

文章编号 1004-924X(2025)17-2765-13

工业CT系统中双向温控原位加载装置与 复合材料热-力耦合行为分析

肖清俊¹, 任峰^{1*}, 张月锋²

(1. 长春师范大学工程学院, 吉林 长春 130032;
2. 华控(苏州)智能装备有限公司, 江苏 苏州 215211)

摘要:传统工业CT原位加载装置在高温/低温工况下均存在温控不稳定、控制响应迟滞以及热梯度伪影等问题, 导致复合材料热-力耦合行为观测失真。基于现有原位拉伸试验平台基础上, 设计了一台适用于工业CT系统的双向温控原位加载装置。该装置通过优化夹具结构、设计上下对称布置的双向温控模块以及构建一套高适配性的原位拉伸控制系统, 在-20~150℃受控温度环境下实现工业CT系统对复合材料样品微观结构的动态演化过程无损表征。利用该装置对碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)板状试样开展不同温度条件下的原位拉伸实验, 并结合工业CT三维重构技术, 捕捉CFRP的内部细观损伤演化过程。实验结果表明: 在-20~150℃的温度条件下, 随着拉伸位移的增加, 工业CT扫描能够实时清晰记录试件从微观损伤到宏观失效的全过程。高温条件下, CFRP基体发生软化, 界面脱黏与热膨胀失配显著, 力学性能降低; 低温则诱发树脂脆化、微裂纹萌生与界面应力集中等问题, 导致性能劣化。该装置在-20~150℃内具备良好的温度控制性和加载稳定性。该装置的成功研制为深入揭示复合材料在极端温度环境下的内部损伤机制与结构演化规律提供了重要技术手段, 也为其在航空航天、交通运输等领域的工程应用奠定了实验基础。

关键词:工业CT; 原位拉伸加载装置; 双向温控; 碳纤维增强聚合物; 内部损伤演化

中图分类号: TP391.4; TH69

文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253317.2765

CSTR: 32169.14.OPE.20253317.2765

Bidirectional temperature-controlled in-situ loading device for industrial CT systems and analysis of thermo-mechanical coupling behavior in composite materials

XIAO Qingjun¹, REN Feng^{1*}, ZHANG Yuefeng²

(1. School of Engineering, Changchun Normal University, Changchun 130032, China;

2. Huakong (Suzhou) Intelligent Equipment Co., Ltd., Suzhou 215211, China)

* Corresponding author, E-mail: renfeng@ccsfu.edu.cn

Abstract: Conventional industrial CT in situ loading devices suffer from thermal instability, control hysteresis, and thermal gradient artifacts at extreme temperatures, impairing observation of thermomechanical coupling in composite materials. To address these limitations, a purpose built bidirectional temperature

收稿日期: 2025-07-20; 修订日期: 2025-08-08.

基金项目: 吉林省科技厅中青年科技创新创业卓越人才(团队)资助项目(No. 20220508145RC); 吉林省省级产业创新专项基金资助项目(No. 2018C051-4)

controlled in situ loading apparatus for industrial CT systems was developed and implemented. The apparatus enables non destructive characterization of the dynamic microstructural evolution of composite specimens within a controlled temperature range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ by optimizing the fixture geometry, incorporating a symmetric upper and lower bidirectional temperature control module, and integrating a highly adaptable in situ tensile control system. The device was evaluated through in situ tensile tests on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) plate specimens across multiple temperatures. Coupled with industrial CT three dimensional reconstruction, the mesoscale damage evolution of CFRP was captured in real time. Results demonstrate that, throughout the $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ range, incremental tensile displacement can be continuously recorded by industrial CT from micro damage initiation through to macroscopic failure. At elevated temperatures, matrix softening, pronounced interface debonding, and thermal expansion mismatch were observed, resulting in reduced mechanical performance. At low temperatures, resin embrittlement, microcrack initiation, and interface stress concentration were evident, leading to performance degradation. These findings confirm the apparatus provides reliable temperature control and loading stability across the tested range. The developed device offers a robust technical platform for elucidating damage mechanisms and structural evolution of composite materials under extreme thermal conditions and establishes an experimental foundation for their engineering applications in aerospace, transportation, and related fields.

Key words: industrial CT; in-situ tensile loading device; bidirectional temperature control; carbon fiber reinforced polymer; internal damage evolution

1 引 言

随着计算机技术的迅猛发展, X射线计算机断层成像技术(Computed Tomography, CT)已成为材料领域重要的实验观测手段之一^[1-4]。该技术可在不破坏样品的前提下,对材料内部微结构(如裂纹萌生、界面脱黏、相态演化)在受载过程中的动态响应进行实时、三维以及高分辨率观测,为揭示材料的失效机制提供了关键数据支撑,是当前材料无损检测与内部结构分析的重要技术^[5-7]。在材料科学、航空航天和核工业等领域, CT技术在无损检测与动态监测方面已展现出不可替代的优势^[8-9]。将CT成像与力学加载系统相结合,可有效拓展其应用范围,实现材料在加载过程中的结构演化实时可视化,为研究材料的变形破坏机制、界面行为及流体-固体耦合等问题提供实验依据^[10-11]。特别是在材料服役性能研究中,原位加载系统可模拟真实工况下的受力环境,结合CT系统对材料内部微观结构变化进行高时空分辨率成像,显著提升了实验的真实度与分析精度^[12]。然而,实际应用环境中,材料常处于复杂的多物理场耦合状态,如温度与载荷

协同作用等。由于传统原位加载装置在温度场精确控制方面存在明显局限,难以实现极端温度条件下的力学行为表征,如航空发动机热端部件、轨道交通及新能源装备中的快速温变等场景^[13]。开发具备双向温控能力的工业CT兼容型原位加载装置,已成为当前材料服役性能实验研究的关键技术瓶颈之一。

目前在温控原位加载领域的研究已取得一定进展,但多数还集中于单向控温模式和静态观测,主要实现单向加热或低温制冷下的静态观测,缺乏对宽温域内动态升/降温过程及其与多轴加载协同响应的高精度控制能力。清华大学赵杰等开发的石墨烯微加热芯片实现了透射电镜下的快速升温,但受限于微观尺度,不具备工程结构件测试能力^[14]。Mazars等构建了用于编织陶瓷基复合材料的高温 μCT 加载系统,但其适用的材料范围有限^[15]。在低温原位加载方面,北京理工大学李元辰等开发了低温加载系统用于CFRP层合板损伤演化研究,然而其温控能力仍局限于低温单一方向^[16]。Meng与Grogan等则通过场外 μCT 测试,间接分析了低温对CFRP内部微缺陷演化的影响^[17-18]。上述研究均未实现冷

热双向温控,故难以再现场景中频繁出现的热循环工况。此外,现有加载装置普遍存在温控均匀性不足、热变形干扰大以及与 CT 系统兼容性差等问题,易导致 CT 图像伪影、力学数据失真,严重影响测试可靠性^[19-20]。为进一步突破上述技术瓶颈,亟需开发一套兼具高温与低温精密调控能力、温控响应快速且结构稳定、并可与工业 CT 系统深度集成的原位加载装置。

碳纤维增强聚合物(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)因优异的比强度、比刚度、抗腐蚀性及疲劳性能,在航空航天、交通运输及海洋工程等领域得到了广泛应用^[21-25]。相较于传统金属材料,CFRP 更适用于复杂服役环境,具备成为下一代轻质高性能结构材料的潜力^[26-27],但其在复杂温变环境下的损伤演化行为尚缺乏深入研究。传统研究多采用扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)或透射电镜(Transmission Electron Microscope, TEM)进行表面观测,但 SEM 受限于样品导电性和真空环境要求,难以揭示内部损伤演化机制^[28-29]; TEM 虽具纳米级分辨率,但无法加载宏观力学载荷^[30]。已有研究尝试将高温或低温加载模块与 CT 系统耦合,但存在温控精度低、控温范围窄、图像伪影严重以及仅具备静态观测能力等问题,难以满足真实服役环境下的实验需求^[31]。

本文在现有原位拉伸实验系统的基础上,设计了一种双向温控原位加载装置,实现从 $-20\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内的高精度控温与力学加载,并可与工业 CT 系统无缝集成。该装置采用闭环反馈控制系统提升了载荷与温度控制的稳定性与精度,通过对具有交错铺层结构的 CFRP 层合板进行原位拉伸实验,系统考察其在不同温度下的力学响应与细观结构演化行为,验证了装置在热-力耦合环境下的性能表现与实验适应性,为极端温变条件下复合材料服役机制研究提供了技术支持。

2 双向温控模块原位加载装置

2.1 总体设计

与传统工业 CT 原位加载装置不同,双向温控原位加载装置深度集成于工业 CT 系统上,在

实验过程中,对测量的试样进行不同温度下的原位拉伸,同时原位加载装置携试样同步随旋转载物台进行 $0\sim 360^{\circ}$ 旋转工业 CT 扫描。装置的设计需要重点考量以下因素:(1)工业 CT 扫描过程中,原位加载装置随试样绕 Z 轴方向旋转时不能阻挡 X 射线,这就需对装置的夹具结构、温控模块结构及其布局进行专门设计;(2)针对机械-温度耦合场协同加载的复杂实验需求,防止因位移或力偏差影响扫描精度,需对该装置的控制系统进行重新设计;(3)原位加载装置各模块材料的选取要满足一定的强度和温度需求,同时要尽量减少实验本底。本文提出的双向温控原位加载装置的总体设计和夹具结构与温控模块结构设计如图 1 所示。装置通过控制系统的调整可使测量的样品扫描位置与 X 射线中心位置重合。

2.2 硬件构成

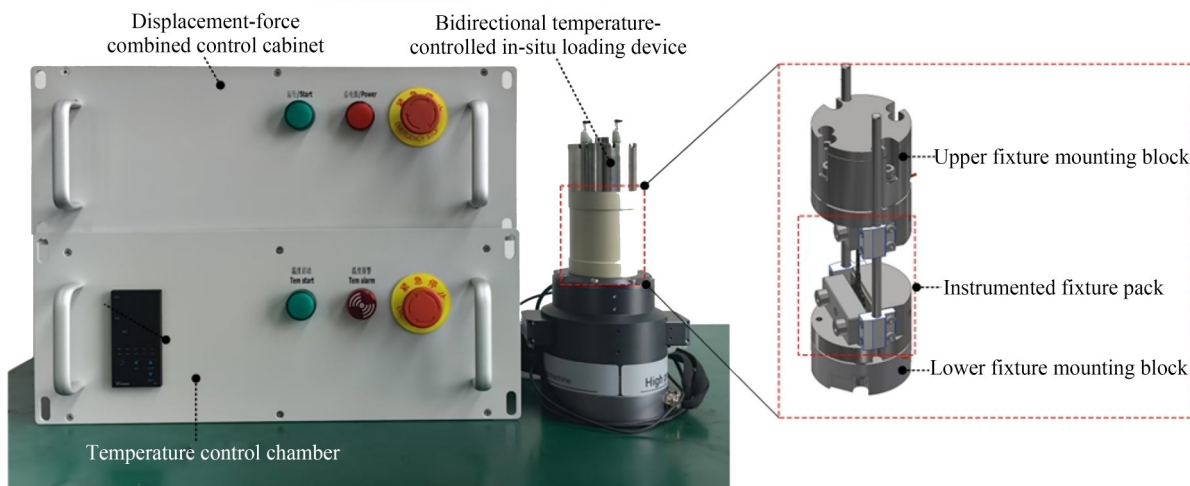
双向温控模块中为实现稳定的温度控制,系统采用可调式直流稳压电源分别驱动加热棒和半导体制冷片元件,结合热传导机制实现对样本温度场的有效调控。在满足功能的前提下,模块结构尺寸尽量小和紧凑。将半导体制冷片安装于实具连接座腔体内和加热棒安装于夹具加热板的孔中,并采用上下对称布置的双向温控模块,从而实现快速的温控响应。温度监测方面,系统配备高灵敏度热电偶传感器,布置于加热区与制冷区,实时监测环境温度并反馈至温控温度设定与数据读取一体化的控制箱,通过 PID 闭环控制调节加热棒和半导体制冷片元件的工作电流和水冷循环系统,最终实现双向温控原位加载装置样本温度场保持在 $-20\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的稳定温控。为提高控温均匀性并降低热应力集中,关键热源与制冷器件的接触界面均匀涂覆高导热系数硅脂,并采用铁氟龙包覆层紧固件确保结构稳定性,同时装置的承载筒选用了保温性能优异的材料。这一系列热管理与结构固定措施显著抑制了局部温度梯度突变所引发的热应力积聚现象,为系统在高低温交替环境下的稳定运行提供了坚实保障(图 1(a)和 1(c))。

装置的夹具模块采用双向空间约束结构,兼顾力学稳定性与热场耦合适应性。该模块通过几何结构对试样进行三维定位:在轴向方向限制横向平移自由度,在法向平面内抑制转动自由

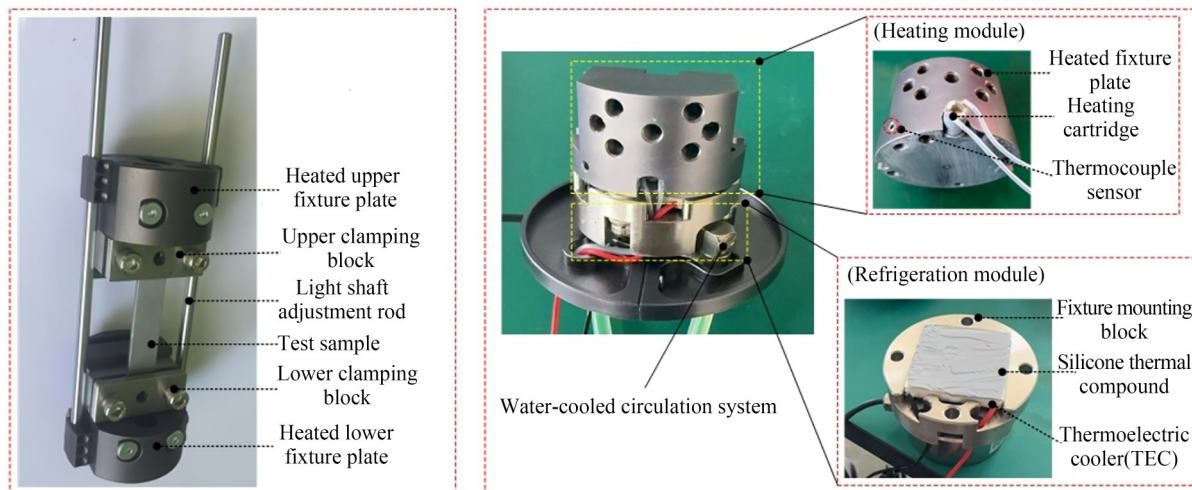
度,从而实现试样在拉伸过程中的精确对中定位。拉伸实验开始前,试样通过夹紧机构固定于圆孔内,形成稳定的三维约束状态。该结构有效阻断了由热膨胀引起的附加应力向加载系统传导,降低了试样变形所产生的横向扰动对力传感器与驱动机构的干扰,确保了实验过程中力学信

号的准确采集与装置运行的可靠性。

如图 1(b)所示,夹具模块主要由两对上下夹块、两根光轴调节杆及两块夹具加热板构成,可灵活调节试样夹持区域的热-力边界条件,实现不同材料和几何形状样本的测试。紧凑的结构也使夹具模块具有高度便携性,可在其他原位加



(a) 实验系统整体视图, 包含双向温控原位加载装置、位移与载荷控制模块、温度设定与数据读取一体化的控制箱, 以及电压调节与温度监测模块
(a) Overall view of the test system, comprising the bidirectional temperature-controlled in-situ loading device, displacement and load control module, integrated control box for temperature setting and data reading, as well as voltage regulation and temperature monitoring modules



(b) 夹具模块局部放大图, 图中显示上下夹块、光轴调节杆及加热板的精密定位结构, 用于实现试样的稳固夹持与均匀温控
(b) Close-up view of the fixture module, showing the precision positioning structure of upper/lower clamping blocks, optical axis adjustment rods, and heating plates for achieving stable specimen clamping and uniform temperature control

(c) 夹具温度模块局部放大图, 包含加热模块和制冷模块, 展示了导热硅脂、加热棒、热电偶传感器及半导体制冷元件的结构布置及其热界面优化设计
(c) A partial enlarged view of the temperature module of the actual device, which includes the heating module and refrigeration module, demonstrating the structural arrangement of thermal conductive silicone grease, heating rods, thermocouple sensor, and thermoelectric cooler (TEC), as well as the thermal interface optimization design

图 1 双向温控原位加载装置

Fig. 1 Bidirectional temperature-controlled in-situ loading devices

载装置上使用。为降低实验本底和装置重量,选取密度较低和对 X 射线的吸收较少的高强度铝合金作为主材。

2.3 原位拉伸控制系统的工作原理

针对机械-温度耦合场协同加载的复杂实验需求,本研究设计并构建了一套高适配性的原位拉伸控制系统。在综合分析大量相关文献与控制技术对比研究成果可知,闭环控制系统在材料力学性能测试中展现出更优的稳定性、响应性与抗干扰能力,尤其适用于多场耦合环境下的高精度实验场景。因此,选用具备实时反馈与动态修正能力的闭环伺服控制系统,以取代传统开环控制方案。

该系统具备“力控制”与“位移控制”两种工作模式。以位移控制模式为例,实验所需的目标位移值由上位机软件预设,随后执行单元接收指令并开始加载,通过高精度、高刚度滚珠丝杠的旋转带动下,移动横梁相对中心位置向相反/相同方向运动,而对试样进行拉伸/压缩,并保证了试样观

测点始终在视野中间位置。拉伸单元同时设有负载传感器,用于对试样进行拉伸的拉力或位移测定。加载过程中,负载传感器实时采集载荷数据并传输至数据采集卡,随后反馈至控制软件进行处理。系统通过对比设定值与当前实际值,判断是否存在偏差并调整执行单元的位置。若实际值大于设定值,执行单元向下调整;若低于设定值,则反向修正;当实际值趋近于设定值时,执行单元停止移动,实现高精度控制。该闭环控制逻辑将比较-修正-稳定三个阶段循环迭代,直至误差消除,实现位移或载荷的精准施加。其原理框架及状态转换流程如图 2 所示。

值得指出的是,该闭环逻辑亦适用于力控制模式,仅需将反馈变量从位移参数替换为载荷数据,便可完成两种控制策略间的灵活切换。通过将此控制系统与工业 CT 系统深度集成,成功构建了具备变温适应能力的原位拉伸加载平台,为复合材料在热-力耦合环境下的力学响应研究提供了可靠、高效的测试途径。

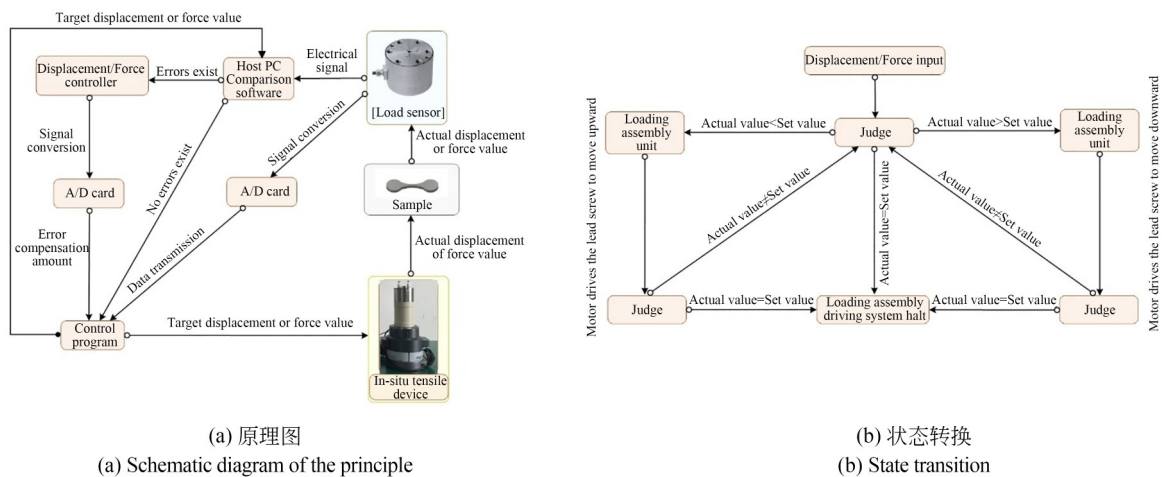


图 2 所开发装置的闭环控制
Fig. 2 Closed-loop control of developed devices

3 材料和方法

3.1 材料和试样制备

这里选用碳纤维增强复合材料(CFRP)作为测试对象,开展原位 CT 拉伸实验。实验所用 CFRP 材料为平纹 3K 碳纤维/环氧树脂预浸料。其面层由两层正交铺设[0°/90°]的碳纤维编织布

构成,用以提高试样的表面稳定性与初始强度。多层 CFRP 层合板采用热压成型工艺制备,最终得到的层合板采用[90°/0°/90°]的对称堆叠方式,厚度控制在(1±0.1) mm 以内。为满足工业 CT 系统对样品尺寸和精度的一致性要求,层合板经计算机数控(Computer Numerical Control, CNC)精密铣削加工,制备成标准化拉伸测试试

样。试样的几何形貌及尺寸如图 3(a)所示。该加工方式确保了样本边缘光滑、尺寸一致,为后续热-力耦合环境下的原位加载测试与图像重建提供了稳定可靠的实验基础。

3.2 实验装置和方法

CFRP 试样的原位 CT 拉伸实验在华控(苏州)—TESCAN 全球 4D 演示中心完成,采用 TESCAN UniTOM XL 系统进行原位 X 射线微米级计算机断层成像(μ CT)测试。该系统集成了高稳定性 X 射线源、高分辨率探测器、360°旋转/平移载物台、自主开发的双向温控原位加载模块及配套图像采集与重建软件等组件,系统构成如图 3(b)所示。实验过程中,将制备好的 CFRP 试样通过夹具模块安装于原位加载装置中。加载系统在温控环境下施加单轴拉伸载荷,当载荷/位移达到预设临界点时,原位加载装置携试样同步进行 360°旋转扫描。整个 μ CT 扫描

阶段,夹具机构保持恒定位移与静态约束状态,确保成像过程中无额外干扰位移,提高图像重建质量与实验数据可靠性。

在成像过程中,选定感兴趣区域(Region of Interest, ROI)为 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,以聚焦分析样品内部可能存在微裂纹萌生、界面脱黏或纤维断裂等局部细观损伤行为,如图 3(a)所示。该区域通常对应结构中应力集中最为显著的位置,有助于精准识别潜在损伤起始点并追踪其演化过程。实验前,在室温条件下对 CFRP 试样进行了探索性加载实验,以评估其极限承载能力,记录最大载荷为 $F_{\max}=1\ 223\text{ N}$ 。随后,分别在 150, 125, 100, 80, 60, 25, 0 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下,对 CFRP 板状试样以准静态加载速率 0.2 mm/min 进行位移控制拉伸试验,并在 150, 80, 25 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下开展工业 CT 扫描,如图 3(c)所示。

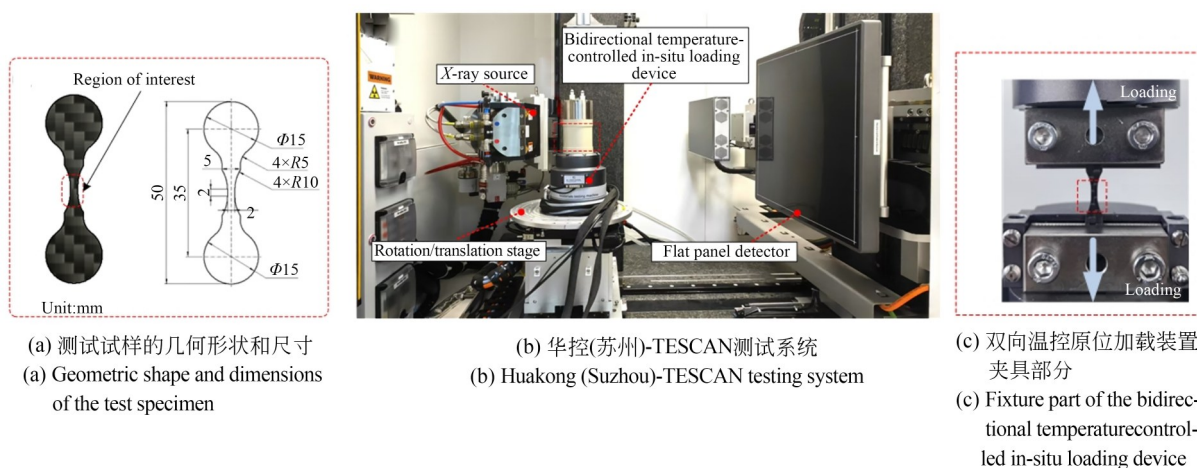


图 3 原位 CT 实验测试平台

Fig. 3 In-situ CT experimental test platform

试样经由夹具模块固定于加载系统中后,首先通过温控模块将其温度调整至目标设定值,温控精度控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。通过热电偶传感器监测夹具及试样内部温度,确保温度场在空间分布上的均匀性。当温度稳定维持设定值并经过 30 分钟的热平衡过程后,启动原位拉伸加载与 CT 同步扫描。本试验设置 5 个扫描节点,分别定义为:初始状态 A 点(加载前)、位移达到 0.4 mm (B 点)、 0.8 mm (C 点)、 1.2 mm (D 点)时进行 CT 扫描,若试样在此之前发生断裂,则在断裂状态下完成最后一次扫描(定义为 E 点)。因此,在各温

度条件下获得了具有交替纤维铺设结构的 CFRP 试样的载荷-位移响应曲线。

在工业 CT 图像采集过程中,为确保图像清晰度,需暂停加载操作并保持试样静止状态进行全角度旋转扫描。然而,这一静止过程会导致试样内部应力发生部分释放,随后加载恢复时,载荷-位移曲线将呈现锯齿状波动特征,如图 4 所示。

CT 扫描由 TESCAN 系统软件控制。扫描过程在 70 kV 的 X 射线束电压和 $214\text{ }\mu\text{A}$ 的电流下进行,每组 CT 扫描包含 1 800 幅投影图像,覆盖 360° 全方位旋转,每幅图像的曝光时间为

1.5 s,总扫描时长约为 45 min。获取的原始投影数据通过 TESCAN 重建软件进行三维体数据重建,用于后续分析与讨论。

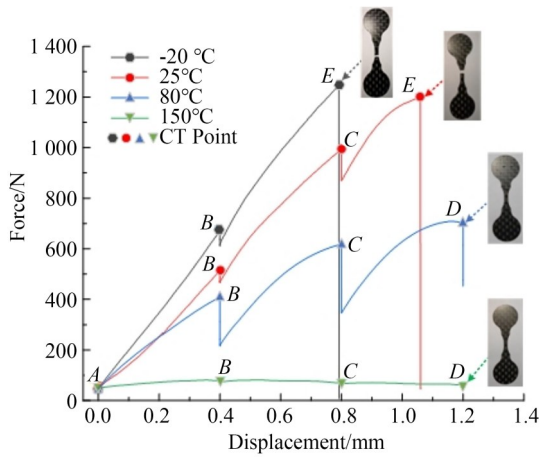


图 4 CFRP 试样在不同温度下的载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of CFRP specimens at different temperatures

4 结果和讨论

4.1 装置温度性能验证

为验证所开发双向温控模块的温度控制稳定性与响应性能,在无加载工况下开展温控性能测试,设定的目标温度分别为-20,0,25,60,80,100,125和150℃。实验过程中,系统在持续加热或制冷后达到温度稳定状态,由热电偶实时记录装置中加热区域、制冷区域及负荷传感器的温度变化曲线,如图5和图6(a)所示。

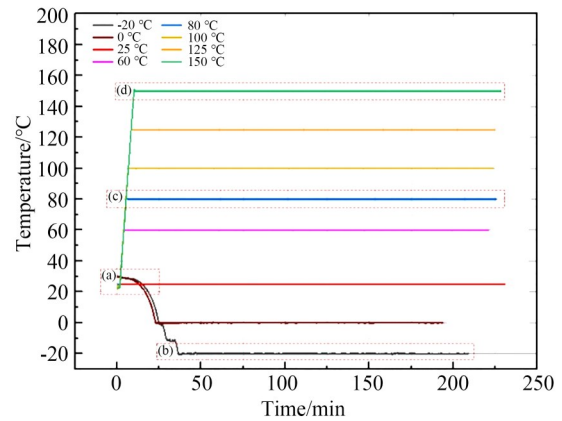
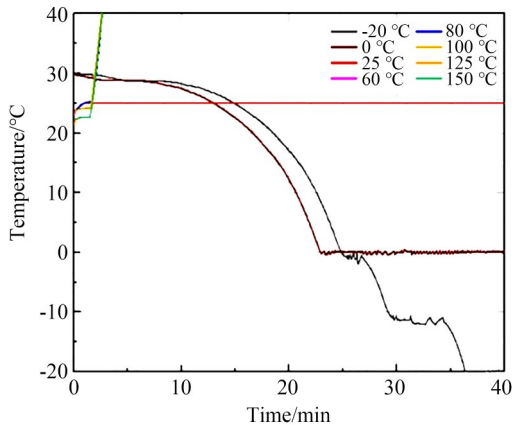


图 5 加热区域、制冷区域的温度波动曲线及负荷传感器的温度变化趋势曲线

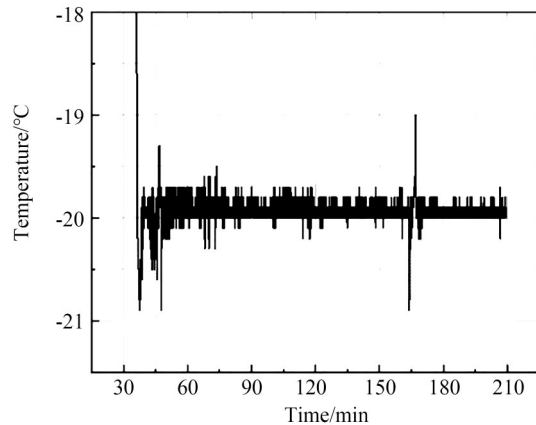
Fig. 5 Temperature fluctuation curves of heating zone, cooling zone, and temperature variation trend curve of load sensor

实验结果表明,该装置可在-20~150℃的宽温域内实现稳定控温。从室温升温至80℃仅需约5.4 min,升至150℃耗时约10 min;而从室温降温至-20℃约需36 min。在设定温度达到目标值后,经过30 min的温度平衡以及实验测试这两个过程,各部件稳态温度波动控制在±1℃以内,如图6(b)~6(d)所示。此外,夹具模块与其他功能模块间存在明显的温度梯度差异,进一步验证了加热棒与半导体制冷元件在热隔离和区域精控方面的有效性。尤其在150℃的高温条件或-20℃的低温条件下,负荷传感器所在区域的温度始终维持在(25±1)℃,完全符合其额定



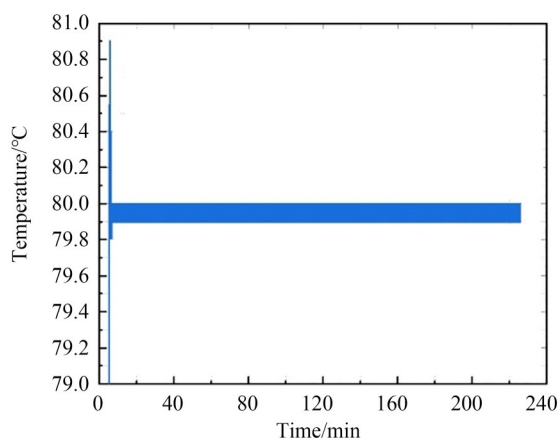
(a) 不同工况下温度时间起始曲线放大图

(a) Enlarged view of initial temperature-time curves under different working conditions

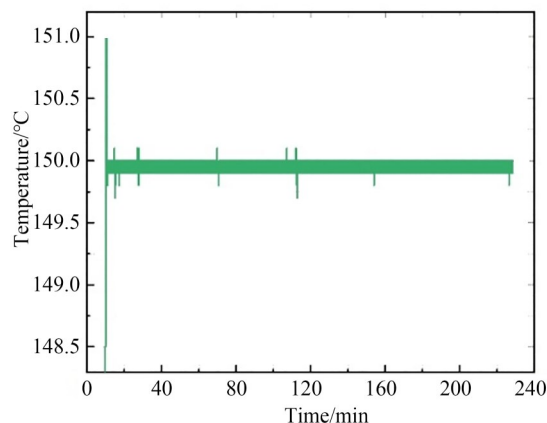


(b) -20℃原位CT拉伸实验温度-时间曲线

(b) Temperature-time curve for in situ CT tensile test at -20℃



(c) 80 °C原位CT拉伸实验温度-时间曲线
(c) Temperature-time curve for in situ CT tensile test at 80 °C



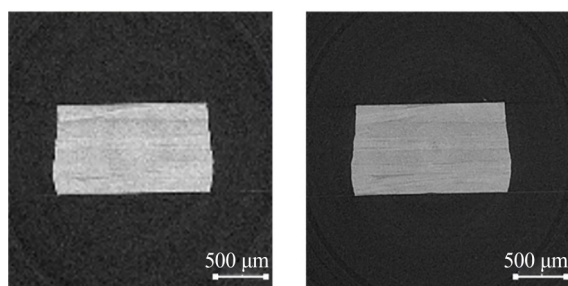
(d) 150 °C原位CT拉伸实验温度-时间曲线
(d) Temperature-time curve for in situ CT tensile test at 150 °C

图 6 拉伸实验中的温度-时间曲线

Fig. 6 Temperature-time curves in tensile tests

工作温度(0~40 °C),从而确保了测试数据的稳定性与传感器的安全运行,充分验证了装置在极端温度环境下的可靠性。

该研究装置在与工业CT系统集成运行过程中表现出良好的成像兼容性。模块化的加热与制冷元件布局有效避免了传统金属加热器常见的射线伪影。在低温测试中,双向温控系统有效抑制了样品表面冷凝水生成,从而避免了冷凝引发的成像模糊。在高温测试中,闭环温控策略能够抑制样品表面因氧化速率不均而引起的灰度波动,从而保障CT图像灰度值真实反映材料内部变化,提升了高温状态下成像结果的可靠性与可解析度。通过上下对称布置的加热与制冷模块,有效削弱了轴向温度梯度所引起的图像伪影,如图7所示。



(a) 图像伪影削弱前的成像效果 (a) Imaging effect before image artifact reduction
(b) 图像伪影削弱后的成像效果 (b) Imaging effect after image artifact reduction

图 7 图像伪影削弱前后的成像效果

Fig. 7 Comparative visualization of images before and after artifact suppression

4.2 温度对CFRP力学行为的影响

本研究获得了交替铺层结构的CFRP试样在不同温度条件下的典型工程应力-应变曲线,如图8所示。试样中0°层的碳纤维束平行于拉伸轴,90°层则垂直于拉伸轴。工业CT图像采集过程中需短暂停止电机运转,会造成样品内部应力的部分释放,致使应力-应变曲线出现锯齿状波动。然而,重新加载后的曲线斜率与初始弹性阶段一致,说明该短暂停载过程并未影响材料的弹性响应特性^[32]。

结合8组不同温度下的拉伸实验数据分析结果表明,CFRP的弹性模量与抗拉强度随着温度升高整体呈下降趋势。相较之下,低温环境则表

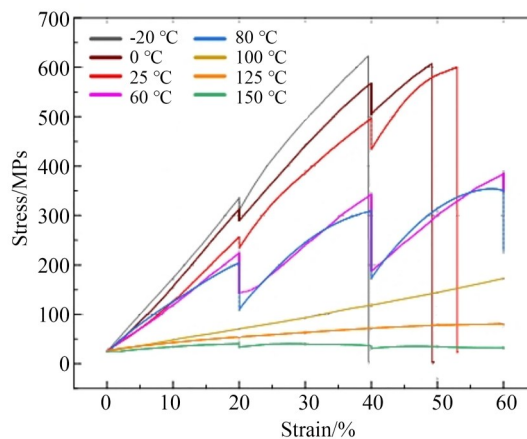


图 8 不同温度下拉伸实验的应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of tensile tests at different temperatures

现出强度增强、延展性下降的特点。整体而言,CFRP 的宏观力学性能对温度高度敏感,特别是在接近或超过其树脂基体玻璃化转变温度($T_g \approx 120^\circ\text{C}$)时,性能劣化尤为显著。

在 25°C 下进行拉伸实验时,CFRP 处于设计使用温度范围内,其基体远未达到 T_g ,可有效承担载荷并在一定程度上抑制纤维屈曲、吸收剪切应力并保持材料韧性。因此,该温度下所获得的力学性能可作为评估其他温度状态下性能变化的重要参考基准。分析实验数据发现,在 -20°C 与室温条件下,CFRP 分别于 $0.79, 0.91$ 与 1.06 mm 处发生断裂。与室温 (599.6 ± 2) MPa 相比, -20°C 与 0°C 下最大抗拉强度提升至 (622.66 ± 2) MPa (变化幅度 $< 5\%$), 但断裂应变明显降低, 显示出更为脆性的断裂模式。这种行为归因于低温下聚合物基体链段运动受限, 材料刚性增强, 弹性模量提升。然而刚性基体缺乏塑性耗能能力, 微裂纹一旦萌生即迅速扩展, 最终诱发脆性断裂。

在升温至 $60, 80, 100, 125$ 和 150°C 的高温实验中, 试样在 1.2 mm 位移下均未发生断裂, 但抗拉强度明显下降。具体表现为: 60°C 下最大强度下降至 (380.12 ± 3) MPa, 150°C 下更是骤降至 (35.41 ± 2) MPa。其中, 100°C 为性能转折点, 这主要由于树脂基体临近 T_g , 其模量明显下降, 进入黏弹响应阶段, 基体黏性增强, 削弱了承载能力及纤维间载荷转移效率, 同时对纤维屈曲和层间滑移的抑制能力也显著下降。此时, 基体通过一定程度的塑性变形吸收能量, 使得材料具备更大的变形能力。当温度进一步升至 150°C (远高

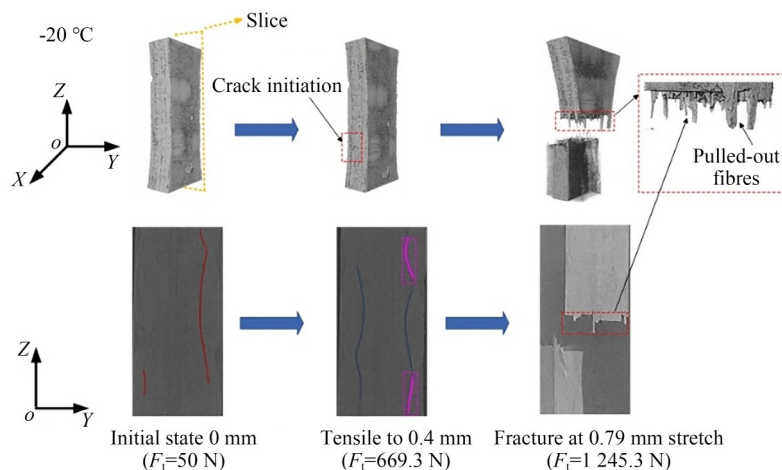
于 T_g) 时, CFRP 力学性能急剧劣化, 抗拉强度骤降。这主要是由于树脂基体发生了热氧化降解, 其化学结构遭到破坏, 导致基体整体力学性能严重下降。同时, 高温也加剧了纤维-基体界面键合强度的削弱或断裂, 影响纤维与基体之间的协同承载能力。

综上所述, CFRP 的力学性能对温度变化高度敏感, 尤其在接近或超过 T_g 的环境下, 其结构完整性与承载能力显著降低。因此, 在实际工程中应充分考虑服役温度对 CFRP 性能的影响, 以保障其安全性与可靠性。

4.3 温度对 CFRP 微观力学行为的影响

将所有切片图像导入 Avizo 软件后, 提取尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的最优片段进行三维重建, 并通过高斯滤波对切片图像的噪声进行去除处理。图 9 展示了初始状态 CFRP 在 4 组不同温度条件下的中心位置的 YZ 平面切片和加载状态下的重构模型。图中, X 轴为纤维铺设方向, Y 轴为厚度方向, Z 轴为高度方向。通过多阈值灰度分割实现纤维、孔隙等组分的有效区分。

基于工业 CT 获取的图像与重建三维模型, 可直观捕捉 CFRP 在拉伸过程中的内部损伤演化特征。结合体积感兴趣区受载状态与图像变化进行分析发现: 在 -20°C 下, 裂纹主要起始于纤维-基体界面, 并沿界面快速扩展, 表明低温下界面热应力集中与基体脆性增强共同促成了界面失效的主导机制; 室温 (25°C) 时, 裂纹通常起始于纤维缺陷处, 随后在纤维与基体协同作用下沿复合路径扩展, 体现出一定的损伤缓释能力; 当温度升至 80°C , 由于树脂基体显著软化, 裂纹



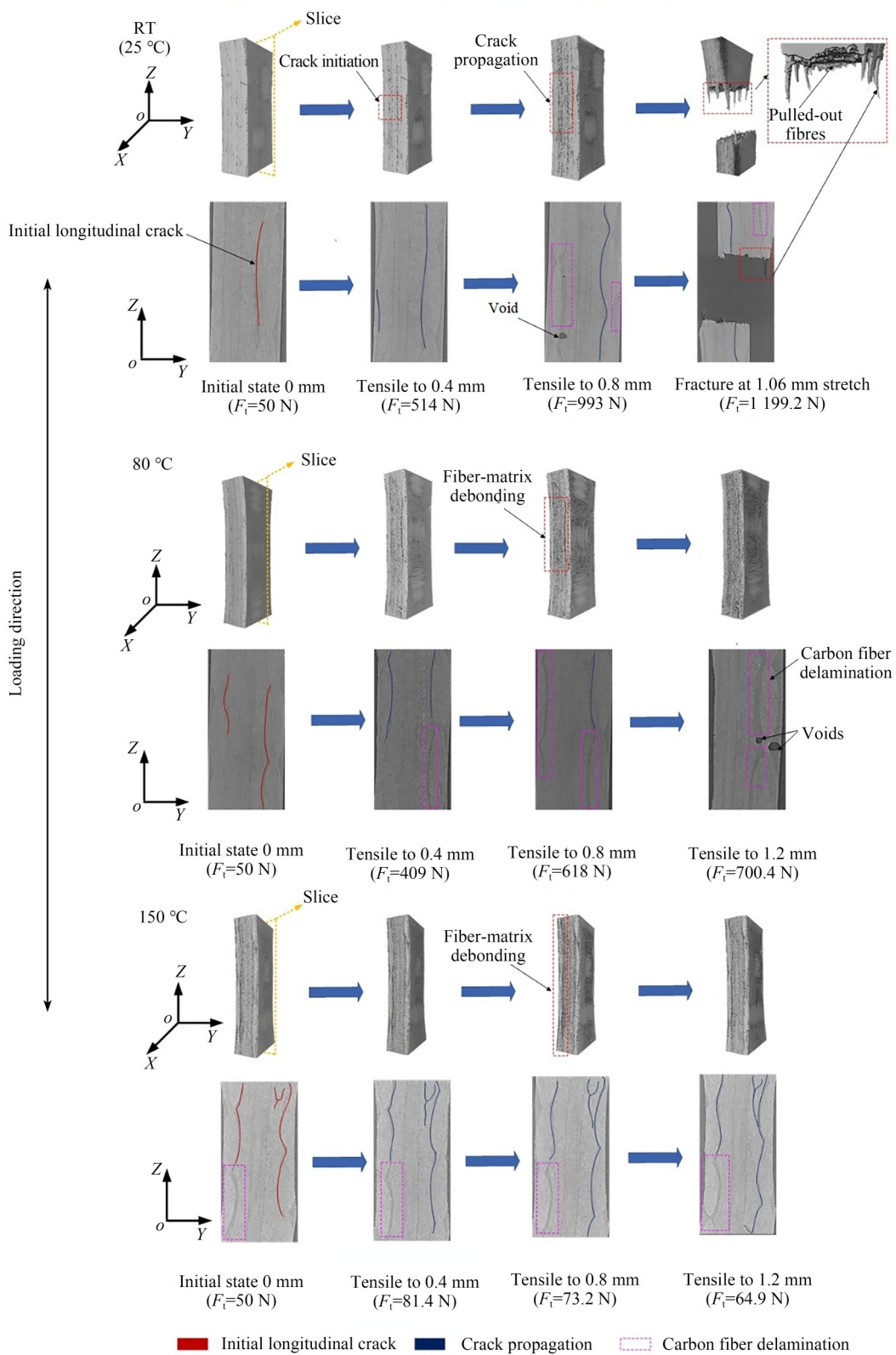


图9 CFRP在不同温度和拉伸状态下的重构模型和中心位置的YZ平面截图

Fig. 9 Reconstructed models of CFRP under different temperatures and tensile states and YZ-plane cross-sectional view of CFRP specimen at initial state (center position)

扩展路径变得更加弯曲,呈现出塑性变形吸能特征,在纤维-基体界面可观察到局部脱黏现象,说明载荷传递路径已发生局部退化;在 150 °C 高温下,重建图像显示出广泛的界面脱黏与基体结构塌陷,表明材料已发生严重热降解与界面失效。

本研究通过双向温控原位加载与高分辨率 CT 技术的耦合,有效揭示了 CFRP 在不同温度场中的微观损伤机制和演化过程,为深入理解复合材料在热-力耦合工况下的失效行为提供了可视化、动态化的分析手段与技术支撑。

5 结 论

本研究构建了一种适用于工业 CT 系统的双向温控原位加载平台,并分析了温度对 CFRP 宏观力学性能与微观损伤演化行为的影响。首先,实现了 -20~150 °C 宽温域内的精准温控,通过

上下对称布置的加热与制冷模块,有效削弱了轴向温度梯度所引起的图像伪影,确保了在极端温度环境下的 CT 成像质量与加载过程稳定性。然后,设计并实现了基于实时反馈的闭环伺服控制系统,具备“力控制-位移控制”双模式切换功能,在复杂热变条件下依然能够保持加载响应的高精度与系统运行的高稳定性。原位实验结果表明,温度显著调控 CFRP 的失效模式。高温条件下,基体软化、界面脱黏以及热氧化降解等因素导致材料强度急剧下降;低温则使基体脆化、界面热应力集中,增强弹性模量但降低断裂应变,表现出典型脆性破坏特征。

作者贡献声明:

肖清俊:数据分析,论文构思和撰写;
任峰:方案提出,论文设计;
张月锋:研究指导,资源提供和项目管理。

参考文献:

- [1] SHI L, YANG H, WU Z Y, *et al.* Effect of fiber layout on low-velocity impact response of intralaminar hybrid carbon/glass fiber braided composite pipes under internal pressure [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 198: 111711.
- [2] 关洪达,李才巨,高鹏,等. 材料高通量制备与表征技术研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(12): 4131-4140.
GUAN H D, LI C J, GAO P, *et al.* Research progress of high-throughput material synthesis and characterization[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(12): 4131-4140. (in Chinese)
- [3] SCOTT A E, MAVROGORDATO M, WRIGHT P, *et al.* *In situ* fibre fracture measurement in carbon-epoxy laminates using high resolution computed tomography[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(12): 1471-1477.
- [4] QIAO Y, SALVIATO M. Micro-computed tomography analysis of damage in notched composite laminates under multi-axial fatigue[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 187: 107789.
- [5] XU F J, SUN L J, ZHU L T, *et al.* X-ray 3D microscopy analysis of fracture mechanisms for 3D orthogonal woven E-glass/epoxy composites with drilled and moulded-in holes [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 133: 193-202.
- [6] GUO L C, HUANG J Z, ZHANG L, *et al.* Damage evolution of 3D woven carbon/epoxy composites under tension-tension fatigue loading based on synchrotron radiation computed tomography (SRCT) [J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 142: 105913.
- [7] SHI D Q, ZHANG B, LIU C Q, *et al.* *In-situ* study on compressive behaviors of different types of 3D SiC/SiC composites using X-ray computed tomography and digital image correlation[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22: 3475-3488.
- [8] MA P H, HU D Y, LIU X, *et al.* Temperature dependent fatigue damage evolution of SiC_f/SiC composites captured using *in situ* X-ray imaging and strain analysis[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 199: 109197.
- [9] HU D Y, PAN J C, MAO J X, *et al.* Mechanical behavior prediction of additively manufactured components based on defect evolution observation by synchrotron radiation X-ray tomography[J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109353.
- [10] YU B, BLANC R, SOUTIS C, *et al.* Evolution of damage during the fatigue of 3D woven glass-fibre reinforced composites subjected to tension-tension loading observed by time-lapse X-ray tomogra-

- phy[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 82: 279-290.
- [11] SUN R J, ZHENG T, YAO Y D, *et al.* Experimental investigation on shear damage evolution of 3D woven composites using *in situ* computed tomography and multi-scale digital image correlation [J]. *Composite Structures*, 2023, 319: 117159.
- [12] LI Z X, GUO L C, ZHANG L, *et al.* *In situ* experimental investigation on the out-plane damage evolution of 3D woven carbon-fiber reinforced composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 162: 101-109.
- [13] PERNAS-SÁNCHEZ J, GARCÍA-RODRÍGUEZ S M, ARTERO-GUERRERO J A, *et al.* High velocity impact response of carbon/epoxy composite laminates at cryogenic temperatures [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 168: 107456.
- [14] ZHAO J, LIANG L, TANG S Y, *et al.* Graphene microheater chips for *In situ* TEM [J]. *Nano Letters*, 2023, 23(2): 726-734.
- [15] MAZARS V, CATY O, COUÉGNAT G, *et al.* Damage investigation and modeling of 3D woven ceramic matrix composites from X-ray tomography *in situ* tensile tests [J]. *Acta Materialia*, 2017, 140: 130-139.
- [16] LI Y C, MENG J X, NIU G H, *et al.* Cryogenic damage mechanisms of CFRP laminates based on *in situ* X-ray computed tomography characterization [J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 247: 110413.
- [17] GROGAN D M, LEEN S B, SEMPRIMOS-CHNIG C O A, *et al.* Damage characterisation of cryogenically cycled carbon fibre/PEEK laminates [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 66: 237-250.
- [18] MENG J X, WANG Y, YANG H Y, *et al.* Mechanical properties and internal microdefects evolution of carbon fiber reinforced polymer composites: Cryogenic temperature and thermocycling effects [J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 191: 108083.
- [19] YANG F Q, ZHANG D H, ZHANG H, *et al.* Streaking artifacts suppression for cone-beam computed tomography with the residual learning in neural network [J]. *Neurocomputing*, 2020, 378: 65-78.
- [20] HU D L, LIU J, LV T L, *et al.* Hybrid-domain neural network processing for sparse-view CT reconstruction [J]. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 2021, 5(1): 88-98.
- [21] TANG S F, HU C L. Design, preparation and properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic composites for aerospace applications: a review [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(2): 117-130.
- [22] MACHADO J J M, GAMARRA P M, MARQUES E A S, *et al.* Numerical study of the behaviour of composite mixed adhesive joints under impact strength for the automotive industry [J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 373-380.
- [23] AHMADI H, KHALAJ G, NAJAFI A, *et al.* Metakaolin-red mud/carbon nanotubes geopolymer nanocomposite: mechanical properties and structural studies [J]. *Materials Research Express*, 2022, 9(2): 025011.
- [24] XIONG C N, SHAO Y B, TONG L W, *et al.* Static strength of CFRP-strengthened preloaded circular concrete-filled steel tube stub columns, Part I: Experimental test [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 184: 110546.
- [25] WILSON P R, CINAR A F, MOSTAFAVI M, *et al.* Temperature driven failure of carbon epoxy composites-A quantitative full-field study [J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 155: 33-40.
- [26] ALAM P, MAMALIS D, ROBERT C, *et al.* The fatigue of carbon fibre reinforced plastics - A review [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166: 555-579.
- [27] CHEN D D, SUN G Y, MENG M Z, *et al.* Residual crashworthiness of CFRP structures with pre-impact damage-An experimental and numerical study [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 149: 122-135.
- [28] ZHAO S, ZHOU X G, YU J S. Effect of heat treatment on the mechanical properties of PIP-SiC/SiC composites fabricated with a consolidation process [J]. *Ceramics International*, 2014, 40(3): 3879-3885.
- [29] 张学习, 郑忠, 高莹, 等. 金属基复合材料高通量制备及表征技术研究进展 [J]. *金属学报*, 2019, 55(1): 109-125.

- ZHANG X X, ZHENG ZH, GAO Y, *et al.* Progress in high throughput fabrication and characterization of metal matrix composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(1): 109-125. (in Chinese)
- [30] QIE Z P, RABBANI A, LIANG Y, *et al.* Multi-scale investigation of pore network heterogeneity and permeability of fluid catalytic cracking (FCC) particles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 440: 135843.
- [31] 虞雨涯, 吴正凯, 吴圣川. 高分辨三维成像原位试验机研制进展及应用[J]. *中国材料进展*, 2021, 40(2): 90-104, 111.
- YU Y K, WU ZH K, WU SH CH. Development and application of *in situ* testing machines based on high resolution three-dimensional tomography [J]. *Materials China*, 2021, 40(2): 90-104, 111. (in Chinese)
- [32] LI J K, SUN Y, YANG S G, *et al.* Revealing low temperature-mechanical coupling failure mechanisms in CFRP laminates with *in situ* observations [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 2817-2825.

作者简介:

肖清俊(2000—),男,四川成都人,硕士研究生,2023年于长春电子科技学院获得学士学位,主要从事车辆车身与底盘系统关键技术方面的研究。E-mail:qjun0712@163.com

通讯作者:

任峰(1982—),男,吉林镇赉人,博士,教授,2009年、2012年于长春理工大学分别获得学士和硕士学位,2015年于吉林大学获得博士学位,主要从事智能机械系统与材料方向的研究。E-mail:renfeng@ccsfu.edu.cn