

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.025

连续碳纤维增强热塑性复合材料的性能与工艺优化研究进展

焦卫国, 李文晓

(同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: 连续碳纤维增强热塑性复合材料(CCFRTP)兼具优异的比强度、快速成型能力及可回收特性,但其工程应用仍受限于工艺诱导缺陷、界面结合弱及服役环境适应性差等问题。本文基于“问题导向”的视角,系统综述了CCFRTP在力学响应各向异性、界面多尺度损伤、环境物理/化学降解及智能功能集成方面的研究现状与关键挑战。以此为切入点,重点归纳了针对性的材料改性与工艺优化策略:首先,通过流变-结晶耦合控制、主动压力场引入及运动学轨迹规划策略,实现工艺缺陷的协同抑制与结构致密化;其次,采用纤维表面活化改性及物理强化浸渍技术,解决树脂高黏度导致的界面浸润难题;再次,构建基于化学键合与结晶调控的多级防护体系,以延缓湿热及腐蚀环境下的性能衰减;最后,指出多材料增材制造与基于人工智能的闭环控制系统的深度融合,是未来实现CCFRTP结构-功能一体化与制造过程自适应调节的关键发展方向。

关键词: 连续碳纤维;热塑性复合材料;性能;材料改性;工艺优化

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0214-07

Advances in properties and process optimization of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites

JIAO Weiguo, LI Wenxiao

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CCFRTP) possess excellent specific strength, rapid processing capabilities, and recyclability; however, their engineering applications are still restricted by issues such as process-induced defects, weak interfacial bonding, and poor service environmental adaptability. Adopting a "problem-oriented" perspective, in this paper, the research status and critical challenges of CCFRTP regarding anisotropic mechanical response, multi-scale damage at the interface, physical or chemical degradation in complex environment, and integration of intelligent functions were systematically reviewed. Based on these critical challenges, targeted material modification and process optimization strategies were summarized. Firstly, synergistic suppression of process-induced defects and structural densification are achieved through rheology-crystallization coupling control, the introduction of active pressure fields, and kinematic trajectory planning strategies. Secondly, the challenge of interface impregnation caused by high viscosity of resin is addressed by adopting activation modification of the fiber surface and physical enhanced impregnation techniques. Thirdly, a multi-level protection system based on chemical bonding and crystallization regulation is constructed to retard performance attenuation under hygrothermal and corrosive environments. Finally, it is highlighted that the deep integration of multi-material additive manufacturing and artificial intelligence-based closed-loop control systems represents a key development direction for achieving future structure-function integration and adaptive regulation of the manufacturing process for CCFRTP.

Keywords: continuous carbon fiber ; thermoplastic composite ; property ; material modification ; process optimization

相较于传统的热固性复合材料,在保持同水平的力学性能的基础上,热塑性复合材料展现出更为优异的快速加工特性,其预浸料可在常温环境下存放且无需苛刻的洁净度控制^[1],制造周期相对较短,同时赋予生产部件可回收的特性,

通信作者: 李文晓,副教授,博士,主要从事聚合物基复合材料以及复合材料泡沫夹层结构的设计、制备与性能的研究

收稿日期: 2026-02-18

引用格式: 焦卫国,李文晓.连续碳纤维增强热塑性复合材料的性能与工艺优化研究进展[J].工程塑料应用,2026,54(5):214-220.

JIAO Weiguo, LI Wenxiao. Advances in properties and process optimization of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites [J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5): 214-220.

有效解决材料生命周期中的资源循环问题^[2]。另一方面,热塑性复合材料高韧性、基体的熔融-再固化特性和基体聚集态结构的可设计性等特点使材料自感知、自修复及形状记忆等功能更易于实现。

以短纤维为增强相的热塑性复合材料已被广泛用于汽车、航空航天、电子电器等领域,但纤维的非连续性和随机取向限制了该类材料在承载结构件中的应用。相较之下,连续

碳纤维增强热塑性复合材料(CCFRTP)可通过定制纤维方向获得优异的承载性能。根据树脂基体性能差异及应用场景需求,CCFRTP涉及多种材料体系与制造工艺,常用的热塑性树脂基体有聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚酰胺(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)、聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS)、聚醚酰亚胺(PEI)等。表1汇总了当前主流的CCFRTP树脂基体、成型方法及典型部件分类。

表1 CCFRTP树脂基体、常用制造工艺及典型部件分类

Tab. 1 Classification of resin matrices, common manufacturing processes, and typical components of CCFRTP			
Resin category	Resin examples	Common manufacturing processes	Typical components
General plastics	PP, PE	Compression molding; Vacuum bag/Oven molding; Pultrusion molding	Basic automotive interior parts, industrial pipes, housings with low load-bearing requirements
Engineering plastics	PA6/PA66, PC, PET	Compression molding; Pultrusion molding; Additive manufacturing; Automated tape laying/fiber placement (ATL/AFP)	Automotive load-bearing components (e.g., chassis parts, seat frames), sports and leisure products
Special engineering plastics	PEEK, PPS, PEI	Compression molding; Autoclave molding; ATL/AFP; Additive manufacturing	Key aerospace structural components (e.g., aircraft secondary load-bearing frames, radomes), high-temperature resistant complex load-bearing parts

CCFRTP的性能取决于纤维/树脂界面结合质量,而这种界面质量在很大程度上受制于制造过程中产生的各类工艺缺陷(如孔隙、浸润不均、纤维褶皱等)。由于热塑性树脂熔体黏度较高,纤维浸渍困难,微观孔隙与界面弱黏结极易引发应力集中,进而劣化材料的静态与疲劳性能。尽管CCFRTP的成型工艺已趋于多元化^[3-6],但如何依托工艺创新来抑制上述缺陷,确保树脂在多尺度下对纤维的全面浸润,并协同优化基体相结构及界面应力传递机制,仍是改善复合材料宏观性能的关键。此外,界面质量的优劣还直接决定了材料在湿热、紫外及化学介质等复杂服役环境下的耐久性表现,并影响其智能功能集成的可靠性。

基于此,本文采用问题导向的视角,首先系统分析CCFRTP在力学行为、界面损伤、环境稳定性及智能功能等核心性能方面的研究现状与挑战。随后,紧扣上述性能瓶颈,重点归纳先进的材料改性与制造工艺优化策略。

1 CCFRTP的性能研究现状与关键挑战

1.1 复杂载荷下的各向异性力学响应

CCFRTP兼具高比强度与快速成型优势,但其力学行为表现出复杂的各向异性与非线性特征。材料对纤维排布方向及内部微观缺陷的高度敏感性,给结构设计与性能预测带来了显著挑战。

在静态力学性能方面,纤维排布方向是决定材料模量与强度的支配性因素。Holmes等^[7]结合数字图像相关法(DIC)和计算机断层扫描(CT)方法,研究了碳纤维(CF)/PEEK在不同偏轴角度(0°、15°、30°、45°)下的拉伸行为,发现随着偏轴角度增大,失效模式由纤维断裂转变为基体主导的剪切失效,导致弹性模量和强度显著下降,但能量吸收能力有所提升。Goh等^[8]通过挤出增材制造方法制备了多种纤维排布试样,建立了一套完整的正交各向异性参数集,量化了纤维路径对宏观力学性能的决定性影响。此外,热塑性基体的非线性黏弹性使得材料本构关系更为复杂。Andriß等^[9-10]指出线

弹性模型无法准确描述基体的黏弹性,提出了耦合损伤-塑性-黏弹性的本构模型,并通过分步加载-卸载实验有效分离了各分量,揭示了复杂加载下的应力松弛机制。

在动态载荷(冲击与疲劳)下,材料表现出显著的缺口敏感性与工艺依赖性。Li等^[11]的Charpy冲击试验表明,缺口会切断连续纤维的传力路径,导致交叉排列试样的冲击强度骤降61.04%,这种对几何突变的高度敏感性是工程应用中的关键隐患。材料的疲劳性能高度依赖于微观结构的致密程度,Saeed等^[12]通过熔融沉积成型技术结合热压后处理制备了连续碳纤维(CCF)/PA试样,发现将纤维体积分数从20%提升至30%可显著延长疲劳寿命,高纤维含量且浸润良好的样品在百万次循环后仍未失效。针对疲劳表征耗时的问题,Moghanlou等^[13]提出了一种基于热力学方法的加速疲劳表征技术,运用Run-Stop-Cooldown(RSC)循环测试方法,研究了增材制造的CCFRTP单向和多向层合板的疲劳特性,得出断裂疲劳熵(FFE)的值分别为3.10 MJ/(m³·K)和3.67 MJ/(m³·K),通过监测耗散能演化实现了对应力水平-失效循环次数曲线(S-N曲线)的高效预测。

CCFRTP在力学响应表现上的波动性,很大程度上归因于孔隙、纤维波纹及几何精度偏差等制造缺陷。这些初始缺陷的存在,限制了材料宏观性能的充分发挥。因此,通过优化制造工艺参数来抑制缺陷并提升结构致密性,是解决上述性能瓶颈、实现材料稳定承载的关键。

1.2 纤维/树脂界面黏结质量与多尺度损伤演化

纤维与热塑性基体之间的界面是复合材料内部应力传递的枢纽,其结合质量直接决定了材料的破坏模式与整体承载能力。然而,由于碳纤维表面的化学惰性以及热塑性树脂熔体的高黏度特性,CCFRTP在成型过程中极易出现浸润不完全现象,导致界面结合强度不足,往往会诱发结构早期失效。

微观层面的界面结合性能往往通过界面剪切强度

(IFSS)与断裂韧性来表征。Touchard等^[14]针对3D打印CF/PA6复合材料的研究发现,由于打印过程中缺乏足够的压力与保压时间,测得的表现IFSS值仅约为20 MPa,显著低于传统热压成型复合材料的典型水平(通常为40~60 MPa)。此外,层间断裂行为表现出显著的纤维角度依赖性:在+45°/-45°界面中,裂纹倾向于在层间发生迁移和偏转,导致其I型层间断裂韧性显著优于0°/0°界面。这些研究表明,虽然改变打印路径可以在一定程度上通过裂纹偏转机制来耗散能量,但界面结合力本身的不足仍是限制材料层间力学性能的本质因素。

损伤演化过程则表现出显著的多尺度特征与环境敏感性。Zhu等^[15]建立了宽温域下的损伤本构模型,揭示了失效机制随温度的演变规律:在室温下,损伤主要表现为基体的脆性破碎和纤维断裂;而在高温下,随着基体软化,损伤模式转变为纤维的微动滑移与基体的黏性流动,界面脱黏成为主导因素。Dutra等^[16]采用渐进均质化技术和统计等效代表性体积单元(RVE)模型,结合多机制失效准则,研究了CCFRTP的损伤演化机制。通过分别定义纤维(最大纵向应力准则)、基体(Mises等效应力与应力张量不变量组合准则)和界面(法向/切向牵引二次准则)的失效判据,研究表明,只有将界面作为一个独立的损伤实体进行解耦分析,并充分考虑剪切应力对界面损伤的驱动作用,才能准确预测材料从微裂纹萌生到宏观结构断裂的全过程。CCFRTP在界面处的应力集中与脱黏失效,源于纤维/树脂界面的物理浸润不充分与化学结合力匮乏。这种界面缺陷不仅降低了载荷传递效率,更诱发了复杂的损伤模式。因此,通过表面改性技术增强纤维活性,并优化浸渍工艺以改善树脂对纤维束的渗透率,是攻克界面瓶颈、提升材料损伤容限的切实可行途径。

1.3 复杂服役环境下材料的物理/化学降解与性能衰减规律

CCFRTP在实际服役阶段,不可避免地暴露于湿热、紫外辐射及化学介质中。这些环境因素通过物理溶胀、化学降解及微观结构演变等机制,引发材料性能的多场耦合衰减,其演化规律远比单一载荷下的力学行为复杂。

高温与湿热环境威胁着树脂基体稳定性。Zhu等^[15]指出,尽管碳纤维本身具有优异的热稳定性,但热塑性基体对温度高度敏感,高温会导致基体软化和模量急剧下降,使材料的抗弯曲与层间剪切性能显著劣化。有趣的是,湿热老化则呈现出一种独特的“双刃剑”效应。一方面,水分子的侵入会引发基体塑化和界面空化;但另一方面,Borba等^[17]研究了湿热环境(71℃、95%相对湿度,28 d)对CF/PEEK摩擦铆接接头性能的影响,发现适当的湿热条件诱导了半结晶树脂基体发生后结晶,这种微观有序度的提升在老化初期反而使接头的最大拉伸力提升了23%。

紫外辐射(UV)对材料表层的破坏具有显著的阶段性特征。Mahat等^[18]对CF/PPS复合材料的加速耐候性研究表明,UV暴露存在明显的阈值效应:在老化初期,紫外线辐射加热有助于提高表层结晶度,导致拉伸强度微幅上升;然而,随着

暴露时间延长(超过300 h),光氧化降解机制占据主导,高能光子切断了聚合物分子链,导致玻璃化转变温度降低及力学性能不可逆的衰减。这种“先升后降”的非单调趋势,增加了长寿命预测的不确定性。

在更极端的服役环境中,化学腐蚀与物理损伤形成恶性协同。Dong等^[19]系统研究了海水浸泡、盐雾腐蚀及冻融循环对复合材料耐久性的影响。研究发现,氯离子的化学侵蚀会削弱纤维/树脂界面的结合力,而冻融循环中水分子在微裂纹内的体积膨胀则会物理性地扩展损伤区域。两者叠加作用下,材料的层间剪切强度下降幅度远超单一环境因素所引发的损伤总和。

CCFRTP在复杂环境下的失效不仅是材料表面的物理剥蚀,更是涉及基体结晶动力学改变、分子链断裂及界面水解的深层结构退化。面对这种多场耦合的降解机制,单凭材料自身的本征耐候性难以满足长期服役需求,这要求在后续的工艺设计中引入主动防护体系(如阻隔涂层)并调控结晶行为,以应对长效服役的严峻考验。

1.4 智能功能集成中的兼容性瓶颈与响应可靠性

利用热塑性基体的可逆相变特性与连续碳纤维优异的物理属性(导电、导热),CCFRTP展现出向形状记忆、自感知与自修复等智能系统演变的巨大潜力。然而,在当前的“结构-功能一体化”探索中,材料兼容性差与性能权衡难题始终是限制其工程应用的瓶颈。

在智能响应与4D打印方面,追求快速且可控的形变是核心目标。Jin等^[20]利用熔融沉积成型(FDM)技术开发了磁/电双响应的CCFRTP,通过多场协同驱动,成功将形状恢复时间缩短至22 s,并展示了可编程的“抓取-提升”仿生结构。然而,为了赋予材料磁响应特性,往往需要混入磁性颗粒等功能填料,这些异质组分的引入破坏了聚合物基体的连续性,极易在界面处形成应力集中点,导致材料的基础力学性能较纯CCFRTP出现明显下降。

在自感知与自修复领域,如何在不损伤结构完整性的前提下植入功能是核心挑战。Liu等^[21]探索了利用微波辐射加热受损界面的修复策略,借助碳纤维对微波的高效吸收特性实现基体熔融愈合。尽管这种非接触式加热效率较高,但对外部微波发射设备的依赖限制了其在现场服役环境中的应用。Luan等^[22]提出了一种基于双材料3D打印技术的CCFRTP结构,通过电阻监测实现自感知功能,并通过释放预埋的修复剂实现自修复,但这种方法的修复效率在多次修复循环后呈现明显衰减趋势。

自监测功能是结构健康监测的核心,其根本作用是赋予材料或结构“感知”自身状态的能力,如同人体的“神经系统”。Ji等^[23]通过测量铺层间电阻变化,研究了CF/PEEK复合材料在自动化纤维铺放(AFP)过程中对异物、断裂、间隙/重叠等缺陷的检测能力,结果表明该方法能准确定位缺陷位置和尺寸。不过,在实际应用中,碳纤维的电阻信号极易受环境温度波动与接触电阻变化的干扰。

目前针对 CCFRTP 智能化的探索仍普遍受困于实验室尺度的概念验证。异质组分间的相容性矛盾、功能化单元对材料本征强度的削弱,以及长期服役下传感元件的失稳,都是限制材料迈向工程化应用的因素。

2 基于问题导向的材料改性与工艺优化策略

2.1 抑制工艺缺陷与提升结构完整性的协同调控策略

针对 1.1 节揭示的孔隙率高、纤维波纹及几何精度偏差等核心痛点,CCFRTP 的工艺优化不再局限于单一参数调整,而是转向多物理场的协同调控。这一系统性策略涵盖三个关键维度:一是通过构建精确的流变-结晶耦合工艺窗口,在保证树脂充分浸润的同时规避热降解与过度结晶;二是通过引入主动压力场与真空辅助机制,利用物理挤压与负压排气实现微观组织的强制致密化;三是基于运动学轨迹规划与热历史管理,解决复杂路径下的纤维偏离与各向异性收缩问题,从而实现构件微观质量与宏观精度的同步提升。

在流变-结晶耦合方面,核心矛盾在于平衡树脂熔体的浸润动力学与成型效率。在连续拉挤与铺放工艺中,提升温度虽能降低树脂黏度,但若牵引速度过快,树脂在纤维束内的浸润时间不足,会导致孔隙率显著上升。Liu 等^[24]针对 CF/PEEK 的研究表明,单一提升模具温度无法完全补偿高拉速带来的浸润滞后,必须建立严格的“温度-速度”耦合模型以锁定低孔隙率区间。Motochika 等^[25]进一步指出,对于混编纱体系,增加预热段长度比单纯提高成型温度更能有效改善深层浸润。对于反应性树脂体系,Luisier 等^[26]强调了“化学流变控制”的重要性,提出必须使单体的低黏度物理浸润期与原位聚合反应的化学诱导期精确重合。在激光辅助自动铺放中,这一矛盾更为尖锐,Brandt 等^[27]和 Cao 等^[28]证实,激光功率必须维持在极窄的范围内:能量过低导致层间未熔合,能量过高则诱发基体热降解,只有在特定的热输入区间内才能获得最佳的结晶度与层间剪切强度。

在主动压力场与真空辅助方面,施加外部物理场是消除残留孔隙、实现微观致密化的必要手段。即便在最佳温度下,熔体内部的包裹气泡仍需外部驱动力排出。Venkatesan 等^[29]对比发现,在 AFP 过程中施加较高的压实辊压力是降低空隙率的主导因素,并且采用弹性压辊可使压力分布更均匀。针对 3D 打印(FDM)层间结合弱的难题,Ichihara 等^[30]开发了基于喷嘴压力的主动反馈系统,通过在沉积过程中施加法向“熨平力”,有效抑制了纤维波纹的产生,使构件的轴向压缩强度逼近理论极限。Li 等^[31]则引入了真空环境下的打印策略,利用负压差加速熔体内气体的逸出,从物理根源上消除了气孔成核机制,显著提升了材料的抗弯性能。

在运动学轨迹规划与热历史管理方面,几何精度的保障主要依赖于打印路径的算法优化与冷却应力的调控。针对 FDM 打印路径转角处的纤维偏离问题,Quan 等^[32]建立了纤维束沉积几何模型,指出恒速打印会导致内侧纤维堆积与外侧“桥接”悬空;为此,他们提出了变速打印策略,即在曲率变化处动态调整喷头速度,成功实现了复杂轨迹下的纤维精准

定位。而在成型后的冷却阶段,Limaye 等^[33]和 Barocio 等^[34]揭示了非均匀温度场导致的各向异性收缩现象。其研究表明,通过优化模具温度分布来调控冷却速率,进而控制半结晶聚合物的结晶度分布,可以有效消除残余应力、防止大型构件翘曲变形。

2.2 增强界面应力传递的纤维表面处理与浸渍优化技术

针对 1.2 节所述的界面化学惰性与高黏度树脂浸润受阻问题,提升 CCFRTP 界面性能的核心策略在于协同采用表面活化改性与物理强化浸渍技术。前者旨在增加纤维表面的粗糙度与活性位点,后者则致力于缩短树脂熔体的渗透路径。

纤维表面活化改性是增强界面结合最直接且有效的手段,旨在通过物理或化学方法引入活性官能团,增加纤维表面能。Zhang 等^[35]通过 H_2SO_4/HNO_3 混酸氧化法对碳纤维进行处理,在纤维表面成功引入了酸性官能团。Zhang 等^[36]使用硝酸对碳纤维进行电氧化处理,以改变其表面碳原子的粗糙度和无序度,显著提高了碳纤维与高密度聚乙烯基体的界面黏附性能。纳米增强上浆是另一重要方向:Sasikumar 等^[37]在碳纤维上沉积碳纳米管,与聚碳酸酯薄膜进行热压复合后,增强了界面的相互作用,同时减少了碳纤维的使用量,从而降低了成本。Dai 等^[38]通过绿色溶剂(γ -戊内酯)和生物基原料制备了纤维素纳米晶体(CNC)改性氧化锌(ZnO)杂化的超支化水性聚氨酯(HWPU)上浆剂,上浆剂中的氨基甲酸酯基团可以与 PA6 中的酰胺基团形成氢键,这种上浆剂显著提升 CF/PA6 复合材料的界面性能、力学性能及抗紫外能力。

在物理浸渍工艺优化方面,核心目标是克服热塑性熔体的高黏度阻力,实现树脂对微细纤维单丝的完全包裹。针对 FDM 打印过程中熔体难以渗入纤维束芯部的问题,An 等^[39]开发了销钉辅助原位熔融浸渍系统,如图 1 所示,通过在打印喷头内部设置特制的展纱销钉,利用机械力将集束的纤维强制展开为扁平带状,显著增加了纤维与熔体的接触比表面积,从而在极短的停留时间内实现了高度均一的浸润。Zhang 等^[40]则采用粉末浸渍与双纺技术两步法制备 CF/PEEK 包裹纱线,如图 2 所示,该方法利用低黏度的悬浮液先将微米级 PEEK 粉末均匀填充至纤维束间隙,随后通过包覆结构将其固定,规避了高黏度熔体渗透难的问题。实验表

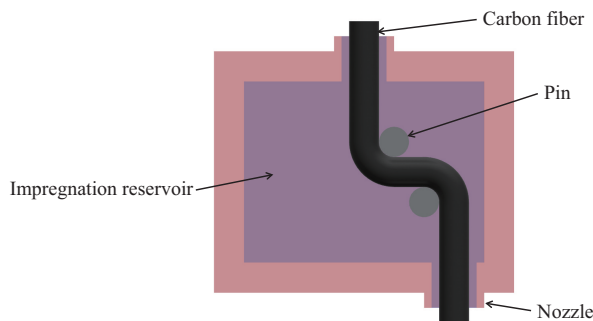


图1 原位销钉辅助熔融浸渍系统

Fig. 1 In-situ pin-assisted melt impregnation system

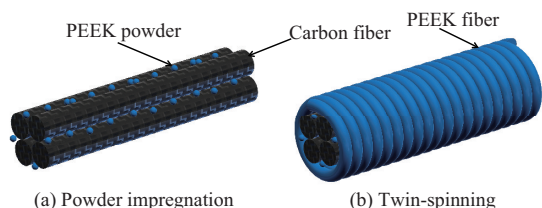


图2 粉末浸渍与双纺技术制备复合材料纱线

Fig. 2 Manufacturing of composite yarns through powder impregnation and twin-spinning

明,这种预浸渍处理使最终打印构件的孔隙率大幅降低,层间剪切强度显著提升。

2.3 延缓环境老化的多级防护设计与结晶调控

CCFRTP在湿热、腐蚀等极端工况下的服役稳定性,本质上取决于“纤维/基体”界面的抗侵蚀能力以及基体自身的微观结构演化。因此,通过表面改性构建致密的化学键合界面,并利用环境热效应调控结晶行为,是抑制环境损伤、延长材料寿命的核心策略。

建立稳固的化学键合网络可以防止水分侵入与界面分离。Zhao等^[41]采用“液相氧化+偶联剂接枝”的联合处理工艺,利用硅烷偶联剂KH550在碳纤维与基体间构建了强有力的化学键。这种化学桥接作用不仅大幅提升了初始界面强度,更有效抵消了水分子对界面的极性攻击,使得材料在严苛的湿热老化后仍能保持较高的力学性能与界面完整性。经过240 h加速老化后,复合材料弯曲强度与层间剪切强度保留率仍分别达到66%和67%。

除了化学键合,提升组分间的相容性以消除微观缺陷,也是阻断腐蚀介质扩散路径的关键。Yan等^[42]针对CF/PEEK体系,合成了具有高度分子结构相似性的水性PEEK-NH₂上浆剂,克服了传统环氧上浆剂耐温性差、易降解的缺陷。该上浆剂在纤维表面形成了均匀且致密的“亲和型”过渡层,有效填补了界面处的微孔隙,从源头上减少了水分子的驻留空间。Ren等^[43]则进一步引入氧化石墨烯与磺化聚醚砜构建杂化上浆层,利用磺化聚醚砜的双亲特性显著提高了纤维表面的自由能与润湿性。这种高致密的界面层通过共轭作用及氢键实现了纤维与树脂的紧密咬合,消除了因浸润不良产生的“死角”,从而延缓了环境介质对承力骨架的侵蚀。

值得注意的是,环境因素并不完全导致性能退化,合理利用湿热条件下的分子链运动可实现材料性能的“逆势提升”。Borba等^[17]发现,高温提供了分子链重排所需的活化能,诱导半结晶基体发生了二次结晶,这种由无定形区向有序晶区的转变显著增强了基体刚性。这一现象表明,通过对结晶动力学的被动或主动调控,可将环境热应力转化为优化微观结构的驱动力,从而抵消塑化效应带来的负面影响。

2.4 多材料混合增材制造与智能闭环控制

针对1.4节所述的单一材料功能集成度低以及异质界面兼容性差等瓶颈,单纯的工艺参数优化已难以满足复杂构件

对“轻量化、高承载、智能化”的综合需求。因此,可以借鉴多材料协同设计理念,发展多材料增材制造(MMAM)工艺,并建立基于人工智能的闭环控制系统。

聚焦多材料混合制造与结构优化,单一材料的3D打印技术常受制于层间性能弱与制造效率低的矛盾。为了突破这一局限,Bean等^[44]提出了多材料先进增材制造的策略。该策略主张在基础聚合物结构中“定点”嵌入连续纤维增强相,实现局部的定向强化。这种多材料集成的思路为CCFRTP解决各向异性难题提供了重要的方法论支撑,即通过在承力路径上精确布置连续碳纤维,而在非承力区采用低成本基体填充,从而在宏观上构建出兼具低成本与高性能的梯度复合结构。

关于制造过程的智能监控与闭环反馈,传统的“开环”制造模式无法应对环境扰动导致的随机缺陷,而引入机器学习算法是实现“零缺陷”制造的质变飞跃。Chi等^[45]针对3D打印连续碳纤维复合材料,开发了一种基于计算机视觉与机器学习的在线监测与闭环控制系统。该系统利用卷积神经网络实时捕获并分析打印过程中的图像数据,能够精准识别纤维断裂、层间间隙及基体堆积等微观缺陷。更关键的是,该系统构建了“感知-决策-执行”的闭环反馈机制,一旦检测到异常,即可毫秒级动态调整打印温度、速度等工艺参数。实验表明,这种智能闭环控制显著提高了CCFRTP成型质量的一致性,有效解决了长时无人值守制造中的稳定性难题。

通过MMAM工艺实现结构的宏观性能定制,并利用人工智能实现工艺过程的“自适应调节”,将彻底改变CCFRTP的制造范式。

综上所述,为直观揭示CCFRTP性能缺陷与解决手段之间的对应关系,本文在此对引发材料力学、界面、耐久性及智能响应等性能缺失的根本原因,及其对应的先进制造与改性优化策略进行了全面汇总,详见表2。

3 总结

本文综述了连续碳纤维增强热塑性复合材料(CCFRTP)在力学行为、界面机理、环境稳定性及智能化制造等方面的最新研究进展。通过对材料失效机理的深入剖析与工艺优化策略的归纳,主要总结如下。

(1)CCFRTP力学性能的离散,主要归因于制造环节中孔隙的滞留、纤维屈曲以及残余应力的累积。突破这一瓶颈的关键在于摒弃单一参数的试错,转向精确的多物理场工艺窗口构建。通过有效耦合树脂的流变学与结晶动力学,并辅以主动压实反馈机制与真空排气干预,能够在底层制造逻辑上保障微观形貌的致密化。同时,依托变速打印等自适应路径规划策略,可有效消除复杂曲率带来的纤维偏离,确保构件的宏观力学一致性。

(2)碳纤维本身的化学惰性叠加热塑性熔体极高的表现黏度,共同阻碍了树脂的深层浸渍,导致界面脱黏成为诱发早期结构破坏的主要因素。应对此类微观损伤,必须采取双管齐下的策略:一方面,借助纳米改性等技术重塑纤维表面

表2 CCFRTP性能缺陷机制与优化策略总结

Tab. 2 Summary of performance defect mechanisms and optimization strategies for CCFRTP

Performances	Causes of performance deficiencies	Optimization Strategies	Ref.
Mechanical response & structural integrity	Anisotropy and notch sensitivity	Rheology-crystallization coupling control	[24–28]
	Voids, fiber waviness, and weak interlaminar bonding	Active pressure field and vacuum assistance	[29–31]
	Non-uniform cooling causing shrinkage and residual stress	Kinematic trajectory planning and thermal history management	[32–34]
Fiber/resin interfacial bonding quality	Chemical inertness of carbon fiber surface	Fiber surface activation and nano-enhanced sizing	[35–38]
	High viscosity of resin melt hindering impregnation	Physically enhanced impregnation (mechanical yarn spreading/powder impregnation)	[39–40]
Durability in complex environments	High-temperature softening and hygrothermal plasticization	Construction of chemical bonding networks (e.g., silane coupling)	[41]
	UV photo-oxidative degradation	Barrier construction via hybrid affinity transition layers	[42–43]
	Synergistic damage from corrosion and freeze-thaw cycles	Passive/active crystallization regulation utilizing environmental thermal stress	[17]
Reliability of intelligent function integration	Heterogeneous fillers disrupting matrix continuity	Multi-Material Additive Manufacturing (MMAM) for directional reinforcement	[44]
	Interference of sensing signals and degradation of healing efficiency	Closed-loop control based on machine vision and machine learning	[45]

的活性过渡层;另一方面,引入原位销钉展纱或粉末悬浮液预浸渍等创新工艺,以冲破高黏度熔体的渗透壁垒。

(3)在湿热及化学腐蚀环境中,水分子沿界面的楔入以及基体的吸湿塑化,会引发材料发生深刻的物理-化学耦合降解。为提升环境耐久性,构建集阻隔与微观重组于一体的防护体系显得尤为重要。除了利用硅烷偶联剂及致密涂层切断侵蚀介质的扩散路径外,若能合理引导服役环境中的热输入去激发基体的二次结晶行为,将有效转化环境劣势,从而提升极端工况下的服役可靠性。

(4)为全面实现从实验室验证到规模化应用的跨越,CCFRTP未来的演进方向应深度聚焦于多材料混合增材制造(MMAM)与底层数字驱动的智能闭环控制。针对单一材料难以兼顾“轻质、高强、多功能”的综合诉求,MMAM技术允许在非承载区使用低成本或具备特定感知功能的树脂基体,而在主应力传递路径上精准锚定连续碳纤维束,从而在宏观尺度上实现成本与力学响应的最优配置,并为智能传感元件的无损嵌入提供空间。在此基础上,为克服传统“开环式”加工对随机环境扰动的脆弱性,亟需将计算机视觉与机器学习算法引入制造现场。通过打通“原位感知-自主决策-动态补偿”的数据链路,加工设备能够对纤维断丝、层间微孔洞等隐蔽缺陷实现毫秒级在线捕捉与工艺参数修正。这种具备自我纠偏能力的智能制造范式,将极大收窄成型质量的波动带,是推动复合材料实现结构-功能一体化及高质量批量制造的核心技术依托。

参考文献

[1] TEGGINAMATH A, et al. A review: Thermoplastic composites in aerospace applications[C]//62nd International Conference of Machine Design Departments (ICMD 2022). Dordrecht: Atlantis Press, 2024:329–336.

[2] OZTURK F, et al. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2023, 37(9):3 084–3 116.

[3] 肇研,等.复合材料学报, 2022, 39(9):4 274–4 285.

ZHAO Yan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 274–4 285.

[4] 曹建凡,等.复合材料学报, 2023, 40(3):1 229–1 247.

CAO Jianfan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1 229–1 247.

[5] 储浩,等.复合材料学报, 2025, 42(9):4 903–4 927.

CHU Hao, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(9): 4 903–4 927.

[6] 霍红宇,等.材料工程, 2025, 53(3):44–53.

HUO Hongyu, et al. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(3): 44–53.

[7] HOLMES J, et al. Composites Part B:Engineering, 2022, 229. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109448.

[8] GOH G D, et al. Composites Part B:Engineering, 2021, 216. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108840.

[9] ANDRIß C, et al. Composites Part B:Engineering, 2022, 235. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109740.

[10] ANDRIß C, et al. Composites Part B: Engineering, 2023, 259. DOI:10.1016/j.compositesb.2023.110734.

[11] LI L J, et al. Composites Science and Technology, 2022, 227. DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109618.

[12] SAEED K, et al. Polymers, 2024, 16(5). DOI: 10.3390/polym16050579.

[13] MOGHANLOU M R, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 192. DOI:10.1016/j.compositesa.2025.108805.

[14] TOUCHARD F, et al. Composites Part B:Engineering, 2021, 218. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.108891.

[15] ZHU T Q, et al. Composites Science and Technology, 2023, 244. DOI:10.1016/j.compscitech.2023.110300.

[16] DUTRA T A, et al. Composites Science and Technology, 2021, 213. DOI:10.1016/j.compscitech.2021.108962.

[17] BORBA N Z, et al. Composite Structures, 2021, 255. DOI:

- 10.1016/j.compstruct.2020.112871.
- [18] MAHAT K B, et al. *Macromolecular Symposia*, 2016, 365(1): 157–168.
- [19] DONG S C, et al. *Journal of Building Engineering*, 2024, 98. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.111055.
- [20] JIN F K, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 508. DOI: 10.1016/j.cej.2025.160450.
- [21] LIU S, et al. *Composites Science and Technology*, 2023, 243. DOI:10.1016/j.compscitech.2023.110264.
- [22] LUAN C C, et al. *Composites Science and Technology*, 2020, 188. DOI:10.1016/j.compscitech.2019.107986.
- [23] JI Y Y, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 276. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111356.
- [24] LIU K, et al. *Thin-Walled Structures*, 2025, 213. DOI: 10.1016/j.tws.2025.113224.
- [25] MOTOCHIKA T, et al. *Advanced Composite Materials*, 2023, 33 (1):71–89.
- [26] LUISIER A, et al. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34(7):583–595.
- [27] BRANDT L, et al. *Journal of Composite Materials*, 2023, 57(24): 3 897–3 906.
- [28] CAO Z L, et al. *Materials*, 2020, 13(19). DOI: 10.3390/ma13194417.
- [29] VENKATESAN C, et al. *Composite Structures*, 2023, 309. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.116725.
- [30] ICHIHARA N, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 291. DOI:10.1016/j.compositesb.2024.112052.
- [31] LI H M, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109277.
- [32] QUAN Z Z, et al. *Composites Science and Technology*, 2024, 255. DOI:10.1016/j.compscitech.2024.110723.
- [33] LIMAYE M, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 235. DOI:10.1016/j.compositesb.2022.109728.
- [34] BAROCIO E, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 275. DOI:10.1016/j.compositesb.2024.111325.
- [35] ZHANG G X, et al. *Carbon*, 2008, 46(2):196–205.
- [36] ZHANG S B, et al. *Surface and Interface Analysis*, 2018, 51(2): 184–189.
- [37] SASIKUMAR R, et al. *Composites Science and Technology*, 2024, 248. DOI:10.1016/j.compscitech.2024.110468.
- [38] DAI S T, et al. *Composites Science and Technology*, 2024, 245. DOI:10.1016/j.compscitech.2023.110328.
- [39] AN Y S, et al. *Additive Manufacturing*, 2022, 55. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102860.
- [40] ZHANG J H, et al. *Materials*, 2023, 16(3). DOI: 10.3390/ma16031168.
- [41] ZHAO H B, et al. *Composites Communications*, 2023, 38. DOI: 10.1016/j.coco.2023.101508.
- [42] YAN T W, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 199. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108258.
- [43] REN T N, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138 (45). DOI:10.1002/app.51327.
- [44] BEAN P, et al. *Journal of Composites Science*, 2025, 9(11). DOI: 10.3390/jcs9110595.
- [45] CHI X Y, et al. *Additive Manufacturing Frontiers*, 2025, 4(2). DOI:10.1016/j.amf.2025.200196.