

FBG 传感器在复合材料层合板应变监测中的应用

郭艳丽¹, 叶金蕊¹, 张君一², 高丽敏², 张博明¹, 卿新林²

(1.北京航空航天大学, 北京 100191; 2.中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心, 北京 100191)

摘要: 随着复合材料在航空航天等领域的广泛使用, 复合材料在恶劣环境中失效引起的严重后果越来越突出, 因此复合材料结构健康监测技术显得越发重要, 尤其是无损检测。光纤传感技术是重要的无损检测技术, 本文在详细调研光纤传感技术国内外研究现状的基础上, 介绍了 FBG 传感器的传感机理, 针对完整的及不同预置损伤的层合板, 进行了悬臂梁实验, 得出不同载荷下应变监测结果并与应变片得出的结果进行比较分析, 进一步探索了层合板应变规律及机理, 为复合材料结构关键部位应变状态的实时监测与载荷重构研究奠定了理论基础。结果表明, 光纤光栅能够对复合材料应变实现精密监测, 层合板应变大小与外加载荷成正线性关系, 预置损伤造成的应力集中使层合板损伤部位附近应变增大。

关键词: FBG 传感器; 传感机理; 层合板; 应变监测

Application of FBG Sensors in Composite Laminates Strain Monitoring

GUO Yanli¹, YE Jinrui¹, ZHANG Junyi², GAO Limin²,
ZHANG Boming¹, QING Xinlin²

(1.Beijing University of Aeronautics and Astronautics, No. 37 Xueyuan Road, Haidian District, Beijing 100191, China; 2.Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute of COMAC, Beijing 100083, China)

Abstract: With the extensive use of composite materials in the aerospace and other fields, the serious consequences led by the composite material due to failure in the harsh environment is increasingly prominent, thus composite structural health monitoring technology is increasingly important, especially in non-destructive detecting. Optical fiber sensing technology is an important non-destructive detecting technique. In this paper, based on the detailed research on the research status of optical fiber sensing technology, the sensing mechanism of FBG sensor was introduced, and the scheme for the FBG sensor monitoring the strain of laminates was designed. For the complete laminate and ones with preset damage, cantilever experiments were taken under different loads, then the obtained strain monitoring results were compared with the results obtained from the strain gages, both the results were analyzed to further explore the regularity and mechanism of strain of laminates, So this paper laid theoretical foundation for the real-time monitoring of the strain state and load reconfiguration of key parts of the composite structure. The results shows that the FBG sensors can monitoring the strain of composite precisely, the strain of

作者简介: 郭艳丽, 硕士在读研究生, 从事分布式光纤及光纤布拉格光栅在复合材料结构健康监测方面的应用研究;
Email: gylno1@126.com

laminates shows a positive linear relationship with the applied loads, and the stress concentration caused by preset damage increases the strain near the damage.

Keywords: FBG Sensor, Sensing Mechanism, Laminates, Strain Monitoring

随着高性能复合材料在航空、航天、船舶、民用工程等各个领域的广泛应用, 复合材料在恶劣的环境中易发生失效和破坏的问题日益突出, 从而使得结构健康监测技术显得越发重要。从 70 年代美国将光纤传感器埋入复合材料至今, 经过将近 30 年的发展, 光纤传感技术在复合材料结构健康监测领域已经有了充分的发展^[1]。将光纤光栅传感器贴在结构表面或者植入其中与结构形成整体, 然后通过传感器响应就可以得到结构的完整信息从而可以评估工程结构的安全性和完整性。

目前已经能够利用光纤传感器对复合材料的应力、应变、温度、固化度、振动、损伤与断裂等进行实时监测。在复合材料的诸多参数中, 利用嵌入式光纤传感器对其应变监测的研究进行的最为充分, 发展出的方法最多。与传统的传感器相比, 光纤光栅具有体积小^[2]、波长选择性好、不受非线性效应影响、偏振不敏感、易于与光纤连接、便于使用和维护、带宽宽、附加损耗小、耦合性好等诸多优点, 并且其制作工艺比较成熟, 易于形成规模生产, 成本低, 因此具有良好的实用性^[3]。

1 FBG 的传感原理

布拉格光栅是通过在光纤纤芯上写入规则的布拉格光栅, 使本来沿光纤轴线均匀分布的折射率产生周期性大小起伏的变化, 从而对入射的宽带光进行选择性的反射^[4]。通过对写入光栅反射或者透射光谱的检测, 实现被测结构温度或应变的测量^[5, 6], 其传感原理如图 1 所示^[7]。

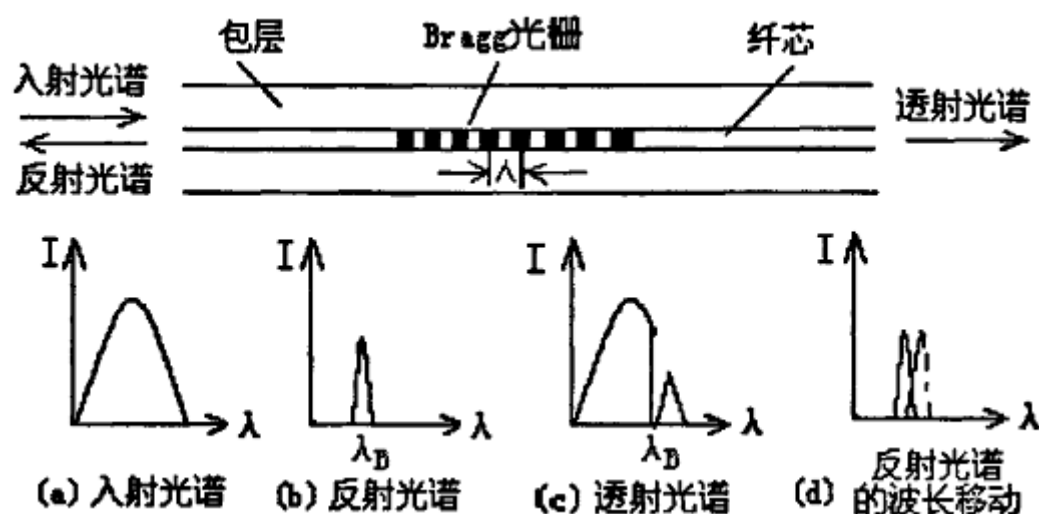


图 1 FBG 的传感检测原理

当光波传输通过光纤布拉格光栅时, 满足 Bragg 光栅波长条件 (见公式 1)^[8]的光波矢将被反射回来, 这样入射光栅波矢就分成两部分, 透射光波矢和反射光波矢。

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

λ_B 为光栅的布拉格波长, n_{eff} 为光栅的有效折射率(折射率调制幅度大小的平均效应), Λ 为光栅条纹周期(折射率调制的空间周期)。

从公式 (1) 可以看出, FBG 波长取决于光栅条纹周期和反向耦合模的有效折射率。在引起 FBG 波长漂移检测的外界因素中, 最直接的为应力、应变参量。对光栅进行拉伸或者挤压, 都引起光栅条纹周期的变化, 并且光栅本身所具有的弹光效应使有效折射率也随外界应力状态的变化而变化^[7]。假设光纤光栅仅

受轴向应变作用，温度保持不变，应变引起 FBG 波长漂移为：

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon \quad (2)$$

K_ε 是 FBG 的温度灵敏度系数，材料确定后， K_ε 基本上为与材料系数相关的常数，所以 FBG 应变传感器具有很好的线性输出。

2 实验

2.1 实验仪器

实验采用美国 MICRON OPTICS INTERNATIONAL 公司 SI425 光纤光栅解调仪。SI425 是一个大功率、高速度、多传感器的测量系统，主要为力学传感应用进行改进。SI425 具有高功率快扫描（达 250Hz），4 根光纤上可连多达 512 个传感器，向 FBG 通光 4 个探测器可同时测量每根光纤反射回的光信号。

2.2 实验原材料

使用 5428/T700 预浸料通过热压罐工艺制作的复合材料层合板，将层合板切割成四块，尺寸为 300mm × 35mm，编号为 A1、A2、A3、A4，样条上预置损伤的孔数依次为 0、1、2、3。其中，预置损伤孔沿层合板纵向从中心向两边对称分布，孔直径为 6mm，两孔之间的距离为 26mm。

图 2 给出了 A4 试验件的实物图片，图 3 为 A1 试验件 FBG 和应变片的粘贴位置。



图 2 A4 试验件照片

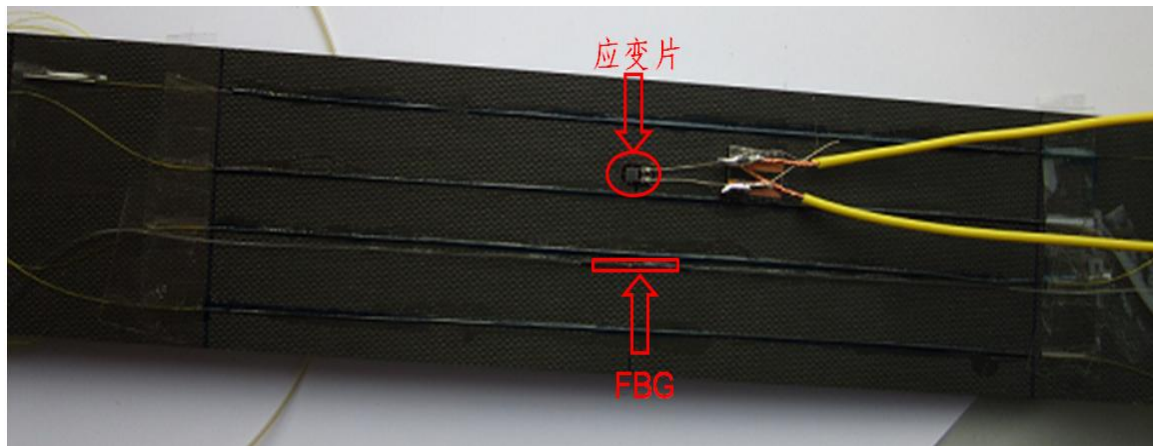


图 3 A1 试验件 FBG 和应变片位置标注

2.3 加载实验

将层合板一端夹持固定，另一端分别施加 100g、200g、500g、1000g 的载荷，待层合板稳定后，用光纤光栅和应变片同时测定其应变。

3 实验结果分析

图 4 为四个试验件 FBG 与应变片监测结果，图 4 (a)、(c)、(d) 均显示 FBG 传感器与应变片测量结果相符，说明 FBG 测量结果是准确可靠的。同时可以看出，无论预置损伤情况如何变化，层合板应变与载荷均呈正线性关系。

由于进行的是悬臂梁实验，层合板横向受力均匀，纵向所受力距从夹持区到加载区逐渐变化，所以应变沿层合板纵向逐渐变化。粘贴在 A2 试验件上的两个光栅在试验件纵向有一定距离，所以其应变监测结果有差距，并且随着载荷增大，层合板应变越来越大，两个光栅应变监测结果差距也越来越大。这也很好的解释了图 4 (a) 中 FBG 与应变片、图 4 (c) 中 FBG2 与 FBG1、应变片所得曲线逐渐远离的原因。

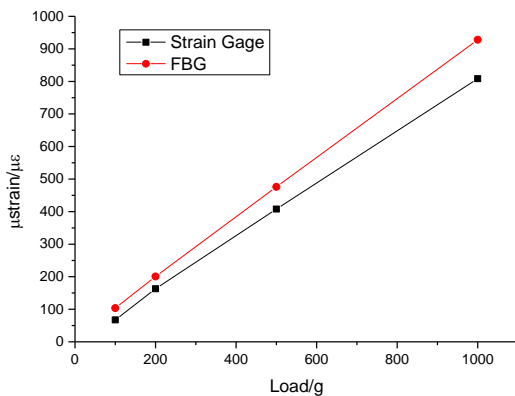


图 4 (a) A1 应变随载荷的变化

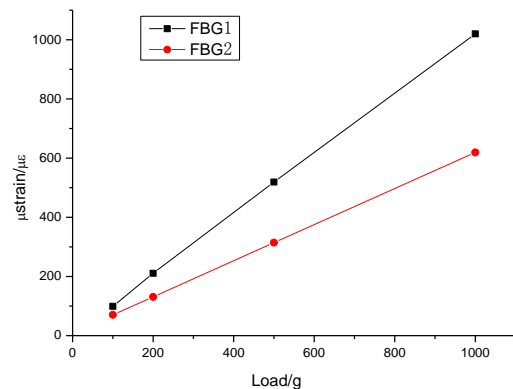


图 4 (b) A2 应变随载荷的变化

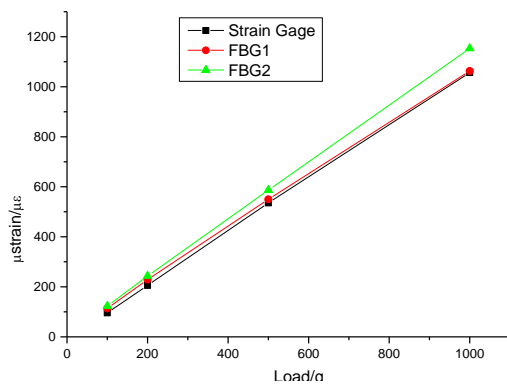


图 4 (c) A3 应变随载荷的变化

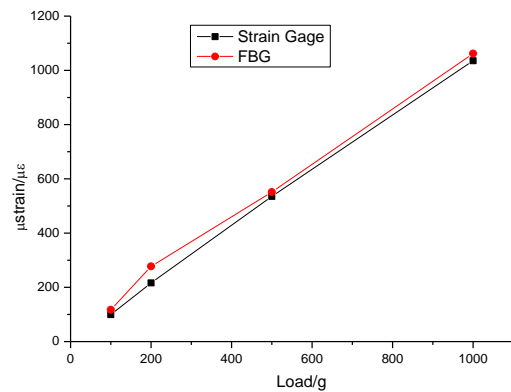


图 4 (d) A4 应变随载荷的变化

四个试验件同一位置的 FBG 监测结果（见图 5）显示，随着预置损伤个数的增加，应变结果呈现增大的趋势，这主要是由于层合板结构缺陷造成的应力集中效应使孔附近应变急剧增大，四个试验件中光栅均粘贴在孔附近，所以相同载荷下，不同层合板的同一位置应变随着孔的个数增加而增大。

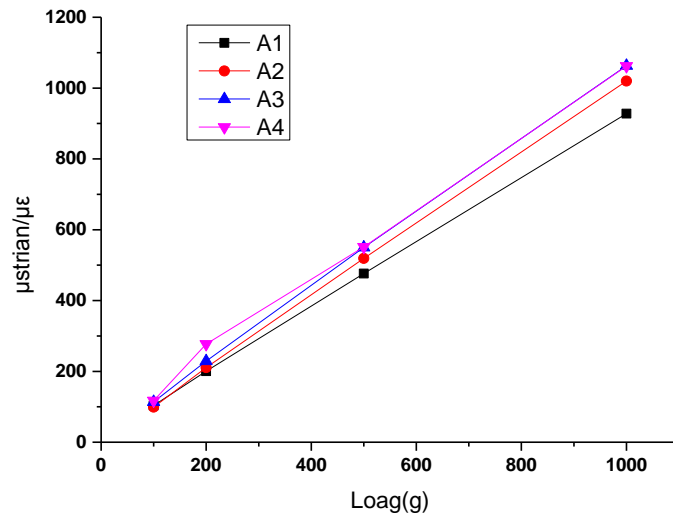


图 5 四个试验件相同位置应变结果

4 结论

本文采用 FBG 传感器测量了复合材料层合板在不同载荷下的应变变化, 由测量结果分析了层合板的应变变化规律, 并初步探索了其应变机理。通过将 FBG 测试结果与应变片测量结果进行对比分析, 可以确定 FBG 传感器能够胜任对复合材料应变的精确测量。层合板应变随载荷的增加而线性增大, 在缺陷附近由于应力集中效应应变增大, 同种缺陷数量越多, 应变越大。

参考文献

- [1] Wang T J, Wu C H, Lee L J. In—plane Pemeability Measurement and AnalysisIn Liquid Composite Molding[J]. Polymer Cornposites, 1994, 15(4): 278—2686.
- [2] Jaureguic, Quintelaa, Lopez-Higuera Jm. Interrogation unit for fiber Bragg grating sensors that uses a slanted fiber grating[J]. OptLett, 2004, 29(7): 676-678.
- [3] 雷飞鹏, 宁提纲, 周倩, 等. FBG 传感器封装技术的进展[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2010, 3: 1-4.
- [4] 陈宏伟, 李炜. Bragg 光栅传感器在复合材料加工与检测中的应用[J]. 纤维复合材料, 2009, 26(3): 26-28.
- [5] 姜德生, Richard O C. 智能材料器件结构与应用[M]. 武汉工业大学出版社, 2000.3.
- [6] 梁磊, 姜德生, 等. 光纤 Bragg 光栅传感器在桥梁工程中的应用[J]. Optics&Optoelectronic Technology, 2003, 2(1): 36-39.
- [7] 王艳妮. 复合材料 FBG 传感器的设计理论与工艺研究[D]. 武汉理工大学, 2008 年.
- [8] Hill K O, Miltz G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview[J], J. of Lightwave Tech, 1997, 15(8): 1265-1276.

(责任编辑 李宏福)