

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.013

热压成型工艺对单向碳纤维/聚酰胺6预浸料性能的影响

吴竹平¹, 徐乐婷¹, 童方强², 曾虹玉¹, 韩妃¹, 李菲¹, 杜诚杰^{1,3,4,5}, 沈伟⁶, 陈立峰⁶, 占海华^{1,3,4,5}, 赵德方^{1,3,4,5}

(1. 绍兴大学纺织科学与工程学院, 浙江绍兴 312000; 2. 浙江宝旌炭材料有限公司, 浙江绍兴 312000;

3. 浙江省清洁染整重点实验室, 浙江绍兴 312000; 4. 国家碳纤维工程技术研究中心浙江分中心, 浙江绍兴 312000;

5. 纤维基复合材料国家工程研究中心绍兴分中心, 浙江绍兴 312000; 6. 绍兴宝旌复合材料有限公司, 浙江绍兴 312000)

摘要:针对碳纤维(CF)与树脂基体间润湿性差、界面黏附力弱,从而制约CF增强热塑性复合材料(CFRTP)整体性能充分发挥的问题,以热塑性聚酰胺6(PA6)为基体,采用热压工艺通过叠层覆膜法制备了单向CF/PA6预浸料。系统研究了热压温度、热压时间、热压压力三个工艺参数对预浸料微观形貌、界面结合状态及性能的调控作用。设计了正交试验方案,系统分析了温度、时间、压力在成型过程中的作用,明确了工艺参数对预浸料性能的影响规律。通过工艺优化,有效改善了CF与PA6界面黏附性,提升了预浸料的综合性能,并确定了最佳成型条件,在此条件下CF/PA6预浸料的力学性能和热稳定性实现了协同增强,成功制备出高性能预浸料。研究表明,热压温度对预浸料性能的影响最为显著,其次为热压时间,热压压力的影响最小;预浸料的最佳成型条件为264℃、5 min、3 MPa;热压工艺条件对预浸料的热性能影响不大,264℃条件下预浸料表现出较好的热稳定性。

关键词:碳纤维;聚酰胺6;预浸料;力学性能;热性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)07-0116-09

Effect of hot-pressing process on properties of prepreg of unidirectional carbon fiber and polyamide 6

WU Zhuping¹, XU Leting¹, TONG Fangqiang², ZENG Hongyu¹, HAN Fei¹, LI Fei¹, DU Chengjie^{1,3,4,5}, SHEN Wei⁶, CHEN Lifeng⁶,ZHAN Haihua^{1,3,4,5}, ZHAO Defang^{1,3,4,5}

(1. School of Textile Science and Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. Zhejiang Baojing Carbon Materials Co., Ltd.,

Shaoxing 312000, China; 3. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China;

4. Zhejiang Sub-center of National Carbon Fiber Engineering Technology Research Center, Shaoxing 312000, China;

5. Shaoxing Sub-center of National Engineering Research Center for Fiber-based Composites, Shaoxing 312000, China;

6. Shaoxing Baojing Composite Materials Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

Abstract: To address the issues of poor wettability and weak interfacial adhesion between carbon fiber (CF) and resin matrix in CF reinforced thermoplastic composites (CFRTP), which restrict the full realization of the material's overall performance, the prepregs of unidirectional CF/ polyamide 6 (PA6) were fabricated using a hot-pressing process combined with a film stacking method. The regulatory effects of three key process parameters, namely hot-pressing temperature, holding time and pressure on the micro-structure, interfacial bonding state and overall performance of the prepregs were systematically investigated. An orthogonal experimental design was employed to analyze the individual roles of temperature, time and pressure during the molding process, thereby elucidating the influence of these parameters on prepreg performance. Through process optimization, the interfacial adhesion between CF and PA6 was effectively improved, leading to enhanced comprehensive properties of the prepreg. The optimal molding conditions were subsequently determined, under which the mechanical properties and thermal stability of CF/PA6 prepreg were synergistically enhanced, enabling the fabrication of high-performance prepregs. The results show that hot pressing temperature has the greatest influence on properties of prepregs, followed by hot pressing time, while hot pressing pressure has the least effect. The optimal preparation process parameters for the prepreg are 264℃, 5 min and 3 MPa. The hot pressing conditions have little effect on the thermal properties of the prepreg and the prepreg exhibits good thermal stability at 264℃.

Keywords: carbon fiber; polyamide 6; prepreg; mechanical property; thermal property

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C01097), 国家级大学生创新创业训练计划项目(202410349041)

通信作者: 赵德方, 副教授, 主要从事高性能纤维及其复合材料的开发与应用研究

收稿日期: 2026-04-20

引用格式: 吴竹平, 徐乐婷, 童方强, 等. 热压成型工艺对单向碳纤维/聚酰胺6预浸料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 116-124.

WU Zhuping, XU Leting, TONG Fangqiang, et al. Effect of hot-pressing process on properties of prepreg of unidirectional carbon fiber and polyamide 6[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 116-124.

近年来,汽车产量与保有量不断攀升,由此带来了环境、能源、安全等方面的一系列问题。随着国家环保政策越发严格,积极推进汽车的节能减排是解决当前汽车工业所面临问题的有效途径。汽车轻量化是汽车工业上为减少机动车燃料消耗和温室气体排放而采取的一种有效方法。为了实现这一目标,碳纤维(CF)增强聚合物复合材料(CFRP)引起了人们的关注,正越来越广泛地用于机动车结构部件,例如汽车内饰、底盘、车身面板、保险杠等^[1]。

按树脂基体种类划分,CFRP可分为热固性和热塑性两大类^[2]。其中热塑性复合材料具有一系列突出优势,包括生产效率高、预浸料贮存期长、生产周期短、抗冲击性能优异、可回收再利用等优点^[3-4],较前者更适于工业应用^[5]。随着交通运输、航天航空、电子、医疗等行业的升级与环保标准的提升,推动了热塑性复合材料的应用需求^[6],复合材料在越来越广泛的领域得到应用^[7-9],其工业化得到迅速发展。作为一种代表性的工程塑料,聚酰胺6(PA6)兼具高性能与高性价比,是制备热塑性复合材料的理想基体选择。

在CF增强热塑性复合材料(CFRTP)的制备中,预浸料是常见的基础中间体之一,但预浸料成型加工过程中面临诸多技术难点:树脂与纤维间浸润性差,难以充分浸渍纤维^[10],会产生许多孔隙;CF的表面化学惰性使其与树脂基体的界面结合较弱,载荷难以从基体有效传递至CF,复合材料的优异力学性能难以发挥^[2,11]。为解决连续CF增强热塑性预浸料制备中纤维束难以充分浸渍、界面结合力弱等问题,研究者们就其成型技术开展了诸多尝试与探究。白艳博^[12]采用PA6与12K CF,通过螺杆挤出与熔融浸渍制备连续纤维预浸带,通过优化浸渍压力、温度及模具的结构参数,使预浸带的纤维体积分数和孔隙率可分别达到66.5%和1.33%,复合材料的拉伸强度及其模量分别达2 291 MPa和151 GPa。陈儒圣^[13]基于正交试验设计研究了浸渍温度、树脂挤出速度与牵引速度对CF/PEEK预浸带成型效果及性能的影响规律,确定了预浸带的最优制备工艺,得到了高性能CF/PEEK预浸带,孔隙率为3.56%,纤维质量分数52.60%,浸渍度为95.01%,拉伸强度达2 261 MPa。为提升预浸带性能,Wan等^[14]提出一种结合双粉末浸渍法与熔融均质化法的新

工艺制备预浸带,与传统粉末浸渍法相比,预浸带拉伸强度提高43.35%,孔隙率降低了56.30%。预浸带的增宽减薄处理显著提高了树脂分布的均匀性。Lu等^[15]提出一种基于柔性CF/PEEK平纹织物的混编-热压工艺,该研究通过纤维混编和编织结构设计,实现了纤维的均匀分布,突破了高黏度热塑性树脂对连续纤维浸润的瓶颈,为复杂构件的高效成型提供了新的思路。尽管上述学者们在工艺优化方面取得了积极进展,但国内在纤维-基体界面调控、浸渍均匀性、力学性能波动大、孔隙率高、批次稳定性及装备配套等方面仍存在短板,整体产业化成熟度不及国外,尚未达到高度成熟阶段。现有的连续CF增强热塑性预浸料的制备工艺主要集中在两点,一是CF的分散,直接决定了浸渍质量,典型的开纤工艺包括:振动开纤法、气流开纤法、机械开纤法、超声波开纤法等^[16-18],两种或多种工艺的协同作用实现展纤。另一方面在于浸渍环节,对片材的最终性能起主导作用,常见的浸渍工艺包括:溶液浸渍法、熔融浸渍法、粉末浸渍法、薄膜层叠法、悬浮热熔法^[19]、反应链增长浸渍法等^[20-21]及纤维混编法。从上述研究可知,熔融状态下树脂黏度大、纤维束难分散、浸渍不充分等问题^[19]长期存在,严重制约了国内连续CF增强热塑性预浸料的批量化生产进程,极大限制了其在新能源汽车等领域的应用潜能。鉴于新能源汽车领域对热塑性CF复合材料的迫切应用及高标准需求,加快推进连续CF增强热塑性预浸料的研发与商业化是重中之重。

针对PA6体系的预浸料系统工艺研究相对薄弱,且存在CF难以分散、浸渍困难等问题,本文以单向CF为增强纤维,PA6为热塑性树脂基体,通过热压成型、叠层覆膜法制备单向CF/PA6预浸料,优化预浸料的制备工艺,分析成型条件对预浸料结构与性能的影响,建立工艺参数与性能间的关系,筛选出预浸料加工参数之间的最优组合,实现连续CF/PA6预浸料的稳定化制备,并进一步探究连续CF/PA6复合材料制备工艺,以期产业化生产提供理论指导。

1 实验部分

1.1 主要原料

PA6: 拉伸强度 82 MPa, 拉伸弹性模量 230 GPa, 断裂伸长率 4%, 密度 1.1 g/cm³, 四川木辛复材科技有限公司;

CF: ZBJ4923, 拉伸强度 $\geq 4\ 900$ MPa, 拉伸弹性模量 230~260 GPa, 密度 1.8 g/cm^3 , 浙江宝旌碳材料有限公司。

1.2 仪器与设备

平板硫化机: XLB-350.350.2, 上海齐才液压机械有限公司;

万能材料试验机: Instron8801, 美国 Instron 电子仪器有限公司;

热重(TG)/差热综合分析仪: TG/DTA6300, 日本精工仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC1, 瑞士梅特勒托利多公司;

扫描电子显微镜(SEM): SU3800, 日本日立有限公司。

1.3 正交试验设计

基于单因子实验结果, 将热压温度(A)、热压时间(B)、热压压力(C)作为主要研究因素, 设计了三因素三水平的正交试验方案^[22], 正交试验设计中各因素与水平具体见表1。

1.4 预浸料的制备

以 PA6 薄膜和单向 CF 束为原料, PA6 膜厚 0.135 mm, 将膜裁剪为 $80\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 大小, 采用

表1 正交试验设计因素与水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experimental design

Levels	Factors		
	$A/^{\circ}\text{C}$	B/min	C/MPa
1	254	1	3
2	259	3	5
3	264	5	7

平板硫化机, 通过热压成型工艺制备单向 CF/PA6 预浸料。具体铺层采用叠层覆膜法, 将 2 层 PA6 膜与 CF 丝束按以下步骤叠层铺放: 首先在模具上均匀喷涂脱模剂, 将第一层 PA6 膜整齐铺放在模具上; 然后, 将 CF 丝束铺展于 PA6 膜表面, 保持相邻 CF 束间无空隙, 用夹头固定两端使其拉直; 最后在铺展好的 CF 丝束上覆盖第二层 PA6 膜, 盖上模具上板。将模具置于热压机中, 加热至设定温度使 PA6 树脂基体完全熔融, 在模具上方施加所需压力, 进行保压, 使树脂充分流动实现纤维与树脂间的良好浸渍。热压结束后, 将模具迅速转移至冷压板进行冷却定型。冷压板温度设定为室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 采用循环水冷却。冷压过程中的保压压力为 3 MPa , 冷压时间为 3 min , 所有样品的冷却定型条件均保持完全一致。制得单向 CF/PA6 预浸料试样, 将 CF/PA6 预浸料裁剪成 $20\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的试样, 即完成样品的制备, 单向 CF/PA6 预浸料的制备工艺流程见图1。

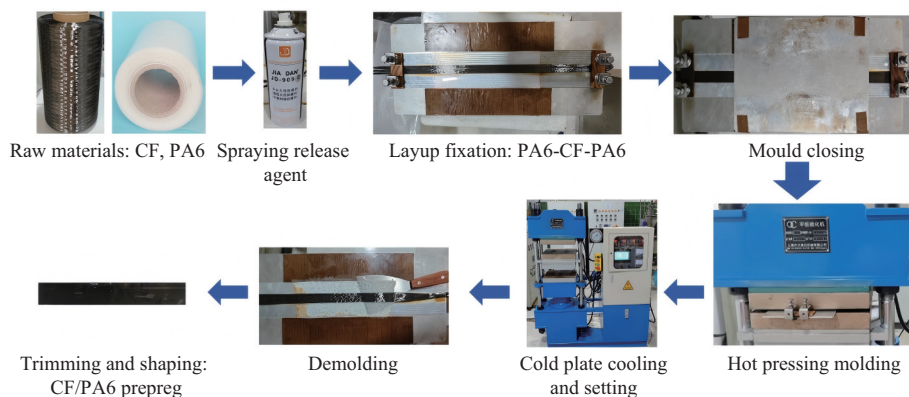


图1 单向CF/PA6预浸料制备流程

Fig. 1 Preparation process of unidirectional CF/PA6 prepreg

1.5 测试与表征

1.5.1 拉伸性能测试

采用万能材料试验机对不同热压条件下制备的 CF/PA6 预浸料进行拉伸性能测试, 试样尺寸为 $200\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$, 标距为 100 mm , 选取拉伸速度为 1 mm/min , 将试样置于夹头中间位置保持垂直状态, 连续拉伸至断裂, 实时记录载荷-位移曲线, 为确保数据的准确性, 每组实验重复进行 7 次, 结果

取平均值。

1.5.2 SEM 表征

采用 SEM 观察拉伸断裂后 CF/PA6 预浸料的断面微观形貌, 对于拉伸断裂后的 CF/PA6 预浸料样品, 在断面处进行切片制样。先将样品附着于导电胶表面固定在样品台上, 经喷金处理后, 通过 SEM 观察 CF 与 PA6 树脂的界面结合状态。

1.5.3 DSC 测试

采用DSC仪,按照GB/T 19466.3-2025进行测试。称量10 mg的样品,精确称重后放入铝制坩埚并压紧密封,完成试样的制备。将样品放入炉体,在氮气保护下进行,起始温度为25 °C,以10 °C/min的升温速率升至280 °C,该温度下保温5 min,以消除样品热应力史。随后,以10 °C/min的降温速率降至20 °C,再以相同升温速率重新加热至280 °C,最后以10 °C/min的降温速率冷却至室温,实时记录二次升温与降温过程的热流动曲线。

1.5.4 TG 测试

采用TG仪,按照GB/T 33047.1-2016标准进行测试。取5~10 mg样品放入氧化铝坩埚,通入氮气保护后启动测试,以10 °C/min的升温速率由25 °C升至700 °C,全程采集升温过程中样品质量的变化曲线。

2 结果与分析

2.1 力学性能分析

2.1.1 正交试验结果分析

选择热压温度254、259、264 °C,热压时间1、3、5 min,热压压力3、5、7 MPa为主要因素进行正交试验,为减少实验误差,确保实验结果的准确性和可靠性,以下9组工艺条件下各制备7个预浸料样品,共计63个样品。表2列出了正交试验的测试结果,表中 K_{ij} 定义为:第 j 个因素处于第 i 个水平时,对应试样拉伸强度指标的均值; R 为各因素水平间的极差。

表2 正交试验结果

Tab. 2 Result of orthogonal experiments

Test number	A/°C	B/min	C/MPa	Tensile strength/MPa
1 [#]	254	1	3	561.52
2 [#]	254	3	5	502.05
3 [#]	254	5	7	597.63
4 [#]	259	1	5	564.63
5 [#]	259	3	7	559.09
6 [#]	259	5	3	575.07
7 [#]	264	1	7	587.18
8 [#]	264	3	3	623.49
9 [#]	264	5	5	614.84

极差越大,因素对指标影响越显著。从表3得到,三个因素对CF/PA6预浸料拉伸强度的影响主次排序为:温度(A)>时间(B)>压力(C),温度是影响拉伸强度的首要因素,其次为时间,压力的影响程度最小。 K_{3A} 为最高值,最优水平为 A_3 ,确定最佳热压温度为264 °C。对于时间因素(B), K_{3B} 为最高值,最

优水平为 B_3 ,确定最佳热压时间为5 min。对于成型压力(C),是三个因素中影响最小的, K_{1C} 为最高值,最优水平为 C_1 ,确定最佳热压压力为3 MPa。

根据极差结果分析,确定不同因素的最佳水平组合为 $A_3B_3C_1$,即成型温度为264 °C、热压时间为5 min、热压压力为3 MPa。该组合虽未在正交试验中直接出现,但为统计分析推导的理论最优方案,后续将通过验证试验对该工艺参数下的拉伸强度进行重复测试,以验证其稳定性与可靠性,为CF/PA6的规模化制备提供工艺依据。

表3 极差分析结果

Tab. 3 Range analysis results

Item	A	B	C
K_{1j}	553.73	571.11	586.69
K_{2j}	566.26	561.54	560.51
K_{3j}	608.50	595.85	581.30
Range	54.77	34.30	26.19
The order of factors in importance		$A>B>C$	
Optimal level	A_3	B_3	C_1
Optimal process combination	$A_3B_3C_1$, 264 °C, 5 min, 3 MPa		

2.1.2 CF/PA6 预浸料拉伸强度分析

采用万能材料试验机对单向CF/PA6预浸料样品进行拉伸性能测试,不同工艺条件下的拉伸强度如图2、图3所示。由图2、图3可得到,264 °C、3 min、3 MPa和264 °C、5 min、5 MPa成型条件下样品的拉伸强度最高,分别为623.49 MPa、614.84 MPa。预浸料的拉伸强度均在400~700 MPa,热压温度在254 °C条件下的拉伸强度离散性大,平均强度偏低;低温条件下PA6树脂基体熔融不充分、熔体黏度较高,无法充分浸润CF表面,预浸料内部形成孔隙、弱结合等缺陷,载荷传递效率大幅降低,导致力学性能下降与稳定性不足^[23]。热压温度在259 °C条件下的拉伸强度稳定在500~620 MPa,离散性显著降

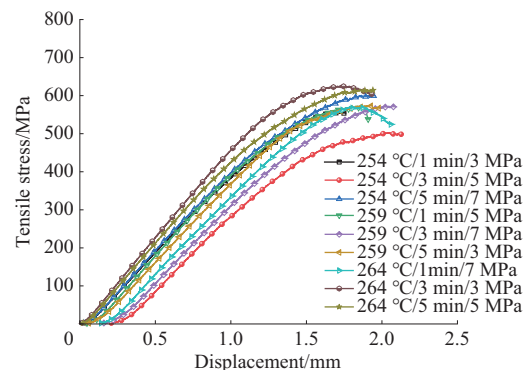


图2 不同热压条件下预浸料的拉伸应力-位移曲线

Fig. 2 Tensile stress-displacement curves of prepreps under different hot pressing conditions

低,树脂基体熔融状态与浸润性得到明显改善,界面结合强度提高,工艺稳定性增强。热压温度在264 °C条件下的拉伸强度整体较高,平均拉伸强度在510~700 MPa,是最佳成型温度,温度较高时树脂基体充分熔融流动,较好的流动性使PA6与CF实现良好浸渍,界面性能较好,能充分发挥CF的高强度优势,同时未出现树脂基体热降解导致的力学性能下降^[24-25],CF/PA6预浸料的拉伸强度提高。

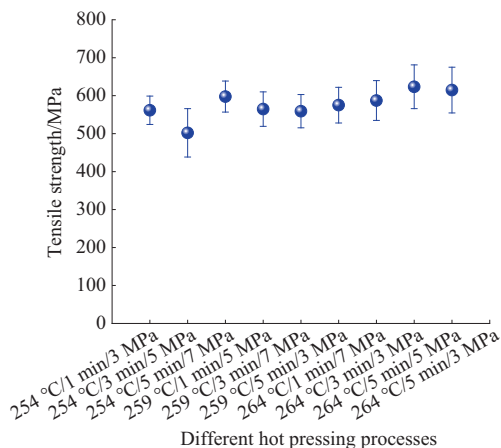


图3 不同热压条件下预浸料的拉伸强度

Fig. 3 Tensile strength of preregs under different hot pressing conditions

2.1.3 正交试验结果验证

对正交试验分析中所得最佳成型工艺进行验证,成型温度为264 °C、热压时间为5 min、热压压力为3 MPa,在该条件下制备CF/PA6预浸料样品并进行拉伸性能测试,与正交试验结果进行对比分析,如图4、图5所示。

对十组实验结果进行对比得出,264 °C、5 min、3 MPa的参数组合在力学性能上有明显优势。由图4可知,264 °C、5 min、3 MPa条件下曲线整体最高,峰值应力远超其他条件下的曲线,该工艺条件下基体熔融充分、熔体流动性好、界面结合强度高、内部缺陷最少,力学性能显著优于其他工艺组合。结合图5拉伸强度验证结果可知,264 °C、5 min、3 MPa条件下预浸料的拉伸强度为675.4 MPa,显著高于正交试验中其他工艺组合的强度水平,误差处于合理区间,数据稳定性良好,充分验证了正交试验优化工艺的可靠性。从图中分析,温度仍是影响拉伸性能的主要因素,拉伸强度整体随热压温度的上升而提高。264 °C、5 min、3 MPa工艺在高温基础上,通过适宜的热压时间与压力,进一步促进了树脂流动浸润与孔隙排出,提高了界面结合质量,预浸料

的拉伸强度较高。

正交试验结果分析表明,工艺影响主次顺序为温度(A)>时间(B)>压力(C),264 °C、5 min、3 MPa为最佳工艺组合,本次验证试验的应力-位移曲线与拉伸强度结果均与正交试验结论一致,证明了正交试验结果的准确性,为单向CF/PA6预浸料热压成型工艺的优化与实施提供了可靠的理论支撑。

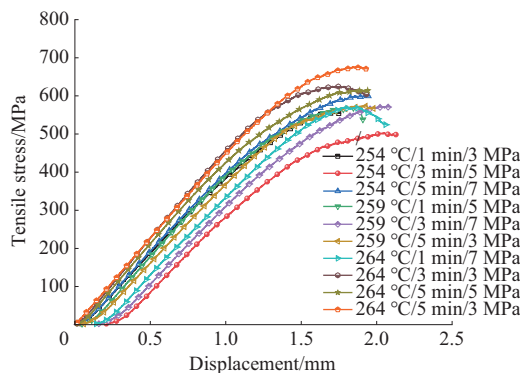


图4 不同热压条件下预浸料的拉伸应力-位移曲线

Fig. 4 Tensile stress-displacement curves of preregs under different hot pressing conditions

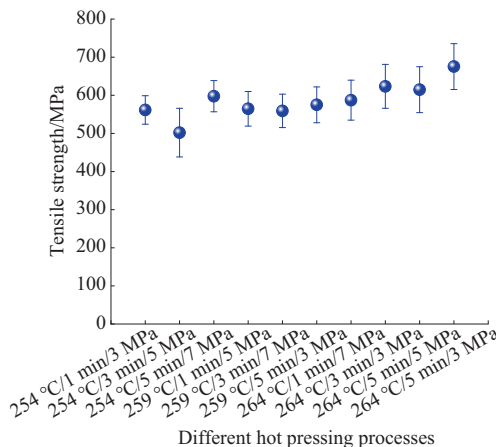


图5 264 °C、5 min、3 MPa条件下预浸料的拉伸强度验证

Fig. 5 Validation of tensile strength of preregs under conditions of 264 °C, 5 min, 3 MPa

2.2 微观形貌分析

通过SEM对CF/PA6预浸料进行微观形貌的观测与分析,结果如图6所示。

图6a显示,CF表面裸露严重、树脂流失,纤维间存在明显孔隙,浸渍效果较差,界面结合疏松,导致载荷无法从基体有效传递至CF,最终表现为界面失效模式。图6b与图6c显示,CF表面的树脂残留量逐渐增加,但CF与PA6仍存在明显的分离现象。在图6d至图6f中,CF表面均匀覆盖PA6树脂基体,纤维表面出现微裂纹,纤维间孔隙明显减少。由图

6g至图6i可得到,界面结合状态进一步改善,CF表面已完全被PA6基体包裹,其中图6h中基体浸润性较好,纤维与树脂间界面结合紧密,PA6熔融状态良好,有效实现了对CF的良好浸润,力学性能稳定良好。图6j中界面结合状态达到最优,CF与PA6基体紧密结合,浸渍效果良好,纤维表面基体残留完整,高温条件下PA6基体充分熔融流动,可高效填充CF间隙、排出内部孔隙,形成优异的界面结合,应力可在纤维与基体间高效转移,力学性能优异。

通过正交试验得出的最佳工艺参数(264 °C、5 min、3 MPa)制备的CF/PA6预浸料,纤维分散均匀、

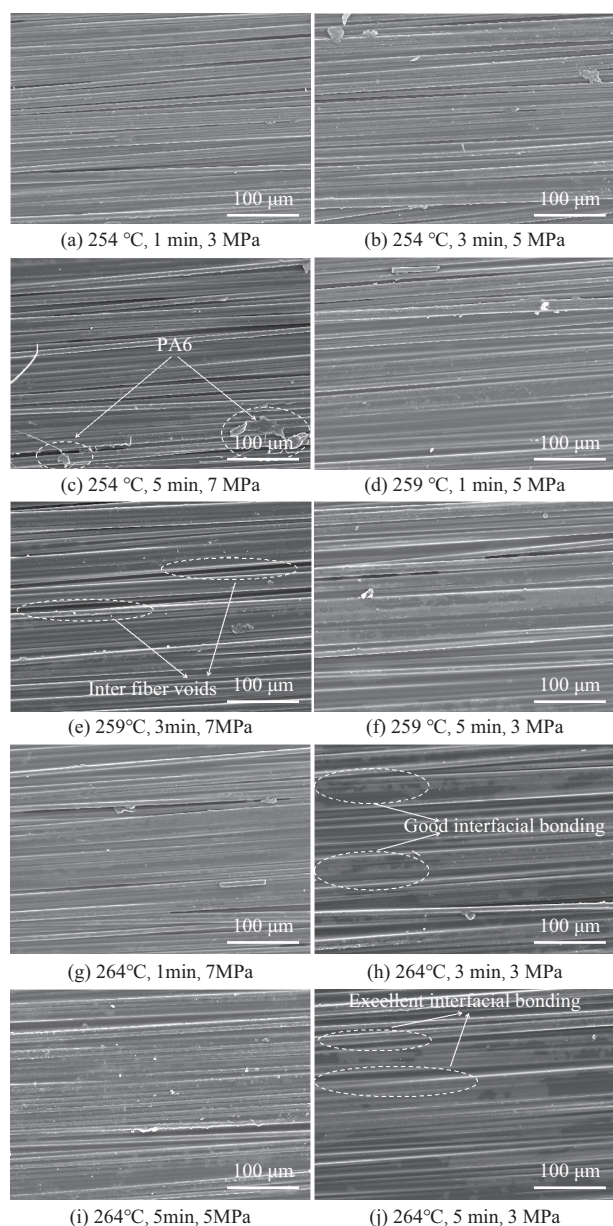


图6 不同热压条件下预浸料的微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of prepreps under different hot pressing conditions

界面结合紧密,综合浸渍效果最优。温度、时间与压力的协同作用使CF/PA6具有良好的微观形貌,这种多因素协同作用最终形成了CF/PA6预浸料的致密界面结构。

2.3 DSC 测试分析

为明确热压工艺参数对单向CF/PA6预浸料结晶行为的作用与影响进行了DSC测试。单向CF/PA6预浸料试样的第二次熔融升温 and 降温结晶曲线见图7、图8,从图中得到的热性能参数见表4。

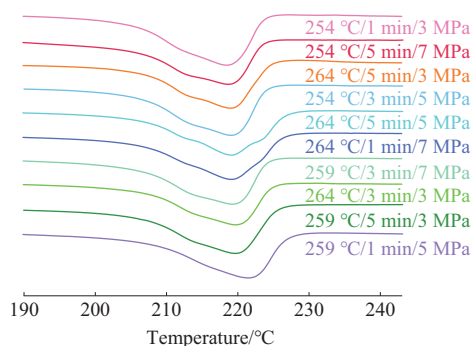


图7 不同热压条件下预浸料的第二次熔融升温曲线

Fig. 7 The second melting heating curves of prepreps under different hot pressing conditions

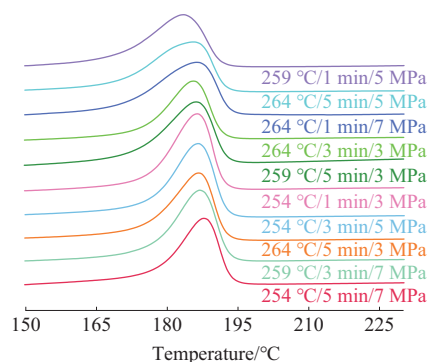


图8 不同热压条件下预浸料的第二次降温结晶曲线

Fig. 8 The second cooling crystallization curves of prepreps under different hot pressing conditions

分析表4得出,热压温度、压力和时间这三个关键工艺参数对预浸料的熔融温度(T_m)和结晶温度(T_c)影响较小。 T_m 均在219 °C左右,结晶峰集中在186 °C附近,无明显变化规律。不同热压条件下,PA6的 T_m 和 T_c 总体变化不大,没有明显上升或下降趋势。热压温度对结晶度(X_c)有一定影响,随着温度升高, X_c 略有降低^[26],高温下引发了PA6的轻微氧化热降解。

2.4 热稳定性分析

对不同热压条件下制得的CF/PA6预浸料开展TG分析测试,系统探究了不同热压工艺参数对CF/

表 4 不同热压条件下预浸料的热性能参数

Tab. 4 Thermal performance parameters of prepregs under different hot pressing conditions

Temperature/°C	Time/min	Press/MPa	T_m /°C	T_c /°C	ΔH_c /(J·g ⁻¹)	X_c /%
254	1	3	218.44	186.39	46.1	34.66
	3	5	219.07	186.45	46.95	35.30
	5	7	218.6	187.68	42.63	32.05
259	1	5	221.4	183.55	43.05	32.37
	3	7	219.14	186.76	42.44	31.91
	5	3	219.73	186.22	43.29	32.55
264	1	7	219.12	186.24	40.71	30.61
	3	3	219.68	185.56	33.8	25.41
	5	5	219.11	185.57	42.62	32.05
	5	3	218.97	186.68	42.79	32.17

Notes: T_m is melting point; T_c is crystallization temperature; ΔH_c is crystallization enthalpy; X_c is degree of crystallinity.

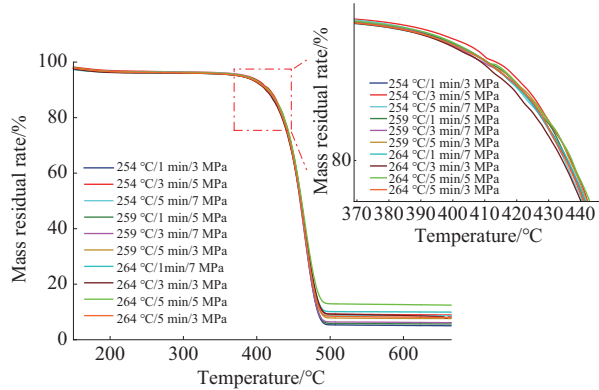
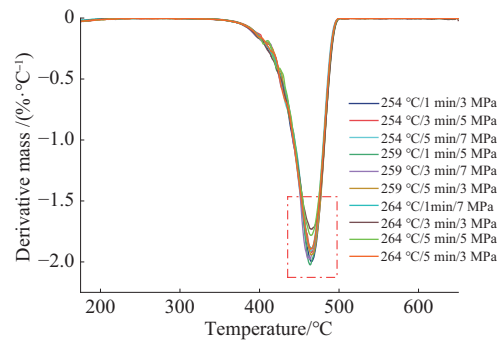


图 9 不同热压条件下预浸料的热分解曲线

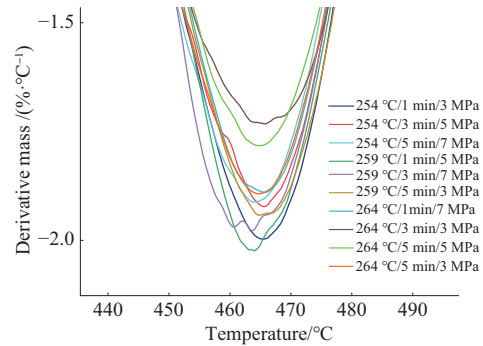
Fig. 9 Thermal decomposition curves of prepregs under different hot pressing conditions

PA6 预浸料热稳定性的影响,图 9、图 10 为不同热压条件下预浸料的热降解曲线,从图中得到的热降解参数见表 5。

由图 9、图 10 得到,不同热压条件下预浸料的热分解曲线和热分解速率曲线几乎重合,350~450 °C 预浸料的质量快速下降,质量损失速率也相差较小,400~500 °C 分解速率达到峰值,热压工艺的变化对预浸料热稳定性未产生明显影响。根据表 5,预浸料的热稳定性随热压温度、时间和压力的变化仅出现微小波动。不同热压条件下预浸料的初始分解温度($T_{5\%}$)均在 380 °C 左右,质量损失 10%、30% 时的温度($T_{10\%}$ 、 $T_{30\%}$)在 415、446 °C 附近,最大分解温度(T_{max})在 465 °C 左右。总体来看,热分解温度随温度的升高轻微上升,在 264 °C 的热压条件下,热稳定性较好,热分解温度随热压时间、压力的增加轻微升高,在适宜范围内增加热压时间或提高压力可提高分解温度,超出合理范围易导致树脂热降解,热稳



(a) DTG curves



(b) Enlarged view of DTG curves

图 10 不同热压条件下预浸料的热分解速率曲线

Fig. 10 Thermal decomposition rate curves of prepregs under different hot pressing conditions

表 5 不同热压条件下预浸料的热分解温度

Tab. 5 Thermal decomposition temperatures of prepregs under different hot pressing conditions

Temperature/°C	Time/min	Press/MPa	$T_{5\%}$ /°C	$T_{10\%}$ /°C	$T_{30\%}$ /°C	T_{max} /°C
254	1	3	379.46	414.28	446.08	465.27
	3	5	386.27	417.67	447.20	463.16
	5	7	382.96	414.24	445.79	462.25
259	1	5	380.01	415.57	446.71	463.28
	3	7	380.70	414.39	446.32	457.49
	5	3	378.05	415.18	447.47	463.82
264	1	7	376.28	414.17	447.06	465.06
	3	3	376.96	412.17	445.56	465.42
	5	5	381.92	416.16	447.57	465.16
	5	3	377.50	414.30	446.07	465.46

Notes: $T_{5\%}$ is temperature at which mass loss reaches 5%; $T_{10\%}$ is temperature at which mass loss reaches 10%; $T_{30\%}$ is temperature at which mass loss reaches 30%; T_{max} is temperature at the maximum thermal decomposition rate.

定性下降。

3 结论

(1)通过设计正交试验方案,探究热压成型工艺对 CF/PA6 预浸料成型质量的作用规律。研究了不同热压温度、压力和时间对 CF/PA6 预浸料拉伸性能与热性能的具体影响。

(2)热压工艺参数对 CF/PA6 预浸料性能影响如

下:热压温度、时间和压力均对预浸料力学性能产生显著影响。对于拉伸强度,热压温度是主要影响因素,其次为热压时间,热压压力的影响最小。拉伸强度总体随热压温度的升高而提高。

(3)热压成型工艺中,在热压温度为264 °C、时间为5 min、压力为3 MPa的条件下,CF/PA6预浸料的拉伸强度为675.4 MPa,具有最佳力学性能。

(4)热压条件对CF/PA6预浸料的热性能影响较小,264 °C条件下预浸料的热稳定性较好。

参考文献

- [1] 薛采智. 连续碳纤维增强PA6高性能复合材料的制备[J]. 科技创新导报, 2020, 17(7):106–108.
XUE Caizhi. Preparation of continuous carbon fiber reinforced PA6 high performance composites[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(7):106–108.
- [2] 王在跃, 姜宁, 王明道. 碳纤维表面改性对其增强热塑性复合材料性能影响的研究进展[J]. 复合材料学报, 2025, 42(1):147–161.
WANG Zaiyue, JIANG Ning, WANG Mingdao. Research progress on surface modification of carbon fiber and its effect on the properties of thermoplastic composites[J]. Acta Materialia Compositae Sinica, 2025, 42(1):147–161.
- [3] 刘孟珂, 颜春, 祝颖丹, 等. 纤维增强热塑性树脂基复合材料与金属热熔连接技术的研究进展[J]. 高分子通报, 2024, 37(11):1 535–1 549.
LIU Mengke, YAN Chun, ZHU Yingdan, et al. Research progress on hot-melt joining of fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites and metal[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2024, 37(11): 1 535–1 549.
- [4] 罗楚养, 尚梦茜, 朱龙宇, 等. 先进复合材料研究现状及其在机载武器上的应用展望[J]. 航空兵器, 2023, 30(2):1–20.
LUO Chuyang, SHANG Menghan, ZHU Longyu, et al. Research status of advanced composites and its application prospect in airborne weapons[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(2):1–20.
- [5] ALMUSHAIKEH A M, ALASWAD S O, ALSUHYBANI M S, et al. Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of carbon fiber: A review[J]. Polymer Testing, 2023, 122. DOI:10.1016/j.polymertesting.2023.108029.
- [6] 郑津烁, 何继敏, 张文武, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料嵌件注射成型研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(9):178–182.
ZHENG Jinshuo, HE Jimin, ZHANG Wenwu, et al. Research progress on insert injection molding of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9):178–182.
- [7] TIAN X Y, TODOROKI A, LIU T F, et al. 3D printing of continuous fiber reinforced polymer composites: Development, application, and prospective[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 2022, 1(1). DOI: 10.1016/j.cjmeam.2022.100016.
- [8] DANG J, SUN J Y, LIU Z. Interfacial strengthening and processing of carbon fibers reinforced poly(ether-ether-ketone) composites: A mini-review[J]. Polymer Composites, 2024, 45(8):6 788–6 803.
- [9] MENG Z J, LIU S N, HU K Q, et al. A review on the cutting of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Polymer Composites, 2024, 45(15):13 459–13 479.
- [10] WU Q, DENG H, LI Y T, et al. Synergistic interfacial effects of sizing agent containing gradient curing agent and pre-heating treated carbon fibers[J]. Composites Science and Technology, 2024, 247. DOI:10.1016/j.compscitech.2023.110415.
- [11] 王明道, 姜宁, 赵新涛, 等. 纤维增强热塑性树脂基复合材料固相复合成型工艺研究进展[J]. 材料科学与工艺, 2024, 32(4): 95–110.
WANG Mingdao, JIANG Ning, ZHAO Xintao, et al. Progress on solid phase blended molding technology of fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Materials Science and Technology, 2024, 32(4):95–110.
- [12] 白艳博. 连续纤维增强PA6预浸带制备及其耐久性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
BAI Yanbo. Study on the preparation and durability of continuous fiber reinforced PA6 prepreg tapes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [13] 陈儒圣. 连续碳纤维—聚醚醚酮预浸带熔融浸渍机理及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
CHEN Rusheng. Research on impregnation mechanisms and properties of continuous carbon fiber reinforced peek tapes[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [14] WAN T Y, MA H H, WANG Z J, et al. Optimization of powder impregnation process parameters of carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone prepreg tape by response surface methodology[J]. Fibers and Polymers, 2022, 23(6):1 672–1 683.
- [15] LU C R, XU N, ZHENG T, et al. The optimization of process parameters and characterization of high-performance CF/PEEK composites prepared by flexible CF/PEEK plain weave fabrics[J]. Polymers, 2019, 11(1). DOI:10.3390/polym11010053.
- [16] 华泽天, 薛平, 陈轲, 等. 连续纤维展纱工艺研究进展[J]. 塑料工业, 2023, 51(10):1–6.
HUA Zetian, XUE Ping, CHEN Ke, et al. Research progress of continuous fiber yarn spreading technology[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(10):1–6.
- [17] 高心玥, 蒋金华, 陈南梁. 大丝束碳纤维展纱技术研究进展[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(8):17–27.
GAO Xinyue, JIANG Jinhua, CHEN Nanliang. Research progress of large tow carbon fiber spreading technology[J]. Technical Textiles, 2024, 42(8):17–27.
- [18] 潘益鹏. 连续碳纤维展纱装置设计及预浸带制备工艺研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
PAN Yipeng. Design of continuous carbon fiber spreading device and preparation process of prepreg tape[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2025.
- [19] 霍红宇, 姚鑫, 高亮, 等. 高性能连续纤维增强热塑性预浸料及

- 复合材料制备工艺研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(3):44–53.
- HUO Hongyu, YAO Xin, GAO Liang, et al. Research progress in preparation technology of high performance continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg and its composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(3):44–53.
- [20] 曹建凡, 白树林, 秦文贞, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料的制备与性能研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3):1 229–1 247.
- CAO Jianfan, BAI Shulin, QIN Wenzhen, et al. Research progress on preparation and properties of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3):1 229–1 247.
- [21] 盛哲, 盛文思, 金美汐, 等. 连续纤维增强高性能热塑性预浸料制备工艺研究进展[J]. 棉纺织技术, 2026, 54(2):4–10.
- SHENG Zhe, SHENG Wensi, JIN Meixi, et al. Research progress on preparation process of continuous fiber reinforced high-performance thermoplastic prepreg[J]. Cotton Textile Technology, 2026, 54(2):4–10.
- [22] 宋厚生, 孔令杰, 张伟平, 等. 正交实验设计法优化大气等离子喷涂氧化铝涂层工艺参数[J]. 表面技术, 2025, 54(7):235–246, 259.
- SONG Housheng, KONG Lingjie, ZHANG Weiping, et al. Optimizing of process parameters of atmospheric plasma sprayed alumina coatings by orthogonal experimental design[J]. Surface Technology, 2025, 54(7):235–246, 259.
- [23] 李娜. 碳纤维/环氧复合材料特性及对竞技体育器材影响[J]. 粘接, 2023, 50(3):69–72.
- LI Na. Research on the properties of carbon fiber/epoxy composite materials and its effects on sports equipment[J]. Adhesion, 2023, 50(3):69–72.
- [24] 周翔. 新材料技术在体育器械中的创新与应用研究[J]. 材料保护, 2021, 54(2):191–192.
- ZHOU Xiang. Research on the innovation and application of new material technology in sports equipment[J]. Materials Protection, 2021, 54(2):191–192.
- [25] ZHANG X, FAN W, LIU T X. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its applications[J]. Composites Communications, 2020, 21. DOI: 10.1007/S11665-021-06149-6.
- [26] LIAO G X, LI Z X, LUAN C C, et al. Additive manufacturing of polyamide 66: Effect of process parameters on crystallinity and mechanical properties[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(1):191–200.