

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.016

不同浸渍工艺CF/PAEK预浸料的自动铺放成型质量及性能

顾星河^{1,2}, 来晓靓^{1,2}, 纪毓杨^{1,2}, 林秋实^{1,2}, 李博健^{1,2}, 陶群燕^{1,2}, 谢富原^{1,2}

(1.浙江省飞机复合材料技术创新中心,杭州 311222; 2.浙江华瑞航空制造有限公司,杭州 311222)

摘要:为研究国产热塑性预浸料的自动铺放工艺适配性,分别以熔融浸渍法和溶液浸渍法制备的碳纤维增强聚芳醚酮(CF/PAEK)预浸料为原材料,借助国产激光加热自动铺丝设备,采用原位固结、原位热压、热压罐后固结三种不同的工艺方法制备复合材料,并通过无损检测、金相表征、压缩性能测试等方法评价复合材料的成型质量及性能。结果表明,溶液浸渍法制备的预浸料的浸渍质量更好,在原位固结和原位热压工艺中,使用溶液浸渍预浸料制备的复合材料0°压缩性能优于熔融浸渍法。溶液浸渍CF/PAEK复合材料原位固结工艺下的0°压缩强度为705.6 MPa,压缩模量为129.9 GPa,在原位热压工艺下的0°压缩强度为686.1 MPa,压缩模量为145.1 GPa。在热压罐后固结工艺条件下,熔融浸渍预浸料制备的复合材料力学性能明显优于溶液浸渍预浸料制备的复合材料,其0°压缩强度为960.4 MPa,压缩模量为131.9 GPa,冲击后压缩强度达到317.1 MPa,这主要是由于热压罐后固结工艺能够消除熔融浸渍法预浸料的缺陷,显著提升了复合材料的成型质量。

关键词:热塑性复合材料;自动铺放成型;预浸料;激光加热;成型工艺

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0130-08

Quality and performance of automated placement molded CF/PAEK prepregs with different impregnation processes

GU Xinghe^{1,2}, LAI Xiaoliang^{1,2}, JI Yuyang^{1,2}, LIN Qiushi^{1,2}, LI Bojian^{1,2}, TAO Qunyan^{1,2}, XIE Fuyuan^{1,2}

(1. Zhejiang provincial Innovation Center of Aircraft Composite Technology, Hangzhou 311222, China;

2. Zhejiang Huarui Aerospace Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 311222, China)

Abstract: To investigate the process adaptability of the domestical thermoplastic prepregs for automated placement, in this study, utilizing carbon fiber-reinforced polyaryl ether ketone (CF/PAEK) prepregs manufactured by melt impregnation and solution impregnation methods. Aiding the domestical laser-heated automated fiber placement equipment, composites were fabricated using three distinct process methods: in-situ consolidation, in-situ hot pressing, and post-autoclave consolidation. The consolidation quality and performance of the composites were systematically evaluated through non-destructive testing, metallographic characterization, and compression property measurements. The results indicate that the prepreg produced via solution impregnation exhibits superior impregnation quality. Composites fabricated from solution-impregnated prepregs demonstrated better 0° compression performance under both in-situ consolidation and in-situ hot pressing processes, achieving compressive strengths of 705.6 MPa and 686.1 MPa, and compressive moduli of 129.9 GPa and 145.1 GPa, respectively. Conversely, after post-autoclave consolidation, composites made from melt-impregnated prepregs showed significantly enhanced mechanical properties, with a 0° compressive strength of 960.4 MPa, a compressive modulus of 131.9 GPa, and a compression-after-impact strength of 317.1 MPa, outperforming the solution-impregnated counterparts. This is primarily attributed to the effective elimination of inherent defects in the melt-impregnated

通信作者: 顾星河, 博士, 工程师, 研究方向为高性能热塑性复合材料制备技术

收稿日期: 2025-12-17

引用格式: 顾星河, 来晓靓, 纪毓杨, 等. 不同浸渍工艺CF/PAEK预浸料的自动铺放成型质量及性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 130-137.

GU Xinghe, LAI Xiaoliang, JI Yuyang, et al. Quality and performance of automated placement molded CF/PAEK prepregs with different impregnation processes[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 130-137.

prepregs by the post-autoclave consolidation process, which substantially improved the overall consolidation quality of the composites.

Keywords: thermoplastic composites ; automated layup molding ; prepreg ; laser heating ; forming process

碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)具有高断裂韧性和抗冲击性、可修复性和高疲劳寿命等优点^[1-2],已成为各个国家高端复合材料领域研究和发展的重点,被广泛应用于航空、航天等领域^[3],并且已经从非承力结构向主承力结构过渡。CFRTP具有灵活的加工工艺性^[4],其中自动铺放成型技术是一种以连续纤维增强热塑性预浸料为原材料,采用自动铺丝设备实现的增材制造技术^[5],该技术是将多根预浸带通过输送系统输送到铺丝头,经热源加热后由铺丝头按照规划的路径进行铺放并用压辊进行压实^[6],成型过程中涉及原材料凝聚态结构的变化与温度场、压力场等多参数耦合^[7],其成型质量受到原材料质量、成型工艺控制和成型装备精度等条件共同影响。

国外针对CFRTP自动铺放成型技术已经进行了多年的研究,原材料方面形成了以日本Toray公司、美国Cytec公司为代表的热塑性预浸料供应商^[8],装备方面形成了以法国Coriolis公司、西班牙M. Torres公司、美国Automated Dynamics公司为代表的自动铺丝设备供应商^[9],应用方面制备出了热塑性复合材料典型结构件,如荷兰Fokker公司的栅格型机身加筋壁板、法国Stelia宇航公司的飞机尾椎及美国Automated Dynamics公司的直升机机身筒段^[10-11],德国航空航天中心的结构与设计中心轻量化生产技术研究使用自动铺丝原位固结技术制造了多功能演示机身的上机身蒙皮^[12]。相对于国外的成熟应用,我国在热塑性复合材料自动铺放成型技术领域的研究起步较晚,对材料、工艺和装备等方面关键科学和技术问题的研究仍处于起步阶段。宋清华等^[13]设计和搭建了龙门式热塑性复合材料自动铺放设备,提出了预浸丝的张力控制和温度控制方案,并开展工艺试验,验证了铺放设备的可行性;杨洋等^[14]针对连续纤维增强的聚苯硫醚预浸料的结晶行为、基本工艺性能等进行了测试和研究,并系统开展了基于该预浸料的自动铺丝工艺研究,建立了可靠的工艺方法;Zhang等^[15]采用响应面法分析铺放过程中的工艺参数对碳纤维(CF)增强聚醚醚酮复合材料楔形剥离强度的影响,并优化得到了最佳工艺参数;辛志博等^[16]提出一种铺放

后真空辅助原位退火工艺,通过调控原位退火温度和保温时间制备复合材料单向层合板,分别研究退火工艺参数对成型温度场、翘曲变形、孔隙率、结晶度和层间性能的影响。前期研究显示自动铺放成型技术尚不能完全实现原位固结^[17],自动铺放成型后的复合材料仍需进行后处理以达到可用的力学性能。

目前国内对自动铺放成型技术的研究工作主要集中于对自动铺放成型设备及复合材料铺放工艺的优化,而针对不同浸渍方法制备的预浸料的自动铺放成型质量研究较少。本文以熔融浸渍法和溶液浸渍法制备的国产CF增强聚芳醚酮(PAEK)预浸料为原材料,借助国产激光加热自动铺丝设备,分别采用原位固结、原位热压、热压罐后固结三种不同的工艺方法制备复合材料,并通过无损检测、金相表征、0°压缩性能、冲击后压缩性能等方法评价复合材料的成型质量及性能,为CFRTP自动铺放成型工艺选材和工艺优化提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CF/PAEK预浸料为国产市售预浸料,其增强纤维为国产T800级CF,树脂基体为国内自主研发的低熔点PEAK,预浸料分别采用熔融浸渍法和溶液浸渍法制备,记为CF/PAEK-M(熔融浸渍法)和CF/PAEK-S(溶液浸渍法),预浸料的参数见表1,两种预浸料具有相似的纤维面密度和纤维体积含量。

表1 CF/PAEK预浸料的规格参数

Tab. 1 Specification parameters of CF/PAEK prepregs

Prepregs	t/mm	W/mm	$\rho_F/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	$\varphi_F/\%$
CF/PAEK-M	0.19 ± 0.02	6.4 ± 0.4	144 ± 3	55 ± 2
CF/PAEK-S	0.17 ± 0.02	6.4 ± 0.3	146 ± 3	57 ± 2

Notes: t is thickness; W is width; ρ_F is fiber mass per unit area; φ_F is fiber volume fraction.

图1为两种预浸料的差示扫描量热(DSC)曲线,如图所示,CF/PAEK-M的熔融峰值温度约为307℃,CF/PAEK-S的熔融峰值温度约为310℃,两种预浸料具有相似的热学性能;图2为两种方法制备的CF/PAEK预浸料的截面形貌,如图所示,CF/PAEK-M预浸料表面树脂基体含量稍高且粗糙度较大,纤维束内堆积紧密,但束间存在较为明显的界

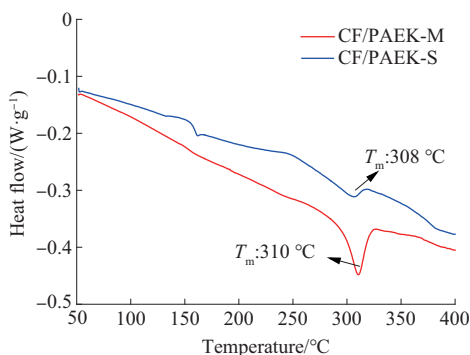


图1 CF/PAEK 预浸料的DCS曲线

Fig. 1 DSC curves of CF/PAEK prepreps

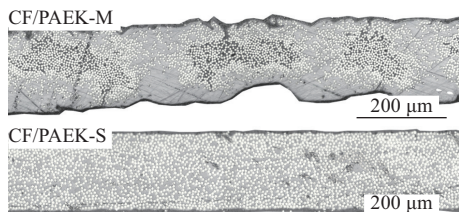


图2 CF/PAEK 预浸料的截面形貌

Fig. 2 Cross section morphology of CF/PAEK prepreps

限,束内不完全浸渍,CF/PAEK-S 预浸料厚度均匀,表面较为光滑,内部纤维分散均匀,浸渍质量较好,但纤维堆积紧密程度较低。

1.2 主要仪器及设备

机器人式激光加热自动铺丝机:6轴机器人、8丝束1/4英寸热塑性铺丝头,激光功率6 kW,西安华晟复合材料科技有限公司;

高温高压热压罐:R042,陕西神鹰装备科技有限公司;

万能材料试验机:Instron 5982,美国英斯特朗公司;

落锤冲击试验机:Instron CEAST 9350,美国英斯特朗公司;

万能材料试验机:MTS E45.605,600 kN,美特斯工业系统(中国)有限公司;

超声波扫描显微镜:PVA TePla AM300,普发拓普真空设备(北京)有限公司;

水切刀:OMAX Proto Max,南京傲马水射流有限公司;

磨抛机:ZMP-2000,上海中研仪器制造有限公司;

金相显微镜:Olympus BX53M/BXFM,日本奥林巴斯株式会社。

1.3 层合板制备

复合材料成型方法包括原位固结、原位热压、

热压罐后固结,分别记为MA、MB、MC。其中,MA工艺是借助激光加热铺丝设备进行自动铺放成型,铺放速度为100 mm/s,铺放温度为380 °C,铺放压力500 N,预浸料张紧力6 N,热床温度150 °C,脱模温度50 °C;MB工艺是针对每一层预浸料先采用自动铺丝设备进行铺放,然后再采用相同的工艺参数进行激光加热和辊压,该方法能够有效降低每层预浸料的铺放粗糙度^[18];MC工艺是将铺放完成的复合材料放入热压罐进行后固结,复合材料固结工艺曲线如图3所示。分别采用不同的工艺制备铺层为 $[0^\circ]_{14}$ 的单向复合材料和铺层为 $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{4S}$ 的准各向同性复合材料,用于评价预浸料浸渍质量和工艺方法对复合材料性能的影响。

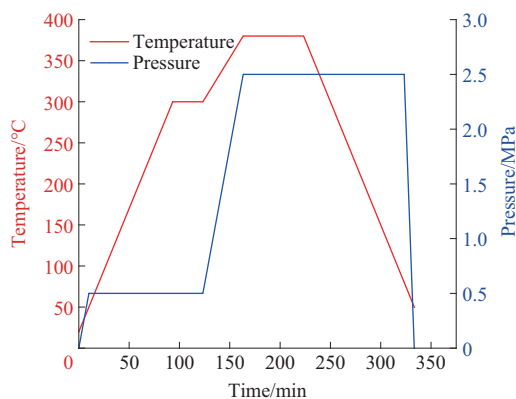


图3 复合材料热压罐固结工艺曲线

Fig. 3 Autoclave curing process curve of composite materials

1.4 测试与表征

复合材料的成型质量采用无损检测和金相显微形貌进行评价。无损检测借助超声波扫描显微镜进行表征,主要评价复合材料层合板的内部质量,图中超声信号越强越偏向蓝色,反之则越偏向红色。金相显微形貌分析时先采用水切刀切割复合材料的试样,然后将试样固化在环氧树脂中,再用磨抛机进行打磨、抛光,最后在金相显微镜下观察。

复合材料自动铺放成型过程中层间易产生制造缺陷,将影响复合材料压缩性能和抗冲击性能等^[19],因此需要表征其相关力学性能。复合材料的0°压缩性能采用万能材料试验机进行表征,测试方法参照ASTM D 6641/D66641M-16。复合材料的低速冲击试验采用落锤冲击试验机完成,试验方法参考ASTM D7136/D7136M-20,冲击能量统一为30 J,冲击完成后采集复合材料表面凹坑深度、凹坑直径等数据。复合材料的冲击后压缩性能采用600 kN

材料试验机配合冲击后压缩夹具完成,测试方法参考ASTM D 7137/D7137M-23。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的成型质量

图4为不同成型方法制备的单向复合材料超声C扫无损检测结果,准各向同性复合材料无损检测结果与图4呈现的趋势基本相同。如图4所示,MA与MB工艺制备的单向复合材料内部透射信号较弱,代表其内部质量较差,其中CF/PAEK-S复合材料的透射信号强度相对于CF/PAEK-M复合材料稍高,整体呈现强弱交替分布的特征;MC工艺制备的单向复合材料信号明显增强,复合材料的成型质量得到明显提高。在MA与MB工艺条件下两种复合材料无损检测超声信号略有差异,结合图2分析造成这种差异的原因是CF/PAEK-S预浸料相对于CF/PAEK-M预浸料表面光滑,内部浸渍质量较好,预浸料层间接触更加紧密,层间孔隙缺陷相对较少,使得CF/PAEK-S复合材料的内部透射信号强度较高,而为了避免预浸料拼缝处于相同位置采用的拼缝偏移策略使得透射超声信号呈现强弱交替分布的特征,但两种工艺均无法消除复合材料的成型缺陷^[20],使得复合材料内部质量较差;MC工艺条件下,二者的超声信号强度几乎无明显差异,是因为热压罐成型过程中提供了持续的高温和压力环境,能够使复合材料中的树脂基体在高温下变成低黏度的熔融态,并在压力的作用进行微小范围内的流动,充分浸渍纤维并消除原位固结工艺产生的孔隙缺陷,明显提升复合材料的成型质量^[21]。

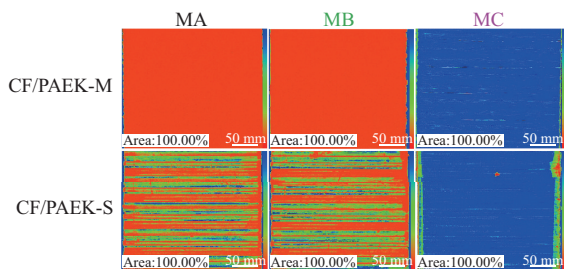


图4 单向复合材料无损检测成型质量

Fig. 4 Forming quality of unidirectional composite materials tested by ultrasonic scanning

图5为CF/PAEK-M复合材料的金相显微形貌,如图所示,MA、MB工艺制备的CF/PAEK-M复合材料的内部缺陷较多,缺陷集中于预浸料内部,预浸料层间的缺陷较少,其中MA工艺制备的复合材料层间树脂含量低,纤维排列较为均匀,而采用MB工

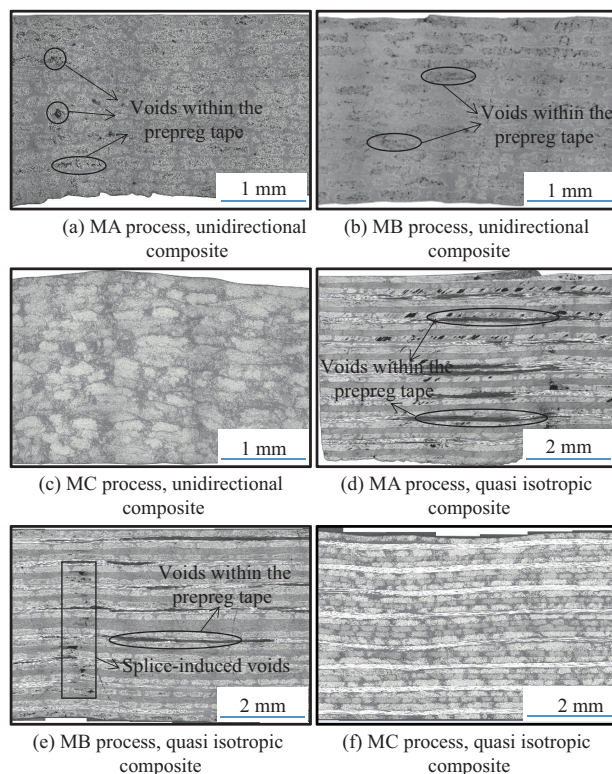


图5 CF/PAEK-M复合材料金相形貌

Fig. 5 The metallographic morphology of CF/PAEK-M composites

艺后,预浸料层间出现富树脂,纤维排列稀疏,造成这种现象的原因可能是预浸料经过二次热压的过程中出现膨化行为^[22],树脂基体受热快速熔融,其黏度降低,流动性增加,分子链段运动能力变强,树脂在表面张力的作用下发生收缩团聚,因此呈现树脂层增厚,纤维排列稀疏的特征。MC工艺条件下复合材料的内部质量较好,孔隙率较低,这是因为在热压罐中持续的温度及压力使得树脂充分流动,重新浸润碳纤维并消除预浸料在制备过程中存在缺陷^[23]。其中图5c为单向复合材料,其厚度出现波动且内部纤维分散,无法分辨层与层之间的界限,图5f为准各向同性复合材料,其内部孔隙缺陷较少,层与层分布均匀且界限分明,但是层间界面出现波动,这是因为预浸料树脂发生流动,填补层内孔隙缺陷和束间拼缝,进而导致纤维散乱和层间界面波动。

图6为CF/PAEK-S复合材料的金相显微形貌,如图所示,MA、MB工艺方法制备的CF/PAEK-S复合材料内部缺陷较少,缺陷主要集中于层间和束间,其中采用MB工艺制备的复合材料纤维排列更加均匀,但复合材料层间和束间的缺陷未见到明显降低,造成这种现象的原因可能是预浸料表面树脂含量较

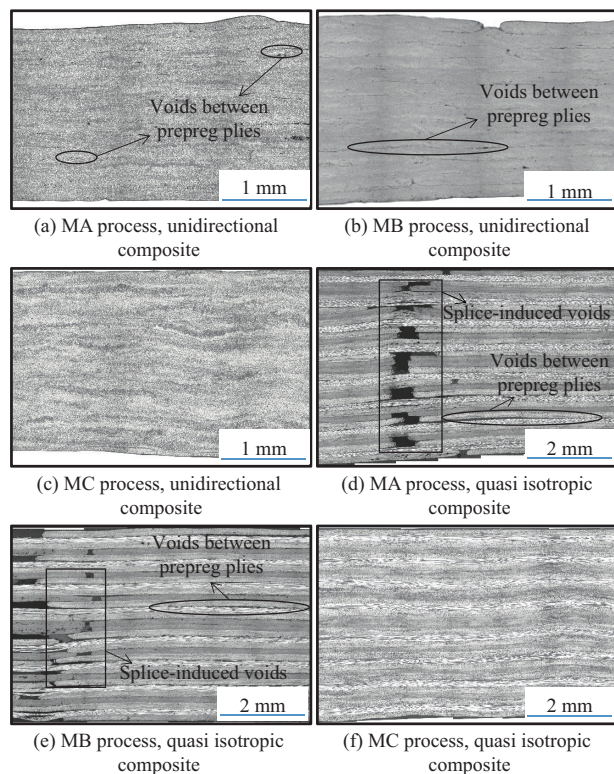


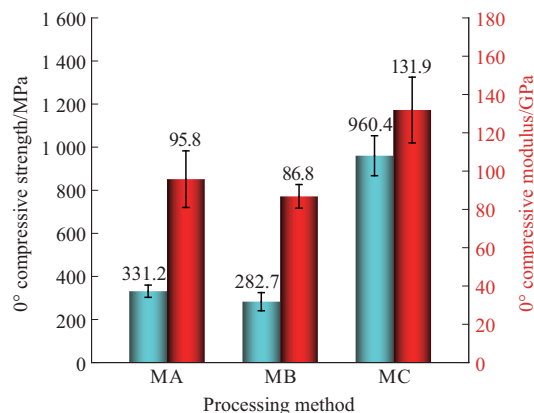
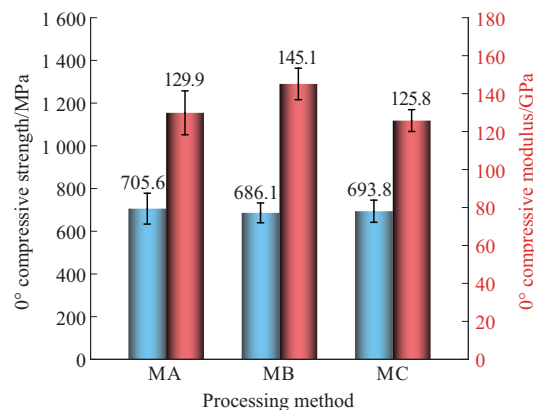
图6 CF/PAEK-S复合材料金相形貌

Fig. 6 Metallographic morphology of CF/PAEK-S composites

低,树脂基体受热后无法形成较大尺度的流动并填充层间孔隙。图6c和图6f显示,MC工艺制备的CF/PAEK-S复合材料各层完全融合形成整体,但纤维分布散乱和层间界面波动,这是由于CF/PAEK-S预浸料的浸渍质量较高,预浸料表面树脂含量较低,其在成型过程中融为一体,而预浸料内部纤维没有紧密排列,单根纤维之间存在树脂层,树脂基体在热压罐成型过程中发生流动,填补预浸带间隙,纤维则随着树脂基体发生流动而变得分布散乱。

2.2 复合材料的力学性能

图7为复合材料的 0° 压缩性能测试结果。三种工艺制备的CF/PAEK-M复合材料的压缩强度分别为331.2、282.7、960.4 MPa,压缩模量为95.8、86.8、131.9 GPa,MA、MB工艺制备CF/PAEK-M复合材料的压缩强度分别为MC工艺条件下的34.5%和29.4%,压缩模量分别为MC工艺条件下的72.6%和65.8%,采用MB工艺后,复合材料的 0° 性能略有降低,这可能与原位热压工艺使预浸料表面粗糙度降低有关,预浸料表面受热后快速辊压使得表面粗糙度降低,当下一层预浸料铺贴时,树脂流动能力减弱,无法通过层间树脂流动排除层间孔隙夹杂^[24];MC工艺制备复合材料的 0° 压缩性能大幅度提高,

(a) 0° compression performance of CF/PAEK-M(b) 0° compression performance of CF/PAEK-S图7 复合材料的 0° 压缩性能Fig. 7 0° compression performance of composite materials

热压罐的高温环境使得复合材料重新处于熔融状态,树脂基体在持续的压力作用下发生流动,弥补了复合材料中的孔隙缺陷,使其压缩性能提高。三种工艺制备的CF/PAEK-S复合材料的压缩强度分别为705.6、686.1、693.8 MPa, 0° 压缩模量为129.9、145.1、125.8 GPa,在三种条件下的压缩强度和模量较为接近,产生这种现象的原因是试验所用CF/PAEK-S预浸料纤维浸渍质量较好,不同的工艺条件下基本不改变束内纤维的浸渍质量,但是层间孔隙和纤维散乱导致整体压缩强度较低。

对比两种复合材料的压缩性能可知,在MA与MB两种工艺条件下,CF/PAEK-S复合材料压缩性能明显优于CF/PAEK-M复合材料性能,在MC工艺的条件下,CF/PAEK-S复合材料压缩性能相对于CF/PAEK-M复合材料提升不明显。这是因为CF/PAEK-S预浸料表面树脂含量稍低,复合材料的层间缺陷经热压罐成型后得到改善,但层间性能仍然较弱,另一方面,复合材料内部纤维出现了一定程度的屈曲,导致压缩性能下降。

复合材料的低速冲击损伤及冲击后压缩性能

见表2。CF/PAEK-M复合材料MC工艺下内部质量得到提高,测得复合材料的平均损伤面积约为 2.4 cm^2 ,冲击后压缩强度约为 317.1 MPa ;CF/PAEK-

S复合材料仅MC工艺条件下能够采集到冲击损伤数据,两种复合材料试样典型表面及内部损伤情况如图8所示。

表2 复合材料低速冲击损伤及冲击后压缩性能

Tab. 2 Low velocity impact damage and post impact compression performance of composite materials

Composites	M	E/J	H/mm	D/mm	S/cm ²	F/kN	R/MPa
CF/PAEK-M	MA	30	1.01 ± 0.04	9.7 ± 0.7	/	13.7 ± 0.8	25.5 ± 2.1
	MB		0.62 ± 0.07	7.0 ± 0.5	/	43.7 ± 1.6	88.3 ± 3.5
	MC		0.31 ± 0.04	7.1 ± 0.4	2.4 ± 0.8	141.7 ± 14.7	317.1 ± 32.6
CF/PAEK-S	MA	30	/	/	/	7.9 ± 1.1	16.2 ± 2.3
	MB		/	/	/	7.2 ± 1.9	14.9 ± 3.9
	MC		0.29 ± 0.01	5.0 ± 0.2	23.2 ± 8.0	89.9 ± 8.1	207.8 ± 18.1

Notes: M is molding method; E is low velocity impact energy; H is depth of impact dent; D is diameter of impact dent; S is area of impact damage; F is compressive load after impact; R is compressive strength after impact.

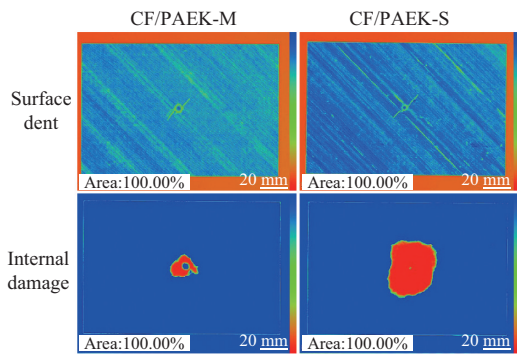
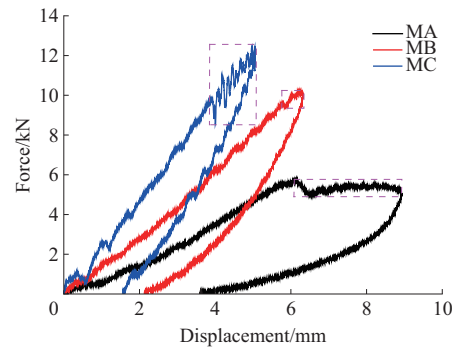


图8 MC工艺下复合材料典型冲击损伤情况

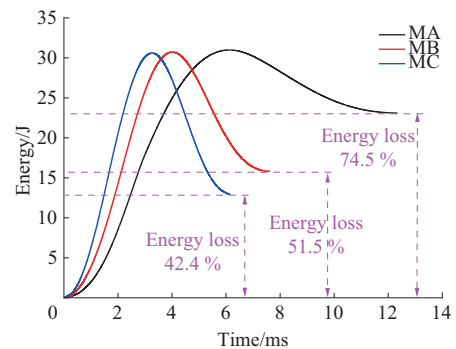
Fig. 8 Typical impact damage of composites under MC proces

图9为CF/PAEK-M复合材料的冲击曲线,如图所示,MA工艺制备的复合材料初始损伤载荷约为 5.7 kN ,受到冲击后载荷出现波动性下降,说明内部出现了损伤扩展,冲击锤头位移约为 9.0 mm ,冲击能量损耗约为 74.5% ;MB工艺制备的复合材料初始损伤载荷约为 10.2 kN ,载荷没有波动性,说明复合材料没有出现明显的损伤扩展,锤头接触后试样后直接弹起,冲击锤头位移约为 6.3 mm ,冲击能量损耗约为 51.5% ;MC工艺制备的复合材料初始损伤载荷约为 9.7 kN ,超过初始损伤载荷后,载荷出现相对明显的波动,整体呈现上升的状态,说明试样在冲击的过程中出现了明显的损伤,且损伤随着位移的增加出现了扩展^[25],当试样挠曲程度达到最大时,即复合材料的冲击载荷最大时,冲击锤头位移约为 5.3 mm ,锤头的动能逐渐衰减,并且直接弹起,冲击能量损耗约为 42.4% ,明显低于其他两种工艺方法制备的复合材料。

图10为CF/PAEK-S复合材料的冲击曲线,如图所示,MA工艺制备的复合材料初始损伤载荷约为 3.3 kN ,受到冲击后载荷出现较大幅度的下降和载



(a) Force-displacement curves of CF/PAEK-M



(b) Energy-time curves of CF/PAEK-M

图9 CF/PAEK-M复合材料的冲击曲线

Fig. 9 Impact curves of CF/PAEK-M composites

荷波动,冲击锤头位移约为 15.8 mm ,冲击能量损耗约为 96.8% ;MB复合材料的初始损伤载荷约为 2.6 kN ,载荷同样出现较大幅度的下降和波动,冲击锤头位移约为 17.8 mm ,冲击能量损耗约为 97.8% ;MC工艺复合材料的初始损伤载荷约为 4.6 kN ,超过初始损伤载荷后,载荷波动增加,说明试样内部出现损伤并且随着锤头位移的增加而发生损伤扩展,冲击锤头最大位移约为 5.6 mm ,冲击能量损耗约为 48.6% ,大幅低于其他两种工艺制备的复合材料。

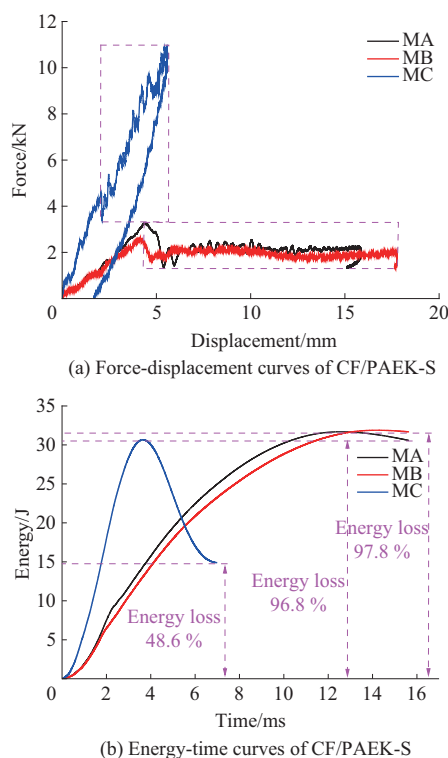


图10 CF/PAEK-S复合材料的冲击曲线

Fig. 10 Impact curve of CF/PAEK-S composite material

上述结果显示MB、MC工艺能够不同程度地提高自动铺放成型复合材料的抗冲击性能,其中MC工艺对复合材料抗冲击性能的提升较为明显。CF/PAEK-M复合材料的抗冲击性能优于CF/PAEK-S,这是CF/PAEK-M复合材料层间树脂含量同样较高,使其具有较高的层间韧性,能够通过塑形变形消耗冲击能量,抑制冲击损伤的扩产,使其具备较强的抗冲击性能^[26]。

3 结论

(1)溶液浸渍工艺制备的预浸料浸渍质量明显优于熔融浸渍工艺制备的预浸料,其原位固结工艺及原位热压工艺条件下具有较高的0°压缩性能。CF/PAEK-S复合材料在原位固结工艺条件下的0°压缩强度为705.6 MPa,压缩模量为129.9 GPa;在MB条件下的0°压缩强度为686.1 MPa,模量为145.1 GPa。

(2)热压罐后处理工艺相对于原位热压工艺,能够显著提复合材料的成型质量,并且使由熔体法预浸料制备的复合材料的力学性能得到明显提升。采用热压罐后处理的CF/PAEK-M复合材料的0°压缩强度为960.4 MPa,压缩模量为131.9 GPa,冲击后压缩强度达到317.1 MPa。

参考文献

- [1] XU X Y, PENG G Q, ZHANG B Y, et al. Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 209. DOI:10.1016/j.tws.2024.112899.
- [2] WANG H, HUO S Q, CHEVALI V, et al. Carbon fiber reinforced thermoplastics: From materials to manufacturing and applications [J]. Advanced Materials, 2025, 37(27). DOI: 10.1002/adma.202418709.
- [3] OZTURK F, COBANOGU M, ECE R E. Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2024, 37(9):3 084–3 116.
- [4] 晁聪聪, 臧致艺, 佟海滨, 等. 高性能热塑性树脂基复合材料发展: 材料、工艺及应用[J]. 航空材料学报, 2025, 45(3):1–18.
CHAO Congcong, ZANG Zhiyi, TONG Haibin, et al. Development of high-performance thermoplastic resin-based composites: Materials, processes and applications[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3):1–18.
- [5] 陈吉平, 李岩, 刘卫平, 等. 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放原位成型技术的航空发展现状[J]. 复合材料学报, 2019 (4):784–794.
CHEN Jiping, LI Yan, LIU Weiping, et al. Development of AFP in-situ consolidation technology on continuous fiber reinforced thermoplastic matrix composites in aviation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019(4):784–794.
- [6] 孙守政, 赵尧旭, 王扬, 等. 热塑性复合材料机器人铺放系统设计及工艺优化研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(23):209–219.
SUN Shouzheng, ZHAO Yaoyu, WANG Yang, et al. Design of robotic fiber placement machine and process optimization for thermoplastic composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(23):209–219.
- [7] 宋清华, 刘卫平, 肖军, 等. 热塑性复合材料自动铺放工艺参数分析与优化[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5):1 149–1 157.
SONG Qinghua, LIU Weiping, XIAO Jun, et al. Analysis and optimization of the processing parameters for automated fiber placement of thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(5):1 149–1 157.
- [8] 李学宽, 肇研, 王凯, 等. 热熔法制备连续纤维增强热塑性预浸料的浸渍模型和研究进展[J]. 航空制造技术, 2018, 61(14):74–78, 90.
LI Xuekuan, ZHAO Yan, WANG Kai, et al. Impregnation model and research progress of continuous fiber reinforced thermoplastic prepregs prepared via hot melting method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14):74–78, 90.
- [9] 宋清华, 肖军, 文立伟, 等. 热塑性复合材料自动纤维铺放装备技术[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6):1 214–1 222.
SONG Qinghua, XIAO Jun, WEN Liwei, et al. Automated fiber placement system technology for thermoplastic composites[J]. Acta

- Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6):1 214–1 222.
- [10] 胡记强,王兵,张涵其,等.热塑性复合材料构件的制备及其在航空航天领域的应用[J].宇航总体技术, 2020, 4(4):61–70.
HU Jiqiang, WANG Bing, ZHANG Hanqi, et al. Fabrication of thermoplastic composite components and their application in aerospace[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(4):61–70.
- [11] 肇研,刘寒松.连续纤维增强高性能热塑性树脂基复合材料的制备与应用[J].材料工程, 2020, 48(8):49–61.
ZHAO Yan, LIU Hansong. Preparation and application of continuous fiber reinforced high-performance thermoplastic composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8):49–61.
- [12] 王成博,查萌,张代军,等.连续碳纤维增强聚芳醚酮热塑性复合材料在航空领域的研究及应用进展[J/OL].复合材料学报, 2025:1–24[2026-01-23]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250905.002>.
WANG Chengbo, ZHA Meng, ZHANG Daijun, et al. Research and application progress of continuous carbon fiber reinforced polyaryletherketone thermoplastic composites in the aviation field[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025:1–24[2026-01-23]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250905.002>.
- [13] 宋清华.热塑性复合材料自动铺放过程温度场分析及构件性能研究[D].南京:南京航空航天大学, 2016.
SONG Qinghua. Research on temperature field during automated fiber placement and the mechanical properties of thermoplastic composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [14] 杨洋,徐捷,原崇新,等.连续纤维增强聚苯硫醚预浸料自动铺丝工艺与热塑性复合材料性能研究[J].纤维复合材料, 2020, 37(1):3–9.
YANG Yang, XU Jie, YUAN Chongxin, et al. Study on automatic fiber placement technology with continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide prepreg and characterization of the thermoplastic composites[J]. Fiber Composites, 2020, 37(1):3–9.
- [15] ZHANG C P, DUAN Y G, XIAO H, et al. The effects of processing parameters on the wedge peel strength of CF/PEEK laminates manufactured using a laser tape placement process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(11):7 251–7 262.
- [16] 辛志博,江梦茹,肖涵,等.基于自动铺丝技术的CF/PAEK热塑性复合材料原位退火工艺[J].航空材料学报, 2025, 45(3):43–51.
XIN Zhibo, JIANG Mengru, XIAO Han, et al. Vacuum-assisted in-situ annealing of CF/PAEK composites based on automated placement technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(3):43–51.
- [17] 王凯,刘寒松,肇研.连续纤维增强热塑性树脂基复合材料自动铺放技术研究进展[J].航空制造技术, 2021, 64(11):41–49.
WANG Kai, LIU Hansong, ZHAO Yan. Advance in automated fiber placement technology on continuous fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11):41–49.
- [18] CHANTELI A, BANDARU A K, PEETERS D, et al. Influence of repress treatment on carbon fibre-reinforced PEEK composites manufactured using laser-assisted automatic tape placement[J]. Composite Structures, 2020, 248. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112539.
- [19] YASSIN K, HOJJATI M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018, 31(12):1 676–1 725.
- [20] WANG R Z, XU E T, WEN L W. The effect of resin interleaving on the wedge peel strength of CF/PEEK manufactured by laser-assisted in situ consolidation[J]. Coatings, 2024, 14(5). DOI: 10.3390/coatings14050635.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] MARTIN I, SAENZ DEL CASTILLO D, FERNANDEZ A, et al. Advanced thermoplastic composite manufacturing by in-situ consolidation: A review[J]. Journal of Composites Science, 2020, 4(4). DOI:10.3390/jcs4040149.
- [24] 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.
- [25] SHAH S Z H, KARUPPANAN S, MEGAT-YUSOFF P S M, et al. Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review[J]. Composite Structures, 2019, 217: 100–121.
- [26] KIM J W, LEE J S. Influence of interleaved films on the mechanical properties of carbon fiber fabric/polypropylene thermoplastic composites[J]. Materials, 2016, 9(5). DOI:10.3390/ma9050344.