

# 光纤形状传感器封装过程中残余应力的分布式实时监测

尹国路<sup>1,2\*</sup>, 徐州<sup>1</sup>, 朱涛<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

<sup>2</sup>煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆大学, 重庆 400044

**摘要** 设计了一种柔性细径光纤束形状传感器及其注胶封装装置,采用光频域反射仪的分布式应变测量技术,实验探究了形状传感器在封装过程中胶水材料及配比对残余应力的产生、积累和分布情况的影响。实验结果表明,胶水交联反应使得光纤产生的残余应变随着固化时间的推移逐渐增大,且形状传感器中 3 根光纤的残余应变随时间的积累以及沿光纤轴向的空间分布具有一致性。经过约 16 h 的固化反应后,3 根光纤的残余应变达到最大值并稳定保持在 80~100  $\mu\epsilon$  范围内。该研究成果最大限度地减小光纤形状传感器封装过程中的残余应变,为高精度形状测量提供了基础。

**关键词** 光纤光学; 光纤形状传感器; 光频域反射仪; 残余应力监测

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1606002

## Distributed Real-Time Monitoring of Residual Stress During Packaging Process of Optical Fiber Shape Sensor

Yin Guolu<sup>1,2\*</sup>, Xu Zhou<sup>1</sup>, Zhu Tao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** A flexible fiber bundle shape sensor with a thin diameter and its glue injection packaging device are designed. By the distributed strain measuring technology of an optical frequency-domain reflectometer, we experimentally explore the influence of the glue material and ratio on the generation, accumulation, and distribution of residual stress in the packaging process of the sensor. The experimental results reveal that the cross-linking reaction of glue makes the residual strain gradually increase with the curing time. Moreover, for the three optical fibers in the shape sensor, the accumulation of residual strain with time and the spatial distribution of residual strain along the fiber axle are consistent. After about 16 h curing reaction, the residual strain of the three fibers reaches the maximum and remains stable in the range of 80~100  $\mu\epsilon$ . The research results minimize the residual strain during the packaging process of the optical fiber shape sensor and lay a foundation for high-precision shape measurement.

**Key words** fiber optics; optical fiber shape sensor; optical frequency-domain reflectometer; residual stress monitoring

## 1 引言

光纤形状传感技术是一种采用多个光纤应变传感点实现光纤多维弯曲测量的传感技术,在介入医疗器械视觉引导、无人机机翼形状监测和智能机械臂姿态

反馈控制等领域发挥着重要的作用。例如,在介入医疗领域,需要实时监测进入人体的各种介入器械(如斜尖针头、医学柔性导管和血管手术机器人)的形状轨迹,实现器械在介入术中的精确引导<sup>[1]</sup>。根据光纤应变测量方式的不同,光纤形状传感技术可以分为基于

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-03-03; 录用日期: 2022-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61975022)、国家杰出青年科学基金(61825501)、重庆市自然科学基金创新研究群体科学基金(cstc2020jcyj-cxttX0005)、重庆市英才青年拔尖人才基金(CQYC202005011)

通信作者: \*glyin@cqu.edu.cn

光纤光栅阵列的准分布式形状传感技术和基于光纤瑞利散射和光频域反射仪(OFDR)的分布式形状传感技术。相较于光纤光栅阵列的准分布式形状传感技术,基于 OFDR 的分布式形状传感技术具有高空间分辨率、高精度和分布式无盲区测量的特点。近年来,国内外学者基于 OFDR 技术在众多形状传感领域开展了应用研究,包括边坡形貌失稳<sup>[2]</sup>、坝体结构的开裂变形<sup>[3]</sup>、医疗介入探针的靶向末端跟踪<sup>[4]</sup>、连续体机器人的形状路径导航<sup>[5]</sup>、变体飞行器的机翼姿态反馈<sup>[6]</sup>等。该技术不需要在光纤上增添复杂的结构,只需将数根光纤按照一定方式排列并用胶水封装便可制成形状传感器,进而实现对传感器形状的精确重构。

目前,光纤形状传感器主要包括多芯光纤和光纤束两种形式。多芯光纤是多个纤芯共用同一包层的介质波导,主要通过光纤拉丝塔熔融预制棒控制而成。三芯光纤<sup>[7]</sup>、四芯光纤<sup>[8]</sup>和七芯光纤<sup>[9]</sup>等多种空间排布的多芯光纤已经被用于光纤形状传感。另外一种光纤形状传感器是由采用黏合剂捆绑光纤的方式形成的光纤束制备而成。相较于多芯光纤而言,光纤束的光纤空间排布及间隔具有更大的灵活性,且多根光纤形成独立信道,避免多芯光纤需要扇入扇出器,实现激光信号的输入和输出。2012年 Yi 团队<sup>[10]</sup>使用环氧树脂胶将 4 根光纤(每根上含有 5 个光纤布拉格光栅)间隔 90° 粘贴在记忆合金丝表面,构成形状传感器。2014 年 Moon 团队<sup>[11]</sup>开发了一种形状传感器封装装置,使用环氧树脂胶将呈三角形排列的 3 根光纤(每根上含有 4 个光纤布拉格光栅)粘合成束,通过检测光纤上的布拉格光栅信号完成 3 维形状重构。2017 年,Parent 团队<sup>[12]</sup>采用一边移动光纤定位模具、一边局部固化无影胶(UV)胶的方式将 3 根光纤进行粘合,制成形状传感器,并采用 OFDR 解调光纤上的应变信息,对传感器的 3 维形状进行了较高精度的还原。2020 年,上海大学的钱晋武教授团队<sup>[13]</sup>同样使用树脂胶将刻有多个布拉格光纤光栅(FBG)的 3 根光纤间隔 120° 粘贴在记忆合金丝表面,制备了形状传感器,并提出了一种分离形状传感器弯曲和扭转的理论方法,以提高形状传感器在变形过程中的传感精度。封装过程中,黏合剂固化发生热收缩反应,产生残余应力,在黏合剂的选择方面,德国、荷兰及韩国等多个国家的学者先后尝试了硅树脂、氰基丙烯酸、聚酰亚胺、环氧树脂等多种黏合剂<sup>[11,14-16]</sup>。如荷兰的 van der Heiden 等<sup>[14]</sup>尝试使用聚酰亚胺黏合剂将 3 根光纤进行粘合,制成形状传感器。但该黏合剂的固化条件苛刻,且光纤与聚酰亚胺胶之间的杨氏模量(分别是 75 GPa 和 3 GPa)差异巨大。两者杨氏模量的不匹配使得传感器中的残余应力不能随着弯曲恢复及时地释放,容易形成永久性的波浪形弯曲,较大的残余应力会严重影响传感器结构的稳定性及形状还原的精度。

在树脂胶的固化监测研究方面,国内外学者进行了相应的研究。例如,康峻铭等<sup>[17]</sup>采用 FBG 作为应变传感器,将数值仿真与实验分析相结合,研究了环氧树

脂固化过程中的温度和残余应力变化,并致力于优化环氧树脂的固化工艺。Giordano 等<sup>[18]</sup>利用 FBG 传感器研究了环氧树脂在铝模固化过程中的残余应变累积情况,对固化过程进行了成功的监测和分析。Kalamkarov 等<sup>[19]</sup>提出了一种嵌入式光学传感器用于实现对法布里-珀罗(F-P)传感器拉挤过程中的实时应变监测和复合材料棒内部残余应变的测量,通过改进材料棒的加工工艺成功地降低了传感器拉挤过程产生的残余应变。O'Dwyer 团队<sup>[20]</sup>采用嵌入介质微传感器和 FBG 应变传感器测量了基体树脂电导率和嵌入光纤内部应变的变化情况。Martin 团队<sup>[21]</sup>采用光纤系统监测注射过程中树脂流动前沿的运动和内部残余应变。综上所述,国内外学者大多采用 FBG 阵列的多点式应力传感器监测树脂胶的固化过程,无法对内部残余应力的分布和累积情况进行全面的监测。此外,在光纤形状传感领域,尚未见到对形状传感器封装过程中产生的残余应力进行监测的相关报道。

本文提出了一种基于光纤束的光纤形状传感器制备方法,实验研究了不同胶水固化时光纤产生残余应力的情况,选用残余应力最小的胶水封装制备了光纤形状传感器,采用 OFDR 技术实时监测了光纤束各光纤残余应力的产生、累积和分布情况,最后展示了 3 维形状分布式测量结果。

## 2 基于光频域反射仪的应变传感技术原理

瑞利散射是光纤本征的特征,具有指纹信息,在没有外界扰动情况下是稳定且不变的。当外部环境改变时,随光纤空间分布的瑞利散射具有类似 FBG 中光谱变化的性质。恒定温度情况下,外界应变和瑞利散射波长漂移的关系可表示为

$$\Delta\lambda/\lambda=(1-P_e)\cdot\Delta\epsilon, \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda$ 表示瑞利散射光谱漂移量; $\lambda$ 表示光源扫描的中心波长; $\Delta\epsilon$ 为光纤纵向应变变化量; $P_e=n^2[P_{12}-(P_{11}+P_{12})\nu]/2$ 为光纤材料的有效弹光系数, $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 为光纤的光弹系数, $\nu$ 为纤芯材料的泊松比, $n$ 为纤芯的有效折射率。为了获取波长变化,可以对应应力变化前后的瑞利散射光谱进行互相关运算<sup>[22]</sup>,互相关峰偏离零点位置的距离对应着瑞利散射波长漂移量的大小。

图 1 表示基于 OFDR 的分布式残余应力监测系统。连续扫描激光经过耦合器 C1 后被分为 1% 的参考光和 99% 的测试光,测试臂的光信号经过环形器和光开关依次询问 3 根被测光纤(FUT)。FUT 中的后向瑞利散射光通过环形器 3 端口与参考光共同进入耦合器 C2 中,经过偏振分束器 PBS 后分为两路分别进入光电探测器 PD1 和 PD2 并产生拍频信号。拍频信号由四通道数据采集卡(AT9440)以 20 MSa/s 的采样速率进行采集。

分别获取待测光纤产生应变前后的两组拍频信号,对其进行快速傅里叶变换(FFT)得到后向散射信号的强度沿待测光纤的分布情况。然后,在距离域上

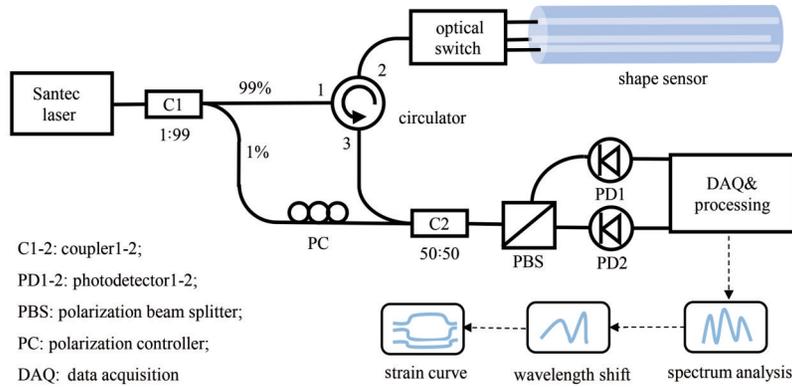


图 1 基于光频域反射仪的应力传感系统图

Fig. 1 Diagram of strain sensing system based on optical frequency domain reflectometer

加窗进行快速傅里叶逆变换 (IFFT), 得到该传感位置的瑞利散射光谱。接着对产生应变前后的瑞利散射光谱进行互相关运算得到波长漂移量, 进而确定局部应变。重复上述过程, 可以实现待测光纤的分布式应变测量。为了平衡应变测量精度和轴向的高空间分辨率, 实验中设置激光器的扫描速度为 40 nm/s, 采集卡采样时间为 0.41 s, 对应的激光器扫描范围大小为 16.384 nm, 距离域轴向上的空间采样分辨率为 47.684  $\mu\text{m}$ 。每个加窗含有 2000 个数据点, 相邻窗之间重叠 80%, 对应的传感采样分辨率约为 19 mm。该轴向分辨率高于 FBG 串联的准分布式传感器的分辨率<sup>[23]</sup>。对距离域加窗进行快速傅里叶逆变换后得到的波长精度为 8 pm, 其对应的应变测量精度约为 6  $\mu\epsilon$ 。系统的空间分辨率和应变测量精度能够满足分布式残余应变测量要求。

### 3 光纤形状传感器的制备技术及残余应力监测

#### 3.1 形状传感器的设计及封装工艺

设计了一种柔性细径形状传感器, 其结构如图 2 (a) 所示。形状传感器长 1 m, 直径为 2 mm。该传感器采用直径为 1 mm 的镍铬形状记忆合金丝 (SMA) 作为基材, 3 根直径为 250  $\mu\text{m}$  的单模光纤按照 120° 等间隔分布在 SMA 基材周围。SMA 具有变形后能够恢复

其原始形状的独特性能, 并且有助于克服材料之间相变的影响<sup>[24]</sup>, 避免传感光纤长期处于拉伸或者压缩的状态。整个传感器内部被环氧树脂混合胶填充, 外部套以热塑管进行封装保护。该形状传感器具备体积小、质量轻、柔性好等优势, 采用光纤本征瑞利散射测量分布式应变的原理, 避免了基于光纤光栅的形状传感器需要在每个传感节点进行光纤光栅位置校准的问题。

为了封装这种柔性形状传感器, 设计了一种基于真空注胶方法的形状传感器封装装置, 使得 3 根单模光纤相隔 120° 分布于镍铬记忆合金丝表面。如图 2 (b) 所示, 该装置包括石英玻璃管、基材-光纤位置定位件、注胶及抽真空连接咀部件和基材-光纤夹持装置。传感光纤的安装角度及其与基材之间的孔隙对形状还原误差影响较大, 为此设计加工了插图所示的基材-光纤位置定位件, 以保证传感光纤的安装精度。3 根光纤和基材一同放置于石英玻璃管中, 光纤夹持装置和两个半圆形卡槽定位件同时使用, 可以使 3 根光纤保持平直、相隔 120° 并准确粘接在直径为 1 mm 的 SMA 上。注胶咀、抽真空咀与石英玻璃管的连接部分均采用由树脂传递模塑成型 (RTM) 工艺制备的密封胶条进行密封。注胶口与活塞漏斗通过硅胶管连接, 实现胶水注入。抽真空口与真空泵连接, 以最大程度地减少玻璃管中的空气, 同时也有利于胶水快速填充整个传感器。

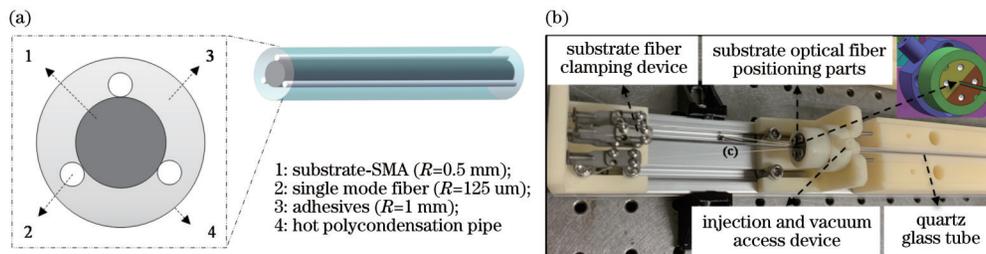


图 2 形状传感器的结构及封装示意图。(a) 形状传感器结构示意图; (b) 封装装置示意图 (插图为基材-光纤定位件放大图)

Fig. 2 Structure and packaging diagrams of shape sensor. (a) Structure diagram of shape sensor; (b) schematic diagram of packaging device (inset is enlarged view of substrate-optical fiber positioning part)

#### 3.2 残余应力的实时监测

在封装形状传感器时, 胶水固化过程中化学收缩

和温度冷却会带来热收缩, 从而导致残余应力的累积<sup>[25]</sup>。当形状传感器发生弯曲时, 其残余应力和弯曲

应力产生交互作用,使整个传感器的变形受到影响<sup>[26]</sup>。随着传感器形状的恢复,其残余应力也会发生变化并重新分布,这会降低传感器结构的稳定性及敏感系数的均匀性,影响形状的还原精度。因此,有必要对封装过程中残余应力的产生、积累和分布情况进行监测,选择合适的胶水材料和配比以最大限度地减小残余应变,进而为高精度形状测量提供基础。

### 3.2.1 胶水种类对固化过程中残余应力的影响

环氧树脂是一种热固性树脂胶,其与固化剂发生交联反应后固化,具有很好的力学性能、尺寸稳定性和较大的压缩与拉伸强度,适合用于对形状传感器进行封装。树脂胶种类多样,树脂结构、固化剂配比、环氧值当量和固化工艺的不同都会严重影响固化过程,造成不同的动态力学性能。固化过程中残余应力和应变的演变主要取决于热固性树脂基体的体积固化收缩(包括化学收缩和热收缩),因此不同种类的树脂胶在固化过程中会产生不同的残余应力积累。

在掌握了树脂胶固化反应的各阶段情况后,选择

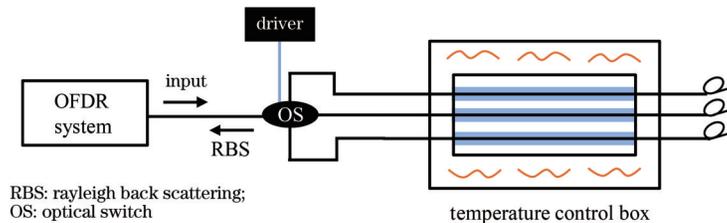


图3 不同胶水固化的残余应力监测实验装置

Fig. 3 Residual stress monitoring experiment device for curing of different glues

实验研究了3种树脂胶(编号:#1、#2、#3)的固化过程,3种胶水的配制参数如表1所示。所有胶水均采用环氧树脂(A)和固化剂(B)按一定的质量分数比混合制成,使用前先搅拌至没有拉丝为止,然后对其进行10 min真空脱泡处理,最后3种胶水分别注入3个矩形凹槽,每间隔5 min对胶水固化过程产生的残余应力进行监测。

表1 3种胶水材质及配比情况

Table 1 Material and proportion of three kinds of glue

Glue number	Glue type (resin)	Mass fraction ratio of A to B
#1	JH-5582 (slow drying soft adhesive)	1:1
#2	Kaft K-9761 (soft glue)	2:1
#3	Crystal glue (soft glue)	3:1

图4(a)表示#1号树脂胶在固化过程中残余应力的监测结果。树脂胶内部的残余应力在60 min左右开始累积,图4(a)中各曲线时间间隔为30 min左右,箭头代表时间从60 min逐渐增加到12 h。监测到的残余应变为负值,说明树脂固化时的收缩对光纤产生了挤压应变。随着固化反应的进行,残余应变不断累积,

对不同种类的环氧树脂胶进行残余应力的监测研究,以此为依据选择形状传感器的封装胶水种类和参数。如图3所示,环氧树脂胶固化残余应力监测的实验装置由OFDR系统、温度控制箱、光开关、光纤夹持部件和3D打印注胶部件组成。采用3D打印加工了具有3个矩形凹槽的注胶部件,矩形凹槽的长、宽、高分别为100 mm、2 mm和2 mm,可向其中注入不同种类的胶水,近似模拟传感器的真实封装环境。将3根单模光纤穿过凹槽,两端用光纤夹持部件夹紧并给予一定预应力,避免在封装过程中光纤松动对残余应力测量带来的误差,在光纤末端进行打环处理,以减小端面反射。注胶部件放置于温度控制箱中,温度设定为23.5℃。OFDR系统连接光开关时序并切换3根光纤,获得3种封装胶水种类和参数。相关仿真和实验结果表明:20 mL的树脂胶在25℃恒温固化48 h过程中,其内部发热温度变化仅为1.3℃<sup>[27]</sup>。本实验中树脂胶总固化体积约为2.21 mL,沿轴向局部的树脂胶就更少了,因此,本次封装固化实验过程中产生的温度可以忽略不计。

经过约12 h的反应固化后,#1号树脂胶中的残余应变不再累积,达到最大值。在10 cm的注胶区域中监测到的残余应力分布比较均匀。图4(a)中注胶区域以外部分出现了较小的波长变化,认为这是由控温箱中温度的微小变化导致。图4(b)表示3种树脂胶在注胶区域内残余应力随固化时间的变化图。从图中可以看到,随着固化时间的增加,残余应力也在逐渐增加。固化初始阶段的残余应力累积速度较快;3~10 h时间段内,残余应力累积速度逐渐变慢,但残余应力还在进一步增加;最终,在经过约10 h的反应固化后,#1、#2和#3树脂胶中的残余应力不再累积、达到最大值,对应的最大值分别为-440  $\mu\epsilon$ 、-303  $\mu\epsilon$ 和-157  $\mu\epsilon$ 。固化后混合胶中的残余应力越小,则在形状传感器进行弯曲时其残余应力对弯曲应力交互叠加的影响越小,且对形状还原精度的影响就越小。因此,选用#3号胶水封装形状传感器。

### 3.2.2 光纤形状传感器封装过程中的残余应力监测

采用图2(b)所示的形状传感器封装装置,将#3胶水注入形状传感器,在室温下静置30 h左右,采用OFDR系统每5 min监测一次光纤的残余应力。待胶水完全固化后去除玻璃管,套上热塑管加以保护。图5为传感器封装过程中残余应力的监测结果。图5(a)为监测到的传感器封装固化过程中部分残余应力曲

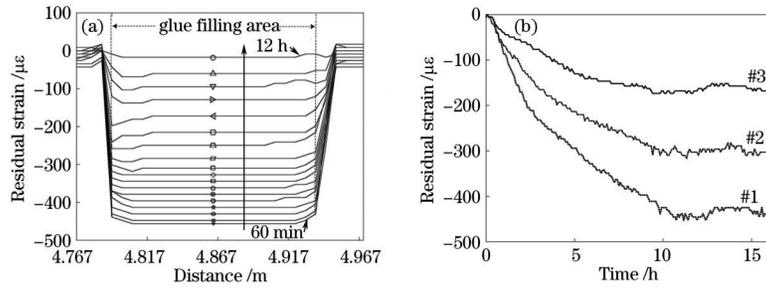


图 4 不同胶水固化过程中光纤残余应力监测结果。(a) #1 胶固化过程中的残余应力监测结果;(b) 3 种胶水固化时残余应力随时间的变化情况

Fig. 4 Monitoring results of fiber optic residual stress during curing process of different adhesives. (a) Monitoring results of residual stress during curing of No. 1 adhesive; (b) change of residual stress with time when three glues are cured

线。传感器内部的残余应力在 60 min 左右开始累积,各曲线时间间隔为 1 h 左右,图中箭头代表时间从 60 min 逐渐增加到 16 h。图 5(a) 左边虚线框内为抽真空咀部件与光纤夹持件连接区域,右边虚线框内为注胶咀部件与光纤夹持件连接区域。胶水固化过程中,这些区域内的光纤受到固化收缩应力与光纤夹持件所施加应力的双重作用,因此该部分的应力积累较大。固化期间,注胶咀部件附近的残余应力积累始终比抽真空咀部件附近的偏大一些,这可能是由在注胶操作完成后注胶咀位置胶水有冗余所导致的。此外,考虑到传感器封装直径仅为 2 mm,封装胶体积较小,固化

交联反应产生的热量有限,因此可以忽略固化反应带来温度微小变化的影响。

从图 5(b) 可以看到,在注胶后约 60 min 内,检测到的应变大小基本没有变化,这是由于此时树脂处于黏性流体状态,应力未积累。而在凝胶点后,传感光纤感应到基体材料的热膨胀,残余应力逐渐累积,树脂与光纤之间的结合越来越有效,表明树脂逐渐转化为黏弹性固体状。在经过约 16 h 的反应固化后,残余应力不再累积达到最大值。3 根光纤中监测到的残余应变的最大值几乎接近,并且最大值均在 80~100  $\mu\epsilon$  范围内。

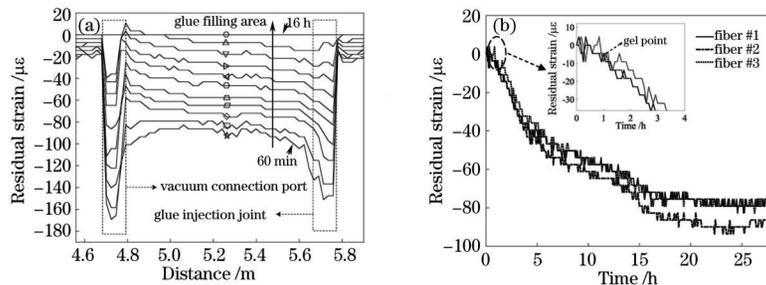


图 5 传感器封装固化残余应力监测结果。(a) 封装区域残余应力积累与分布情况;(b) 封装区域内某点处残余应力随时间的变化情况

Fig. 5 Monitoring results of residual stress of sensor package solidification. (a) Accumulation and distribution of residual stress in packaging area; (b) variation of residual strain with time at a certain point in packaging area

#### 4 形状传感器的形状感知

实验中在不同树脂胶种类、不同参数配比下制备了形状传感器。通过对比实验发现:未优化的形状传感器存在局部的膨胀、开裂或松散情况,在对其进行形状传感时,重构误差在 10 cm 及以上。经过参数优化后,对优化封装的形状传感器进行 2D、3D 形状重构,最终,其 2D、3D 形状末端的平均最大误差为传感器总长度的 0.58% 和 3.45%<sup>[28]</sup>。为进一步验证上述形状传感器的 3 维形状感知能力,将形状传感器弯曲成空间 3 维曲线。图 6(a) 为处于平直状态的传感器,图 6(b) 为弯曲后具有 3 维曲线特征的传感器。采用基于 Frenet-Serret 微分方程的形状重构算法,通过对光纤

空间路径上的逆向积分还原出空间曲线的形状并在计算机屏幕上显示。实际形状与重构形状的对比如图 6(c) 所示。可以看出,两者很好地吻合,同时具有较高的可视化程度。

#### 5 结 论

提出了一种柔性细径光纤束形状传感器,阐述了传感器的结构和封装设计,采用 OFDR 技术实时监测了不同胶固化过程中光纤中残余应力的产生和累积情况,选择合适的胶水材料和配比以最大限度地减小残余应变,从封装方面优化了光纤束形状传感器的性能,以为高精度形状测量提供基础。此外,该研究为复合材料固化及结构的健康监测提供有效的参数依据和精

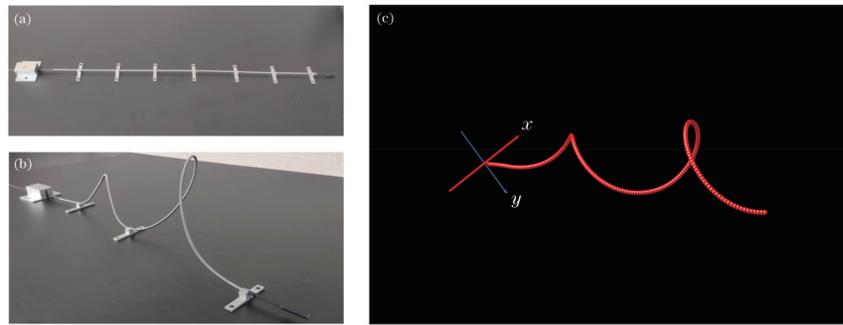


图 6 形状传感器的 3 维形状重构。(a)形状传感器保持平直;(b)形状传感器弯曲形变;(c)重构的传感器 3 维形状

Fig. 6 3D shape reconstruction of shape sensor. (a) Keep shape sensor straight; (b) bending deformation of shape sensor; (c) reconstructed three-dimensional shape of sensor

准的测量方法。

### 参 考 文 献

- [1] Amanzadeh M, Aminossadati S M, Kizil M S, et al. Recent developments in fibre optic shape sensing[J]. *Measurement*, 2018, 128: 119-137.
- [2] Zheng Y, Zhu Z W, Xiao W, et al. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102127.
- [3] Wu C F, Sun K K, Xu Y M, et al. Concrete crack detection method based on optical fiber sensing network and microbending principle[J]. *Safety Science*, 2019, 117: 299-304.
- [4] Park Y L, Elayaperumal S, Daniel B, et al. Real-time estimation of 3-D needle shape and deflection for MRI-guided interventions[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(6): 906-915.
- [5] Zhuang W, Sun G K, Li H, et al. FBG based shape sensing of a silicone octopus tentacle model for soft robotics[J]. *Optik*, 2018, 165: 7-15.
- [6] Sun G K, Li H, Dong M L, et al. Optical fiber shape sensing of polyimide skin for a flexible morphing wing[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(33): 9325-9332.
- [7] Moore J P, Rogge M D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2967-2973.
- [8] Khan F, Denasi A, Barrera D, et al. Multi-core optical fibers with Bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5878-5884.
- [9] Khan F, Donder A, Galvan S, et al. Pose measurement of flexible medical instruments using fiber Bragg gratings in multi-core fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18): 10955-10962.
- [10] Yi J C, Zhu X J, Zhang H S, et al. Spatial shape reconstruction using orthogonal fiber Bragg grating sensor array[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(6): 679-687.
- [11] Moon H, Jeong J, Kang S, et al. Fiber-Bragg-grating-based ultrathin shape sensors displaying single-channel sweeping for minimally invasive surgery[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59: 50-55.
- [12] Parent F, Loranger S, Mandal K K, et al. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(4): 2210-2221.
- [13] Yi X H, Chen X Y, Fan H C, et al. Separation method of bending and torsion in shape sensing based on FBG sensors array[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9367-9383.
- [14] van der Heiden M S, Henken K R, Chen L K, et al. Accurate and efficient fiber optical shape sensor for MRI compatible minimally invasive instruments[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8550: 85500L.
- [15] Ledermann C, Pauer H, Woern H. Fiber optical sensor system for shape and haptics for flexible instruments in minimally invasive surgery: overview and status quo[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 915766.
- [16] Araújo F M, Ferreira L A, Santos J L. Simultaneous determination of curvature, plane of curvature, and temperature by use of a miniaturized sensing head based on fiber Bragg gratings[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13): 2401-2407.
- [17] 康峻铭, 孙亮亮, 王继辉, 等. 电子封装用环氧树脂固化温度与应变的三维有限元模拟[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2330-2340.
- [18] Kang J M, Sun L L, Wang J H, et al. Three-dimensional finite element simulation of temperature and strain in epoxy resin used to electronic packaging during curing[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2330-2340.
- [19] Giordano M, Laudati A, Nasser J, et al. Monitoring by a single fiber Bragg grating of the process induced chemo-physical transformations of a model thermoset[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 113(2): 166-173.
- [20] Kalamkarov A L, Fitzgerald S B, MacDonald D O. The use of Fabry Perot fiber optic sensors to monitor residual strains during pultrusion of FRP composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 1999, 30(2): 167-175.
- [21] O' Dwyer M J, Maistros G M, James S W, et al. Relating the state of cure to the real-time internal strain development in a curing composite using in-fibre Bragg gratings and dielectric sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(8): 1153-1158.

- et al. Fiber optic sensors for process monitoring of composite aerospace structures[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4694: 53-64.
- [22] Shao C, Yin G L, Lü L, et al. OFDR with local spectrum matching method for optical fiber shape sensing [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(8): 082010.
- [23] 沈维亮, 朱启荣, 解明如, 等. 光纤光栅传感网络应用于环氧树脂固化过程监测的试验研究[J]. *现代科学仪器*, 2013(4): 183-186.
- Shen W L, Zhu Q R, Xie M R, et al. Experimental study of monitoring of curing process of epoxy resin based on fiber Bragg grating sensing network[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2013(4): 183-186.
- [24] Gentile C, Bernardini G. Radar-based measurement of deflections on bridges and large structures[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2010, 14(4): 495-516.
- [25] 李雪芹, 周玉敬, 张子龙, 等. 光纤布拉格光栅传感器监测环氧树脂固化收缩研究[J]. *材料工程*, 2012, 40(8): 73-77.
- Li X Q, Zhou Y J, Zhang Z L, et al. Curing shrinkage monitoring in epoxy resin by fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012, 40(8): 73-77.
- [26] Weiss M, Rolfe B, Hodgson P D, et al. Effect of residual stress on the bending of aluminium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(4): 877-883.
- [27] 康峻铭. 电子封装用环氧树脂固化工艺优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- Kang J M. Research on curing process optimization of epoxy resins used for electronic packaging[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [28] 尹国路, 徐州, 蒋锐, 等. 基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0106002.
- Yin G L, Xu Z, Jiang R, et al. Optical fiber distributed three-dimensional shape sensing technology based on optical frequency-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0106002.