

文章编号:1001-5078(2016)09-1128-05

· 光纤及光通讯技术 ·

光纤光栅应变传感器预紧封装及传感特性研究

陈昊¹, 闫光¹, 庄炜^{1,2}, 祝连庆¹

(1. 北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 光电测试技术北京市重点实验室,
生物医学检测技术及仪器北京实验室, 北京 100192; 2. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:介绍了一种具有预紧力的基片式光纤光栅应变传感器封装方法, 并根据 Ansys 建模及实验对其传感性能进行研究。使用宽 10 mm, 长 22 mm, 厚 1 mm 的铝合金 7075-T6 材质基片对光纤光栅进行预紧封装, 所得带预紧封装传感器灵敏系数为 $1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 线性度达到 0.99 以上。表明预紧封装基片式光纤光栅应变传感器具有良好的线性度和应变测试灵敏度, 对光纤光栅传感器封装工艺有指导作用。

关键词: 光纤光栅; 预紧封装; 应变; 传感器

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.09.021

Research on preload package and sensing characteristics of fiber Bragg grating strain sensor

CHEN Hao¹, YAN Guang¹, ZHUANG Wei^{1,2}, ZHU Lian-qing¹

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing key laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Laboratory for Biomedical Detection Technology and Instrument Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
2. School of Instruments Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A package method of substrate fiber Bragg grating strain sensor with preload was introduced, and its sensing characteristics were studied by Ansys and experiments. The preload package was carried out for fiber Bragg grating by using aluminium alloy 7075-T6 substrate with 10mm width, 22 mm length and 1mm thickness, and the sensor sensitivity of $1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$ is obtained, and the linearity is more than 0.99. The results show that the fiber Bragg grating strain sensor with preload package has good linearity and strain sensitivity, which has a guiding function for the packaging process of fiber grating sensor.

Key words: fiber Bragg grating; preload package; strain; sensor

1 引言

光信息技术的飞速发展, 使得光纤光栅传感技术日益成熟。1978 年, 加拿大的 Hill K O 制作出世界上第一根光纤光栅; 1993 年, Hill K O 和 Lemaire

分别提出相位掩膜技术和低温载氢技术, 大大降低光纤光栅传感原件的制作成本, 光纤光栅的应用研究进入高潮; 1989 年, Morey 首次将光纤光栅用于传感元件^[1], 此后光纤光栅受到广泛关注。光纤光

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队”发展计划 (No. IRT1212); 北京市重大科技计划项目 (No. Z151100003615010) 资助。

作者简介: 陈昊 (1990 -), 男, 硕士生, 主要从事光纤传感方面研究。E-mail: chenhaols@aliyun.com

通讯作者: 祝连庆 (1963 -), 男, 博士生导师, 主要从事光纤传感和光纤激光器, 光电检测技术方面的研究。E-mail: zhu-lianqing@sina.com

收稿日期: 2015-11-24; **修订日期:** 2016-01-05

栅传感器具有耐腐蚀、耐高温、抗干扰能力强、体积小、易于组网等优点^[2-5]。但由于光纤光栅本身抗剪切能力差,实际应用中需要根据工作需求对光纤光栅进行适当的封装处理^[6-8],目前常见的封装形式有基片式^[9]、管式^[10]以及盒式^[11]等。基片式封装对于光纤光栅应变传感器有较好的应力传递效率,能够较好地将被测件所产生的形变传递至光栅^[12-14],虽然基片式封装的光纤光栅传感器已经被广泛使用,但带有光纤带有预紧力的基片式光纤光栅应变传感器因为对应力测量结果分辨率高、精度高等优点在各领域得到了越来越广泛的应用。

光纤光栅作为光纤无源器件,对物理量的探测主要由光栅周期的变化和有效折射率的变化引起,光纤带有预紧力的基片式光纤光栅应变传感器的封装形式对有效的测量微应变具有重要意义。本文针对基片式光纤光栅应变传感器的预紧封装技术及传感特性问题,制作了光纤带有预紧力的基片式光纤光栅应变传感器,采用 Ansys 建模和实验分析对其传感特性进行研究。研究内容有助于光纤光栅应变传感器的优化和性能的进一步提升,以改善光纤光栅应变传感性能。

2 光纤光栅应变传感的理论分析

根据麦克斯韦经典方程,利用光纤耦合模理论,并结合光纤光栅传输模式的征缴关系,可知,光纤光栅的 Bragg 波长为:

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

式中, n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率; Λ 为光栅栅格周期。光栅栅格周期 Λ 可根据写入光栅时两束相干光夹角变化为改变,这样可以得到不同中心波长的光栅。由式(1)可知,栅格周期 Λ 的变化引起 Bragg 波长的变化。应变主要通过弹光效应和光栅栅格周期 Λ 来影响 λ_B :

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{eff}\Lambda \quad (2)$$

式中, $\Delta\Lambda$ 为光栅栅格周期的变化量; Δn_{eff} 为弹光效应引起的有效率变化量。将式(1)对长度 L 求得:

$$d\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{dn_{eff}}{dL} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dL}\right)dL \quad (3)$$

将式(3)两端分别除以式(1)两端,得:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dL} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dL}\right)dL \quad (4)$$

式中,设 $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dL} = \varepsilon$, 代表光纤纵向伸压系数;设

$\frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dL} = P$, 代表光纤弹光效应系数。则式(4)可写为:

$$d\lambda_B = \lambda_B(P + \varepsilon)dL \quad (5)$$

令 $\lambda_B(P + \varepsilon) = K_L$, K_L 为光纤光栅对应变的灵敏度系数,得:

$$\Delta\lambda_B = K_L\Delta L \quad (6)$$

式(6)为光纤光栅中心波长关于应变的关系式,通过解调仪监测中心波长变化,即可得到应变的变化。

由于光纤光栅的封装工艺不同,以及采用的基片材料差异较大,所以封装好的传感器传感性能差异较大。

3 有限元分析及传感器封装

3.1 基片有限元分析

对光纤光栅采用基片式封装,具体封装结构如图1所示,基片材料选用1 mm厚7075铝合金板材。对于基片式封装,根据栅区长度将中央区域长度设计为12 mm,宽度为8 mm,两端耳片长度为4 mm,宽度为10 mm。

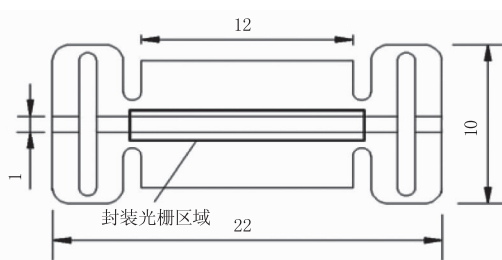


图1 封装基片结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of package substrate structure

利用 Ansys 软件,选取 solid 实体单元模型,根据基片材质 7075 铝合金及实际尺寸进行建模^[15]。结构的宽厚比大于 10,因此根据 ANSYS 提供的复合材料单元库中单元特性,选取 SHELL99 号单元。SHELL99 是一种 8 节点 3D 壳单元,每个节点有 6 个自由度,该类单元主要适用于薄板和薄壳以及中等厚度的板和壳结构,一般要求结构的宽厚比大于 10 就可以采用,如图 2 所示。

采用 SHELL99 号单元对三类模型进行网格划分,为了提高计算精度,采用扫略方式划分网格,保证网格分布规律,并且数目可控。另外在光纤光栅与环氧树脂的连接处、结构变形导致应力集中的部位进行了网格细化。网格划分结果如图 3(a)所示,光纤与基底通过环氧树脂连接处的网格划分如图 3(b)所示,基片一端限制 XYZ 三个方向的位

移,另一端 X 方向位移动,另一端施加位移边界条件,如图 3(c) 所示。基底与光纤光栅的屈曲变形云图如图 4 所示。

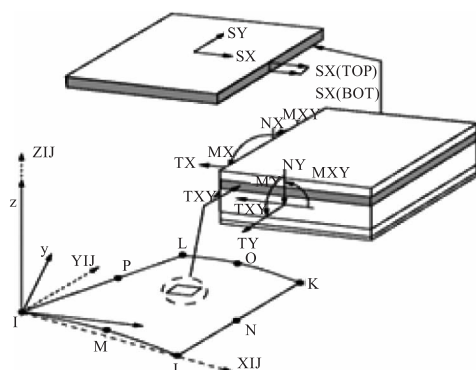


图2 SHELL99 单元应力输出示意图

Fig. 2 Schematic diagram for stress output of SHELL99 unit

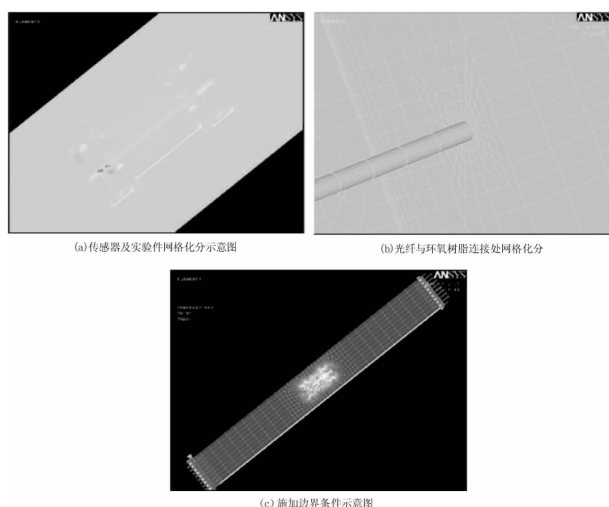


图3 传感器及实验件 Ansys 建模示意图

Fig. 3 The Schematic diagram of Ansys modeling for Sensors and test pieces

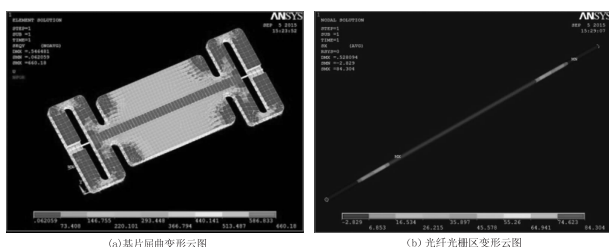


图4 基片与光纤光栅的屈曲变形云图分布图

Fig. 4 The buckling deformation of the substrate and the fiber grating

根据应变分布可以看出基片在受拉过程中,中央部分变形较为均匀,在两端耳边处有明显的应力集中,光纤上的应力水平比基底上的应力水平高一个量级。

底板上的应力传递到光纤上要经过如下流程:应变→基片底部的环氧树脂→基片槽内环氧树

脂→光纤

由上述可知这一路径中,被测物(铝板)比底部和槽内的环氧树脂杨氏模量要高很多,在应变传递上起到了一个阻隔或者说卸载的作用,如果要继续提高在同等载荷下光纤上的形变,应该降基片的模量,或者使用和环氧树脂相近的材质。

3.2 传感器封装

选取中心波长 $\lambda = 1528.114 \text{ nm}$ 裸光纤光栅,将封装基片放置在加热台面板上,并将光纤光栅置于封装及片中央槽内,光栅两端用调整架固定,调整微分头使光纤光栅处于绷紧状态,如图 5 所示。开启加热台,将温度设置为 180°C ,此时光纤光栅中心波长变为 $\lambda_1 = 1530.051 \text{ nm}$;待温度稳定后,旋转微分头,调整光栅中心波长为 $\lambda_2 = 1540.124 \text{ nm}$ 。待中心波长数值相对稳定后,在中央槽两端加入环氧树脂并在 180°C 下高温固化。固化完成后,将传感器冷却至室温,读取中心波长 $\lambda' = 1533.153 \text{ nm}$ 。

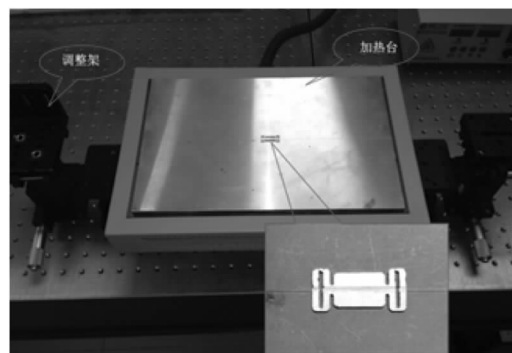


图5 光纤光栅封装平台

Fig. 5 The package platform of optical fiber grating

4 实验系统及分析

4.1 实验系统

为了进一步研究预紧封装应变传感器传感特性,将已制备的传感器连入等强度梁测试系统。实验测试装置如图 6 所示。宽谱光有宽带光源,进过 3 dB 耦合器射入光栅,光栅反射光谱经耦合器至解调仪,以此可同时检测光纤光栅的中心波长偏移量。

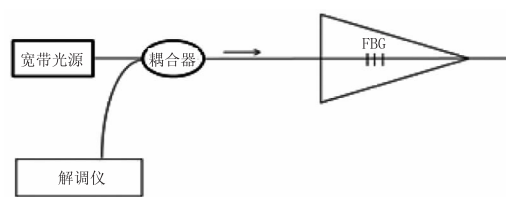


图6 传感性能测试系统示意图

Fig. 6 The schematic diagram of sensing performance test system

实验中选用等强度梁材料为铝合金 7075-0, 厚度 $h=2$ mm、中心线长度 $L=280$ mm, 用环氧树脂 DP420 将传感器粘结在等强度梁中心线上。对等强度梁自由端用微分头进行加载。

4.2 实验结果及分析

光纤布拉格光栅传感器粘贴于等强度梁后, 在室温环境下对等强度梁加载进行拉伸与压缩标定实验。微分头控制的行程范围为 $0 \sim 23$ mm, 实验中等强度梁端头微分头每次改变 1 mm, 等强度梁在水平方向上的形变为 $40 \mu\epsilon$ 。整理实验数据可知, 两种光纤光栅传感器中心波长随等强度梁形变呈良好的线性关系, 如图 7 所示。

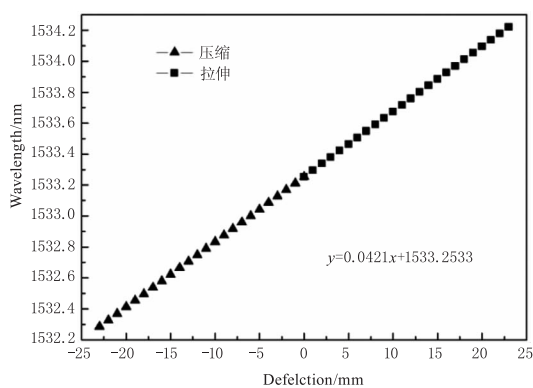


图7 中心波长与挠度关系曲线

Fig. 7 The curve between wavelength and deflection

图7给出预紧光纤光栅传感器承受拉伸与压缩形变过程中形变范围 $-23 \sim 23$ mm 时中心波长与挠度的关系, 从压缩阶段可以看出, 传感器并未发生屈曲变形, 试验整个过程中传感器一直处于弹性阶段; 从拉伸阶段可以看出, 卸载过程完成后, 传感器并未完全恢复原始状态但仍处于弹性状态, 静置数小时后又回归正常, 由此推断: 在多次实验后传感器有产生蠕变的趋势。

根据实验测得光纤光栅中心波长与梁微应变的关系, 利用最小二乘法拟合得:

$$y = 0.0421x + 1533.2533 \quad (7)$$

式中, y 代表传感器中心波长; x 表示挠度值。式(7)为预紧封装光纤光栅传感器在压缩和拉伸载荷下中心波长与挠度拟合结果, 线性度均达到 0.999 以上。

根据材料力学等强度梁形变理论, 在等强度梁弹性变形范围内, 梁弯曲时其表面沿梁轴线方向所产生应变与梁末端的微应变关系为:

$$\epsilon = Fh/l^2 \quad (8)$$

式中, F 为梁末端(加载位置)的挠度; h 为梁的厚度; l 为梁的固定端与施加作用力处之间的距离。经预紧封装后, 基片式光纤光栅传感器灵敏系数为

$1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 且线性度均在 0.99 以上。

5 结论

本文介绍了一种预紧封装基片式光纤光栅传感器, 并对其传递特性进行了有限元分析。根据等强度梁拉伸压缩实验, 结果表明预紧封装基片式光纤光栅传感器线性度良好, 具有较高灵敏度, 灵敏系数为 $1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。本文对光纤光栅封装研究具有指导性意义。

参考文献:

- [1] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [2] ZHANG Sen, LIU Menghua, WANG Zhen, et al. Development and applications of fiber-optic sensors [J]. Study on Optical Communications, 2007(03): 62-65. (in Chinese)
张森, 刘孟华, 王臻, 等. 光纤传感器的研究及应 [J]. 光通信研究, 2007(03): 62-65.
- [3] LI Yulong, WEN Changjin, ZHAO Cheng. Research status of the sensitivity enhancing and encapsulation technologies & devices of the fiber Bragg grating [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(11): 1203-1211. (in Chinese)
李玉龙, 温昌金, 赵诚. 光纤光栅增敏封装工艺及装置研究现状 [J]. 激光与红外, 2013, 43(11): 1203-1211.
- [4] ZHOU Wei, YAN Lianshan, ZHANG Zhiyong, et al. Rail sensing technique utilizing matched gratings under Bi-directional strains [J]. Journal of the China Railway Society. 2014, 36(02): 75-80. (in Chinese)
周威, 闫连山, 张志勇, 等. 基于双向应变匹配解调的光纤光栅轨道传感技术研究 [J]. 铁道学报, 2014, 36(02): 75-80.
- [5] WANG Wenzhen, LIU Mingyue. Research on temperature cross sensitivity compensation technology of FBG strain sensor [J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(02): 51-56. (in Chinese)
王雯珍, 刘月明. FBG 应变传感器温度交叉敏感补偿技术研究 [J]. 光电技术应用, 2014, 29(02): 51-56.
- [6] ZHANG Yanjun, JIA Bingbing, HUANG Baokai, et al. Research on mine collapse monitoring based on distributed-grating sensor network [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(3): 319-323. (in Chinese)
张燕君, 贾冰冰, 黄保凯, 等. 基于分布式光栅传感网络的矿井坍塌监测研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(3): 319-323.
- [7] HU Xingliu, LIANG Dakai, WANG Yan, et al. The temperature-insensitive package of long period fiber grating

- pair used in liquid detection[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(10): 1895 – 1898. (in Chinese)
- 胡兴柳, 梁大开, 王彦, 等. 应用于液体检测的级联长周期光纤光栅的温度减敏封装结构[J]. 光电子·激光, 2013, 24(10): 1895 – 1898.
- [8] PANG Dandan, SUI Qingmei, JIANG Mingshun. New fiber bragg grating high temperature sensing network based on diffraction demodulation [J]. China Journal of Laser, 2011, 38(11): 168 – 173. (in Chinese)
- 庞丹丹, 隋青美, 姜明顺. 基于衍射解调的新型光纤光栅高温传感网络[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 168 – 173.
- [9] SHEN Haowen, ZHU Pingyu, XU Peisheng, et al. Strain transfer factor analysis of basal grooving encapsulating fiber bragg grating sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015, (2): 96 – 99. (in Chinese)
- 申昊文, 朱萍玉, 许沛胜, 等. 基底刻槽封装式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析[J]. 仪表技术与传感器, 2015, (2): 96 – 99.
- [10] ZHANG Guihua, CHAI Jing, LI Xujuan, et al. Research on strain transfer of surface fiber grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, (01): 52 – 57. (in Chinese)
- 张桂花, 柴敬, 李旭娟, 等. 基片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, (01): 52 – 57.
- [11] ZHANG Xuezhong, ZHU Lianqing, ZHANG Yinmin, et al. Fiber bragg grating with nonmetal and corrosion resisting packaging and its temperature characteristic[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(4): 437 – 441. (in Chinese)
- 张学智, 祝连庆, 张荫民, 等. 光纤光栅非金属耐腐蚀封装及其温度特性研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(4): 437 – 441.
- [12] HU Jiayan, JIANG Shan. Study on encapsulating technique and strain sensing characteristic of FBG temperature sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(3): 311 – 313. (in Chinese)
- 胡家艳, 江山. 光纤光栅传感器的应力补偿及温度增敏封装[J]. 光电子·激光, 2006, 17(3): 311 – 313.
- [13] WU Jun, CHEN Weimin, ZHANG Peng, et al. Impact analysis on surface strain sensing properties of FBG sensors' packaging type[C]. Proceedings of the 2010 Annual Conference of the China Institute of Optics, 2010: 3861 – 3864. (in Chinese)
- 吴俊, 陈伟民, 章鹏, 等. 封装形式对布拉格光纤光栅表面应变传感性能的影响分析[C]// 中国光学学会2010年光学大会论文集, 2010: 3861 – 3864.
- [14] ZHANG Yanjun, WANG Haibao, CHEN Zegui, et al. Study on FBG sensor's steel capillary packaging technique and sensing properties[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(1): 53 – 54. (in Chinese)
- 张燕君, 王海宝, 陈泽贵, 等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 53 – 54.
- [15] YAN Guang, FAN Zhou, LI Zhonghai, et al. Analysis and design of composite cylindrical shell with coner[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(6): 1437 – 1441. (in Chinese)
- 闫光, 范舟, 李钟海, 等. 复合材料加工盖柱壳的设计与分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(6): 1437 – 1441.