

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.026

激光原位固化热塑性复材制造及监测技术进展

纪毓杨^{1,2,3}, 来晓靓^{2,3}, 谢富原^{2,3}, 栾丛丛¹, 顾星河^{2,3}, 林秋实^{2,3}, 傅建中¹

(1. 浙江大学机械工程学院, 浙江杭州 310000; 2. 浙江省飞机复合材料技术创新中心, 浙江杭州 310000;
3. 浙江华瑞航空制造有限公司, 浙江杭州 310000)

摘要: 连续碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)凭借其优异的力学性能、可熔可焊及可回收等优势,已成为复合材料领域的发展前沿和竞争焦点。系统综述了CFRTP激光原位固化技术的研究进展,重点涵盖了制造前期预浸料改性与铺放策略规划、制造过程中的工艺参数优化与后处理技术,以及贯穿全寿命周期的缺陷与损伤监测方法。分析表明,开发高效可工程化的预浸料层间改性技术并调控其本体特性(如结晶度、粗糙度)是提升原位固化构件力学性能的关键途径;工艺参数优化仍是保障成型质量的主流手段;适宜的后处理工艺能有效改善构件的结晶度、力学性能、表面质量并降低孔隙率;而实时在线缺陷检测与服役过程健康监测则是确保障成型质量与使用安全极具前景的解决方案。

关键词: 激光原位固化;碳纤维;热塑性复合材料;层间界面;工艺优化;在线监测;结构健康监测

中图分类号: TB322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0221-08

Research progress on manufacturing and monitoring technologies for laser in-situ consolidated thermoplastic composites

Ji Yuyang^{1,2,3}, Lai Xiaoliang^{2,3}, Xie Fuyuan^{2,3}, Luan Congcong¹, Gu Xinghe^{2,3}, Lin Qiushi^{2,3}, Fu Jianzhong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China; 2. Zhejiang Composite Material Application Technology Innovation Center, Hangzhou 310000, China; 3. Zhejiang Huarui Aerospace Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic composites (CFRTP) have emerged as the development frontier and competitive focus in the field of composite materials, owing to their outstanding mechanical properties, weldability, melt-processability, and recyclability. The research progress of laser in-situ curing technology for CFRTP was systematically reviewed, with particular emphasis on prepreg modification and placement strategy planning during the preparatory stage, process parameter optimization and post-processing technology during manufacturing, and real-time defect and damage monitoring methods throughout the whole life cycle. The analysis indicates that developing efficient, engineered interlayer modification techniques for prepreps, along with controlling their intrinsic properties, such as crystallinity and surface roughness, represents a key approach to enhancing the mechanical properties of in-situ consolidated components. Besides, optimizing processing parameters remains the mainstream method for ensuring manufacturing quality. Additionally, appropriate post-treatment process can effectively improve the crystallinity, mechanical properties and surface quality of the components and reduce the porosity. Moreover, real-time online defect detection and in-service health monitoring offer promising solutions for guaranteeing manufacturing quality and operational safety.

Keywords: laser in-situ consolidation; carbon fiber; thermoplastic composites; interlayer interface; process optimization; online monitoring; structural health monitoring

纤维增强复合材料作为高端装备减重增效的关键结构材料,凭借其高比强度和高比模量等优异特性广泛应用于航

空航天、轨道交通、风电和能源储运等领域。相较于传统热固性复合材料,碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)具有可

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LMS26E050009),国家自然科学基金项目(52175440)

通信作者: 栾丛丛,博士,助理研究员,研究方向为复合材料增材制造

收稿日期: 2026-03-19

引用格式: 纪毓杨,来晓靓,谢富原,等.激光原位固化热塑性复材制造及监测技术进展[J].工程塑料应用,2026,54(6):221-228.

Ji Yuyang, Lai Xiaoliang, Xie Fuyuan, et al. Research progress on manufacturing and monitoring technologies for laser in-situ consolidated thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 221-228.

回收利用、可一次性直接制造和成型周期短等优势,在顺应绿色可持续发展潮流的同时,正逐渐成为复合材料领域的前沿热点与竞争焦点。近年来,以碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)和碳纤维增强低熔点聚芳醚酮(CF/LMPAEK)为代表的高性能CFRTP,更因其优异的抗冲击、抗疲劳性能和耐高温、耐腐蚀特性在火箭壳体、飞机结构件、新型化学储罐等极端应用场景下展现出巨大潜力,受到学术界和工业界的广泛关注。激光原位固化技术的出现为CFRTP复杂构件的高质高效制造注入了新动力。该技术充分利用CFRTP预浸带层间熔融黏接特性,无需热压罐工艺即可实现目标构件的一次性原位成型,在降低制造成本、缩短生产周期的同时,为制造大型、整体化的复杂结构提供了有效途径。然而,激光原位固化技术是涉及多学科交叉的复杂过程,其工程应用仍存在如下几项技术瓶颈:层间界面结合强度不足,成为结构整体性能的“薄弱环”;快速冷却过程导致基体结晶度偏低,无法充分发挥材料性能;工艺参数繁多复杂且相互耦合,优化过程时间和材料成本高;制造过程保压时间短,极易引入孔隙、分层等内部缺陷,损害结构的完整性及力学性能;缺乏有效的原位质量监控与结构健康监测方法,难以保障大型复杂构件的制造可靠性与服役安全性。笔者聚焦于此,系统梳理了面向高性能热塑性复合材料原位固化技术的全流程关键研究进展,主要涵盖以下三个核心方面:1)制造前的预浸料特性调控及路径规划;2)制造过程中的层间力学性能优化及缺陷实时检测;3)制造后的后处理工艺及服役过程中的结构健康监测。在此基础上,本文总结了原位固化CFRTP构件的关键技术瓶颈,并对未来发展方向进行了展望。

1 预浸料改性与铺放策略规划

预浸料固有性质与工艺规划策略作为制造过程的关键前置环节,对制造过程稳定性及最终成型件质量具有决定性影响。目前,相关优化工作主要围绕热塑性预浸料本体改性、设备误差补偿以及制造策略优化三个维度展开。

首先,在预浸料层面,优化方向主要聚焦在内部纤维/树脂界面的改性、预浸料物化性能调控及层间界面改性。尽管针对纤维/树脂微观界面的改性手段(如等离子体处理、上浆剂、酸蚀、氧化及接枝等)已有诸多详尽综述^[1-2],但针对预浸料宏观特性及层间界面改性的研究仍相对匮乏。因此,本文将重点对该部分的现有工作进行梳理。

针对层间界面改性,Chahine等^[3]采用空气等离子体处理碳纤维增强低熔点聚芳醚酮(CF/LMPAEK)预浸料表面,将样件拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度(ILSS)分别提高了7.6%、18%和18.7%。Su等^[4]利用喷涂法将碳纳米管(CNTs)引入CF/PEEK预浸料表面,虽将热压样件的ILSS和抗弯强度分别提高了35.85%和25.4%,但由于CNTs附着不牢固,难以直接应用于原位固化工艺。为了解决附着问题,Zhang等^[5]先通过溶液挥发法将多壁CNTs分散在CF/PEEK预浸料表面,并引入低压力预热压以将多壁CNT嵌入到预浸料表面树脂中。然而,研究发现该处理导致原位固化样件的

ILSS不升反降,只有通过后续的热压处理才能在低浓度掺杂下显著提升ILSS。总体而言,目前针对预浸料层间界面的改性处理对层间力学性能的提高有限,且诸如纳米颗粒改性等方法在原位固化工艺工程化应用中面临诸多挑战,主要表现在纳米颗粒在预浸料表面的稳定均匀黏附仍处在实验室层面,缺乏高效低成本的批量化生产方案。

针对预浸料固有特性,现有研究主要关注表面粗糙度、孔隙率和结晶度等指标。Jensen等^[6]提出预浸料自身的缺陷和粗糙度直接影响最终成型件的性能。Arquier等^[7]进一步指出,较低的表面粗糙度有利于促进层间紧密接触从而降低层间孔隙率,且预浸带中的水分等挥发性物质亦是孔隙形成的重要诱因。

此外,原位固化过程中快速的升降温速率会降低树脂基体的结晶度,进而影响层间界面的力学性能及损伤形式。通常,热压罐成型样件的结晶度被视为基体完全结晶的基准(CF/PEEK为40%~50%,CF/LMPAEK为25%~32%),而原位固化样件的结晶度往往仅能达到该基准的70%。尽管优化基板加热等工艺参数可显著提升结晶度,但其效果随样件厚度增加而衰减,且铺放过程热历史复杂,目前尚缺乏对结晶行为及调控方法的系统性研究。对此,Comer等^[8]在研究中指出,由于部分预浸带在制造中未完全熔融,会保留预浸带原始结晶度到最终成型件,因此通过热处理提高预浸带本身结晶度可能有利于提高最终成型件结晶水平。除此之外,也有学者通过在树脂中添加成核剂减小结晶球状体尺寸并加快结晶速度,使弯曲强度和模量增加了15%,0°抗压强度提升35%^[9]。

其次,在工艺规划层面,设备精度与铺放策略是影响成型质量的关键。针对设备误差可能引入的制造缺陷,Miao等^[10]建立了原位固化制造设备及辊轮变形的预测模型,通过将变形误差补偿到初始轨迹中,提高了成型件的加工质量。此外,合理的铺放策略(如铺层角度和路径规划)也会提升成型件的力学性能。Liv等^[11]通过设计铺层间错配角,可通过非常规堆叠序列的厚度确定分层位置,并有效增强了材料在低速冲击后的强度保持能力。李环宇等^[12]亦指出铺层角度深刻影响碳纤维层合板的能量吸收性能及断裂模式,并确定了[0/0/45/-45]s为最佳吸能铺层方案。Double-Double非常规铺层设计也被用于实现结构减重^[13]。最新的研究结合机器学习方法提出了层合板角度多目标优化框架,通过铺层优化提升了复合材料层合板的抗冲击性能,将损害面积和位移面积减少了22.46%和11.42%^[14]。近年来,诸多学者出于减重、提升抗冲击性能等目的探索了非常规铺层的可行性,但除单项目性能外,还应进行更加全面的性能测试以验证其应用可行性。

进一步地,重叠和间隙作为原位固化制造过程中的常见缺陷会影响成型件性能,其产生与铺放策略规划密切相关。Lan等^[15]在研究中表明间隙缺陷区域会出现富树脂区,而重叠缺陷区域则形成富纤维区,且间隙对剪切性能的削弱作用

更为显著。Raps等^[16]进一步研究原位固化过程中引起的真实三角形间隙重叠缺陷对构件性能的影响,发现间隙重叠会导致局部温度和几何形貌变化,并影响构件的失效形式。除考虑对力学性能的影响外,还有学者利用重叠和间隙缺陷实现对层合板基频的调控与优化^[17]。值得注意的是,Dutta等^[18]发现间隙/重叠缺陷显著影响层合板的质量、热屈曲行为和屈曲载荷,而当铺放路径丝束间移位距离与已铺放丝束宽度一致时,预浸料宽度变化对结构性能影响微乎其微。这说明重叠和间隙缺陷可以通过合理匹配预浸带铺放后实际尺寸与铺放路径偏移进行改善。同时,铺放路径优化也是决定成型件精度和性能的关键因素之一。Jiang等^[19]基于路径的误差建立了理论评估模型,通过铺放路径优化将最大路径误差和平均路径误差分别降低了63.4%和69.0%。此外,针对实际热源的工艺仿真模拟也是指导实际制造过程的重要手段^[20-21]。

综上所述,预浸料的固有特性与铺放策略是决定最终构件质量的基础因素。最新研究主要集中于通过表面处理、纳米颗粒掺杂等方式改善层间界面性能,以及优化铺放路径以减少几何缺陷。这些研究为提升原位固化热塑性构件质量提供了前瞻性视角,但在以下方面仍需进一步研究:1)热塑性预浸料层间改性方法多处于实验室研究阶段,需进一步优化其工程化应用的稳定性、成本和效率,开发专用于原位固化工艺的改性预浸料;2)铺放策略与工艺参数的耦合程度不够,需进一步数据积累以建立基于工艺参数的铺放路径补偿方法。

2 原位固化过程工艺参数优化

目前针对激光原位固化制造中的优化工作主要聚焦于工艺参数优化,所涉及的关键工艺参数如图1所示。其中,铺放速度和激光功率(温度)作为两个相互耦合的核心工艺参数,对成型件力学性能的影响最为显著,因而受到了最广泛的关注。由于CFRTP达到最佳熔融状态所需的能量窗口较窄,能量输入不足会导致树脂熔融不充分,而输入过量则会引发树脂基体的蒸发降解。在原位固化过程中,预浸料吸收的热量除取决于自身的吸收率外,主要由激光照射时间和单位时间的能量输入决定。激光功率(温度)的提高增加了单位时间的能量密度,而铺放速度的提升则缩短了激光照射时间,二者的协同作用直接决定了成型件的最终性能。

鉴于层间黏接质量通常是原位固化成型件的薄弱环节,现有研究多将其作为核心优化指标。Stokes-Griffin等^[22]发现在高铺放速度(400 mm/s)下,CF/PEEK成型件的短梁剪切强度随激光温度的升高而显著改善,这是因为高速铺放需匹配更高的温度以确保预浸带充分熔融;而在相对低的铺放速度(100 mm/s)下,层间虽易于实现充分黏接,但当激光温度达到600 °C时,明显的树脂降解现象导致了短梁剪切强度的下降。Qureshi等^[23]进一步指出铺放速度和热源温度对ILSS的影响是多因素权衡的结果:一方面,较低的速度延长了界面分子的扩散时间并增加了热量吸收,有利于基体的流动扩

散及ILSS的提升;另一方面,若由此导致温度过高引发基体降解,则会显著削弱ILSS。

此外,针对层间性能表征方法的创新亦是研究热点。Grouve等^[24]开发了一种芯轴剥离装置以评估层间黏接强度,研究表明高铺放速度配合低输入功率可获得优异的界面断裂韧性。同时,楔块剥离测试以其制样简单方便、节省材料的特点获得越来越多的关注。Wang等^[25]基于楔块剥离实验作为界面性能验证指标开展实验,明确其制样仅需2~6层,相对短梁剪切试验和双悬臂梁测试有效率和成本优势。Clancy等^[26]则设计了专用楔块剥离装置以探索铺放速度与转向半径的影响,发现宽6.35 mm的CF/PEEK预浸料可以实现400 mm的转向半径,且铺放速度和转向半径均会对预浸带尺寸和层间质量产生影响。Wynn等^[27]则融合微观表征和概率机器学习方法更深入地揭示了楔块剥离样件的失效模式。除对层间性能进行研究之外,Comer等^[8]还将原位固化CF/PEEK样件的弯曲强度、刚度及开孔压缩强度与热压罐成型件进行了系统对比。

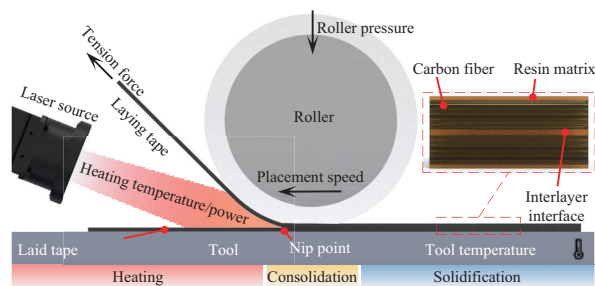


图1 原位固化技术原理示意图及关键工艺参数

Fig. 1 Principle diagram and key process parameters of in-situ consolidation technology

除铺放速度和激光功率外,诸多学者针对辊压力、模具温度及张力等其他工艺参数也展开了深入优化。Miao等^[28]的研究表明辊压力的增加可促进预浸带间的亲密接触程度从而减少孔隙缺陷,通过将辊压力从48 N提升至109 N,成功使ILSS提升了9.08%。Raps等^[29]在研究中发现基板加热能显著提高成型件的ILSS,当基板加热至250 °C时,成型件结晶度较未加热时提升了15.7%,有效促进了层间黏接。Wang等^[30]发现首层和工装模具之间的有效初步黏接有利于提高成型件质量,并探索了基板材料类型及表面粗糙度的影响。Zhang等^[31]指出辊压力会影响树脂基体的分布进而影响剥离强度,而提高模具温度及引入编织材料基板有助于抑制翘曲变形。针对张力参数,Zhang等^[32]指出预浸带张张力与送丝精度及铺层性能密切相关,将张紧力控制在2.5~25 N可获得较优的制造质量。

综上,工艺参数优化是确保热塑性复材层间界面性能的核心环节,目前仍是学术界和工业界的研究焦点。现有研究已经就激光温度/功率、铺放速度、辊压力、模具温度、丝束张力等关键工艺参数形成了一定的经验性规律。然而参数间的耦合关系使得传统工艺参数优化方法效率较低,且难以找

到全局最优解。人工智能指导多目标参数优化是极有潜力的发展方向,且高效稳定的力学表征方法也是提高优化效率的有效途径。

3 原位固化热塑性复材构件的后处理技术

制造后的后处理工艺是进一步提升成型件质量、弥补原位固化缺陷的重要手段,其核心目的在于降低孔隙率、提高结晶度及增强力学性能。针对离线后处理技术,Schiel等^[33]将制造的聚芳醚酮基碳纤维复合材料试样在290℃的烘箱里进行退火处理后实现了结晶度和剪切强度的提高。van de Werken等^[34]则引入热等静压技术对CF/PEEK复合材料进行后处理,研究表明该工艺能显著减少内部孔隙、促进PEEK结晶及层间分子链扩散,最终使样件的弯曲强度和ILSS分别提升了46%和30%。Chen等^[35]将原位固化样件进行热压罐后处理,在降低孔隙率并提高结晶度的同时,消除了原位制造过程中产生的复杂热历史,显著提升了ILSS和压缩强度。Karimi等^[36]从孔隙率影响的角度,对比了热压罐后处理与真空袋后处理对CF/PEEK原位固化样件的影响,发现当样件内部存在较多连通孔隙时,仅使用真空袋后处理亦可达到媲美热压罐的处理效果。此外,原位复通(Repass)作为一种在线后处理策略也备受关注。顾星河等^[37]同时探究了原位固化层合板的原位复通和热压罐后处理方法,其中热压罐后处理后层合板的0°压缩强度提升高达36.1%。此外,现有诸多研究表明该工艺会对成型件的孔隙含量、ILSS、表面粗糙度及结晶度产生影响,但目前关于其具体影响机制尚未达成一致的规律性结论。

可以看出,各种后处理技术会对原位固化热塑性构件的孔隙率、结晶度、力学性能等产生显著影响,近年来,为提高生产效率,降低能耗,烘箱等非热压罐(OoA)后处理方法的研究越来越受到研究人员的关注,原位固化配合后处理的组合工艺可以作为一种过渡方法,对热塑性复材的工程化应用与推广有重要意义。

4 原位固化制造过程缺陷检测技术

激光原位固化技术具有可实现复杂路径规划、固结时间较短、工艺参数复杂等特点,这使得制造过程中难以完全避免各类缺陷的产生。总体而言,常见的缺陷产生原因包括预浸带自身缺陷、加工条件、路径偏差以及设备误差等。如图2所示,现有研究中常见的原位固化缺陷主要可归纳为四类:第一是以间隙、重叠、扭曲、褶皱等为代表的铺放位置缺陷,这在转向铺放中尤为显著;第二是以孔隙、桥接、分层等为代表的层间黏接缺陷,其普遍与工艺参数匹配不当有关;第三是源于加工环境或过程碎屑污染的异物夹杂缺陷;第四是涉及预浸料自身破损、开裂及尺寸波动的原材料缺陷^[39]。Croft等^[40]在研究中发现间隙、重叠、扭曲等缺陷可导致成型件开孔拉伸和开孔压缩强度下降高达13%。Woigk等^[41]研究了不同间隙和重叠缺陷的组合对力学性能的影响,发现单独的间隙和重叠缺陷对拉伸和压缩强度的影响不显著,而间隙

和重叠缺陷的组合导致拉伸和压缩强度分别降低了7.4%和14.7%,其特别指出在同一位置的缺陷堆积会加剧对成型件力学性能的负面影响。Raps等^[16]则是聚焦更贴近现实的三角形重叠间隙缺陷,发现重叠间隙对拉伸强度、抗压强度的影响可以接受,但其会作为初始裂纹的起始点。Pourahmadi等^[42]在研究中提到孔隙率是影响层间剪切强度的关键因素之一。

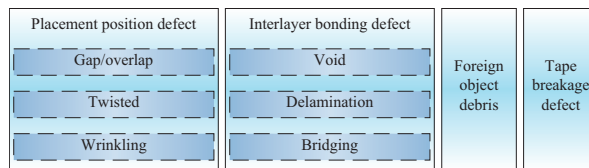


图2 原位固化制造过程中的常见缺陷

Fig. 2 Common defects in in-situ consolidation manufacturing process

鉴于制造缺陷对构件力学性能的潜在威胁,建立高效的检测体系对于保障加工质量至关重要。目前的无损缺陷检测方法主要分为离线检测和原位在线检测。其中离线检测技术已经相对成熟,常见的诸如X射线检测(CT)^[43-44]、超声波C扫描^[45-46]等传统缺陷检测方法可用于实现缺陷的高精度定位及定量表征,并作为验证新缺陷检测方法的基准。近年来,也有诸多研究在这些方法基础上进行改进以进一步增加其检测性能并拓展其应用场景。针对超声检测,相控阵超声检测因其在检测分辨率、检测效率、样件适应性、缺陷表征等方面的全面升级而备受关注^[47]。此外,Dubois等^[48]讨论了激光超声在航空复杂复合材料构件缺陷检测中的应用。针对X射线检测,已经在空间分辨率、检测时间等方面取得了诸多进展^[49]。Wu等^[50]和French等^[51]更是设计了一种原位X射线成像设备用于复合材料变形及失效检测。然而,离线检测方法的使用始终需要暂停样件制造,然后移动到专门的检测设备工位对结构中的缺陷进行检测,这显著降低了检测效率,从而限制了其应用场景的拓展。

为突破离线检测的效率瓶颈,在线实时缺陷检测方法越来越受到研究人员的关注。在线缺陷检测能够在制造过程中及时发现并记录缺陷,为缺陷的及时修复提供了可能,当缺陷较为严重难以修复时,可以及时停机以避免更多的工时和材料损耗^[52]。目前主流的制造过程在线缺陷检测方法通常基于视觉原理。其中,可见光机器视觉是最直观的监测手段,王国全等^[53]分别结合图像处理算法实现了对预浸料纹理角度及表面裂纹、孔洞、划痕、褶皱等缺陷的检出。进一步将激光投影仪引入进行辅助,研究了基于激光投影系统的视觉检测方法。Shadmehri等^[54]将激光投影模块与视觉模块协同,验证了这种方法对纤维角度偏移、纤维束移位和间隙等缺陷的检测能力,同时也指出了激光投影模块存在难以进行曲面精确投影和预浸带表面反射率高导致图像不清晰的难点。张杰等^[55]融合线激光传感器提出了2.5D图像缺陷检测方法,实现自动铺丝过程中多类别缺陷检测,总体误检率和漏检率分别达到7.3%和4.1%,最大检测速度为2 m/s。为进

一步提升检测的精度,配合激光轮廓仪的3D点云缺陷检测也是研究的主流,Wen等^[56]为减少点云倾斜、表面微观结构波动、缺陷尺度小等问题带来的检测误差,提出了基于点云分割的叠加表面缺陷检测方法。近年来红外热成像技术在原位固化制造过程缺陷检测方面也取得了较好的效果。Denkena等^[57]将红外热像仪测量数据与图像处理技术相结合,通过对比分析新铺层与基底的温差分布实现了对重叠、间隙、扭曲和桥接等缺陷的检测。Marani等^[58]则引入脉冲热成像方法,通过外部脉冲热源对材料施加瞬时热扰动,进而分析温度历史实现缺陷辨别。值得注意的是,数字图像相关(DIC)技术虽在形变监测中表现优异,但传统DIC需预制散斑的步骤限制了该方法的实时检测能力。为此,Rajan等^[59]在待铺放预浸料表面事先制备好散斑并记录,在铺放过程中使用DIC技术实现了褶皱缺陷的识别。然而,这种方法制备的散斑会影响下一层的铺放,没有解决DIC在线检测的根本问题。Shadmehri等^[60]进一步通过高分辨率投影仪投射图案来代替传统的散斑制备,使用DIC技术实现了对预浸带位置 and 间隙缺陷的检测,但目前的检测结果噪声较为严重。

总体而言,在线缺陷检测是提高检测效率、实现质量闭环控制的关键技术,视觉和热成像作为主流的检测方法能有效识别间隙、重叠、褶皱等表面或近表面缺陷。然而这些技术的检测精度和速度受限于照明条件、材料表面反射率、复杂的铺放路径等因素。将多传感器数据进行融合,并结合人工智能算法实现缺陷的自动分类与评估,是提高在线检测全面性和准确性的必然趋势^[61-62]。此外,目前最新研究已初步实现在缺陷检测的基础上自动返工,是提升检测效率提高良品率的有效方法^[63]。同时,目前原位固化过程在线缺陷检测技术成熟度还有待提升,需进一步充实面向热塑性复材的原位固化过程缺陷数据库。

5 原位固化成型件服役过程结构健康监测

CCFRTP构件在服役过程中会经历层间剥离、纤维/基体脱黏、纤维断裂和基体裂纹等复杂的损伤行为,这些损伤通常较为隐蔽(构件表面无可目视痕迹),当这些不可见缺陷累积至临界值时可能引发突发性结构失效,给CFRTP构件的结构健康和使用寿命预测带来了巨大挑战。因此,建立实时的结构健康监测(SHM)系统,实现损伤的早期预警,是确保CFRTP构件服役安全的关键^[64]。传统的健康评估策略多依赖定期的停机离线检测,但这不仅会显著降低生产效率,且对于压力容器等涉及腐蚀性介质或拆装复杂的构件而言实施难度极大^[65]。并且,目前对复合材料结构的损伤扩展预测工作仍然存在挑战,故难以对定期检查维护的周期进行准确估计^[66]。为了解决上述问题,在线原位结构健康监测(SHM)技术应运而生,研究表明其与传统方法相比可以将检测时间缩短40%以上^[67]。原位实时结构健康监测常见方法见表1。根据传感器布置位置,现有技术主要可归纳为非接触型、表面贴装型及嵌入/自感知型三类。

非接触型监测主要是通过视觉的方式对损伤进行监测。

表1 原位实时结构健康监测常见方法

Tab. 1 Common methods of in-situ real-time structural health monitoring

Sensor types	Sensor position	Detection capability
Vision	Non-contact	Surface or shallow
Acoustic wave	Generally surface	Surface and internal
Optical fiber	Generally embedded	Surface and internal
Self-sensing	Surface or embedded	Surface and internal

虽然DIC技术在制造过程监测中存在局限,但在服役过程的应力应变状态与损伤扩展监测中表现出色。Jamshed等^[68]提出了一套机器学习增强型DIC框架,用于飞机零部件的自动裂纹监测,可准确检测裂纹起始,定位裂纹尖端,并预测裂纹生长轨迹。Sun等^[69]则使用DIC技术监测典型开孔加筋壁板的应力集中和裂纹扩展。但DIC技术通常只能监测扩展到表面上的裂纹,难以监测构件内部形成的微裂纹。相比之下,基于微波、光学、电磁、超声波等热激发形式的热成像方法在浅表层损伤监测中已被验证有效,而电容层析成像技术则在深层损伤监测方面展现出优势^[70-73]。

另外,声发射传感器和兰姆(Lamb)波检测作为表面贴装型监测的典型代表是非常有潜力的原位结构健康监测方法。声发射技术作为一种被动监测方法以其精度高、损伤敏感度高、可辨别损伤模式的特点受到广泛研究。McCrorry等^[74]使用声发射技术结合delta-T映射方法实现了碳纤维复合材料板件损伤区域的定位,然后基于神经网络对屈曲过程中监测到的分层和基体开裂两种不同的损伤模式进行了分类。Xu等^[75]使用声发射技术对复合材料风力发电机叶片进行了结构健康监测,使用小波包分解和聚类分析方法实现了疲劳载荷固有噪声的异常值检出和基体开裂、界面脱黏、纤维断裂三种损伤模式的区分。Lamb波检测作为一种主动检测方法同样具有损伤敏感度高、且其传播距离远,在大面积结构健康监测中表现良好。武李奇亚等^[76]基于Lamb波监测技术实现了碳纤维复合材料板件不同层分层损伤的持续结构健康监测。Li等^[77]将Lamb波检测与深度学习相结合对碳纤维增强复合材料的损伤大小和位置进行监测,分别实现了98.61%和96.52%的监测准确率。

光纤布拉格光栅(FBG)传感器和分布式光纤(DOF)传感器等小尺寸可嵌入式传感器能够预埋到复合材料构件内部,可以对内部微小应变、损伤、温度变化等参数进行实时监测。Kwon等^[78]在复合材料机翼制造过程中嵌入了FBG传感器,在飞行测试中对机翼的载荷进行实时监测,结果表明FBG传感器在起飞、爬升、下降及滚转等不同飞行状态下的应变及载荷监测结果与实际相符,总估算误差仅为4.19%。金鑫等^[79]在复合材料加筋板上布置FBG传感器阵列实现了疲劳载荷下的渐进式分层损伤及裂纹扩展监测。Datta等^[80]将FBG传感器的监测结果与机器学习算法相结合对复合材料构件的冲击损伤进行检测,其中位置监测精度可以达到20 mm范围,冲击能量平均误差为3 J,并指出所提出方法在全尺寸复合材料飞机冲击损伤快速定位及能量估计方面的

应用潜力。近年来也有学者面向航空工业中吸湿工况进一步修正了布拉格定律,进一步提升了FBG传感器在吸湿工况下的监测精度,并初步展示了FBG传感器对复合材料水分含量的传感可行性^[81]。分布式光纤传感技术进一步增加了可监测的区域,已有诸多研究验证了DOF传感器在固化过程检测及全生命周期应变及损伤监测方面的潜力^[82-83]。为了解决嵌入过程易损坏的问题,可将DOF传感器使用复合材料封装实现模块化应用^[84]。已有研究证明了FBG传感器和DOF传感器在氢气和低温环境下对复合材料损伤的可靠监测能力^[85]。另外,含有碳纳米管、石墨烯等导电颗粒的薄膜已被集成到低导电性的复合材料构件中以实现结构健康监测,其基本原理与嵌入式传感器相同^[72]。然而,这些嵌入式方法相当于在构件内部引入缺陷,会对构件力学性能造成不利影响。为此,自感知结构健康监测正成为前沿热点。将连续碳纤维束引入打印树脂基体中可以在增强机械性能的同时实现自感知功能。基于挤出式打印的诸多研究已经证明了基于连续碳纤维电阻变化的监测方法在增材制造结构中的健康状态监测能力^[86-88]。CFRTP预浸带具有更高的碳纤维体积分数,且浸渍良好的树脂基体限制了大多数碳纤维丝的位置,这使得预浸带在稳定自感知方面展现出巨大的潜力。

可以预见,结构健康监测是保障CFRTP构件服役安全、实现预测性维护的重要支撑。目前技术路线呈多样化发展,从以声发射为代表的表面贴装型到FBG等可嵌入式检测方法均表现出广阔的应用潜力。然而这些方法在信号解耦、传感器长期服役耐久性方面都需要进行更加系统而深入的评估。此外,基于碳纤维自感知的SHM技术作为目前的研究热点仍处在定性监测阶段,需要更加成熟的电阻变化理论支撑和监测信号解耦算法支撑其工程化应用。

6 结论与展望

6.1 结论

(1)通过预浸料表面处理、界面改性等方法增加其原位固化工艺适应性,并结合铺放策略的优化,在提升CFRTP原位固化构件质量方面潜力巨大,但目前缺乏高效且可工程化应用的预浸料改性技术,铺放策略与工艺参数的耦合也较为欠缺。

(2)工艺参数优化是保证成型件质量的主流方法,但工艺参数的繁杂和参数间的耦合关系使得优化效率较低;热压、烘箱等后处理方法虽可改善CFRTP构件的孔隙率、结晶度以及力学性能,但牺牲了一部分原位固化一步成型的效率和成本优势。

(3)在线缺陷检测和结构健康监测技术越来越受到研究人员的关注,视觉、声发射、嵌入式传感等方法展现了巨大的应用潜力,但目前的检测速度、精度及数据信号处理方法尚需进一步提升。

6.2 展望

(1)除关注碳纤维丝与树脂基体的界面问题外,须补充

对预浸料层间界面的研究内容,揭示预浸料自身粗糙度、结晶度、孔隙率等对成型件性能具体影响;聚焦原位固化技术探索高效且易于工程化的预浸带层间界面改性技术是进一步提升CFRTP制造效率和原位固化成型件性能的核心因素;此外,工艺仿真方法的革新或更高效的层间性能测试方法的提出有望简化繁杂的工艺参数筛选,节省时间及材料成本;进一步地,非常规铺层设计方法及路径误差补偿等研究也有待进一步深入挖掘。

(2)目前,原位固化样件的孔隙率较高且铺放速度普遍较慢。诸如LMPAEK等在保证力学性能的前提下兼顾可加工性的树脂研发是CFRTP原位固化技术革命性进步的基础;同时,各类热压罐外(OoA)后处理方法是减少孔隙率的关键措施,值得注意的是高速原位固化和烘箱后处理的组合方法近年来受到了诸多关注。

(3)原位固化制造过程的敏感性和工艺参数复杂性导致其制造过程的成型质量稳定性难以保证,易产生树脂降解、纤维暴露等缺陷,影响成型件的力学性能及可靠性。此外,在使用过程的热塑性复合材料构件复杂且隐蔽的损伤行为也对其服役可靠性带来挑战。因此,探究简单高效的制造过程在线监测方法和使用过程工作状态监测方法是保证成型件力学性能和使用可靠性的必要补充。多模态传感融合技术及人工智能技术的进一步应用是提升检测精度和检测全面性的趋势。

参考文献

- [1] 许恬甜,等.工程塑料应用,2025,53(10):229-236.
XU Tiantian, et al. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 229-236.
- [2] ZHENG H, et al. Composites Part B, 2022, 233. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109639.
- [3] CHAHINE G, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 188. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108540.
- [4] SU Y N, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 108: 89-98.
- [5] ZHANG C P, et al. Composites Part C: Open Access, 2022, 9. DOI: 10.1016/j.jcomc.2022.100321.
- [6] JENSEN B J, et al. International SAMPE Technical Conference. Baltimore, Maryland: NASA Technical Reports Server, 2012. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120009354>.
- [7] ARQUIER R, et al. Materials Today Communications, 2022, 32: 104036. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104036.
- [8] COMER A J, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 69: 10-20.
- [9] URMATSU H, et al. Composites Part B: Engineering, 2026, 316. DOI: 10.1016/j.compositesb.2026.113560.
- [10] MIAO L, et al. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 134: 832-850.
- [11] LIV Y, et al. Composites Part B: Engineering, 2017, 126: 133-142.
- [12] 李环宇.碳纤维复合材料层合板的弯曲与冲击等力学性能[D].

- 北京:北京化工大学,2024.
- LI Huanyu. The study of mechanical properties such as bending and impact of carbon fiber composite laminates[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.
- [13] WANG Z Y, et al. Aerospace Science and Technology, 2024, 147. DOI:10.1016/j.ast.2024.109030.
- [14] CHEN Y S, et al. Thin-Walled Structures, 2025, 216. DOI: 10.1016/j.tws.2025.113687.
- [15] LAN M, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 82:198–207.
- [16] RAPS L, et al. Composite Structures, 2025, 373. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119556.
- [17] PAGANI A, et al. Aerotecnica Missili & Spazio, 2025, 104(2): 135–151.
- [18] DUTTA S, et al. Composite Structures, 2025, 368. DOI:10.1016/j.compstruct.2025.119221.
- [19] JIANG M, et al. Path optimization for open-contoured structures in robotic fibre placement[C]//2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). Hefei: IEEE, 2017:207–212.
- [20] TAVKARI D, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 190. DOI: 10.1016/j.compositesa.2024.108568.
- [21] LE REUN A, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 179. DOI:10.1016/j.compositesa.2024.108010.
- [22] STOKES-GRIFFIN C M, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 78:274–283.
- [23] QURESHI Z, et al. Composites Part B: Engineering, 2014, 66: 255–267.
- [24] GROUVE W J B, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 50:44–53.
- [25] WANG R Z, et al. Coatings, 2024, 14(5). DOI: 10.3390/coatings14050635.
- [26] CLANCY G, et al. Composites Part B: Engineering, 2019, 163: 243–251.
- [27] WYNN M, et al. Manufacturing Letters, 2024, 40:93–96.
- [28] MIAO Q Y, et al. Composite Structures, 2021, 266. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.113779.
- [29] RAPS L, et al. Composite Structures, 2022, 284. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.115087.
- [30] WANG Y, et al. Composites Communications, 2024, 52. DOI: 10.1016/j.coco.2024.102114.
- [31] ZHANG Z, et al. Composites Part B: Engineering, 2024, 287. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111798.
- [32] ZHANG C P, et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(11/12):7 251–7 262.
- [33] SCHIEL I, et al. Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science, 2020, 6(4):191–197.
- [34] VAN DE WERKEN N, et al. Additive Manufacturing, 2021, 37. DOI:10.1016/j.addma.2020.101634.
- [35] CHEN J P, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 140. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.106160.
- [36] KARIMI S, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2024, 43(9 – 10):490–503.
- [37] 顾星河,等.工程塑料应用, 2026, 54(3):130–137.
- GU Xinghe, et al. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 130–137.
- [38] BRASINGTON A, et al. Composites Part C: Open Access, 2021, 6. DOI:10.1016/j.jcomc.2021.100182.
- [39] SONG Q H, et al. Polymers, 2022, 14(7). DOI: 10.3390/polym14071401.
- [40] CROFT K, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(5):484–491.
- [41] WOIGK W, et al. Composite Structures, 2018, 201:1 004–1 017.
- [42] POURAHMADI E, et al. Composites Part B: Engineering, 2024, 269. DOI:10.1016/j.compositesb.2023.111104.
- [43] FOUGEROUSE C, et al. Composite Structures, 2025, 371. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119491.
- [44] KHALEGHI S, et al. Composites Part B: Engineering, 2026, 310. DOI:10.1016/j.compositesb.2025.113134.
- [45] DURMAZ T, et al. Results in Engineering, 2026, 29. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108333.
- [46] 杨皓越,等.工程塑料应用, 2026, 54(2):96–107.
- YANG Haoyue, et al. Engineering Plastics Application, 2026, 54 (2):96–107.
- [47] ZHANG H Y, et al. Journal of Composite Materials, 2021, 55(30): 4 633–4 643.
- [48] DUBOIS M, et al. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26(3/4):213–228.
- [49] WITHERS P J, et al. Nature Reviews Methods Primers, 2021, 1. DOI:10.1038/s43586-021-00015-4.
- [50] WU R H. Polymer Composites, 2025, 46(S3):S668–S680.
- [51] FRENCH J, et al. Composites Science and Technology, 2022, 224. DOI:10.1016/j.compscitech.2022.109453.
- [52] OROMIEHIE E, et al. Composite Structures, 2019, 224. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110987.
- [53] 王国全. 基于机器视觉的碳纤维预浸料表面质量检测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2020.
- WANG Guoquan. Research on Surface Quality Inspection of Carbon Fiber Prepreg Based on Machine Vision[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020.
- [54] SHADMEHRI F, et al. Laser-vision inspection system for automated fiber placement (AFP) process[C]//20th International Conference on Composite Materials. Copenhagen:Aalborg University, 2015. DOI:10.5281/zenodo.15443293.
- [55] 张杰,等.复合材料学报, 2025, 42(7):4 112–4 128.
- ZHANG Jie, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(7): 4 112–4 128.

- [56] WEN B, et al. Measurement, 2026, 274. DOI:10.1016/j.measurement.2026.121236.
- [57] DENKANA B, et al. Composites Part B: Engineering, 2016, 97: 239–243.
- [58] MARANI R, et al. Composites Part B: Engineering, 2018, 135: 129–141.
- [59] RAJAN S, et al. Composites Part B: Engineering, 2019, 160: 546–557.
- [60] SHADMEHRI F, et al. Applied Sciences, 2019, 9(13). DOI: 10.3390/app9132719.
- [61] 牟欣颖,等.电子测量与仪器学报,2021,35(4):211–217.
MOU Xinying, et al. Journal of Electronic Measurement and instrumentation, 2021, 35(4):211–217.
- [62] MEISTER S, et al. Composites Part B: Engineering, 2021, 224. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.109160.
- [63] ARABUL E, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2026, 202. DOI:10.1016/j.compositesa.2025.109469.
- [64] LI G, et al. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 296: 109870. DOI:10.1016/j.engfracmech.2024.109870.
- [65] DHIWAR D, et al. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 297. DOI:10.1016/j.engfracmech.2024.109877.
- [66] MAZZESCHI M, et al. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 375. DOI:10.1016/j.sna.2024.115540.
- [67] AHMED O, et al. Composites Part B: Engineering, 2021, 223. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.109136.
- [68] JAMSHED A, et al. Measurement, 2026, 258. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.119264.
- [69] SUN K R, et al. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2024, 60(12):1 420–1 433.
- [70] BANG H T, et al. Composite Structures, 2020, 246. DOI:10.1016/j.compstruct.2020.112405.
- [71] 陈昊泽.基于激光热成像的材料缺陷检测方法研究[D].太原:中北大学,2023.
CHEN Haoze. Research on Material Defect Detection Method based on Laser Thermography[D]. Taiyuan: Central North University, 2023.
- [72] HAN S L, et al. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024, 39 (4):725–761.
- [73] 周志彦.基于IRT和PECT的碳纤维复合材料缺陷检测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2024.
ZHOU Zhiyan. Research on defect detection method for carbon fiber composites based on IRT and PECT[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.
- [74] MCCRORY J P, et al. Composites Part B: Engineering, 2015, 68: 424–430.
- [75] XU D, et al. Composite Structures, 2021, 255. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112954.
- [76] 武李奇亚,等.复合材料科学与工程,2025(12):72–78.
WU Liqiya, et al. Composites Science and Engineering, 2025(12): 72–78.
- [77] LI Z L, et al. Measurement, 2025, 242. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.116159.
- [78] KWON H, et al. Structural Health Monitoring, 2019, 18(4):1 337–1 351.
- [79] 金鑫.基于光纤布拉格光栅的航空结构损伤监测研究[D].南京:南京航空航天大学,2020.
JIN Xin. Research on fiber Bragg grating based aeronautical structural damage monitoring[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [80] DATTA A, et al. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(12):4 463–4 470.
- [81] ACETI P, et al. Journal of Composites Science, 2024, 8(12). DOI: 10.3390/jcs8120518.
- [82] 单一男.基于分布式光纤传感的典型结构状态监测研究[D].大连:大连理工大学,2020.
SHAN Yinan. Study of structural states monitoring method for typical structures based on distributed optical fiber sensing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [83] OGUNLEYE R O, et al. Advanced Engineering Materials, 2024, 26(22). DOI:10.1002/adem.202401745.
- [84] ZHU P Y, et al. Composites Part B: Engineering, 2019, 168: 267–273.
- [85] CIMINELLO M, et al. Applied Sciences, 2025, 15(15). DOI: 10.3390/app15158748.
- [86] YAO R W, et al. Engineering Structures, 2024, 308(38). DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118049.
- [87] HAN B, et al. International Journal of Mechanical Sciences, 2026, 314. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2026.111390.
- [88] YE W G, et al. Materials Letters, 2022, 317. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.132077.