膜片式带温补结构的光纤光栅压力传感器

于璐瑶[1,2],赵强[2],杜大伟[2],曲轶[1]

(1 海南师范大学 物理与电子工程学院 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海口 571158)

(2 齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266061)

摘　要：用栅区仅为 1 mm、间隔仅为 20 mm 的超短光纤光栅串,借助激光焊接工艺制作出长度约为 40 mm,直径约为 20 mm 的基于弹性膜片增敏的带温补结构的光纤光栅压力传感器,用于海洋深度探测。在 0.6 MPa 测量范围内,传感器的理论压力灵敏度为 -1.218 nm/MPa,利用有限元分析法仿真得到的压力灵敏度为 -1.364 nm/MPa,通过温度及压力测试实验消除温度对测压光纤光栅的影响后得到传感器实际平均压力灵敏度达 -1.728 nm/MPa,升降压曲线的线性度达 99.9％。与激光密封尾纤方式相比,采用环氧胶密封尾纤不必考虑瞬时高温对光纤造成的损伤,且更容易保持对光纤所施加的预应力。结合仿真分析发现双光纤光栅温度响应趋势存在差异是由结构设计的缺陷所致,后续可对此进行改进。在传感器的制作过程中增设了温度及压力老化步骤,可有效提高传感器升降压曲线的线性度及重合度。尾纤抖动会对传感器稳定性造成影响,建议使用切趾光纤光栅或设置缓冲区的方法解决。环氧胶固化时流动导致光纤光栅有效长度减小以及预应力增加使光纤光栅压力灵敏度提高,是实测传感器压力灵敏度偏高的主要原因。

关键词：光纤光栅；压力传感器；有限元分析法；弹性膜片；海洋

中图分类号：TP212　　　　**文献标识码**：A　　　　　**doi**：10.3788/gzxb20225103.0306007

0　引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)压力传感器具有寿命长、精度高、损耗小、抗电磁干扰能力强、可靠性和稳定性高、能实现多点分布检测等优点。但 FBG 本身的理论压力灵敏度仅为 8 pm/Mpa[1],通常需要利用波纹管[2]、悬臂梁[3]、薄壁圆筒[4-5]和弹性膜片[6-9]等弹性结构进行增敏。波纹管式 FBG 压力传感器的压力灵敏度高,但量程有限。悬臂梁式 FBG 压力传感器虽不受限于量程,但当非均匀力作用到悬臂梁一端后易引起振动从而使 FBG 的波长发生啁啾。薄壁圆筒式 FBG 压力传感器可以兼顾压力灵敏度和量程,但该结构不易串连。与上述结构相比,膜片式 FBG 压力传感器具有更多优点,其结构稳定易串连,合理选择膜片参数可灵活改变传感器的量程和压力灵敏度。若用环氧胶直接固定膜片与光纤,传感器受压会加速环氧胶的老化和蠕变,但借助激光焊接工艺,采用金属化[10]光纤或金属管封装后的光纤可以解决这一问题。HUANG Jun 等[11]将 FBG1、FBG2 分别沿径向粘贴在膜片边缘及中央(1 MPa,1.57 nm/MPa),膜片式 FBG 压力传感器的直径约为 60 mm。LIANG Minfu 等[12]将温补 FBG 平行粘贴在与测压 FBG(栅区长度为 33 mm)相连的外壳上消除温度对膜片式 FBG 压力传感器的影响(50 MPa,-40.43 pm/MPa)。WANG Li

http：// www.photon.ac.cn

等[13]使用金属化光纤制作膜片式压力传感器(1 MPa,1.611 nm/MPa),其直径约为 10 mm,长度约为 60 mm,但无温补结构。上述膜片式 FBG 压力传感器中皆采用紫外准分子激光相位掩膜法写制的 FBG,栅区长度至少为 10 mm,因此制作完成后的传感器体积偏大。

此次实验采用飞秒激光直写法制作的超短 FBG 串(栅区长度为 1 mm,FBG 间隔为 20 mm)得到长度约为 40 mm,直径约为 20 mm 的带有温补结构的膜片式 FBG 压力传感器。在 0.6 MPa 压力范围内,传感器压力灵敏度的理论值为−1.218 nm/MPa,利用有限元分析法仿真得到压力灵敏度为−1.364 nm/MPa,而实测传感器升、降压曲线的压力灵敏度分别为−1.765 57 nm/MPa 和−1.690 45 nm/MPa,线性度分别达 99.996 7% 和 99.928%,可满足黄海、渤海等海域的实际探测需求。

1　膜片式光纤光栅压力传感器的理论与仿真

1.1　测压原理

在膜片式 FBG 压力传感器中,对 FBG1 施加预应力 F 后,其波长漂移量 $\Delta\lambda_1 > 0$ 范围内,FBG1 的波长 λ_1 会随膜片所受均布压力 P 的线性增大而线性减小。F 引起的膜片中心最大挠度变化量为[14]

$$\omega_F = \frac{3FR^2(1-\mu^2)}{4\pi EH^3} \tag{1}$$

式中,R、H 分别为膜片的半径、厚度,E、μ 分别是膜片材料的杨氏模量、泊松比。

P 使膜片中心产生最大的挠度变化量为[14]

$$\omega_P = \frac{3PR^4(1-\mu^2)}{16EH^3} \tag{2}$$

ω_P 与 P、R、H 的关系详见图1。膜片中心挠度变化总量为

$$\omega_{max} = \omega_F + \omega_P \tag{3}$$

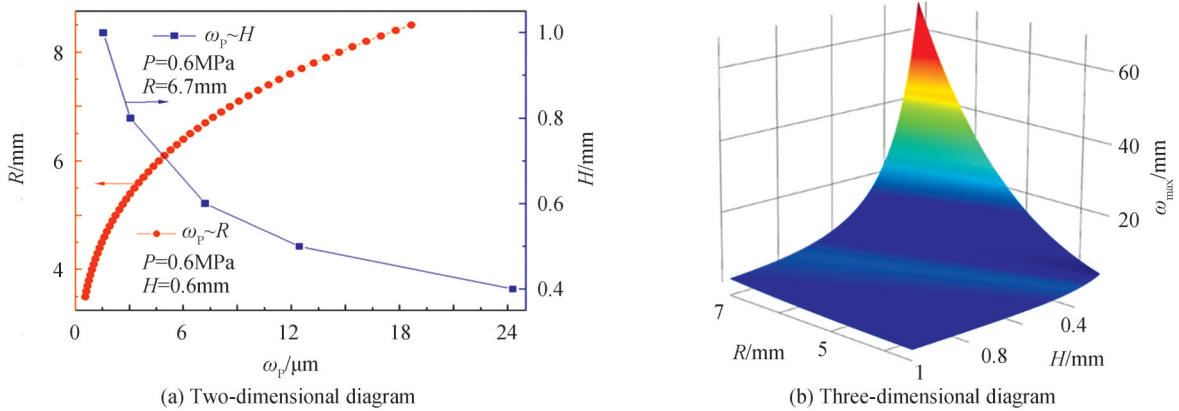(a) Two-dimensional diagram　　　　　　　(b) Three-dimensional diagram

图1　ω_P 与 R、H 的关系

Fig.1　The relationship between ω_P and R, H

测压时,膜片的 ω_P 传递到与其中心相连的光纤上,导致光纤上刻写的 FBG1 长度变化量为

$$\Delta L = \frac{L}{x}\omega_P \tag{4}$$

式中,L、x 分别是 FBG 的长度、有效长度,长度变化使 FBG1 发生应变,即

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\omega_P}{x} \tag{5}$$

则 FBG1 的波长漂移量为[2]

$$\Delta\lambda = \lambda_1(1-P_e)\Delta\varepsilon = \left[(1-P_e)\frac{\omega_P}{x}\right]\lambda_1 \tag{6}$$

式中,P_e 是 SiO_2 光纤的有效弹光系数,膜片式 FBG 压力传感器的压力灵敏度为[15]

$$K_{P} = \frac{\Delta\lambda}{P} = \frac{\left[\left(1 - P_{e}\right)\dfrac{\omega_{P}}{x} \right]\lambda_{1}}{P} \tag{7}$$

为减小金属膜的弹性迟滞效应,保证 ω_{max} 在小挠度理论范围内得到精确的解析解,ω_{max} 要小于 $H/3$[14]。另外,ω_{max} 也受制于 FBG 的波长漂移量极限 $\Delta\lambda_{max}$,即 $\omega_{max} \leqslant \dfrac{x\Delta\lambda_{max}}{\lambda(1 - P_{e})}$。

1.2 温补原理

由于 FBG1 的波长 λ_1 会随温度的线性升高发生线性红移,因此增设中心波长为 λ_2、只受温度影响的温补 FBG2,当对传感器进行温度测试实验时,有

$$\Delta\lambda_1 = K_{T1}\Delta T \tag{8}$$

$$\Delta\lambda_2 = K_{T2}\Delta T \tag{9}$$

式中,K_{T1} 是 FBG1 的温度灵敏度,$\Delta\lambda_2$、K_{T2} 分别是 FBG2 的波长漂移量、温度灵敏度。通过温度测试实验可知 K_{T1}、K_{T2},对传感器进行压力测试实验,得

$$\Delta\lambda_1 = K_{P1}P + K_{T1}\Delta T \tag{10}$$

通过式(9)可求得 ΔT,将 ΔT 代入式(10)得到因均布压力 P 导致 FBG1 的波长漂移量

$$\Delta\lambda_P = K_{P1}P = \Delta\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_2 \times K_{T1}}{K_{T2}} \tag{11}$$

设计的膜片式带温补结构的 FBG 压力传感器具体参数见表1。

表 1 膜片式带温补结构的 FBG 压力传感器的具体参数
Table 1 The specific parameters of diaphragm-type FBG pressure sensor with temperature compensating structure

Parameter	P_e	x/mm	λ_1/nm	λ_2/nm	$E/(\times 10^{11}Pa)$	μ	R/mm	H/mm	P/MPa
Value	0.216	12	1 550	1 563.6	1.28	0.35	6.7	0.6	0.6

1.3 设计仿真

通过式(2)计算得到的 ω_P 为 7.195 μm,则膜片式 FBG 压力传感器的理论压力灵敏度为 -1.218 nm/MPa,借助有限元分析软件仿真得到铍青铜膜片受压后的结果见图2,其中心的最大位移量 ω_P 为 7.407 6 μm,与理论值相差不大,但实际上,ω_P 还会受预应力 F 和光纤封装结构的影响。
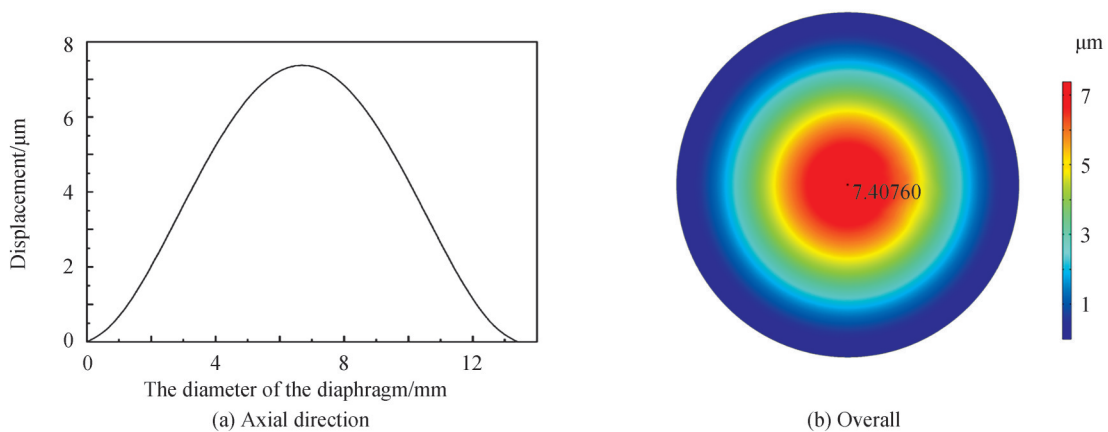

图 2 膜片表面受压位移图
Fig.2 Displacement diagram of diaphragm surface under compression

用金属管1(外径为0.8 mm,长度为4.5 mm)封装 SiO₂ 光纤(半径为0.062 5 mm,长度为16.5 mm)并固定在膜片上,膜片受压的同时对光纤施加预应力(当施加不同的 F 使 FBG1 的 $\Delta\lambda_1$ 从 0 nm 等间隔地增大到 3.5 nm 时,仿真发现在 FBG1 的有效长度 x 范围内,FBG1 的应变逐渐增大),通过多物理场耦合后,得到 ω_P 为 8.08 μm($\Delta\lambda_1 = 2.5$ nm),具体结果见图3,将此时的 ω_P 代入式(7),得膜片式 FBG 压力传感器的仿真压力灵

敏度为－1.364 nm/MPa。

(a) Results of applying different prestress to the optical fiber

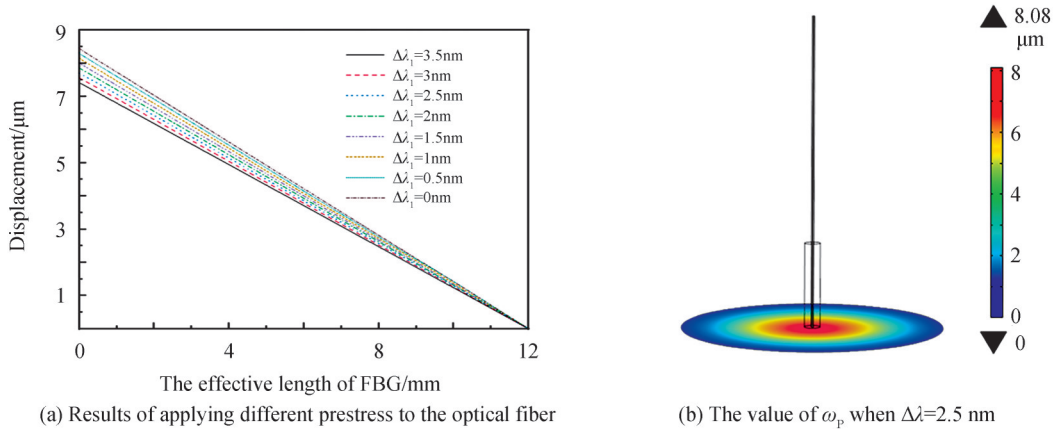(b) The value of ω_p when $\Delta\lambda$=2.5 nm

图3 不同的$\Delta\lambda$对光纤应变的影响

Fig.3 The influence of different $\Delta\lambda$ on fiber strain

2 膜片式光纤光栅压力传感器的制作与测试实验

2.1 制作工艺

图4为带温补结构的膜片式光纤光栅压力传感器简图,制作时首先用超声波清洗仪去除传感器零件表面残存的油污,烘干后利用波长为1.06 μm的激光焊接机将金属管1点焊在膜片中心。挑选边模抑制比高、主峰带宽窄、峰顶陡峭的FBG串(通过飞秒激光直写法制作),将写有FBG1的光纤一端固定在金属管1内,光纤的另一端封装于金属管2并穿出,金属管2底端距金属管1顶端的距离即x。膜片固定在压力外壳凹台内,借助激光密封膜片与压力外壳。对FBG1(L=1 mm)施加较大的预应力,同时用环氧胶密封金属管2与压力外壳,与FBG1间隔20 mm的FBG2(L=1 mm)置于温度外壳。压力外壳与温度外壳交界处用激光密封,对FBG2施加较小的预应力,然后用环氧胶密封尾纤与温度外壳。
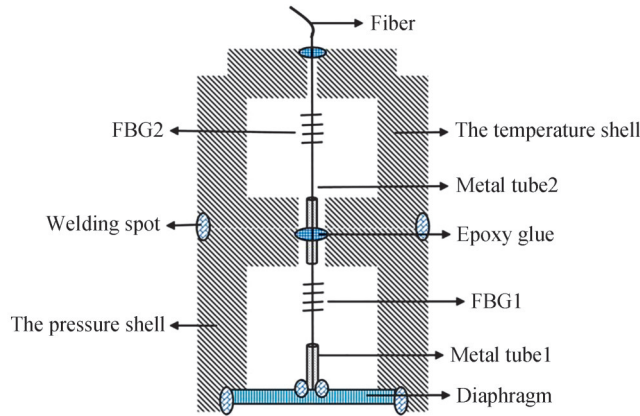

图4 带温补结构的膜片式光纤光栅压力传感器简图

Fig.4 Schematic diagram of diaphragm-type fiber grating pressure sensor with temperature compensating structure

2.2 测试实验

2.2.1 超短光纤光栅拉断实验

由于$\Delta\lambda$受限于FBG的可拉伸极限,于是对超短FBG进行了拉断实验,实验结果见图5。从FBG被拉断时的数据记录表2可知,光纤可承受的最大预应力F_{max}为2.646 N,FBG的波长最大漂移量$\Delta\lambda_{max}$约3.4 nm,为防止FBG断裂,F控制在F_{max}的90%以下最佳。
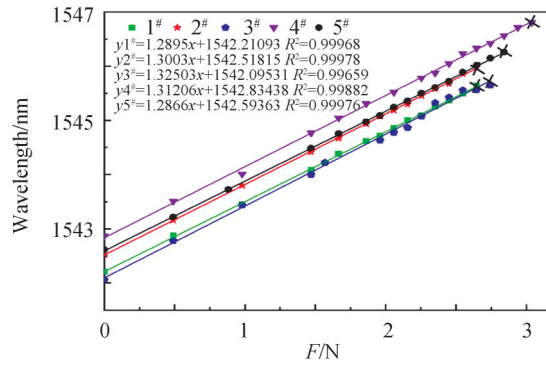
图 5　FBG 拉断实验结果

Fig.5　FBG pull-off test results

表 2　FBG 被拉断时的实验数据

Table 2　Data when the FBG was pulled off

Number	1#	2#	3#	4#	5#
λ_0/nm	1 542.205	1 542.523	1 542.06	1 542.866	1 542.615
F_{max}/N	2.646	2.646	2.744	3.038	2.842
$\Delta\lambda_{max}$/nm	3.432	3.453	3.59	3.936	3.643

2.2.2　传感器温度测试实验

将一等标准铂电阻温度计的温度探头同膜片式带温补结构的 FBG 压力传感器捆绑在一起沉入恒温水槽,恒温水槽的初始温度设为 35℃,然后以每 5℃ 递减至 0℃,温度稳定后再以每 5℃ 递增至 35℃,期间通过 MOI-SI155 光纤光栅解调仪记录 FBG1、FBG2 的波长及温度计所测的温度。利用一次线性拟合可计算出 FBG1、FBG2 的波长与升温、降温的关系,结果见图 6,求均值得 K_{T1}、K_{T2} 分别为 0.038 47、0.013 06。然后将 FBG1、FBG2 升降温曲线的平均关系式写入光纤光栅解调仪以实时监测传感器从室温快速放入恒温水槽(35℃)后的温度,整理数据绘制 FBG1、FBG2 的温度响应曲线如图 7。
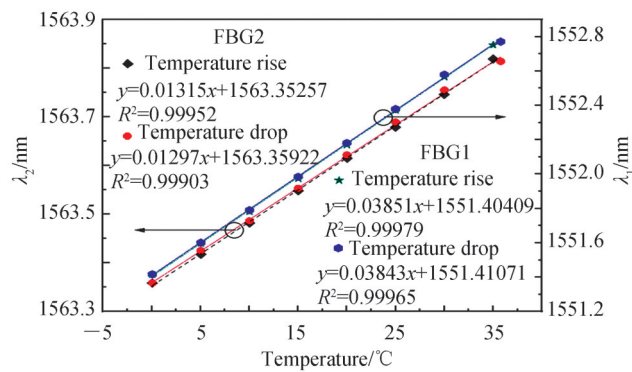

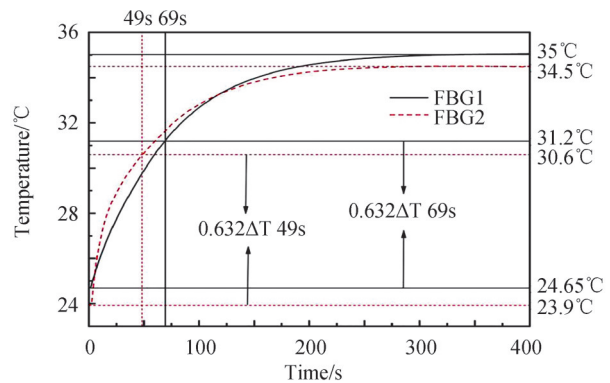图 6　温度测试曲线

Fig.6　Temperature test curve

图 7　温度响应曲线

Fig.7　Temperature response curve

2.2.3　传感器压力测试实验

膜片式带温补结构的 FBG 压力传感器通过特制的转接头密封在活塞式压力计(0.04～0.6 MPa)中,打开压力计的表座截止阀,旋转十字手轮,使活塞位移指示器稳定在 0 mm,借助 MOI-SI155 光纤光栅解调仪记录压力为 0.04 MPa 时 FBG1、FBG2 的波长值。后续测试从 0.1 MPa 开始,间隔 0.1 MPa,逐渐递增至 0.6 MPa,然后进行降压实验。整理实验数据得图 8,据式(11)得 FBG1 升降压曲线的平均压力灵敏度约为 −1.728 nm/MPa,线性度为 99.9%。
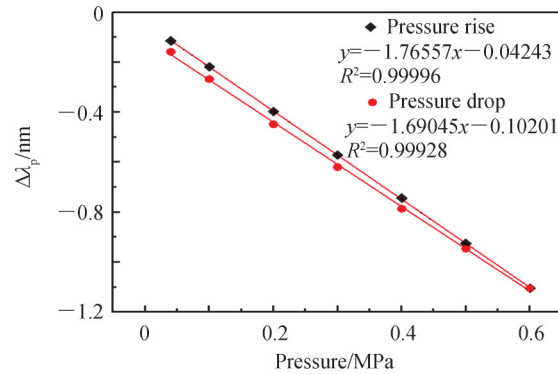
图 8　压力测试曲线

Fig.8　Stress test curve

2.3　结果分析

2.3.1　尾纤密封方式探讨

实验发现若用激光焊接密封上管与外壳,最终得到的 $\Delta\lambda_1$ 在 $-0.2\sim0.6$ nm 之间,经分析 $\Delta\lambda_1$ 较小的原因为:1)在激光焊接过程中,传感器转动使作用到光纤上的预应力方向改变并减小,微调传感器的位置同时监测波长可以增大预应力;2)激光产生的高温透过管壁向内传递达到了光纤涂覆层的熔化温度 150℃,甚至超过了环氧胶的分解温度 412℃,封装在管内的光纤松动,预应力去除后 FBG 的波长逐渐回缩,对此增加壁厚至 0.325 mm,但仍不能紧固光纤;3)上管与外壳间的焊接应力使上管倾斜并向膜片方向移动,导致预应力方向改变后减小和 FBG 的压缩。

换用环氧胶密封尾纤实际得到的 $\Delta\lambda_1$ 在 $1.5\sim2$ nm 之间,但波长回缩量约为 1.5 nm,导致波长回缩的原因及改进措施包括:1)环氧胶难以紧固施加预应力后的光纤,可通过增加环氧胶的粘贴面积来提高黏力;2)传感器内部压强随温度升高逐渐增大,部分空气在环氧胶固化前逸出,待传感器彻底密封后,传感器的内外差(约 17 kPa)会使 FBG 被压缩,降低环氧胶的固化温度可降低压差。

2.3.2　温度响应曲线的趋势分析

从图 7 可看出,FBG1 测量的温度明显高于 FBG2 且更接近通过温度计测量的温度,这是因为铍青铜膜片比 316L 不锈钢外壳薄且热导率更高,从而使 FBG1 所处压力腔的温度稳定后更接近环境温度。但 FBG2 的时间常数(49 s)明显高于 FBG1(69 s),通过仿真分析,经图 9 可以看出(Time＝50 s)是由于压力外壳(下端)与温度外壳(上端)连接的位置较厚导致压力腔的顶端形成瞬态低温区,而 FBG1 恰好处于该位置,但若将压力腔与温度腔导通可提高 FBG1、FBG2 温度响应曲线的重合度。

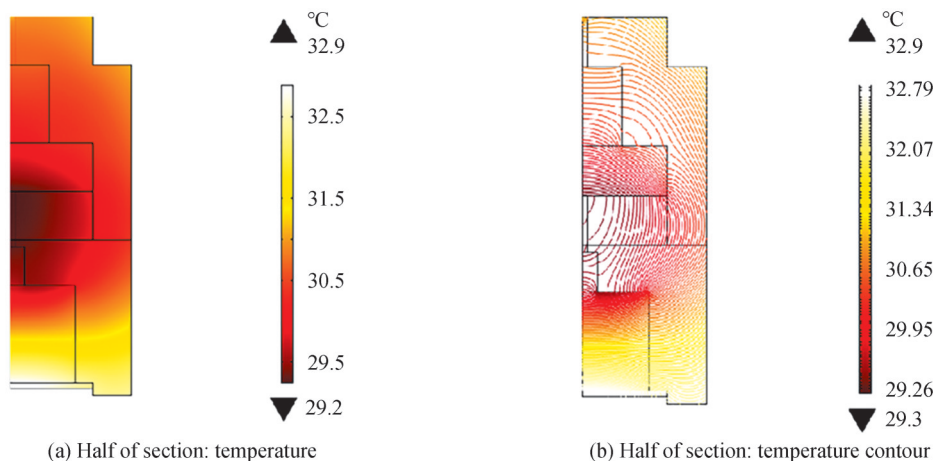(a) Half of section: temperature　　　　　　(b) Half of section: temperature contour

图 9　压力传感器的二维截面温度变化(time＝50 s)

Fig.9　The two-dimensional cross-section temperature change of the pressure sensor (time＝50 s)

2.3.3 升降压曲线的线性度及重合度研究

图 10（a）、(b)分别是结构参数相同的传感器 1、传感器 2(传感器 2 即膜片式带温补结构的 FBG 压力传感器)置于 120℃的鼓风恒温干燥箱内保温 5 h、6 h 后的两次升、降压测试曲线(不考虑温补)，可见通过一次压力老化实验后，延长加热时间有利于提高升、降压曲线的线性度和重合度。但是传感器 2 经温度补偿后，如图 8 所示，升、降压曲线的重合度变差，这是由于 FBG2 对 FBG1 提供的温度补偿不精确导致，实验开始是在上午 9:00 左右，当进行到降压实验时，室内温度逐渐升高，压力外壳内的膜片接触测压油，所以压力外壳内的温度较为稳定，但是温度外壳内的温度随周围气温的升高而逐渐升高，因此通过 FBG2 的波长换算得到的温度略高于 FBG1 的温度，最终计算得到均布压力导致 FBG1 的波长漂移量偏小。
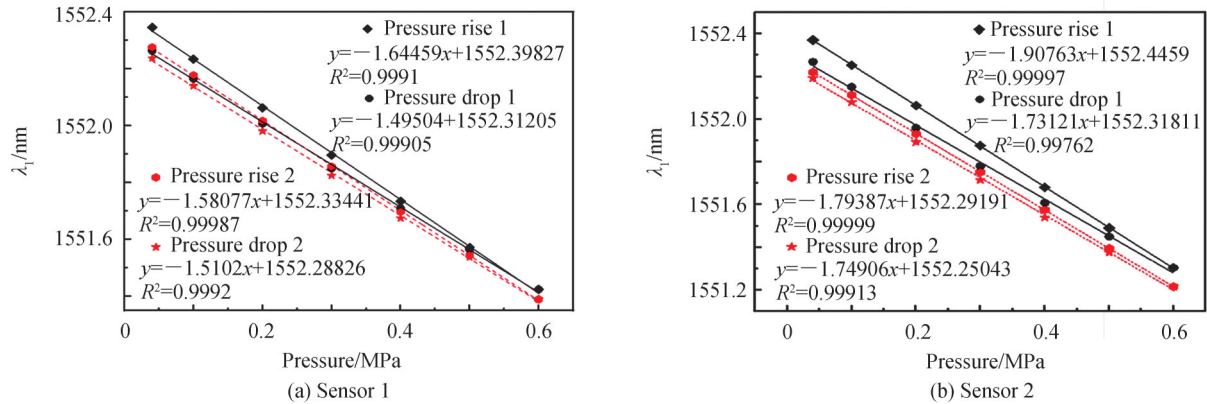

图 10 压力测试曲线(无温补)

Fig.10 Pressure test curve without temperature compensation

2.3.4 传感器稳定性研究

尾纤抖动改变了光纤的曲率半径进而造成弯曲损耗，使部分光溢出光纤包层，FBG 光谱的强度分布发生变化，若主峰峰顶平滑，光纤光栅解调仪通过波长寻峰法监测到的波长会不断地向左或向右平移。弯曲损耗也会导致波峰带宽的变化，光纤光栅解调仪监测到的主峰峰值可能消失，转而探测被展宽的次峰峰值。选用边模抑制比在 35 dB 以上，主峰带宽约 3 dB 且峰顶尖锐，次峰带宽较窄且分布均匀的切趾光纤光栅制作的传感器稳定性较好。此外实验中发现 FBG1 因波长抖动引起的波长变化量远小于 FBG2，因此可通过增设过渡区，阻止外界力向内传递从而减小光纤抖动对 FBG 光谱的影响。

2.3.5 传感器灵敏度提高的原因分析

膜片式带温补结构的压力传感器实测平均压力灵敏度约为 -1.728 nm/MPa，明显高于理论及仿真计算得到的压力灵敏度。经分析原因为：1)为了提高焊接质量，对膜片表面进行了打磨处理，但厚度减小在 0.02 mm 以内；2)超短 FBG 的写制工艺不稳定，所使用的超短 FBG 本身应变灵敏度较高，当对 FBG1 施加 2.45 N 的预应力后，$\Delta\lambda=3.5$ nm，则其应变灵敏度约为 1.23 nm/mε，而普通 FBG 的应变灵敏度约为 1.2 nm/mε[16]；3)涂抹环氧胶时用量较多或固化时流动导致金属管 1 上端及金属管 2 底端附近的光纤硬化，FBG 的有效长度 x 减小；4)通过仿真发现 F 造成的 $\Delta\lambda_1$ 越大，光纤光栅的压力灵敏度越高，实际实验如图 10 所示，传感器 1 中的测压 FBG 本身应变灵敏度比传感器 2 中的测压 FBG 本身应变灵敏度略高，但预应力造成的 $\Delta\lambda$ 仅为 1.5 nm，第二次升降压测试后得到的平均压力灵敏度只有 1.545 nm/MPa。此外，如图 6 所示，FBG1($\Delta\lambda_1=2.5$ nm)的平均温度灵敏度(38.47 pm/℃)明显高于 FBG2($\Delta\lambda_2=0.1$ nm)的平均温度灵敏度(13.06 pm/℃)，结合统计结果分析，由 F 增加使 $\Delta\lambda$ 增大，从而使 FBG 温度灵敏度提高的可能性较大。

3 结论

本文制作的膜片式带温补结构 FBG 压力传感器量程为 0.6 MPa，理论压力灵敏度为 -1.218 nm/MPa，通过仿真计算得到的压力灵敏度为 -1.364 nm/MPa，消除温度影响后，实测平均压力灵敏度达 -1.728 nm/MPa，升降压曲线的线性度分别为 99.996％和 99.928％，可满足在渤海和黄海等海域的深度探测需求。目

前限制FBG压力传感器量程和压力灵敏度的主要因素是FBG的可拉伸极限,这需要从光纤的材质和结构等方面进行研究,同时改进尾纤密封工艺,使施加预应力后产生的Δλ能够基本保持不变。后续可通过改善传感器结构提高FBG1、FBG2温度响应的一致性,改进传感器的温度老化参数或换用弹性迟滞效应小的膜片材料如铁基高弹性合金,提高传感器升、降压曲线的线性度和重合度,优化FBG的光谱质量或利用过渡结构提高传感器的稳定性。

参考文献

［1］ XU M G, REEKIE L, CHOW Y T, et al. Optical in-fibre grating high pressure sensor[J]. Electronics Letters, 1993, 29 (4):398-399.

［2］ PACHAV V R, KAMINENI S, MADHUVARASU S S, et al. FBG based high sensitive pressure sensor and its low-cost interrogation system with enhanced resolution[J]. Photonic Sensors, 2015, 5(4):321-329.

［3］ LIANG Minfu, FANG Xinqiu, WU Gang, et al. A fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation based on diaphragm-cantilever structure[J]. Optik, 2017, 145:503-512.

［4］ YAN Zhidan, GUO Chen, XU Chaoyu, et al. Design and experimental study of a sensitization structure with fiber grating sensor for nonintrusive pipeline pressure detection[J]. ISA Transactions, 2020, 101:442-452.

［5］ ZHAO Qiang, ZHENG Hongkun, LV Riqing, et al. Novel integrated optical fiber sensor for temperature, pressure and flow measurement[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2018, 280:68-75.

［6］ AMEEN O F, YOUNUS M H, AZIZ M S, et al. Graphene diaphragm integrated FBG sensors for simultaneous measurement of water level and temperature[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2016, 252:225-232.

［7］ LEA-JUNIOR A, FRIZERA A, MARQUES C. A fiber Bragg gratings pair embedded in a polyurethane diaphragm: towards a temperature-insensitive pressure sensor[J]. Optics and Laser Technology, 2020, 131:106440.

［8］ FAN Qinggeng, JIA Zhenan, FENG Dequan, et al. Highly sensitive FBG pressure sensor based on square diaphragm[J]. Optik, 2020, 225:165559.

［9］ AIME L F J, KISSINGER T, JAMES S W, et al. High sensitivity pressure measurement using optical fibre sensors mounted on a composite diaphragm[J]. Optics Express, 2021, 29(3):4105-4123.

［10］ LI Yulong, ZHANG Hua, FENG Yan, et al. Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization[J]. Optical Fiber Technology, 2009, 15(4):391-397.

［11］ HUANG Jun, ZHOU Zude, WEN Xiaoyan, et al. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation[J]. Measurement Journal of the International Measurement Confederation, 2013, 46(3):1041-1046.

［12］ LIANG Minfu, FANG Xinqiu, NING Yaosheng. Temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor based on plane diaphragm[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(2):157-167.

［13］ WANG Li, WANG Yongjie, WANG Jianfeng, et al. A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth[J]. Photonic Sensors, 2020, 10(1):57-66.

［14］ 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 国防工业出版社,2002:158-166.

［15］ HUANG Jun, ZHOU Zude, TAN Yuegang, et al. Design and experimental study of a fiber Bragg grating pressure sensor [C]. Montreal, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014:217-221.

［16］ 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京:科学出版社, 2009:111-117.

Diaphragm-type Fiber Bragg Grating Pressure Sensor with a Temperature Compensation Structure

YU Luyao[1,2], ZHAO Qiang[2], DU Dawei[2], QU Yi[1]

(1 *Hainan Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials*, *School of Physics and Electronic Engineering*, *Hainan Normal University*, *Haikou* 571158, *China*)

(2 *Institute of Oceanographic Instrumentation*, *Qilu University of Technology* (*Shandong Academy of Sciences*), *Qingdao*, *Shandong* 266061, *China*)

Abstract: For the field of ocean depth detection, a small volume diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure is made. The length and diameter of the fiber Bragg grating pressure sensor are approximately 40 mm and 20 mm, respectively. The diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure uses an ultrashort fiber

Bragg grating string. There are two fiber Bragg gratings on the ultrashort fiber Bragg grating string. The length of the two fiber Bragg gratings is 1 mm, and the interval between them is 20 mm. One fiber Bragg grating is used to measure pressure, and the other fiber Bragg grating is only affected by temperature, which can eliminate the influence of temperature on the pressure measuring fiber Bragg grating. The optical fiber is encapsulated in a metal tube a short distance away from the measuring pressure fiber Bragg grating. The end of the metal tube is fixed on the elastic metal diaphragm by a laser welding process. In this way, the optical fiber and metal diaphragm are not fixed by epoxy adhesive directly, which can avoid the influence of aging and creep of epoxy adhesive on the performance of the diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure. In the measuring range of 0.6 MPa, the theoretical pressure sensitivity of the diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure is － 1.214 nm/MPa, and the pressure sensitivity of the diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure obtained by the finite element analysis method is － 1.364 nm/MPa. After the diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure is fabricated, the pressure and temperature characteristics of the sensor are tested. With the help of a fiber Bragg grating only affected by temperature, the influence of temperature on the pressure measuring fiber Bragg grating is eliminated through calculation. The actual average pressure sensitivity of the diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure is － 1.728 nm/MPa. Moreover, the linearity of the boost and buck curves of the diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure is more than 99.9％, and the boost and buck curves of the diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure also coincide well. In addition, the best way of the tail fiber seal, the reason of the different temperature response characteristics of the double fiber grating, the method of improving the linearity and coincidence degree of the pressure curve, the reason and solution of affecting the stability of the sensor, and the reason of improving the sensitivity of the measured pressure are discussed. First, when the thickness of the metal tube that encapsulates the optical fiber is relatively thin, comparative experiments show that the method of sealing the fiber tail with epoxy glue is better than laser welding. By sealing the fiber tail with epoxy glue, the wavelength shift of the fiber Bragg grating can reach 2 nm. It can be seen that sealing the tail of the optical fiber with epoxy glue more easily maintains the prestress applied to the optical fiber. Second, a temperature response test experiment of a diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure is carried out. The experimental results show that the temperature response of the fiber Bragg grating and pressure response of the fiber Bragg grating are slightly different. Combined with the simulation analysis, it is found that the main reason for the difference in the temperature response trend of dual fiber Bragg gratings is the defect of the structural design. Third, to improve the linearity and coincidence of the boost and buck curves of the sensor, temperature and pressure aging processes are added to the sensor manufacturing process. The experimental results show that these methods are effective. Next, considering the influence of an optical fiber tail wobble on the stability of a diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure, it is suggested to use apodisated linearly chirped fiber gratings or set up a region to isolate external forces to solve the problem. Finally, the problem that the actual pressure sensitivity of a diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with a temperature compensation structure is higher than the theoretical value is discussed from several angles. The main reasons are that the effective length of the fiber Bragg grating decreases due to the flow of epoxy glue and the pressure sensitivity of the fiber Bragg grating increases due to the increase in prestress.

Key words：Fiber Bragg grating；Pressure sensor；Finite element analysis method；Elastic diaphragm；Ocean

OCIS Codes：060.2370；060.3735；130.60l0