

# 连续碳纤维增强聚醚醚酮热塑性复合材料制备及应用研究进展

李振磊<sup>1,2,3</sup>, 马峰岭<sup>1,2</sup>, 李小慧<sup>1,2</sup>, 吴新锋<sup>3</sup>, 钱勇军<sup>1,2</sup>, 金石磊<sup>1,2\*</sup>

(1. 上海材料研究所有限公司, 上海 200437; 2. 上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437;  
3. 上海第二工业大学能源与材料学院, 上海 201209)

**摘要:** 连续碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料因其轻量化、耐热、可回收、力学性能优异, 在航空航天、汽车和医疗等领域展现出广阔的应用前景。文章系统综述CF/PEEK预浸料的浸渍方法(如溶液浸渍法、熔融浸渍法、粉末浸渍法等)及其复合材料的成型工艺(如模压成型、缠绕成型、自动铺放成型及3D打印技术), 重点分析不同工艺对材料界面结合强度、孔隙率和力学性能的影响。研究表明, 通过优化工艺参数和界面改性技术, 可显著提升CF/PEEK复合材料的综合性能。当前研究聚焦于低温高压绿色成型、智能工艺调控及多功能复合材料的开发, 以推动其在超轻结构、精密医疗器件等领域的规模化应用。未来需要进一步突破高黏度树脂浸润的瓶颈, 完善智能化制造体系, 助力产业轻量化升级。

**关键词:** 热塑性复合材料; 聚醚醚酮; CF/PEEK 复合材料; 预浸料; 成型工艺

中图分类号: TB332; TQ320.6

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0214-07

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.038

## Research Progress of Preparation and Application of Continuous Carbon Fiber-reinforced Polyetheretherketone Thermoplastic Composites

LI Zhenlei<sup>1,2,3</sup>, MA Fengling<sup>1,2</sup>, LI Xiaohui<sup>1,2</sup>, WU Xinfeng<sup>3</sup>, QIAN Yongjun<sup>1,2</sup>, JIN Shilei<sup>1,2\*</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Materials Co., Ltd., Shanghai 200437, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation, Shanghai 200437, China; 3. School of Energy and Materials, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

**Abstract:** Continuous carbon fiber-reinforced polyether ether ketone (CF/PEEK) composites have demonstrated broad application prospects in fields such as aerospace, automotive, and medical industries due to their lightweight, thermal resistance, recyclability, and excellent mechanical properties. The article systematically reviews the impregnation methods of CF/PEEK prepregs (such as solution impregnation, melt impregnation, and powder impregnation) and the molding processes of the composites (such as compression molding, filament winding, automated tape laying, and 3D printing), with a focus on analyzing the impact of different processes on the interfacial bonding strength, porosity, and mechanical properties of the materials. The study indicates that optimizing process parameters and interfacial modification techniques can significantly enhance the overall performance of CF/PEEK composites. Current research has focused on low-temperature high-pressure green molding, intelligent process control, and the development of multifunctional composites to promote the large-scale application of these materials in fields such as ultra-lightweight structures and precision medical devices. Future efforts will need to further break through the bottleneck of high-viscosity resin impregnation, improve the intelligent manufacturing system, and facilitate the lightweight upgrade of the industry.

**Keywords:** Thermoplastic composites; PEEK; CF/PEEK composites; Prepreg; Forming process

收稿日期 Submitted date 2025-03-26; 修回日期 Revised date 2025-04-20; 录用日期 Accepted date 2025-05-19

\*联系人, 13764238392@163.com

引用本文: 李振磊, 马峰岭, 李小慧, 等. 连续碳纤维增强聚醚醚酮热塑性复合材料制备及应用研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 214-220.

Citation: LI Z L, MA F L, LI X H, et al. Research progress of preparation and application of continuous carbon fiber-reinforced polyetheretherketone thermoplastic composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 214-220.

作为复合材料领域的重要成员,连续碳纤维增强热塑性复合材料(CCFRTP)近年来受到业界的广泛关注和深入研究。与传统热固性复合材料相比,该材料展现出显著优势,包括优异的韧性和抗冲击性能、易于修复和维护等特点。此外,其成型周期大幅缩短,具有较长的储存周期和稳定的性能。尤为突出的是,该材料可通过熔融重塑实现纤维的循环回收利用,高度契合当前的环保要求。这类热塑性复合材料已拓展至航空航天、新能源汽车、高端医疗器械等尖端领域,并在轨道交通、风力发电和国防军工等领域实现了规模化应用<sup>[1-5]</sup>。以航空工业为例,空客 A380 机型成功应用了多种热塑性复合材料结构件。

常见的热塑性树脂包括聚苯硫醚(PPS)、聚酰亚胺(PI)、聚醚醚酮(PEEK)和聚乳酸(PLA)等。其中,PEEK 是一种全芳香族半结晶型热塑性树脂,其以极其出色的耐热性(长期使用温度可达 260 °C,瞬时可达 300 °C)、耐化学性和机械性能而闻名。同时,PEEK 在熔点以上展现出良好的热稳定性,能够与其他纤维制备性能更优越的复合材料<sup>[6-8]</sup>。碳纤维(CF)兼具卓越的力学性能与轻质的特性,目前已成为航空航天及国防军工等领域复合材料应用中的理想增强体<sup>[9-10]</sup>。基于 PEEK 的碳纤维增强复合材料(CF/PEEK)继承了 CF 和 PEEK 的优良特性,凭借低密度、高比强度和卓越的热稳定性脱颖而出。经连续碳纤维(CCF)增强后,PEEK 的综合性能显著提升,在高性能应用领域更具竞争力。

CF/PEEK 复合材料的加工流程主要分为预浸料生产和成型加工两大环节,也可采用热压等工艺实现纤维与树脂的直接复合。其核心在于预浸料的制备,通过浸渍工艺使 PEEK 树脂充分浸润 CF 或其编织物,形成后续成型的中间材料。然而,实际加工中面临双重挑战:一是 PEEK 分子链缺乏亲水基团,导致其在熔融状态下高黏度,影响浸渍效果;二是 CF 表面的高结晶石墨化结构具有化学惰性,影响界面结合强度。因此,研究人员通过优化工艺参数、改进制备工艺以及采用表面改性技术等方式有效提升了树脂浸润性和纤维结合力,从而显著增强了材料的力学性能<sup>[11]</sup>。

本文聚焦 CF/PEEK 复合材料体系,从制备工艺优化与应用领域拓展两方面展开综述,结合国内外研究进展探讨其性能提升路径与潜在应用前景。

## 1 CF/PEEK 预浸料的制备

CF/PEEK 预浸料制备体系依据浸渍时序可分为两类工艺:(1)预浸渍法,包括溶液浸渍法、熔融浸渍法等;(2)后浸渍法,包括粉末浸渍法、纤维混杂法和薄膜层叠法等。在预浸料制备阶段,可根据不同的应用需求,通过调控纤维/基体配比、设计预浸体几何参数以及选择纤维铺覆角度实现复合材料成型前宏观性能的初级调控。

### 1.1 溶液浸渍法

溶液浸渍法是通过溶剂溶解树脂形成胶液体系,使纤

维充分浸润后,经热脱溶工序制备成预浸料。图 1 为溶液浸渍法流程。该方法的优势在于工艺流程简便,设备要求低,能有效避免热塑性树脂高熔体黏度导致的浸润不足问题<sup>[12]</sup>。然而,该方法存在溶剂选择受限(受限于树脂的耐溶剂性)、环境排放污染风险以及脱溶过程中可能产生孔隙缺陷等问题。目前,这种浸渍方法主要适用于特定的高性能热塑性树脂体系<sup>[13]</sup>。

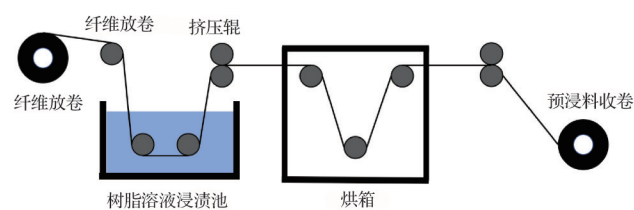


图 1 溶液浸渍法流程

Fig.1 Process of solution immersion method

在 CF/PEEK 复合材料中,PEEK 具有极佳的化学稳定性,除浓硫酸外几乎不溶于其他溶剂。为提升其溶解性,研究人员多采用磺化改性或共聚掺杂等方法。例如,周华民等<sup>[14]</sup>利用磺化共聚反应开发了新型可溶性 PEEK 树脂,并结合溶剂浸渍法制备 CF/PEEK 预浸带。该创新技术突破了传统溶剂的限制,经过热压成型后,材料的界面结合强度显著提升,拉伸强度达到 640 MPa,层间剪切强度达到 90 MPa。改性机理在于磺化基团增强了树脂的润湿性和界面黏附效应。

### 1.2 熔融浸渍法

熔融浸渍法是连续纤维增强热塑性预浸料的主流制备方法。其主要工艺是将热塑性树脂加热至熔融状态,然后充分浸润展纱纤维束,从而得到预浸料。与溶剂型浸渍工艺相比,熔融浸渍法全程无溶剂参与,从根本上消除了溶剂残留引发的性能劣化风险,具有环境友好、工艺周期短、孔隙率低以及树脂含量精准可控等优势<sup>[15]</sup>,因此是目前最常用的商业生产热塑性预浸料的工艺。图 2 为热塑性预浸料熔融浸渍装置<sup>[16]</sup>。



图 2 热塑性预浸料熔融浸渍装置

Fig.2 Melt impregnation system for thermoplastic prepreg

熔融浸渍法是目前制备增材制造用预浸料最常用的工艺,多用于制备 CF 预浸料。其关键在于通过浸渍模具结构优化与纤维展纱装置创新,实现纤维的充分浸渍<sup>[17]</sup>。李兴乐<sup>[18]</sup>针对 CF/PEEK 预浸丝束成型工艺展开研究,旨在解决现有熔融沉积成型(FDM)打印中 CF/PEEK 线材存

在的浸润性差、纤维含量低、层间剪切性能弱等问题。研究通过机械展纤法优化CF展纤工艺,发现当初始张力为5 N、凸杆数量为3个、收丝速度为2.3 m/min时,展纤宽度最佳。基于熔融浸渍法制备预浸带,确定温度380 °C、CF宽度13 mm、收丝速度2.3 m/min为最佳工艺参数,使预浸带孔隙率降至5.23%,层间剪切强度达到91.66 MPa。通过拉挤装置制备预浸丝束,发现当温度为360 °C时,预浸丝束的拉伸强度最大,达到1 660.33 MPa。该研究显著优化了CF/PEEK预浸丝束的浸润性和力学性能,为高性能复合材料的FDM打印应用提供了支持,推动了该领域的发展。

### 1.3 粉末浸渍法

粉末浸渍工艺通过将热塑性树脂微粉化(粒径1~

50 μm),借助流态化或静电吸附机制,使树脂微粒均匀分布于增强纤维表面,经热熔融实现纤维浸润,最终制备预浸料<sup>[19]</sup>。

根据树脂微粒沉积方式的不同,该工艺可分为干法粉末浸渍和湿法粉末浸渍<sup>[20]</sup>。表1为粉末浸渍干湿法比较。从表1可以看出,相较于传统浸渍工艺,粉末浸渍体系具有显著优势,对树脂粉末的黏度无限制,减少了纤维损伤,同时具备可控性强、生产效率高、成本低以及预浸料树脂分布均匀性优异等特点,尤其适用于高熔融黏度树脂基预浸带的制备。然而,该工艺对树脂粒径分布、分散体系稳定性及浸渍工艺参数较为敏感<sup>[21]</sup>。这些因素直接影响预浸料的树脂分布均匀度及孔隙率,需要通过工艺参数的协同优化来实现性能调控。

表1 粉末浸渍干湿法比较

Tab.1 Comparison between dry and wet powder impregnation

指标	干法粉末浸渍	湿法粉末浸渍
树脂分布均匀性	树脂粉末可直接附着在纤维表面,适合单层或简单铺层的结构,但粉末分散性和树脂含量难以控制	液体介质辅助分散,树脂含量易控制,适合复杂纤维结构
环保性	环保性好,不需要溶剂	需要溶剂回收/处理,溶剂挥发可能产生挥发性有机化合物(VOCs)
生产效率及能耗	生产效率高且适用连续生产	需要高温烘干,生产成本较高,生产线长,纤维易磨损起毛
制品性能	熔融过程中树脂流动路径受限,易形成孔隙(尤其纤维束内部)	产品孔隙率较低,界面结合较好,但制品性能易受分散剂去除效果影响

针对CF/PEEK预浸带制备过程中存在的树脂分布不均、纤维浸渍不足及高孔隙率等问题,WAN等<sup>[22]</sup>提出一种结合双粉末浸渍法与熔融均质化法的新工艺,并采用响应面法优化关键工艺参数,以提升预浸带性能。与传统粉末浸渍法相比,该方法制备的预浸带孔隙率降低了56.30%,拉伸强度提高了43.35%。同时,预浸带的增宽减薄处理显著提高了树脂分布的均匀性。此外,在单因素实验基础上,利用响应面法建立了工艺参数(浸渍温度、牵引速度和熔体均化温度)与CF/PEEK预浸带孔隙率之间的二次多项式回归方程,构建了浸渍模型。根据该模型计算得到使预浸带孔隙率达到最小值的工艺参数组合。在此工艺参数下,预浸带孔隙率可降低至7.39%。最终,通过实验验证了该模型的准确性,为浸渍工艺参数的优化设定提供了重要参考。

### 1.4 纤维混杂法

纤维混杂法主要分为混编与混纤两种工艺类型。图3为纤维混杂工艺。从图3可以看出,混编工艺是将树脂制成纤维形态,利用其柔软性与增强纤维混编成织物,通常以增强纤维为经纱,树脂纤维为纬纱<sup>[23]</sup>。该方法虽工艺简单,但树脂对纤维的浸润效果较差。混纤工艺则是将树脂纤维与增强纤维结合成单一一束,在成型时,纱束内的树脂受热熔融形成基体,浸润效果良好,且其结构形式更适

用于单向铺层及多维编织<sup>[24]</sup>。纤维混杂法通过纤维束内原位熔融克服了热塑性树脂高黏度导致的浸渍困难,保障了纤维的充分浸润,并具备加工灵活、树脂含量可控等优势,适用于缠绕成型和复杂结构制备。然而,编织过程易引发纤维断裂及增强纤维屈曲,从而影响复合材料的性能。

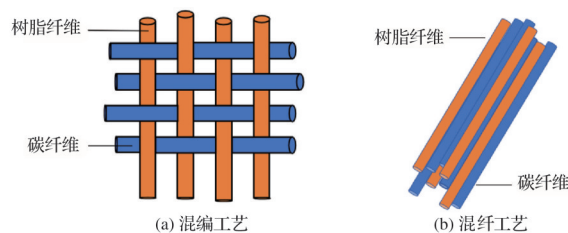


图3 纤维混杂工艺

Fig.3 Fiber hybridization process

针对CF/PEEK复合材料因高黏度树脂浸润性差导致的界面结合弱、孔隙率高以及纤维损伤对材料性能的影响等问题,LU等<sup>[25]</sup>提出一种基于柔性CF/PEEK平纹织物的混编-热压工艺,并系统优化了熔融温度、成型压力、结晶温度及树脂质量分数等关键参数。采用超景深显微镜观测表面形貌,研究确定优化后的成型压力为0.5 MPa,以平衡孔隙排出与纤维分散性。结果显示,

300 °C等温结晶可显著提升界面剪切强度及结晶度;当树脂质量分数为59.07%时,复合材料的综合性能达到最优(拉伸强度为738.36 MPa,弯曲强度为659.68 MPa),孔隙率显著低于传统粉末浸渍法。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。

### 1.5 薄膜层叠法

薄膜层叠法是将热塑性树脂制备成薄膜,与增强纤维交替铺叠后经热压实现熔融浸渍,最终固化形成预浸料<sup>[26]</sup>。其浸渍过程遵循两阶段机制,树脂先在纤维束间流动,随后向单丝间隙渗透。虽然增大压力可促进初期浸渍,但过度施加压力会压缩纤维间隙,导致树脂在纤维单丝间渗透能力下降。因此,精确控制外部压力是优化熔融浸润的关键<sup>[27]</sup>。该技术兼具工艺简洁、环保及制品尺寸稳定性好等优势,树脂含量可通过铺层设计精确调控,生产效率显著高于传统方法。然而,对于高黏度树脂体系,需要采用高温高压工艺条件。此外,胶膜质量直接影响预浸料的制备效果,国际市场上稳定均匀的0.03 mm级胶膜成本甚至高于预浸料本身,因此该技术用于制备薄型预浸料的成本相对较高。图4为薄膜层叠工艺。

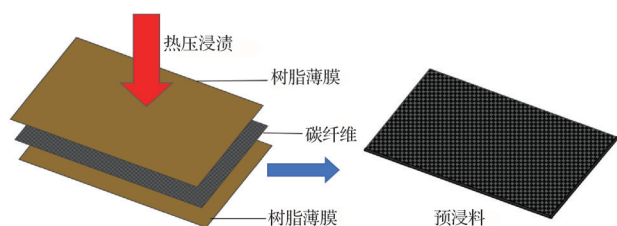


图4 薄膜层叠工艺

Fig.4 Film stacking process

薄膜层叠工艺主要适用于模压层合制品的成型,但对制品的尺寸和适用范围存在较大限制。朱世杰等<sup>[28]</sup>针对形状记忆复合材料的应用需求,采用薄膜层叠技术制备了超薄CF/PEEK预浸料,并结合热压工艺制备出厚度仅为0.036 mm且具备主动变形功能的层合材料。实验结果表明,该材料在320 °C热循环条件下表现出近100%的形状回复率,即使经过百次循环,仍能维持90%以上的回复特性。通过层厚梯度设计,成功实现了从平面基材到深海珊瑚、立方体等多维构型的可逆形态转换。这些研究成果不仅验证了CF/PEEK材料在极端环境(如空间探测)中的变形结构适用性,也为智能复合材料的工程应用开辟了新路径。

## 2 CF/PEEK复合材料的成型工艺

CCFRTP的成型工艺体系直接决定结构件的性能表现和高端产业化的应用进程。在工程实践中,通过优化工艺路线以实现材料功能的最大化适配,已成为重要共识。在现有技术体系中,模压、拉挤及缠绕等传统工艺仍占据主导地位,而自动铺放、增材制造等创新技术随着材料技

术的进步不断发展,极大地拓展了CCFRTP在高端制造领域的应用范围。

### 2.1 模压成型

模压成型工艺主要用于预浸片材或纤维织物与树脂膜复合形成的叠层预制体的加工。图5为模压成型工艺。该工艺流程包括预制体裁切、模具定位、热压固化及冷却脱模等阶段,通过与模具尺寸匹配的叠层材料在高温高压条件下实现制品成型。该工艺具有简单、短周期、低能耗、低成本和质量稳定等优势<sup>[29]</sup>,是工业生产中最主要的成型方式之一,也是热塑性复合材料快速成型的普遍适用技术。然而,受成型机理限制,该工艺更适合几何构型简单的制件,对复杂制件的成型存在明显局限性。在模压工艺中,优化层压工艺参数是研究重点,以提高制品的力学性能<sup>[30]</sup>。但PEEK因大分子链刚性导致的高熔融黏度,会引起CF浸润不良,这在一定程度上制约了CF/PEEK模压制品性能的提升及广泛应用。

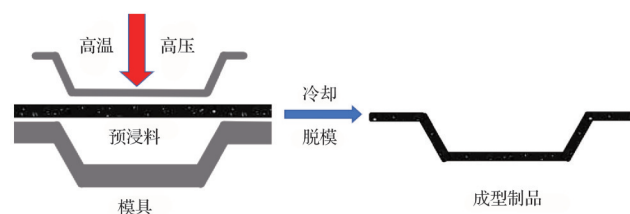


图5 模压成型工艺

Fig.5 Compression molding process

CF/PEEK复合材料非常适用于卫星太阳能电池板支架和飞机机翼等薄壁结构部件。然而,树脂基体与CF之间显著的热膨胀系数差异,加上薄壁件成型时高冷却速率导致的非均匀收缩效应,容易引发结构翘曲变形,从而直接影响部件的装配精度。因此,减少翘曲以提高装配精度对于制造CF/PEEK薄壁结构至关重要。LI等<sup>[31]</sup>采用模压工艺制备厚度为1.2 mm的CF/PEEK薄壁层压板,并分析不同冷却工艺对板材翘曲的影响。该研究阐明了CF/PEEK薄壁结构翘曲缺陷的形成机制,绘制了冷却速率曲线,以确定有效减轻此类缺陷的策略,并研究了翘曲对弯曲性能和稳定性的影响。数据显示,过度翘曲会显著降低弯曲强度,而具有较小翘曲差异的层压板表现出更一致的性能稳定性。这些研究成果为提高CF/PEEK复合材料的成型质量和性能,促进其快速发展和实际应用提供了有价值的参考。

### 2.2 缠绕成型

缠绕成型工艺以树脂浸润的连续纤维或预浸带为原料,通过张力控制体系引导材料在芯模表面进行螺旋铺覆。在成型过程中,接触点加热激活树脂基体熔融,实现纤维与基体界面的层间结合,最终固化形成复合材料制品。该工艺特别适用于轴、管件、储罐和容器等复合材料制件的连续制造<sup>[32]</sup>。目前,热源系统包括激光能量、电磁辐射(红外/微波)、热气炬及超声加热等多种形式<sup>[33]</sup>。表2

为缠绕成型热源比较。纤维缠绕技术具有三大核心优势：工艺重复性高、产品性能一致性好和适合规模化生产。与其他成型方法相比，其纤维取向可控性强，制品的轴向力学性能更优，显著提升了比强度与比刚度。然而，该技术

对工艺参数控制要求较高，需要精确调控温度梯度、缠绕速率、纤维张力及铺覆角度等关键参数<sup>[34]</sup>。工业机器人的集成应用进一步提高了缠绕成型的精度和工艺自动化水平。

表2 缠绕成型热源比较

Tab.2 Comparison of heat sources for filament winding molding

热源	优点	缺点	适用情况
激光加热	激光能量集中，局部快速加热，热影响小；激光原位成型技术可大幅提升生产效率	设备成本和维护费用较高，穿透深度有限且存在热损失风险	高精度、小尺寸或复杂结构部件的成型
红外加热	红外辐射可穿透材料表层，加热均匀，减少热应力；能量利用率高，且无直接接触污染	聚焦能力弱且穿透有限；需根据材料匹配合适波长，调试周期较长	中薄壁制件的生产；常作为预热器
微波加热	通过分子振动产生热量，加热速度快；能量可穿透材料内部，减少温度梯度	CF导电性易引起电磁屏蔽效应，导致加热不均；设备复杂，成本较高	树脂含量高的复合材料或需快速固化
热气炬加热	设备简单，成本较低；适应较广，可调节气流温度与速度满足不同加热需求	气流易受环境干扰，导致加热不均匀，影响界面强度；能源利用率较低	温度均匀性要求低的实验性研究或少量生产
超声加热	超声波振动可促进树脂流动，改善浸润性，提升材料界面强度	应用范围较窄，设备要求高，需要高频超声发生器	高界面结合强度的薄层复合材料

单毫等<sup>[35]</sup>针对 CCF 增强 PEEK 复合材料的缠绕成型技术开展系统研究，采用自主开发的高功率红外加热系统，以粉末浸渍法制备的 CF/PEEK 单向预浸带为原料，构建 CF/PEEK 缠绕制品层间剪切强度(ILSS)的工艺参数体系。经过多次实验，发现当送料张力为 8 kg、压辊压力为 0.3 MPa、缠绕速率为 6 r/min、加热温度为 410 °C、预热时长为 40 min 以及低冷却速度时，制品性能最佳。实验数据表明，在此优化参数组合下制备的缠绕构件 ILSS 高达 82.29 MPa。该研究通过参数敏感性分析建立了缠绕工艺优化模型，成功制备了高性能 CF/PEEK 管状构件，验证了红外技术在高性能热塑性复合材料缠绕成型中的有效性，为工程应用提供了关键工艺数据支持。

### 2.3 自动铺放成型

自动铺放成型工艺是一种高效的复合材料自动化加工技术，其核心在于通过程序化轨迹控制实现预浸丝束或预浸带的自动化精准排布，并结合原位固结技术，利用不同热源加热完成预浸料的同步铺层和固结成型。图 6 为自动铺放成型工艺。根据预浸料形态，自动铺放成型体系主要包含两种技术：自动铺丝成型 (AFP)<sup>[36]</sup> 和自动铺带成型 (ATL)<sup>[37]</sup>。控制铺放速度、温度和压力等关键工艺参数，该体系能够实现预浸料的剪切、精确定位铺层和叠层构建等功能，显著提升生产效率。同时，工艺参数的精密调控有效保障了大型构件的结构完整性和性能稳定性。基于高度自动化的生产模式，该技术通过预定轨迹实现异形构件的定制化制备，已在航空航天领域大型零部件制造中建立了成熟的应用体系，尤其在国际军民用飞行器生产环节表现突出<sup>[38]</sup>。

AFP 能够实现预浸带的原位固结，对提高飞机机翼等大型热塑性复合材料部件的制造效率具有显著作用。然而，在铺丝加热阶段，由于缺乏压实力，可能导致脱固行

为(如层间空隙和纤维变形)，从而显著削弱复合材料的力学性能。MIAO 等<sup>[39]</sup>对比 CF/PEEK 层压板与 CF/PEEK 带材在激光辅助自动铺放(LAFP)加热过程中的脱黏行为，揭示其机理并提出优化方法。研究表明，带材脱黏主要由初始残余应力释放引起，而层压板则因纤维弹性变形能释放导致塑性变形。辊压工艺可消除层压板的脱黏现象，而对带材进行预退火处理可以释放残余应力，从而抑制脱固行为。该研究阐明了残余应力与热膨胀对脱固行为的影响机制，为优化 LAFP 工艺参数(如温度控制与预退火处理)提供了依据，对提高 LAFP 制造零件的质量及推动高效制造技术的发展具有重要意义。

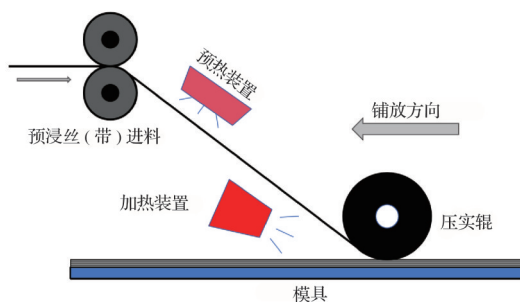


图6 自动铺放成型工艺

Fig.6 Automated tape placement molding process

### 2.4 3D 打印成型

目前，3D 打印技术在 CCFRTP 制备领域的应用已成为研究热点。作为一种典型的增材制造手段，3D 打印技术基于逐层堆叠成型原理，借助数字程序精确控制实现复杂三维构件的无模化生产，具有智能化、自动化、低成本、尺寸精准及生产高效等优点，且材料利用率高<sup>[40]</sup>。在主流技术中，熔融沉积成型(FDM)<sup>[41]</sup>与选择性激光烧结(SLS)<sup>[42]</sup>应用最为广泛。值得注意的是，纤维与树脂基体的浸润程度直接影响制品性能，同时打印设备性能和参数设置也是

最终制品质量的重要影响因素。此外,热塑性树脂的高熔融温度、高黏度和半结晶结构导致打印材料层间结合强度较弱,这也是亟待解决的问题<sup>[43]</sup>。

因此,研究纤维与树脂的浸渍、开发新型软件和硬件系统或对复合材料进行后处理对于提高3D打印制件的力学性能具有重要意义。LUO等<sup>[44]</sup>深入研究一种创新的等离子体-激光协同辅助3D打印工艺,显著改善了CCF/PEEK复合材料的界面结合性能。研究表明,该工艺使层间剪切强度从5.78 MPa大幅提高至39.05 MPa。具体而言,激光通过提升层间温度促进宏观界面结合,而等离子体则通过表面化学和物理处理增强了CF与PEEK之间的微观界面黏结力。实验进一步证明,等离子体处理显著改善了材料的界面结合性能,激光处理不仅提高了材料的结晶度,还增强了整体层间结合强度。这一创新工艺为CF/PEEK复合材料在航空航天和汽车工业的应用开辟了新的前景,通过优化界面结合,显著提升了材料的力学性能与结构完整性。

近年来,4D打印技术的发展备受瞩目,其在智能材料和自适应结构制造方面展现出巨大潜力。4D打印技术是跨维度制造技术的创新延伸,在3D打印的基础上增加了时间维度,即打印出的材料能在特定外界刺激(如湿度、磁场、温度、光照等)下,随着时间推移自动发生形状或性能的改变。目前,4D打印研究主要集中在热变形温度较低的形状记忆材料上,多用于服装工业和医疗领域<sup>[45]</sup>,但在航空航天领域,针对高模量、高转变温度及轻量化需求的材料研究较少,这限制其在该领域的应用。YANG等<sup>[46]</sup>创新开发了基于4D打印的双层智能CFRP构件,采用CF/PLA和CF/PEEK两层复合材料板材结构,在外界温度变化时,PLA层与PEEK层因异质层间应变差发生弯曲变形,这种智能材料为仿生驱动装置(如人工肌肉模块)提供了新型解决方案。

### 3 结语

本文总结近年来CF/PEEK复合材料的制备工艺及应用研究进展。传统加工手段目前仍主导复杂构件的制造流程,但以增材制造为代表的先进成型技术正加速渗透产业领域。3D打印技术的核心优势在于其无模具成型特性,这种数字制造模式不仅突破了传统模具设计的限制,还能显著缩短生产周期并降低制造成本,特别适用于航空航天精密部件和医疗定制化器械的加工需求。

结合自动化制造系统的升级与新型原位反应成型等创新工艺的突破,未来研究重点应聚焦于3个主要方向:(1)研发低能耗的低温高压成型工艺,以符合绿色发展趋势;(2)探索人工智能驱动的自动铺放和增材制造技术,以实现复杂构件的快速精准制造;(3)通过添加石墨烯、纳米陶瓷等增强相,开发多功能复合材料。这些突破将助力推动CF/PEEK复合材料在医疗、航空航天超轻结构、新能源汽车电池包等领域的规模化应用,同时实现产业轻量化的

发展转型。

### 参考文献

- [1] 张国庆,李晓拓,蒲颖.连续纤维增强热塑性复合材料一体成型工艺研究进展及其应用[J].化学推进剂与高分子材料,2024,22(6):34-38.
- [2] 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): 100016.
- [3] 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): 6788-6803.
- [4] 朱昊,李勇,还大军.短切CF/PEEK复合材料的制备及抗紫外老化性能[J].材料导报,2024,38(14):285-290.
- [5] 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): 13459-13479.
- [6] 谢金梦,逢显娟,赵若凡,等.不同摩擦配副对PEEK及CF/PEEK复合材料摩擦学性能的影响[J].材料导报,2024,38(16):269-277.
- [7] 成霖.高导热聚醚醚酮复合材料的压力诱导流动成型及其性能研究[D].长春:吉林大学,2024.
- [8] 杨学萍.CCF/PEEK复合材料制备及应用研究进展[J].合成纤维,2021,50(5):41-51.
- [9] 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.
- [10] PAN L, YAPICI U. A comparative study on mechanical properties of carbon fiber/PEEK composites[J]. Advanced Composite Materials, 2016, 25(4): 359-374.
- [11] 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.
- [12] 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):1229-1247.
- [13] 冯冰涛,王晓珂,张信,等.连续碳纤维增强热塑性复合材料制备与应用研究进展[J].中国塑料,2022,36(7):165-173.
- [14] 周华民,蒋维,黄志高,等.一种连续碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的制备方法及产品:CN108047470A[P].2018-05-18.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 皮展鹏,杨磊,欧阳震,等.增材制造用碳纤维预浸料制备技术研究进展[J].复合材料学报,2025,42(1):1-20.
- [18] 李兴乐.PEEK基碳纤维预浸丝束成型工艺研究[D].郑州:河南工业大学,2023.
- [19] NASSIR N, BIRCH R S, CANTWELL W J, et al. The perforation resistance of glass fibre reinforced PEKK composites[J]. Polymer Testing, 2018, 72: 423-431.
- [20] 华泽天,薛平,贾明印,等.粉末浸渍法制备连续纤维增强热塑性复合材料研究进展[J].塑料科技,2022,50(10):118-122.

- [21] 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.
- [22] 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): 1672-1683.
- [23] 刘延宽, 顾子琛, 王志平. 连续纤维增强热塑性预浸料制备工艺与发展趋势[J]. 中国塑料, 2022, 36(2): 172-181.
- [24] VALENTE M, ROSSITTI I, SAMBUCCI M. Different production processes for thermoplastic composite materials: Sustainability versus mechanical properties and processes parameter[J]. *Polymers*, 2023, 15(1): 242.
- [25] 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): 53.
- [26] 岳伟, 袁远, 李莹莹. 热塑性预浸料的制备技术及研究进展[J]. 纤维复合材料, 2023, 40(4): 95-99.
- [27] 许云鹏, 颜春, 刘东, 等. 连续纤维增强热塑性预浸料制备工艺的研究进展[J]. 复合材料科学与工程, 2020(8): 123-128.
- [28] 朱世杰, 张金纳, 王朝阳, 等. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的形状记忆效应[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 2832-2840.
- [29] 李源, 张琦, 夏礼栋, 等. 碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺研究进展[J]. 现代塑料加工应用, 2022, 34(5): 52-55.
- [30] MA X L, WEN L H, WANG S Y, et al. Inherent relationship between process parameters, crystallization and mechanical properties of continuous carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. *Defence Technology*, 2023, 24: 269-284.
- [31] LI Y, YANG A S, LIU Y T, et al. Analysis of warping defect formation mechanisms in hot molding of CF/PEEK thin-wall structures and their influence on mechanical properties[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 207: 112740.
- [32] MA Q J, GE J, REJAB M R M, et al. Fabrication of the carbon fiber reinforced plastic (CFRP) cone tube through the laboratory-scale 3-axis winding machine[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 1645-1651.
- [33] YASSIN K, HOJJAT M. Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods [J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2018, 31(12): 1676-1725.
- [34] GENG H B, CAO X W, ZU L, et al. The effects of laser-assisted winding process parameters on the tensile properties of carbon fiber/polyphenylene sulfide composites[J]. *Materials*, 2024, 17(18): 4664.
- [35] 单毫, 陈宇, 李俊杰, 等. 红外加热缠绕成型工艺参数对CF/PEEK复合材料层间剪切性能的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2020(1): 39-46.
- [36] JIN Z A, SUN S Z, JOSHI S C, et al. Temperature field characteristics of CF/PEEK thermoplastic composites formed by automated fiber placement using hot gas torch with slit structure nozzle[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, 37(6): 392-409.
- [37] BACKMANN V, ADIL M, WETTEMANN T, et al. Laser-assisted automated tape laying: Effects of placement rate and heated tooling on layer bonding and tensile properties[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2025, 38(6): 2063-2084.
- [38] 王显峰, 段少华, 唐珊珊, 等. 复合材料自动铺放技术在航空航天领域的研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(16): 64-77.
- [39] MIAO Q Y, YUE K J, WU D J, et al. Comparative analysis of the deconsolidation behavior of CF/PEEK laminates and CF/PEEK tapes during laser-assisted automated fiber placement[J]. *Composite Structures*, 2025, 357: 118924.
- [40] WANG P, ZOU B, DING S L, et al. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(9): 236-246.
- [41] SIDIM G, DOGU M, OZBEK B. Manufacturing and characterization of continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide filaments via melt impregnation method[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(1): 749-760.
- [42] ZHANG S X, TANG H B, TANG D N, et al. Effect of fabrication process on the microstructure and mechanical performance of carbon fiber reinforced PEEK composites via selective laser sintering[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 246: 110396.
- [43] 杨洋. 3D打印用碳纤维/聚醚醚酮复合材料的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [44] LUO M, TIAN X Y, SHANG J F, et al. Bi-scale interfacial bond behaviors of CCF/PEEK composites by plasma-laser cooperatively assisted 3D printing process[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 131: 105812.
- [45] LI G W, LI H, LIU Q P, et al. 4D printing of polycarbonate ternary composites and the biomimetic folding deployment mechanisms[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(1): 54.
- [46] YANG C C, WANG B J, LI D C, et al. Modelling and characterisation for the responsive performance of CF/PLA and CF/PEEK smart materials fabricated by 4D printing[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12(1): 69-76.