

EVA增敏的光纤光栅径向压力传感特性研究

刘 丰^{1,2} 马文龙¹ 郭 璇^{1,2}

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

²河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 提出了一种采用乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)封装增敏的光纤光栅径向压力传感方案,将光纤光栅用EVA材料和方钢封装成哑铃型传感单元,利用有限元软件对结构体受力分布进行了仿真,理论分析了传感单元在径向压力作用下的响应特性,并建立实验系统对光纤光栅径向压力传感特性进行验证。研究表明:当径向压力在0~0.3 N范围内时,封装后的光纤光栅对径向压力响应具有很好的线性度;对径向压力的灵敏度相对于裸光栅提高了100.74倍,经匹配法解调后,系统的灵敏度最高可以达到0.94 nm/N;对于解决微小径向应变精确测量的实际工程需求具有重要的参考意义。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 径向压力; 匹配法解调; 聚合物封装

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1006001

Study on Radial Pressure Sensing Characteristics of EVA Sensitivity Enhanced Fiber Grating

Liu Feng^{1,2} Ma Wenlong¹ Guo Xuan^{1,2}

¹College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A novel fiber grating radial pressure sensitivity enhanced scheme, which is encapsulated with ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA), is presented. The fiber grating is encapsulated into a half dumbbell-shaped sensing unit with EVA material and square steel. And the structure stress distribution and radial pressure response characteristics of the sensor are calculated theoretically with finite element software. Finally, an experiment system is established for verifying the sensing characteristics of the sensitivity enhanced optic fiber grating radial pressure sensors. The experiment results show that when the radial pressure is ranged from 0 to 0.3 N, the encapsulated sensors have excellent linearity to radial pressure. And the sensitivity is 100.74 times higher than that of naked optical fiber grating. Further more, after demodulation with the matching method, the sensitivity of the system can be up to 0.94 nm/N. The research results have an important reference significance for solving the practical engineering requirements for accurate measurement of micro radial strain.

Key words fiber optics; fiber grating; radial pressure; matching demodulation; polymer encapsulation

OCIS code 060.2370; 060.3735; 120.1880; 300.6190

1 引 言

光纤光栅作为光纤传感领域应用最为广泛的技术之一,具有传感结构简单、测量精度高、响应速度快、耐油污、不受周围环境电磁干扰等优点,非常适合于在强电磁干扰环境下进行应力、温度等物理量的传感测量。近年来,光纤光栅在大型建筑和桥梁健康监测、火灾预警与边界安防、航空器健康监测、机械振动等工程技术领域都得到了广泛的应用^[1-2]。

虽然光纤光栅传感器的应用越来越广泛,但大多数仅限于直接利用布拉格光栅(FBG)的轴向应变特性进

收稿日期: 2015-04-22; 收到修改稿日期: 2015-05-21

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器基础研究专款项目(51027003)、河北省自然科学基金(F2013203252, F2015203270)

作者简介: 刘 丰(1976—),男,教授,主要从事光纤传感及光电检测技术方面的研究。E-mail:kennan@ysu.edu.cn

行传感的建筑物健康状况评估、航空器材内部压力检测等领域。由于测量空间狭小,用FBG进行径向压力检测的优势更加明显,并且FBG径向压力传感器也可以制成级联形式,用来实现光纤光栅多路复用和多点分布测量系统^[3-4]。

但由于裸光栅的径向压力灵敏度极低^[5],远不能满足工程检测的要求。为了提高光纤光栅对径向应力的响应灵敏度,目前采用的增敏结构主要有金属膜片^[6-7]、拉杆^[8]、变边三角支架^[9]、弹簧梁等^[10]。文献[6]中提出将光栅直接粘贴于金属膜片中心,由膜片形变带动光栅形变,但由于膜片应变分布不均匀,当应力过大时,光栅反射谱易出现啁啾现象。文献[9]提出了通过变边三角金属结构将膜片中心的压力放大后直接作用于裸光栅的两端,灵敏度达到27.5 nm/MPa。但测量单元结构复杂,裸光栅无过载保护,容易损坏。在上述光纤光栅径向应力增敏方案中,多数都需要额外的机械机构,系统结构复杂,整体系统的精确度和稳定性仍然存在较多问题。用聚合物材料来提高光纤光栅温度响应灵敏度和轴向应变响应灵敏度的方案近年来也有报道^[10-12]。但是如何提高光纤光栅对径向应力响应灵敏度的研究工作却鲜有提及。

本文提出了一种乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)封装增敏的光纤光栅径向压力传感方案,将光纤光栅用EVA材料和金属衬底封装成半哑铃型结构,利用有限元软件对结构体的受力分布进行了分析,并在深入的理论分析基础上开展了实验研究。研究结果表明采用半哑铃型EVA封装的光纤光栅能够大幅提高径向压力的响应灵敏度,且具有良好的线性度,对于解决微小径向应变精确测量的实际工程需求具有重要的参考意义。

2 光栅增敏封装及受力分析

2.1 光纤光栅的增敏封装

由光纤光栅的耦合模理论可知,FBG的中心反射波长为

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

式中 $n_{\text{eff}} = 1.45$ 为导模的有效折射率, Λ 为光栅的周期。当裸光栅受到一个径向压力 F 时,光纤光栅内部的压力分解形式可以为

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{2F}{\pi Ld} \\ \sigma_{\theta\theta} = -\frac{6F}{\pi Ld} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 σ_{rr} 为光栅受力伸长形变引起的正压力, $\sigma_{\theta\theta}$ 为光栅受力压缩形变引起的负压力, L 为光栅栅区长度, d 为光栅的直径。根据广义Hooke定理,可求得光栅在2个方向上的应变量为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \nu/E)[\sigma_{rr}(1 - \nu) - \nu\sigma_{\theta\theta}] \\ (1 + \nu/E)[\sigma_{\theta\theta}(1 - \nu) - \nu\sigma_{rr}] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 ν 为石英光纤的泊松比, E 为弹性模量。则在径向压力 F 作用下,光纤光栅的中心反射波长偏移量可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2}(P_{12} - P_{11})(\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{rr}), \quad (4)$$

式中 P_{11} 、 P_{12} 为光纤的弹光系数^[13],分别为 $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$ 。根据(1)~(4)式,可以计算得到当FBG受到单位压力作用时,其中心反射波长漂移量仅为0.00839 nm。这说明裸光栅对径向压力的灵敏度是非常低的,在一些需要径向压力测量的场合中,裸光纤光栅难以满足实际工程需求。为了解决这一问题,提出了一种用EVA聚合物材料对裸光栅进行封装以提高径向压力灵敏度的方案。在该方案中,对光纤光栅进行如图1所示的封装,先将刻写完成的光纤光栅固定在钢材料的衬底层上,然后用EVA溶胶将光纤光栅封装成半个哑铃形,完成光纤光栅的增敏封装。

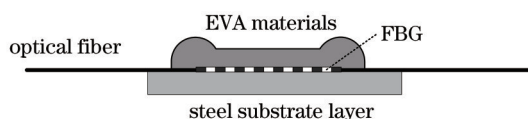


图1 光纤光栅径向压力增敏封装示意图

Fig.1 Schematic diagram of radial strain sensitivity enhanced encapsulation

2.2 光纤光栅封装后的受力分析

当光栅被聚合物封装后,由于基底材料和封装结构的作用,在径向应力作用下,结构体带动光纤光栅发生轴向形变,从而有效利用光纤光栅轴向拉伸(或压缩)具有很高灵敏度的优点。封装结构受力分析如图2所示。封装结构两端是2个半球体(曲率半径为2.5 mm),结构整体长度为15 mm,光栅被封装在2个虚拟直径之间。当 F_1 、 F_2 作用在半球体顶点时,半球体会被挤压发生形变,将 F_1 、 F_2 进行分解分别得到 F_{R1} 、 F_{T1} 和 F_{R2} 、 F_{T2} ,由于 F_{R1} 、 F_{R2} 的作用区域内没有光栅的封装,所以 F_{R1} 、 F_{R2} 对光栅没有作用。 F_{T1} 、 F_{T2} 会对聚合物中间部分进行挤压,将 F_{T1} 、 F_{T2} 进行分解分别得到 F_{H1} 、 F_{V1} 和 F_{H2} 、 F_{V2} ,垂直分力作用在半圆直径位置,对光栅部分不起作用。所以光栅会受到2个水平方向的分力 F_{H1} 和 F_{H2} 的挤压。

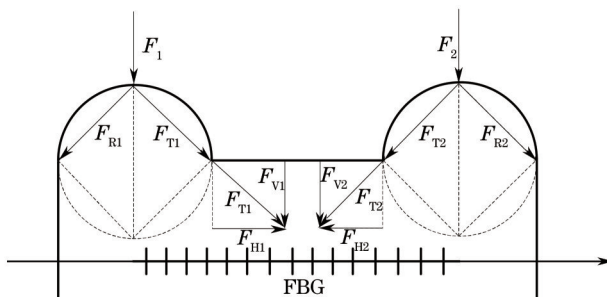


图2 封装结构受力分析图

Fig.2 Force diagram of package structure

为了更深入地分析外部压力作用下光纤光栅的受力分布情况,利用有限元软件建模并进行了仿真研究。建立了整个封装结构整体的有限元模型如图3所示,仿真分析时假设在2个半圆球作用点上分别施加0.5 N垂直向下的压力,根据仿真结果云图(云图标尺单位为MPa)可以粗略地看到沿着光纤轴向方向的受力分量是比较均匀的。

为了进一步明确封装结构内光纤光栅在径向压力作用下的力学分布特性,截取图3中的半圆柱型光纤光栅封装部分(不包含2个半圆球区域)进行数据的细化分析,得到的受力分布如图4所示(图4的受力分布云图数据与图3中是一致的,但是因为缩小了区域,云图标尺在仿真软件中自动进行了调整,标尺单位仍为MPa)。从图4的仿真结果可以看出:在径向压力作用下,实际上沿着光纤光栅轴向的应力分布从两端到中间呈现梯度状。图5给出了光纤光栅在轴向上不同位置处的受力分布曲线图。

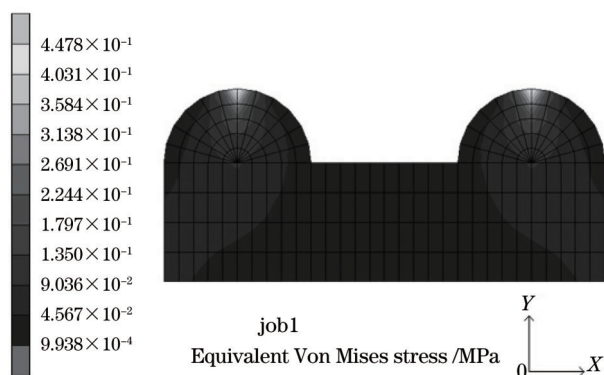


图3 封装结构受力分析仿真图

Fig.3 Force simulation diagram of package structure

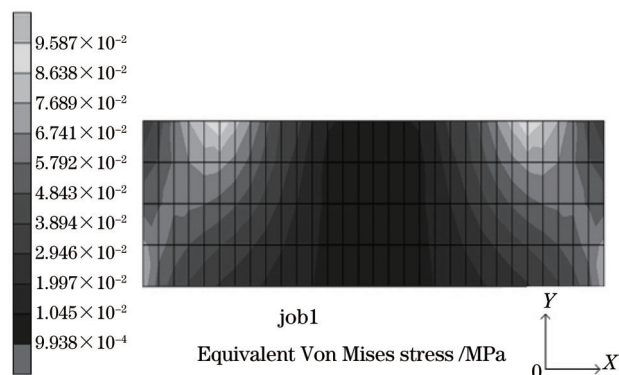


图4 光栅受力分布图

Fig.4 Stress distribution diagram of optical fiber grating

从图4和图5的受力分析结果可以看出,当给半哑铃型结构体受力点施加0.5 N压力后,结构体中光纤光栅所受的最大值应力为0.284 MPa,根据Hooke定律有

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (5)$$

式中 E 为光纤光栅的弹性模量, ε 为光栅的弹性应变。根据(5)式可得光栅在轴向应力的作用下,最大应变 ε 约为40.5 $\mu\varepsilon$ 。而根据参考文献[14],当光纤光栅的应变小于100 $\mu\varepsilon$ 时,不会发生明显的啁啾现象。并且参考文献[15]中提出,光栅在不均匀的轴向应力作用下,还可在一定程度上提高系统的测量灵敏度。

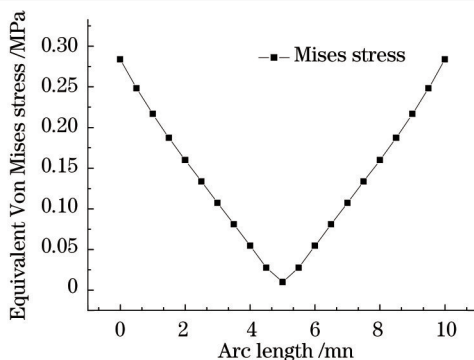


图5 光栅轴向受力分布曲线图

Fig.5 Axial strain distribution diagram of optical fiber grating

为了进一步从理论上论证封装结构对光栅轴向应力的影响,在不改变光纤及承载方钢结构的条件下分别建立了受力半圆球曲率半径为2 mm和3 mm时的有限元仿真模型,仿真云图结果分别如图6(a)和图6(b)所示。需要说明的是:在建立有限元分析模型的过程中,设定从2个受力半圆球到封装结构中心的方向为受力正方向,而图6中的负值表示受力方向变成了从中心到两端。

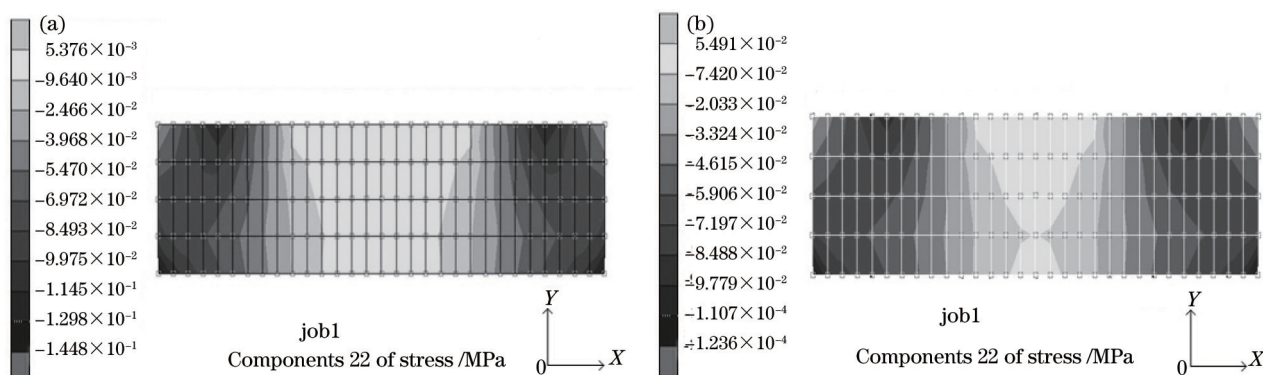


图6 受力半圆球不同曲率半径条件下的光纤光栅受力分布图。(a)半球半径为2 mm; (b)半球半径为3 mm

Fig.6 Strain distribution diagrams of optical fiber gratings with different stressed hemisphere radii.

(a) Radius of hemisphere is 2 mm; (b) radius of hemisphere is 3 mm

根据上述分析结果可以看出:当半球体曲率半径为2 mm时,光纤栅区的两端出现了拉伸应力,只有中间一部分受到的是挤压应力,且挤压应力较半球曲率半径为2.5 mm时明显减小;当半球体曲率半径为3 mm时,可以明显看出光栅位置出现了2个方向上力的交叉;所以,封装结构中2个半圆球型受力结构的曲率半径过小或者过大都将对压力传感性能带来显著影响;根据上述分析结果,选择半圆球型受力结构的曲率半径为2.5 mm是相对比较理想的。

若半圆球型受力结构半径为2.5 mm,且假设基底方钢材料与光纤光栅紧密结合,方钢在EVA受力过程中不会发生形变,则由外界压力所引起的光纤光栅中心反射波长的相对变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_c)\epsilon_{zz}, \quad (6)$$

式中 $P_c = \frac{n_{eff}}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$ 为有效弹光系数。由受力分析可知,由径向压力引起的光栅轴向应变量为

$$\epsilon_{zz} = \frac{1 - 2\mu}{E'} 2F', \quad (7)$$

式中 μ 和 E' 分别为聚合物材料的泊松比和弹性模量,对于所选用的基底材料, μ 为0.35, E' 为460 MPa。 F' 为经过近似拟合平均后光纤光栅单端所受轴向接触力。光纤光栅中心波长的漂移量为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_c) \frac{(1 - 2\mu)}{E'} 2F', \quad (8)$$

压力灵敏度系数为

$$k_p = (1 - P_e) \frac{1 - 2\mu}{E'} \quad (9)$$

经计算可得封装后的光栅受到单位压力时中心波长的偏移量为 0.940088 nm, 对应的应力灵敏度约为 0.94 nm/N。

3 实验方案

在实验过程中, 用相位掩膜法制作光纤布拉格光栅, 先将单模光纤在 10 MPa 的压力下进行 7 天时间的载氢, 载氢后开始刻写, 刻写完成后恒温退火 24 h。光纤光栅刻写成功后即用方形钢条和 EVA 聚合物对刻写完成的光纤光栅进行增敏封装, 封装后的径向压力传感单元如图 7 所示。



图 7 EVA 增敏封装的光纤光栅径向压力传感单元

Fig.7 Radial pressure sensing unit of EVA encapsulated FBG

在完成光纤光栅的增敏封装后, 建立了如图 8 所示的实验系统对光纤光栅径向压力响应特性进行了实验研究。在图 8 中, 采用匹配光栅法对径向压力传感 FBG 进行解调^[6-17]。宽带放大自发辐射光源 (ASE) 发出的光经光隔离器和光纤环行器 1 后进入到 EVA 增敏封装的压力传感 FBG 中, 压力传感 FBG 在受到径向压力作用时其中心反射波长会受到调制, 反射光再经过光纤环行器 2 进入到匹配光纤光栅 FBG*, 匹配光纤光栅 FBG* 的反射光用光功率计进行光强探测。在实验中, 匹配光栅 FBG* 与传感 FBG 在静态条件下需要具有相同的参数特性。

图 8 中径向压力传感区的压力施加方式采用如图 9 所示的方案进行。在图 9 中, 按照如图 1 所示的方法用 EVA 材料和方形钢条封装 2 个完全相同的哑铃型单元, 其中一个单元刻写了光纤光栅, 而另外一个单元未刻写光纤光栅, 仅作为对称的支撑结构。将 2 个封装好的单元置于光学平台上, 然后在 2 个单元上放置薄玻璃板, 最后在玻璃板中心位置放置不同重量的砝码作为压力负载。理论上, EVA 封装的径向压力传感单元上受到的压力是砝码重量的 1/2。

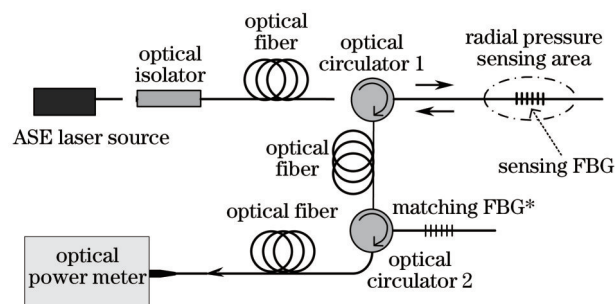


图 8 增敏封装 FBG 径向压力传感方案

Fig.8 Experiment scheme for radial pressure sensing characteristics of sensitivity enhanced FBG

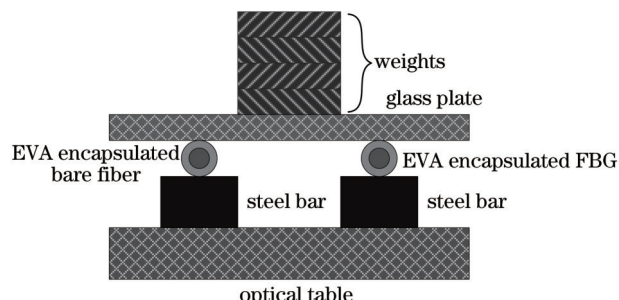


图 9 FBG 径向压力施加方案

Fig.9 Scheme of radial pressure applying on FBG

4 实验及结果分析

在实验中, 共制作 A、B 2 组传感光纤光栅和相应的匹配光栅并分别进行实验, A 组传感光栅中心波长为 1558.828 nm, 匹配光栅中心波长为 1558.764 nm; B 组传感光栅中心波长为 1559.800 nm, 匹配光栅中心波长为 1559.812 nm。为了验证 EVA 增敏封装后将径向压力转换成轴向形变的有效性, 用如图 10 所示的简单实验系统对受到径向压力作用时增敏封装光纤光栅的反射谱进行研究。

图 11 是中心波长为 1558.828 nm 的光纤光栅受到径向压力作用时从光谱仪上观察到的反射谱图。从图 11 中可以看出: 在封装好的压力传感单元受到压力作用时, 反射谱是整体向短波方向漂移, 并没有产生劈裂峰, 这说明光纤光栅没有出现明显的啁啾现象。

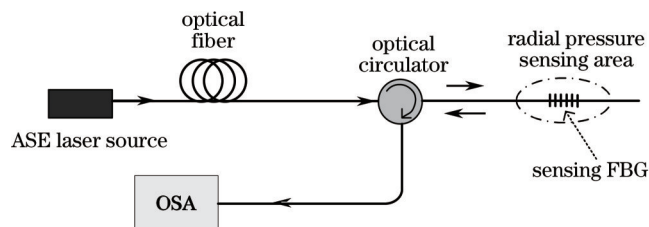


图 10 EVA 增敏光纤光栅的反射谱测试图方案

Fig.10 Scheme of reflection spectrum investigation of EVA sensitivity enhanced FBG

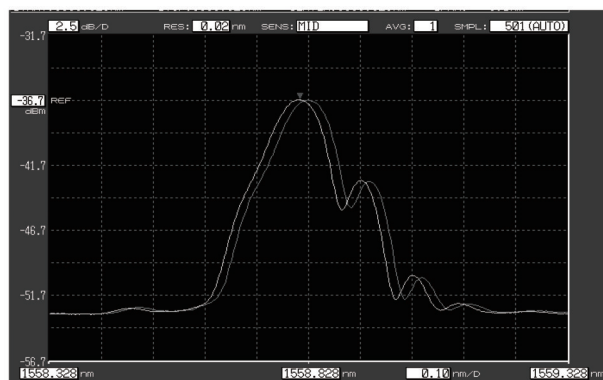


图 11 压力作用下 EVA 增敏光纤光栅的反射谱漂移图

Fig.11 Reflection spectrum drift of EVA sensitivity enhanced FBG when radial pressure is applied

在实验过程中,采取先在玻璃板上逐次增加砝码重量、然后再依次减小砝码重量的方式为 EVA 增敏后的光纤光栅施加径向压力,表 1 是在玻璃板上以 10 g 间隔放置和撤掉砝码时光纤光栅中心反射波长的变化情况。从表中可以明显看出:随着光纤光栅受到的径向压力的增加,中心反射波长向短波方向移动;而当光纤光栅受到的径向压力减小时,其中心反射波长又重新向长波长方向移动。

用表 1 中的实验数据绘制的 EVA 增敏径向压力传感光纤光栅中心反射波长与径向压力之间的关系曲线如图 12 所示。从图 12 中可以看出,增敏封装后的光纤光栅中心反射波长与径向压力之间具有良好的线性关系,且在压力从增加再到减小的过程中,中心反射波长也具有较好的回复性能。

表 1 增加和减少砝码重量时传感光栅的反射谱漂移量

Table 1 Reflection spectrum drift of the encapsulated FBG when adding or removing weights

Add weight F/N	λ/nm	Remove weight F/N	λ/nm
0	1558.7464	0.294	1558.4872
0.049	1558.6924	0.245	1558.5520
0.098	1558.6600	0.196	1558.5736
0.147	1558.6168	0.147	1558.6168
0.196	1558.5736	0.098	1558.6630
0.245	1558.5304	0.049	1558.6924
0.294	1558.4872	0	1558.7464

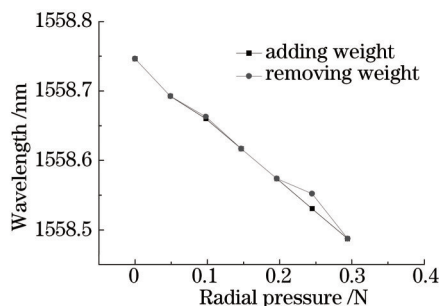


图 12 波长和径向压力的关系

Fig.12 Relationship of wavelength and radial pressure

按照图 8 的完整实验方案,分别用 2 组匹配光栅和封装好的传感光栅进行径向压力测试实验。同样地,实验过程中也分别在玻璃板上增加和减小砝码,并用光功率计监测经匹配光栅解调后的光强。实验结果如图 13 所示。

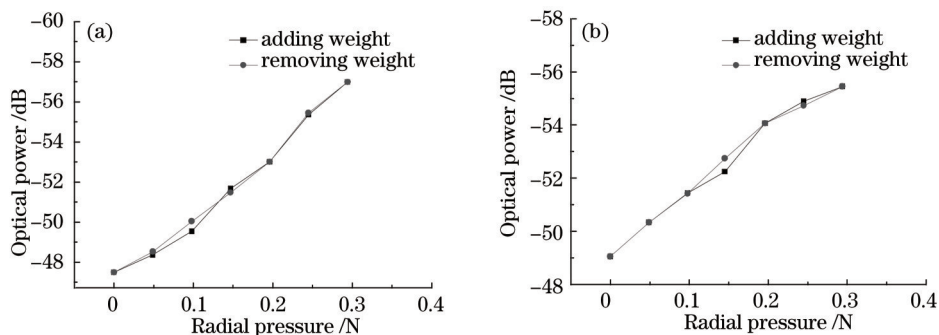


图 13 匹配光栅输出光功率和径向压力的关系。(a) A 组; (b) B 组

Fig.13 Relationship between radial pressure and output optical power of matching FBG. (a) Group A; (b) group B

从图 13 中可以看出:随着砝码重量的增加(进程),由匹配光栅反射到光功率计的光强减小;且随着玻璃板上砝码的移除(回程),从光功率计测得的光功率又会沿着进程曲线的方向返回。这表明经过 EVA 增敏封装后的光纤光栅对径向压力响应具有良好的线性度的同时也有很高的灵敏度。

根据光纤光栅的基本理论,当轴向受力过大或不均匀时,可能会产生啁啾现象,从而对传感特性带来影响。为了验证所设计 EVA 增敏光纤光栅径向压力传感器的测量范围和啁啾产生的条件,实验过程中设计制作了多组传感单元并开展了实验研究。

以一组中心波长为 1542.485 nm 的光纤光栅为例,通过持续增加砝码来验证啁啾现象的产生。实验过程中从光谱仪上得到的光纤光栅反射光谱如图 14 所示。

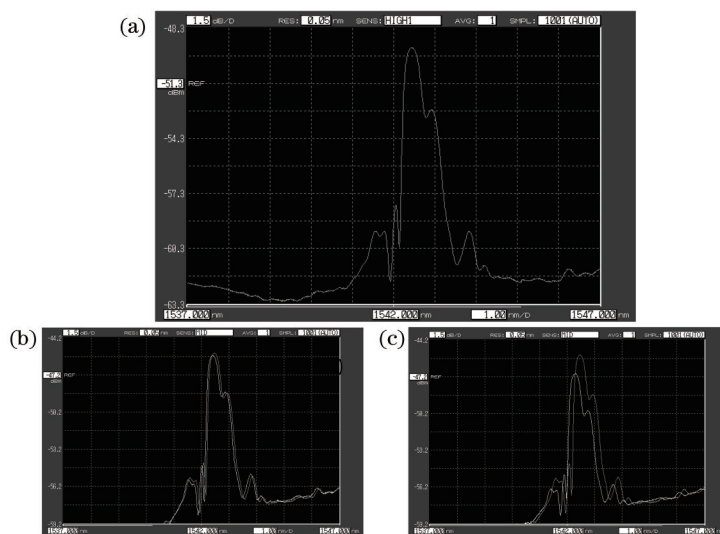


图 14 不同径向压力作用下 EVA 增敏光纤光栅的反射谱图。(a) 径向受力为 0; (b) 径向受力为 0.5 N; (c) 径向受力为 2.0 N

Fig.14 Reflection spectra of EVA sensitivity enhanced FBG when different radial pressures are applied.

(a) Radial pressure is 0; (b) radial pressure is 0.5 N; (c) radial pressure is 2.0 N

从图 14 中可以看出:在增敏封装后的传感头上施加径向压力时,反射谱中心波长向短波方向发生漂移;在压力达到 0.5 N 时,反射谱开始出现轻微形变,表明已经开始出现啁啾现象;在压力达到 2.0 N 时,反射光谱发生比较严重的形变(反射谱谐振峰幅值和旁瓣形状均发生变化),表明出现了比较严重的啁啾现象。

经过多次实验验证表明:所设计的 EVA 增敏型光纤光栅径向压力传感器在 0~0.3 N 压力范围内,能够保证良好的线性响应特性,且没有啁啾现象产生。在实际工程应用中,若需要获得更大的测量范围,可以选用具有更大弹性模量的材料替换 EVA 材料进行哑铃型封装,但是同时也会降低传感器的响应灵敏度。

5 结 论

研究了一种光纤光栅径向压力增敏方案,利用EVA聚合物和方钢将光纤光栅封装成“半哑铃”结构的传感单元。建立了径向压力传感单元的力学结构模型,利用有限元软件对模型进行了受力分析与仿真研究。设计了实验系统对EVA增敏后的光纤光栅传感单元径向压力响应特性进行了实验研究。研究表明:经过增敏封装后的光纤光栅能够在0~0.3 N径向压力范围内获得高达0.94 nm/N的径向压力传感灵敏度,具有很好的线性度,并且在径向压力增加和减小过程中传感器也具有良好的回复性能。该研究结果对于设计高灵敏度的光纤光栅径向压力传感器具有重要的参考意义,能够广泛应用在诸如金属构件2个平面间的压力和微位移测量等工程领域。

参 考 文 献

- 1 Chen Tao, Zhang Song. Bridge health monitoring system FBG demodulator[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(15): 41-43.
陈 涛, 张 嵩. 用于桥梁健康监测的光纤光栅解调系统[J]. 武汉大学学报, 2009, 31(15): 41-43.
- 2 Wu Huijuan, Li Shanshan, Lu Xianglin, *et al.*. A novel method for simultaneous intrusion detection and fire alarm in a single FBG-based fiber fence monitoring system configuration[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(11): 1671-1675.
吴慧娟, 李珊珊, 卢祥林, 等. 一种新型光纤光栅围栏防火防入侵同步预警系统[J]. 光子学报, 2011, 40(11): 1671-1675.
- 3 Chen Haiyun, Gu Zhengtian, Gao Kan. Multi-parameter photochemical sensing technology of long-period fiber grating and wavelength division multiplexing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0205003.
陈海云, 顾铮先, 高 侃. 基于波分复用的长周期光纤光栅光化学多参量传感技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0205003.
- 4 Zhang Yanjun, Xie Xiaopeng, Bi Weihong. High-speed high-multiplexing distributed temperature sensor network based on weak-reflection fiber gratings[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405006.
张燕君, 谢晓鹏, 毕卫红. 基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405006.
- 5 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, *et al.*. Stress sensitivity enhanced in-fiber Bragg grating pressure sensor[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(4): 473-476.
傅海威, 乔学光, 贾振安, 等. 应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 473-476.
- 6 Y Q Tan, H P Wang, Z J Sun. Calibration method of FBG sensor based on asphalt pavement indoor small size test[C]. International Conference on Transportation Mechanical and Electrical Engineering, Changchun, 2011: 1390-1394.
- 7 Yin Xiaofeng, Jiang Nuan, Yang Huayong, *et al.*. A novel fiber grating pressure sensor with high sensitivity based on elastic sheet packaging[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(5): 681-684.
殷小峰, 姜 暖, 杨华勇, 等. 基于弹性薄片封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. 光电子·激光, 2011, 22(5): 681-684.
- 8 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei, *et al.*. Study of optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 686-691.
王 静, 冯德军, 隋青美, 等. 基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 686-691.
- 9 Jiang Shanchao, Cao Yuqiang, Sui Qingmei, *et al.*. Research on the micro and high-precision fiber Bragg grating soil pressure sensor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405002.
蒋善超, 曹玉强, 隋青美, 等. 微型高精度光纤布拉格光栅土压力传感器研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405002.
- 10 He Wei, Xu Xiandong, Jiang Desheng. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor with polymer jacket and its low-temperature characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1316-1317.
何 伟, 徐先东, 姜德生. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅温度传感器及其低温特性[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1316-1317.
- 11 M Rosenberger, G Koller, S Belle, *et al.*. Polymer planar Bragg grating sensor for static strain measurements[J]. Opt Lett, 2013, 38(5): 772-774.
- 12 Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, *et al.*. Temperature and pressure responsive characteristics of polymer packaged fiber Bragg grating with large dynamic range[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 224-226.
孙 安, 乔学光, 贾振安, 等. 聚合物封装光纤布拉格光栅传感器温度压力特性研究[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 224-226.
- 13 Shao Jun, Liu Junhua, Qiao Xueguang, *et al.*. A FBG pressure sensor based on bourdon and cantilever beam of uniform strength[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(7): 807-809.
- 14 Chen Zhemin, Chen Jun, Shu Ruijun. Simulation and reconstruction for nonuniform strain profile of fiber Bragg grating sensor[J].

- Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19 (12): 2400–2404.
陈哲敏, 陈 军, 舒睿俊. Bragg 光纤光栅传感器内不均匀应力分布的模拟和重构[J]. 传感技术学报, 2006, 19(12): 2400–2404.
- 15 Su Juan, Dong Xiaopeng, Shi Zhidong. Design of the sensitivity enhanced strain sensor based on fine transmission spectrum of FBG[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805002.
苏 娟, 董小鹏, 石志东. 基于FBG精细谱的应变增敏型传感器的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805002.
- 16 Wu Yuan, Lutful Khan, David J Webb, *et al.*. Humidity insensitive TOPAS polymer fiber Bragg grating sensor[J]. Opt Express, 2011, 19(20):19731–19738.
- 17 Zhan Yage, Lu Qing, Xiang Shiqing. Study on the optimization of matched grating interrogation technique of fiber grating sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(6):711–712.
詹亚歌, 陆 青, 向世清, 等. 优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究[J]. 光子学报, 2004, 33(6): 711–712.

栏目编辑: 王晓琰