

融合荧光成像和层析干涉的多模态聚合物 固化行为全场监测^{*}

冯瑞欣¹, 倪梓浩¹, 白玉磊², 谢胜利², 董 博^{1,2,3}

(1. 广东工业大学自动化学院 广州 510006; 2. 广东工业大学智能检测与制造物联网教育部重点实验室
广州 510006; 3. 广东工业大学广东省智能系统与优化集成重点实验室 广州 510006)

摘要:聚合物材料的力学性能与其固化过程密切相关,因此需要全场监测手段为其提供丰富、可靠的实验依据。受限于固化行为的不可逆性,现有监测技术无法对单向固化过程进行重复测量以获取多维全面的监测信息。针对该问题,提出了一种融合荧光成像和层析干涉的多模态全场固化监测方法,借助荧光数字图像相关技术和相位敏感光学相干层析成像技术的高灵敏全场测量优势,同步实现对聚合物表面形貌和内部截面固化过程的全场应变估计。为验证该方法有效性,搭建了一套多模态监测系统,分别建立近紫外荧光激发、蓝色荧光散斑成像、近红外层析成像3个并行监测通道。之后通过背光方式激发光固化聚合物材料CharmFil Flow并对其固化过程进行全面监测。在利用该系统采集荧光散斑和干涉光谱的过程中,首先通过对荧光散斑进行图像相关性计算,实现了表面x-y平面内x,y方向上的全场应变监测;然后通过对层析成像结果进行图像相关性计算,实现了内部x-z平面内的x轴横向全场应变监测;最后通过对层析成像结果进行差分相位分析,实现了内部x-z平面内的z轴纵向全场应变监测。此外,在实验过程中还通过对多个维度下的时间量程收缩形变进行定量表征,验证了多模态固化监测结果的一致性。因此,所提方法可有效地同时实现聚合物固化过程中表面和内部的多模态全场固化监测,为深入聚合物固化动力学、优化固化参数等提供一种全面可靠的测量手段。

关键词:聚合物;全场固化监测;多模态;数字图像相关;层析成像

中图分类号: TH691.9 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4010

Multimodal full-field monitoring of polymer curing behavior integrating fluorescence imaging and tomographic interferometry

Feng Ruixin¹, Ni Zihao¹, Bai Yulei², Xie Shengli², Dong Bo^{1,2,3}

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Detection and Manufacturing Internet of Things, Ministry of Education, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Systems and Integrated Optimization, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The mechanical properties of polymer materials are intricately linked to their curing process. This relationship highlights the need for full-field monitoring techniques to provide rich and reliable experimental data. Due to the irreversible nature of curing, current methods cannot repeatedly measure a unidirectional curing process to get comprehensive, multi-dimensional information. To overcome this, we propose a novel multimodal full-field curing monitoring method that combines fluorescence imaging and tomographic interferometry. This approach leverages the high-sensitivity, full-field measurement capabilities of fluorescence digital image correlation and phase-sensitive optical coherence tomography to simultaneously estimate full-field strain on both the polymer's surface and internal cross-section during curing. We validated this by building a multimodal monitoring system with parallel channels for near-ultraviolet fluorescence excitation, blue fluorescence speckle imaging, and near-infrared tomographic imaging. Using backside illumination, we comprehensively monitored the curing of CharmFil Flow. During data acquisition, we calculated image correlations from fluorescence

speckle to monitor full-field surface strain in the x - y plane. We then applied image correlation to tomographic results for internal transverse full-field strain along the x -direction in the x - z plane and used differential phase analysis for internal z -axis longitudinal full-field strain in the same plane. The consistency of our multimodal curing monitoring results was further confirmed by quantitatively characterizing time-domain shrinkage deformation across multiple dimensions. In essence, our method effectively achieves simultaneous multimodal full-field monitoring of both surface and internal polymer curing, offering a comprehensive and reliable measurement tool for in-depth studies of polymer curing dynamics and optimization of curing parameters.

Keywords: polymer; full-field curing monitoring; multimodal; digital image correlation; tomography

0 引言

聚合物材料以其良好的可设计性和性能调控能力,在航空航天^[1]、工业制造^[2]以及生物医学^[3]等诸多领域发挥着不可替代的作用^[4]。聚合物的固化过程作为决定其微观结构与宏观性能的关键环节,其复杂机理主要体现于化学交联反应、微观结构的时变演化,以及宏观力学响应等多重效应的动态耦合^[5]。然而,受限于固化过程的不可逆特性,聚合物的固化过程无法进行多次重复监测,这使得现有监测技术难以获取多维、全面的监测信息,为深入理解聚合物固化动力学带来了显著的技术挑战^[6-7]。

现有的固化监测技术通常是采用测量某个固化敏感的物理量来实现固化过程的监测,主要有差示扫描量热法、动态热机械分析法、介电分析法、光纤布拉格光栅法等。如 Puhurcuoglu 等^[8]通过差示扫描量热法测试确定环氧树脂的固化动力学参数,为环氧基纤维复合材料的固化基理研究提供了理论依据。Demleitner 等^[9]进行了聚合物的介电测量,利用获得的介电数据对固化动力学进行建模,并预测了聚合物在其他温度下的固化过程。Guo 等^[10]提出一种基于植入式光纤传感的原位实时监测方法,以端羟基聚丁二烯推进剂为模型体系,通过双光纤光栅对固化过程中的内部应力演化进行动态追踪。另一方面,Guo 等^[11]提出一种基于光纤布拉格光栅传感器的在线固化监测技术,解析了酚醛树脂的固化阶段并量化其化学收缩行为,实现了基于应变信号反演固化状态的多阶段动态追踪。然而,尽管上述方法具有较高的测量灵敏度,能满足聚合物固化过程监测的需求,但这些方法仅能提供宏观整体固化程度的评估,不具备全场测量能力。而聚合物固化过程容易受到材料结构和环境等影响,通常具有较强的空间分布特性,因此还需开发一种具备全场测量能力的监测技术。

近年来,相继有学者开展了基于全场应变测量的固化过程可视化监测技术研究。如 Knowles 等^[12]利用数字图像相关(digital image correlation, DIC)方法的非接触式测量和全场分析的优势,通过热膨胀和收缩实验将高温数字图像相关技术应用于聚合物固化过程中的监测,

获得了传统技术无法提供的更多数据。Verschatse 等^[13]提出一种新型电子显微 DIC 散斑图案,适用于 500~5 000 倍放大倍率,可在 0.05%~100% 应变范围内高质量测量微观力学行为,并通过 3 种聚合物微观力学测试验证了其多用途特性。Bukenya 等^[14]利用三维数字图像相关技术(3D-DIC),通过表面直接喷涂散斑的方法,首次实现了对 EPON-86 固性树脂在固化过程中的三维应变场的全场测量与分析。

DIC 是一种基于散斑追踪的算法。它通过计算变形前、后图像中散斑图案的相关性,提取位移变化信息,进而获得全场位移与应变数据。在固化监测领域中,DIC 往往只能通过表面制作散斑的方式来对聚合物表面的固化过程进行监测,难以获得其深度方向的全场固化特征。为弥补这一不足,研究者们将研究方向转向基于光学相干层析成像(optical coherence tomography, OCT)的固化监测方法,OCT 利用光的干涉原理,能够非侵入式的对生物组织或其他材料的内部结构进行高分辨率成像,近年来,研究者们以此为基础,在固化监测领域取得了新的进展。如 Dong 等^[15]使用了一种将光学相干层析技术与定量相位成像相结合的方法,即相位敏感层析成像技术,在时间和空间上将聚合物内部的固化程度分布可视化,为更好地理解聚合物的固化动力学提供了新的方向。Ni 等^[16]提出一种基于光衰减系数的非接触式固化监测方法,通过 OCT 实时获取聚合物固化的干涉光谱,利用其幅值与频率特性解析时变光衰减系数,进而反演聚合物的固化度。此外,基于 OCT 固有的散斑特征,Chen 等^[17]将其作为 DIC 分析的特征标记,实现了复合树脂内部聚合收缩行为的研究,通过对层析成像序列进行相关性匹配分析,有效揭示了复合树脂内部的收缩与脱粘特性。

但需要注意的是,聚合物的固化过程具有不可逆的特性,单一模态监测手段在信息维度上存在局限。在单次测量中,难以获取多维度数据。要全面地表征其固化过程,还需在一次测试中同时获得其表面以及内部的全场信息分布。而联合 DIC 和 OCT 开发一种可实现表面和内部同时测量的多模态固化监测技术是解决上述问题的潜在手段。但受限于传统 DIC 需要在聚合物表面制备散斑的问题,导致联合成像过程会使 OCT 系统受到散斑

表面遮挡的影响,无法实现层析成像。最近,Dong 等^[18]发现,利用荧光成像的荧光 DIC 技术,在消除镜面反射,提高散斑对比度的同时,还能利用荧光散斑的透明特性,同步观察试样内部结构与表面变形。在透明 FEP 管与玻璃纤维复合材料的拉伸实验中,同步测量了表面应变与内部纤维状态。得益于固有的透明特性,荧光散斑允许成像光线穿透,从而实现内部成像,这使得多系统同步测量成为了可能。该成像技术同样被 Chen 等^[19]应用于多层蝉翼结构的多表面同步测量。

基于上述背景,为突破现有监测手段的局限,实现聚合物固化过程多维度、全场形变信息的同步获取,本文提出一种融合荧光成像和层析干涉的多模态全场固化监测方法,借助荧光数字图像相关技术和相位敏感层析成像技术的高灵敏全场测量优势,同步实现对聚合物表面形貌和内部截面固化过程的全场应变估计。同时基于荧光散斑的穿透特性、二向色滤光片对特定波长的选择性透射与反射特性,构建了一套多模态固化监测系统。分别建立近紫外荧光激发、蓝色荧光散斑成像和近红外层析

成像 3 个并行监测通道。可同步捕捉固化过程中表面与内部的形变信息。针对表面形变表征,采用荧光 DIC 技术进行高分辨率处理。对于内部($x-z$ 平面截面)的复杂形变,相较于对层析成像结果进行 DIC 分析的方法,相位敏感层析成像技术具有更好的抗干扰性、更高的空间分辨率和灵敏度,但相位敏感层析成像技术受限于无法对 x 方向的位移场和应变场进行表征,鉴于此,内部形变分析以层析干涉技术为基础,实现双维应变重构, x 方向形变通过对层析成像结果进行 DIC 运算实现,而 z 方向形变则直接利用相位敏感层析成像技术进行表征。这种融合了表面荧光成像与内部层析干涉的多模态协同方法,实现了对固化过程由表面到内部的高精度可视化动态监测。

1 多模态全场固化监测原理

1.1 固化监测系统

多模态固化监测系统内部结构图如图 1 所示。

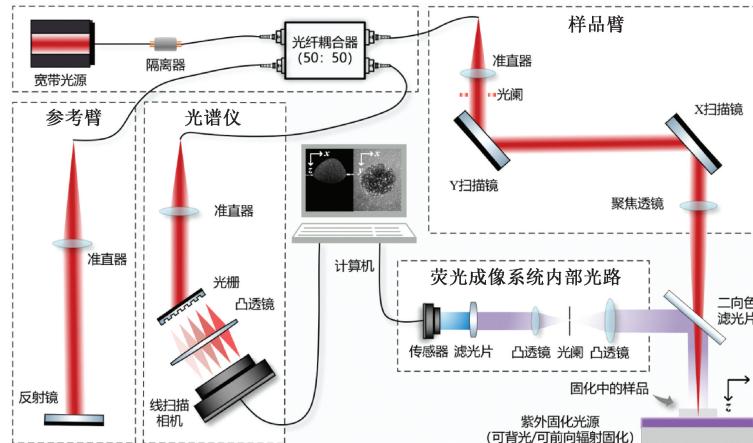


图 1 多模态固化监测系统内部结构

Fig. 1 Internal diagram of the multimodal curing monitoring system

首先,宽带光源输出的光经隔离器进入光纤耦合器(50:50),来自宽带光源的光信号被光纤耦合器等分为两条光纤通路,一条光纤通路进入参考臂,另外一条进入样品臂。进入参考臂的光束在准直器的作用下转换为低发散度的平行光,并由精密定位的反射镜沿光路逆向反射返回。进入样品臂的光束同样经过准直器被准直为平行光,其光束孔径由光阑调节。随后,由 Y 扫描镜和 X 扫描镜控制其扫描位置,经聚焦透镜的作用,会聚光束穿过二向色滤光片(利用其对特定波长的选择性透射特性)后,最终聚焦在样品上。样品内部不同深度会反射不同强度的光,来自样品的反射光和来自参考臂的反射光发生干涉,这些干涉光最终被光谱仪捕捉。光谱仪通

过光栅和凸透镜将接收到的干涉光分离,并通过线扫描相机记录。而不同波长的光会产生不同的干涉图样,通过计算机处理这些图样,可以获取样品的深度信息。同时,样品下方的紫外固化光源发出均匀漫射的紫光,来自样品表面的荧光散斑受紫光激发后发出蓝光,蓝光与紫光混合,经过二向色滤光片(对特定波长的选择性反射特性)后进入荧光成像系统。反射光通过由凸透镜、光阑组成的含孔径光阑的双凸透镜组后被相机的传感器所接收,在相机传感器前方置有滤光片,该滤光片允许荧光散斑发出的蓝光通过,同时滤除其他波段的光,经滤光片筛选出特定的波段荧光,最终被相机传感器接收以生成高对比度荧光图像。

1.2 全场重构方法

在使用多模态固化监测系统进行固化监测时,具体

的固化监测流程以及系统所使用的全场重构方法如图 2 所示。

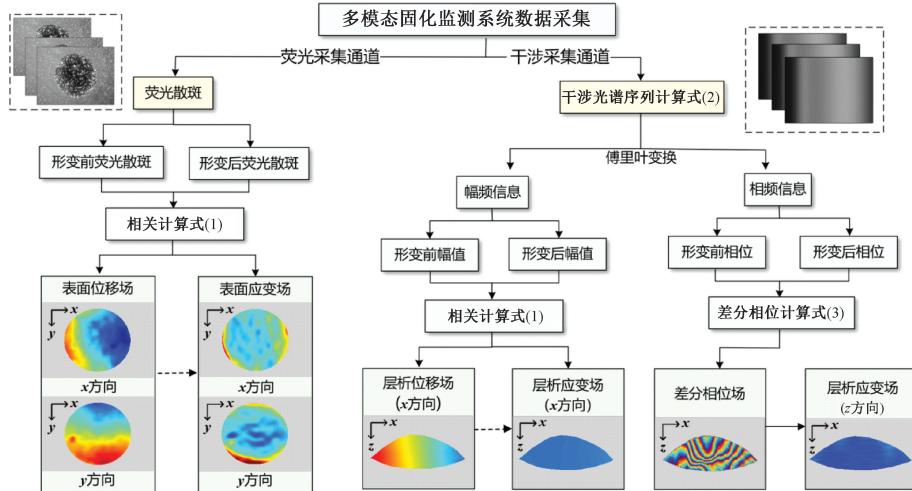


图 2 多模态固化监测全场重构流程

Fig. 2 Full-field reconstruction flowchart of multimodal curing monitoring

首先,多模态固化监测系统对聚合物的固化过程进行数据采集,通过荧光采集通道获取表面荧光散斑图像序列,通过干涉采集通道获取干涉光谱序列。

基于表面形貌时序信息,采用 DIC 相关计算获得表面 x 、 y 方向位移场以及应变场信息。DIC 方法通过分析试样形变前后两帧的数字图像,计算感兴趣区域 (region of interest, ROI) 内每个像素的位移,进而表征表面应变演化信息。其计算流程为:

1) 取任意一张形变前的表面形貌图像作为参考图像,并在其中选取一个 ROI,将其划分为若干子集 (若干相同大小均匀分布的虚拟网格)。每个子集应包含足够的特征以保证计算的可靠性。

2) 通过归一化互相关函数对参考图像的子集与变形图像的子集进行逐一匹配,归一化互相关函数的值越接近 1, 匹配结果越准确, 归一化互相关函数可以由式 (1) 表示, 即:

$$NCC = \frac{\sum_{i,j} (I_f(i,j) - \bar{I}_f) \cdot (I_r(i',j') - \bar{I}_r)}{\sqrt{\sum_{i,j} (I_f(i,j) - \bar{I}_f)^2 \cdot \sum (I_r(i',j') - \bar{I}_r)^2}} \quad (1)$$

式中: $I_f(i, j)$ 为参考子区域的灰度值; $I_r(i', j')$ 为变形后子区域的灰度值; \bar{I}_f 为参考子区域的平均灰度; \bar{I}_r 为变形后子区域的平均灰度。通过定位相关函数峰值确定各子集的最优匹配位置,并引入位移函数量化形变过程中的位移量。

3) 为提高测量精度,引入了三次样条插值算法^[20], 将分辨率提升至亚像素级。完成所有子集位移计算后,

可在 ROI 区域内构建完整的二维位移场,通过对位移场进行空间微分处理后即可获得聚合物表面 x 、 y 方向的应变场。

基于干涉采集通道获取的干涉光谱序列,在滤波消除干涉信号中的直流分量和互相干分量后,干涉光强可由式 (2) 表示,即:

$$I(k) = 2 \sum_{j=1}^M \sqrt{I_R I_j} \cos(2kz_j + \varphi_{j0}) \quad (2)$$

式中: M 为聚合物内部参与干涉表面总数; 幅值 $\sqrt{I_R I_j}$ 反映了第 j 个表面的反射光强, 其强度与材料散射光的光强有关; k 为波数; φ_{j0} 为初始相位; z_j 为聚合物内部第 j 表面与参考面反射光的光程差。试样内部每存在一个表面就会导致干涉信号中存在一个频率, 频率 $f_k = z_j / \pi$ 反映了第 j 个表面的光学深度, 提取其幅频信息可实现深度信息的获取。针对样品上横向位置获取的深度剖面 (A-Scan) 组合起来便形成二维截面图像 (B-Scan), 因此, 干涉信号沿波数轴的幅频特性即为被测材料的内部截面形貌。通过对干涉光谱序列进行傅里叶变换, 可同步提取聚合物固化过程的幅频信息和相频信息。基于幅频信息进行 DIC 计算, 在选取的 ROI 内逐子集解析位移量, 实现 x 方向层析位移场的重构, 进而利用位移与应变的关系构建 x 方向层析应变场。

除此之外, 干涉信号相位的灵敏性也可实现内部 z 方向应变场的重构, 相位项包含初始项 φ_{j0} 和与光程差 z_j 相关的动态相位, 对形变前后的相位进行差分计算后可以得到包含 z 方向形变信息的差分相位, 差分计算过程如式 (3) 所示。

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\cos\varphi_R \sin\varphi_D - \sin\varphi_R \cos\varphi_D}{\sin\varphi_R \sin\varphi_D + \cos\varphi_R \cos\varphi_D} \right) \quad (3)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为差分包裹相位; φ_R 和 φ_D 分别为变形前后的原始相位场和变形相位场。由于反正切函数的限制, 只能得到涵盖截面变形信息的包裹相位差分布, 这种包裹现象会导致相位数据呈锯齿状跳变, 无法直接反应连续的变化。而对相位差进行解包裹后再乘以相关系数即可实现 z 方向层析位移场的重构, 在此基础上对位移场在深度方向进行梯度估计可实现层析应变场的重构。此外, 根据其他方法: 如矢量法^[21]、最小二乘法^[22]可以在不求得位移场的情况下直接根据相位差图对 z 方向应变场进行重构。

2 实验与结果

2.1 多模态固化监测系统

多模态固化监测系统实验装置如图 3 所示, DIC 系

统采用 POINTGREY-Grasshopper3-GS3-U3-91S6M-C 工业相机。其分辨率为 3 376 pixels \times 2 704 pixels, 最高帧率 9 fps, 内置 C 接口带通滤光片 (中心波长 450 nm, 带宽 ± 20 nm)。相机通过 Oeabt-BK-60A-M6 支架固定并实现倾角调节, 底部集成 Oeabt-TSX-L1 位移台提供水平位移调控功能。OCT 系统选择使用 OQLabScope-3.0 商用谱域成像系统, 中心波长 840 nm, 在空气中与组织中分别具备 3 和 2.1 nm 成像深度, 轴向分辨率 1.33 μm , 横向分辨率 18 μm , 其探头由自行搭建的光学支架固定, 确保成像稳定性。样品夹持装置由 Oeabt-TAL-XY60 位移台与 X3-SLH 支架组合而成。二向色滤光片 (尺寸 25.2 mm \times 35.6 mm \times 1 mm) 的光学特性为: 800 \sim 1 100 nm 波段透射, 420 \sim 700 nm 波段反射, 通过恒洋光学 EPH-02 M 干板夹固定, 并经由 PD 系列支杆连接至 DHC-GCM-550102 调节支座, 底部配置 Oeabt-TSX-L1 位移台实现水平位姿校准。固化装置采用波长为 395 nm 的固化光源以及特定支架, 提供可控固化能量输出。

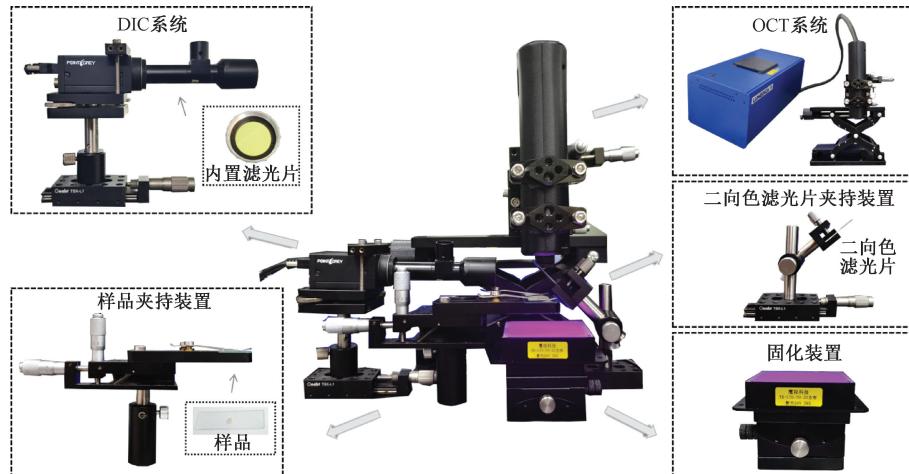


图 3 多模态固化监测系统的硬件组成

Fig. 3 The hardware architecture of the multimodal curing monitoring system

2.2 聚合物固化过程的多模态全场监测

在实验开展前, 首先进行样品的制备工作, 样品选择使用 DentKist, Inc 公司生产的 CharmFil Flow 光固化聚合物材料, 其固化行为具有典型的物理和力学特性, 是近年来固化监测研究中常用的一种材料^[23-24], 将其滴加于透明载玻片基板表面, 并在其表面制备均匀的荧光散斑。完成样品制备后, 将其固定于图 3 中所示的夹持装置中, 确保其在成像过程中的稳定性。随后进行系统的校准, 在材料尚未固化的初始状态, 分别利用荧光采集通道获取其表面荧光散斑图像和干涉采集通道获取其干涉光谱序列, 并以此联合标定材料的初始位置和基底界面。正式实验时, 先启动多模态固化监测系统采集数据, 再打开

固化光源启动固化过程, 确保记录材料的初始状态, 系统同步采集材料在固化过程中的表面荧光散斑序列和干涉光谱序列, 最终基于上述全场重构方法, 对采集数据进行处理和分析, 获得了材料固化的力学表征。

1) 基于荧光成像的表面全场固化监测

在荧光成像系统获取的表面荧光散斑图像序列中, 选取形变前的一帧作为参考图像。如图 4 所示, 采集的荧光散斑图像显示, 被测材料表面分布着清晰、连续的均匀荧光散斑, 无明显的信息缺失或不均匀区域。因此, 为全面表征材料固化过程中的整体形变行为, 将试样表面全域定义为感兴趣区域 (ROI), 进行表面全场位移和应变分析。

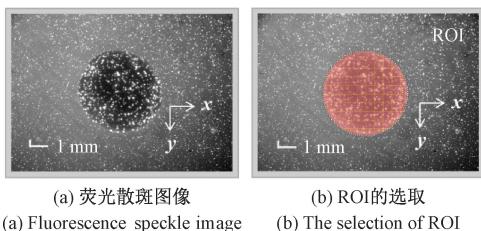


图 4 试样表面荧光散斑图像与对应的 ROI

Fig. 4 The surface fluorescence speckle image and its corresponding region of interest (ROI)

在进行 DIC 计算时,如式 (1) 所示,子区尺寸的选择需权衡空间分辨率与匹配精度。本次计算中设定子区尺寸为 125 pixels \times 125 pixels,确保各子区中包含充分的纹理特征以保障相关匹配的准确性。步长参数设定为 8 pixels,在保证高空间分辨率的同时兼顾计算效率。为应对固化过程中表面可能出现的大变形,在 DIC 分析中采用增量计算的策略,将每帧图像与其前一帧进行相关匹配,避免传统 DIC 因图像退相关导致的失效问题,有效提高了长时间监测的稳定性。该参数配置经分析验证,满足固化过程全场位移场与应变场提取的精度要求。在对整个固化过程表面散斑图像进行 DIC 分析后,提取 $t=5, 10, 20, 40$ s 特征时刻的全场位移场和应变场分布,如图 5 所示。

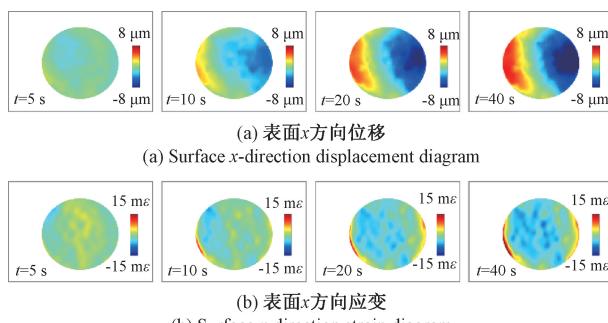
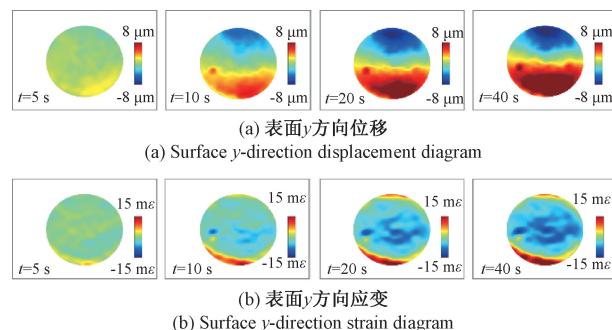
图 5 表面 x 方向全场位移与应变演化时序Fig. 5 Time sequence diagram of full-field displacement and strain evolution in the x direction on the surface

图 5 呈现了材料固化过程表面 x 方向位移场及应变场的演化规律。位移场分布表明,固化初始阶段,位移梯度分布不显著,材料未发生明显宏观形变;随着反应进行,位移场逐渐形成以中轴线为对称的双向梯度分布,形成分明的左侧区域与右侧区域对称结构,且边缘区域位移幅值显著高于中心区域,表明试样沿 x 方向发生向内收缩变形。在位移场的基础上,通过空间梯度计算得出的应变场分布显示,全场应变值随时间呈单调递减趋势,与位移场显示材料持续收缩行为一致。具体而言, x 方向应变场在初始阶段变化微弱,随着反应的推进,负应变

区域逐渐扩展,至 $t=40$ s 时形成显著的水平对称收缩分布,反映出材料在 x 方向发生的强烈收缩。

图 6 展示了材料固化过程表面 y 方向的全场位移与应变演化。

图 6 表面 y 方向全场位移与应变演化时序Fig. 6 Time sequence diagram of full-field displacement and strain evolution in the y direction on the surface

结果表明, y 方向位移场演化趋势与 x 方向具有相似性:固化初期未呈现显著梯度分布,位移幅值维持在较低水平;随反应进程推进,逐渐形成垂直方向梯度分布特征,呈现顶部区域与底部区域对称结构,表明试样沿 y 方向发生收缩形变。对应变图的观测进一步证实了该结论, y 方向负应变持续累计,展现出明确的垂直收缩特性。相较于 x 方向, y 方向位移场与应变场表现出更显著的累计幅值,此方向性差异表明试样在固化过程中存在表面收缩非均匀现象,且 y 方向收缩行为更为剧烈。

此外,应变图像边缘区域呈现较明显的高应变值。这是由于边缘区域在 DIC 计算中易出现匹配误差或插值异常,从而影响计算的准确性。因此,边缘区域的 DIC 分析结果应结合实际图像质量及算法边界处理方式予以合理判断。

2) 基于层析成像的内部全场固化监测

通过对干涉采集通道获取的干涉光谱序列,进行傅里叶变换处理,如式(2)所示,其幅频信息可直接映射试样固化过程的内部截面形貌。基于此截面形貌进行 DIC 计算,如式(1)所示,计算流程与上述表面全场监测中 DIC 分析一致,涵盖 ROI 区域选取、子区尺寸的参数设置、全场位移提取以及应变场的空间梯度推导等关键步骤。由于表面图像与层析截面图像存在分辨率的差异,所以在子区设置和步长选取中有所区别,为确保 DIC 分析的稳定性,本次计算设置子区尺寸为 49 pixels \times 49 pixels,步长设置为 3 pixels。样品内部截面图和对应选取的 ROI 如图 7 所示。

完成对层析图像进行 DIC 分析后,提取 $t=5, 10, 20, 40$ s 特征时间点的全场位移场和应变场数据,如图 8 所示。

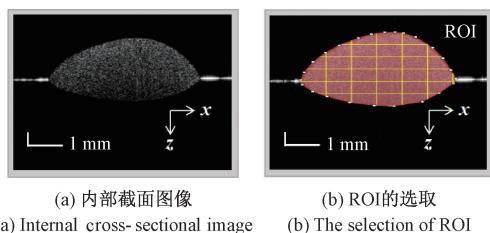


图 7 试样内部截面图像与对应的 ROI

Fig. 7 Internal cross-sectional image of specimen and corresponding ROI

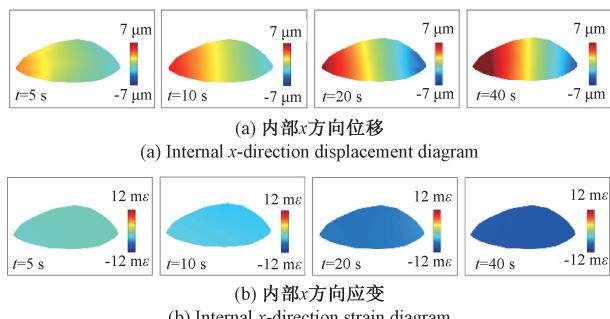


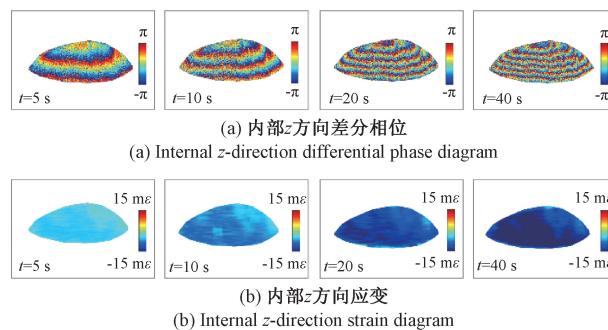
图 8 内部 x 方向全场位移与应变演化时序图

Fig. 8 The sequence diagram of full-field displacement and strain evolution in the internal x direction

受限于内部截面散斑特征的低信噪比特征,DIC 分析需采用较大子区尺寸 (49 pixels \times 49 pixels), 导致原始位移场与应变场的空间分辨率相对较低, 图 8 所示位移场及应变场为双线性插值处理后的结果, 以提升可视化效果。结果表明, 随固化反应进程推进, 位移场呈显著的空间分布特征: 左侧区域与右侧区域分界明显且梯度逐渐加深, 揭示了试样内部在 x 方向发生向中心收缩的位移行为。应变场演化进一步验证了该现象, 表现为持续积累的负应变分布, 证实了试样在 x 方向随时间持续发生收缩变形。

基于干涉光谱序列解调的相位信息, 通过与未固化初始时刻的相位分布进行差分运算, 如式 (3) 所示, 可获得试样内部不同固化时刻的相位差分布图。采用矢量法对该相位差图沿 z 方向进行梯度计算, 由此得到试样内部不同时刻的 z 方向应变图, 如图 9 所示。

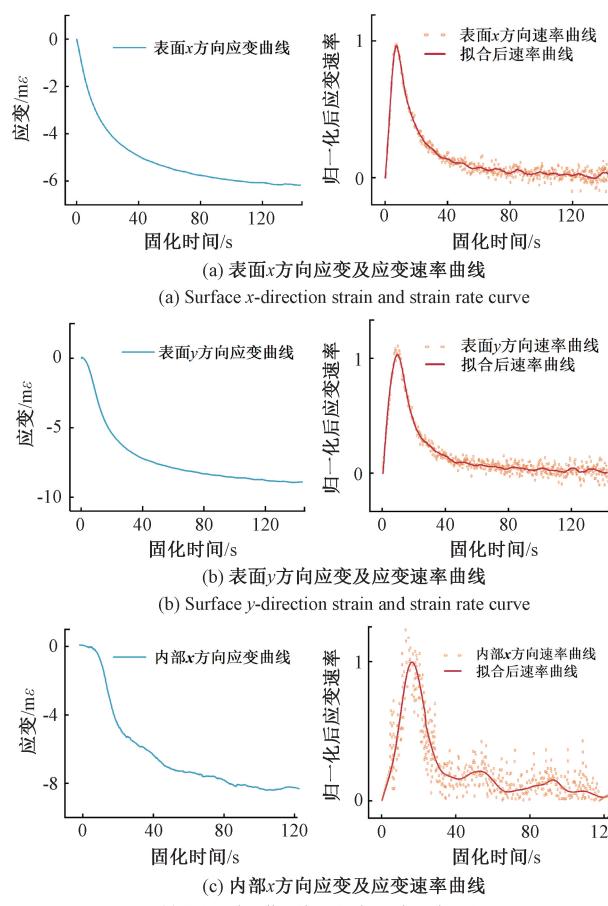
图 9 表明, 在固化初始阶段, 相位差图呈现稀疏纹理特征, 表明材料处于低量级扰动状态, 无明显形变。随反应进程推进, 清晰条纹逐渐形成, 至 $t = 40$ s 演变成方向一致、密集分布的条纹结构, 反映出材料内部发生连续、定向的位移累积。在应变图中, 初始阶段应变均匀, 试样整体变形微弱。随着试样固化程度的不断提高, 应变分布强度显著增强, 至 $t = 40$ s 时试样内部 z 方向发生显著收缩, 应变梯度分布呈现自底部向上递

图 9 内部 z 方向全场位移与应变演化时序Fig. 9 The sequence diagram of full-field displacement and strain evolution in the internal z direction

增的趋势, 该梯度变化特征与在底部使用光源诱导固化的情况相吻合。

3) 固化时间-收缩应变的定量表征与分析

为定量揭示试样固化过程的形变演化规律, 基于多模态系统采集并通过相关算法处理后的表面及内部全场应变数据, 经选取代表性区域进行空间平均处理, 得到试样固化时间-收缩应变曲线。通过对该应变曲线在时间上进行微分运算, 获取相应的固化时间-应变速率曲线, 如图 10 所示。



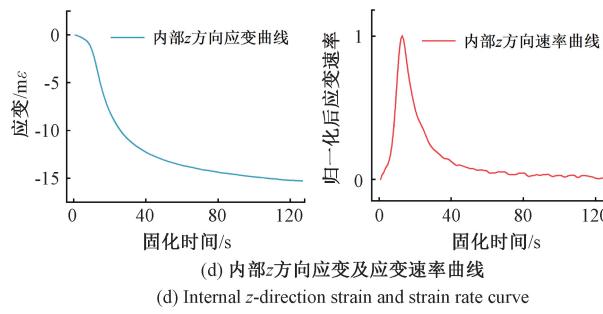


图 10 固化时间-收缩应变的定量表征

Fig. 10 Quantitative characterization of curing time-shrinkage strain

进一步,为更清晰地表征试样固化过程中应变速率的变化特征,对微分后所得到应变速率曲线进行了拟合处理和归一化处理。结果表明,无论是表面还是内部区域,应变在固化初期迅速增大,随后趋于平稳。反映出试样在初期反应阶段快速发生收缩形变,随后趋于固化稳定状态。试样表面 x 和 y 方向的应变响应曲线收敛时间大致相同,但在数值上存在一定差异。表面 x 方向应变最终收敛至约 $-6.1 \text{ m}\epsilon$,而表面 y 方向应变最终收敛至约 $-9 \text{ m}\epsilon$,表明试样表面 y 方向的收缩

变化略大于 x 方向的收缩变化。而内部 z 方向的平均应变相对较大,最终收敛至约 $-15 \text{ m}\epsilon$,内部 x 方向的平均应变收敛至约 $-9 \text{ m}\epsilon$,这表明内部 z 方向发生的收缩形变更为剧烈。通过曲线可以看出,相较于内部 z 方向应变曲线,内部 x 方向应变曲线的抗干扰能力较差,曲线中波动较为明显,这与前文中提到的使用层析成像结果进行 DIC 分析的劣势相吻合。

应变速率曲线即对应变随时间做导数运算的结果。各个方向速率曲线在初始阶段均出现明显的峰值,表明固化反应初期应变速率达到最大,随后迅速衰减并趋于 0,到达稳定状态。该演化规律符合典型的快速响应至缓慢收敛的固化动力学特征。而各个方向到达峰值的时间几乎相同,进一步验证了该方法在揭示固化空间非均匀性与时间演化方面的有效性。

4) 单一模态方法与多模态融合方法的对比

通过对对比单一模态的全场监测方法,包括 DIC、PhS-OCT(相位敏感光学相干层析)、DIC-OCT(对层析成像结果进行 DIC 分析),本文提出的多模态融合监测方法可通过多维固化监测的方式获取更加丰富、可靠的固化信息。上述单一模态固化监测方法与本文提出的多模态固化监测方法的具体对比如表 1 所示。

表 1 固化监测方法对比
Table 1 Comparison of solidified monitoring methods

监测方法	可测范围	测量维度	优势/局限性
DIC	表面全场	x, y 方向	1 无法获取深度全场信息 2 测量灵敏度较低
PhS-OCT	内部全场	z 方向	1 无法获取表面全场信息 2 无法获取内部 x 方向信息 3 测量灵敏度高
DIC-OCT	内部全场	x, z 方向	1 无法获取表面全场信息 2 测量灵敏度较低
本文提出的多模态融合方法	同时表面和内部全场	表面 x, y 方向、内部 x, z 方向	1 兼顾以上 3 种单模态监测方法的优点 2 多模固化监测结果可互为验证,提高监测可靠性

具体包括:(1) 传统单一模态手段在信息维度上均存在一定局限。单模态方法往往只能获取固化过程中某一特定方向的形变信息,难以实现对聚合物表面、内部的同步监测。而多模态融合方法融合了多种技术的优势,能够在一次实验中同时获取多维度的应变场信息,提升了固化监测的完整度。(2) 在多模态固化监测中,当某一模态受环境噪声或信号衰减等因素影响时,融合系统可依靠另一模态的测量结果保持监测过程的稳定性与可靠性。该系统充分融合了 3 种技术的优势,在不同的方向上选取最优模态进行测量,由于该系统集成了多种

学测量手段,多种技术的结果还可以互为验证,从而进一步证明了所提出多模态固化监测方法的准确性与有效性。

3 结 论

随着固化监测技术的不断发展,单一模态监测手段在全面表征聚合物固化进程中的局限性日益凸显。针对当前缺乏能够对聚合物固化过程进行多维度全场表征方法的现状,本文提出并构建了一种多模态聚合物固化行

为全场监测系统。该系统结合了荧光散斑的透光特性与二向色滤光片的选择性透射与反射特性,实现了近紫外荧光激发、蓝色荧光散斑成像与近红外层析干涉三通道的同步运行,从而同步捕捉聚合物固化过程中表面与内部的动态形变场。

为验证所提出方法的有效性,对CharmFil Flow光固化聚合物材料进行了实验,成功实现了其表面(x - y 平面)与截面(x - z 平面)固化过程的多模态同步全场监测。结果清晰展示了各个维度下的收缩应变-固化时间曲线,表面 x 方向应变最终收敛至约-6.1 mε;表面 y 方向应变收敛至约-9 mε;内部 z 方向应变收敛至约-15 mε;内部 x 方向的应变收敛至约-9 mε,这些数据充分揭示了该材料在固化收缩过程中表现出的各向异性。对应变曲线进行求导后得到了试样固化速率随时间的演化信息,各方向应变速率的演化规律具有一致性,这充分证明了该多模态监测方法在不同测量维度上捕获固化过程动态行为的精确性和可靠性。

本文详细阐述了该系统的内部原理与工作流程,并概述了系统捕捉形变信息所采用的处理方法。此外,还对CharmFil Flow及多种市售光固化聚合物材料(如BEAUTIFIL Flow Plus、Z350 XT、COM FLOW等)的固化过程进行了监测,结果呈现出一致的变化规律,进一步验证了该系统的普适性与可靠性。系统还可适用于对热固化聚合物的固化过程进行监测,在保留该系统的同时,仅需增加一个均匀加热的装置即可。此时,系统的下方的紫外固化光源不再用于激发聚合物的固化反应,仅作为荧光激发光源,用于激发样品表面的荧光散斑。

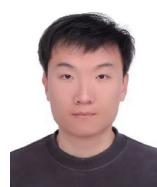
综上,本文所提出的多模态监测方法验证了其在典型聚合物体系中的可行性与应用潜力,为实现聚合物固化过程的多维度表征提供了一种新思路。

参考文献

- [1] 吴靖,陈远哲,郭禹泽,等. 聚合物基压力敏感涂料近真空稳态特性研究及优化[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 123-130.
WU J, CHEN Y ZH, GUO Y Z, et al. Investigation and optimization on static characteristics of polymer-based pressure-sensitive paints in near-vacuum environment[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 123-130.
- [2] 刘晨,陈友兴,谭辉,等. 丁羟衬层的激光超声表征技术研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17): 171-176.
LIU CH, CHEN Y X, TAN H, et al. Laser ultrasonic characterization of butyl hydroxyl lining layer [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (17): 171-176.
- [3] DING L, YU Z D, WANG X Y, et al. Polymer semiconductors: Synthesis, processing, and applications[J]. Chemical Reviews, 2023, 123 (12): 7421-7497.
- [4] 刘明尧,卢一帆,张志建,等. 基于聚合物封装的光纤布拉格光栅压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2392-2398.
LIU M Y, LU Y F, ZHANG ZH J, et al. FBG pressure sensor based on polymer packaging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2392-2398.
- [5] DONG B, BAI Y L, XIE SH L, et al. Phase sensitive optical coherence tomography for noncontact monitoring photocuring process [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(11): 115104.
- [6] 梁群,冯喜平,张坤,等. 热固性树脂固化过程热膨胀与收缩系数测量装置[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 35-43.
LIANG Q, FENG X P, ZHANG K, et al. Measuring device for thermal expansion coefficient and shrinkage rate during cure process of thermosetting resin [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (7): 35-43.
- [7] YANG W K, ZHAO CH, JIA Y L, et al. Simulation and optimized design of cure cycle for three-dimensional polymer matrix composite component [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(16): e53743.
- [8] PUHURCUOGLU N, ARMAN Y. Parameter estimation of epoxy resin cure kinetics by dynamics DSC data[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2024, 35 (7): e6498.
- [9] DEMLEITNER M, SANCHEZ-VAZQUEZ S A, RAPS D, et al. Dielectric analysis monitoring of thermoset curing with ionic liquids: From modeling to the prediction in the resin transfer molding process [J]. Polymer Composites, 2019, 40(12): 4500-4509.
- [10] GUO Y S, JIANG B Q, LIU L, et al. In situ monitoring of curing reaction in solid composite propellant with fiber-optic sensors [J]. ACS Sensors, 2023, 8 (7): 2664-2672.
- [11] GUO R Q, GU Y ZH, ZHOU Y B, et al. On-line cure monitoring of phenol formaldehyde resin using embedded fiber Bragg grating sensor [J]. Materia Today Communications, 2024, 39: 109114.
- [12] KNOWLES K R, RU J W, WIGGINS J S. Thermal and volumetric property analysis of polymer networks and composites using elevated temperature digital image correlation[J]. Polymer Testing, 2017, 58: 48-53.

- [13] VERSCHATSE O, PAEPEGEM W V, CLERCK K D, et al. Development of a versatile speckle pattern of nano-sized polymer particles for high-resolution SEM-DIC[J]. *Polymer Testing*, 2023, 125: 108134.
- [14] BUKENYA K, SABATO A, MAIARÙ M. Cure shrinkage characterization of a thermosetting resin with three dimensional digital image correlation (3D-DIC)[C]. 38th Technical Conference of the American Society for Composites, 2023: 1660-1673.
- [15] DONG B, PAN B. Visualizing curing process inside polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(5): 054103.
- [16] NI Z H, XIE SH L, HUANG P B, et al. Monitoring polymer curing progress through optical attenuation coefficient variations[J]. *Polymer Testing*, 2024, 136: 108481.
- [17] CHEN W C, LAI T W, LI C L, et al. Assessments of polymerization shrinkage by optical coherence tomography based digital image correlation analysis-Part II: Effects of restorative composites[J]. *Dental Materials*, 2024, 40(7): 1064-1071.
- [18] DONG B, LI CH ZH, PAN B, et al. Fluorescent digital image correlation applied for macroscale deformation measurement[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(4): 044101.
- [19] CHEN ZH N, XU Y N, TANG X Q, et al. Dual stereodigital image correlation system for simultaneous measurement of overlapped wings with a polarization RGB camera and fluorescent speckle patterns[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 3345-3357.
- [20] TIAN Q, HUHNS M N. Algorithms for subpixel registration[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1986, 35(2): 220-233.
- [21] MATVEYEV A L, MATVEEV L A, SOVETSKY A A, et al. Vector method for strain estimation in phasesensitive optical coherence elastography[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(6): 065603.
- [22] KENNEDY B F, KOH S H, MCLAUGHLIN R A, et al. Strain estimation in phase-sensitive optical coherence elastography [J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, 3(8): 1865-1879.
- [23] ISLAM M S, NASSAR M, ELSAYED M A, et al. In vitro optical and physical stability of resin composite materials with different filler characteristics[J]. *Polymers*, 2023, 15(9): 2121.
- [24] BAI T, ZHAN L J, ZHANG N, et al. Learning-prolonged maintenance of stimulus information in CA1 and subiculum during trace fear conditioning[J]. *Cell Reports*, 2023, 42(8): 112853.

作者简介



冯瑞欣,2023年于沈阳理工大学获得学士学位,现就读于广东工业大学自动化学院,攻读控制工程专业硕士学位,主要研究方向为层析干涉测量、数字图像相关。

E-mail:2112404304@mail2.gdut.edu.cn

Feng Ruixin received his B. Sc. degree from Shenyang Ligong University in 2023. He is currently pursuing his M. Sc. degree in Control Engineering at the School of Automation, Guangdong University of Technology. His research interests include tomographic interferometry and digital image correlation.



董博(通信作者),2012年于广东工业大学获得学士学位,2017年于广东工业大学获得博士学位,现为广东工业大学副教授,主要从事层析干涉测量、光测力学、传感与成像等方面的研究。

E-mail:b.dong@gdut.edu.cn

Dong Bo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Guangdong University of Technology in 2012 and his Ph. D. degree from Guangdong University of Technology in 2017. He is currently an associate professor at Guangdong University of Technology. His research interests include tomographic interferometry, optical measurement mechanics, sensing, and imaging.