Research on Preparation Technology and Parameters of Flexible Optical Fiber Pressure Sensor

LIN Yakun, HONG Mingsen, SUI Dandan, HONG Yingping, ZHANG Huixin*

(Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing of the Ministry of Education, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China)

Abstract: In order to improve the sensitivity and stability of the flexible optical fiber pressure sensor, the structural design and relevant parameters and the fabrication process of the pressure sensor are studied. Flexible optical fiber pressure sensors based on different concentration ratio and different curing time of PDMS are fabricated. The performance of the sensors under different parameters is compared to get the best parameters of concentration ratio and curing time. Finally, the fiber strain change is measured by using optical frequency domain reflectometer (OFDR). The results show that the sensitivity of the flexible optical fiber pressure sensor is influenced by the concentration ratio and curing time when the conditions of PDMS substrate thickness and curing temperature is fixed. The sensitivity of the sensor with the PDMS ratio of 8:1 and curing time of 2 h is the highest, which can reach 6.250 59 $\mu\varepsilon/kPa$, when the range of pressuring is $0 \sim 276.2$ kPa and the step size of pressuring is 27.6 kPa. At the same time, the flexible pressure sensor has the advantages of flexibility, lightness and thinness, and can measure complex curved surfaces, which provides a reliable solution for measuring the surface pressure of curved objects in the field of aero-space and navigation.

Key words: PDMS; fiber optic pressure sensor; sensitivity; optical frequency domain reflectometer (OFDR)EEACC: 7320Vdoi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2022.05.007

柔性光纤压力传感器的制备工艺与参数研究

林雅坤,洪明森,隋丹丹,洪应平,张会新*(中北大学,仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西太原030051)

摘 要:为了提高柔性光纤压力传感器的灵敏度和稳定性,对压力传感器结构设计、结构参数及制作工艺进行了研究。制作了 基于不同浓度配比和不同固化时间的 PDMS 柔性光纤压力传感器,对比了不同参数下传感器的性能,得出了最佳的配比和固化 参数,最后利用光频域反射计(OFDR)测量了光纤应变变化。结果表明,在 PDMS 基底厚度和固化温度恒定的情况下,浓度配比 和固化时间均对柔性光纤压力传感器的灵敏度有影响,并验证了当施加压力的范围为 0~276.2 kPa,加压的步长为 27.6 kPa 时, PDMS 配比为 8:1,固化时间为 2 h 的传感器灵敏度最高,可达 6.250 59 με/kPa。同时,柔性压力传感器具有柔韧、轻薄、可测量复 杂曲面等优点,为航天航海领域弧形物体表面压力测量提供了可靠的解决方案。

关键词:PDMS;光纤压力传感器;灵敏度;光频域反射计 中图分类号:TP212.1 文献标识码:A

生活中压力无处不在,压力是人类感知外界的 重要物理量之一。柔性压力传感器作为一种应用广 泛的新型电子器件,应用在机器人领域、医疗设备领 域以及物联网等领域^[1-3]。光纤压力传感器具有灵 敏度高,体积小,抗电磁干扰能力强等优点^[4],被广 泛应用于工业、电子等领域。目前,法布里-珀罗压 力传感器^[5]和光纤布拉格光栅压力传感器^[6]是应 用最广泛的光纤压力传感器,这两种传感器的制作

文章编号:1005-9490(2022)05-1061-05

都需要对光纤进行微加工,由于光纤自身纤细脆弱, 微加工过程复杂、费用昂贵,不利于量产,所以制备 一种高灵敏、成本低、便于量产、可折叠且结构简单 的柔性压力传感器具有非常重要的意义^[7]。

潜射导弹、潜艇等弧形物体在水下工作时,需要 随时随地检测其表面的压力,以此为依据分析潜射 导弹是否在预计的弹道以及潜艇航行轨迹是否正 确。而为了计算飞行器以及各部件的强度,最常见 的一种测试是在风洞中对机翼、机身等各个飞行器 部件表面的压力进行测量,提供气动载荷的原始数 据^[8]。但是传统压力传感器无法对弧形物体表面 的压力进行测量。因此,航天航海领域对柔性压力 传感器的需求非常迫切。针对这个问题,设计一种 柔性光纤压力传感器,提出以 PDMS 作为弹性封装 的"三明治"结构的柔性光纤压力传感器^[9],通过对 PDMS 基体制作过程中不同配比和不同固化时间进 行实验测试以及特性分析,得到压力与应变之间的 关系,制备出灵敏度高、线性度及重复性好的柔性传 感器件。

1 传感器的结构设计与原理分析

1.1 传感器的结构设计及制作

传感器的结构设计成"三明治"结构,三维结构 和实物如图 1、图 2 所示,上下两层是由 PDMS 制成 的基体接触面,中间嵌入单模光纤。



图 2 传感器实物图

"三明治"结构的传感器制作流程如图 3 所示。 首先,配置预聚物与固化剂质量比为 m:n 的 PDMS 混合溶液(m 与 n 具体数值依据制作基体数量和要 求配比而定):先将干净的一次性塑料杯放在电子 天平上去皮,向杯中倒入 m g PDMS 预聚物,用滴管 缓慢滴入 n g 的 PDMS 固化剂。将混合溶液置于磁



力搅拌器上,搅拌10min到混合物呈乳白色,使两 种试剂充分混合。将充分混合的 PDMS 在室温下静 止 30 min,然后放入真空干燥箱(真空度<133 Pa), 打开真空泵进行脱气将混合物中的气泡去除,当 PDMS 混合物变成透明且确保混合物中无气泡溢出 时,关闭真空泵,打开箱门,大气使 PDMS 混合物表 面气泡破裂,取出塑料杯。其次,固化成型:将塑料 杯中的混合液倒入模具,放在已调水平的热板上加 热固化。通过设置 m:n 的具体值和高低温箱的固 化时间可制作不同配比和不同固化时间的 PDMS 基 体。之后,脱模:等到 PDMS 完全固化后,利用薄金 属片在模具边缘撬起 PDMS 基体的一角,并用镊子 夹住,缓慢地将 PDMS 从模具中脱离出来,放入干净 的容器中。最后封装光纤,将光纤粘合到两片 PDMS 基体中间,制作成"三明治"结构的柔性光纤 传感器。

材料名称	生产厂商	产品型号
PDMS	美国道康宁	Sylgard184
单模光纤	长飞光纤光缆	G.657A2
电子天平	梅特勒-托利多公司	MS-TS
真空干燥箱	上海力辰邦西仪器科技	DZF
磁力搅拌器	博纳科技	MS-280-H
高低温试验箱	重庆四达	SDJS701B

1.2 传感器的工作原理分析

将光纤嵌入 PDMS 基体中间形成"三明治"结构的柔性压力传感系统,利用推拉力计向柔性压力 传感系统施加法向应力,光纤随着柔性基底变形而 产生轴向应变,由于光纤介质存在折射率分布不均 匀,会使光向波信号的方向发生改变,向四面八方传 播,发生瑞利散射现象^[10-11]。发生瑞利散射的光波 信号会向后传播,向后传播的光波信号称之为背向 瑞利散射光。背向瑞利散射光在光纤中传播时携带 着光纤不同位置的损耗信号,相对于其他散射更容 易获得。基于背向瑞利散射原理提出了光频域反射 技术(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR),利用该技术对光纤中的光信号进行检测, 经过 OFDR 测量仪内部进行编码可以测出光纤受到 的应变值^[12]。

2 有限元仿真分析

使用 ABAQUS 2016 对光纤压力传感器进行仿 真分析,柔性基底选用配比为 10:1、固化时间为 2 h 的 PDMS,因为单模光纤的直径相对于传感器的整 体尺寸很小,所以我们建立模型时只建立柔性基底 的模型,不包括单模光纤,并假设光纤的变形随着 PDMS 柔性基体一起变形^[13]。

首先对柔性光纤压力传感器进行前处理,利用 ABAQUS 的建模功能建立压力传感器试件的三维有 限元模型。长为 35 mm、宽为 15 mm、厚度为 3 mm, 采用三维结构进行和仿真。根据 PDMS 的力学参量 赋予模型材料属性,弹性模量为 2.270 MPa, 泊松比 为 0.49, 密度设为 970 kg/m³。为了准确模拟压力传 感器受压力作用时的变形情况,首先要对建好的压 力传感器模型按照实际的试验条件进行相应的位移 约束, 对模型的上表面依次施加均匀分布的载荷, 载 荷的大小分别为 27.7 kPa、55.4 kPa、83.1 kPa、 110.8 kPa、138.5 kPa 以及 166.2 kPa。观察在施加 载荷的情况下,模型的变形与应变情况。

2.1 传感器受力变形分析

当施加 27.7 kPa 的载荷时,经过计算之后,得 到如图 4 所示的传感器光纤轴向应变分布图。实心 增敏结构的应变分布均匀。



图 4 应变分布图

2.2 法向力作用下的传感器输出应变特性

从图 5 所示的传感器受力时的应变情况可以看 出,对传感器上表面施加接触力时,传感光纤的应变 将随着载荷的增大而不断增加,每增加相同量级的 载荷,其应变也是线性增加的。光纤中间位置的应 变最大,因此,取 7.5 mm 处的应变,绘制不同载荷与 应变的对应关系及拟合曲线,如图 6 所示,压力传感 器的灵敏度为 1.593 63 με/kPa(με 是应变单位,形 变量与原尺寸的比值,1 με = 10⁻⁶ ε),拟合系数为 1,表明载荷与应变之间呈现出良好的线性关系。





3 实验测试与分析

图 7 为柔性光纤压力传感器测试系统。该系统 由推拉力计、光纤解调设备(OFDR 测试仪)、光纤跳 线及计算机组成。



图 7 柔性光纤压力传感器测试系统

3.1 不同配比的 PDMS 对传感器灵敏度影响

对不同配比的 PDMS 传感器进行封装测试,观察 不同配比对传感器灵敏度的影响。每个传感器的尺寸 都相同,宽度为 15 mm,厚度 3 mm,固化温度为 80 ℃, 固化时间为 2 h。从 0 N 开始,按步长为 5 N 增加,加 载到 50 N。根据压强、力与受力面积之间的换算,得 到施加压力的范围为 0~276.2 kPa,加压的步长为 27.6 kPa。记录测试结果,可以绘制出不同 PDMS 配 比的传感器应变与压力之间的关系,如图 8 所示。

从图 8 可以看出 5 种不同配比 PDMS 封装的光 纤压力传感器的光纤应变和压力之间具有较高的线 性关系,说明 PDMS 柔性基体在加载实验中一直处 于弹性阶段,并没有发生塑性变形。对图 8 中的数



据点进行拟合,拟合直线的斜率即为灵敏度,从而得 到在压力范围 0~276.2 kPa 内各配比的光纤压力传 感器的灵敏度,如表 2 所示。

配比	灵敏度	配比	灵敏度
5:1	5.049 49	9:1	6.831 61
7:1	5.501 61	10:1	6.932 47
8:1	6.250 59	12:1	7.580 62

表 2 基体在不同配比下的灵敏度

由表 3 可以看出,封装传感器的 PDMS 基体配 比越大,传感器对压力就越灵敏。但是 9:1、10:1 和 12:1 配比的传感器测量数据中虽然灵敏度高,但更 适合微小形变的测量,5:1、7:1 和 8:1 配比的传感 器均适合大力度的测量,且满足测试压力的范围,所 以选择灵敏度较高的 8:1 配比 PDMS 作为封装光纤 压力传感器增敏材料。

3.2 不同固化时间的 PDMS 对传感器灵敏度影响

对不同固化时间的 PDMS 传感器进行封装测试, 观察 PDMS 基体的不同固化时间对传感器灵敏度的影 响。每个传感器的尺寸都相同,宽度为 15 mm,厚度为 3 mm,固化温度为 80 ℃,随机分别选取配比为 9:1 和 8:1 的基体。从 0 N 开始,按步长为 5 N 增加,加载到 50 N。根据压强、力与受力面积之间的换算,得到施加 压力的范围为 0~276.2 kPa,加压的步长为 27.6 kPa。 记录测试结果,可以绘制出不同 PDMS 基体固化时间 的传感器应变与压力之间的关系,如图 9 所示。



从图 9 可以看出 5 种不同固化时间封装的 PDMS 光纤压力传感器的光纤应变和压强之间具有 较高的线性关系,说明 PDMS 柔性基体在加载实验中 一直处于弹性阶段,并没有发生塑性变形。对图 9 中 的数据点进行拟合,拟合直线的斜率即为灵敏度,两 种配比分别在不同固化时间下的灵敏度见表 3 和 表 4。

表 3 8:1 配比的基体在不同固化时间下的灵敏度

时间/h	灵敏度	时间/h	灵敏度	
1.0	5.905 14	3.0	4.669 98	
1.5	6.126 45	4.0	3.480 14	
2.0	6.250 59			
表 4 9:1 配比的基体在不同固化时间下的灵敏度				
表 4	9:1 配比的基体在	不同固化时	间下的灵敏度	
表 4 时间/h	9:1 配比的基体在 灵敏度	不同固化时 时间/h	间下的灵敏度 灵敏度	
表 4 时间/h 1.0	9:1 配比的基体在 灵敏度 5.994 31	不同固化时 时间/h 3.0	间下的灵敏度 灵敏度 5.091 86	
表 4 时间/h 1.0 1.5	9:1 配比的基体在 灵敏度 5.994 31 6.578 52	不同固化时 时间/h 3.0 4.0	间下的灵敏度 灵敏度 5.091 86 4.156 34	
表 4 时间/h 1.0 1.5 2.0	9:1 配比的基体在 灵敏度 5.994 31 6.578 52 6.831 61	不同固化时 时间/h 3.0 4.0	间下的灵敏度 灵敏度 5.091 86 4.156 34	

根据随机选取的两组不同配比分别在不同固化 时间下封装的传感器的灵敏度计算结果可得,固化 3 h 以上的 PDNS 基体硬度偏大,弹性形变量小,传 感器灵敏度较低。固化 1.5 h 以下的 PDMS 基体固 化不完全,传感器灵敏度相对较低。因此,封装传感 器的 PDMS 基体固化 2 h 时柔韧性较好,传感器对 压力较灵敏。

4 结论

本文针对柔性光纤压力传感器的制备工艺与参数进行了研究,制作不同性质的柔性基底并封装成不同的柔性光纤压力传感器。通过实验测试及分析,能够直观地发现 PDMS 基体配比越大,传感器对压力就越灵敏,高配比的传感器更适合测量更小的压力,低配比的传感器更适合应用在大力度的测量上;固化时间越长,PDMS 基体硬度越大,传感器灵敏度越低,相反,在 PDMS 基体硬度越大,传感器灵敏度越低,相反,在 PDMS 基体固化完全的情况下,固化时间越短,传感器灵敏度相对较高。综上所述,该柔性光纤压力传感器在配比 8:1,固化时间 2 h 时,在 0~300 kPa 的压力范围内,具有较高灵敏度。可应用于航天航海领域弧形物体表面压力测量。

参考文献:

- [1] 白成,耿达,周伟,等.高性能电阻型柔性压力传感器研究进展[J].微纳电子技术,2021,58(7):559-570.
- [2] 李玲,岳凤英,乔霖,等. 基于多孔 PDMS 薄膜介电层的柔性压力传感器[J]. 仪表技术与传感器,2019(4):15-19.
- [3] 刘胜强,谭晓兰,吕博,等.柔性压力传感器的研制[J]. 机械工 程师.2020(10):9-12.

- [4] Li C, Tan Q L, Xiong J J, et al. A Noncontact Wireless Passive Radio Frequency (RF) Resonant Pressure Sensor with Optimized Design for Applications in High-Temperature Environments [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(7):075101.
- [5] 陈宝杰,刘佳,贾平岗,等. 基于 FBG 温度解耦的光纤法布里-珀罗高温压力传感器[J].测试技术学报,2020,34(4): 321-326.
- [6] Jin P, Wang Y, Qin N, et al. Relative Slipping at the Interfaces of the Flexible Fiber Bragg Grating Sensor[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(10):604-610.
- [7] 侯星宇,郭传飞. 柔性压力传感器的原理及应用[J]. 物理学报,2020,69(17):64-79.
- [8] 张博,徐豫新,曹梦雨,等. 弹头偏转弹体风洞实验设计[J]. 实

林雅坤(1995—),女,汉族,硕士研究生, 主要研究方向为动态测试,1371812114@ qq.com; 验室研究与探索,2014,33(4):18-21.

- [9] 隋丹丹,张会新,洪应平,等. 基于柔性基的高灵敏度无损光纤 压力传感器[J]. 电子器件,2020,43(3):590-594.
- [10] Zhao S Y, Cui J W, Wu Z J, et al. Accuracy Improvement in OFDR-Based Distributed Sensing System by Image Processing[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2020, 124:105824.
- [11] 薛慧如,马秀荣,单云龙. 基于 OFDR 光纤振动传感器解调算 法的研究及改进[J]. 光通信技术,2019,43(6):9-12.
- [12] 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.
- [13] 隋丹丹,张会新,张利平,等. 柔性光纤压力传感器的增敏结构 设计[J]. 仪表技术与传感器,2021,(3):19-22,53.



张会新(1980—),男,汉族,博士,副教授,主要研究方向为动态测试技术与 仪器,zhanghx@nuc.edu.cn。