

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.010

压实力对激光加热辅助CF/PEEK原位固结层间剪切强度的影响机制

刘丰玮¹, 李辉¹, 武婷^{2,3}, 张晓祥^{1,3}, 陈占春^{1,2,3}, 梁建国^{1,2,3}, 刘江林^{1,2,3}

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学先进成型与智能装备研究院, 太原 030024;
3. 新疆智能装备研究院, 新疆阿克苏 842008)

摘要: 激光加热以其高热流密度和快速响应特性, 成为满足热塑性复合材料自动铺丝(AFP)技术需求的新兴加热方法。为探索AFP技术下压实力对激光加热辅助连续碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)预浸料原位固结后层间剪切强度(ILSS)的影响机制, 选取了100~400 N范围内的4个压实力(梯度为100 N), 通过短梁剪切(SBS)试验获取ILSS测试结果, 并结合微观分析、压敏纸检测和热历史监测等手段分析压实力对ILSS的影响机制。结果表明, 在100~400 N范围内, ILSS随压实力增加呈非线性增长趋势。相较于100 N试样, 400 N试样的平均ILSS提升了31.21 MPa, 增幅达到123.1%。微观分析结果表明, 高压实力下, 层间孔隙率降低, 平整度提高, 材料膨化行为得到有效抑制, 层间接触更为紧密。此外, 压敏纸检测结果显示, 随着压实力增大, 原始预浸料表面形貌对层间初始紧密接触程度的不利影响减弱, 有效压力区域面积增加, 分布更均匀。热历史曲线进一步揭示, 较高压实力可降低层间接触热阻, 使预浸料2至4层温度升高15~20℃。上述研究内容详细阐明了压实力提升层间结合强度的作用机理, 为优化热塑性复合材料原位固结制造工艺提供了理论依据。

关键词: 热塑性复合材料; 自动铺丝; 压实力; 激光加热; 层间结合; 层间剪切强度

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0071-10

Influencing mechanism of compaction force on interlayer shear strength of laser heating-assisted CF/PEEK with in-situ consolidation

LIU Fengwei¹, LI Hui¹, WU Ting^{2,3}, ZHANG Xiaoxiang^{1,3}, CHEN Zhanchun^{1,2,3}, LIANG Jianguo^{1,2,3}, LIU Jianglin^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Advanced Forming and Intelligent Equipment Research Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Xinjiang Intelligent Equipment Research Institute, Aksu 842008, China)

Abstract : Laser heating, with its high heat flux density and rapid response characteristics, has emerged as a new heating method for automated fiber placement (AFP) technology of thermoplastic composites. In order to explore the influencing mechanism of compaction force on the interlayer shear strength (ILSS) of laser heating-assisted continuous carbon fiber reinforced poly-ether ether ketone (CF/PEEK) prepreg after in-situ consolidation under AFP technology, the four compaction forces were selected in the range of 100 to 400 N, with a gradient of 100 N. The influence mechanism of compaction force on ILSS was analyzed by combining the ILSS test results obtained through short beam shear (SBS) tests with microscopic analysis, pressure-sensitive paper detection and thermal history monitoring. The results indicate that within the 100–400 N range, the ILSS exhibits a nonlinear increase with compaction force. Compared to the 100 N samples, the average ILSS of the 400 N samples increases by 31.21 MPa, representing a 123.1% increase. Microscopic analysis show that under high compaction force, the interlayer porosity is reduced, the flatness is improved, the swelling behavior of material is effectively inhibited, and the interlayer contact is more intimate. In addition, pressure-sensitive paper testing results show that as the compaction force increases, the adverse influence of the surface morphology of the original prepreg on the initial intimate contact between layers weakens, and the effective pressure area increases and is more evenly distributed. The thermal history curve further reveals that higher compaction force can reduce the interlayer

基金项目: 国家科技重大专项(2024ZD0701601), 国家自然科学基金项目(52075361), 山西省科技重大专项(20201102003)

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制备技术及装备

收稿日期: 2025-07-12

引用格式: 刘丰玮, 李辉, 武婷, 等. 压实力对激光加热辅助CF/PEEK原位固结层间剪切强度的影响机制[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 71–80.

LIU Fengwei, LI Hui, WU Ting, et al. Influencing mechanism of compaction force on interlayer shear strength of laser heating-assisted CF/PEEK with in-situ consolidation[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 71–80.

contact thermal resistance, causing the temperature of 2–4 layers to increase by 15–20 °C. This study elaborates on the mechanism of compaction force increasing interlayer bonding strength, providing a theoretical basis for optimizing the in-situ consolidation manufacturing process of thermoplastic composites.

Keywords : thermoplastic composites ; automated fiber placement ; compaction force ; laser heating ; interlaminar bonding ; interlayer shear strength

热塑性复合材料具有优异的力学性能、轻量化特性、良好的抗腐蚀性以及较高的加工灵活性,可在保证结构强度的同时有效减轻质量,因而在航空航天、交通运输、环保建材等诸多领域得到广泛应用^[1–3]。随着生产需求的不断提升,热塑性复合材料的成型工艺正在向更高效率与精度的方向发展。其中,自动铺丝(AFP)技术凭借其高精度、高效率、高灵活性和原位固结优势,已成为热塑性复合材料加工的一种重要手段。该技术利用自动化设备将增强纤维预浸丝精准铺覆至模具表面,形成复合材料的层叠结构,相比传统的热压成型技术在力学性能接近(达到70%~80%)的同时显著提升铺放精度、缩短生产周期并减少材料浪费^[2–7]。然而,AFP产业化应用仍面临一个核心挑战:层间剪切强度(ILSS)的稳定性不足,易导致分层失效。

在AFP成型过程中,压实力是决定层间结合性能的关键因素^[8–10]。压辊施加的压实力分布直接影响有效接触面积和树脂流动特性,进而对层间结合产生决定性影响。孔隙率作为关键指标,已被证实是削弱层间结合强度及其他力学性能的主要因素之一,其影响在各类缺陷中最为显著^[11–12]。

AFP技术中存在热气矩^[13–14]、红外辐射^[15]和激光加热^[8,16–18]三种常见的加热方式。其中,热气矩能量利用率低,加热均匀性差,受环境温度影响剧烈,而红外辐射热流密度较低,聚焦短,这两种方式都无法适应高效高质量生产,已经基本被淘汰。而激光加热技术凭借其较高的能量密度、精确的加热位置、快速的响应与动态控制能力,成为研究热点。与传统加热方式相比,该方式显著降低了生产成本,提高了铺放效率。

层间结合性能方面,Pourahmadi等^[19]对比了AFP原位固结和高压釜热压固结制备的碳纤维(CF)/聚醚醚酮(PEEK)热塑性层合板。发现两种方法制备的试样在孔隙率和纤维分布方面存在很大差异,AFP技术生产层合板的ILSS比热压固结层合板低37%。Miao等^[8]使用不同压实力在激光辅助成形下制备层合板,发现随着压实力的增大,孔隙率减小,ILSS平均值增大。通过对层间纤维富集区孔隙形态和温度

历史分析,证实了孔隙来源于固结时刻。宋清华等^[20]通过建立铺层间紧密接触模型预测原位成型过程中铺层间的结合强度与成型工艺参数之间的关系,对原位成型工艺参数进行优化,并通过试验验证模型的正确性。通过计算发现,当柔性压辊压力达到1 500 N时,铺层间的紧密接触程度才能达到100%。

笔者旨在探讨在激光加热辅助情况下,不同压实力条件下复合材料的层间结合性能变化。以ILSS试验为主线,通过深入研究层间面内微观形态、成型过程中的压力分布与热历史曲线,并依据紧密接触理论^[17],结合“树脂岛”假设^[21],分析压实力对层间结合强度的影响机制,期望为热塑性复合材料的优化加工工艺提供理论依据和实践指导。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维预浸料:HB90-700-12.7型单向连续CF增强热塑性PEEK(CF/PEEK)预浸带(CF型号为T700),密度为1.57 g/cm³,宽度为12.7 mm,厚度为0.135 mm,树脂质量分数为34%±3%,江苏亨博复合材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

自动铺丝机:自研(图1),太原理工大学;

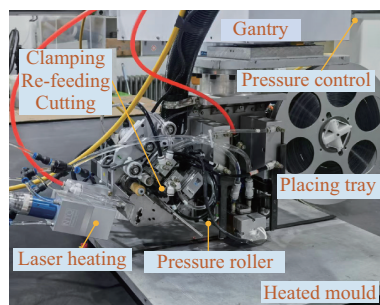


图1 龙门架四自由度热塑性复合材料自动铺丝机

Fig. 1 Gantry four-degree-of-freedom thermoplastic composite automated fiber placement machine

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

光学显微镜: DM4M, 德国徕卡显微系统有限公司;

三维轮廓形态扫描系统: Keyence VK-X1100, 日本基恩士株式会社;

压敏纸:1LW (2.5~10 MPa),日本富士胶片股份有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM): Gemini 300, 德国蔡司集团;

热电偶:耐高温K型、100 Hz,宇创电热科技有限公司。

1.3 CF/PEEK 层合板制备

基于本实验室已有的研究^[22],特选择激光加热器的加热温度为 400 °C(约 735 W),铺放速度为 150 mm/s。在该铺放条件下,压力对层间结合性能的影响较为明显。铺放前,仔细清理铺放底板和压辊,并调平以确保压力分布均匀。为排除环境温度影响,恒温底板温度设置为 50 °C。对于第一层预浸料,使用铝制双面胶将其固定在铺放模具的铺放路径上,其后的预浸料通过自动铺丝机按该铺放路径层层铺放,如图2所示。在本实验中发现,在 400 N 以上压实力下工件发生了不可接受的预浸带变形。参考相关论文^[14,16]及实验现象,选取的压实力范围为 100~400 N,梯度 100 N。每个压实力下制备 7 个 12.7 mm×200 mm 层压板,每个层压板内选取最平整处制备测试工件,用以探索压实力对 ILSS 的影响,分析结果的合理性。

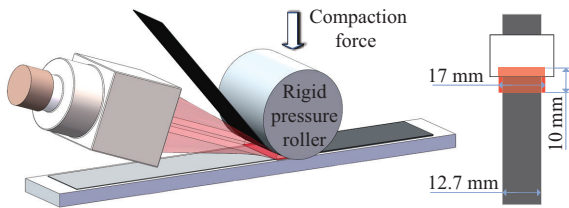


图2 激光加热辅助成型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser heating-assisted molding

1.4 测试与表征

根据 ASTM D2344/D2344M-16 进行短梁剪切(SBS)试验来表征复合材料的 ILSS。先在工件上通过平板透光法选择翘曲度达标的区段(≤ 0.015 mm/20 mm),再用 0.33 mm 的金刚石线锯进行初步切割,最后用砂纸按标准尺寸将试件研磨至合格的范围内[试件长度 l 为 (18 ± 1) mm、宽度 b 为 (6 ± 0.2) mm、高度 h 为 (3 ± 0.1) mm]。测试设备为电子万能材料试验机(负载能力为 50 kN),加载上压头半径 R 为 3 mm,试样支座半径 r 为 1.4 mm,跨距 L 为 (12 ± 0.3) mm,加载速度 v 为 1 mm/min,加载至 3 mm 或者试验件层间断裂为止,如图 3a 所示。图 3b 展示了可接受的破坏形式,若出现其他损伤则需重新进行试验。ILSS

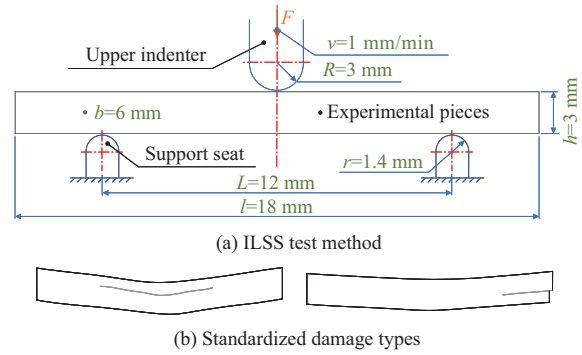


图3 ILSS测试方法及SBS标准破坏类型

Fig. 3 ILSS test method and SBS standardized damage types

根据标准试验公式(1)计算得到。

$$\tau_m = \frac{3}{4} \times \frac{F}{bh} \quad (1)$$

式中: τ_m 为 ILSS,单位 MPa; F 为测试过程中所测得断裂前的最大力,单位 N; b 和 h 分别为试件的宽度和厚度,单位 mm。

通过 MatchID 系统完成数字图像相关技术(DIC)采集与分析。在试验件表面喷涂高对比度散斑;使用高分辨率相机拍摄 SBS 试验前后的图像序列;通过 2D MatchID 软件算法追踪子区域内散斑的位移,逐帧分析位移场跳变,重建裂纹扩展轨迹。DIC 可识别微米级应变集中区,早于肉眼可见裂纹的出现。

根据 GB/T 3365-2008,使用光学显微镜测量试验件孔隙率。用金刚石线锯切割获得层合板横截面,并将其镶嵌入金相镶嵌料中打磨抛光,在光学显微镜下随机取 5 点成像。得到的图像经过 ImageJ-win 软件灰度分析取平均值后获得孔隙率。

使用三维轮廓形态扫描系统扫描原始与各压实力下加工过的预浸料的纯层间分离表面,获得表面超景深图片,通过 Vk-X Series 后处理软件分析表面形貌。为得到无损的纯层间分离表面,用单层 CF/PEEK 和单层碳纤维/聚苯硫醚(CF/PPS)黏合,然后利用熔点差加热至接近 PPS 熔点分离两层,以近似模拟实际层间黏合过程。虽然 PEEK 的玻璃化转变温度与 PPS 熔融温度有重合,但研究表明微晶的存在阻碍了 PEEK 低于熔化温度的扩散过程^[23-26],因此这种办法是可行的。

使用 FESEM 观察样件 SBS 试验后断裂面的微观结构。截取部分断裂面将其裁剪成 5 mm×5 mm 的试样,喷金后在 10 kV 下观察。

采用压敏纸来测试成型过程中的压力大小及分布情况。压敏纸分 A-film 和 C-film 两层,分别剪

切成长 100 mm、宽度略宽于预浸带的长条状,面对面放置于两条预浸料中间,按照制备层合板时的铺放条件铺放。在压力作用下使 A 层上的微型色囊泄出发色剂与 C 层上的显色剂反应显色。将显色后的 C 层用扫描仪扫描后与标准比色卡对比。

采用 K 型耐高温热电偶进行热历史监测。在试验中避开初始功率不稳定和末端树脂富集区域,将热电偶放置在基层上表面合适区域,后续铺放的预浸料即为第 1 层,热电偶所测的温度为经过该层预浸料吸收传热到下表面的温度。以此类推第 2 层、第 3 层……

2 结果与讨论

2.1 ILSS 的 SBS 试验结果分析

SBS 试验是层合板重要的层间力学性能表征手段之一。笔者重点研究了铺放过程中的压实力对层合板 ILSS 的影响。在 100, 200, 300, 400 N 下所测得的 ILSS 分别为 (25.36 ± 2.43) , (39.14 ± 3.11) , (53.53 ± 3.19) , (56.57 ± 1.45) MPa, 如图 4 所示。

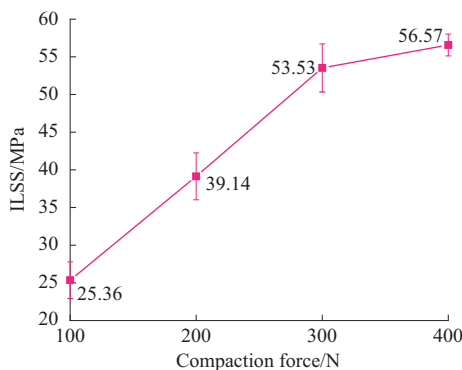


图 4 不同压实力下的 ILSS 测试结果

Fig. 4 ILSS test results under different compaction forces

测试结果表明,在以激光加热器为热源的情况下,压实力对 CF/PEEK 的 ILSS 具有显著调控作用:压实力在 100~300 N 时 ILSS 稳定且快速增长,300 N 后 ILSS 增长减缓,呈现非线性增长趋势,样本标准差先增大后减小。400 N 试样的平均 ILSS 较 100 N 试样增加了 31.21 MPa,提升 123.1%。

DIC 图像处理结果也证明了这一结论,图 5 展示了高速摄像机获得的试验失效时刻图像及使用 DIC 软件 crack 模块后处理获得的裂纹显像结果。由图 5 看出,100 N 试验件发生了明显的多层失效,层间滑移与层间开裂大量出现,表明层间结合强度普遍较低,因此标准差也较小;200~300 N 时的试验件只发生部分层间或单层失效,破坏发生在结合最薄弱部位,对压力作用非常敏感,标准差较大,裂纹呈现稳态扩展

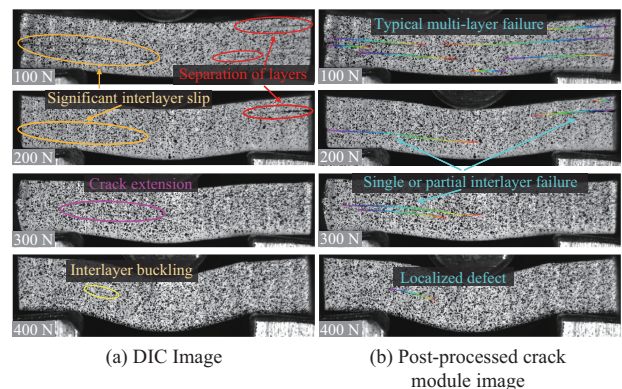


图 5 DIC 图像处理结果

Fig. 5 DIC image processing results

趋势;而 400 N 试验件在上压头位移 1.43 mm 时才出现了可观测到的局部失效,在拱形作用下屈曲只发生在了上下压头之间的区域,层间结合性能最好。

2.2 微观分析

为定量表征孔隙率特征,采用光学显微镜对试样垂直于纤维方向的横截面进行观测。基于 ImageJ-win 软件灰度分析表明,在 100, 200, 300, 400 N 压实力条件下,平均孔隙率依次为 5.65%, 3.75%, 2.52% 和 1.92%。由 100 N 至 200 N, 200 N 至 300 N 及 300 N 至 400 N 时计算得出的孔隙率下降率依次为 33.6%, 32.8% 和 23.8%, 该下降趋势与 ILSS 的提升率变化趋势一致。

图 6a 至图 6d 分别展示了不同压实力下孔隙分布的典型特征。在 100 N 低压实力条件下,试样中可见明显的宏观裂纹,边缘呈现锯齿状特征,这是纤维未被树脂浸润粘连的结果,层间结合区域同时

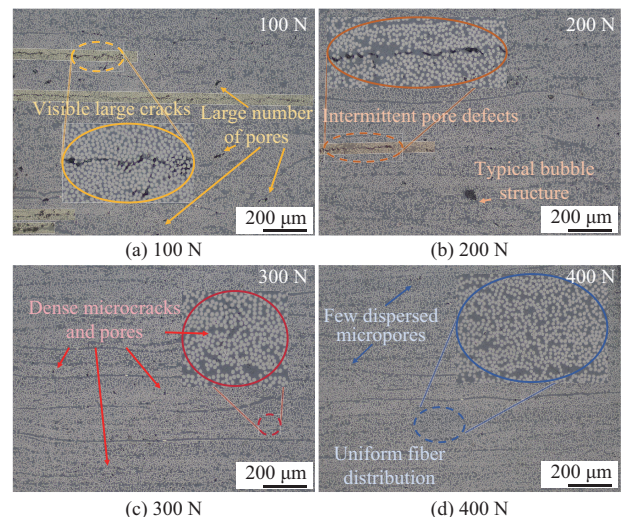


图 6 孔隙率测试的光学显微镜照片(放大倍数 100,局部放大倍数为 400)

Fig. 6 Optical microscope photograph of porosity testing

($\times 100$, local magnification to 400)

存在大量孔隙结构。当压实力提升至200 N时,缺陷演化为聚集在部分层间的断断续续的孔隙(图6b标示区域),此类孔隙缺陷在层间剪切应力作用下具有快速连通形成宏观裂纹的倾向,进而引发剧烈的层间断裂失效。300 N压实力条件下的试样层间界限趋于模糊,使面内纤维分布不均现象凸显,该现象源于原材料纤维分布的本征不均匀性,此时层间区域主要存在密集但孤立分布的微米级孔隙(图6c标示区域)。研究表明^[27],这类微小孔隙在层间剪切

测试中容易成为裂纹萌生的起点。当压实力达到400 N时,试样展现出最优层间结合质量:层间界面完全模糊,树脂富集区域也经压实力作用细小化,纤维分布均匀性显著提升。截面仅存微量亚微米级孔隙,且孔隙分布呈现由层间向面内转移的特征。

基于紧密接触理论^[17],压实力的提升可有效增大材料界面间的有效接触面积。采用200放大倍数及1 000%高差增强模式获取纯层间分离表面轮廓特征,如图7所示。图7a为100 N试样表面的典型

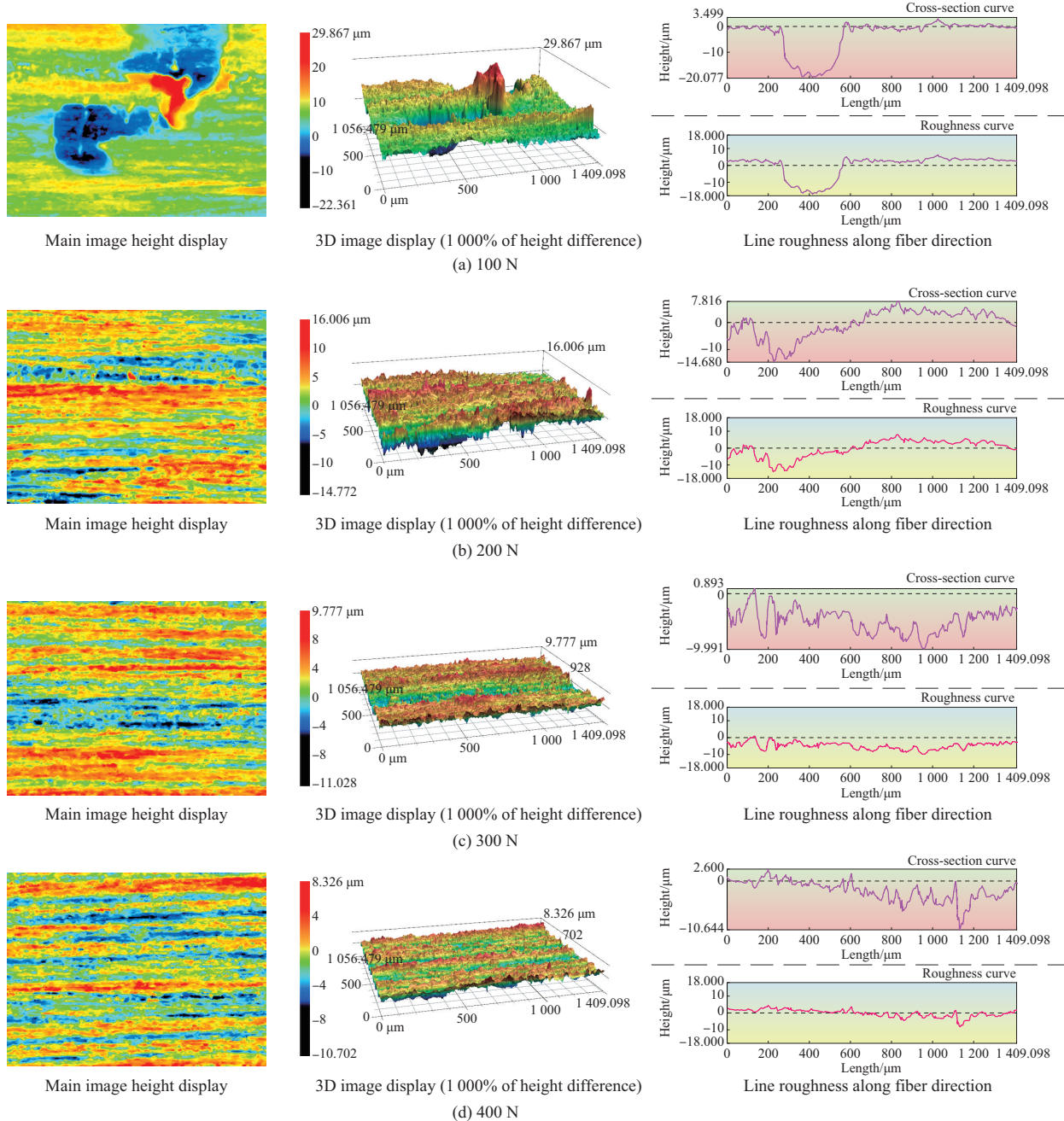


图7 三维轮廓扫描图及粗糙度测量结果(放大倍数200、高差1 000%)

Fig. 7 Three-dimensional profile scanning images and roughness measurement results ($\times 200$, 1 000% of height difference)

特征,可以看出,层内存在显著形貌缺陷,其中存在典型的气泡结构,呈现 $52.56\ \mu\text{m}$ 的极端高差,证明气泡直径超过该值。两气泡之间存在隆起结构,推测为压辊对气泡施加推挤作用时,熔融树脂基体流动产生的纤维重排现象。该现象揭示了低压实力条件下层内气体无法及时排出,致使树脂基体固结后形成的永久性孔洞缺陷。200 N 和 300 N 试样表面高度图红蓝色条纹逐渐细密,分布越来越均匀,气泡、褶皱等特殊起伏不再出现(图 7b 和图 7c)。相较而言,400 N 试样断面形貌显著改善(图 7d),三维图像非常平整光滑,起伏基本均一化。

根据承载面积曲线(BAC)方法^[28],紧密接触程度 D_{ic} 可以通过线条粗糙度转化为 BAC 方法的承载比曲线进行大致估算^[28],见式(2)。

$$D_{ic} = 1/[1 + (a_1/a_2)] \quad (2)$$

式中: a_1 为成型后材料的核心孔隙面积; a_2 为原材料的核心材料面积。

依据先前测得的线粗糙度绘制 100~400 N 纯层间分离表面典型承载比曲线,如图 8 所示[图 8 中,箭头标注的百分数代表承载比曲线面积比例,即图中所围面积占整体区域的比例,也即公式(2)中的 a_1],经计算可得 100~400 N 下各试样的平均紧密接触程度分别为 55.37%, 59.91%, 64.77%, 69.02%, 400 N 试样相较 100 N 试样的紧密接触程度增加了 24.65%。试验数据验证了高压实力对界面接触质量的提升机制:更低的表面粗糙度表明材料界面实现了更充分的物理接触,这有效促进了分子链扩散的机械互锁作用,进而强化了层间结合性能。该发现与紧密接触理论预测的压力-接触面积正相关关系具有高度一致性,与紧密接触理论相契合。

为进一步分析孔隙形成原因,控制相同的工艺

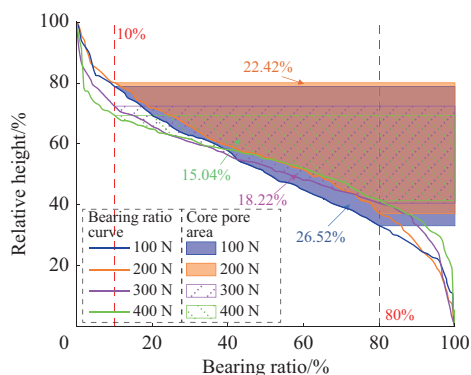


图 8 100~400 N 纯层间分离表面典型承载比曲线

Fig. 8 Typical bearing ratio curves for 100–400 N pure interlayer separation surfaces

参数(加热温度 $400\ ^\circ\text{C}$ 、铺放速率 $150\ \text{mm/s}$),对原始及不同压实力(100~400 N)处理的单层预浸料开展截面形貌定量分析。图 9 展示了原始试样及不同压实力成型试样的光学显微镜对比图像,其中淡黄色曲线表征热-力耦合作用后的边界轮廓。形貌分析表明,随着压实力从 100 N 增至 400 N,预浸料表面轮廓曲线曲率半径逐渐增大,界面平滑度显著提升。定量统计显示,100 N 试样表面起伏峰谷差极值约为 $15\ \mu\text{m}$,平均振幅约为 $6\ \mu\text{m}$,与三维轮廓测试中算术平均表面粗糙度 R_a 值($5.31\ \mu\text{m}$)具有良好一致性。这种现象称为膨化效应^[29],当加工温度高于树脂熔点时,基体黏度降低导致纤维约束力减弱,残余应力释放引发纤维“弹性回弹”,形成典型表面凹凸结构(图 9 中 100 N 和 200 N 的红色标示区,即潜在的孔隙区域)。这种周期性起伏结构在层压过程中会形成树脂流动障碍,当相邻铺层波峰-波谷错位时,在树脂贫乏区域将产生永久性层间孔隙^[23]。但值得注意的是,400 N 试样的表面平整度甚至优于原始预浸料,证实了“树脂岛”理论中高压实力条件能够促进树脂横向渗流^[21],进而实现界面缺陷的动态修复。该试验结果从界面形貌演化角度揭示了压实力对孔隙的调控机理:高压实力可以提升界面约束力和树脂渗流能力,二者的协同作用能够逆转材料热膨胀系数差异导致的残余应力回弹,实现层间孔隙的抑制和愈合。

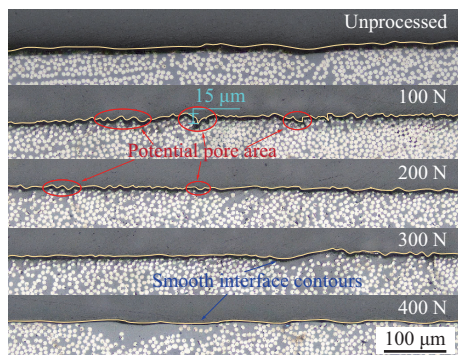


图 9 原始及各压实力下单层预浸料表面起伏情况

Fig. 9 Surface undulation of single-layer prepreg at original (unprocessed) state and various compaction forces

2.3 压力分布分析

对于施加压实力时间较长的过程,初始紧密接触程度往往被忽略。然而,对于原位固结过程,情况并非如此^[9]。笔者通过高温压敏纸测试了压实力对 CF/PEEK 初始接触状态的调控规律。如图 10a 所示,采用高温压敏纸记录的原位固结压力场分布表

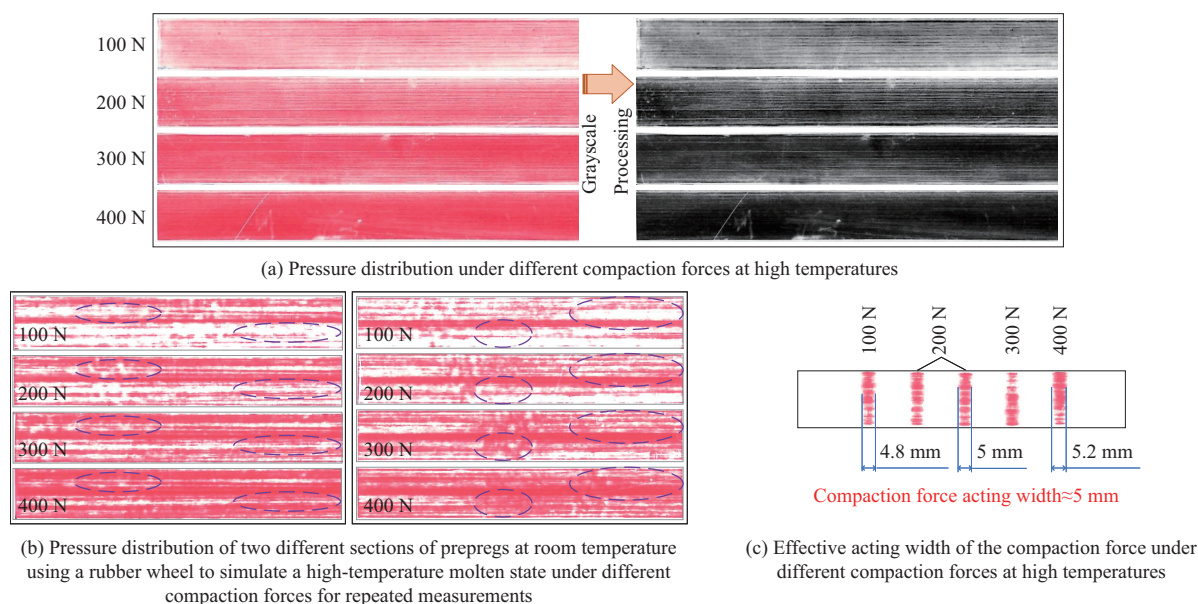


图10 压敏纸测试压力分布情况扫描图

Fig. 10 Scanning diagrams of pressure distribution of pressure-sensitive paper tests

明:100 N低压实力条件下压力分布呈现显著非均匀特征[压力场变异系数(CV)为0.186],仅47.3%区域达到有效接触阈值(≥ 2.5 MPa)。随着压实力增至400 N,有效压力面积比例达到90.8%,CV下降至0.067,证实高压实力条件能够突破材料本征表面凹凸的限制。

值得注意的是,原始预浸料表面形貌的批次差异会显著影响初始接触状态^[30]。为此,采用室温橡胶模拟高温熔融弹性状态(如图10b所示),通过可重复加载同一段预浸料以排除材料变异的干扰。实验数据显示,随着压实力增大,图像总是在上一压实力的基础上继续扩展面积、加深颜色(如图10b紫色圆圈区域),从100 N到400 N有着明显的递进关系,这表明高压实力条件下表面微凸体的塑性变形主导接触机制;当压实力超过300 N时,80%以上的表面微凸体高度差被有效压溃,促使接触界面从离散接触模式向连续接触模式转变;400 N压实力下各组图像均趋于完整均匀矩形,揭示较高的压实力通过多尺度形变机制(弹性→弹塑性→完全塑性)可以逐步消除原始预浸料表面形貌的不利影响。

2.4 热历史分析

在层间界面上实现黏结需要两个阶段,除紧密接触外还包括自黏结^[23-26,31-32],黏结的发生和过程与温度息息相关。图11对比了100 N和400 N压实力下预浸料1至4层温度历史曲线,图中橘色、粉色虚线分别为熔融温度 T_m (343 °C)和玻璃化转变温度 T_g

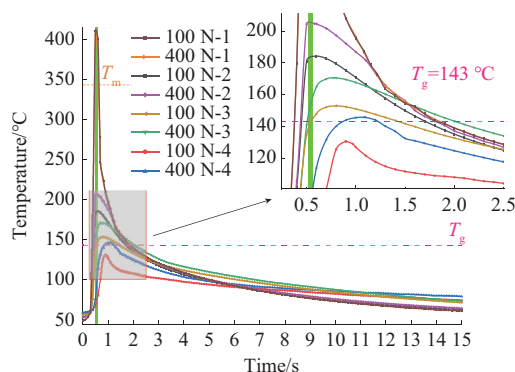


图11 100 N和400 N下1至4层温度历史曲线

Fig. 11 Temperature history curves of 1, 2, 3, 4 layers under 100 N and 400 N

(143 °C)。测量发现第1层各压实力下峰值温度均接近400 °C,但2至4层峰值温度随压实力增大而升高,温差为15~20 °C。此种现象的原因归结于较大的压实力增加了层间紧密接触程度从而降低了热阻,使得第1层接收的热量可以快速且尽可能无损地传递到随后铺设的层。此外,通过压敏纸测得静止压辊的压实区域宽度为5 mm(如图10c所示),即压力保持时间仅为0.033 s(图11绿色柱状区域为实际压实历程)。在压实过程中,实际在100 N压实力下第3层的温度就不足以支撑冷结晶的发生,表明较低的压实力会减少有效黏结次数。研究证明,较大的压实力对温度的提升为分子链扩散创造了更好的条件,可以有效促进层间结合。

值得注意的是,热历史分析还发现刚性压辊的瞬时固化特性(接触时间0.033 s)会导致压实后界面

存在残余温度,在压辊压过后,试样内部仍维持 T_g 以上温度。这导致残余气体存在的区域容易在固化力消失后发生回弹膨胀,形成较大的层内或层间孔隙^[30,33]。这可能是三维轮廓试验中在100 N试验件层间发现大气泡的主要原因。该现象凸显了压实力对气体逸出的核心作用,尤其在刚性压辊体系中,压实力幅值直接决定界面孔隙缺陷的抑制效果。

2.5 微观形貌FESEM分析

采用FESEM对ILSS测试样品的断裂机制进行了表征,如图12所示。由图12可以看出,随着压实力从100 N增加至400 N,试样断裂面的塑性变形特征

逐渐显著,具体表现为:100 N试样断面呈现点黏结特征,可见大量未粘连的平滑区域;200 N试样断面表现为区域面黏结,破坏主要出现在树脂-树脂界面;300 N试样断面开始出现纤维迁出,破坏同时发生在树脂-树脂和纤维-树脂界面,这些迁出的纤维有效抑制了裂纹扩展;400 N试样的塑性断裂区域扩展至整个层间和面内,发生大量纤维拉断,表明局部层间黏结强度超过了纤维本身强度。结合DIC观测结果,表明随着压实力的增加,失效模式从多层脆性断裂转变为单层韧性破坏,再次证明高压实力显著优化了界面结合质量。

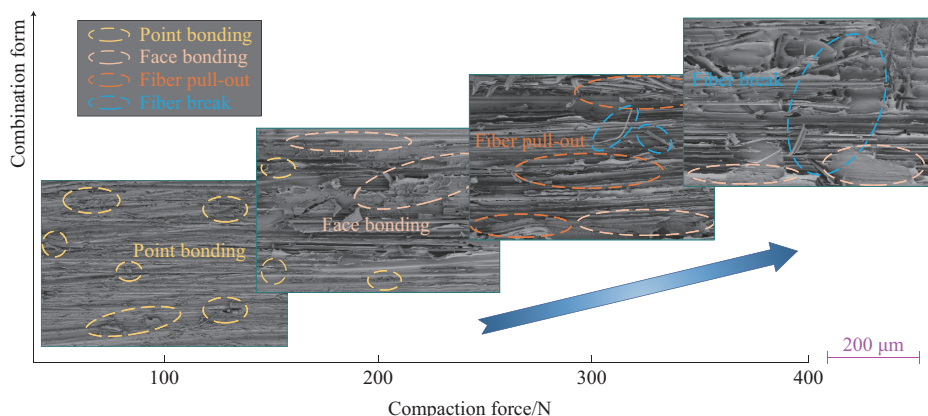


图12 ILSS测试样品的断裂机制图

Fig. 12 Diagram of fracture mechanism of ILSS test samples

3 结论

通过ILSS分析、微观形貌、压力场分布和热历史分析揭示了压实力对激光加热辅助成型CF/PEEK层压板ILSS的作用机制,得出以下结论。

(1)在激光加热体系下,ILSS与压实力呈非线性正相关。压实力从100 N增至400 N时,平均ILSS增加31.21 MPa,增幅达到123.1%,层间结合性能显著提升。高压实力条件可以减少孔隙、促进界面塑化,使失效模式从多层脆性断裂转变为单层韧性破坏,还能通过微凸体塑性变形实现表面形貌均质化,削弱原始预浸料表面起伏对界面接触的负面影响。

(2)孔隙率与层间结合强度呈显著负相关,对ILSS结果影响最大。100 N和200 N低压实力条件下的试样因层间紧密接触程度不足、界面粗糙度大、树脂流动不足,形成数量较多的孔隙和粗糙的层间界面;而400 N的高压实力促使层间接触紧密,层间平整且孔隙率低。单层预浸料表面形貌对比结果表明,较大的压实力可抑制材料膨化行为,实现层间更紧密的贴合。

(3)热历史分析表明,400 N压实力使2~4层界面温度较100 N提升15~20 °C,有效促进了分子链扩散,提升了层间结合质量。这种热传导增强效应源于以下现象:随着压实力增大紧密接触程度提高,层间热阻降低。此外,刚性辊的瞬时固化特性进一步凸显了高压实力促使气体逸出的重要性。

(4)笔者研究结果所揭示的压实力对激光加热辅助成型CF/PEEK层压板ILSS的作用机制可为热塑性复合材料固结过程提供理论依据。对大多数热塑性复合材料而言,充分浸润、低孔隙率和良好界面结合始终是获得高ILSS的关键。上述研究提供的核心物理原理和关键结论在相当程度上具有可推广性。

参考文献

- [1] ZHOU H, LI X Q, SHAO C J, et al. Review on the automated fiber placement process for the aero-engine composite fan blade and its feasibility in element level[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 193. DOI:10.1016/j.compositesa.2025.108875.
- [2] 郭鹏, 杨辰光, 李祥利, 等. 机器人化复合材料自动铺层技术综述[J]. 自动化学报, 2024, 50(5): 873-897.

- GUO Peng, YANG Chenguang, LI Xiangli, et al. A review on robotized automated lay-up technology for composite material manufacturing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(5):873–897.
- [3] NABAVI S F, DALIR H. A review on laser-assisted manufacturing process of thermoset composites: A review of fundamentals, processes, scientific modelling, challenges and prospective[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111713.
- [4] ISLAM F, DONOUGH M J, OROMIEHIE E, et al. Data-driven optimization of additive composite manufacturing using automated fibre placement: A study on process parameters effects and interactions[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 190. DOI:10.1016/j.compositesa.2024.108599.
- [5] BRASINGTON A, SACCO C, HALBRITTER J, et al. Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward[J]. *Composites Part C: Open Access*, 2021, 6. DOI:10.1016/j.jcomc.2021.100182.
- [6] 赵森. 先进热塑性复合材料现状及航空应用进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2024(12):147–152.
- ZHAO Miao. Status and application in aerospace of advanced thermoplastic composite materials[J]. *Composites Science and Engineering*, 2024(12):147–152.
- [7] 王婉. 复合材料自动铺放技术研究[J]. *中国设备工程*, 2020(11):196–197.
- WANG Rao. Research on automatic laying technology of composites[J]. *China Plant Engineering*, 2020(11):196–197.
- [8] MIAO Q Y, DAI Z H, MA G Y, et al. Effect of consolidation force on interlaminar shear strength of CF/PEEK laminates manufactured by laser-assisted forming[J]. *Composite Structures*, 2021, 266. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113779.
- [9] JIANG J X, HE Y X, WANG H, et al. Modeling and experimental validation of compaction pressure distribution for automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2021, 256. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113101.
- [10] JIANG W, HUANG Z G, WANG Y M, et al. Voids formation and their effects on mechanical properties in thermoformed carbon fiber fabric-reinforced composites[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(S2):E1094–E1102.
- [11] MEHDIKHANI M, GORBATIKH L, VERPOEST I, et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance[J]. *Journal of Composite Materials*, 2019, 53(12):1 579–1 669.
- [12] 马少华, 费昂强, 回丽, 等. 含孔复合材料层合板的压缩性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2015, 43(9):106–109.
- MA Shaohua, FEI Bingqiang, HUI Li, et al. Study on compressive properties of composite laminates with a hole[J]. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(9):106–109.
- [13] ZACHERL L, FONTES A, SHADMEHRI F. Three-dimensional heat transfer analysis of Hot Gas Torch (HGT)-assisted Automated Fiber Placement (AFP) for thermoplastic composites[J]. *Composite Structures*, 2024, 343. DOI:10.1016/j.compstruct.2024.118256.
- [14] OROMIEHIE E, GAIN A K, PRUSTY B G. Processing parameter optimisation for automated fibre placement (AFP) manufactured thermoplastic composites[J]. *Composite Structures*, 2021, 272. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.114223.
- [15] VENKATESAN C, ZULKIFLI F, SILVA A. Effects of processing parameters of infrared-based automated fiber placement on mechanical performance of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite[J]. *Composite Structures*, 2023, 309. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116725.
- [16] ZHANG C P, DUAN Y G, JOSHI S C, et al. Laser-assisted AFP-TPC manufacturing of CF/PEEK high-performance thermoplastic composites with low warpage-deformation defects[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 126:267–284.
- [17] ÇELİK O, PEETERS D, DRANSFELD C, et al. Intimate contact development during laser assisted fiber placement: Microstructure and effect of process parameters[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 134. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105888.
- [18] CHEN J P, FU K K, LI Y. Understanding processing parameter effects for carbon fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by laser-assisted automated fibre placement (AFP) [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 140. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.106160.
- [19] POURAHMADI E, SHADMEHRI F, GANESAN R. Interlaminar shear strength of Carbon/PEEK thermoplastic composite laminate: Effects of in-situ consolidation by automated fiber placement and autoclave re-consolidation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 269. DOI:10.1016/j.compositesb.2023.111104.
- [20] 宋清华, 刘卫平, 刘小林, 等. 热塑性复合材料原位成型过程铺层间结合强度[J]. *航空学报*, 2019, 40(4):259–267.
- SONG Qinghua, LIU Weiping, LIU Xiaolin, et al. Interlaminar bonding strength for thermoplastic composite in an in-situ consolidation process[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(4):259–267.
- [21] 黄新杰. 铺丝工艺参数优化及典型工艺缺陷对性能影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- HUANG Xinjie. Research on the process parameters optimization and the influence of the defects on the mechanical properties for automatic fiber placement[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [22] LI H, LI Y H, CHEN Z C, et al. Research on a novel annealing strategy for AFP of thermoplastic composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 305. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.112706.
- [23] ZANETTO J E, PLUMMER C J G, BOURBAN P E, et al. Fusion bonding of polyamide 12[J]. *Polymer Engineering & Science*,

- 2001, 41(5):890–897.
- [24] ZHENG H, ZHANG W J, LI B W, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 233. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109639.
- [25] AGEORGES C, YE L. Fusion bonding of polymer composites [M]. London: Springer London, 2002.
- [26] BAROCIO E, BRENKEN B, FAVALORO A, et al. Inter-layer fusion bonding of semi-crystalline polymer composites in extrusion deposition additive manufacturing [J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 230. DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109334.
- [27] 史俊伟, 杨柳, 王文贵, 等. 孔隙对碳纤维/环氧树脂复合材料剪切性能和破坏模式的影响 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(9): 5 039–5 052.
- SHI Junwei, YANG Liu, WANG Wengui, et al. Effects of voids on shear properties and failure mode of carbon fiber/epoxy resin composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(9): 5 039–5 052.
- [28] KHODAEI A, SHADMEHRI F. Intimate contact development for automated fiber placement of thermoplastic composites [J]. *Composites Part C: Open Access*, 2022, 8. DOI: 10.1016/j.jcomc.2022.100290.
- [29] 苗秋玉. 激光辅助加热成形 CF/PEEK 层合板层间结合过程及构件性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- MIAO Qiuyu. Study on interlaminar bonding process and mechanical properties of CF/PEEK laminates manufactured by laser-assisted forming [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
- [30] SLANGE T K, WARNET L L, GROUVE W J B, et al. Deconsolidation of C/PEEK blanks: On the role of prepreg, blank manufacturing method and conditioning [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 113: 189–199.
- [31] 赵大成. CF/PPS 热塑性复合材料自动铺放原位固结成型机理研究 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
- ZHAO Dacheng. Study on mechanisms during automated fiber placement in situ consolidation process of CF/PPS thermoplastic composites [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [32] 王孟洁. CF/PEEK 复合材料激光原位成型熔凝动力学分析 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
- WANG Mengjie. Melting dynamics analysis of CF/PEEK composites in laser in-situ forming [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023.
- [33] STOKES-GRIFFIN C M, MATUSZYK T I, COMPSTON P, et al. Modelling the automated tape placement of thermoplastic composites with in-situ consolidation [M] // *Sustainable Automotive Technologies 2012: Proceedings of the 4th International Conference*. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg, 2012: 61–68.