文章编号:1004-2474(2017)05-0654-05

预拉伸光纤光栅应变传感器传感性能研究

张开宇^{1,2}, 闫 光^{1,2}, 鹿利单^{1,2}, 祝连庆^{1,2}

(1.北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院,北京100192;2.光电信息与仪器北京市工程研究中心,北京100016)

摘 要:为了提高光纤光栅测量应变的测量范围与测量精度,该文对基片式光纤光栅传感器应变传递理论及 其有限元分析应力分布进行了阐述,并对光纤光栅应变传感器的制作工艺进行了探索。封装工艺与普通基片式光 纤光栅传感器的不同是在制作时加载确定的预紧力,用等强度梁对预应力基片式光纤光栅传感器进行测试并标 定,得到传感器灵敏度为 0.88 pm/με,线性度为 0.996,传递效率为 74%。并在 MTS 拉伸试验机上进行预紧力基 片式光纤光栅传感器、裸光纤光栅传感器与电阻应变计压缩对比实验研究,实验表明,预拉伸制作工艺提高了光纤 光栅测量压缩应变的线性度与测量范围。

关键词:基片式;光纤光栅;应变传感器;预拉伸;线性度;灵敏度 中图分类号:TN253;TH7 **文献标识码:**A

Study on the Sensing Performance of Pre-stretching Fiber Grating Strain Sensor

ZHANG Kaiyu^{1,2}, YAN Guang^{1,2}, LU Lidan^{1,2}, ZHU Lianqing^{1,2}

College of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
 Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing 100016, China)

Abstract: In order to improve the fiber Bragg grating strain measurement range and measurement accuracy, the strain transfer theory and finite element analysis of stress distribution of substrate type optical fiber grating sensor was discussed in this paper, and the fabrication process of fiber grating strain sensor was investigated. The difference between the encapsulation technology and common substrate optical fiber grating sensor was that the certain pre-tightening force was loaded during the production process. The measurement and calibration of the pre-stress substrate fiber Grating sensor was carried out by the equal strength beam. The sensor sensitivity of 0.88 pm/ $\mu\epsilon$, linearity of 0.996, and transfer efficiency of 74% were obtained. The comparative experimental study on the substrate pre-tightening fiber Bragg grating sensor, bare optical fiber grating sensor and the resistance strain gauge compression was carried out on MTS. The results showed that the pre-stretching process improved the linearity and measurement range of the fiber Bragg grating measuring compressive strain.

Key words: substrate; fiber Bragg grating(FBG); strain sensor; prestretching; linearity; sensitivity

0 引言

在材料性能与结构力学性能领域,应变测量是 最主要的测试指标,飞机机翼的结构受力检测,电测 法已被普遍使用,但是,线缆质量大,不能抗电磁干 扰且寿命较短,而光纤光栅传感器测量具有结构简 单、抗电磁干扰、高测量精度、波长编码等优点,有广 阔的应用前景^[1-2]。

在实际工程中,对本质脆弱的光纤光栅进行封装保护和提高灵敏度都是进行封装工艺的研究目的。目前,国内、外对光纤光栅的封装工艺都集中在

裸光纤光栅封装、埋入式封装、金属化封装和基片式 封装^[3-4]。现有光纤光栅应变传感器一般在测量拉 伸情况下,测试范围大,线性度较好,但在测量压缩 力时,测量范围小,超过一定压缩测量范围,光栅反 射谱测量会出现啁啾或双峰现象。

本文设计了一种能够测量较大范围的基片式光 纤布喇格光栅应变传感器,在传统应变传感器的工 艺上进行改进,并在实验室环境对传感器进行标定, 测试传感器压缩性能。该应变传感器能够为机翼机 构拉伸压缩提供有效、可靠的测试手段。

收稿日期:2016-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675053);长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT1212);北京市属高等学校创新团队 发展计划基金资助项目(IDHT20130518)

作者简介:张开宇(1995-),男,硕士生,主要从事光纤光栅传感的研究。通信作者:祝连庆,男,教授,博士生导师。E-mail:zhulianqing@si-na.com。

1 理论基础

1.1 光纤光栅应变传感原理

当宽带光在光纤布喇格光栅(FBG)中传输时产 生模式耦合,满足布喇格条件的反射光波长^[5]为

$$\lambda_{\rm B} = 2\Lambda \cdot \eta_{\rm eff} \tag{1}$$

式中:η_{eff}为导模的有效折射率;Λ为光栅周期。当 光纤布喇格光栅受到外力作用时,由于弹光效应及 光栅周期引起光纤布喇格光栅 λ_B的偏移为

$$\lambda_{\rm B} = 2\Lambda \cdot \Delta \eta_{\rm eff} + 2\Delta\Lambda \cdot \eta_{\rm eff} \tag{2}$$

在轴向应力作用下,λ_B相对偏移量与轴向应变 ε之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_{\rm B}}{\lambda_{\rm B}} = K_{\rm e}\varepsilon = (1 - p_{\rm e})\varepsilon \tag{3}$$

式中: p_{e} 为光纤的有效弹光系数; $K_{e}=1-p_{e}$ 为应变灵敏度。

本实验测试压缩性能,λ_B会发生红移现象。

1.2 光纤光栅应变传感器应变传递理论模型

图 1 为基片式 FBG 一般结构。假设,传感器所 用材料都是线弹性,纤芯与包层有相同的机械性能 且基片式光纤布喇格光栅传感器与被测试验件无相 对滑移,得出光纤光栅与试验件的粘结平均应变传 递关系,最终得到应变传递系数。图 1 中,dσ_n、dσ_g、 dσ_e、dσ_j分别为光纤粘结层、光纤布喇格光栅、基底、 基底粘结层微单元的轴向应力; τ_{ng}、τ_{gc}、τ_{cj}、τ_{jm}分别 为各相邻层间的剪切应力; b 为传感器的宽度; 2L 为传感器粘结长度; γ_g为光栅半径^[6-9]。



图 1 传感器截面图及光纤光栅传感器的轴向力分析

在基片式光纤光栅应变传感器沿 x 方向任取 微元,对各层进行力学分析,根据力学平衡和边界条 件 $\epsilon_{(-L)} = \epsilon_{(L)} = 0$,最终得到光纤光栅应变与被测 试验件之间轴向应变传递关系为

$$\overline{a} = \frac{\varepsilon_{\rm m}}{\varepsilon_{\rm g}} \left[1 - \frac{\tanh\left(k \cdot L\right)}{k \cdot L} \right] \tag{4}$$

其中

$$\frac{1}{k^{2}} = \frac{E_{c}h_{j}}{G_{j}} \Big[h_{c} + \frac{\pi r_{g}^{2}E_{g}}{bE_{c}}\Big] + \frac{h_{c}^{2}E_{c}}{2G_{c}} - \frac{E_{g}}{G_{n}} \Big[\frac{\pi r_{g}^{2}}{b} + \frac{r_{g}}{2}\Big] \Big[\frac{h_{n}}{4} - \frac{r_{g}}{2}\Big]$$
(5)

式中:n、g、c、j分别为光栅粘结层、光纤光栅层、基 底层和基底粘结层;E为该层材料的弹性模量;G为 该层材料的剪切模量;h为该层材料的厚度,由理论 推导得出在传感器材料确定情况下,h与L是影响 应变传递效率主要因素。

1.3 传感器结构设计

为了对传感器进行保护,且达到预期的目的,本 文设计了一种新型光纤光栅应变传感器基片,如图 2 所示。设计思路为将栅区固定在基片中间的槽 内,两侧的半圆耳有助于在施工期间增大胶粘面积, 使传感器使用性能更佳^[10]。



2 实验与讨论

2.1 传感器的制备工艺

对于应变传感器,当压缩超过一定的范围,一旦 胶装层出现瑕疵,光纤光栅传感器反射谱会出现啁 啾或双峰现象。拉伸测试情况下,聚酰亚胺涂覆层 光纤光栅拉伸范围远大于金属受拉伸载荷,且拉伸 线性度良好,对于检测金属结构飞机机翼有较大的 余量。但在压缩情况下,测量范围较小,为了提高基 片式光纤光栅传感器测量压缩荷载范围,本文对预 拉伸工艺进行探索。 在封装过程中,针对光纤光栅与金属基底之间 应变传递研究,考虑到粘接层必须满足的几点要 求^[11],即:

1) 能将光纤与基材良好粘接,蠕变低。

2) 固化后有一定韧性,强度高。

3)长期稳定性好,耐老化,能适应恶劣环境[9]。

选用热固性环氧树脂胶 353ND,这种环氧胶对 多种溶剂和化学品具有优异的抵抗性,是一种理想 的用于固定光纤、金属、玻璃、陶瓷和多数塑料的粘 接剂,适合于飞机机翼应变测量的环境。353ND 主 要特性参数如表1所示^[12]。

表1 环氧树脂 353ND

名称	详细参数
A与B组分比例	10:1.02
150 r/min,23 °C	3 000∼5 000 mPa•s
压缩强度	20 200 psi

封装过程:353ND 胶的固化需要加热平台,光 纤光栅的预紧力需要通过橡胶夹具来实现,因为橡 胶夹具能够提供普通的光纤夹具提供不了的大摩擦 力。所以,将光纤光栅用橡胶夹具固定在加热台上, 静置等待光纤光栅中心波长稳定。旋转橡胶夹具微 分头对光纤光栅施加预紧力,让光纤绷直,在光纤的 一端熔接光纤跳线(APC),连接到解调仪上,时刻 读取光纤光栅的中心波长值。将基底放置在加热平 台上,使光纤光栅的栅区平行置于基底的槽内,使用 小段聚酰亚胺胶带固定基底,防止因其他意外导致 走形。由于 353ND 环氧树脂胶在 80 ℃下需要固化 30 min, 目铝 7075-T6 的热膨胀系数高于光纤, 故设 定加热平台温度为80℃,升温完成后,继续转动夹 具微分头,当光纤光栅中心波长增大 2 nm 时停止转 动,等待中心波长稳定。使用高温环氧树脂 353ND 灌满整个基底槽,等待1h后,关闭加热平台等待其 降温至室温,在这一过程中,缓慢卸载夹持力,整个过 程中无啁啾、无双峰或多峰现象。

由于实验环境未进行严格的温度控制,最后得 到制备的传感器中心波长增大约 2 nm,由于实验室 裸光纤光栅的封装的应变灵敏度为 1.14 pm/με,预 紧残留应力约为1 700 με。

2.2 基片式光纤布喇格光栅传感器标定实验

标定系统采用放大式自发射(ASE)宽带光源与 解调仪通过光纤环形器进行连接,解调仪测得光纤 光栅反射谱,透射谱可以在光纤光栅尾端连接光谱 仪进行透射谱观察,对等强度梁施加应力,应力传递 到光纤光栅,通过解调光纤光栅中心变化,进而得到 光纤光栅中心波长与应变之间的传递关系。光纤光 栅 3 dB 带宽 0.4 nm、栅区长度为 10 mm,同时进行 了反射谱左右旁瓣的切趾,且中心波长为 1 539.980 nm;光源为 1 520~1 595 nm 波段稳定 输出 ASE 光源,功率为-55 dB,解调仪为高速光纤 光栅解调仪,测试所用的分辨率为 1 pm;使用光纤 环形器;标定所采用等强度梁,标定范围为 0~ 1 000 με,通过旋转微分头改变等强度梁施加特定 的应变。其基本测量原理如图 3 所示。



图 3 光纤光栅应变测量原理

实验中,使用的等强度梁材料为铝 7075T6,厚 为 2 mm,长为 28 mm,应变范围为 0~1 000 μ ε;螺 旋测微器测量范围为 0~25 mm,精度 0.01 mm,测 量应变精度为 0.4 μ ε。在将测量点位置打磨并清洁 后,用低温环氧树脂 DP420 将基片式光纤光栅传感 器粘结被测件,旋转微分头使等强度梁尖端每次上 升 0.5 mm 达到最大测量范围,按照同样步骤反向 卸载,并记录数据,重复试验 4 次^[13],实验现场如图 4 所示,对测得数据进行拟合,如图 5 所示,拟合直 线参数如表 2 所示,得到加载预应力传感单元平均 灵敏度为 0.851 pm/ μ ε,卸载预应力传感单元平均 灵敏度为 0.862 pm/ μ ε,其中 a+,b+,c+,d+表示 力的持续加载过程,a-,b-,c-,d-表示力的持续 卸载过程。



图 4 基片式光纤光栅应变标定现场图



拟合直线	灵敏度
a + b + c + d +	0.851\0.852\0.854\0.849
a - b - c - d -	-0.861\-0.864\-0.863\-0.862

2.3 基片式光纤布喇格光栅传感器压缩实验

由以上的等强度梁试验可以发现,由于等强度 梁加载应变的局限性,在超过1000με后,挠度曲线 与等强度梁线性形变不是线性关系,为此,在MTS 拉伸试验机上进行压缩实验,使用高精度电阻应变 计进行对比。结合课题,由于飞机机翼结构可认为 是许多板材结构^[14],为了模拟有效的压缩性能,使 用两块70mm×100mm×4mm板材,鉴于飞机材 料多为铝7075-T6,该实验仍采用这种材质。光纤 光栅应变传感器及电阻应变计的贴片方式如图6所 示,夹持位置为金属片上下两端。



图 6 试验现场贴片方式

对测试数据进行分析,图 7(a)为实验加载位移 传感器测得的压缩位移与压缩载荷关系曲线。在勾 速加载 1/3 时间时位移与加载才是线性关系,采集 卡记录电阻应变计测量应变值,同时解调仪解调基 片式 FBG 中心波长,并用 LabVIEW 上位机软件保 存中心波长随时间变化的值。由图 7 (b)、(c)可知, 从电阻应变计的值可得出试验件的左、右压缩应变量不一致,这是由于试验件加工精度与制造误差引起的。电阻应变计测量值可以验证预紧力封装形式的传感器的测量精度,基片式光纤光栅应变计反映了整个加载过程,原始中心波长1528.201 nm,拟合线性加载(a~b段线性良好)区间 $y = -0.89 \times 10^{-3}x + 1537.986$,灵敏度0.89 pm/ $\mu\epsilon$,正向压缩线性度(R-Square)为0.996。由于封装时不能完全保证胶层厚度,由理论传递模型的应变传递关系可知即式(3),胶层厚越薄,应变系数越大,手工操作不能完全保证环氧树脂胶的厚度一致,压缩试验得到传感器灵敏度比在等强度梁标定的灵敏度提高0.3 pm/ $\mu\epsilon$,传递效率为74%。



图 7 压缩过程拟合曲线

为了验证预拉伸工艺在压缩过程中的线性度, 对基片式光纤布喇格应变传感器、电阻式应变计和 无加载预紧力裸光纤光栅传感器进行对比试验,在 2 #试验件上将基片式光纤布喇格应变传感器与裸 光纤光栅传感器进行对称粘贴,同时将电阻应变计 对称粘贴在基片式光纤布喇格应变传感器两侧。

图 8 为基片式与裸贴式光纤光栅中心波长与微 应变关系曲线。对测试数据进行分析,利用传统测 试方法电阻应变计,得到较好压缩线性度,在线性加 载区间段,基片式光纤光栅应变计很好地反映了加 载情况,原始中心波长为1538.096 nm,在测量 2000 $\mu \varepsilon$ 范围内的正向压缩 R-Square 为0.996,拟 合线性加载(a~b)区间得到 $y = -8.8 \times 10^{-4} x +$ 1538.26,灵敏度为0.88 pm/ $\mu \varepsilon$;裸贴式光纤光栅 灵敏度很高,可达1.16 pm/ $\mu \varepsilon$,符合在等强度梁上 的标定结果^[13],但从压缩加载过程来看,未加预紧 力封装的裸光纤光栅在1500 $\mu \varepsilon$ 后线性度不是很 好,数据处理结果得到未加预紧力封装的裸光纤光 栅传感器的正向压缩线性度为0.879。



图 8 基片式与裸贴式光纤光栅中心波长与微应变关系曲线

本次使用 Ibsen 解调仪,解调原理采用高斯拟 合方式后寻峰算法得到中心波长值,若光纤光栅反 射谱发生微小的啁啾现象并不能观测出来,但线性 度良好说明了预紧力封装形式的可靠性。对比试验 得到基片式光纤光栅应变传感器在施加预紧力的工 艺规范下,不但压缩线性度高,而且提高了测量压缩 应变范围。

3 结束语

本文针对飞机机翼结构测量,对光纤光栅传感 器制作工艺进行探索,光纤光栅两端施加拉伸预紧 力后封装,此种基片式封装形式传递效率约为 74%,验证了有限元仿真结果。分别用等强度梁与 MTS机上对封装后的基片式光纤光栅应变传感器 进行了压缩加载测试,最终得出传感器在承受压缩 应变 2 000 με内的线性度为 0.996,灵敏度为 0.88 pm/με,且有效地消除了传感器制作中出现的 光纤光栅反射谱的 3 dB 波长范围变大,光纤光栅反 射谱出现偏峰与啁啾现象。

参考文献:

[1] 孙丽.光纤光栅传感技术与工程应用研究[D].大连:

大连理工大学,2006.

- [2] 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.
- [3] 郭亮,张华,冯艳.光纤 Bragg 光栅封装增敏技术研究 现状[J].半导体光电,2012,33(4):463-466.
- [4] BETTINI P, GUERRESCHI E, SALA G. Development and experimental validation of a numerical tool for structural health and usage monitoring systems based on chirped grating sensors [J]. Sensors, 2015, 15(1): 1321-1341.
- [5] PANOPOULOU A, LOUTAS T, ROULIAS D, et al. Dynamic fiber Bragg gratings based health monitoring system of composite aerospace structures[J]. Acta Astronautica, 2011, 69(7/8):445-457.
- [6] 郑卜祥,宋永伦,张东生,等.光纤 Bragg 光栅温度和应 变传感特性的试验研究[J]. 仪表技术与传感器,2008, 11:12-15.
- [7] 赵呈锐,金晓峰,倪大成,等.基于塑料光纤和棱镜结构 的光纤式转速传感器[J].重庆邮电大学学报(自然科 学版),2016,28(3):383-388.
- [8] WU R, ZHENG B, LIU Z, et al. Analysis on strain transfer of a pasted FBG strain sensor[J]. Optik- International Journal for Light and Electron Optics, 2014,125(17):4924-4928.
- [9] TORRES B, PAYÁá-ZAFORTEZA I, CALDERÓN P A, et al. Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for structural health monitoring[J]. Engineering Structures, 2011, 33(2):539-548.
- [10] 尤晓镇,隆志力,傅惠,等.基于有限元模型的超声切割 刀优化设计[J].压电与声光,2015,37(6):1083-1087.
 YOU Xiaozhen,LONG Zhili,FU Hui, et al. Optimization design of ultrasonic knife cutting system based on finite element model[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2015,37(6):1083-1087.
- [11] 马收,李明,郭建春,等.光纤布拉格光栅(FBG)传感器 在金属试件上的粘接工艺研究[J].复合材料学报, 2013 (suppl.1):251-254.
- [12] 周国鹏.光纤布喇格光栅(FBG)传感器封装技术的研究[J]. 压电与声光,2010,32(4):534-538.
 ZHOU Guopeng. Study of FBG sensor package technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32 (4):534-538.
- [13] 郑文龙. GB/T7314-2005《金属材料室温压缩试验方法》实施要点[J]. 试验技术与试验机,2006(4):55-70.
- [14] 阎楚良,张书明,卓宁生.飞机机翼结构载荷测量试验 力学模型与数据处理[J]. 航空学报,2000,21(1): 56-59.