

# 基于预拉伸基片式 FBG 的工字梁载荷测试

鹿利单<sup>1,2</sup>, 闫光<sup>1,2</sup>, 刘锋<sup>1,2</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

(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 100192)

**摘要:**对工字梁载荷测试与基片式光纤光栅传感器受力进行有限元分析仿真, 制作并封装加载确定的预拉伸力的基片式光纤光栅传感器。在材料拉伸机(MTS)上进行预拉伸基片式光纤光栅传感器标定与裸光纤光栅传感器对比测试实验, 得到预拉伸制作工艺传感器提高了测量范围、应变灵敏度为  $0.95 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、线性度 0.996、传递效率为 83.5%。将其应用到飞机机翼工字梁上测试, 同时电阻应变计监测最大应变, 得到很好的测试效果, 与仿真结果相吻合, 对飞机机翼载荷标定具有重要意义。

**关键词:**工字梁; 基片式; 光纤光栅; 应变传感器; 预拉伸

**中图分类号:** TN253; TH7      **文献标识码:** A

## Joist Load Test Based on Pre-stretching Substrate FBG Sensor

LU Lidan<sup>1,2</sup>, YAN Guang<sup>1,2</sup>, LIU Feng<sup>1,2</sup>, ZHU Lianqing<sup>1,2</sup>

(1. Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing 100016, China)

**Abstract:** The finite element analysis simulation of the joist load testing and the substrate FBG sensor was performed in this paper. The substrate FBG sensor with certain pre-stretching force loaded was fabricated and packaged. The experiment on the calibration was carried out to compare the pre-stretching substrate FBG sensor with the bare FBG sensor in MTS. The results showed that the measurement range of the sensor fabricated the pre-stretching process was improved, the strain sensitivity was of  $0.95 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , linearity was 0.996, and the transfer efficiency was 83.5%. The load testing was applied to the joist of airplane wing, while using the resistance strain gauge was used to monitor the maximum strain, good test results were obtained and consistent with the simulation results, which was of great significance for the calibration of aircraft wing loading.

**Key words:** joist; substrate; FBG; strain sensor; pre-stretching

## 0 引言

应变测量是材料性能与结构力学性能最具代表性的指标, 针对飞机机翼结构受力监测, 传统测量方法采用电阻应变计, 但因线缆屏蔽线质量大, 不抗电磁干扰与长期寿命监测问题限制了应变计的推广, 而光纤光栅传感器测量具有结构简单, 抗电磁干扰, 高测量精度及波长编码等优点, 应用前景<sup>[1-2]</sup>较大。

由于光纤光栅本质脆弱, 对其进行封装保护与提高灵敏度必须进行封装工艺的研究。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<sup>[3-4]</sup>。无论何种封装形式, 必须具备力学测试性能, 而现在一般的光纤布喇格光栅应变传感器都具有测量拉伸范围

大, 线性度好, 但测量压缩力时, 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者双峰现象。

本设计在制备传感器的工艺上进行了改进, 设计出一款能测量较大压缩范围的光纤布喇格光栅应变传感器, 并进行传感器的标定, 最后在飞机机翼工字梁上进行载荷测试。本研究为机翼结构无论是受压缩, 还是拉伸载荷标定提供了有效的测试手段。

## 1 理论基础

### 1.1 光纤布喇格光栅传感原理

光纤光栅传感器属于波长调制型传感器, 光纤布喇格光栅(FBG)是短周期光纤光栅, 其周期小于  $1 \mu\text{m}$ 。目前, 国内外的光纤光栅的栅区长度规格分

收稿日期: 2016-09-08

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队”发展计划基金资助项目(IRT1212); 北京市重大科技计划基金资助项目(Z151100003615010)

作者简介: 鹿利单(1991-), 女, 安徽人, 硕士生, 主要从事光纤光栅传感及封装技术的研究。E-mail: 15201297184@163.com。通信作者: 祝连庆, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: zhulianqing@sina.com。

别为 10 mm、5 mm、3 mm,短周期光栅的特点是耦合发生在传输方向相反的模式之间,属于典型的反射型带通滤波器。光纤光栅传感器是该测量系统的核心元件,根据应用要求设计不同封装、不同精度的传感器很关键。由耦合波场理论可得,当满足相位匹配条件时,光纤光栅的中心波长<sup>[5]</sup>为

$$\lambda_B = 2\Lambda \times \eta_{\text{eff}} \quad (1)$$

式中: $\lambda_B$ 为FBG波长; $\eta_{\text{eff}}$ 为纤芯的有效折射率; $\Lambda$ 为光栅周期。光纤光栅中心波长漂移、应变与温度的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon + (\xi + \alpha)\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为波长变化; $P_e$ 为光弹常数; $\xi$ 为光纤热光系数; $\alpha$ 为光纤热膨胀系数。本实验测试压缩性能,中心波长会发生红移现象。

## 1.2 有限元分析

有限元分析法最早应用于航空航天领域,主要用来求解线性结构问题。利用有限元分析软件 Ansys,选取 Solid185 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。Solid185 单元用于构造三维固体结构。单元通过 8 个节点来定义,每个节点有 3 个沿着  $x, y, z$  方向平移的自由度。单元具有超弹性、应力钢化、蠕变、大变形和大应变能力。预拉伸传感器制备基片及封装示意图如图 1 所示。

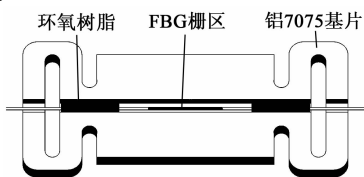


图1 基片式光纤光栅结构示意图

对基片传感器、环氧树脂、光纤及试验件进行切割、组合、扫掠网格划分。基片一端限制  $x, y, z$  3 个方向的位移自由度,一端  $x$  方向压缩,另一端施加位移边界条件,得到基片及光纤光栅受力云图如图 2 所示。

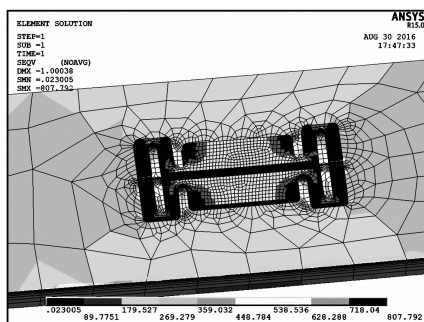


图2 基片屈曲变形云图

根据应变分布可看出,基片在板材压缩过程中,光纤光栅区域受力产生应变较均匀,在耳片两端有应力集中。试验件拉伸后,根据光纤光栅应变传递效率可计算出本传感器的应变传递效率约为 83.5%<sup>[12]</sup>。通过选择胶层固化强度最大后的弹性模量偏大一点,有利于提高应变传递效率。

由于机翼结构复杂,采取局部对称工字梁仿真加载工况,工字梁根部全自由度固定,在工字梁下缘条端部加载,其网格划分如图 3(a)所示,其仿真结果应变云分布如图 3(b)所示。由图 3 可知,在工字梁的上、下缘面应变最大,且上缘面受到压缩产生应变,下缘面受到拉伸产生应变,两者应变大小相等、符号相反,且工字梁中性层应变几乎为 0。



图3 工字梁屈曲变形云图

## 2 实验与讨论

### 2.1 预拉伸传感器的制备工艺

胶层中若出现气泡等瑕疵,当传感器受到压缩载荷,且载荷超过某一范围时,光纤光栅传感器反射谱会出现啁啾或双峰现象。金属受拉伸载荷的弹性范围在  $2\ 000\ \mu\epsilon$ ,聚酰亚胺涂覆层的光纤光栅拉伸范围达  $20\ 000\ \mu\epsilon$  且拉伸线性度很好,对于检测飞机机翼金属结构有很大余量,但测量压缩力时,测量范围小,为了提高基片式光纤光栅测量压缩载荷范围,本文进行了拉伸工艺探索。

封装工艺选用高温固化环氧树脂 353ND,同时为了加强光纤光栅表贴式传感的可靠性,粘接层应满足以下几方面:

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<sup>[9]</sup>。

针对光纤光栅与金属基底间的应变传递研究,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,已被美国 NASA 批准用于太空飞行项目,353ND 主要特性参数如表 1 所示。

表 1 环氧树脂 353ND

名称	详细参数
“A”组分与“B”组分	10:1.02
在 150 r · min <sup>-1</sup> /23 ℃	3 000~5 000 MPa · s
压缩强度	20 200 psi

封装工艺如下:

1) 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。由于普通光纤夹具间的摩擦力远小于拉伸力的要求范围,故选用橡胶垫片,增大摩擦力。

2) 旋转夹具微分头微施加预紧力,让光纤绷直,此时光纤受到沿轴向方向的拉伸载荷,用聚酰亚胺胶布黏住基底,以方便后续涂覆环氧树脂胶。

3) 设定加热平台 180 ℃(光纤光栅承受极限温度 1 100 ℃左右,353ND 高温固化 150 ℃最短 3 min,利用光纤光栅  $(5.3 \sim 5.8) \times 10^{-7}$  与铝 7075-T6 的热膨胀系数  $23.2 \times 10^{-6}$  的差别,铝基底的热胀冷缩效应比光纤光栅明显,选择 180 ℃作为起始温度),观察并记录光纤光栅受高温热膨胀后,其中心波长的变化情况。

4) 等待加热台升温至 180 ℃,转夹具微分头,使得解调仪显示光纤光栅的中心波长增加 3 nm,使环氧树脂冷却时可以沿着光纤光栅轴向压缩,等待中心波长稳定。

5) 封装。高温环氧树脂 353ND 灌满整个基底槽,等待 1 h;关闭加热台并手动连续缓慢(1 h)卸载,180 ℃过渡到室温 25 ℃,整个过程 4 h,其中无啁啾、无双峰或多峰现象。

由于实验环境未进行严格的温度控制,最终制备的传感器中心波长增大为 1 800 pm。实验室裸光纤光栅的封装应变灵敏度为 1.14 pm/ $\mu\epsilon$ ,预紧残留应力约为 1 500  $\mu\epsilon$ 。

### 2.2 基片式光纤布喇格光栅传感器标定及对比实验

标定系统中的放大自发辐射光源(ASE)和解调仪与光纤环形器进行连接,解调仪测得光纤光栅反射谱。另外,透射谱可以在光纤光栅尾端连接光谱仪进行透射谱观察,对通过材料拉伸机(MTS)对传感单元施加载荷,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 带宽为 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 ASE 光源,解调仪为高速光纤光栅解调仪,测试所用图像传感器(CCD)的解调波段为 1 525~1 570 nm。其基本测量原理如图 4 所示。

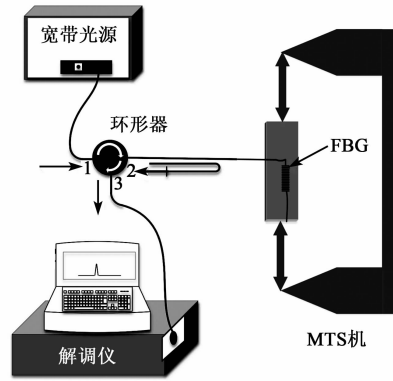


图 4 光纤光栅应变测量原理

为了验证预拉伸工艺在压缩过程中可以提高压缩测量范围,对基片式光纤布喇格应变传感器与无加载预紧力裸光纤光栅传感器进行对比试验,同时电阻应变计监测应变。由于梁式飞机机翼结构复杂,工字梁主要承受载荷部件,本文针对工字梁结构进行载荷测试<sup>[10-11]</sup>,为了真实、有效地模拟机翼结构力学压缩性能,这次实验准备了 150 mm × 100 mm × 4 mm 材质铝 7075T6 作为压缩试验件,用砂纸沿中心线 45°方向打磨被测件测量点位置,并用无尘纸浸透酒精擦拭打磨点,用低温环氧树脂 DP420 将基片式光纤光栅传感器粘结被测件。试验件在加工时不免产生加工误差,为了光纤光栅传感器测量值更准确,减小测量误差,在基片式光纤布喇格应变传感器的两边对称位置用快速固化环氧树脂 CC-33A 贴上电阻式应变计,应变计灵敏度系数 2.08,未加载时电阻 120  $\Omega$ ,并用焊锡焊上电压采集线,DAQ-9188 机箱的应变信号输入板卡 DAQ-9237 监测电阻应变计的应变变量;同时,解调仪解调基片式光纤光栅中心波长,并用 Labview 上位机软件保存中心波长随时间变化的值。图 5 为试验现场加载。



图 5 标定及对比试验加载现场

封装时不能完全保证胶层厚度,胶层厚度越薄,应变系数越大<sup>[12]</sup>,手工操作不能完全保证环氧树脂胶的厚度一致,传递效率为 83.5%。

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 1 538.096 nm,在测量 2 200  $\mu\epsilon$  范围内的正向压缩线性度为 0.996,拟合线性加载区间得到  $y = 1\ 538 - 9.6 \times 10^{-4} \cdot x$ ,如图 6 所示,应变灵敏度为 0.96 pm/ $\mu\epsilon$ ;原始中心波长为 1 554.958 nm 的裸贴式光纤光栅应变灵敏度很高,可以达到 1.15 pm/ $\mu\epsilon$ ,符合在等强度梁上的标定结果<sup>[12]</sup>,但从压缩加载过程来看,未加预紧力封装的裸光纤光栅在 1 700  $\mu\epsilon$  后线性度不好,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。

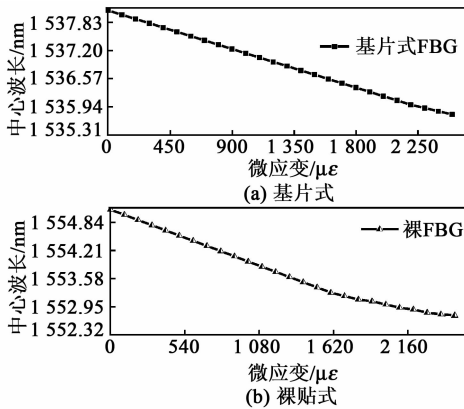


图 6 基片式与裸贴式光纤光栅中心波长与微应变关系曲线

本次使用 Iben 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,但线性度很好地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,且提高了测量压缩应变范围。

2.3 飞机工字梁测试实验

根据工字梁受力仿真结果,在实验室飞机机翼工字梁模型上按照应变分布设计粘贴光纤光栅的布片方式,在工字梁上下缘面、中性层及上下缘条的贴片方式,如图 7(b),(c)所示;用电阻应变计的 1/4 桥进行应力加载监控(见图 7(c),(d));机翼根部用销钉锁死,端部用千斤顶分级加载到 100 kg,且加载间隔 10 kg,如图 7(a)所示。用解调仪记录光纤光栅中心波长值,同时 DAQ-9188 机箱的应变信号输入板卡 DAQ-9237 直接监测电阻应变计的应变

量,通过旋转加载轮加载对应载荷。

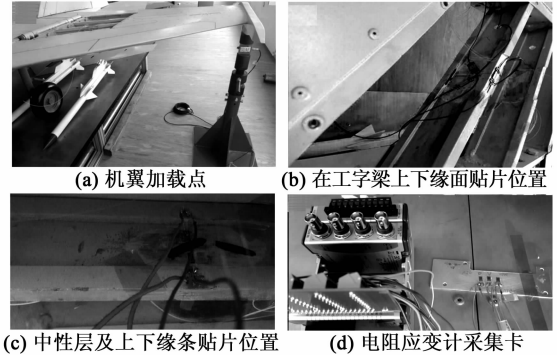


图 7 工字梁测试试验现场

实际飞机机翼工字梁使用航空铝 7075-T6,外界施加载荷所产生的应变值仍处于金属本身的拉伸弹性范围内,否则会损坏机翼结构,降低飞行寿命。本实验用电阻应变计直接对加载应变最大位置——机翼根部进行监控,防止加载过载荷损坏机翼结构。在本次基片式 FBG 应用到工字梁测试工程中,根据基片式光纤光栅传感器与裸光纤光栅传感器应变标定结果,将传感器的中心波长变化量转换为工字梁应变变量,即将基片 FBG 应变灵敏度 0.96 pm/ $\mu\epsilon$ ,以及裸贴式 FBG 应变灵敏度 1.15 pm/ $\mu\epsilon$  应用到式(2)中,其中工字梁上下缘面、中性层及下缘条中心波长分别为 1 526.253 nm、1 530.109 nm、1 536.158 nm、1 548.952 nm,参数如表 2 所示。得到应变随载荷变化的拟合曲线如图 8 所示。

表 2 光纤光栅

编号	中心波长/nm	反射率/%	3 dB 带宽/nm
1	1 526.253	90	0.35
2	1 530.109	90	0.32
3	1 536.158	90	0.34
4	1 548.952	90	0.45

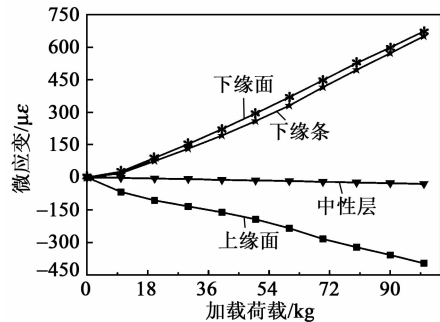


图 8 工字梁各部位应变载荷曲线

由图 8 可知,工字梁在加载初期载荷变化不大,说明机翼根部销钉开始并未完全锁死;随着载荷增加,工字梁的下缘面受到拉伸载荷且与载荷加载呈

线性关系,在载荷 100 kg 时产生应变量为  $673.3 \mu\epsilon$ ;下缘条离中性层较近的位置,应变小于下缘面,在载荷 100 kg 时产生应变量为  $650.9 \mu\epsilon$ ;中性层周围应变几乎为 0,而上缘面受到压缩载荷产生应变量为  $396.5 \mu\epsilon$ ,应变量低于下缘面,这与飞机机翼机构的复杂性有关,机翼本身不是对称结构。测试与工字梁加载有限元分析相吻合。

### 3 结束语

本文针对飞机机翼工字梁结构测量,用 Ansys 有限元软件仿真了机翼工字梁载荷测试,对光纤光栅传感器制作工艺进行探索,并封装出残余拉伸预紧力  $1\ 500 \mu\epsilon$  基片式 FBG 传感器,在 MTS 机上对封装后的基片式光纤光栅应变传感器进行了应变加载测试,最终得出传感器在承受压缩应变  $2\ 200 \mu\epsilon$  内的线性度为 0.996、应变灵敏度为  $0.95 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,且有效地消除了传感器制作的光纤光栅反射谱出现偏峰与啁啾现象,此种基片式封装形式传递效率约为 0.835,有效地提高了测量压缩应变范围。对工字梁上下缘面、中性层及下缘条进行载荷测试,测试结果与仿真吻合。工字梁是飞机机翼结构的关键支撑结构,研究基于光纤光栅测试工字梁力学性能,可提高光纤光栅测量应变的测量范围与测量精度,其结果对飞机机翼结构载荷标定及飞机机翼载荷在线测试具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学,2013,6(3):306-317.  
XU Guoquan, XIONG Daiyu. Applications of fiber Bragg gratingsensing technology in engineering [J]. Chinese Optics,2013, 6(3):306-317.
- [2] 王义平,唐剑,尹国路,等. 光纤光栅制作方法及传感应用[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(5):809-819.  
WANG Yiping, TANG Jian, YIN Guolu, et al. Applications of fiber Bragg grating[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2015,35(5):809-819.
- [3] BERNASCONI A, CARBONI M, COMOLLI L. Monitoring of fatigue crack growth in composite adhesively bonded joints using fiber Bragg gratings[J]. Procedia Engineering,2011,10(7):207-212.
- [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] 安勇龙,叶敦范. 光纤光栅传感器的工作原理和应用实例[J]. 仪器仪表与分析监测,2005(1):5-7.  
AN Yonglong, YE Dunfan. The principle and applied examples of fiber Bragg grating sensor[J]. Instrumentation Analysis Monitoring,2005(1):5-7.
- [6] 孙丽,岳川云,宋岩升. 基片式光纤布拉格光栅传感器应变传递分析[J]. 光电子·激光,2013(5):849-854.  
SUN Li, YUE Chuanyun, SONG Yansheng. Strain transfer analysis of substrate fiber Bragg grating sensor [J]. Journal of Optoelectronics Laser,2013(5):849-854.
- [7] 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.
- [8] TORRES B, PAYÁ-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.
- [9] 丁晨,梁继才,尹艳宁,等. 增强橡胶与金属材料粘接的表面处理技术[J]. 合成橡胶工业,2013,36(5):405-410.  
DING Chen, LIANG Jicai, YIN Yanning, et al. Surface treatment technology for enhancing adhesion between rubber and metal [J]. China Synthetic Rubber Industry,2013, 36(5):405-410.
- [10] 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,2006,46(4):55-70.  
ZHENG Wenlong. GB/T 7314-2005 points of the testing method used for metal materials in compression at ambient temperature[J]. Engineering & Test,2006,46(4):55-70.
- [11] 马清. 某通用飞机机翼结构设计简介[J]. 科技传播,2013(13):76-77.  
MA Qing. A general introduction to the wing structure design of a general aircraft [J]. Public Communication of Science & Technology,2013(13):76-77.
- [12] 李红,祝连庆,刘锋,等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报,2014(8):1744-1750.  
LI Hong, ZHU Lianqing, LIU Feng, et al. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2014(8):1744-1750.