



植入光纤布拉格光栅的不同杨氏模量软体材料弯曲测量响应特性

郭永兴, 杨跃辉, 熊丽, 吴恒, 陈敏

引用本文:

郭永兴, 杨跃辉, 熊丽, 等. 植入光纤布拉格光栅的不同杨氏模量软体材料弯曲测量响应特性[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1634–1643.

GUO Yong-xing, YANG Yue-hui, XIONG Li, et al. Response characteristics of fiber Bragg gratings embedded in soft materials with different Young's modulus for bending measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1634–1643.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1634>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

软体气动驱动器弯曲变形光纤传感与形状重构

Bending deformation of optical fiber sensing and shape reconstruction of soft pneumatic driver
光学精密工程. 2019, 27(5): 1052–1059 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192705.1052>

复合基底柔性光纤曲率传感器

Flexible curvature sensor based on composite substrate
光学精密工程. 2019, 27(6): 1263–1269 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192706.1263>

粘贴于薄板表面的光纤布拉格光栅应变传感器误差修正

Error modification of FBG strain sensors bonded on plates
光学精密工程. 2016, 24(4): 747–755 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162404.0747>

FBG细径形状传感器的应变传递和精度实验

Strain transmission and accuracy experiment on fiber Bragg grating small-diameter shape sensors
光学精密工程. 2019, 27(7): 1481–1491 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192707.1481>

受弯件上粘贴型光纤布拉格光栅的应变传递规律

Strain transfer factors of pasted FBG on bending part surface
光学精密工程. 2015, 23(5): 1254–1264 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1254>

文章编号 1004-924X(2020)08-1634-10

植入光纤布拉格光栅的不同杨氏模量 软体材料弯曲测量响应特性

郭永兴^{1,2*}, 杨跃辉¹, 熊 丽¹, 吴 恒², 陈 敏²

- (1. 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;
2. 武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要:为了研究光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)在感知形状变形时,低杨氏模量的柔性材料与高杨氏模量的刚性二氧化硅的结合是否存在刚-柔应变耦合引起的蠕变、应变传递差异等实际问题。采用软体机器人常用的硅胶和聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)材料,制备了 4 个不同杨氏模量的软体基体,在每个软体基体内植入了 3 个 FBG,形成 4 个具备形状测量能力的柔性传感器,并进行弯曲测试,然后建立应变传递模型验证了实验结果与理论推导的一致性。结果表明:软体基体和 FBG 结合时存在刚-柔耦合引起的蠕滑问题,约 30 min 后趋于耦合稳定。其次,4 个柔性传感器内的 3 支 FBG 耦合稳定后的波长漂移量均表现出较好的线性和一致性。此外,FBG 与基体的刚-柔性差异越大,耦合蠕滑越严重,应变传递引起的波长漂移量越小。其中,最大应变传递率为 0.680,最小应变传递率为 0.260,最大灵敏度为 56.649,最小灵敏度为 35.668。研究结果为基于植入式光纤光栅的软体机器人形状测量技术的研究提供了科学参考。

关键词:光纤布拉格光栅;刚-柔应变耦合;应变传递差异;软体机器人;形状测量

中图分类号:TN253;TP242 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202808.1634

Response characteristics of fiber Bragg gratings embedded in soft materials with different Young's modulus for bending measurement

GUO Yong-xing^{1,2*}, YANG Yue-hui¹, XIONG Li¹, WU Heng², CHEN Min²

- (1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

* Corresponding author, E-mail: yongxing_guo@wust.edu.cn

Abstract: To analyze whether the combination of flexible materials with low Young's moduli and rigid silica with a high Young's modulus produces any practical problems, such as creep or strain transfer differences caused by rigid-flexible strain coupling when the fiber Bragg grating(FBG) senses shape deformation, four different Young's modulus soft matrices were prepared by using silica gel (commonly used in soft robots) and polydimethylsiloxane (PDMS). Three FBGs were implanted in each

收稿日期:2019-11-22;修订日期:2020-01-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51605348)

soft matrix to form four flexible sensors with shape measurement capabilities and subjected to bending tests. The consistency between the experimental results and the theoretical derivation was verified theoretically via the strain transfer model. The results show that there is a creep-slip problem caused by rigid-flexible coupling when the soft matrix and FBG are combined, with the wavelength drift tending to be couple stable after about 30 minutes. Following creep stabilization, the wavelength drift of the three FBGs in the four flexible sensors shows good linearity and consistency. In addition, the larger the rigid-flexible difference between the fiber and the substrate, the more severe the coupling creep and the smaller the strain transfer rate. The maximum and minimum strain transfer rate are 0.680 and 0.260, respectively, while the maximum and minimum sensitivities are 56.649 and 35.668, respectively. These results provide a scientific reference for research focusing on the shape measurement technology of soft robots using implanted FBGs.

Key words: Fiber Bragg Grating(FBG); rigid-flexible strain coupling; difference of strain transfer; soft robot; shape measurement

1 引 言

近年来,软体机器人技术成为研究热点,并得到了迅速发展。与传统的刚性机器人相比,软体机器人采用柔韧性材料制成,可在大范围内改变自身的形状和尺寸^[1-2]。其可连续变形的特性使它能够实现多自由度运动^[3]以及与目标物互动,在侦察、勘测、救援、微创手术等领域有着巨大的应用前景。与此同时,软体机器人躯体的柔性材料易受接触物、负载以及自身重力的影响,加之柔性材料建模困难以及现有传感检测技术的局限,导致对柔性躯体形状信息的准确感知与检测十分困难,是软体机器人发展中需要解决的重要技术难题。

由于软体机器人高度的柔韧与变形特性^[4],要求其搭载的形状传感器同样柔韧而不影响驱体的性能,且对形状传感器的体积、稳定性、相容性等要求极为苛刻。常规的传感器如应变计和电磁追踪器等^[5-6],因存在刚度大、体积大、弱电信号易受干扰、零点漂移、相容性差^[7-8]等问题难以满足软体机器人的形状测量要求。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)利用光纤的光敏性在细微的纤芯上建立折射率调制,具备良好的弹性与柔韧性。此外,易于植入集成^[9]、光信号稳定、生物相容性好、单根光纤可串联多个光栅测点^[10-11]等优势使得 FBG 成为软体机器人形状测量的首选传感元件。

基于 FBG 的软体机器人形状测量研究报道

很多。Ge 等人^[12]将 FBG 采用偏心的方式嵌入到凝胶中,制作了一种基于光纤光栅的双向曲率传感器。XU 等人^[13]以硅胶为基体,提出了一种基于光纤光栅的可实现三维形状测量的传感器。Zhang 等人^[14]设计了一种以橡胶片与聚氯乙烯(Polyvinyl chloride, PVC)为基体的基于光纤光栅的曲率传感器。孙广开等人^[15]提出了一种将光纤光栅植入软体气体驱动器应变限制层进行曲率测量与形状重构的方法。张润玺等人^[16]研究了一种基于多元光纤光栅阵列的柔性仿生触角传感方法。何彦霖等人^[17]设计了一种基于复合基底的柔性光纤传感器。He 等人^[18]提出了一种基于光纤光栅的可实现软手术执行器形状感知的三维形状传感器,之后又研制了一种用于柔性生物医学机器人和柔性变形机翼的 FBG 形状传感器^[19]。以上这些探索工作推动了软体机器人的发展并为软体机器人的形状测量提供了参考。从软体材料与光纤光栅融合固定的角度看,上述传感器本质上是低杨氏模量的柔性材料与高杨氏模量的刚性二氧化硅的结合,二者在形状测量时是否存在刚-柔应变耦合带来的应变响应蠕变和应变传递率差异等现象,进而可能导致形状测量中出现响应滞后、灵敏度异变等问题,现有的工作尚未给出解释。

本文选取软体机器人常用的硅胶和不同配比的(Polydimethylsiloxane, PDMS)作为实验基体,并将光纤光栅植入其中制备了 4 种柔性传感器。实验研究了它们在形状感知过程中的应变传递响应、不同曲率的灵敏度响应等传感特性。

2 光纤光栅的结构和敏感原理

图 1 为 FBG 结构和敏感原理示意图, FBG 是一种纤芯内的周期性折射率调制器件。当宽带光沿纤芯传输时, 光纤光栅反射具有特定波长的窄频部分, 其余部分通过纤芯。根据光纤光栅的耦合模理论, FBG 的光栅方程^[20]为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta, \quad (1)$$

其中: λ_B 为中心波长, n_{eff} 为有效折射率, Δ 为栅格周期。该方程决定了光栅的反射波与其栅格周期 Δ 以及反向耦合模有限折射率 n_{eff} 之间的关系, 是光纤光栅在外界扰动下产生波长漂移的理论基础。

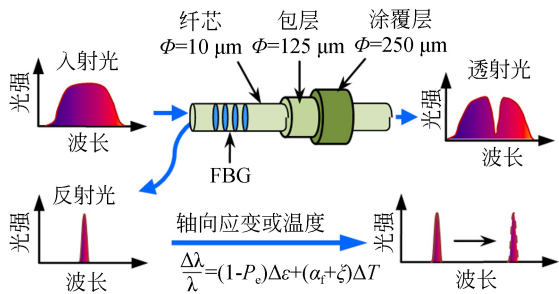


图 1 光纤光栅结构及其敏感原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure and sensing principle for FBG

在所有引起 FBG 波长漂移的外界扰动因素中, 最直接的就是轴向应变和温度。波长改变对于温度和应变的响应关系可以表示为^[21]:

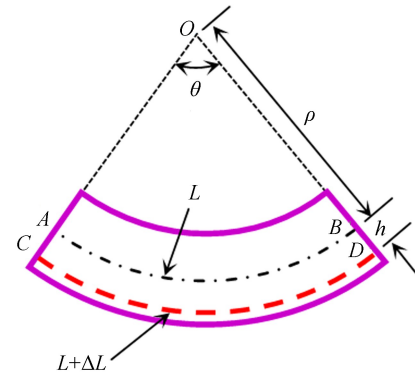
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (2)$$

式中: λ_B 为初始波长, $\Delta\lambda_B$ 为波长漂移量, α_f 为热膨胀系数, ξ 为热光系数, P_e 为弹光系数(常温时约等于 0.22)。通常, 中心波长为 1 550 nm 的光纤光栅, 对应变和温度的灵敏度分别为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 和 11.6 pm/ $^\circ\text{C}$ 。

当前, 基于光纤光栅的软体机器人形状测量, 是基于软体本体形状有变化时产生弯曲变形, 植入的光纤光栅感知弯曲变形应变, 引起波长漂移量变化。通过对波长漂移信息进行曲率反演, 融合多个光栅测点的曲率信息, 即可推算还原出变形形状。单个光纤光栅测点可视为一个独立的柔性弯曲传感器。传感器的设计和分析是基于纯弯



(a) 传感器未变形的状态
(a) Free-state of sensor



(b) 传感器弯曲状态
(b) Bending state of sensor

图 2 传感器中 FBG 的布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FBG arrangement in sensor

曲模型, 图 2 所示为传感器中 FBG 的布置示意图。当传感器处于自然状态时(如图 2(a)), FBG 未受到应变。当传感器处于弯曲状态时(如图 2(b)), 中性层上方部分被压缩, 中性层下方部分被拉伸, 而中性层无应变产生。传感器自由状态时光纤光栅长度与中性层长度相等, 设传感器中性层长度 AB 为 L , 传感器弯曲状态时传感部位长度为 L_{CD} , FBG 与中性层的距离 BD 为 h , 中性层的曲率半径 OB 为 ρ , 传感部位对应的圆心角为 θ , 可得:

$$L_{CD} - L = \Delta L, \quad (3)$$

$$L = \rho \cdot \theta, \quad (4)$$

$$L + \Delta L = (\rho + h) \cdot \theta, \quad (5)$$

$$\epsilon = \Delta L / L, \quad (6)$$

$$K = 1/\rho, \quad (7)$$

式中: ϵ 为传感部位的轴向应变, K 为曲率。由式(3)~式(7)可得:

$$K = \epsilon/h. \quad (8)$$

在环境温度不变的情况下, 结合式(2)和式(8), 可得曲率 K 与光纤光栅波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 的关系式为:

$$K = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B(1 - P_e) \cdot h}. \quad (9)$$

由此可知,当 FBG 确定的情况下, λ_B , P_e 以及 h 均为常数,曲率 K 与光纤光栅波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 呈线性关系。

3 光纤光栅柔性弯曲传感器制备

3.1 传感器设计

为研究植入光纤光栅的软体材料在不同杨氏模量参数下,光纤光栅弯曲测量的响应特性,选取常用作软体机器人本体的硅胶和 PDMS 作为承载 FBG 的基体,并将 FBG 植入 4 个不同杨氏模量的软体基体中。其中,采用硅胶所配置的软体基体的杨氏模量为 2.72 MPa,其余三种软体基体均由 PDMS 配置。PDMS 配比过高时,制备的软体基体表面具有硬度过高、脆性过大且重复性较差等缺点;PDMS 配比过低时,制备的软体基体表面具有黏稠,实用性差等缺点。因此,根据前期配比经验,选用了 3 种可用的配比,分别为 1:5, 1:10 和 1:15,对应软体基体的杨氏模量^[22]分别为 2.66, 1.78 和 1.26 MPa。

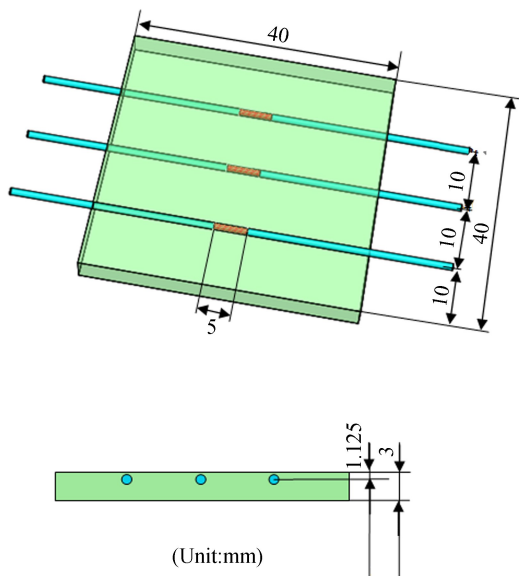


图 3 植入光纤光栅的柔性曲率传感器的三维模型
Fig. 3 Three-dimensional model of flexible curvature sensor implanted with FBG

图 3 所示为植入光纤光栅的柔性曲率传感器的三维模型。其中,每个软体基体内设计有 3 支光纤光栅作为测试样本,以增加实验研究的可信度,所选用的光纤光栅带宽均为 0.2 nm,反射率

均为 90%。传感器的长宽厚分别为 40 mm × 40 mm × 3 mm,每个软体基体中均植入 3 个光纤光栅构成 3 个传感测点。此外,3 个光纤光栅采用等间距设置,相邻两个光纤光栅之间的距离以及软体基体边缘到光纤光栅的距离均为 10 mm。栅区的有效长度约为 5 mm,纤芯距离软体基体中性层的距离为 1.125 mm。

植入式光纤光栅柔性传感器制备过程中,采用了专门的模具,模具材料为光敏树脂,采用高精度的 3D 打印技术加工而成,模具上设计有用于固定光纤光栅的微槽。光敏树脂作为一种具备精确和耐久特性的类 ABS 的立体光造型树脂,具有可加工性好、外观华丽以及耐久性好等优点。因此,采用该种材料加工的模具在保证传感器总体尺寸精度的同时,又可保证光纤光栅的位置精度。

3.2 传感器的制作

图 4 所示为传感器制作流程。首先,将制作传感器的模具固定于实验台上;然后,将 3 个光纤光栅依次固定在加工好的光纤光栅微槽内,并使光纤光栅处于完全拉直的状态;之后,用电子秤和玻璃搅拌杯称取特定比例的混合溶液(硅胶混合溶液制备时采用 A, B 两种溶液配比为 1:1; PDMS 混合溶液制备时,固化剂和 PDMS 溶液配比分别为 1:5, 1:10 和 1:15)。用搅拌棒充分搅拌溶液 5~10 min,使溶液充分混合均匀。再将按特定比例配置好的混合溶液缓慢倒入固定好的传感器模具中,使混合溶液充满整个模腔;静置,待溶液中气泡排尽后,封模以排除多余的溶液。在常温下静置,当表面没有黏稠手感时说明溶液已经完全固化,使用镊子等辅助工具取出传感器模型。

传感器出模后,用光纤焊接机将模型的 3 个光纤光栅尾端依次焊接,使 3 个光纤光栅串联在一起,形成植入式光纤光栅柔性弯曲传感器。另外 3 个传感器的制作方法与上述步骤类似,制作好的 4 个传感器原型如图 5 所示。硅胶材料制备的传感器植入的 3 支光纤光栅的中心波长分别为 1 530.824 1, 1 569.814 4 和 1 581.908 1 nm,配比为 1:5 制备的基于 PDMS 的传感器植入的光纤光栅的中心波长依次为 1 530.874 6, 1 542.924 3 和 1 555.241 0 nm;配比为 1:10 的 PDMS 柔性传感器光纤光栅的中心波长依次为 1 566.726 3, 1 569.780 8 和 1 581.956 2 nm;配

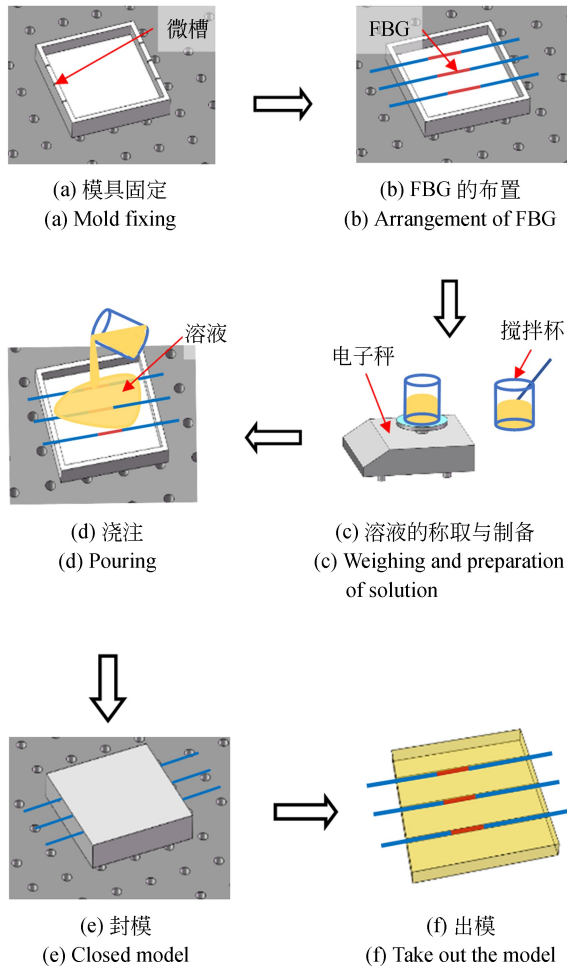


图 4 植入式光纤柔性弯曲传感器的制作流程
Fig. 4 Preparation flow chart of fiber Bragg grating embedded flexible bending sensor

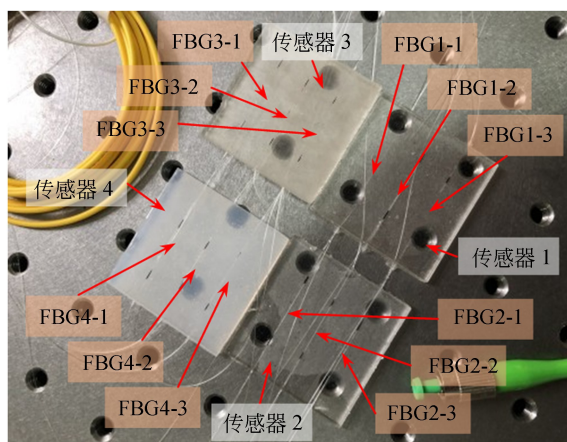


图 5 四种柔性弯曲传感器原型照片
Fig. 5 Photo of four types of flexible bending sensor prototype

比为 1 : 15 的 PDMS 柔性传感器光纤光栅的中心波长依次为 1 542. 949 4, 1 548. 791 0 和 1 552. 055 1 nm。将配比为 1 : 5, 1 : 10 和 1 : 15 制备的基于 PDMS 的柔性传感器依次编号为传感器 1、传感器 2 和传感器 3；采用硅胶制作的传感器编号为传感器 4。

4 实验

图 6 所示为采用 3D 打印制备的不同曲率的标定模块以及实验数据装置。其中,解调器设备为基于 CCD 原理自主研发的 4 通道光纤光栅波长解调器,波长精度为 3 pm,分辨率为 0.1 pm,用于实验中实时记录柔性传感器光纤光栅的波长变化情况。实验过程中,为剔除环境温度变化对弯曲测试中光纤光栅波长漂移带来的交叉耦合,实验室温度保持在 25 °C。

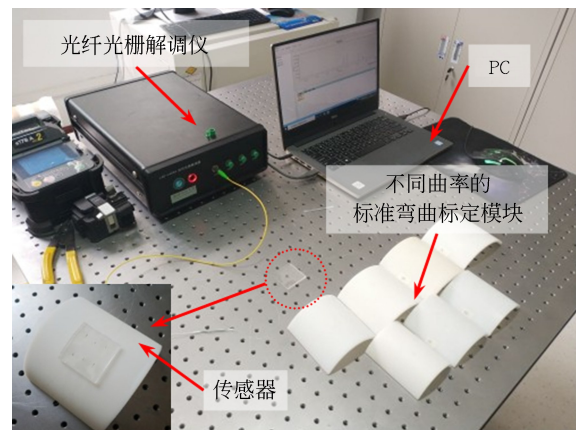


图 6 不同曲率的标定模块以及实验数据装置
Fig. 6 Calibration module with different curvatures and experimental data device

首先,分别对传感器 1、传感器 2、传感器 3 和传感器 4 进行蠕变测试实验。将传感器 1 平整无弯曲变形置于实验台上,并接入光纤光栅解调仪,实时保存波长数据,然后将传感器完全贴合于曲率为 18.18 m^{-1} 的标准弯曲标定模块上,实时保存、观察波长数据的变化情况,约 30 min 后,3 支光纤光栅的波长数据基本保持稳定,再保持约 10 min 后,将传感器 1 平整还原放置在实验台上,停止保存数据。对传感器 2、传感器 3 和传感器 4 同样进行上述蠕变测试,得到 4 种传感器内 3 支光纤光栅波长漂移量的时程图,分别如图 7(a)~

7(d)所示。首先,4种柔性传感器在恒定弯曲状态下,植入的总共12支FBG的波长漂移量均呈现先快速降低、后趋于稳定的蠕变态势,说明软体

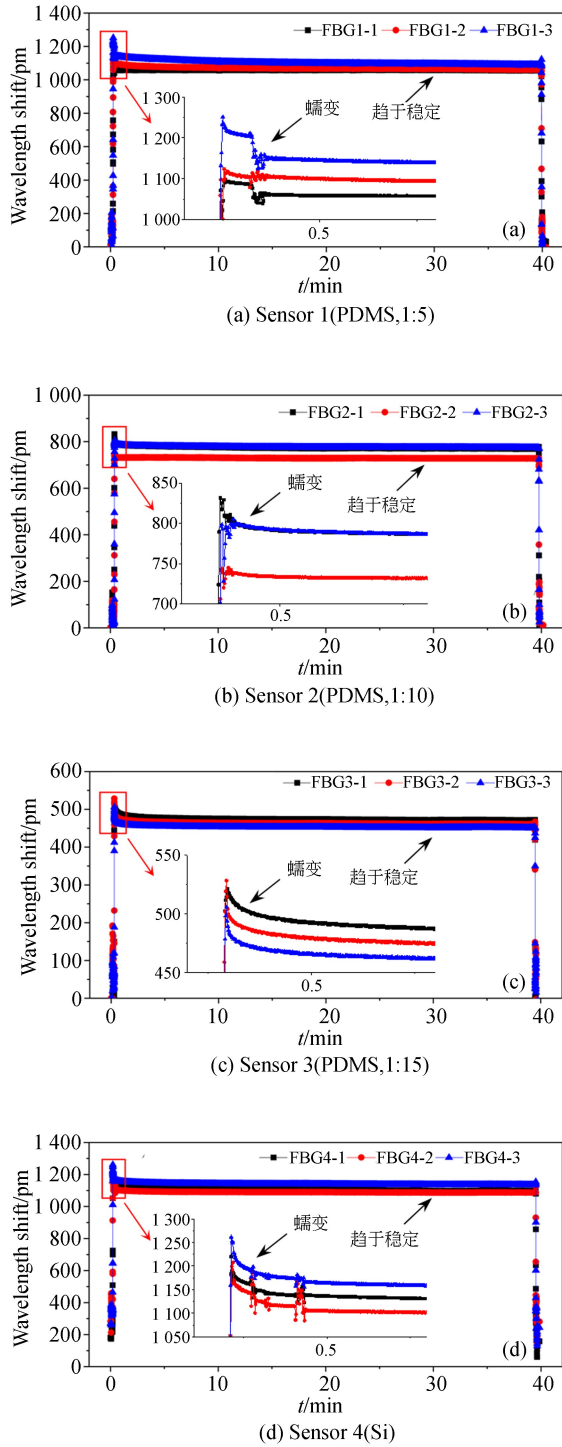


图 7 四种传感器内 FBG 波长漂移量时程

Fig. 7 Time responses of FBG wavelength shifts of four sensors

基体和 FBG 之间存在刚-柔耦合引起的蠕滑问题,并且,二者杨氏模量差异越大,蠕滑越严重。此外,软体基体的形状应变传递到光纤光栅上需要约 30 min,才能达到耦合稳定。因此,若植入式光纤光栅用于软体机器人形状的快速动态测量时,会出现形状应变测量的蠕变滞后问题,导致测量不准确,而现有研究均未发现或忽视该问题;其次,虽然受到模具本身、粘贴 FBG 等误差的影响,同一个传感器中 3 个 FBG 波长漂移量不一致,但是它们的差值在很小的范围内,说明 4 个柔性传感器中的 3 支 FBG 耦合稳定后的波长漂移量表现出较好的一致性。对每个传感器中 3 个 FBG 的波长漂移量取平均值,得到传感器 1~4 的波长漂移量分别约为 1 100, 750, 450 和 1 175 pm,分析认为这是由于不同杨氏模量的软体基体对光纤光栅的应变传递率不同,而且杨氏模量越小,光纤与基体的刚-柔性差异越大,耦合蠕滑越严重,应变传递率越低。而杨氏模量相近的传感器 1 和传感器 4,应变传递率基本相同,它们的波长漂移量比较接近。将所有传感器的波长漂移量变化情况整合,结果如图 8 所示。

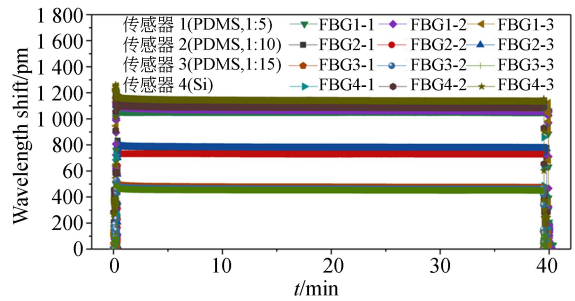


图 8 四个传感器内 FBG 波长漂移量随时间的变化关系

Fig. 8 Relationship between FBG wavelength drift and time in four sensors

进一步地,将传感器 1~4 分别进行了不同曲率的弯曲测试标定,研究它们的曲率灵敏度响应情况。采用曲率分别为 14. 29, 15. 38, 16. 67, 18. 18, 20. 22, 22. 22 和 25 m^{-1} 的 7 个标准弯曲标定模块进行正弯曲测试。测试过程中,每个曲率标定点处均保持 40 min 以上,待光纤光栅波长稳定后读取漂移量。4 种传感器对不同曲率的应变响应情况如图 9 所示。可以看出,随着曲率的增大,每种传感器内的 3 支光纤光栅的波长漂移量均呈

基本线性增大,同种传感器内的 3 支光纤光栅在同一弯曲测点处表现出基本的一致性,说明同一杨氏模量下应变传递的稳定性。而传感器 1 和传感器 4 的杨氏模量基本相同,所有光纤光栅的波长漂移量也均一致,说明光纤光栅的应变传递只与基体的杨氏模量有关,与基体种类无关。

对每种传感器中 3 个光纤光栅的波长漂移量进行算术平均,然后进行线性拟合,即可得到 4 种传感器对弯曲曲率的灵敏度响应,如图 10 所示。由拟合函数可得,传感器 1~4 的曲率灵敏度依次为 49.878,56.649,35.668 和 56.410 pm/m⁻¹。可以看出,每种传感器内的 3 支 FBG 在弯曲测试中,在满足对弯曲状态测量的稳定时间要求下,耦合稳定后的波长漂移量均表现出较好的线性度。

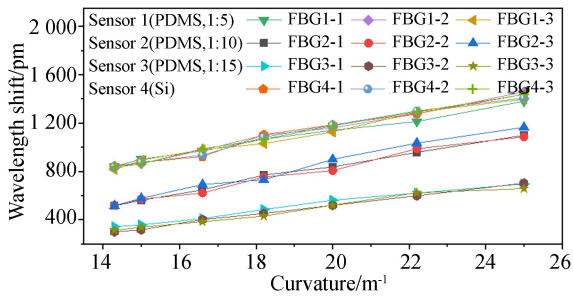


图 9 四个传感器对不同曲率的应变响应

Fig. 9 Strain response of four sensors to different curvatures

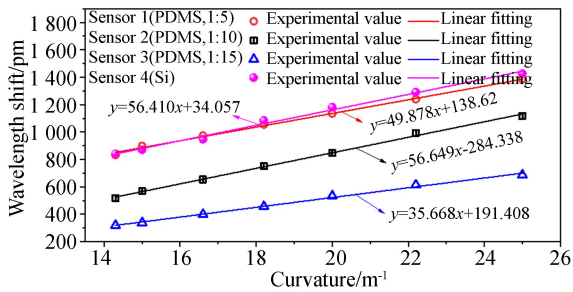


图 10 四种传感器对弯曲曲率的灵敏度响应

Fig. 10 Sensitivity response of four sensors to bending curvature

综合图 8、图 9 和图 10 的实验结果,进一步表明软体基体的杨氏模量越大,光纤光栅对弯曲应变的波长漂移量响应越明显。高杨氏模量的刚

性二氧化硅光栅与低杨氏模量的软体材料结合时,二者的杨氏模量差异越大,耦合蠕滑越严重,应变传递率越低。

5 结果分析

实际测量过程中,基体、FBG 涂覆层以及纤芯均存在不同的应变传递特性,使得应变传递发生变化,导致 FBG 感测的应变与基体产生的实际应变不相等,从而产生了上述应变传递存在差异的实验结果。

为分析应变传递率产生上述差异的原因,实验研究了基体、FBG 涂覆层以及纤芯三者之间的应变传递关系。传感器测量简图如图 11 所示。图 12 所示为应变传递的分析模型。图中所有变量定义如表 1 所示。

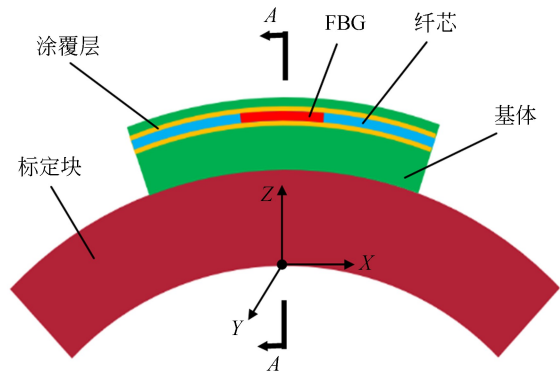
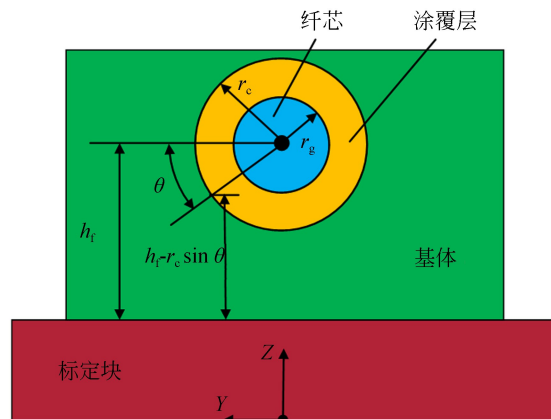


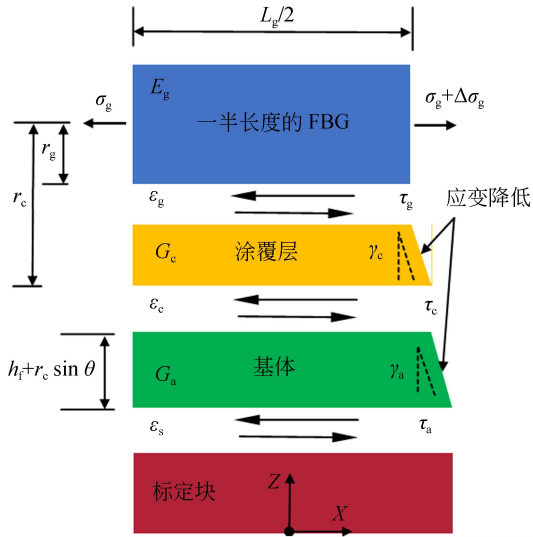
图 11 传感器测量简图

Fig. 11 Schematic diagram of sensor measurement



(a) 图 11 中 A-A 截面

(a) A-A sectional view in Fig. 11



(b) 应变传递的分析模型
(b) Analytical model of strain transfer

图 12 应变传递的分析模型

Fig. 12 Analytical model of strain transfer

表 1 图 12 中所有变量定义

Tab. 1 Definition of all variables in the Fig. 12

变量	含义
r_g	纤芯半径
r_c	涂覆层半径
L_g	FBG 长度
h_f	纤芯中心到基体下底面的距离
θ	水平轴角
E_g	纤芯的杨氏模量
G_c	涂覆层的剪切模量
G_a	基体的剪切模量
γ_c	涂覆层中的剪切应变
γ_a	基体中的剪切应变
u_g	纤芯与涂覆层界面的位移
u_c	涂覆层与基体界面的位移
u_s	基体与标定块界面的位移
ϵ_g	纤芯和涂覆层之间的法向应变
ϵ_c	涂覆层与基体之间的法向应变
ϵ_s	基体与标定块之间的法向应变
σ_g	纤芯与涂覆层之间的法向应力
τ_g	纤芯与涂覆层界面的剪切应力
τ_c	涂覆层中的剪切应力
τ_a	基体中的剪切应力

由图 12(b)中各层之间受力平衡可得:

$$\int_0^\pi \tau_g(r_g, \theta, x) \cdot r_g d\theta = \Delta\sigma_g \cdot \pi r_g^2 = E_s \epsilon_g \cdot \pi r_g^2, \quad (10)$$

$$\int_0^\pi \tau_c(r, \theta, x) \cdot r d\theta = \int_0^\pi \tau_g(r_g, \theta, x) \cdot r_g d\theta, \quad (11)$$

$$\int_{-r_c}^{r_c} \tau_a(x, -h_f, z) dz = \int_0^\pi \tau_c(r_c, \theta, x) \cdot r_c d\theta, \quad (12)$$

其中: σ, τ 和 r 分别表示正应力、剪应力和半径, 下标 g, c 和 a 分别表示纤芯、涂覆层和基体。

由公式(11)可知, 在轴对称的涂覆层的下半部分中, 径向距离为 r 处的剪切应力为:

$$\tau_c(r, \theta, x) = \frac{r_c}{r} \tau_c(r_c, \theta, x), r_g \leq r \leq r_c. \quad (13)$$

当各层中为线性弹性形变以及纯剪切应变传递时, 由公式(13)可得:

$$u_c(x) - u_g(x) = \int_{r_g}^{r_c} \gamma_c(r, \theta, x) dr = \frac{r_c}{G_c} \tau_c(r_c, \theta, x) \cdot \ln \frac{r_c}{r_g}, \quad (14)$$

$$u_s(x) - u_c(x) = (h_f - r_c \sin \theta) \gamma_a(r_c, \theta, x) = (h_f - r_c \sin \theta) \frac{\tau_a(r_c, \theta, x)}{G_a}, \quad (15)$$

其中 u, γ 和 G 分别表示界面位移、剪切应变和剪切模量。

由式(14)和式(15)可以得到基体的剪切应力 τ_a , 当 $r=r_c$ 时, 由式(13)可得该应力与 FBG 涂覆层界面处的剪切应力相等。因此, FBG 涂覆层界面处剪切应力 τ_c 可以表示为:

$$\tau_c(r_c, \theta, x) = \tau_a(r_c, \theta, x) = \frac{u_s(x) - u_g(x)}{\frac{h_f - r_c \sin \theta}{G_a} + \frac{r_c}{G_c} \ln \frac{r_c}{r_g}}. \quad (16)$$

假设在一半的 FBG 长度 $L_g/2$ 上应变均匀, 则 $u_g(x) = L_g/2 \cdot \epsilon_g, u_c(x) = L_g/2 \cdot \epsilon_c, u_s(x) = L_g/2 \cdot \epsilon_s$ 。将式(16)代入式(11), 再代入式(10)可得应变传递率 K 为:

$$K = \frac{\epsilon_g}{\epsilon_s} = \frac{\alpha}{1 + \alpha}, \quad (17)$$

其中 α 表达式为:

$$\alpha = \frac{L_g}{2\pi r_g^2 E_g} \int_0^\pi \frac{1}{\frac{h_f - r_c \sin \theta}{G_a} + \frac{r_c}{G_c} \ln \frac{r_c}{r_g}} d\theta. \quad (18)$$

纤芯的杨氏模量 E_g 为 72 GPa, 半径 r_g 为 0.062 5 mm; FBG 涂覆层半径 r_c 为 0.125 mm, 纤芯距离基体下表面长度 h_f 为 2.625 mm。 G_a 分别为 2.66, 1.78, 1.26 和 2.72 MPa, 分别对应传感器 1、传感器 2、传感器 3 和传感器 4。 G_c 为 10 GPa。将相关参数代入式(17)和式(18)可得, 传感器 1、传感器 2、传感器 3 和传感器 4 对应的应变传递率分别为 0.640, 0.390, 0.260 和 0.680。应变传递率排序为: 传感器 1 \approx 传感器 4 > 传感器 2 > 传感器 3, 与图 9 和图 10 中光纤光栅的应变漂移量是一致的。

6 结 论

本文研究了植入式光纤布拉格光栅、不同杨氏模量软体材料在弯曲测量中的响应特性。通过选取软体机器人常用的硅胶和不同配比的 PDMS 作为实验基体, 制备了 4 种植入有光纤光栅的不

同杨氏模量的柔性传感器。对 4 种传感器展开弯曲测试, 对 FBG 的测量响应进行了研究, 结果阐明了高杨氏模量的 FBG 与软体基体之间存在刚-柔耦合引起的蠕滑问题, 约 30 min 之后趋于耦合稳定, 而且, 二者的杨氏模量差异越大, 耦合蠕滑越严重, 导致蠕变滞后、应变传递率低等问题。其中, 最大应变传递率为 0.680, 最小应变传递率为 0.260。然后对比了 4 个传感器的灵敏度, 得到最大灵敏度为 56.649, 最小灵敏度为 35.668。最后, 建立了应变传递模型, 从理论上推导了蠕变滞后以及应变传递率差异性的关系, 为基于植入式光纤光栅的软体机器人形状测量技术的研究提供科学参考。

后期工作将探索等同杨氏模量、但与光纤光栅黏合效应更好的软体材料, 并增加软体基体尺寸, 植入更多的光纤光栅阵列, 更加全面地研究光纤光栅在软体材料中的应变响应问题。

参考文献:

- [1] RYU S C, DUPONT P E. FBG-based shape sensing tubes for continuum robots[C]. 2014 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 31 May-7 June 2014, Hong Kong, China. *IEEE*, 2014; 3531-3537.
- [2] XU R, YURKEWICH A, PATEL R V. Curvature, torsion, and force sensing in continuum robots using helically wrapped FBG sensors [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(2): 1052-1059.
- [3] WANG H SH, ZHANG R X, CHEN W D, *et al.*. Shape detection algorithm for soft manipulator based on fiber Bragg gratings [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2977-2982.
- [4] ZHANG R M, LIU H, HAN J D. Robust tracking of dexterous continuum robots: Fusing FBG shape sensing and stereo vision[C]. 2017 *39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 11-15 July 2017, Seogwipo, South Korea. *IEEE*, 2017; 925-928.
- [5] NGUYEN T D, HAN H S, SHIN H Y, *et al.*. Highly sensitive flexible proximity tactile array sensor by using carbon micro coils[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 266: 166-177.
- [6] SONG S, LI Z, YU H Y, *et al.*. Electromagnetic positioning for tip tracking and shape sensing of flexible robots [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(8): 4565-4575.
- [7] GUO Y X, KONG J Y, LIU H H, *et al.*. A three-axis force fingertip sensor based on fiber Bragg grating [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 249: 141-148.
- [8] GUO Y X, KONG J Y, LIU H H, *et al.*. Design and investigation of a reusable surface-mounted optical fiber Bragg grating strain sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(23): 8456-8462.
- [9] LIU H, FARVARDIN A, PEDRAM S A, *et al.*. Large deflection shape sensing of a continuum manipulator for minimally-invasive surgery [C]. 2015 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 26-30 May 2015, Seattle, WA, USA. *IEEE*, 2015; 201-206.
- [10] SHI C Y, LUO X B, QI P, *et al.*. Shape sensing techniques for continuum robots in minimally invasive surgery: a survey [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2017, 64(8): 1665-1678.
- [11] LIU H, FARVARDIN A, GRUPP R, *et al.*

- Shape tracking of a dexterous continuum manipulator utilizing two large deflection shape sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5494-5503.
- [12] GE J, JAMES A E, XU L, *et al.*. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(20): 2237-2240.
- [13] XU L, GE J, PATEL J H, *et al.*. Dual-layer orthogonal fiber Bragg grating mesh based soft sensor for 3-dimensional shape sensing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24727-24734.
- [14] ZHANG X X, SONG Y M, MENG F Y, *et al.*. Optical fiber based soft curvature sensor with polyvinyl chloride reinforced silicone rubber substrate [J]. *Optik*, 2019, 178: 567-574.
- [15] 孙广开, 曲道明, 闫光, 等. 软体气动驱动器弯曲变形光纤传感与形状重构[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1052-1059.
SUN G K, QU D M, YAN G, *et al.*. Bending deformation of optical fiber sensing and shape reconstruction of soft pneumatic driver[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1052-1059. (in Chinese)
- [16] 张润奎, 王贺升, 陈卫东. 仿章鱼软体机器人形状控制[J]. *机器人*, 2016, 38(6): 754-759.
ZHANG R X, WANG H SH, CHEN W D. Shape control for a soft robot inspired by octopus [J]. *Robot*, 2016, 38(6): 754-759. (in Chinese)
- [17] 何彦霖, 张旭, 孙广开, 等. 复合基底柔性光纤曲率传感器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(6): 1263-1269.
HE Y L, ZHANG X, SUN G K, *et al.*. Flexible curvature sensor based on composite substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(6): 1263-1269. (in Chinese)
- [18] HE Y L, ZHU L Q, SUN G K, *et al.*. Design, measurement and shape reconstruction of soft surgical actuator based on fiber Bragg gratings [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1773.
- [19] HE Y L, DONG M L, SUN G K, *et al.*. Shape monitoring of morphing wing using micro optical sensors with different embedded depth [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 179-185.
- [20] XIONG L, JIANG G Z, GUO Y X, *et al.*. A three-dimensional fiber Bragg grating force sensor for robot [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(9): 3632-3639.
- [21] WANG X F, GUO Y X, XIONG L, *et al.*. High-frequency optical fiber Bragg grating accelerometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(12): 4954-4960.
- [22] 俞天. 柔性电子中 PDMS 的力学性能及粘接研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
YU T. *Research on Force Properties and Adhesive of PDMS in Flexible Electronics* [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017. (in Chinese)

作者简介:



郭永兴(1986—),男,河南汝南人,博士,副教授,2009年于华北水利水电大学获得学士学位,2014年于武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室获得博士学位,主要从事机器人光纤智能感知技术、光纤光栅传感理论与测试技术、机器人传感技术方面的研究。E-mail: yongxing_guo@wust.edu.cn



杨跃辉(1996—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,2018年于洛阳理工学院获得学士学位,主要从事光纤光栅在软体机器人形状测量的应用。E-mail: yangyuehui998@wust.edu.cn