

## 基于新型工业树脂的FBG柔性传感器

沈志辉 徐一鸣 陆观

### FBG flexible sensor based on new industrial resin

SHEN Zhihui, XU Yiming, LU Guan

引用本文:

沈志辉, 徐一鸣, 陆观. 基于新型工业树脂的FBG柔性传感器[J]. 应用光学, 2025, 46(4): 903–911. DOI: 10.5768/JAO202546.0405002

SHEN Zhihui, XU Yiming, LU Guan. FBG flexible sensor based on new industrial resin[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 903–911. DOI: 10.5768/JAO202546.0405002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0405002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 光纤布拉格光栅柔性传感器研究进展

Research progress of flexible sensor of fiber Bragg grating

应用光学. 2021, 42(5): 932–940 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508002>

#### 基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究

Simulation of Fabry–Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating

应用光学. 2020, 41(5): 1129–1136 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0508002>

#### 基片式光纤光栅传感器加速度试验研究

Acceleration test of substrate–packaged fiber Bragg grating sensor

应用光学. 2022, 43(1): 152–159 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108001>

#### 基于表贴式应变传递的光纤光栅匹配解调研究

Matched filtering demodulation of fiber Bragg grating based on surface attached strain transfer

应用光学. 2025, 46(3): 530–537 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311007>

#### 基于长周期光纤光栅的FBG解调方法

FBG demodulation method based on long–period fiber gratings

应用光学. 2022, 43(1): 160–166 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0108002>

#### 小型化光纤光栅解调系统设计及寻峰算法的模拟评测

Design of miniaturized fiber grating demodulation system and simulation evaluation of peak–detection algorithm

应用光学. 2020, 41(3): 618–625 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 04-0903-09

引用格式: 沈志辉, 徐一鸣, 陆观. 基于新型工业树脂的 FBG 柔性传感器 [J]. 应用光学, 2025, 46(4): 903-911.

SHEN Zhihui, XU Yiming, LU Guan. FBG flexible sensor based on new industrial resin[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(4): 903-911.



在线阅读

# 基于新型工业树脂的 FBG 柔性传感器

沈志辉<sup>1</sup>, 徐一鸣<sup>2</sup>, 陆 观<sup>1</sup>

(1. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 南通大学 电气与自动化学院, 江苏 南通 226019)

**摘 要:** 针对应用在机器人的光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 柔性传感器的柔性封装问题, 设计了以柔性树脂为封装层的 FBG 柔性传感器。首先, 分析了柔性树脂封装的影响; 其次, 制作了柔性树脂、聚二甲基硅氧烷、硅胶封装的传感器, 利用 Ansys 软件对传感器受压情况进行分析; 最后, 将制作的柔性传感器与裸 FBG 进行载荷和温度灵敏度、静态性能对比。实验结果表明: 柔性树脂封装的 FBG 传感器具有良好的响应和感知能力, 其载荷的平均灵敏度为 4.644 pm/N, 温度的平均灵敏度为 1.685 pm/°C, 灵敏度的拟合优度均在 99.8% 以上, 重复性为 0.008, 迟滞性为 0.019, 线性度为 0.01, 优于聚二甲基硅氧烷、硅胶封装的 FBG 传感器以及裸光纤光栅。该研究可为 FBG 柔性封装提供参考。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 柔性树脂; 柔性封装; 应变性能研究

中图分类号: TN209; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0405002

## FBG flexible sensor based on new industrial resin

SHEN Zhihui<sup>1</sup>, XU Yiming<sup>2</sup>, LU Guan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of flexible encapsulation of fiber Bragg grating (FBG) sensor, a FBG sensor with flexible resin as encapsulation layer was designed. Firstly, the impact of flexible resin encapsulation was analyzed. Secondly, the sensors encapsulated with flexible resin, polydimethylsiloxane, silicone were fabricated, and the pressure conditions of the sensors were analyzed by using Ansys software. Finally, the load, temperature sensitivity and static performance of the fabricated flexible sensor were compared with the bare FBG. The experimental results show that the FBG sensor encapsulated with flexible resin has good response and sensing ability. The average sensitivity of load is 4.644 pm/N, the average sensitivity of temperature is 1.685 pm/°C, and the goodness of fit of sensitivity is above 99.8%. The repeatability is 0.008, the hysteresis is 0.019, and the linearity is 0.01, which are better than the polydimethylsiloxane, silicone encapsulated FBG sensor and bare FBG. The research can provide reference for flexible encapsulation of FBG.

**Key words:** fiber Bragg grating; flexible resin; flexible encapsulation; strain performance studies

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2025-01-06

基金项目: 国家自然科学基金国家重点研发计划智能电网联合基金 (61973178); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 重大项目 (21KJA470006)

作者简介: 沈志辉 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事 FBG 传感技术研究。E-mail: george\_sim@163.com

通信作者: 陆观 (1983—), 女, 博士, 教授, 主要从事 FBG 智能感知、机器人触觉传感技术研究。E-mail: luguan@ntu.edu.cn

## 引言

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 具有灵敏度高、抗电磁干扰、防水性能好、可靠性高等优点,在很多领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。裸 FBG 较为脆弱且容易被损坏,因此在实际应用中,需要根据需要对其进行封装<sup>[2-3]</sup>。

当前,对 FBG 的封装方式主要有金属管封式、聚合物嵌入式及表面黏贴式等<sup>[4]</sup>。国内外研究人员针对 FBG 封装方式开展了深入研究。马仲甜等人<sup>[5]</sup>分别采用铜基、铝基和亚克力材料对 FBG 进行表面黏贴式封装,并通过实验验证铜基封装的效果最好,应变与波长相关系数达到 99.89%。许志强等人<sup>[6]</sup>制作了表面式和埋入式两种 FBG 传感器,用以检测法兰螺栓的受力情况,仿真和试验结果表明,埋入式胶封结构的应变传递率略高于表面黏贴式。梁敏富等人<sup>[7]</sup>分析了基体表面黏贴和基体刻槽封装的 FBG 应变传递公式,得出其受胶水剪切模量、凹槽形状及 FBG 黏贴长度影响,采用环氧树脂胶,半圆形且胶黏长度为 100 mm 时,其应变传递效率最大。BAO W 等人<sup>[8]</sup>利用聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 封装 FBG,实验结果表明,与传统的二氧化硅 FBG 对比,PDMS 封装的 FBG 在应变和温度传感方面具有巨大优势。WU B 等人<sup>[9]</sup>利用纤维增强聚合物 (BFRP) 封装 FBG 传感器,对列车荷载作用下的性能进行研究,验证了 BFRP 封装的 FBG 能满足要求。王彦等人<sup>[10]</sup>利用硅胶制作的 FBG 柔性传感器性能较好,载荷灵敏度和温度灵敏度均高于裸 FBG。上述研究在制作 FBG 传感器时采用人工制作 FBG 封装层,需要自行设计传感器模具或者调配相关溶液,存在制作效率和精度低的问题,且一些封装方式和材料不适用于机器人柔性传感。

对于应用在机器人上的 FBG 柔性传感器而言,最重要的是实现其柔性封装。考虑到机器人的应用场景,一般采用聚合物嵌入式封装的方法。柔性链聚合物嵌入式封装目前主要采用硅胶和 PDMS 两种材料。其中,PDMS 作为一种人工皮肤材料,具有优异的柔韧性和弹性,得到了广泛应用。但是在利用 PDMS 制作时,存在以下问题:1) PDMS 需要配置,各材料的配比会影响到最终的柔韧性;2) PDMS 不能直接进行 3D 打印,一般需要常温固化 24 h 以上,影响了效率;3) PDMS 封装需要制作传感器模具,将溶液倒入模具中等待

成型。而模具存在尺寸大小、材质、结构、脱模等问题,在一定程度上影响到 FBG 封装。同样地,硅胶也存在类似的问题,即:制作效率低下,柔韧性依赖于混合物的配比,无法满足尺寸结构小型化的需求。3D 打印技术改变了以往裸 FBG 的封装手段,该技术只需操控 3D 打印设备,避免了人工制作的繁琐,大幅提升了制备效率与精度。不仅如此,它还能批量加工,确保传感器参数的一致,使传感器设计更加灵活,易于定制。在 3D 打印的材料上,作为一种新型工业树脂,柔性树脂 (80A, Formlabs, MA, USA)<sup>[11]</sup>拥有极佳的柔韧性和弹性,其参数与 PDMS 接近,两者的杨氏模量分别为 8.9 MPa(柔性树脂硬化后)和 9.2 MPa(PDMS 固化后),同时该材料一般不需要进行调配且可以直接进行 3D 打印,提高了制作效率。研究人员对柔性树脂在生物医学和人造皮肤领域开展了相关研究<sup>[11-13]</sup>,目前应用在医疗保健中软骨、肌腱和韧带解剖。考虑到 FBG 柔性封装的要求以及柔性树脂在仿生皮肤上的制作和性能优势,将柔性树脂应用在 FBG 封装上,可有效应对 FBG 柔性封装制作效率和精度的不足,对 FBG 柔性封装具有一定的实践意义。

基于上述研究和理论,本文采用柔性树脂和 3D 打印技术制作了 FBG 柔性传感器,与 PDMS、硅胶制作的柔性传感器和裸 FBG 进行了载荷灵敏度、温度灵敏度以及静态性能的比较,验证了柔性树脂作为封装材料的优势,对研究机器人 FBG 柔性传感器感知外界压力和温度物理量具有一定意义。

## 1 FBG 传感和应变原理

### 1.1 FBG 传感原理

FBG 的结构示意图及反射透射特性图如图 1 所示。由于 FBG 的折射率呈现出纳米级的周期性分布,当宽带光波在光纤中传输时,FBG 会对入射光中相应频率的光产生相干反射,进而形成中心反射峰,而其余的透射光则不会受到影响。

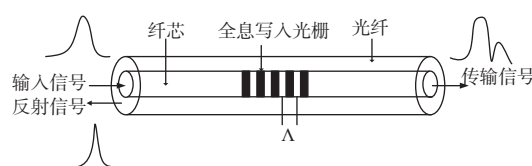


图 1 FBG 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG

FBG 的中心波长表达式为

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

式中:  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率;  $\Lambda$  为光栅周期。FBG 对应变和温度敏感, 三者的关系如下:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda = \lambda_B[(1-P_e)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (2)$$

式中:  $\Delta n_{\text{eff}}$  为折射率改变量;  $\Delta\Lambda$  为光栅周期变化量;  $\varepsilon$  为 FBG 所受到的应变;  $\alpha$  为热膨胀系数;  $\xi$  为热光系数;  $\Delta T$  为温度变化量;  $P_e$  为弹光系数, 一般为 0.22。

当 FBG 仅受外界应变影响时, 其中心波长的变化为

$$\Delta\lambda_B = 0.78\varepsilon\lambda_B \quad (3)$$

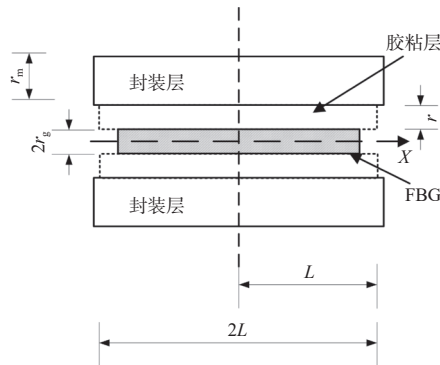
当 FBG 仅受温度影响作用时, 其中心波长的变化为<sup>[10]</sup>

$$\Delta\lambda_B = [(\alpha + \xi)\Delta T]\lambda_B = [(\alpha + \xi) + (1 - P_e)(\alpha_j - \alpha)]\lambda_B\Delta T \quad (4)$$

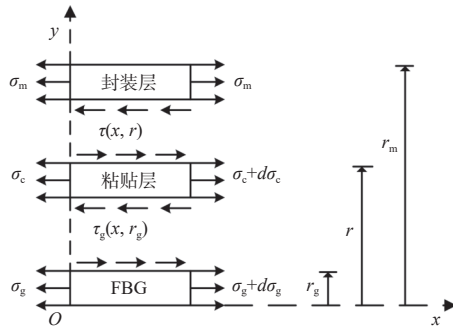
式中  $\alpha_j$  为光纤包层的热膨胀系数。

## 1.2 FBG 应变传递率

本文采用的 FBG 传感器的结构如图 2 所示。



(a) FBG 传感器结构图



(b) FBG 传感器受力分析图

图 2 FBG 传感器结构

Fig. 2 Structure diagram of FBG sensor

图 2 中  $r$  为黏贴层的半径;  $r_g$  为光纤半径;  $r_m$  为封装层半径;  $\sigma_g$  为 FBG 在  $x$  轴方向上的应力;  $\sigma_c$  为黏贴层在  $x$  轴方向上的应力;  $\sigma_m$  为封装层在  $x$  轴方向上的应力;  $\tau_g(x, r_g)$  为光纤表面的剪切应力;  $\tau(x, r)$  为黏贴层与封装材料间的剪切应力。依据模型的弹性模量在应变传递中的理论, 可得 FBG 的应变传递率<sup>[14]</sup> 为

$$\alpha = 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \quad (5)$$

其平均应变传递率<sup>[14]</sup> 为

$$\bar{\alpha} = 1 - \frac{\cosh(kL)}{kL \sinh(kL)} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ ,  $\bar{\alpha}$  为应变传递率及平均应变传递率;  $2L$  为胶黏层长度;  $k$  为与光纤和胶黏层材料特性有关的参数, 由下式给出<sup>[14]</sup>:

$$k^2 = \frac{2}{r_g^2 E_g \left\{ \frac{1}{G_c} \ln \frac{r_c}{r_g} + \frac{2(1+\mu_m)}{E_m} \left[ \frac{r_m^2}{r_m^2 - r_c^2} \ln \frac{r_m}{r_c} - \frac{1}{2} \right] \right\}} \quad (7)$$

式中:  $E_g$  为光纤弹性模量;  $G_c$  为胶黏层剪切模量;  $r_c$  为胶黏层厚度;  $E_m$  为封装层的弹性模量;  $\mu_m$  为封装层材料的泊松比。

## 1.3 FBG 应变传播过程

应变以应变波的形式经过封装材料、胶黏层等, 最后传播到 FBG 上, 整个过程如下所示<sup>[15]</sup>。

### 1) 应变波在柔性材料中的传播

应变波在柔性材料中的传播速度为<sup>[15]</sup>

$$v = \sqrt{E/\rho} \quad (8)$$

式中:  $v$  为应变波传播速度;  $E$  为封装材料的弹性模量;  $\rho$  为封装材料的密度。

由此可得, 应变波在封装材料中的传播时间为

$$t = \frac{h}{v} \quad (9)$$

式中  $h$  为封装材料厚度。

### 2) 应变波在胶黏层中的传播

应变波由传感器表面经封装层和胶黏层传播到整个 FBG 所需要的时间的计算公式也如式 (7)<sup>[15]</sup>。

### 3) 应变波传播至 FBG 的滞后时间

应变波要通过封装材料、胶黏层, 然后传到埋置在内部的 FBG 上, 由于胶黏层和封装材料的存在, FBG 产生应变的时间存在一定的滞后, 该滞后时间应为应变波在封装材料和胶黏层中的传递时间之和<sup>[15]</sup>。

## 2 FBG 柔性传感器的设计与制作

### 2.1 FBG 柔性传感器的设计

3种封装材料的传感器尺寸设置为40 mm×20 mm×4 mm, FBG埋入深度为2 mm。选择的FBG参数如表1所示, 选择中心波长均为1 545 nm±0.5 nm的光纤光栅。设计的柔性传感器平面图如图3所示。

表1 FBG 参数

Table 1 Parameters of FBG

| 封装类型 | 光栅长度/mm | 反射率/% | 3dB带宽/nm | 边模抑制比/dB | 使用温度/℃ |
|------|---------|-------|----------|----------|--------|
| 柔性树脂 | 3       | >60   | 0.65±0.2 | ≥15      | -40~85 |
| PDMS | 3       | >60   | 0.65±0.2 | ≥15      | -40~85 |
| 硅胶   | 3       | >60   | 0.65±0.2 | ≥15      | -40~85 |
| 裸FBG | 3       | >60   | 0.65±0.2 | ≥15      | -40~85 |

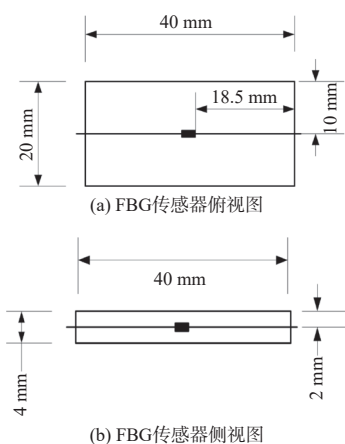


图3 FBG 柔性传感器设计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FBG flexible sensor design

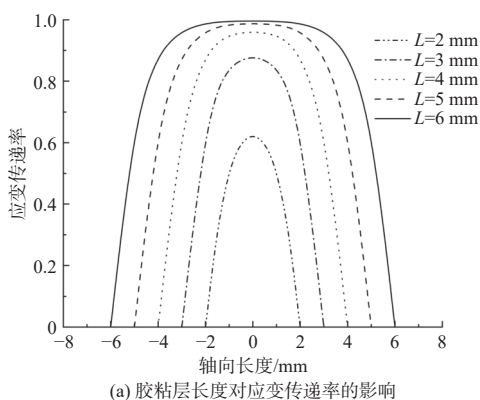
### 2.2 FBG 柔性传感器的制作

柔性树脂作为一种新型工业树脂材料, 具有一定的柔软度和弹性, 拥有优异的耐撕裂性, 坚固耐用, 适用于弯曲、压缩等应用场景。

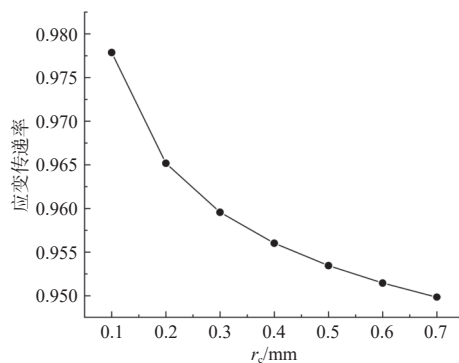
实验用3D打印机为创想三维公司生产, 打印方式为光固化, 打印精度为±0.1 mm。首先采用3D打印技术制作柔性树脂的封装层, 为方便埋置FBG, 采用上下两半打印, FBG的直径为0.125 mm, 弹性模量为72 000 MPa, 埋入深度为2 mm, 因此设计上下两半1.9 mm和1.1 mm打印, 在封装层上开一个半径为0.1 mm的通孔, 以便埋置FBG, 根据实际情况, 在上下两层封装层的通孔的相应区域涂上胶水, 如此便能包裹住光栅段, 从而使其固定。胶水的剪切模量为1 350 MPa, 弹性模量为4 000 MPa。

光栅段的胶层黏贴长度应大于光栅长度, 从而保证FBG的应变传递率。

根据式(5)和式(7), 当胶黏层长度不同时, 其应变传递率如图4(a)所示。从图4(a)可知, 当胶黏层长度逐渐增加时, FBG的最大应变传递率也随之增加, 且维持最大应变传递率的范围也随之增加, 因而在实际应用中, 为确保FBG的应变传递率, 胶黏层长度应达到光栅长度的两倍以上。本文的光栅长度为3 mm, 当 $L=5$  mm时, 其应变传递率曲线显示 $x=±3$  mm的应变传递率在90%以上, 因此设计胶黏层总长度为10 mm。



(a) 胶黏层长度对应变传递率的影响



(b) 胶黏层厚度对应变传递率的影响

图4 不同胶黏层长度和胶黏层厚度的应变传递

Fig. 4 Strain transferring for different adhesive layer lengths and adhesive layer thicknesses

图4(b)为不同胶黏层厚度对应变传递率的影响。从图4(b)中可以看出, 胶黏层半径为0.1 mm时FBG的响应传递率较高。同时可看出, 半径从0.1 mm~0.2 mm的区间内, 应变传递率下降速度较快, 表明了胶黏层半径0.1 mm对FBG传感器应变传递率的重要意义。

本文选择的胶水为环氧树脂胶水, 其剪切模量为1 350 MPa, 不同剪切模量的胶水对FBG应变传递率的影响如图5所示。随着胶水剪切模量的增

加, FBG 传感器的应变传递率也随之增加, 在剪切模量超过 4 000 MPa 后, 其应变传递率逐渐趋于平缓。因此, 选择剪切模量为 1 350 MPa 的胶水才能满足设计要求。

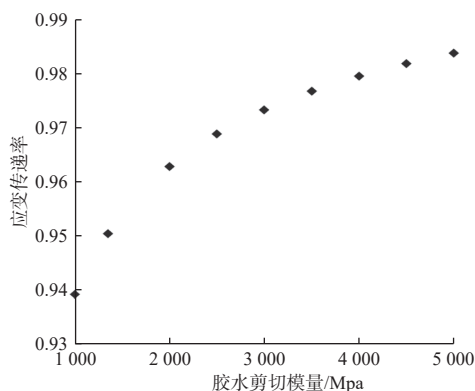


图 5 不同胶水剪切模量对应变传递率的影响

Fig. 5 Effect of different glue shear modulus on strain transfer rate

实验设定柔性传感器厚度为 4 mm, 不同的封装层厚度对 FBG 的应变传递率会造成影响。图 6 为不同的封装层厚度与 FBG 应变传递率的关系。从图 6 可知, 随着封装层厚度的增加, FBG 应变传递率会逐渐下降, 当封装层厚度在 5 mm 内时, 其应变传递率变化相对平缓, 超过 5 mm 后, 应变传递率下降较快。因此, 在满足传感器性能的前提下, 传感器厚度不宜过大, 本文设计的厚度为 4 mm, 满足设计要求。

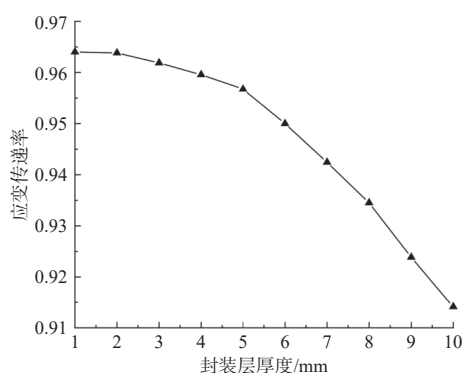


图 6 不同封装层厚度对应变传递率的影响

Fig. 6 Effect of thickness of packing layer on strain transfer rate

对于 PDMS 封装的传感器, 通过 3D 打印制作所需规格的模具, 模具开孔大小为 0.2 mm。把 FBG 按图 3 分布形式拉直穿过小孔, 然后倒入 PDMS 溶液(PDMS 与固化剂比例为 10 : 1)至厚度

为 4 mm。把制作好的柔性传感器放进烘干箱内高温烘干 2 h, 随后进行脱模处理, 得到制作好的 PDMS 封装的 FBG 传感器。对于硅胶封装的传感器, 本文选用弹性模量为 10 MPa, 泊松比为 0.48 的硅胶溶液, 制作方法也和 PDMS 一致。

由于柔性树脂封装 FBG 时采用了环氧树脂胶水, 其速度为 1 000 m/s, 胶黏层厚度为 0.2 mm, 封装厚度为 4 mm。由于 FBG 埋置在中间, 因此  $h$  取 2 mm, 封装材料的弹性模量为 8.9 MPa, 密度为 1.4 g/cm<sup>3</sup>, 则应变波在封装材料中的传播速度为

$$v = \sqrt{E/\rho} = \sqrt{\frac{8.9 \times 10^6}{1400}} = 79.73 \text{ m/s} \quad (10)$$

所需时间为

$$t_1 = \frac{h}{v} = \frac{2}{79.73 \times 1000} = 2.51 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (11)$$

应变波在胶黏层的传播时间为

$$t_2 = \frac{h}{v} = \frac{0.2}{1000 \times 1000} = 2 \times 10^{-7} \text{ s} \quad (12)$$

对于柔性树脂封装的 FBG 柔性传感器而言, 其应变波的传播滞后时间为  $5.1 \times 10^{-5} \text{ s}$ ; PDMS 的弹性模量为 9.2 MPa, 密度为 1.1 g/cm<sup>3</sup>, 由此可计算得到应变波在 PDMS 封装的 FBG 传感器中的传播滞后时间为  $2.17 \times 10^{-5} \text{ s}$ ; 硅胶的速度为 30 m/s<sup>[15]</sup>, 弹性模量为 10 MPa, 则应变波在硅胶封装的 FBG 传感器中的传播滞后时间为  $6.67 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。三者相比可以看出, 应变波在柔性树脂中的传播滞后时间和在 PDMS、硅胶中的传播滞后时间相差不多, 表明 3D 打印和胶黏的方式并不会对后续实验造成重要影响。制作好的 FBG 柔性传感器如图 7 所示。

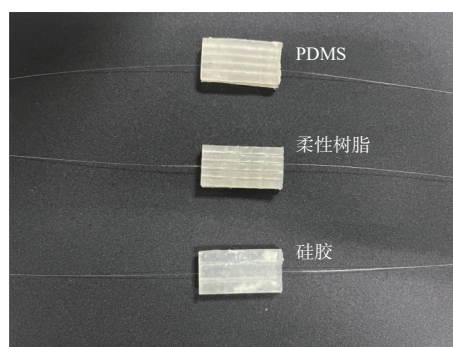


图 7 不同材料封装的 FBG 柔性传感器

Fig. 7 FBG flexible sensors packed in different materials

### 2.3 FBG 柔性传感器仿真分析

在 Ansys 中对柔性树脂封装的柔性传感器进

行仿真力学分析。传感器的尺寸为  $40\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ , 在其表面施加均布力, 图 8(a) 为传感器模型仿真受力图, 图 8(b) 为传感器内的 FBG 在施加  $1.5\text{ N}$  力后得到的应变图。

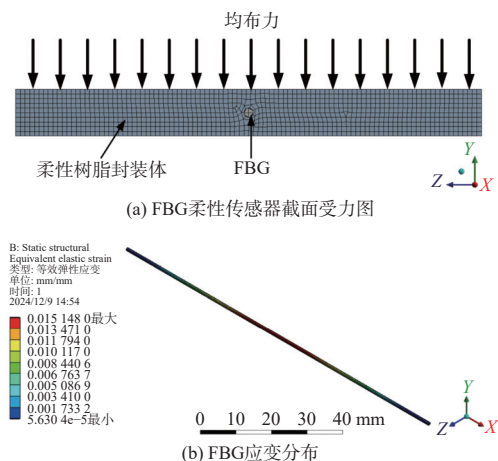


图 8 FBG 柔性传感器仿真

Fig. 8 Simulation of FBG flexible sensor

从仿真结果可知, 柔性传感器表面受力使得内部的 FBG 间接受力而产生应变。对 FBG 的应变求取平均值, 将其代入式(3)求得中心波长偏移量, 具体数据如表 2 所示。

表 2 FBG 仿真中心波长偏移量数据

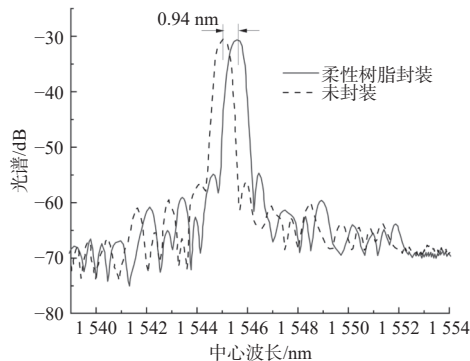
Table 2 Central wavelength shift data of FBG simulation

| 封装类型 | FBG应变均值/ $\epsilon$ | 波长偏移量/pm |
|------|---------------------|----------|
| 柔性树脂 | 0.0094              | 11.42    |
| PDMS | 0.0086              | 10.37    |
| 硅胶   | 0.0074              | 9.01     |

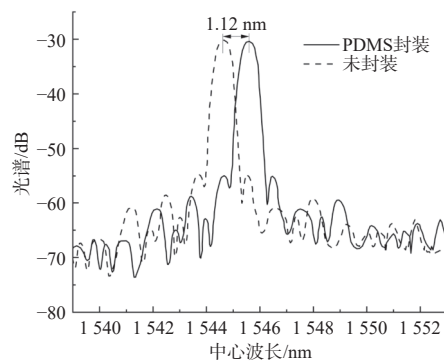
## 2.4 封装前后的光谱对比

图 9 为柔性树脂、PDMS 和硅胶封装前后 FBG 反射光谱变化。在室温为  $25^\circ\text{C}$  时, 封装后 FBG 的波长相比封装前发生了一定的位移, 可能是柔性树脂、PDMS 和硅胶在制作过程中拉伸或收缩不一致, 使得 FBG 产生不均匀应力; 同时制作中胶黏的方式或者直接填充固定的方式, 也使 FBG 本身存在有一定的预应力。对比封装前后 FBG 的反射光谱, 光谱形状基本保持一致, 波长光谱峰值并没有出现明显的变化, 因此封装后的传感器的性能并不会出现特别重大的变化。同时, 柔性树脂封装后的 FBG 的波长偏移比 PDMS 和硅胶封装的 FBG 的波长偏移量要小, 分析原因

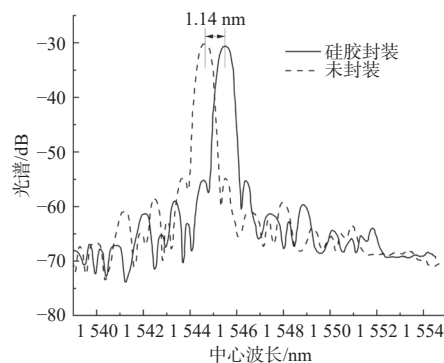
是 PDMS 和硅胶封装时进行了高温烘烤, 导致偏移较多。



(a) 柔性树脂封装前后的FBG光谱



(b) PDMS封装前后的FBG光谱



(c) 硅胶封装前后的FBG光谱

图 9 封装前后 FBG 的光谱变化

Fig. 9 Spectral variation in FBG before and after packaging

## 3 实验与分析

FBG 柔性传感器标定实验系统如图 10 所示, 整个系统包括 FBG 传感器、多通道 FBG 光谱解调仪及上位机。多通道 FBG 光谱解调仪为上海翊宏航空科技公司生产, 型号为 GM320-100-16, 具有 16 个通道, 分辨率为  $0.1\text{ pm}$ , 波长范围为  $1525\text{ nm} \sim 1567\text{ nm}$ , 采样频率为  $100\text{ Hz}$ 。由于裸 FBG 较为脆弱, 为了保证实验的顺利进行, 在施加载荷时在其

上放置树脂制作的圆柱体。

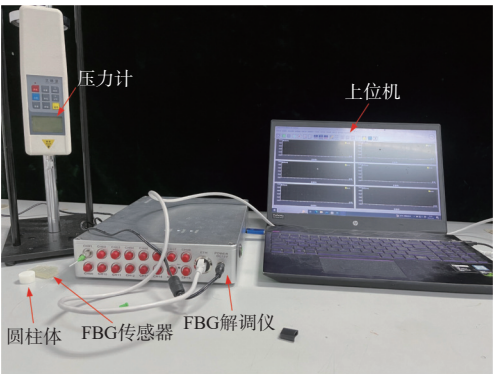


图 10 FBG 柔性传感器检测系统

Fig. 10 FBG flexible sensor detection system

3.1 载荷灵敏度实验

由于裸 FBG 较为脆弱, 直接施加接触力可能会造成光纤断裂, 因此选择树脂圆柱体放置在 FBG 上, 质量较轻可忽略不计。在其上施加载荷, 加载和卸载实验重复 3 次, 取波长偏移量的平均值, 实验在室温 25℃, 相对湿度 53% 中进行。将实验得到的结果进行拟合对比, 如图 11 所示, 灵敏度与拟合优度如表 3 所示。

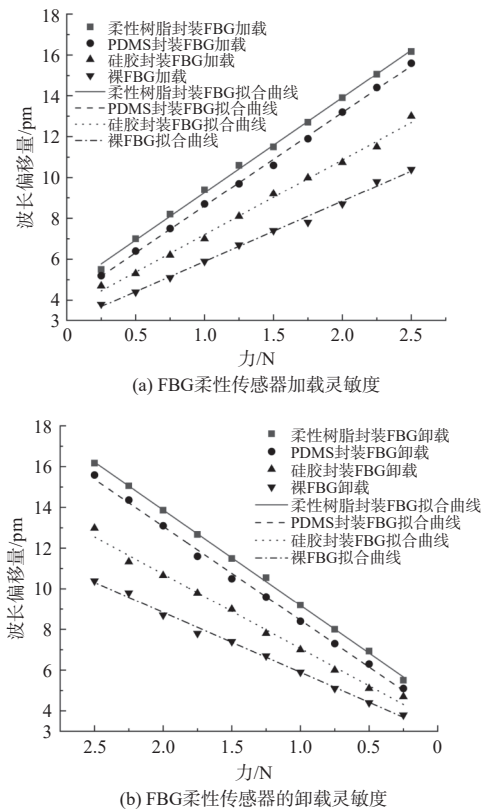


图 11 FBG 柔性传感器载荷灵敏度

Fig. 11 Load sensitivity of FBG flexible sensors

表 3 FBG 载荷灵敏度和拟合优度

Table 3 FBG load sensitivity and goodness of fit

| 封装类别   | 加载                            |          | 卸载                            |          |
|--------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
|        | 灵敏度/<br>(pm·N <sup>-1</sup> ) | 拟合优度     | 灵敏度/<br>(pm·N <sup>-1</sup> ) | 拟合优度     |
| 柔性树脂封装 | 4.649                         | 0.998 65 | 4.639                         | 0.998 63 |
| PDMS封装 | 4.597                         | 0.998 62 | 4.572                         | 0.998 61 |
| 硅胶封装   | 4.657                         | 0.997 05 | 4.636                         | 0.996 75 |
| 裸FBG   | 4.748                         | 0.995 81 | 4.666                         | 0.995 15 |

从图 11 和表 3 可得出以下结论: 1) 埋置在封装材料中的 FBG 对外界载荷具有很好的响应能力和线性能力, 柔性树脂封装的 FBG 表现最好, 柔性树脂封装的 FBG 的平均灵敏度为 4.644 pm/N, 平均拟合优度为 99.9%, 优于裸 FBG 的灵敏度, 表明若要增强 FBG 的灵敏性, 必须进行封装; 2) 封装材料会影响到 FBG 的感知与响应能力, 选择柔性好的封装材料进行 FBG 的封装, 对 FBG 柔性传感器实现感知十分重要, 以柔性树脂为封装材料的传感器灵敏度要优于 PDMS 和硅胶封装的传感器, 表明了柔性树脂的优异性能; 3) 柔性树脂、PDMS、硅胶封装的 FBG 在受到外界载荷时, 产生的波长偏移量的实际值与仿真时的理论值基本一致, 加载误差分别为 0.7%, 2.3%, 2.2%, 卸载时的误差分别为 0.68%, 2.2%, 2.1%。

3.2 重复性、线性度、迟滞性等对比

传感器的评价指标主要有重复性、线性度、迟滞性。

传感器的重复性是指在相同的测量条件下, 对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的接近程度。重复性越好, 误差就会越小。公式如下:

$$e_R = \frac{\Delta R_{\max}}{Y} \tag{13}$$

$$\Delta R_{\max} = (\Delta R_{\max 1}, \Delta R_{\max 2}) \tag{14}$$

式中:  $\Delta R_{\max 1}$ ,  $\Delta R_{\max 2}$  分别为传感器加载及卸载实验的最大偏差;  $Y$  为实验量程下 FBG 波长偏移量的均值。

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间的关系与理想直线的偏离程度, 线性度越小越好。线性度的计算公式如下:

$$e_L = \frac{\Delta \lambda_{\max}}{Y} \tag{15}$$

式中  $\Delta \lambda_{\max}$  为加载卸载实验中 FBG 的波长的算术平均值与其拟合直线上各个点的函数值的最大差值。

传感器的迟滞性是指在相同的测量条件下,当输入量由小到大和由大到小变化时,对于同一输入量,传感器输出量的差值。其表达式如下:

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y} \quad (16)$$

式中  $\Delta H_{\max}$  代表加载和卸载实验中 FBG 的中心波长偏移量的最大值。

3 个柔性传感器和裸 FBG 的重复性、线性度、迟滞性对比如图 12 所示。

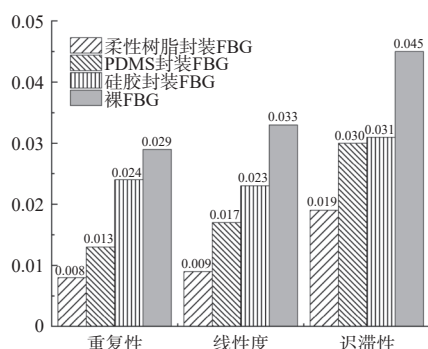


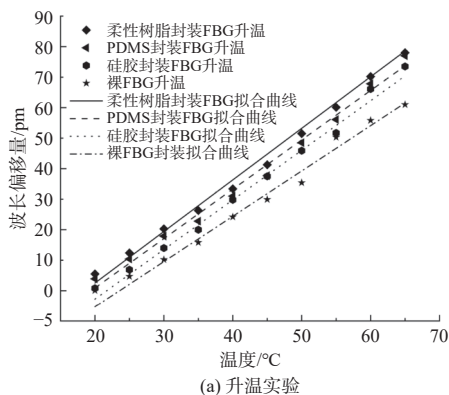
图 12 重复性、线性度、迟滞性等对比

Fig. 12 Comparison of repeatability, linearity and hysteresis

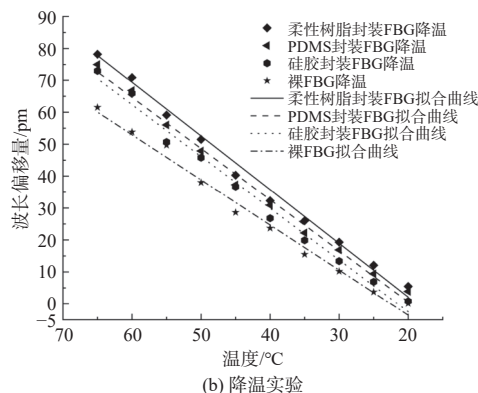
从图 12 中可以得出,与裸 FBG 相比,经过封装的 FBG 的重复性、线性度和迟滞性均较好,均小于未经封装的 FBG;而柔性封装材料中,柔性树脂封装的 FBG 表现最佳,重复性、线性度和迟滞性不超过 0.02,均小于 PDMS、硅胶封装的 FBG 传感器,表明了柔性树脂封装的优势。

### 3.3 温度灵敏度实验

除对应变敏感外,光纤光栅还对温度敏感。将封装好的 FBG 柔性传感器和裸 FBG 放进恒温箱进行温度灵敏度实验。温度设置为 20℃~65℃,间隔为 5℃,每个温度采集 1 000 个数据点。图 13 为 FBG 传感器升温 and 降温拟合曲线,表 4 为温度灵敏度和拟合优度数据。



(a) 升温实验



(b) 降温实验

图 13 FBG 柔性传感器温度灵敏度

Fig. 13 Temperature sensitivity of FBG flexible sensors

表 4 FBG 柔性传感器的温度灵敏度

Table 4 Temperature sensitivity of FBG sensors

| 封装类别   | 升温                            |         | 降温                            |          |
|--------|-------------------------------|---------|-------------------------------|----------|
|        | 灵敏度/<br>(pm·℃ <sup>-1</sup> ) | 拟合优度    | 灵敏度/<br>(pm·℃ <sup>-1</sup> ) | 拟合优度     |
| 柔性树脂封装 | 1.69                          | 0.998 4 | 1.68                          | 0.998 01 |
| PDMS封装 | 1.61                          | 0.997 8 | 1.61                          | 0.997 66 |
| 硅胶封装   | 1.53                          | 0.996 7 | 1.51                          | 0.995 52 |
| 裸FBG   | 1.48                          | 0.986 4 | 1.46                          | 0.995 98 |

从图 13 和表 4 可以看出,封装后的 FBG 对温度具有很好的响应能力,对温度感知良好。柔性树脂封装的 FBG 的温度灵敏度远高于其他 FBG 柔性传感器和裸 FBG,升温和降温的平均灵敏度为 1.685 pm/℃,是裸 FBG 的 1.14 倍。

## 4 结论

本文针对机器人 FBG 传感器柔性链聚合物嵌入式封装的需求和制作效率的不足,利用柔性树脂制作了 FBG 柔性传感器,并与 PDMS、硅胶封装的 FBG 柔性传感器以及裸 FBG 进行了载荷和温度灵敏度、传感器性能比较,得到了以下结论。

1) 柔性树脂和 3D 打印技术可以很好地满足 FBG 柔性传感器柔韧性、制作效率、个性化的需求。应变波在柔性树脂传感器、PDMS 传感器以及在硅胶传感器内的传播滞后时间均属于同一数量级,表明封装并不会对应变波传播产生实质性影响。并且柔性树脂封装后对 FBG 的波长和光谱的偏移影响较小。

2) 柔性树脂封装的 FBG 传感器的载荷平均灵敏度为 4.644 pm/N,温度平均灵敏度为 1.685 pm/℃,且平均拟合优度均达到 99.8%,高于其余两个柔性

传感器和裸 FBG。柔性树脂封装后的 FBG 的重复性、线性度、迟滞性均优于 PDMS、硅胶封装的传感器和裸 FBG, 表明柔性树脂的优越性能, 对 FBG 的柔性封装具有一定的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 张妍, 张帆, 赵冠棋, 等. 基于光纤光栅传感器的体外血管模型应力测量[J]. *应用光学*, 2022, 43(5): 1007-1014.  
ZHANG Yan, ZHANG Fan, ZHAO Guanqi, et al. Circumferential stress measurement of blood vessels model in vitro based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5): 1007-1014.
- [2] 贾振安, 史小宇, 禹大宽, 等. 光纤光栅温度传感增敏方法研究[J]. *红外*, 2023, 44(11): 31-35.  
JIA Zhenan, SHI Xiaoyu, YU Dakuan, et al. Research on sensitization method for fiber Bragg grating temperature sensing[J]. *Infrared*, 2023, 44(11): 31-35.
- [3] 安国文, 王立志, 贾平岗, 等. 基于游标效应的双芯光子晶体光纤温度传感器[J]. *应用光学*, 2022, 43(3): 551-556.  
AN Guowen, WANG Lizhi, JIA Pinggang, et al. Dual-core photonic crystal fiber temperature sensor based on vernier effect[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 551-556.
- [4] 杨杭洲, 刘鑫, 南朋玉, 等. 光纤高温应变传感器研究进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(10): 158-171.  
YANG Hangzhou, LIU Xin, NAN Pengyu, et al. Progress in research of optical fiber high temperature and strain sensor(Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(10): 158-171.
- [5] 马仲甜, 李钊枢, 万嘉颖, 等. 表贴式矿用 FBG 传感器应力传感特性分析研究[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(5): 15-18.  
MA Zhongtian, LI Zhaoshu, WAN Jiaying, et al. Analysis and research on stress sensing characteristics of surface mounted mining FBG sensors[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(5): 15-18.
- [6] 许志强, 王超, 白彬, 等. 监测法兰螺栓力的两种胶封装光纤光栅应变传感器研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2022(12): 13-19.  
XU Zhiqiang, WANG Chao, BAI Bin, et al. Study of two types of fiber bragg grating strain sensors packaged using adhesive for monitoring of bolt load in flange joints[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2022(12): 13-19.
- [7] 梁敏富, 方新秋, 陈宁宁, 等. 正交试验设计的 FBG 测力锚杆结构封装优化及应用[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(8): 2950-2960.  
LIANG Minfu, FANG Xinqiu, CHEN Ningning, et al. Structure packaging optimization and application of FBG dynamometry bolts based on the orthogonal test design[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(8): 2950-2960.
- [8] BAO W, LI X, CHEN F, et al. Bragg grating in a flexible and stretchable coreless polymer optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(13): 3191-3194.
- [9] WU B T, ZHOU Y Y, LU H X, et al. Fatigue resistance of a BFRP-encapsulated long-gauge FBG strain sensor under cyclic train loads[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(9): 3945-3953.
- [10] 王彦, 秦楠, 刘吉虹, 等. 基于光纤光栅的温度与压力柔性传感性能测试[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 93-98.  
WANG Yan, QIN Nan, LIU Jihong, et al. Performance test of temperature and pressure flexible sensor based on optical fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 93-98.
- [11] GUERREIRO H, FLOTTMANN F A, KYSELYOVA A A, et al. First experience with walrus balloon guide catheter in a whole-body flow model[J]. *Neuroradiology*, 2023, 65: 1787-1792.
- [12] KUHL J, HAUSCHILD J, KRAUSE D. Comparing friction of additively manufactured materials with animal blood vessels[J]. *Annals of 3D Printed Medicine*, 2022, 7: 2666-2672.
- [13] CORRADO P, GIOVANNA A, STEFANO P, et al. 3D-printed biomimetic artificial muscles using soft actuators that contract and elongate[J]. *Science Robotics*, 2022, 7: 4155.
- [14] 郝子鉴, 卜胜利, 李用希, 等. 基于拉锥光纤布拉格光栅的法布里-珀罗应变传感器的仿真研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 1129-1136.  
HAO Zijian, PU Shengli, LI Yongxi, et al. Simulation of Fabry-Perot strain sensor based on tapered fiber Bragg grating[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 1129-1136.
- [15] 孙丽, 李宏男, 朱彤, 等. FBG 应变传感器的动态特性及其应用范围[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(3): 29-34.  
SUN Li, LI Hongnan, ZHU Tong, et al. Dynamic characteristics and application range of FBG strain sensor[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(3): 29-34.