

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.02.002

## 碳-玻璃纤维夹层泡沫缝合复合材料的弯曲性能

毛丽贺<sup>1,2</sup>, 朱佳琦<sup>1,2</sup>, 陈利<sup>1,2</sup>, 焦亚男<sup>1,2</sup>, 鲁吉文<sup>1,2</sup>, 孙荣庆<sup>3</sup>

(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. 航天材料与加工技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** 针对夹层泡沫复合材料在弯曲载荷下易分层失效的问题, 通过缝合技术来增强其弯曲性能。通过实验方法研究缝合密度和面板厚度对复合材料弯曲性能的影响, 并结合有限元模拟分析弯曲过程渐进损伤。结果表明: 碳-玻璃纤维夹层泡沫缝合复合材料的弯曲性能与缝合密度和面板厚度呈正比关系。当缝合密度为 10 mm × 10 mm、面板厚度为 5 层时, 试样弯曲性能最优, 弯曲强度达到 73 MPa, 弯曲模量为 4.19 GPa, 弯曲刚度为  $4.01 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ ; 碳-玻璃纤维夹层泡沫缝合复合材料弯曲破坏形貌主要表现为上面板凹陷、下面板断裂、泡沫发生压缩变形和剪切破坏现象, 缝线树脂柱出现抽拔断裂。

**关键词:** 夹层泡沫复合材料; 缝合; 弯曲性能; 破坏形貌; 有限元模拟

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2025)02-0008-07

## Bending properties of carbon-glass fiber sandwich foam stitching composites

MAO Lihe<sup>1,2</sup>, ZHU Jiaqi<sup>1,2</sup>, CHEN Li<sup>1,2</sup>, JIAO Yanan<sup>1,2</sup>, LU Jiwen<sup>1,2</sup>, SUN Rongqing<sup>3</sup>

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Advanced Textile Composites of Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of delamination failure of sandwich foam composites under bending load, stitching technology was used to enhance the bending properties. The influence of sewing density and panel thickness on the bending performance of the composite material was studied experimentally, and the progressive damage of bending process was analyzed by finite element simulation. The results show that the bending performance of the carbon-glass fiber laminated foam stitching composite material is positively correlated with the sewing density and panel thickness. When the sewing density is 10 mm × 10 mm and the panel thickness is 5 layers, the sample has the best bending performance, with a bending strength of 73 MPa and a bending stiffness of  $4.01 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ . The bending failure morphology of the carbon-glass fiber laminated foam stitching composite material mainly shows the depression of the upper panel, the fracture of the lower panel, the compression deformation and shear failure of the foam, and the pull-out failure of the resin column of the sewing thread.

**Key words:** sandwich foam composites; stitching; bending properties; morphological damage; finite element simulation

夹层泡沫复合材料因为具有轻质高强等优良特性而逐渐替代传统金属材料被广泛地应用于现代工程领域中<sup>[1-3]</sup>。常用的泡沫有聚氨酯(PU)、聚氯乙烯(PVC)和聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)等, 与其他闭孔泡沫相比, PMI 具有更优异的力学强度且固化工艺条件不受限, 在应用上获得了更广阔的前景<sup>[4-6]</sup>。然而, 由于夹层芯材和面板两相材料界面性能的不匹配<sup>[7]</sup>, 夹层

复合材料易发生芯体开裂或界面分层等现象, 导致夹层结构的承载能力就会严重受损, 从而导致夹层复合材料的破坏<sup>[8-9]</sup>。通过在厚度方向上引入缝线来改变层间结构, 可以提高夹层复合材料在外载荷作用下的力学性能, 主要包括缝纫增强<sup>[10-11]</sup>、Z-pin 增强<sup>[12]</sup>和 X 状碳纤维销钉增强等技术。缝纫增强通过在夹层中引入缝线树脂柱, 改变了材料的组分, 已被证明是改善夹

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 天津市多元重点项目(22JCZDJC00940)

通信作者: 毛丽贺(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为轻质结构材料设计和性能研究。E-mail: maolihe@tiangong.edu.cn

层复合材料力学性能的常用方法<sup>[13-15]</sup>。

由于夹层复合材料内部结构的复杂性,研究主要以实验方法为主,辅以数值分析<sup>[16-17]</sup>。Styles 等<sup>[18]</sup>探讨了芯材厚度对夹层结构弯曲特性的影响,得出芯材厚度的变化会显著影响夹层结构的弯曲刚度和承载能力。黄志超等<sup>[19]</sup>发现增加芯体厚度会导致弯曲正应力和弯曲强度下降,引入缝线树脂柱后,材料的弯曲强度增加 45%。Henao 等<sup>[20]</sup>利用有限元模拟技术,揭示了缝合间隔对于分散载荷、提高结构整体稳定性和延长使用寿命的潜在益处。也有学者量化了缝合对泡沫芯夹层板的影响,研究发现与未缝合的夹层板相比,缝合夹层板在弯曲载荷下的性能增强了 147%。徐学宏等<sup>[21]</sup>通过利用真空辅助树脂灌注(VARI)工艺成功制备出具有不同缝合方式和密度的泡沫夹层复合材料,发现缝合显著提高了材料弯曲刚度。经实验证明,缝合显著改善了破坏过程和模式,提高了承载能力和损伤容限。但这些缝合技术仍对材料有一定的损伤,如何在保证复合材料强度的同时减少损伤是目前亟待解决的问题。

本研究的主要目的是开发一种碳-玻璃纤维夹层泡沫缝合复合材料,结合碳纤维、无碱玻璃纤维和 PMI 泡沫的优异性能,对复合材料实现轻量化。使用实验室自制穿刺缝合设备,有效降低缝合对复合材料的损伤,并在 VARI 成型工艺<sup>[22]</sup>基础上优化,确保材料内部的均匀性和无缺陷状态,从而提高其整体质量和性能<sup>[23]</sup>。本文选取工程中常用的杨木夹层与泡沫夹层作对比,对所制备的复合材料进行三点弯曲试验,并结合有限元模拟方法,探究缝合密度和面板厚度对碳-玻璃纤维夹层泡沫缝合复合材料的弯曲性能及其破坏形貌的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

上下面板分别选用无锡盛特碳纤维有限公司生产的 W-3011 平纹碳纤维布和 W-9311 无碱玻璃纤维布;夹层选用上海赢创化学特种有限公司生产的 ROHACELL® 71HERO PMI 泡沫;缝合线选用河南永煤碳纤维有限公司生产的 MT300C 双合股碳纤维纱线;选用深圳市郎博万先进材料有限公司生产的 6349 双组分环氧树脂作为夹层复合材料的固化树脂。

### 1.2 夹层结构复合材料制备

使用实验室自制穿刺缝合机对碳-玻璃纤维面板和泡沫夹层进行整体缝纫,根据缝合设备夹具所能夹持的最大尺寸,所有缝料裁剪为 480 mm × 320 mm。采

用碳纤维布和玻璃纤维布 $\pm 45^\circ$ 交替铺层的方式铺 4 层,玻纤织物与碳纤维织物的纤维体积分数分别为 16.4%和 17.7%,上下面板厚度共 2.08 mm,将上下面板与 4 mm 厚度的 PMI 夹层组合,以充分发挥两种纤维的优势并提升复合材料性能。参考滑雪板板芯梯度缝合设计,制备了未缝合、20 mm × 20 mm、15 mm × 15 mm 和 10 mm × 10 mm 这 4 种缝合参数。碳-玻璃纤维夹层缝合预制体制备过程如图 1 所示。

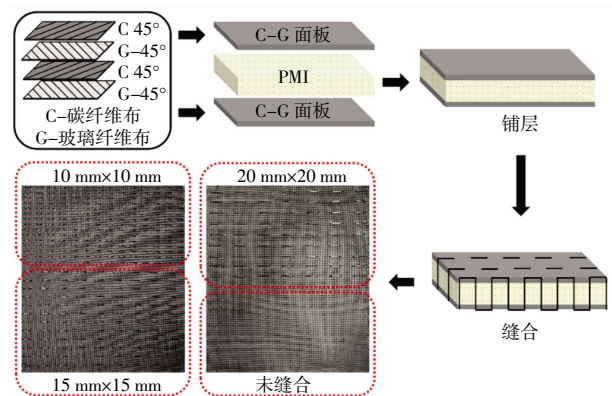


图 1 碳-玻璃纤维夹层缝合预制体制备过程

Fig.1 Preparation process of carbon-glass fiber sandwich suture preform

使用 VARI 复合成型工艺,将预制体复合。具体操作方法为:将真空泵连接到真空桶上,将树脂脱泡处理;用丙酮擦拭玻璃板操作台,在操作台上粘贴脱模布;将剪裁并缝纫好的预制体铺放在操作台上,用真空袋和密封胶将铺好的碳纤维布密封,连接导管;打开真空泵,检查装置气密性后,导管插入环氧树脂;将树脂通过真空流动至预制体中,直到完全浸渍;关闭真空泵,用架子夹紧导管,放入烘箱升温至 80 ℃保持 3 h 进行固化,然后冷却,降至室温(24 ℃);将夹层复合材料脱模并修剪毛边,按照试验标准切割试样。VARI 成型工艺实验装置如图 2 所示。

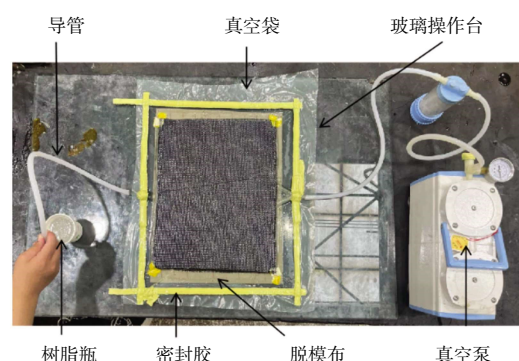


图 2 VARI 成型工艺实验装置

Fig.2 Experimental device of VARI molding process

### 1.3 测试及分析方法

根据 GB/T1456—2005 试验标准<sup>[24]</sup>,将样品切割成 120 mm × 30 mm 的尺寸,如图 3 所示,跨距 70 mm,在日本岛津公司生产的 AG-250KNE 电子万能试验机上进行弯曲性能试验,计算其弯曲强度、弯曲模量和弯曲刚度,加载速率为 2 mm/min。

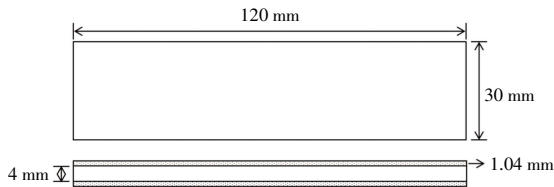


图 3 弯曲试验样品尺寸

Fig.3 Sample size of bending test

使用天津云帆科技公司生产的水浸超声波 C 扫描自动探伤仪检测复合材料的损伤情况,使用美国康耐视公司生产的 3D 轮廓仪拍摄试样力学试验前后的宏观形貌,使用飞纳科学仪器(上海)有限公司生产的 Phenom 飞纳台式扫描电镜拍摄试样的微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 碳-玻璃纤维夹层复合材料弯曲性能

#### 2.1.1 不同夹层材料对复合材料弯曲性能的影响

表 1 为 5 个试样的杨木夹层和 PMI 泡沫夹层复合材料的质量,尺寸为 120 mm × 30 mm,在质量上 PMI 泡沫夹层约为杨木夹层的 1/2,以面积为 0.35~0.45 m<sup>2</sup> 的成人尺寸滑雪板为例,板芯部分采用 PMI 夹层可实现减重 1.2~1.5 kg,实现了滑雪板的轻量化。

表 1 不同夹层复合材料的质量

Tab.1 Weight of different sandwich composites

杨木夹层质量/g	26.7	26.9	24.7	25.4	25.8
PMI 泡沫夹层质量/g	14.7	15.7	15.3	14.9	14.3

图 4 为杨木夹层和 PMI 泡沫夹层复合材料的载荷-位移曲线。由图 4 可见,在弯曲试验过程中,泡沫夹层在弯曲破坏时没有出现明显的屈服点,在达到最大载荷后缓慢下降,虽然杨木夹芯复合材料的极限载荷比泡沫夹层复合材料的要大,但是随着位移的增加,杨木夹芯会发生失效断裂,在位移为 2.21 mm 时出现较大裂纹,在位移为 4.09 mm 时出现另一条裂纹,杨木直接断裂失效,损伤不可逆。而泡沫夹层复合材料在达到最大载荷后,仍保持平稳,只出现微小裂纹,不会最终失效,且在弯曲试验过后,试样弯曲后会有小程度的回弹。对比杨木夹层和泡沫夹层的碳-玻璃纤维夹层结构之间的破坏模式,泡沫夹层结构的载荷位

移曲线更加平滑,断裂位移比杨木夹芯结构的大 2.8 倍,这表明泡沫夹层作为滑雪板芯的减震性能更好。

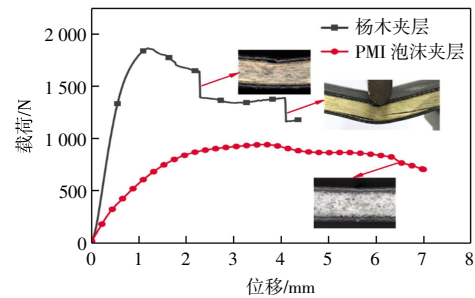
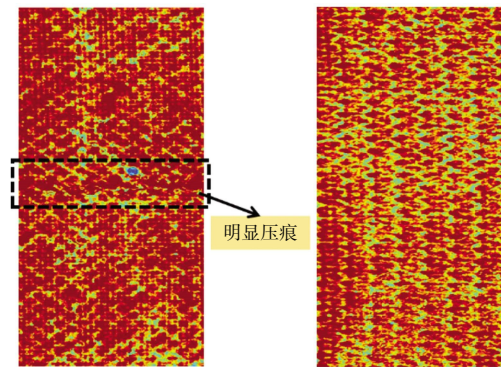


图 4 不同夹层材料的复合材料弯曲试验载荷-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curves of bending test of different sandwich composites

图 5 所示为杨木夹层和 PMI 泡沫夹层复合材料经过弯曲试验后所拍摄的超声 C 扫描探伤图。图 5 也表明采用 PMI 泡沫夹层的复合材料在弯曲性能方面相较于杨木夹层具有更好的韧性和耐久性。



(a) 杨木夹层

(b) PMI 泡沫夹层

图 5 杨木、PMI 泡沫夹层复合材料超声 C 扫描探伤

Fig.5 Ultrasonic C-scan images of poplar and PMI foam sandwich composites

#### 2.1.2 不同缝合参数对复合材料弯曲性能的影响

图 6 所示为不同缝合密度下复合材料弯曲试验载荷-位移曲线。

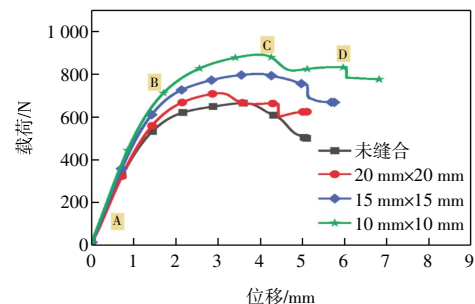


图 6 碳-玻璃纤维夹层缝合复合材料弯曲试验载荷-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves of carbon-glass fiber sandwich stitched composite under bending test

由图 6 可以看出,缝合密度为 10 mm × 10 mm 的试

样极限载荷最大,比未缝合复合材料试样极限载荷增加了 34.3%,有效提高未缝合泡沫夹层复合材料的力学性能。以密度为 10 mm × 10 mm 的载荷-位移曲线为例,弯曲试验过程明显分为几个阶段:

第 1 阶段:A-B 段为加载初始期,载荷随着位移的增加呈线性上升趋势,此时结构件整体承受载荷,尚未发生破坏,这一过程典型地呈现了弹塑性载荷位移曲线。并且,加载初始期的直线段是体现结构整体刚度时期,直线段的斜率可计算出泡沫夹层结构的弹性模量。

第 2 阶段:B-C 段为载荷继续增加时,夹层结构内部开始承受挤压,载荷增加速度减慢,此时为非弹性部分的开始,在此期间达到最大载荷,未缝合复合材料极限载荷为 648.21 N,缝合密度为 20 mm × 20 mm 的复合材料极限载荷为 733.45 N,缝合密度为 15 mm × 15 mm 的复合材料极限载荷为 840.28 N,缝合密度为 10 mm × 10 mm 的复合材料极限载荷为 944.8 N。

第 3 阶段:C-D 段随着载荷的增加,结构承载能力继续保持,并且由于 PMI 泡沫是各向同性且均匀闭孔的材料,沿着 45 °C 方向扩展破坏。在破坏的过程中,泡沫孔洞被挤压,导致破坏路径的增长,进而更多地吸收破坏能量。当破坏达到面板边缘时,载荷会立即降低,从而导致试样的失效和破坏。

弯曲试验的性能参数如表 2 所示,括号内为方差。由表 2 可以看出,试样的弯曲强度随着缝合密度的增加而增加,且缝合密度为 10 mm × 10 mm 的试样弯曲性能最优。比未缝合的试样在弯曲强度上增加 38.1%;在弯曲模量上增加 37.9%;弯曲刚度增加 43.2%。这是因为随着缝合密度的增加,缝线树脂柱对整体夹层结构的支撑力越强,复合材料的抗弯能力越强,所以弯曲性能随着缝合密度提高而逐渐升高。

表 2 碳-玻璃纤维夹层缝合复合材料弯曲强度、模量和刚度

Tab.2 Bending strength, modulus, and stiffness of carbon-glass fiber sandwich stitched composites

试样种类	未缝合	20 mm×20 mm	15 mm×15 mm	10 mm×10 mm
弯曲强度/ MPa	49.32(0.55)	58.00(1.03)	66.87(0.97)	73.00(2.07)
弯曲模量/ GPa	3.13(0.09)	3.55(0.05)	4.01(0.03)	4.19(0.08)
弯曲刚度/ (10 <sup>6</sup> N·mm <sup>2</sup> )	3.00(0.12)	3.40(0.07)	3.84(0.06)	4.01(0.08)

### 2.1.3 不同面板厚度对复合材料弯曲性能的影响

根据试验结果绘制在不同面板厚度试样弯曲性能点线图,图 7 为弯曲强度点线图、图 8 为弯曲模量点线图、图 9 为弯曲刚度点线图。从图 7—图 9 中可以看出,随着面板厚度的增加,弯曲强度、模量和刚度都

随之增加。增加面板厚度,意味着更多的纤维和树脂材料参与承载,增强了结构的整体强度,使复合材料在受到弯曲载荷时能够更好地抵抗变形和破坏,表现出更高的抗弯性能。

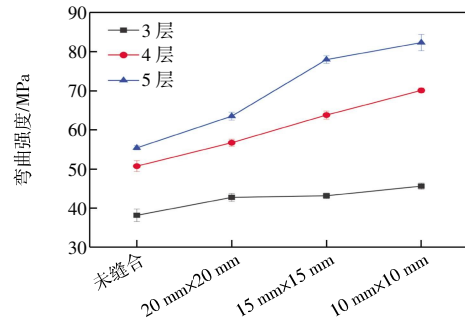


图 7 碳-玻璃纤维夹层缝合复合材料弯曲强度点线图  
Fig.7 Dot plot of bending strength of carbon-glass fiber sandwich composite

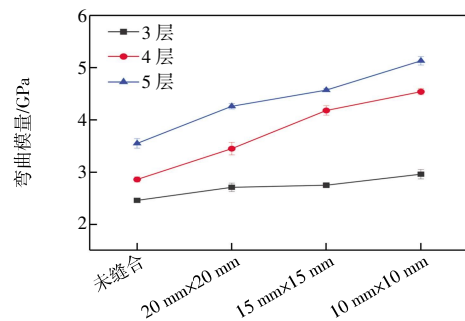


图 8 碳-玻璃纤维夹层缝合复合材料弯曲模量点线图  
Fig.8 Dot plot of bending modulus of carbon-glass fiber sandwich composite

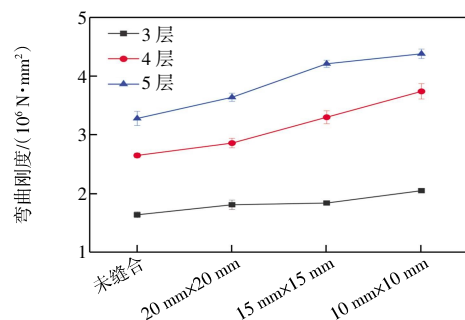


图 9 碳-玻璃纤维夹层缝合复合材料弯曲刚度点线图  
Fig.9 Dot plot of bending stiffness of carbon-glass fiber sandwich composite

## 2.2 碳-玻璃纤维夹层复合材料有限元模拟

C-G 泡沫夹层结构有限元模型由上下 C-G 面板和 PMI 夹芯组成,采用 Abaqus 软件使用壳单元(S4R)定义上下面板,三维实体单元(C3D8R)定义 PMI 夹芯,三点弯曲实验中的 2 个支座和 1 个压头由刚体单元(C3D4)定义。纤维面板和泡沫夹芯通过绑定约束(Tie)连接,支座、压头与夹层结构通过接触来定义。在

材料定义中采用 Abaqus 内置的 Hashin 损伤模型定义了损伤模型,对模型进行弯曲试验模拟,得到弯曲试验与有限元模拟损伤演化过程对比图如图 10 所示。图 10 显示了弯曲试验和模型模拟弯曲过程中的变形,与弯曲实验过程基本一致,证明了模型的合理性。

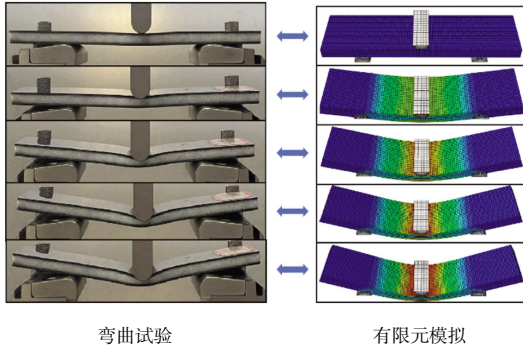


图 10 弯曲试验与有限元模拟损伤演化过程对比

Fig.10 Comparison of damage evolution process between bending test and finite element simulation

随后,进行有限元模拟和试验研究,得到了泡沫夹层结构在弯曲加载下的载荷-位移数据,计算平均值得到弯曲试验与有限元模拟的载荷-位移曲线对比图如图 11 所示。从图 11 中可以看出,有限元模拟和弯曲试验的载荷-位移曲线基本趋势一致,模拟与弯曲试验中平均极限载荷分别为 1 002.1 N 和 944.8 N,相对误差为 5.72%,误差较小,验证了模型的有效性。

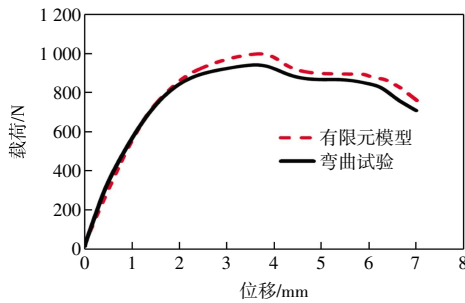


图 11 弯曲试验与有限元模拟的载荷-位移曲线对比

Fig.11 Comparison of load-displacement curves between finite element simulation and bending test

### 2.3 碳-玻璃纤维夹层复合材料弯曲破坏形貌

图 12 所示为不同缝合参数试样弯曲试验损伤图。由图 12 可见,随着加载的进行,试样逐渐弯曲变形,直到发出细微的断裂声响,此时未缝合结构上面板出现碎裂压痕,随着载荷的继续进行,试样内部泡沫持续受到挤压,发出沉闷的爆裂声响,泡沫发生剪切破坏出现裂纹,且沿着 45° 方向扩展。加载继续进行,未缝合泡沫夹层结构裂纹继续扩展,上下面板与夹芯之间出现裂缝,夹层结构脱粘。而缝合后的泡沫夹层结构由于缝线的阻挡,裂纹停止延伸,只发生泡

沫的剪切破坏。

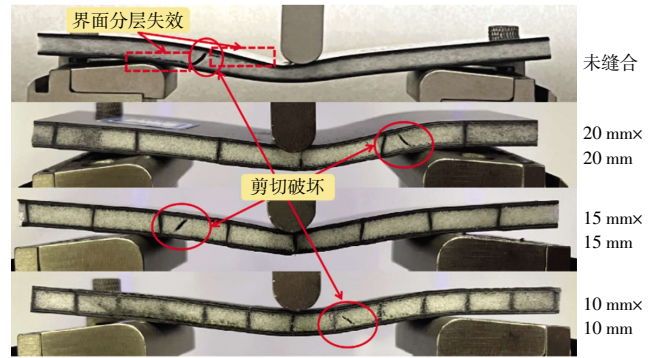
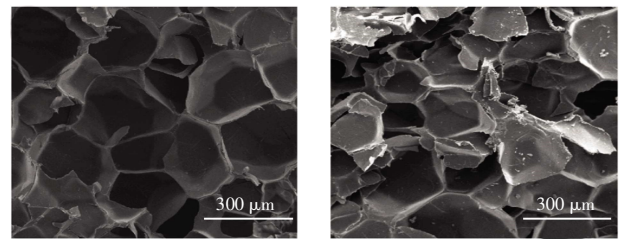


图 12 不同缝合参数试样弯曲试验损伤

Fig.12 Damage diagram of bending test of specimens with different stitching parameters

图 13 为弯曲试验前后 PMI 泡沫 SEM 图。由图 13 可见,在弯曲试验前 PMI 泡沫完整饱满,进行弯曲试验后,PMI 泡沫在压头的压缩下破坏,表现出破碎坚实的失效特征,但依然保持支撑性。



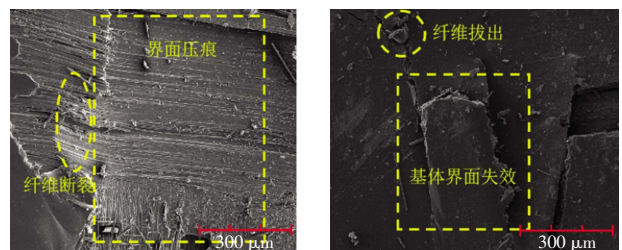
(a) 试验前

(b) 试验后

图 13 弯曲试验前后 PMI 泡沫 SEM 图

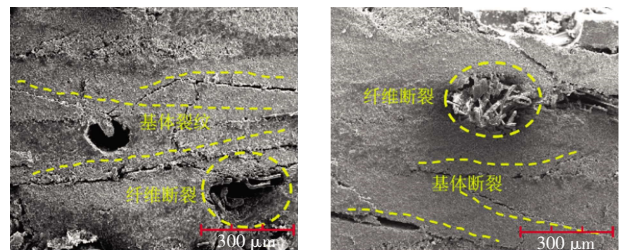
Fig.13 SEM images of PMI foam before and after bending test

弯曲试样随着压头的下降,顶部承受压应力,底部承受拉应力。图 14 为弯曲试验后上下面板 SEM 图。



(a) 压缩面

(b) 拉伸面



(c) 前侧面

(d) 后侧面

图 14 弯曲试验后上下面板 SEM 图

Fig.14 SEM image of upper and lower plate after bending test

图 14(a)为压头压缩面,可以看出明显压痕,界面凹陷,纤维断裂;图 14(b)为底部拉伸面,基体断裂,纤维拔出;图 14(c)为前侧面,图 14(d)为后侧面,破坏形貌均展示为基体出现多条横向裂纹且纤维断裂拔出。

上下面板是最重要的承力者,承担着侧向分布力和平面弯矩;而夹芯层则主要承受着剪切力。材料在缝合后,缝线树脂柱作为承载的重要部分。图 15 所示为弯曲破坏后试样 3D 轮廓仪拍摄图。由图 15 可以看出,未缝合泡沫承力主要是泡沫,加入缝线后,缝线树脂柱承受载荷,泡沫挤出破坏减弱,随着缝合密度的增加,承力的树脂柱增加,复合材料的弯曲强度增加。

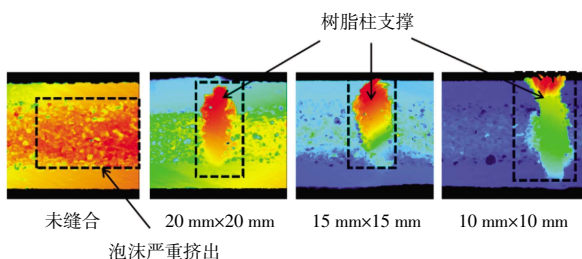


图 15 不同缝合参数试样弯曲后 3D 轮廓仪拍摄图

Fig.15 Image of samples with different stitching parameters after bending compared by 3D profilometer

## 2.4 不同缝合技术的总结和比较

锁式缝合技术通过稳定的环锁结构来增强预制件的强度。改进型锁式缝合则避免了内部线圈的互锁,减少了缝纫线在缝纫过程中的弯曲和磨损。然而,这 2 种技术需要在底部增加额外的储线机构,引起底纱张力过高,对复合材料造成较大损伤。链式缝合适合于大曲率构件和异型结构复合材料的缝合,其优势在于减少底线更换频率,双线链确保预制件稳固。但是,缝线发生断裂会导致结构的解体,且在厚预制件缝合中存在局限。Tufting 缝合作为最简单的单边缝合技术,适用于缝合大厚度和复杂结构的复合材料。该技术操作简便但当缝针缩回时,缝线容易脱落,缝合效率低。Blind 缝合既能穿透纤维预制体的厚度,也能实现非穿透缝合,但要求弯针与锁定装置之间有精确的配合,对设备精度要求高。

与其他双边缝合方式相比,穿刺缝合技术采用预冲孔再缝合的方式,且穿孔缝合针直径大于缝线缝合针,无送布牙磨损,有效避免缝线在穿孔时的损伤。适用于大厚度部件,可通过调整缝针长度实现灵活缝合。该技术工艺简单,成本低廉,且能有效降低缝合过程中缝针对复合材料的损伤,具有广泛的适用性和诸多优点,适用于各种类型的复合材料制备。表 3 简要

总结了每种缝合技术的优缺点与应用。

表 3 不同缝合技术的总结和比较

Tab.3 Summary and comparison of different suturing techniques

缝合技术	优点	缺点	应用
锁式缝合	连接紧密强度高	工艺复杂损伤大	厚度有限
改进锁式缝合	磨损小分散应力	工艺复杂损伤较大	厚度有限
链式缝合	底线更换少磨损少	工艺复杂 易整体破坏	厚度有限
Tufting缝合	灵活损伤小	无固定容易脱落	厚度不限
Blind缝合	灵活简便	设备要求高	厚度形状均不限
穿刺缝合	工艺简单 损伤小效率高	无法制备复杂预制体	厚度不限

## 3 结论

(1) 对比杨木与 PMI 泡沫夹层复合材料,PMI 泡沫夹层复合材料载荷-位移曲线更加平滑,断裂位移更长,具有更高的稳定性与减震性能,且在质量上减少约 1/2,实现了复合材料的轻量化。

(2) 随着缝合密度和面板厚度的增加,试样的弯曲强度、弯曲刚度和弯曲模量均有显著提升。弯曲性能最优参数为缝合密度为 10 mm × 10 mm,面板厚度为 5 层。此时弯曲强度达到了 73 MPa,弯曲模量达到了 4.19 GPa,弯曲刚度达到了  $4.01 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 。

(3) 经过对碳-玻璃纤维夹层泡沫复合材料结构进行模拟,得到的变形过程和破坏模式与实验结果基本相符,其极限载荷的相对误差为 5.72%,表现出很好的吻合度,验证了模型的可靠性。

(4) 未缝合的泡沫夹层主要由于挤压而导致分层破坏和面板开裂,而缝合后的泡沫夹层通过缝线树脂柱来支撑载荷,能够有效承载更大的载荷,其破坏形貌主要是基体裂纹和缝线树脂柱的断裂抽拔。由于树脂柱的连接,面板与夹层结构的分层得到有效抑制。

(5) 本文所用穿刺缝合技术通过预冲孔再缝合的方式,有效降低缝合过程中缝针对复合材料的损伤,并能通过调整缝针长度实现对大厚度试件的灵活缝合,具有广泛的适用性和高效性。

## 参考文献:

- [1] 赵泽华,张兆恒,邢亚娟,等. 新型夹层结构研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2024(3):121-128.  
ZHAO Z H, ZHANG Z H, XING Y J, et al. Research progress of new sandwich structures[J]. Composites Science and Engi-

- neering, 2024(3):121-128(in Chinese).
- [2] MAHFUZ H, THOMAS T, RANGARI V, et al. On the dynamic response of sandwich composites and their core materials[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(14): 2465-2472.
- [3] YANG H K, NG B C, YU H C, et al. Mechanical properties study on sandwich hybrid metal/(carbon, glass) fiber reinforcement plastic composite sheet[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5(1): 83-90.
- [4] 王凯, 贺强. 聚甲基丙烯酸酰胺泡沫夹层结构全生命周期的关键技术研究进展[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(8): 1805-1822.
- WANG K, HE Q. Progress on study of key technologies for polymethacrylimide foam core sandwich lifecycle[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 1805-1822(in Chinese).
- [5] 赵锐霞, 尹亮, 潘玲英, 等. PMI 泡沫夹层结构性能研究[J]. *宇航材料工艺*, 2012, 42(5): 34-37.
- ZHAO R X, YIN L, PAN L Y, et al. Properties of PMI foam sandwich structure[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2012, 42(5): 34-37(in Chinese).
- [6] 原崇新, 董青海, 何斌. PMI 泡沫夹层碳纤维复合材料的制备及力学表征[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(4): 89-95.
- YUAN C X, DONG Q H, HE B. Preparation and mechanical characterization of PMI foam sandwich carbon fiber composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(4): 89-95 (in Chinese).
- [7] DRANSFIELD K, BAILLIE C, MAI Y W. Improving the delamination resistance of CFRP by stitching: A review[J]. *Composites Science and Technology*, 1994, 50(3): 305-317.
- [8] MAMALIS A G, MANOLAKOS D E, IOANNIDIS M B, et al. On the crushing response of composite sandwich panels subjected to edgewise compression: Experimental[J]. *Composite Structures*, 2005, 71(2): 246-257.
- [9] DAS M, OTERKUS E, MADENCI E, et al. Residual strength of sandwich panels with hail damage[J]. *Composite Structures*, 2009, 88(3): 403-412.
- [10] STANLEY L E. Development and Evaluation of Stitched Sandwich Panels[Z]. Washington, D.C.: NASA Langley Technical Report Server, 2001.
- [11] 邓爱民, 张佐光, 李敏, 等. Z 向增强泡沫夹芯阻燃复合材料力学性能[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(5): 50-54.
- DENG A M, ZHANG Z G, LI M, et al. Mechanical properties of Z-direction reinforced foam core sandwich fire-resistant composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(5): 50-54(in Chinese).
- [12] MARASCO A I, CARTIÉ D D R, PARTRIDGE I K, et al. Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: Out-of-plane properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(2): 295-302.
- [13] 徐庆林. 缝纫增强泡沫夹芯结构复合材料制备及力学性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- XU Q L. Fabrication and mechanical properties of stitching reinforced foam sandwich composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016(in Chinese).
- [14] 吴扬, 段跃新. 缝合参数对缝纫平纹玻璃纤维织物复合材料弯曲性能的影响研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2011(6): 24-27.
- WU Y, DUAN Y X. Effects of stitching parameters on flexural properties of the glass fabric reinforced laminated composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2011(6): 24-27(in Chinese).
- [15] 郑锡涛, 孙秦, 李野, 等. 全厚度缝合复合材料泡沫芯夹层结构力学性能研究与损伤容限评定[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(6): 29-36.
- ZHENG X T, SUN Q, LI Y, et al. Mechanical behavior and damage tolerance tests of composites through-thickness stitched foam sandwich panels[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(6): 29-36(in Chinese).
- [16] WANG P Y, LEI Y, YUE Z F. Experimental and numerical evaluation of the flexural properties of stitched foam core sandwich structure [J]. *Composite Structures*, 2013, 100: 243-248.
- [17] SUN Q, ZHENG X T, LI Y, et al. An experimental investigation on composites through-the-thickness stitched foam core sandwich panels[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 353/354/355/356/357/358: 1443-1446.
- [18] STYLES M, COMPSTON P, KALYANASUNDARAM S. The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures[J]. *Composite Structures*, 2007, 80(4): 532-538.
- [19] 黄志超, 程梁. 未缝合与缝合玻纤泡沫夹层复合板弯曲性能研究[J]. *塑料工业*, 2018, 46(8): 89-94.
- HUANG Z C, CHENG L. Study on bending performance of unstitched and stitched fiberglass foam sandwich composites[J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(8): 89-94(in Chinese).
- [20] HENAO A, CARRERA M, MIRAVETE A, et al. Mechanical performance of through-thickness tufted sandwich structures[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(9): 2052-2059.
- [21] 徐学宏, 郑义珠, 陈吉平, 等. 缝合参数对泡沫夹层结构复合材料力学性能的影响[J]. *材料工程*, 2022, 50(01): 132-137.
- XU X H, ZHENG Y Z, CHEN J P, et al. Research progress in mechanical properties of stitched foam sandwich composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(9): 118-122(in Chinese).
- [22] 熊美蓉, 段跃新, 董安琪, 等. 真空辅助树脂灌注工艺成型 (下转第 22 页)

- 7: e120–e124.
- [7] MA L, HAN M, DU J H, et al. Study on friction and wear properties of 3D braided carbon fiber[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2468(1): 012021.
- [8] RASHEVA Z, ZHANG G, BURKHART T. A correlation between the tribological and mechanical properties of short carbon fibers reinforced PEEK materials with different fiber orientations[J]. *Tribology International*, 2010, 43(8): 1430–1437.
- [9] MAN Z Y, WANG H J, HE Q H, et al. Friction and wear behaviour of additively manufactured continuous carbon fibre reinforced PA6 composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 226: 109332.
- [10] ZHOU W, MEISER M, WICH F, et al. Fiber orientation dependence of tribological behavior of short carbon fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, 105(1): 538–552.
- [11] GOU J J, ZHANG H, DAI Y J, et al. Numerical prediction of effective thermal conductivities of 3D four-directional braided composites[J]. *Composite Structures*, 2015, 125: 499–508.
- [12] ELIMAT Z M, HUSSAIN W T, ZIHLIF A M. PAN-based carbon fibers/PMMA composites: Thermal, dielectric, and DC electrical properties[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2012, 23(12): 2117–2122.
- [13] LUO W, LIU Q, LI Y, et al. Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 91: 579–588.
- [14] SHI Y, BAI Y, LEI Y Z, et al. Simultaneously enhanced heat dissipation and tribological properties of polyphenylene sulfide-based composites via constructing segregated network structure[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 99: 239–250.
- [15] MA S S, ZHU Y, FEI J, et al. Facile fabrication of PEI/BN/PDA hierarchical structure for boosting tribological performances of carbon fiber/resin composites matched with copper dual disk[J]. *Tribology International*, 2022, 172: 107641.
- [16] ZAGHLOUL M M Y, STEEL K, VEIDT M, et al. Mechanical and tribological performances of thermoplastic polymers reinforced with glass fibres at variable fibre volume fractions[J]. *Polymers*, 2023, 15(3): 694.
- [17] HU Y, TAN D Q, XU C, et al. Influence of high temperature on the tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite[J]. *Tribology International*, 2022, 174: 107781.
- [18] TANG H, ZHOU H, CHENG X H. Friction process analysis of carbon fiber-carbon nanotube multiscale hybrid reinforced epoxy with excellent tribological performance[J]. *Tribology International*, 2022, 171: 107559.

#### 本文引文格式:

- 裴晓园, 孙晴, 贾志坤, 等. 滑动方向对编织复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(2): 15–22.
- PEI X Y, SUN Q, JIA Z K, et al. Effect of sliding direction on friction and wear properties of braided composites[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(2): 15–22 (in Chinese).

(上接第 14 页)

- 泡沫夹芯结构工艺设计与控制[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3): 28–34.
- XIONG M R, DUAN Y X, DONG A Q, et al. Process design and control of the VARI forming foam-core structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3): 28–34 (in Chinese).
- [23] 李华冠, 丁颖, 章月, 等. 玻璃纤维立体织物增强环氧树脂泡沫夹层复合材料的制备及力学性能[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 601–612.
- LI H G, DING Y, ZHANG Y, et al. Preparation and mechanical properties of glass fiber reinforced 3D fabric reinforced epoxy foam sandwich composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(1): 601–612 (in Chinese).
- [24] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1456—2005 夹层结构弯曲性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 1456—2005 test method for flexural properties of sandwich constructions[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).

#### 本文引文格式:

- 毛丽贺, 朱佳琦, 陈利, 等. 碳-玻璃纤维夹层泡沫缝合复合材料的弯曲性能[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(2): 8–14, 22.
- MAO L H, ZHU J Q, CHEN L, et al. Bending properties of carbon-glass fiber sandwich foam stitching composites[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(2): 8–14, 22 (in Chinese).