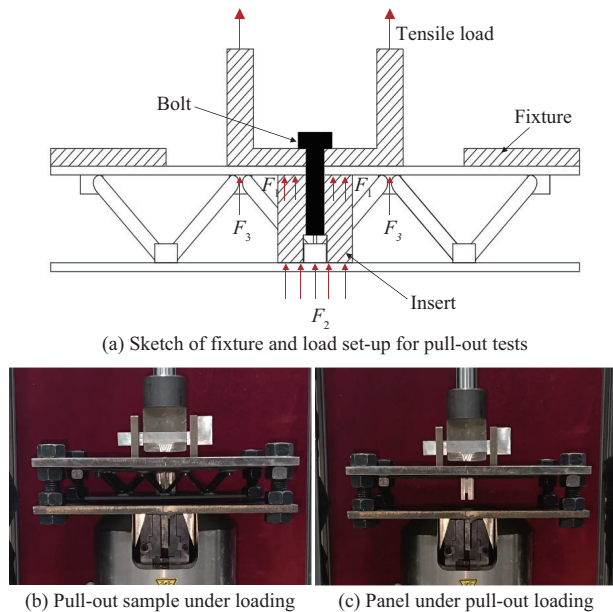


图5 法向拉脱试验
Fig. 5 Normal pull-out tests

参照ASTM F606-95b-1995进行点阵夹芯板面内剪切连接性能测试。面内剪切试验夹具和载荷设置如图6a、图6b所示。试件大小为200 mm×250 mm,包含3×4个单胞,试件中线预埋两个镶嵌件,中心距为56.37 mm,试件通过两个M8的螺栓连接到由45号钢制成的剪切板上,然后将剪切板装卡到电子万能材料试验机,拉伸速率为1 mm/min。图6a

中的 F_1 为螺栓对面板的挤压力, F_2, F_3 为粘接界面传递的剪切力。同时单独对面板进行面内剪切载荷的测试,以得到面板自身的抗挤压性能,如图6c所示,拉伸速率同样为1 mm/min。抗挤压载荷以载荷位移曲线第一次上升阶段峰值载荷记录。

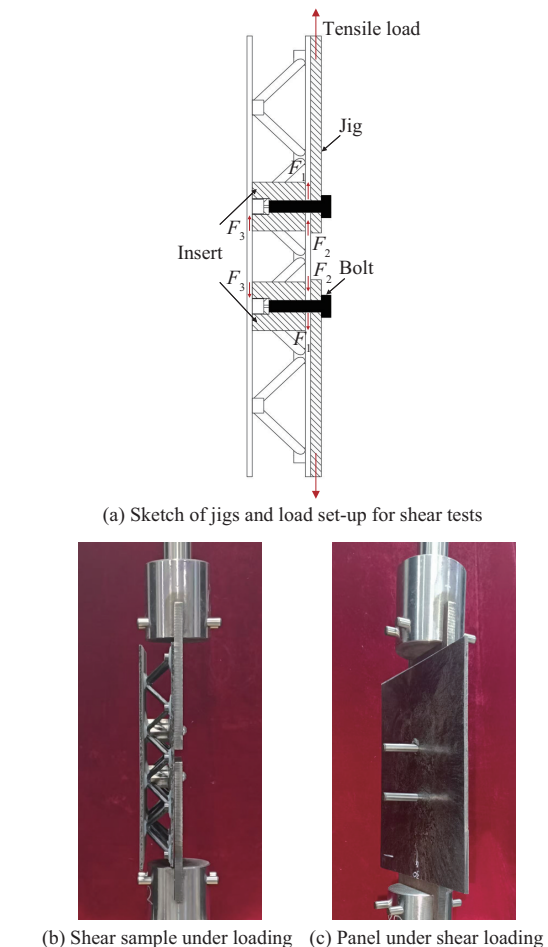


图6 面内剪切实验
Fig. 6 In-plane shear tests

2 结果与讨论

2.1 力学性能

为了对不同参数的夹芯板连接性能差异的原因进行分析,需要对SCFRP复合材料的各项力学性能进行测试。对不同纤维质量分数和厚度的SCFRP面板进行拉伸性能、抗挤压性能和抗弯曲性能的测试,结果见表1。为方便叙述将采用简略形式描述,例如:30%纤维质量分数、3 mm厚度的SCFRP面板记为30%(3 mm)。

从表1可以看出,随着纤维质量分数的增加,SCFRP的拉伸弹性模量增加,质量分数为40%的SCFRP拉伸强度可能出现180 MPa的情况,但多数为140 MPa左右。图7为不同纤维质量分数、厚度

表1 SCFRP复合材料力学性能数据

Tab. 1 Mechanical properties data of SCFRP composite

Samples	σ_b /MPa	E /GPa	F_1 /kN	F_2 /N
20%(3 mm)	140.66	8.02	6.07	520.1
30%(2 mm)	165.79	10.02	3.64	433.6
30%(3 mm)	171.84	9.34	6.96	682.6
30%(4 mm)	100.30	8.54	7.92	1 358.1
40%(3 mm)	140.47	9.48	6.12	929.7

Notes: σ_b is tensile strength; E is tensile modulus; F_1 is squeeze force; F_2 is bending force.

SCFRP复合材料的拉伸断面形貌,由图7a、图7b、图7c可以看出,过高的碳纤维质量分数会导致基体中碳纤维出现堆积现象,致使树脂基体难以充分浸润纤维束^[25],同时在高含量条件下挤出成型时沿挤出方向的纤维取向度显著降低^[26],使得复合材料拉伸强度下降。然而在弯曲载荷作用下,由于主要载荷方向垂直于挤出方向,纤维含量增加所带来的增强相的数量提升能够有效补偿因取向度下降导致的性能损失,因此复合材料的抗弯曲性能仍随纤维质量分数的增加而持续提高。

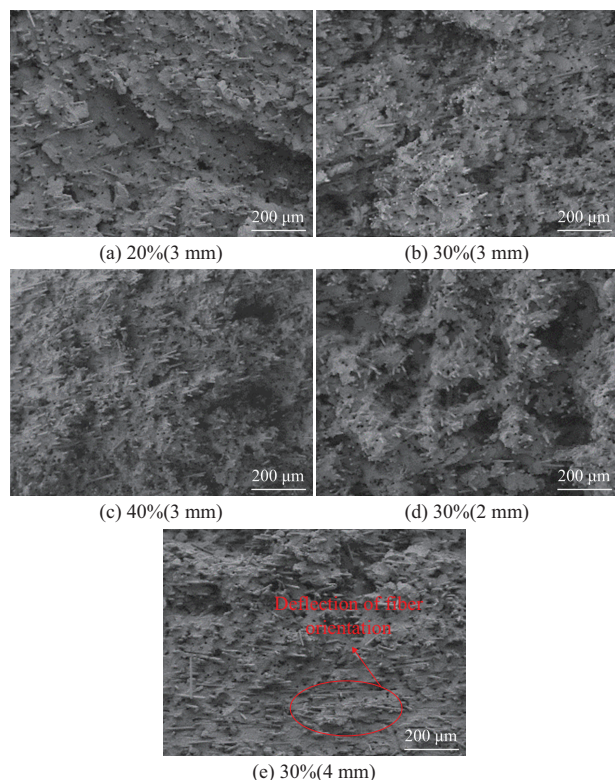


图7 不同纤维质量分数、厚度的SCFRP复合材料断面形貌

Fig. 7 Fracture morphology of SCFRP composites with different fiber mass fractions and thicknesses

同时,随着厚度的增加,拉伸弹性模量逐渐降低,4 mm的SCFRP拉伸强度大幅下降,观察图7c可知,在压缩过程中纤维随基体流动填充空腔,厚

度太高导致纤维取向容易发生偏转,使内部出现类似90°层合板纤维分层取向现象。拉伸过程中纤维垂直于拉伸方向排布的部分不承受或承受较少抗拉载荷,使整体拉伸强度降低。随着厚度增加,载荷作用面积增大,抗挤压载荷和抗弯曲载荷也随之增加。值得提起的是,制备的SCFRP并非具有最优性能,通过对改进纤维在基体中的均匀性分布^[27]和取向程度^[26],可以增加其各项力学性能。

图8为面板挤压载荷-位移曲线,其中30%纤维含量、2 mm厚度的面板抗挤压失效载荷异常,原因是厚度不足使其在挤压载荷加载过程中容易发生内凹弯曲变形,导致向一侧出现压弯撕裂损伤破坏,如图9a所示,相比图9b所示的正常接触导致损伤破坏,这种破坏形式严重降低了其能承受的挤压载荷。

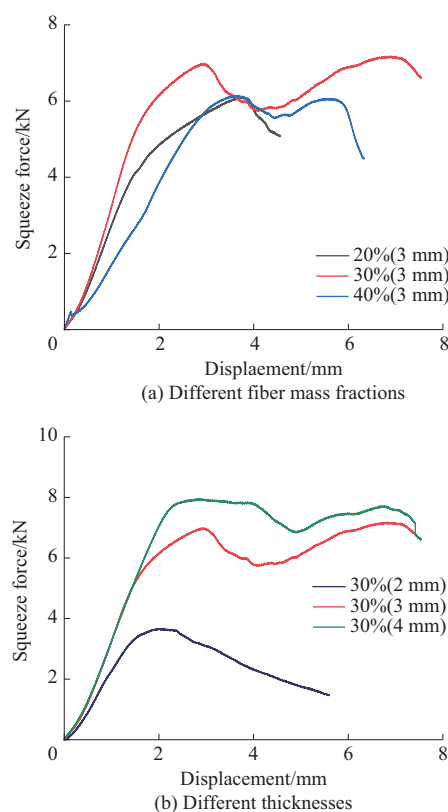


图8 不同纤维质量分数、厚度SCFRP复合材料挤压载荷-位移曲线

Fig. 8 Squeeze load-displacement curves of SCFRP composites with different fiber mass fractions and thicknesses

2.2 法向拉脱试验

图10为不同纤维质量分数、厚度面板组成的SCFRP同质点阵夹芯板法向拉脱载荷-位移曲线。由图10可以看出,法向拉脱位移增加时,载荷-位移曲线均呈准线性上升趋势,夹芯结构面板和芯子均

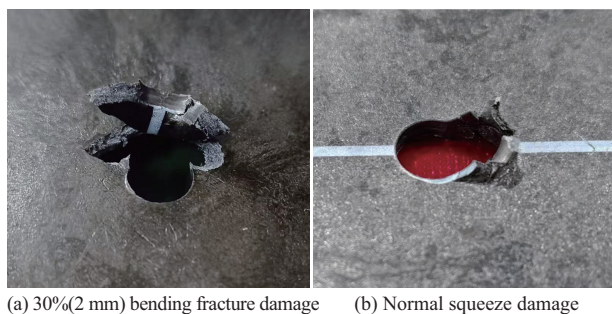


图9 SCFRP 复合材料挤压损伤情况

Fig. 9 Squeeze damage of SCFRP composites

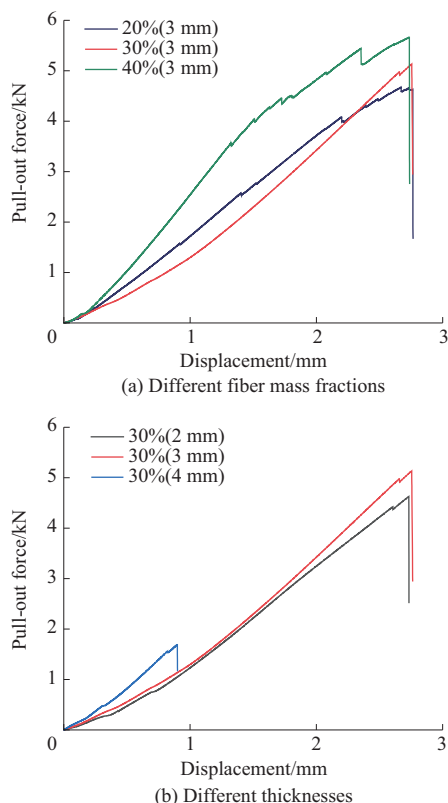


图10 SCFRP 同质点阵夹芯板法向拉脱载荷-位移曲线

Fig. 10 Normal pull-out load-displacement curves of SCFRP homogeneous lattice sandwich panel

发生弹性变形。位移继续增加,载荷水平迅速下降,加载结束,定义此时的载荷为法向拉脱失效载荷。在加载过程中,镶嵌件与对应下节点的黏接界面会产生微脱黏现象,由于胶接区域有效接触面积较大,这种局部界面损伤对整体连接性能的影响处于可控范围内,在载荷-位移曲线上表现为小幅度的应力波动,不会引起承载能力的显著衰减。当界面损伤累积达到临界状态时,将发生镶嵌件与下节点的完全脱黏失效,定义此时的载荷为失效载荷。曲线呈现典型的脆性断裂特征。

在法向拉脱载荷作用下,SCFRP 同质点阵夹芯

板与传统异质夹芯板表现出显著不同的失效机制^[11]。异质夹芯板的失效始发于上节点界面脱黏,其根本原因在于铝合金芯材与复合材料层合板之间的刚度失配:铝合金芯材的弯曲刚度显著高于复合材料层合板,这种刚度差异导致载荷传递过程中芯材变形受限,从而使上面板与节点黏接界面承受过高的拉伸应力集中现象。这种应力分布不均使得异质夹芯板在拉脱位移早期时即发生界面提前脱黏,最终导致其失效载荷未能达到理想承载能力。从图 5a 可以看出,在 SCFRP 同质点阵夹芯板的法向拉脱加载过程中,力学响应呈现多组分耦合变形特征:镶嵌件在拉脱载荷 F 作用下产生向上的位移,通过黏接界面传递的力 F_2 使下面板发生内凹弯曲变形;同时,该位移导致对应单胞的下节点产生协同位移,引发点阵单胞的弯曲变形。上面板的变形主要由镶嵌件传递的垂直压力 F_1 主导,表现为典型的受迫弯曲行为。值得注意的是,点阵上节点与上面板间的黏接界面主要承受法向压力 F_3 的作用,这种应力状态使得该界面在加载过程中保持压缩接触状态,从而避免了拉伸脱黏失效模式。

在 40% 纤维质量分数面板的 SCFRP 同质点阵夹芯板载荷-位移曲线中观察到的载荷水平小幅下降现象,可归因于结构装配过程中的公差累积以及夹具约束的非对称性。这种工况可能导致载荷分布不均,使得特定上节点界面承受异常应力集中现象,引发局部胶层损伤。该下降幅度为 5.7%,仍在载荷容差范围内,表明损伤仍处于亚临界状态,未对结构整体承载性能产生实质性影响。如图 11a 所示,其形貌与 Zhao 等^[16]的研究中的非约束压缩损伤类似。SCFRP 同质点阵夹芯板仍然以镶嵌件下表面直接脱黏失效为主要失效模式,如图 11b 所示。

从图 10 还可以看出,随着纤维质量分数和面板厚度的增加,试样的失效位移基本保持稳定,而失

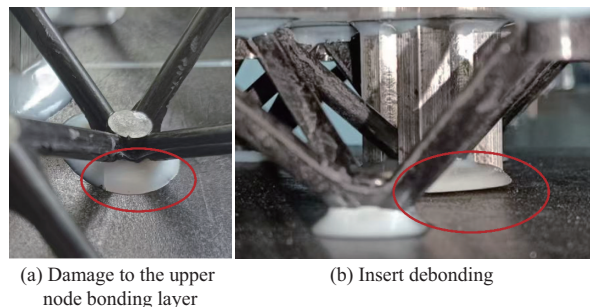


图11 法向拉脱试验损伤照片

Fig. 11 Photos of normal pull-out experimental damage

效载荷仅呈现小幅提升趋势,这主要归因于面板弯曲强度的有限增强。在法向拉脱测试中,纤维质量分数为 40% 的 SCFRP 同质点阵夹芯板表现出优异的连接性能,其失效载荷达到 5.65 kN,较装配相同尺寸镶嵌件的传统异质点阵夹芯板^[11]提升 88.3%,表 2 为传统异质点阵夹芯板的各项连接性能数据。这一显著差异不仅源于可能的胶黏剂性能的优化,更重要的是 SCFRP 同质结构有效避免了上节点界面提前脱黏这一典型失效模式。在加载过程中,SCFRP 夹芯板各组件均未出现可见损伤,这表明界面黏接强度是决定法向连接性能的主导因素,只有当黏接强度增强到一定程度后,面板力学性能的差异才会对整体性能产生显著影响。

表 2 异质点阵夹芯板连接性能数据

Tab. 2 Connection performance data of heterogeneous lattice sandwich panels

F_a /kN	E_a /(kN·mm ⁻¹)	F_b /kN	E_b /(kN·mm ⁻¹)
3.0	2.7	5.45	0.96

Notes: F_a is normal pull-out failure load; E_a is normal pull-out stiffness; F_b is in-plane shear failure load (ultimate load); E_b is in-plane shear stiffness.

当面板厚度增至 4 mm 时,试样的失效位移和承载能力均出现急剧下降。原因可能是过厚的面板在受力时产生的异常变形机制:在镶嵌件拉力 F_2 作用下,下面板发生内凹变形,而较大的厚度导致变形受到强烈约束,从而在材料内部产生严重的应变局部化和应力集中现象,最终引发界面在 0.9 mm 位移处直接失效。

Qi 等^[24]通过法向拉脱试验与有限元仿真的可靠性分析证实,在常规厚度范围内,面板厚度对失效载荷和失效位移的影响并不显著,这一结论与本文试验结果基本吻合。然而需要指出的是,相关仿真研究采用的基准模型是基于四层编织布层合板建立(厚度为 1 mm),该模型在预测厚板行为时可能存在明显偏差。当下面板厚度超过临界值(如 4 mm 试样)时,其在法向拉力作用下的内凹变形会表现为厚度方向应变不均,这种不均匀变形将产生局部应力集中,使结构在位移增加早期出现界面失效。这一机理很好地解释了厚板试样性能急剧下降的试验现象。

2.3 面内剪切试验

图 12 为不同纤维质量分数、厚度面板组成的 SCFRP 同质点阵夹芯板面内剪切载荷-位移曲线。

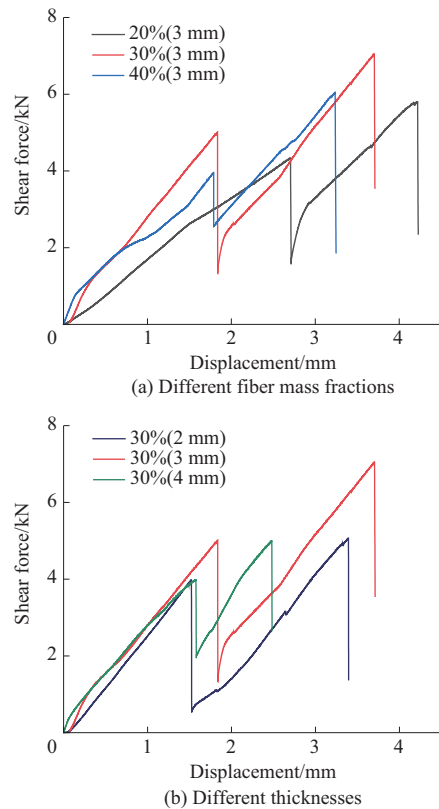


图 12 SCFRP 同质点阵夹芯板面内剪切载荷-位移曲线

Fig. 12 In-plane shear load-displacement curves for SCFRP homogeneous lattice sandwich panels

从图 12 可以得出,面内剪切载荷作用下 SCFRP 同质点阵夹芯板的力学响应可以分为两个阶段。在第一加载阶段,载荷通过镶嵌件-点阵协同传递至整个夹芯结构。如图 6a 所示,上面板的受力状态可分解为三个区域:以两镶嵌件为端点的中间区段主要承受界面剪切力 F_2 产生的拉伸作用,而边缘区段则受螺栓挤压力 F_1 作用。相应地,下面板在两镶嵌件对应节点中间区段在剪切力 F_3 作用下呈现弹性变形行为。与传统异质夹芯板易发生面板挤压破坏不同^[11],SCFRP 同质夹芯结构通过有效的载荷分配避免了上面板损伤,最终破坏模式表现为首个镶嵌件-下节点界面发生脱黏,定义此时为失效载荷。进入第二加载阶段后,由于 SCFRP 面板未发生挤压损伤,剩余承载结构仍保持完整的载荷传递路径,在载荷-位移曲线上表现为准线性上升趋势,直至第二个镶嵌件-节点界面发生脱黏。SCFRP 同质夹芯结构的面板抗压强度显著高于界面黏接强度,因此在第二加载阶段仍表现为镶嵌件界面脱黏失效模式,如图 13 所示。

此阶段对应的剪切载荷达到最大值,定义为极



图13 面内剪切试验损伤照片

Fig. 13 Photos of in-plane shear experimental damage

限载荷。原因是在第一加载阶段,螺栓挤压力 F_1 和界面剪切传递力 F_2 相对较弱;而进入第二加载阶段后,由于首个镶嵌件脱黏,对应螺栓对面板的直接挤压力 F_1 显著增强,导致结构在第二阶段展现出更高的承载能力,使得峰值载荷明显超过初始失效载荷值。

从图12a可以看出,随着纤维质量分数的增加,首个镶嵌件的失效位移呈现递减趋势,这是由于纤维质量分数从20%提升至40%时,SCFRP复合材料的拉伸弹性模量相应增大,导致在相同剪切位移条件下,下面板的应变响应减弱。这种刚度差异会在镶嵌件与下面板连接界面处产生变形不协调,进而引发界面应力集中并促使脱黏提前。而纤维质量分数为30%与40%复合材料的拉伸弹性模量差异较小,这很好地解释了二者首个镶嵌件脱黏位移相近的现象。随纤维质量分数变化,上、下面板的拉伸强度与抗挤压强度发生变化,纤维质量分数为30%试样展现出最优的连接性能。30%纤维质量分数,厚3 mm的SCFRP同质点阵夹芯板面内剪切失效载荷约为5 kN,略低于相同镶嵌件尺寸的传统异质夹芯板^[1],极限载荷约为7.04 kN,提高29.2%。同时失效刚度为2.64 kN/mm,提高175%,原因是SCFRP同质点阵夹芯板中对镶嵌件的约束并非单独的上、下两表面,如图3b所示,对镶嵌件进行适用性调整后,其底部扩孔十字槽深度为9.5 mm,SCFRP点阵芯子节点高度为6.5 mm,达到镶嵌件开槽深度的68.4%,且点阵芯子为一体成型制造,镶嵌件与点阵形成嵌锁结构连接紧密。同时环氧结构胶黏剂不仅提供轴向固定,还通过周向包裹增强了局部约束。

从图12b可以看出,随面板厚度变化,面内剪切失效位移与材料的拉伸弹性模量变化相似,2 mm厚度试样的失效位移明显小于3 mm。然而4 mm厚度试样表现出异常行为,原因是当下面板厚度过大时,厚度方向的应变梯度加剧,导致界面应力集中引发提前脱黏失效。SCFRP同质点阵夹芯板的面内剪切极限载荷差异主要受面板抗挤压性能主导。

对于4 mm厚度试样,其较低的极限载荷可归结于两个因素:首先,首个镶嵌件脱黏导致对应螺栓的接触状态由面接触变为倾斜挤压,显著降低了有效承载面积;其次,第二个镶嵌件的过早脱黏使得面板的抗挤压性能未能充分发挥。

通过对失效后的20%纤维质量分数试样的再次加载面内剪切载荷测试,得到如图14所示曲线,对比图8a中20%纤维质量分数的挤压曲线,发现点阵结构显著优于相同材料单独面板的挤压性能,这源于点阵结构的协同承载机制,该机制通过优化载荷分布使失效位移和极限载荷分别提升约213.2%和84.7%。

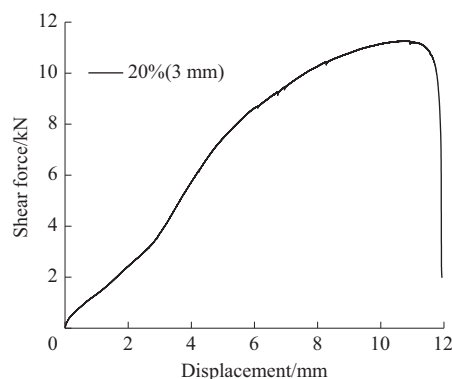


图14 失效后点阵夹芯板面内剪切载荷-位移曲线

Fig. 14 In-plane shear force-displacement curves after failure of lattice sandwich panels

实验结果表明,SCFRP同质点阵夹芯板在面内剪切载荷作用下展现出卓越的结构完整性,即便在首个镶嵌件失效后,对应螺栓对上面板的挤压作用仅产生轻微的螺纹压痕,如图15a所示,而未造成结构性损伤。镶嵌件脱黏失效后再次进行面内剪切试验的最终失效模式表现为螺栓挤压断裂,如图15b所示,而非夹芯结构本身发生破坏失效。与异质夹芯板在初始加载阶段即出现面板挤压损伤不同^[1],SCFRP同质点阵结构在整个加载过程中保持



(a) Thread impression

(b) Screw fracture

图15 SCFRP同质点阵夹芯板通孔损伤情况

Fig. 15 Through-hole damage in SCFRP homogeneous lattice sandwich panels

各组件完好,充分展现了其性能优势。然而这也表明,界面黏接强度已成为制约性能发挥的瓶颈因素。通过使用更高强度的胶黏剂或采用如超声波焊接等新型连接工艺去提高界面连接强度的方式,从而更好地发挥 SCFRP 同质点阵夹芯板的高强度优势,进而使该类夹芯板展现出广阔的应用前景。

3 结论

(1)使用直接复合压缩成型工艺(DCCM)制备的短碳纤维增强热塑性塑料(SCFRP)时,纤维质量分数过高,易出现纤维大量堆积导致基体无法充分浸润且纤维沿挤出方向取向效果变差,影响 SCFRP 拉伸强度;厚度过大的试样在压缩过程中易出现纤维偏转取向现象,影响 SCFRP 的拉伸强度。

(2)与碳纤维层合板面板-铝合金嵌锁点阵芯子组成的传统异质点阵夹芯板(异质夹芯板)相比,SCFRP 同质点阵夹芯板受法向拉脱载荷作用时以镶嵌件下表面直接脱黏为失效模式,点阵芯子节点未发生提前脱黏;受面内剪切载荷作用时以两个镶嵌件陆续脱黏为失效模式,无面板压溃现象。

(3)相较于装配相同尺寸镶嵌件的传统异质点阵夹芯板,SCFRP 同质点阵夹芯板法向拉脱失效载荷以 40% 纤维质量分数、3 mm 厚度面板时最高,约为 5.65 kN,提高 88.3%;面内剪切失效载荷以 30% 纤维质量分数、3 mm 厚度时最高,约为 5 kN,极限载荷约为 7.04 kN,提高了 29.2%,失效刚度约为 2.64 kN/mm,提高了 175%。

参考文献

- [1] YE G Y, BI H J, LI Z L, et al. Compression performances and failure modes of 3D printed pyramidal lattice truss composite structures[J]. *Composites Communications*, 2021, 24. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100615.
- [2] HU B, WU L Z, XIONG J, et al. Mechanical properties of a node-interlocking pyramidal welded tube lattice sandwich structure[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 129:290–305.
- [3] 刘国春,孙华伟,杨文锋,等. 复合材料泡沫夹芯结构三点弯的改进弹塑性解析模型[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(9):5 323–5 339. LIU Guochun, SUN Huawei, YANG Wenfeng, et al. Improved elastoplastic analytical model of three-point bending in composite foam sandwich structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(9):5 323–5 339.
- [4] 李开开. 褶皱夹芯结构的静/动态连接研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. LI Kaikai. Research on static/dynamic connection of fold sandwich structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [5] LIANG Z L, CHEN X L, SUN Z G, et al. A study on the compressive mechanical properties of 316L diamond lattice structures manufactured by laser powder bed fusion based on actual relative density[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 84:414–423.
- [6] SANTANA M V B, GONÇALVES P B, SILVEIRA R A M. Stability and load capacity of an elasto-plastic pyramidal truss[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2019, 171:158–173.
- [7] 邓晓星,朱子旭,陈长海,等. 复合材料夹芯结构准静态稳定性性能现状概述[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(11):5 701–5 723. DENG Xiaoxing, ZHU Zixu, CHEN Changhai, et al. Research status of quasi-static stability performance of composite sandwich structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(11): 5 701–5 723.
- [8] YE G Y, BI H J, HU Y C. Compression behaviors of 3D printed pyramidal lattice truss composite structures[J]. *Composite Structures*, 2020, 233. DOI:10.1016/j.compstruct.2019.111706.
- [9] NUÑO M, BÜHRING J, RAO M N, et al. Delamination testing of AlSi₁₀Mg sandwich structures with pyramidal lattice truss core made by laser powder bed fusion[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34(1). DOI:10.1186/s10033-021-00643-7.
- [10] ZHANG Z J, ZHANG Q C, HUANG L, et al. Effect of elevated temperature on the out-of-plane compressive properties of nickel based pyramidal lattice truss structures with hollow trusses[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 159. DOI: 10.1016/j.tws. 2020. 107247.
- [11] QI G, MA L. Experimental investigation of composite pyramidal truss core sandwich panels with lightweight inserts[J]. *Composite Structures*, 2018, 187:336–343.
- [12] XU H W, LIU C M, MAO H, et al. Strengthening nodes to obtain high-strength pyramid lattice structure by using wire arc additive manufacturing method[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 117:125–133.
- [13] MEHDIPOUR H, CAMANHO P P, BELINGARDI G. Elastoplastic constitutive equations for short fiber reinforced polymers [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165:199–214.
- [14] LIU G, XIONG Y, ZHOU L M. Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications[J]. *Composites Communications*, 2021, 27. DOI:10.1016/j.coco.2021.100907.
- [15] PASTUKHOV L V, GOVAERT L E. Crack-growth controlled failure of short fibre reinforced thermoplastics: Influence of fibre orientation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 143. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105982.
- [16] ZHAO R T, GU X, WU T, et al. Compression behavior of direct compounded compression molded short carbon fiber reinforced thermoplastic pyramidal lattice truss core[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 284. DOI:10.1016/j.compositesb.2024.111686.
- [17] SCHELLEIS C, SCHEURING B M, LIEBIG W V, et al. Approaching polycarbonate as an LFT-D material: Processing and

- mechanical properties[J]. *Polymers*, 2023, 15(9). DOI: 10.3390/polym15092041.
- [18] ISHIKAWA T, AMAOKA K, MASUBUCHI Y, et al. Overview of automotive structural composites technology developments in Japan[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 155: 221–246.
- [19] KIM B J, LEE D G. Characteristics of joining inserts for composite sandwich panels[J]. *Composite Structures*, 2008, 86(1/2/3): 55–60.
- [20] WANG J F, DING L, SONG B Y, et al. Effect of size and shape of joining insert on the strength of sandwich-structured laminate panels for wheeled vehicle's body[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, 34(22):1 823–1 832.
- [21] SONG K I, CHOI J Y, KWEON J H, et al. An experimental study of the insert joint strength of composite sandwich structures[J]. *Composite Structures*, 2008, 86(1/2/3):107–113.
- [22] RAGHU N, BATTLE M, SOUTHWARD T. Strength variability of inserts in sandwich panels[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2009, 11(6):501–517.
- [23] SCHWENNEN J, SESSNER V, FLEISCHER J. A new approach on integrating joining inserts for composite sandwich structures with foam cores[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 44:310–315.
- [24] QI G, MA L, WANG S Y. Modeling and reliability of insert in composite pyramidal lattice truss core sandwich panels[J]. *Composite Structures*, 2019, 221. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.04.060.
- [25] LIU J L, HE L, YANG D D, et al. Effects of carbon fiber content on the crystallization and rheological properties of carbon fiber-reinforced polyamide 6[J]. *Polymers*, 2024, 16(17). DOI:10.3390/polym16172395.
- [26] 王治辉, 陈占春, 刘江林, 等. 基于收敛口模诱导纤维取向的碳纤维复合材料制备方法[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(3):79–88.
- WANG Zhihui, CHEN Zhanchun, LIU Jianglin, et al. Preparation method of carbon composites based on convergent die induce fiber orientation[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(3): 79–88.
- [27] 何浪, 刘江林, 杨冬冬, 等. 双螺杆挤出机螺杆组合对碳纤维增强聚酰胺6均匀性的影响[J]. *中国塑料*, 2025, 39(6):14–18.
- HE Lang, LIU Jianglin, YANG Dongdong, et al. Effect of screw configuration of twin-screw extruder on uniformity of carbon-fiber-reinforced polyamide 6[J]. *China Plastics*, 2025, 39(6): 14–18.

(上接第64页)

- [25] SUN Y M, MEI J, HU H, et al. In-situ Polymerization of exfoliated structure PA6/organo-clay nanocomposites[J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2020, 59(1):434–440.
- [26] ZHANG H X, SEO D H, LEE D E, et al. Fabrication of highly thermal conductive PA6/hBN composites via in situ polymerization process[J]. *Journal of Polymer Research*, 2021, 28(2). DOI: 10.1007/s10965-020-02378-w.
- [27] LIU M X, XU M K, ZHOU J Q, et al. Interlaminar shear properties of carbon fiber/nylon 6 composites reinforced with GO-modified waterborne polyurethane sizing agent prepared by in situ polymerization[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2025, 198. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108900.
- [28] MENDOZA TOLENTINO Y, ROMERO-ZÚÑIGA G Y, CENICEROS REYES M A, et al. Microwave dielectric heating affects the in situ polymerization process of nylon-6/Ag-NPs hybrid polymer nanocomposite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(18). DOI:10.1002/app.53793.
- [29] 李相, 骆子寅, 陈珺娴, 等. 原位聚合型阻燃抗菌聚酰胺66聚合机理及性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(10):58–65.
- LI Xiang, LUO Ziyang, CHEN Junxian, et al. Polymerization mechanism and properties of flame-retardant and antibacterial polyamide 66 by in-situ polymerization[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(10):58–65.
- [30] 王忠强, 卢健体, 易庆锋, 等. 原位聚合免喷涂PA6/滑石粉纳米复合材料及其性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(8):113–118, 128.
- WANG Zhongqiang, LU Jiantu, YI Qingfeng, et al. Properties of spray free PA6/talc nanocomposites by in situ polymerization[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(8):113–118, 128.