

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614834

深度分辨聚合物固化过程监测:对比研究与自适应 帧间距优化方法*

杨 康¹,白玉磊²,董 博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:深度分辨的固化过程可视化监测方法对深入理解聚合物固化动力学、优化固化工艺具有极其重要的意义。近年来,国际上相继发展出基于数字图像相关(DIC)和相位敏感探测(PhS)方法的两类功能型光学相干层析成像技术(OCT),这两种技术凭借非接触、高分辨率、实时监测的优势,已成为聚合物固化监测的有效手段,但目前研究还存在两方面局限:一方面,缺乏两种方法在实际场景下的系统量化对比;另一方面 PhS-OCT 受 2π 相位模糊效应制约,难以兼顾大形变条件下的监测需求。针对上述问题,量化对比了 DIC-OCT 与 PhS-OCT 在测量灵敏度、范围及抗噪声能力方面的差异,明确两种技术的适用边界。在此基础上,创新性提出基于相位梯度的自适应帧间距调节方法,通过构建“相位梯度-信噪比耦合”的动态调节机制,动态调整监测帧间距,实现量程拓展与累积误差抑制的协同优化。为验证所提方法的有效性,分别开展了双层复合树脂固化实验与牙齿修复模拟实验:在双层树脂实验中,成功将 PhS-OCT 的监测量程从 $-12.21\text{ m}\epsilon$ 拓展至 $-22.15\text{ m}\epsilon$,同时计算效率较传统增量法提升 24 倍;在牙釉质高反射散斑的复杂噪声环境中,DIC-OCT 应变计算失效区域占比达 16.8%,而所提方法依托强抗噪性与动态量程拓展能力,实现了树脂固化全过程的可靠监测。该方法与 PhS-OCT 深度融合后,可实现聚合物固化过程的高精度、大形变、全场动态监测。

关键词:固化过程监测;深度分辨测量;光学相干层析;相衬成像;数字图像相关

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

Deep-resolution monitoring of polymer curing process: Comparative study and adaptive inter-frame spacing optimization method

Yang Kang¹, Bai Yulei², Dong Bo³

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Detection and Manufacturing of IoT of the Ministry of Education, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Province Key Laboratory of Intelligent System and Optimization Integration, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Visualization monitoring methods with high depth resolution for the curing process are of great significance for in-depth understanding of polymer curing kinetics and optimizing curing processes. In recent years, two types of functional optical coherence tomography (OCT) techniques based on digital image correlation (DIC) and phase-sensitive detection (PhS) have been developed internationally. With the advantages of non-contact, high-resolution and real-time monitoring, these techniques have become effective means for polymer curing monitoring. However, current research still presents two main limitations. First, there is a lack of systematic quantitative comparison between the two methods in practical scenarios. Second, PhS-OCT is restricted by the 2π phase wrapping effect, making it difficult to meet the monitoring requirements under large deformation conditions. To address the above problems, this study quantitatively compares the differences between DIC-OCT and PhS-OCT in measurement sensitivity, range and noise immunity, and clarifies the applicable boundaries of the two techniques. On this basis, an adaptive frame interval adjustment method based on phase

收稿日期:2026-01-05 Received Date: 2026-01-05

* 基金项目:国家自然科学基金(62475048,62571145)、广东省自然科学基金(2024A151010230)项目资助

gradient is innovatively proposed. By constructing a dynamic regulation mechanism of "phase gradient-signal-to-noise ratio coupling", the monitoring frame interval is dynamically adjusted to achieve collaborative optimization of measurement range expansion and cumulative error suppression. To verify the effectiveness and practicability of the proposed method, curing experiments of double-layer composite resin and simulated dental restoration experiments are carried out respectively. In the double-layer resin experiment, the monitoring range of PhS-OCT is successfully expanded from $-12.21 \text{ m\epsilon}$ to $-22.15 \text{ m\epsilon}$, and the computational efficiency is improved by 24 times compared with the traditional incremental method. In the complex noise environment of enamel with high-reflection speckles, the proportion of invalid strain calculation regions of DIC-OCT reaches 16.8%, while the proposed method achieves reliable monitoring of the whole resin curing process relying on strong noise immunity and dynamic range expansion capability. After deep integration with PhS-OCT, this method realizes high-precision, large-deformation and full-field dynamic monitoring of polymer curing process.

Keywords: curing process monitoring; depth resolution measurement; optical coherence tomography; phase contrast imaging; digital image correlation

0 引 言

聚合物普遍具有易加工、低导电、低导热、耐腐蚀等特点,被广泛应用于增材制造、柔性电子、复合材料、牙齿修复等工业生产和日常生活当中,已成为航空航天、工业制造、生物医学等多领域的重要材料^[1-3]。其在制备成型期间需经历由单体/低聚物向三维交联网络结构的转变,即固化过程。该过程通常伴随着材料从液态/粘弹态向玻璃态的物理状态演变,直接决定了材料力学特性与界面质量。如粘接界面处的梯度固化会导致残余应力集中,进而使其力学性能下降^[4];复合材料固化度时空分布不均会诱发孔隙率升高与分层缺陷^[5];牙科树脂的聚合收缩应力可能引发修复体边缘微渗漏等^[6]。因此,了解固化动力学对聚合物材料的研发与生产具有极其重要的意义。

聚合物固化是一个复杂的过程,其通常伴随着多种物理量的变化。因此,现有监测方法通常是通过测量某个固化敏感的物理量来实现固化过程的监测。如差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)通过测量固化过程聚合物的反应焓来计算聚合物的转化率^[7];动态热机械分析法(dynamic thermal analysis, DMA)通过测量固化过程聚合物的储能模量来计算其转化率^[8];介电分析法(dielectric analysis, DEA)通过测量固化过程离子电导率的变化来计算其转化率^[9];光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)通过测量固化过程的收缩应变程度来计算其转化率^[10]。但上述这些成熟技术都是对表面或宏观整体固化程度的表征,难以观测到固化过程的空间分布细节,如深度依赖的固化特征和应力集中现象等。此外,受限于仪器复杂结构和接触式测量方式等问题,这些方法也难以适用于在线监测场景。

光学相干层析(optical coherence tomography, OCT)是一种具有微米级分辨率和毫米级量程的层析成像技

术^[11]。它借助近红外光源和低相干干涉原理,可实现透明、半透明物体内部的深度分辨成像,被广泛应用于眼角膜、皮肤、牙齿等生物组织的非侵入式诊断和陶瓷、聚合物、复合材料等工业材料的无损检测^[12-14]。近年来,结合了数字图像相关(digital image correlation, DIC)和相位敏感技术(phase sensitive detection, PhS)后,OCT还可作为一种功能型成像技术,用于测量生物组织/材料在机械和温度载荷下的层析应变场^[15]。因此,相关学者借助其层析应变测量能力,将其拓展应用于聚合物固化过程的深度分辨可视化监测。如2020年Dong等^[16-17]首次将相位敏感OCT技术(PhS-OCT)用于固化监测,清晰观察到聚合物固化过程的深度分布特征;2023年Ni等^[18]将这种PhS-OCT用于牙齿树脂修复过程监测,展示了其在生物医学领域应用的潜在价值;2024年Chen等^[19-20]探索了基于DIC的OCT技术(DIC-OCT)对牙齿树脂修复过程监测的可行性。2025年Feng等^[21]提出了融合荧光成像与层析干涉的多模态全场固化监测方法,通过增量计算的策略实现了大形变条件下两种技术的同步全场监测。尽管上述研究验证了PhS-OCT和DIC-OCT均可用于深度分辨的聚合物固化过程监测,但现有研究仍存在以下局限:1)目前尚无研究在实际固化场景中对两种方法的测量性能开展系统性量化对比;2)PhS-OCT的动态量程受限于 2π 相位模糊效应,现有大形变监测中常采用固定步长的增量策略,但聚合物固化速率存在显著的动态变化特征,固定帧间距难以适配全过程的测量需求。

针对上述问题,本文首先以理论与实验相结合的方式,系统量化对比了DIC-OCT与PhS-OCT在聚合物固化监测中的性能。在此基础上,为突破PhS-OCT的量程瓶颈,本文创新性地提出基于相位梯度的自适应帧间距调节方法(自适应增量法),该方法在保留PhS-OCT测量精度的同时,有效解决了累积误差与量程受限的问题。将其与PhS-OCT深度融合后,可实现聚合物固化过程的高精度、大形变、全场动态监测。

1 测量原理及优化方法

1.1 OCT 测量原理

第1代 OCT 技术在利用宽带光源低相干特性的基础上,借助轴向扫描的方式实现层析成像。因其在时间维度对材料内部进行扫描的成像机制,所以也被成为时域

OCT。尽管时域 OCT 可用于微米级分辨率的层析成像,但其存在成像信噪比低、速度慢等瓶颈,实际应用局限性较大。第2代 OCT 技术借助扫频/光谱成像方式采集干涉信号,并借助傅里叶变换等手段在频域实现层析成像,因此也被成为频域 OCT。得益于显著提升的成像信噪比和成像速度,频域 OCT 在提出不久后便成为了主流的 OCT 技术。光谱域 OCT 成像原理及信号处理如图1所示。

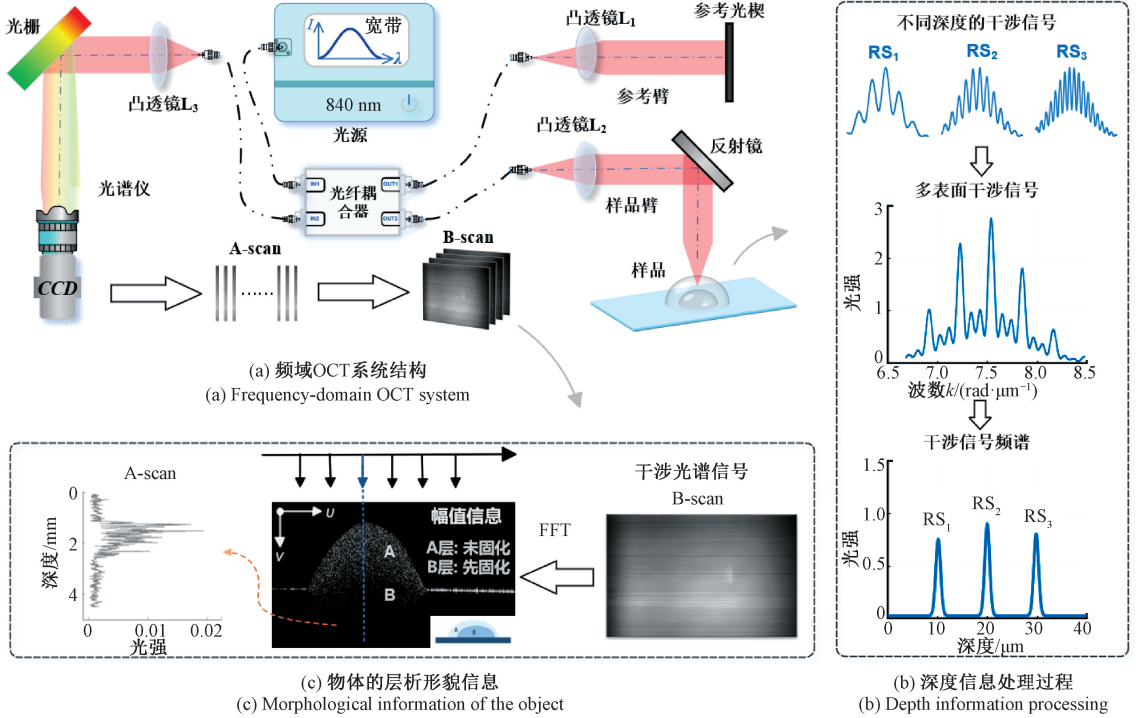


图1 光谱域 OCT 成像原理及信号处理

Fig. 1 Principle of spectral-domain OCT imaging and signal processing

图1(a)是采用光谱成像方式的频域 OCT 系统,通过利用宽带光空间调谐的方式来获取样品的干涉光谱信号^[22],即:

$$I(k) = I_0 + 2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sqrt{I_i I_j} \cos[\phi_i(k) - \phi_j(k)] + 2 \sum_{j=1}^M \sqrt{I_R I_j} \cos[\phi_j(k)] \quad (1)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长; I_0 为直流分量; M 为被测样品内部参与干涉的表面个数; I_i 和 I_j 分别为物体内部第 i 和第 j 个表面的反射光强; $\phi_i = 2kz_i + \phi_{i0}$ 和 $\phi_j = 2kz_j + \phi_{j0}$ 分别为第 i 和第 j 个表面干涉信号的相位, z_i 和 z_j 为其光学深度, ϕ_{i0} 和 ϕ_{j0} 为其初始相位。由于等式右侧第3项的幅值 $\sqrt{I_R I_j}$ 反映第 j 个表面的反射光强, 频率 $f_k = z_j/\pi$ 反映第 j 个表面的光学深度, 因此消除了等式右侧第1项的直流分量和第2项的自相干分量后, 提取其幅频信息可实现深度信息的获取, 如图1(b)所示。再结合切向扫描/成像, 可进一步获得待测物体的层析形貌信

息, 如图1(c)所示。

1) 基于 DIC-OCT 的固化监测原理

在层析成像的基础上, Schmitt 等^[23] 提出可进一步利用待测样品形变前后层析形貌之间的相似性特征, 通过散斑追踪/DIC 技术实现层析应变测量。该技术首先利用 OCT 系统采集形变前后的层析形貌, 然后选取感兴趣的计算区域(region of interest, ROI)并将其划分为均匀分布的虚拟网格后, 通过计算其中每个网格节点的位移最终实现全场位移重构。以变形前图像中任意一点 $P(x_0, y_0)$ 点为例, 首先将其作为中心选取一个大小为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 像素的参考子区后, 通过相关函数在变形后的图像中搜索相关系数最大的子区, 也即目标子区, 则点 $P(x_0, y_0)$ 到目标子区中心点 $P'(x'_0, y'_0)$ 的矢量即为该点的位移矢量。其中, 零均值归一化互相关函数(zero-mean normalized cross correlation, ZNCC)是主流的相关函数之一^[24], 可表示为:

$$C_{\text{ZNCC}} = \frac{\sum_{i,j} (AR_{ij} - \mu_{AR}) \cdot (AD_{ij} - \mu_{AD})}{\sqrt{\sum_{i,j} (AR_{ij} - \mu_{AR})^2 \cdot \sum_{i,j} (AD_{ij} - \mu_{AD})^2}} \quad (2)$$

其中, AR_{ij} 和 AD_{ij} 分别表示目标子区和参考子区内某个像素点 (i, j) 的灰度值, μ_{AR} 和 μ_{AD} 分别是目标子区和参考子区内所有像素灰度值的平均值。对每点进行位移计算得到层析位移场后, 可结合位移与应变的关系, 通过梯度计算实现全场应变重构。在固化过程中, 可通过对干涉光谱的连续采集, 并通过上述层析应变测量, 可实现固化过程的深度分辨固化过程监测^[25-26]。由于 DIC 对位移追踪的灵敏度可达 0.02 pixels, 而 OCT 成像分辨率普遍为 5 $\mu\text{m}/\text{pixels}$, 因此 DIC-OCT 技术对全场位移的测量灵敏度一般为: $0.02 \text{ pixels} \times 5 \mu\text{m}/\text{pixels} = 0.1 \mu\text{m}$ 。再结合 OCT 对大多数材料的成像深度约为 1 mm, 因此 DIC-OCT 对应变测量的灵敏度可估计为 10^{-4} , 也即 100 $\mu\epsilon$ 。

2) 基于 PhS-OCT 的固化监测原理

尽管 DIC-OCT 可用于层析成像基础上的全场位移与应变重构, 但是其测量灵敏度仅为 10^{-4} , 与接触式应变测量技术(如应变片、FBG 等^[27])相差 2 个数量级, 仍存在测量灵敏度不足的问题, 难以表征形变过程存在的空间分布细节。为此, Li 等^[28]在利用相位敏感特性的基础上, 又提出一种 PhS-OCT 技术。该技术在利用 OCT 采集干涉光谱后, 利用变频信息代替幅频信息, 通过在形变前后采集的相位谱进行差分相位计算首先获得相位差分布, 即:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\cos\phi_R \sin\phi_D - \sin\phi_R \cos\phi_D}{\sin\phi_R \sin\phi_D + \cos\phi_R \cos\phi_D} \right) \quad (3)$$

其中 ϕ_R 和 ϕ_D 分别是形变前后的相位谱。进而根据差分相位 $\Delta\phi$ 、中心波长 λ_c 与离面位移 w 的关系: $\Delta\phi = 4\pi w/\lambda_c$, 经相位解包络和梯度计算后, 可实现离面位移场和应变场的重构。在固化过程中, 可通过对干涉光谱的连续采集实现深度分辨的固化过程监测^[29-30]。从上述分析可知, 干涉相位每变化 π 到 $-\pi$ 的一个周期则表示产生 $\lambda_c/2$ 的离面位移, 也即约 400 nm 的位移。考虑到实际测量当中对相位测量的灵敏度通常可达到 10 mrad, 因此其位移测量灵敏度可达 1 nm。再结合 OCT 对大多数材料的成像深度约为 1 mm, 因此 PhS-OCT 对应变测量的灵敏度可估计为 10^{-6} , 也即 1 $\mu\epsilon$, 达到与接触式应变测量同等量级。但其测量量程受 2π 相位模糊效应的制约, 仅能达到亚微米量级, 因此难以满足大形变场景下的测量需求。

1.2 用于 PhS-OCT 固化监测的优化方法

为突破 PhS-OCT 量程限制, 目前普遍采用增量计算的策略, 通过提高时间维度采样率的方式扩展测量量程。然而该方法在实际应用中面临帧间距选择的难题: 若帧

间距过大, 相邻帧的相位差计算易出现超出 2π 量程的风险; 若帧间距过小, 则会导致计算效率低下, 且累积误差显著增大。考虑到聚合物的固化过程普遍遵循自催化动力学模型^[31], 其固化过程呈现“诱导期-加速期-减速期”三阶段特征, 固化速率的动态变化幅度较大, 此时若采用固定帧间距必然难以兼顾全固化周期的测量需求, 容易出现帧间距过大或过小的问题。

基于上述分析, 本文结合聚合物固化过程中固化速率的时域连续变化特征, 提出一种基于相位梯度的自适应帧间距调节方法(自适应增量法), 具体流程如图 2 所示。

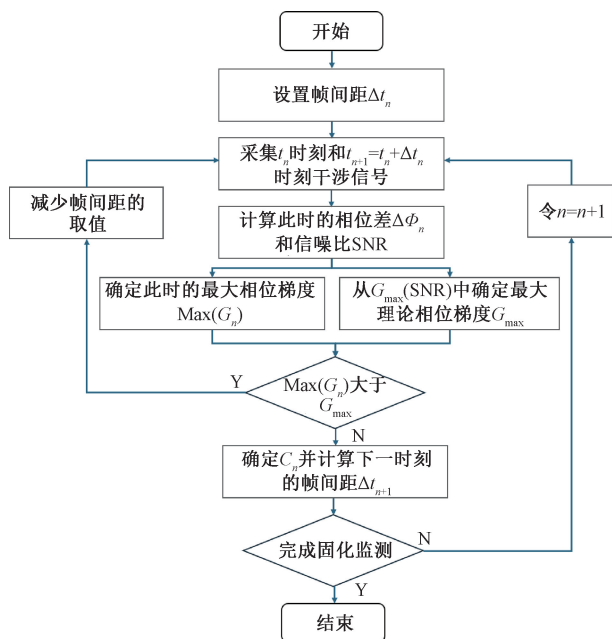


图2 自适应帧间距调节方法流程

Fig. 2 Flowchart of adaptive frame spacing adjustment method

首先设定当前时刻 t_n 的初始帧间距 Δt_n , 考虑到固化初期相位梯度变化较为剧烈, 将 Δt_n 初始值设为 3 帧; 随后在时刻 t_n 与 $t_{n+1} = t_n + \Delta t_n$ 分别采集两帧干涉光谱信号, 经傅里叶变换处理后提取相位信息。进而通过差分计算得到相位差分布 $\Delta\phi_n$ 与信噪比 (signal to noise ratio, SNR), 其中 SNR 通过复平面上的相位相干性量化信号质量, 其表达式为:

$$\text{SNR} = 20 \lg \left(\frac{R_{\text{mag}}}{1 - R_{\text{mag}}} \right) \quad (4)$$

式中: R_{mag} 代表平均向量的模值, 当 R_{mag} 越趋近 1 时, 表明信号占优, 噪声水平低。随后基于相位差分布 $\Delta\phi_n$ 确定当前时刻的最大相位梯度 $\text{Max}(G_n)$, 并依据 SNR 与最大可测相位梯度的关联关系 $G_{\text{max}}(\text{SNR})$, 确定当前样品与环境噪声条件下的理论最大可测相位梯度 G_{max} , 其对应关系如图 3 所示。

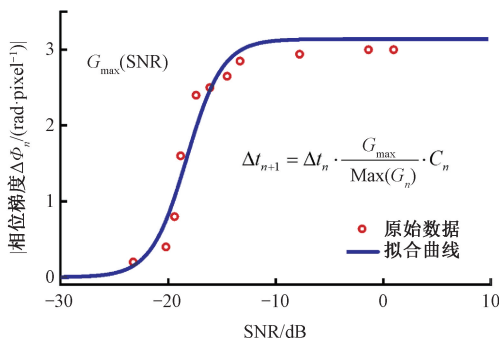


图3 最大可测相位梯度随 SNR 变化曲线

Fig. 3 Curve of maximum measurable phase gradient versus SNR

需要说明的是,该曲线是在不同噪声水平下,通过仿真获取理论可测最大相位梯度后,建立的 SNR 与 $G_{\max}$ 之间的变化关系曲线。若 $\text{Max}(G_n)$ 的值小于 $G_{\max}$,则基于上述参数计算下一时刻的帧间距 Δt_{n+1} ,即:

$$\Delta t_{n+1} = \Delta t_n \cdot \frac{G_{\max}}{\text{Max}(G_n)} \cdot C_n \quad (5)$$

其中,为了应对固化监测过程中,因模型误差、固化速率、环境因素等导致的信噪比波动,还设置了取值范围为 $(0, 1]$ 的安全系数 C_n ,其核心作用是提供充足冗余缓冲,适配聚合反应的非线性加速特征。若 C_n 取值过小,会因帧间距过度缩小导致应变累加运算次数增加,不仅显著延长计算时间,还会叠加累计误差影响测量精度;若 C_n 取值过大,则会因帧间距设置偏宽,在反应速率激增的极端工况下,相邻帧相位差易超出 2π 阈值引发相位混叠,最终导致测量失效。为确保即便在反应速率突变的极端场景下,后续帧的相位梯度仍能稳定处于无混叠区间,有效规避相位模糊带来的测量偏差,同时综合平衡测量可靠性与计算效率,可将安全系数 C_n 设定为 0.6。

2 系统与实验

为验证 DIC-OCT 与 PhS-OCT 两种技术的实际测量效果,本文搭建了线扫描谱域 OCT 实验装置,并基于此系统分别开展了双层复合树脂固化监测实验与牙齿修复模拟实验,实验装置如图 4 所示。

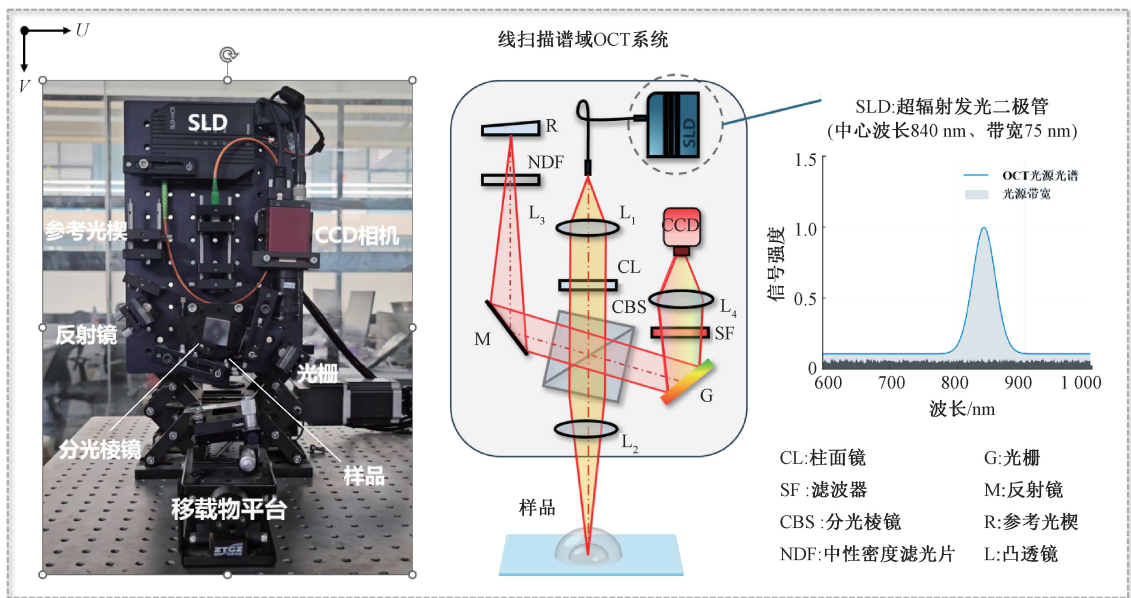


图4 线扫描谱域 OCT 实验装置

Fig. 4 Line-scanning spectral-domain OCT experimental setup

该装置主要由测量系统与高精度空间位移载物平台两部分构成,其轴向分辨率达 $7.5 \mu\text{m}$,横向分辨率为 $3 \mu\text{m}$ 。系统搭载的宽带光源为 Superlum 公司的 SLD-mCS,中心波长 840 nm ,波长带宽 75 nm ;光谱仪配套的线阵电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机则选用 AVT 公司的 MantaG-125B,其分辨率为 1292×964 ,传感器尺寸为 $1/3$ 英寸,帧率设置为 2 fps 。考虑到在测量样品内部信号时光强往往较弱,这类微弱信号极易被

噪声掩盖。所以在信号采集相机的选型上,并未采用采集速度更具优势的 CMOS 相机,而是选用了灵敏度更高、噪声水平相对更低的 CCD 相机。

具体的光路原理为:超辐射发光二极管(super luminescent diode, SLD)发出的宽带光,经分光比为 $50:50$ 的立方分光棱镜(cube beam splitter, CBS)后分为参考光路和样品光路两部分。参考光路由中性密度滤光片(neutral density filter, NDF)、反射镜(mirror, M)和参考光

楔(reference wedge, R)构成,NDF可对参考光路的光强进行有效抑制。参考光经反射后返回至分光棱镜,与样品臂返回的、携带样品结构信息的光束在分光棱镜中发生干涉,形成干涉信号。干涉信号经柱面镜(cylindrical lens, CL)和透镜(L₄)聚焦后进入光谱仪,其中光栅(grating, G)将干涉光按波长分散,经滤波器(spatial filter, SF)滤除杂散光和高阶衍射成分后,由 CCD 探测器接收。CCD 捕获的光谱干涉条纹信号经图像采集卡实时采集,并同步传输至计算机进行傅里叶变换与数据处理,从而获得样品的深度反射信息。

2.1 双层复合树脂固化监测实验

为验证 DIC-OCT 与 PhS-OCT 的测量性能,本文选取临床常用的流动型牙科树脂 3M™ Filtek™ Z350 XT 作为研究对象,展开了双层复合树脂实验。实验中先将树脂滴加至载玻片固化形成 B 层(先固化层),再在其表面滴加 A 层(后固化层),对应的 OCT 成像结果如图 5(a)所示。随后基于 CCD 采集的干涉图,提取幅值与相位信息,分别采用两种技术开展固化全程动态监测。考虑到牙科树脂光固化过程中会产生聚合收缩应变,且该应变可直接表征固化动态演化,本研究选取收缩应变作为核心监测参数,通过应变场(空间域)与时间-应变曲线(时域)定量评估两种方法的应变测量灵敏度与量程范围。针对 DIC-OCT,以固化前任意一帧为参考图像,随后在该图像上划定 ROI,如图 5 所示。

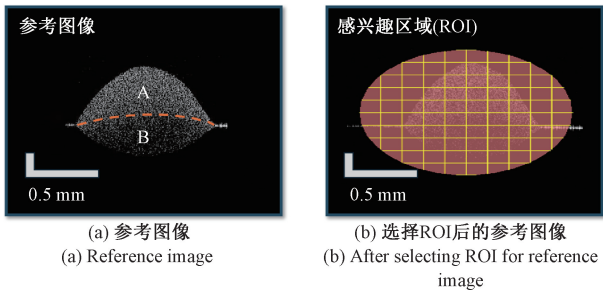


图 5 ROI 选择
Fig. 5 ROI selection

子集尺寸直接决定位移追踪的精度:小子集包含的图像信息不足,易导致匹配准确性下降;而大子集虽能包含更多信息,却会使计算负载急剧增加。为平衡匹配精度与计算耗时,本文经多次实验验证,将子集尺寸设置为 49 pixels×49 pixels,步长设为 8 pixels,可同时兼顾计算效率与匹配精度。相关函数则选用 ZNCC,该函数具备优异的抗干扰能力,能够有效抵御 OCT 图像中噪声对匹配结果的干扰。通过上述子匹配算法完成全场位移场解算后,经梯度运算进一步推导得到全场应变场,最终实现 DIC-OCT 的全场固化监测。

针对 PhS-OCT,参考帧选择与 DIC-OCT 一致,将参

考相位与目标时刻的相位代入式(3),计算得到差分相位。由图 6 可见,单帧原始相位呈现分散分布特征;经相位差计算后,获得了具有明确规律的相位分布结果,可反应参考相位至目标时刻相位的内部变化情况。获得规则分布的差分相位后,在满足 Nyquist 采样定理的前提下,采用矢量法计算其应变,该方法可有效省去位移场的计算且具有先进的抗噪声能力。因此,本文关于 PhS-OCT 的应变计算均采用矢量法。

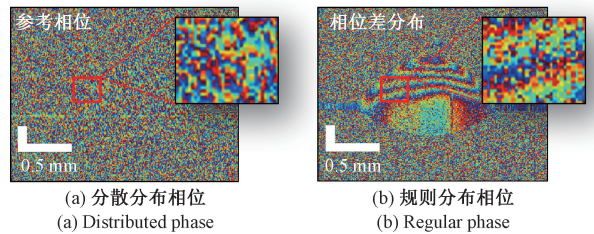


图 6 相位分布
Fig. 6 Phase distribution

1) 固化过程收缩应变的定量分析

为明确 DIC-OCT 与 PhS-OCT 的性能差异,本文先通过固化过程中样品内部动态变化的可视化结果,对比分析两种方法的空间分辨能力,再结合时域应变曲线与稳定性量化指标,全面评估其测量性能。图 7 展示了固化第 2、第 5.5 和第 9 s 时 DIC-OCT 的轴向位移场与应变场,图 8 则对应呈现了 PhS-OCT 的轴向相位差分布与应变场。结果可见,两种方法均能捕捉样品内部的固化变化,但在测量灵敏度与量程上存在显著区别。

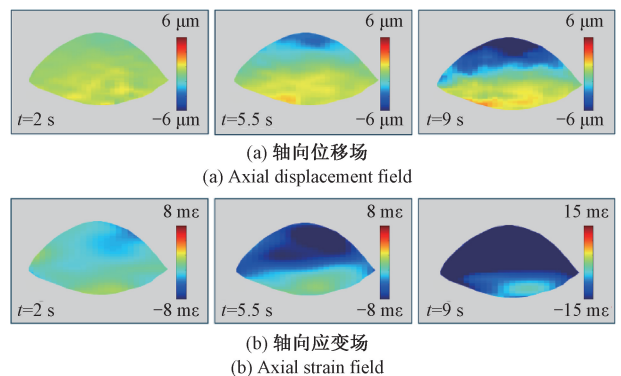
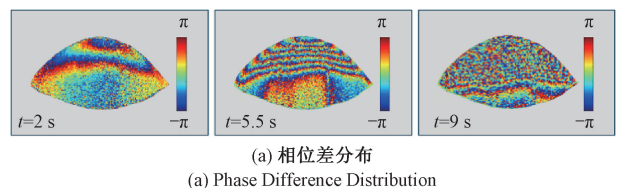


图 7 DIC-OCT 固化监测可视化结果
Fig. 7 DIC-OCT tomographic resolution visualization results



(a) 相位差分布
(a) Phase Difference Distribution

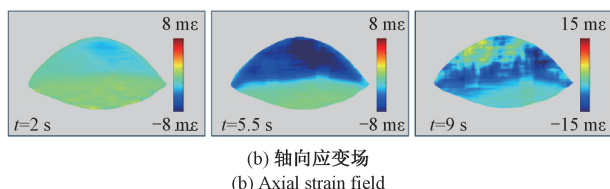


图8 PhS-OCT 固化监测可视化结果

Fig. 8 PhS-OCT tomographic resolution visualization results

具体来看,固化进行至2 s时,A层已呈现显著固化特征,而B层应变相对微弱。DIC-OCT的位移场与应变场均未能清晰辨识A-B层界面,难以捕捉界面区域的微应变变化;相比之下,PhS-OCT凭借相位信息的高灵敏度优势,此时即可清晰分辨A-B层界面的微应变梯度。随着固化进程推进,DIC-OCT的位移场与应变场中逐渐显现出清晰的分层特征;而PhS-OCT的相位条纹密度随固化收缩持续增大,当相邻像素间的相位变化超出 π 时,会产生随机相位(即相位退相关现象),最终引发应变失真。从2~9 s的结果可见,相位分布从连续有序逐渐转为随机离散,对应退相关区域的应变计算出现随机失真值,例如9 s时的大形变区域,本应呈现负值的应变结果出现了异常正值。

为量化两种方法的测量稳定性,本文绘制了A层的时间-应变曲线,如图9所示。并采用平均滑动窗口标准差(mean rolling standard deviation, MRSD)进行分析,该值已通过Savitzky-Golay(SG)函数消去应变本身的增长趋势,仅保留曲线波动特征。

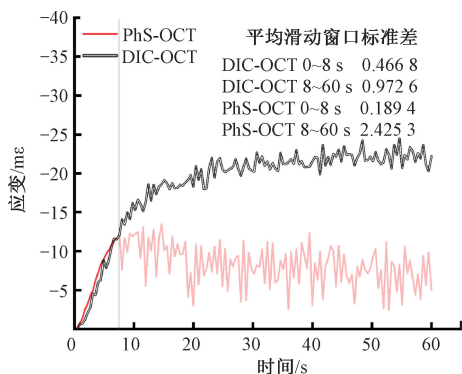


图9 DIC-OCT与PhS-OCT应变曲线

Fig. 9 DIC-OCT and PhS-OCT strain curve

量化结果显示,DIC-OCT应变曲线在前期(0~8 s)波动平缓,对应MRSD值为0.466 8、波动范围约0~6.9%,较低的波动水平表明其测量可靠性较高。8~60 s的MRSD值为0.972 6,最终应变收敛于-20.3~-24.5 mε。PhS-OCT的应变曲线在前期(0~8 s)与DIC-OCT的增长趋势基本一致,但当应变达到-12.21 mε后,曲线出现无规律随机振荡,无法继续反映有效的应变变化

化特征,其有效测量阶段(0~8 s)的MRSD为0.189 4,而应变超出-12.21 mε后MRSD值骤升至2.425 3,与可视化结果中的应变失真现象一致。对比两者,可明确PhS-OCT的测量量程难以覆盖固化全过程的应变变化,无法满足大形变场景下的动态监测需求。

2) 用于PhS-OCT的固化监测的自适应优化实验

为突破PhS-OCT的量程限制,本文分别采用了固定步长的传统增量法与1.2节提出的自适应增量法。自适应增量法的具体实施流程如下:初始帧间距 Δt_n 设定为3帧(保守取值以避免相位混叠);基于实测信噪比 $\text{SNR}=8.2$ dB与图3相位梯度-信噪比曲线,确定理论最大可测相位梯度 $G_{\max}=-2.9$ rad/pixels,同步测得当前实际最大相位梯度 $G_{\max}(\text{SNR})=-0.84$ rad/pixels;将安全系数 $C_n=0.6$ 代入式(5),计算得下一时刻帧间距 $\Delta t_{n+1}=6.21$ 帧,取整为6帧。按此逻辑循环迭代完成固化全程监测。最终,自适应增量法仅需执行5次应变累加运算,对应帧序列为第1、4、11、18、47及120帧,较传统增量法的119次累加,计算效率提升24倍。

图10的结果表明两种方法均能有效的恢复A层中大形变区域不准确的应变值。

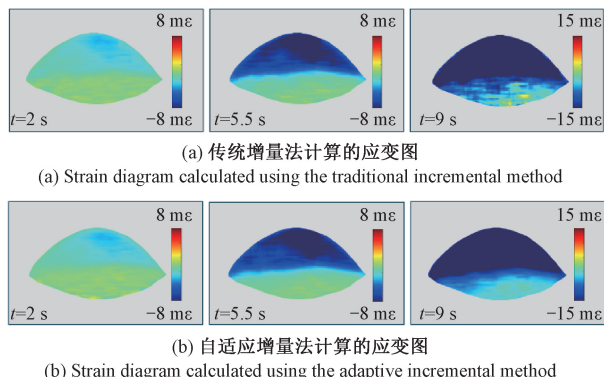


图10 两种增量法固化监测可视化结果

Fig. 10 Visualization results of two incremental curing monitoring methods

传统增量法受累计误差累积效应影响,测量准确性不可避免地下降,尤其在B层微应变区域表现更为显著;相比之下,本文提出的自适应增量法可有效抑制累计误差的影响,在保留高应变灵敏度的基础上实现了测量量程的拓展。具体来看,固化至2和5.5 s时,A层未出现相位退相关,传统增量法累计运算次数仅3和10次,误差较小;但固化至9 s时,传统增量法测得的A-B层界面趋于模糊,分层特征不明显,且B层因应变幅值小,受累计误差影响更显著,应变分布呈现非真实“拉丝状”(真实应变分布应如图8所示呈平滑特征);反观自适应增量法,凭借更少的累加次数,A-B层界面仍清晰可辨,微应变区域的测量灵敏度未受影响。

图 11 通过时间-应变曲线直观对比两种方法的时域稳定性,并叠加了 DIC-OCT 的 SG 包络线,绘制 SG 包络线的 MRSD 值以 DIC-OCT 0~8 s 时段的 0.466 8 作为标准。结果可见, DIC-OCT 的 SG 包络线最终收敛于 $-21.814\ 4\sim -22.747\ 4\text{ m}\epsilon$ 范围;传统增量法虽然全程 MRSD 仅为 0.135 9,但因执行 119 次应变累加运算,累积误差持续叠加,最终应变结果约收敛于 $-25\text{ m}\epsilon$,明显超出 $-22.747\ 4\text{ m}\epsilon$;而自适应增量法通过动态调节帧间距,有效抑制了累积误差的产生,最终应变结果收敛于 $-22.15\text{ m}\epsilon$,且全程的应变结果均落于 SG 包络线范围内,充分体现了其优异的时域测量稳定性。

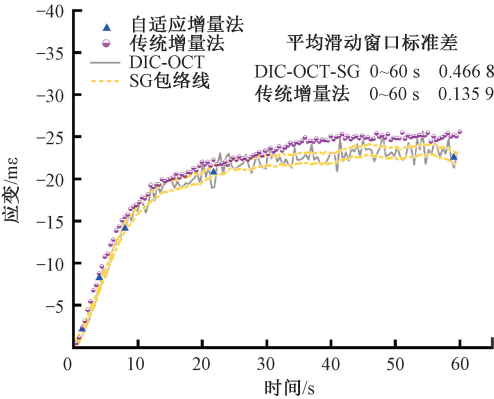


图 11 PhS-OCT 增量方法时间-应变对比
Fig. 11 Comparison of time-strain using the incremental PhS-OCT method

2.2 牙齿修复模拟实验

为验证自适应增量法在复杂实际场景中的适用性,本小节构建牙齿修复模拟模型,复现临床牙科树脂修复的固化行为。实验选取离体人牙样本,制备深度为 $1.2\pm0.1\text{ mm}$ 的标准窝洞并将相同的树脂材料充填至窝洞内,如图 12 所示。成像结果中可清晰辨识牙釉质、牙科树脂材料及其界面边界,表明该系统的测量深度与成像分辨率均能满足牙科树脂修复过程的监测需求。

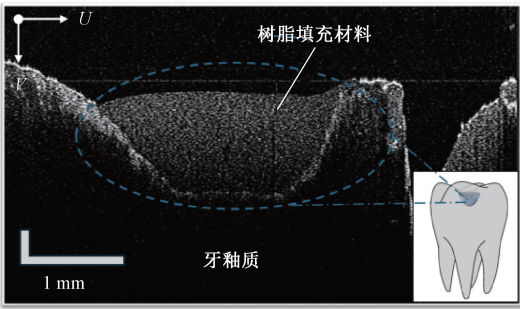


图 12 牙齿填充样本
Fig. 12 Diagram of a dental filling sample

图 13 展示了树脂固化进程中 2 s(诱导期)、5 s(加速期)、15 s(减速期)这 3 个时间点的 DIC-OCT、PhS-OCT 与自适应增量法的应变空间分布结果,可直观观测到修复体的动态固化状态。

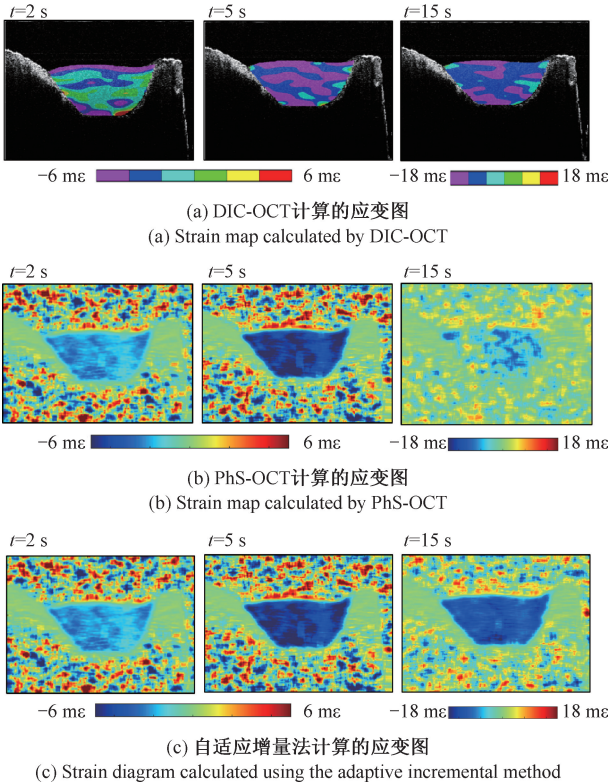


图 13 牙齿填充样本固化监测可视化结果
Fig. 13 Visualization results of dental filling sample curing monitoring

在诱导期(2 s),此时树脂固化处于应变微小的初始阶段。从应变图可见, DIC-OCT 的树脂中间区域无明显颜色变化,反映其灵敏度不足,无法有效捕捉该阶段的微应变;相比之下, PhS-OCT 与自适应增量法的应变图中,树脂中间区域能清晰呈现微应变的空间梯度,直观体现二者对微小应变的识别优势;加速期(5 s):此时树脂固化进入应变快速增长的加速阶段,3 种方法的应变图均能捕捉到明显的应变变化。DIC-OCT 的应变图中,树脂中间区域出现了清晰的色彩梯度变化,说明其已能识别该阶段的应变增长。但牙釉质-树脂边界处,牙釉质高反射散斑干扰了 DIC-OCT 的散斑匹配计算,导致对应区域应变结果失真,表现为绿色区域,失效区域约占树脂整体的 16.8%。相比之下, PhS-OCT 凭借相位信息对噪声的强鲁棒性,应变图中树脂边界清晰,无明显失真区域,能准确呈现边界附近的应变分布;减速期(15 s):该阶段应变变化进入缓慢增长阶段。PhS-OCT 因固化程度增大、应变超出其量程导致的相位退相关现象,已无法反映修

复体的真实应变分布;而自适应增量法的应变图中,树脂区域呈现均匀的颜色分布,与该阶段修复体各区域均发生显著固化的状态高度契合。

图14对3种方法的时域应变变化特征进行了量化分析,其中DIC-OCT的应变曲线由有效测量区域数据计算所得。

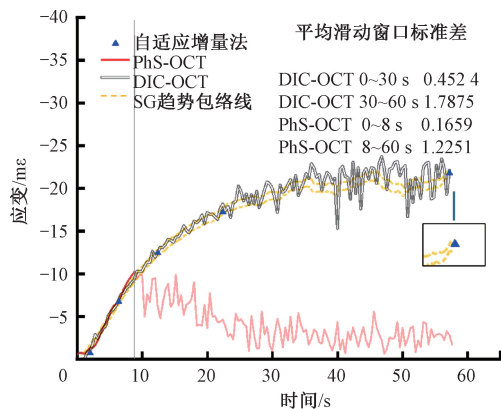


图14 3种监测方法应变曲线及MRSD分析图

Fig. 14 Strain curves and MRSD analysis by three methods

当0~30 s时,波动幅度较小(MRSD=0.452 4),30 s后受散斑匹配误差等干扰,曲线波动显著增大(MRSD升至1.787 5),数据稳定性下降。为此,本研究以DIC-OCT前30 s的MRSD(0.452 4)为波动基准,绘制其SG趋势对应的包络线,该包络线最终收敛区间约为-21.6~-22.7 mε。PhS-OCT的应变曲线受量程限制,应变测量结果仅为-10.2 mε,难以覆盖树脂固化全过程的应变变化。自适应增量法则实现了全过程的应变监测,所有应变结果均落在DIC-OCT的SG包络线范围内,最终应变量收敛于-22.2 mε。上述结果验证了本文提出的自适应增量法在牙科修复场景中的适用性,体现了该方法的临床实用价值。

3 结 论

本文以流动型牙科树脂3M™ Filtek™ Z350 XT为研究对象,以收缩应变作为表征参数,针对PhS-OCT与DIC-OCT在聚合物固化深度分辨监测中存在的两大关键问题,开展了系统性研究:1)目前缺乏两种方法在实际场景下的系统性量化对比;2)PhS-OCT受 2π 相位模糊效应制约,难以兼顾高灵敏度与大形变场景的监测需求。

为解决上述问题,本文创新性提出基于相位梯度的自适应帧间距调节方法,构建“相位梯度-信噪比耦合”的动态调节机制。该机制区别于传统固定步长策略,可实时匹配聚合物固化速率变化特征,在保留PhS-OCT高灵敏度(10^{-6})的同时,有效突破 2π 相位模糊带来的量程

限制。此外,本文对两种技术的实测性能开展系统性对比,明确了DIC-OCT量程宽但微应变识别能力不足(灵敏度 10^{-4})、PhS-OCT灵敏度高但测量量程受限的性能边界,为不同应用场景下的技术选择提供了数据支撑。

双层复合树脂与牙齿修复模拟实验充分验证了所提方法的有效性。在双层复合树脂实验中,通过动态调节帧间距,成功将PhS-OCT的测量量程从-12.21 mε拓展至-22.15 mε,计算效率较传统增量法提升24倍,且累积误差得到有效抑制;在牙齿修复实验中,面对牙釉质高反射散斑的复杂噪声环境,DIC-OCT的应变计算失效区域占比达16.8%,PhS-OCT则因量程限制仅能测量至-10.2 mε,而所提方法凭借强抗噪性与动态量程拓展能力,实现了固化全程的可靠监测,充分验证了其在牙科修复场景中的适用性。

综上,本文提出的基于相位梯度的自适应帧间距调节方法,有效协调了PhS-OCT的高灵敏度与大形变的监测需求,为聚合物固化过程的高精度、大形变动态监测提供了一种全新技术方案。

参考文献

- [1] 陈少轩,陈诚,张宏儒. 复合柔性电子变形失配数字图像相关研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 48-53.
CHEN SH X, CHEN CH, ZHANG H R, et al. Research on digital image correlation of deformation mismatch in composite flexible electronics [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(6): 48-53.
- [2] 王嘉庆,田祺,吴文征,等. AlSi10Mg及其复合材料增材制造研究进展:材料设计、成形及工艺调控(特邀)[J]. 中国激光, 2026, 53(4): 162-185.
WANG J Q, TIAN Q, WU W ZH, et al. Research progress on additive manufacturing of AlSi10Mg and its composites: Material design, forming and process control (invited) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2026, 53(4): 162-185.
- [3] NOGALES F M, BORRERO-LÓPEZ Ó, PAJARES A, et al. On the suitability of photocuring-assisted DIW for manufacturing complex prosthesis from commercial dental composites [J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2024, 35(1): 59.
- [4] WANG J H, WANG R S, JI X X, et al. Enhancing and toughening bamboo interfacial bonding strength by reactive hyperbranched polyethyleneimine modified phenol formaldehyde resin adhesive [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 8213-8228.
- [5] BODESHEIM D, CROY A, CUNIBERTI G. Elastic

- properties of defective 2D polymers from regression driven coarse-graining[J]. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 2025, 21(21): 11210-11218.
- [6] ALHUSSEIN A, ALSAHAFI R, BALHADDAD A A, et al. Novel bioactive nanocomposites containing calcium fluoride and calcium phosphate with antibacterial and low-shrinkage-stress capabilities to inhibit dental caries[J]. *Bioengineering*, 2023, 10(9): 991.
- [7] BLACKMAN M A, SHOFNER M L, CHATHAM C A. Investigating fast scanning calorimetry and differential scanning calorimetry as screening tools for thermoset polymer material compatibility with laser-based powder bed fusion[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2025, 7(2): 719-728.
- [8] BENALI N, ALSHAHRANI H, DE BARROS S. Dynamic mechanical analysis of shape memory polymers: Thermomechanical behavior and influence of thermal stimuli[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2025, 303: 2507-2514.
- [9] VOGELWAID J, BAYER M, WALZ M, et al. Process optimization of the morphological properties of epoxy resin molding compounds using response surface design[J]. *Polymers*, 2024, 16(8): 1102.
- [10] YAN W, BI ZH H, SONG Y, et al. FBG-based UV-curing kinetics analysis by exothermic behavior[J]. *Photonic Sensors*, 2025, 15(2): 250203.
- [11] 杨建龙,张浩然,刘畅,等. 基于光场幅度动态变化的 OCT 功能成像原理和应用(特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(2): 268-283.
- YANG J L, ZHANG H R, LIU CH, et al. Optical coherence tomography based on dynamic changes in light field amplitude for functional imaging (invited)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(2): 268-283.
- [12] AMBRÓSIO R, ESPORCATTE L P G, DE CARVALHO K A, et al. Combined rotating ultra-high-resolution spectral domain OCT and scheimpflug imaging for in vivo corneal optical biopsy[J]. *Diagnostics*, 2024, 14(13): 1455.
- [13] YU J W, GUO J CH, GONG L ZH, et al. Synergistic antifungal activity and mechanism of piroctone olamine and sorbitan caprylate against *Malassezia restricta*[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2026, 137(1): lxxg009.
- [14] HANNAY V, CZERPAK C, QUIGLEY H A, et al. A noninvasive clinical method to measure in vivo mechanical strains of the lamina cribrosa by OCT[J]. *Ophthalmology Science*, 2024, 4(4): 100473.
- [15] CHEN ZH SH, CHEN ZH D, GUO T Y, et al. Depth-guided DIC for 3D shape, deformation, and strain measurement on discontinuous surfaces[J]. *Optics Express*, 2025, 33: 11638-11654.
- [16] DONG B, PAN B. Visualizing curing process inside polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(5): 5141827.
- [17] 董博,潘兵. 光学相干层析技术及其在实验力学中的应用[J]. *科学通报*, 2020, 65(20): 2094-2105.
- DONG B, PAN B. Optical coherence tomography and its applications in experimental mechanics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(20): 2094-2105.
- [18] NI Z H, XIE SH L, LIAO W J, et al. Measuring polymerization shrinkage of dental composite by using PhS-OCT[J]. *Measurement*, 2023, 221: 113471.
- [19] CHEN W CH, CHUANG SH F, TSHENG P CH, et al. Assessments of polymerization shrinkage by optical coherence tomography-based digital image correlation analysis—part I: Parameter identification[J]. *Dental Materials*, 2024, 40(6): 8.
- [20] CHEN W CH, 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.
- [21] 冯瑞欣,倪梓浩,白玉磊,等. 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[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(10): 396-405.
- FENG R X, NI Z H, BAI Y L, et al. Full-field monitoring of multi-modal polymer curing behavior by fusing fluorescence imaging and tomographic interferometry[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(10): 396-405.
- [22] 王鲁通,王毅,徐宇帅,等. 基于局部信噪比阈值调节的分光谱去相关光学相干断层扫描血管造影方法[J]. *光学学报*, 2024, 44(5): 151-160.
- WANG L T, WANG Y, XU Y SH, et al. Split-spectrum threshold decorrelation optical coherence tomography angiography method based on local signal-to-noise ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(5): 151-160.
- [23] SCHMITT J M. OCT elastography: Imaging microscopic deformation and strain of tissue[J]. *Optics Express*, 1998, 3(6): 199-211.
- [24] 金旭,张一鸣,李广,等. GPR 初值引导自监督 DIC 的旋转结构位移场测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(11): 193-204.
- JIN X, ZHANG Y M, LI G, et al. GPR initial value guided self-supervised DIC method for displacement field

- measurement of rotating structures[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(11): 193-204.
- [25] 李开平,蔡萍. 数字图像相关方法的亚像素算法性能研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 180-187.
- LI K P, CAI P. Study on sub-pixel algorithm performance of digital image correlation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 180-187.
- [26] 钟俊杰,邵珩,聂中原,等. GPU加速的路径依赖数字图像相关法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 17-24.
- ZHONG J J, SHAO H, NIE ZH Y, et al. GPU accelerated path-dependent digital image correlation method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(10): 17-24.
- [27] 姬星辰,袁配,吕峥,等. 基于双AWG的新型FBG连续解调方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 159-166.
- JI X CH, YUAN P, LYU ZH, et al. Research on a novel FBG continuous demodulation method based on dual AWG[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 159-166.
- [28] LI CH H, GUAN G Y, CHENG X, et al. Quantitative elastography provided by surface acoustic waves measured by phase-sensitive optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 722-724.
- [29] DONG B, WU R, NI Z H, et al. Digital image correlation-assisted phase-sensitive optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 2024, 49(4): 867-870.
- [30] 周宁,钟舜聪,张秋坤,等. 微梁模态分析的声激励光学相干振动层析系统[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 47-54.
- ZHOU N, ZHONG SH C, ZHANG Q K, et al. Acoustic excitation optical coherence vibration tomography system for microbeam modal analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12): 47-54.

- [31] SVOBODA R, MACHOTOVÁ J. Polymer crystallization: Universal macroscopic description via the autocatalytic hofmann-lauritzen approach[J]. ACS Omega, 2025, 10(16): 16602-16619.

作者简介



杨康, 2023年于重庆交通大学获得学士学位, 现为广东工业大学硕士研究生, 主要研究方向为层析干涉测量、数字图像相关。

E-mail: 2112404266@mail2.gdut.edu.cn

Yang Kang received his B. Sc. degree from Chongqing Jiaotong University in 2023. He is currently pursuing his master's degree at Guangdong University of Technology. His main research interests include being tomography interference measurement and digital image correlation.



白玉磊, 2011年于广东工业大学获得学士学位, 2016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, 主要研究方向为层析干涉测量、光信号处理、智能计算成像。

E-mail: ylbai@gdut.edu.cn

Bai Yulei received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Guangdong University of Technology in 2011 and 2016, respectively. He is currently an associate professor at Guangdong University of Technology. His research interests include chromatographic interference measurement, optical signal processing, and intelligent computational imaging.



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, 主要研究方向为层析干涉测量、光测力学、传感与成像。

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

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