

文章编号: 1001-4888(2016)04-0475-08

光纤光栅传感网络应用于玻璃纤维 复合材料构件损伤检测的试验研究^{*}

陈堃, 朱启荣, 沈维亮

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要: 将光纤光栅传感网络埋入玻璃纤维复合材料试件后, 通过无损试件与有损试件的准静态弯曲对比试验研究, 分析了测量过程中反映损伤位置以及损伤程度的光纤光栅参数。然后使用 ANSYS 有限元软件对其进行数值模拟计算, 并将数值模拟的结果与试验测得的结果相对比, 验证了应用光纤光栅传感网络利用准静态加载方法测量损伤的可行性以及准确性。本文研究结果可为利用 FBG 光纤传感网络对实际工程中复合材料结构的在线健康监测提供实验基础。

关键词: 光纤光栅传感器; 玻璃纤维; 弯曲试验; 损伤测量

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-15-189

0 引言

碳纤维、玻璃纤维等复合材料在航天航空领域已经得到了广泛的应用, 纤维加强复合材料结构在生产与使用过程中会产生一些缺陷与损伤, 工艺技术不完备或者由各种应力造成的疲劳是复合材料出现损伤的主要原因^[1,2]。如何通过一定的监测手段和分析方法对结构进行检测与评估, 以确定结构是否有损伤存在, 进而判别损伤的位置和程度, 以及结构的现状、使用功能和变化趋势等, 是一个具有重大意义的问题^[3,4]。布拉格光纤光栅传感器(Fiber Bragg Grating, FBG)是一种新型的传感技术, 与传统的电测传感器相比, 它有更好的稳定性、抗干扰性与耐久性, 并且在航空航天领域中, 光纤光栅传感器可以大量埋入飞行器, 形成一个神经网络。常见的航空航天复合材料无损检测方法有涡流法、射线检测法、超声波检测法等, 但是每种方法都相对有其局限性, 比如涡流法只适用于导电的材料; 射线检测法效率较低; 超声波检测法适用于较厚的试件等。布拉格光纤光栅传感器由于体积小、质量轻、信号稳定、与复合材料的相容性好等优点, 近年来成为监测复合材料的首选传感器。采用内置光纤光栅传感器实时监测复合材料结构的健康状态是复合材料结构无损检测技术的重要发展趋势^[5-7]。然而, 在布置传感器时, 传感器布置数量太多, 虽然可以对复合材料构件进行全面的在线监测, 但是成本代价太高且有些数据利用价值不大, 不经济; 若传感器布置太少, 采集数据不够, 则对复合材料构件内部应力状态和损伤状况的掌握就显得比较粗糙。因此 FBG 传感器网络的合理布置对实现智能复合材料在线监测有重要意义^[8-11]。

FBG 的折射率呈固定的周期调制分布, 调制深度与光栅周期均为常数, 光栅波矢方向与光线轴线方向一致, 作为传感单元, FBG 的调制信息为波长编码的状态测量, 如图 1 所示。

^{*} 收稿日期: 2015-10-12; 修回日期: 2016-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(112272239); 国家自然科学基金重点项目(11532005); 上海市自然科学基金(15ZR1443900)

通讯作者: 朱启荣(1976—), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 实验力学及其信息处理, 光纤传感器的工程应用。Email: zhuqr@tongji.edu.cn

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

式中, $\Delta\lambda_B$ 为中心波长的变化量; Λ 为光栅周期; n_{eff} 为光栅折射率。上式表明, 光栅周期 Λ 和折射率 n_{eff} 的任何变化过程都能引起光纤 Bragg 中心波长的漂移。在所有能引起光纤 Bragg 中心波长漂移的外界因素中, 应变和温度是两个最基本且能够被直接测量的参量。

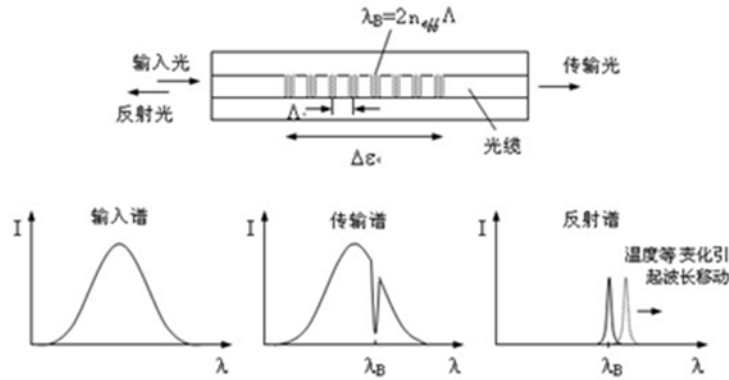


图 1 光纤 Bragg 光栅传感原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Optical Fiber Bragg Grating Sensor

本文将光纤光栅传感器埋入玻璃纤维复合材料试件后进行无损试件以及预设人工损伤试件的弯曲试验, 将测量数据与 ANSYS 有限元数值模拟计算结果进行对比, 探索了通过准静态测试方法应用光纤光栅网络测量玻璃纤维复合材料构件损伤的可行性。

1 试件制备及试验过程

本文光纤光栅传感器(四传感段)分为 4 组, 每组 2 根, 中心波长范围为 1529nm~1559nm, 栅区之间距离公差 3mm, 即 33mm±3mm。

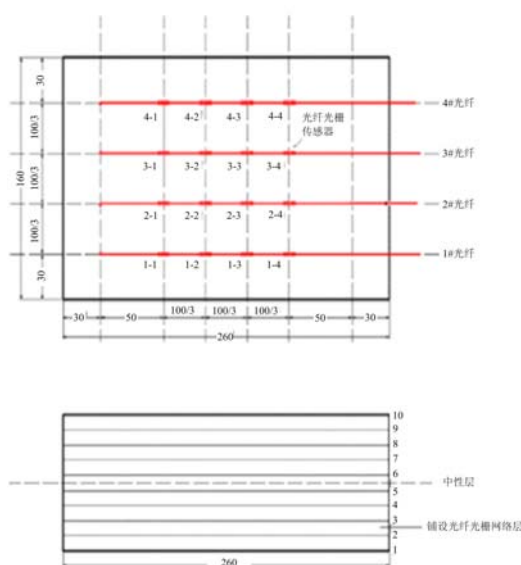


图 2 无损试件测点布置图

Fig. 2 Measuring point layout of intact specimen

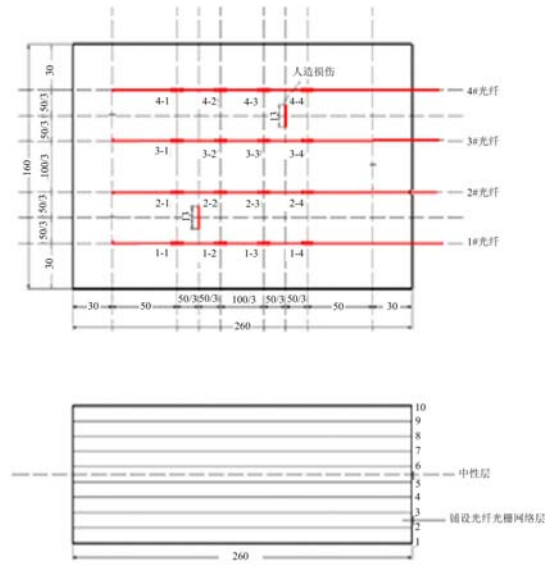


图 3 有损试件测点布置图

Fig. 3 Measuring point layout of damage specimen

本文采用真空袋压法进行试件的制作。分别设计了 4×4 光纤光栅网络布置的无损与有损试件共两块。在试件监控区域布置的传感网络相对于试件横轴和纵轴均为对称结构, 为后面的损伤判定提供便利。试件的尺寸都取为 240mm×160mm×5mm, 铺层情况为单数层为 0°, 偶数层为 90°。并且在玻璃纤维复合材料试件 2~3 层中埋入封装 FBG 传感网络, 4 条光纤光栅传感器均有 4 个光栅, 按照顺序

依次连接解调仪的1~4号通道,如图4所示。试验测点布置如图2和图3所示,其中人造损伤是指在板中特定位置通过割断一定长度的玻璃纤维布模拟实际复合材料构件纤维断裂的情况,最终成型试件如图5所示。每块试件在做弯曲试验时,利用未受力试件内埋设的FBG传感器作温度补偿。试验加载装置是100kN电子万能试验机。弯曲试验压头长度为160mm,试件跨距为200mm,加载速度为0.5 mm/min,本试验属于准静态试验,采样频率设为1Hz,试件加载及试验现场如图6所示。

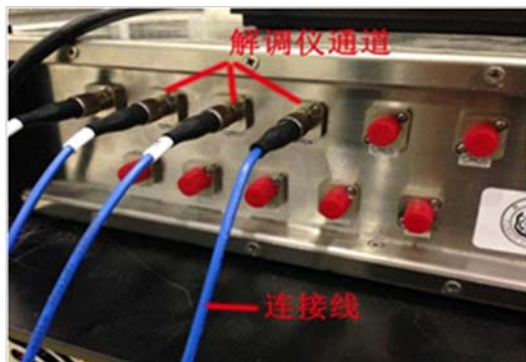


图4 解调仪通道连接

Fig. 4 Demodulator channel connection

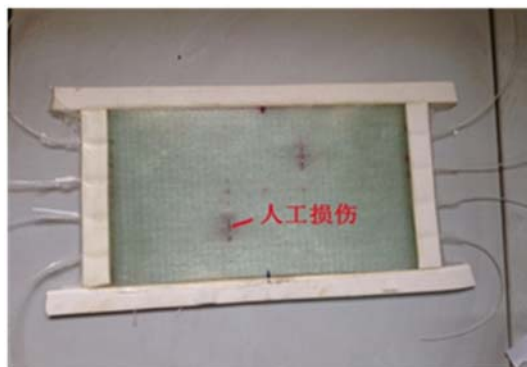


图5 有损试件

Fig. 5 Damage specimen

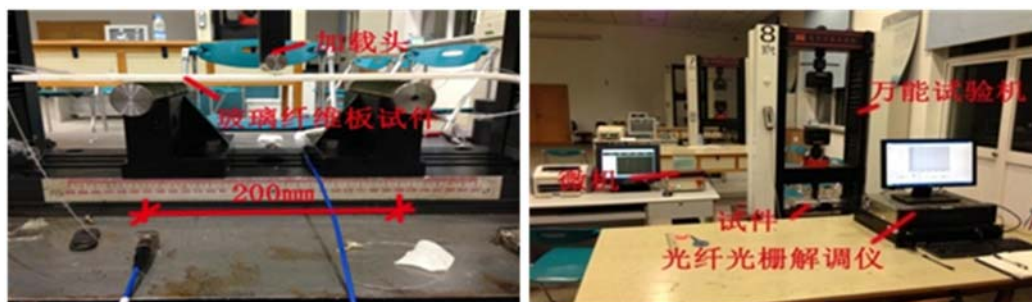


图6 试件加载及试验现场

Fig. 6 Specimens loaded and the experiment site

2 损伤检测试验及数据分析

对玻璃纤维复合材料板进行从0~1500N的加载试验,试验一共重复3次,进行一次预加载,每次卸载后,稳定5min继续加载,选取稳定后两次试验数据作为参考值,无损与有损试件各测点的应变图如图7、图8所示,加载至1500N时各光纤光栅测点的应变值及误差分析见表1和表2。

从图7中可以看出,对于4×4无损试件,在加载过程中,各光纤光栅呈现很好的线性关系,并且布置位置关于试件中心轴相对称的各组光纤光栅传感器,其应变曲线几乎重合,大小相等,符合理论分析规律。例如1-1测点与1-4测点、1-2测点与1-3测点、2-1测点与2-4测点、2-2测点与2-3测点等位置处光纤光栅所测得的应变曲线也几乎重合,相对而言,图6(a)中的对称位置1-2测点与1-3测点的斜率稍有不同,可以计算出,最大相对误差为 $(1040.3 - 1006.6) / 1023.5 = 3.3\%$,小于5%,在允许范围之内。

如图8所示,总的可以看出,对于4×4有损试件,在加载过程中,各光纤光栅也呈现很好的线性关系,在损伤位置周边的光纤光栅所测得的数据应变曲线斜率明显增大,应变绝对值也相对较大。对于4×4有损试件,通过观察图8(a)、(b)、(c)、(d)可知,靠近损伤位置处光纤光栅测量的应变曲线斜率明显增大,应变相对也较大,测量数据呈现很好的中心对称关系,损伤位置处应变较大,表1中处于中心对称位置的1-4测点与4-1测点应变分别为 $595.3\mu\epsilon$ 与 $601.2\mu\epsilon$,非常接近,其他测点也有同样的规律,与理论分析相符。

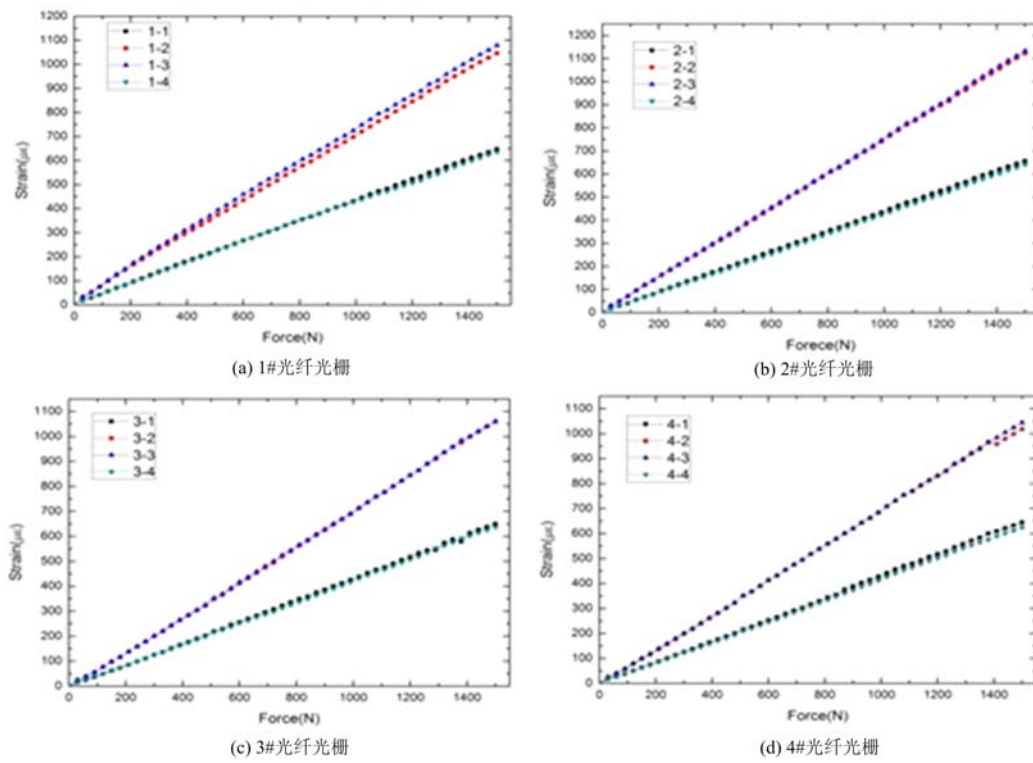


图 7 4×4 无损试件光纤光栅应变图
Fig. 7 Curve of force-strain of 4×4 intact specimen

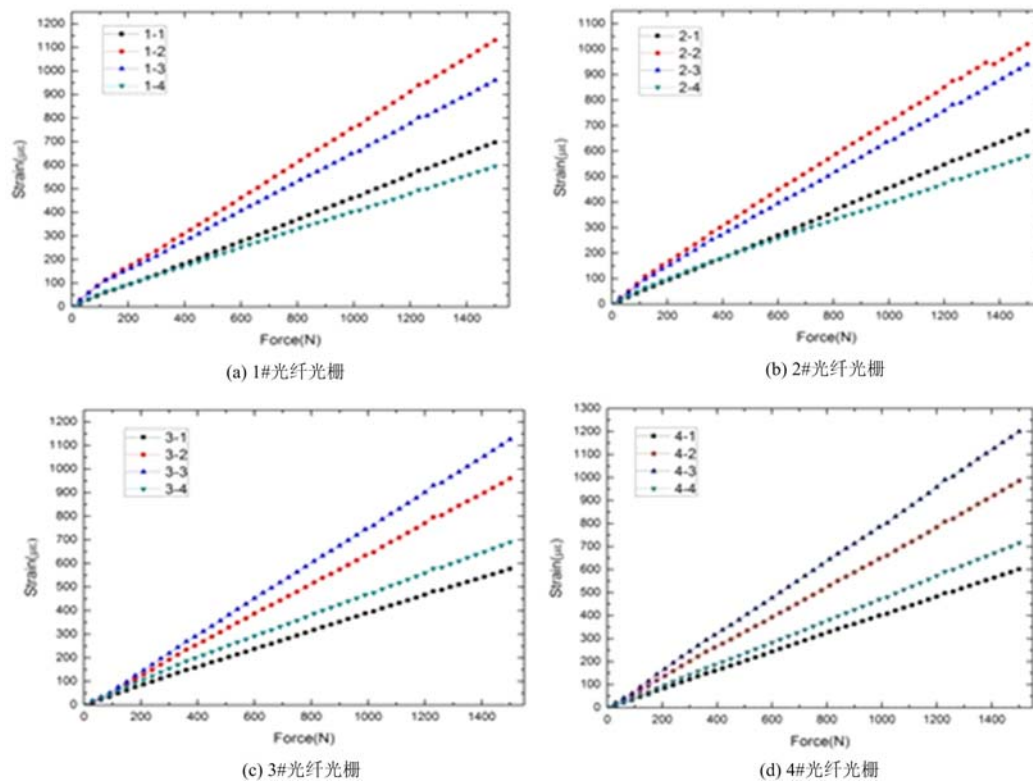


图 8 4×4 有损试件光纤光栅应变图
Fig. 8 Curve of force-strain of 4×4 damage specimen

表 1 4×4 无损试件 FBG 传感网络与有限元结果对比

Tab. 1 The experimental results of 4×4 intact specimen compared with the results of ANSYS

传感器	第一次加载 ($\mu\epsilon$)	第二次加载 ($\mu\epsilon$)	平均值 ($\mu\epsilon$)	ANSYS 结果 ($\mu\epsilon$)	绝对误差 ($\mu\epsilon$)	相对误差 (%)
1-1	623.9	623.0	623.5	620.1	3.4	0.5
1-2	1007.1	1006.1	1006.6	1023.5	16.9	1.7
1-3	1041.7	1038.9	1040.3	1023.5	16.8	1.7
1-4	612.2	611.6	612.2	620.6	8.4	1.4
2-1	634.2	633.0	633.6	628.3	5.3	0.8
2-2	1084.9	1083.1	1084.0	1071.0	13	1.3
2-3	1095.6	1093.5	1094.6	1071.0	23	2.1
2-4	618.4	616.4	617.4	628.3	10.9	1.7
3-1	627.8	626.2	627.0	628.3	1.3	0.2
3-2	1019.1	1019.3	1019.2	1071.0	51.8	4.8
3-3	1022.4	1021.4	1021.9	1071.0	49.1	4.6
3-4	614.6	614.5	614.6	628.3	13.7	2.2
4-1	620.3	619.5	619.9	620.5	0.6	0.1
4-2	978.7	978.3	978.5	1023.5	45	4.4
4-3	1005.5	1004.3	1004.9	1023.5	18.6	1.8
4-4	601.7	600.7	601.2	620.6	19.4	3.1

表 2 4×4 有损试件 FBG 传感网络与有限元结果对比

Tab. 2 The experimental results of 4×4 lossy specimen compared with the results of ANSYS

传感器	第一次加载 ($\mu\epsilon$)	第二次加载 ($\mu\epsilon$)	平均值 ($\mu\epsilon$)	ANSYS 结果 ($\mu\epsilon$)	绝对误差 ($\mu\epsilon$)	相对误差 (%)
1-1	697.2	696.2	696.7	672.8	23.9	3.6
1-2	1130.5	1130.1	1130.3	1091.6	38.7	3.5
1-3	960.5	959.5	960.0	1034.4	74.4	7.2
1-4	595.7	594.9	595.3	627.1	31.8	5.1
2-1	679.5	677.3	678.4	654.0	24.4	3.7
2-2	1020.6	1019.4	1020.0	1074.3	54.3	5.1
2-3	941.0	939.6	940.3	1023.4	83.1	8.1
2-4	581.9	578.9	580.4	624.5	44.1	7.1
3-1	577.9	576.1	577.0	625.6	48.6	7.8
3-2	960.5	959.5	960.0	1026.8	66.8	6.5
3-3	1126.1	1125.3	1125.7	1077.0	48.7	4.5
3-4	690.8	689.6	690.2	658.8	31.4	4.8
4-1	601.6	600.8	601.2	627.3	26.1	4.2
4-2	986.1	984.5	985.3	1032.3	47.0	4.6
4-3	1180.5	1179.5	1180	1090.0	90.0	8.3
4-4	715.8	715.0	715.4	668.3	47.1	7.0

综上所述,损伤试件准静态弯曲试验中可以通过光纤光栅所测量位置的应变绝对值、应变变化量以及应变曲线斜率的大小来很好地识别损伤,证明了通过准静态测试方法采用光纤光栅网络测量复合材料构件损伤的可行性。

3 数值分析对比

本节将利用 ANSYS 有限元软件对无损与有损的玻璃纤维复合材料板进行数值模拟,得出最大荷载作用下玻璃纤维板的光纤方向应变云图。复合材料层单元选用 Shell99,玻璃纤维层合板材料参数如表 3 所示。利用 ANSYS 建立 10 层纤维板模型,边界条件为简支,加载装置的压头长度为 160mm,最大荷载为 1500kN,加载在模型中心线各节点上。

表 3 玻璃纤维复合材料参数

Tab. 3 The parameters of glass fiber composite material

E_x (GPa)	E_y (GPa)	E_z (GPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	G_{xy} (GPa)	G_{xz} (GPa)	G_{yz} (GPa)
52	4	4	0.2	0.2	3.76	3.76	2.5

实际试件中光纤光栅埋设于第二层与第三层之间,光纤光栅应变值直接反映了 10 层纤维板模型中第二层顶面或者第三层底面应变值(二者相等),各试件截面 X 轴应变强度云图如图 9 与图 10 所示。将最大荷载值时的试验数据与有限元模拟数据进行对比,分别如表 1 和表 2 所示。

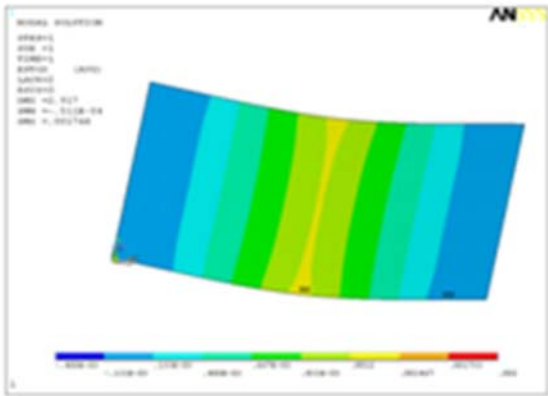


图 9 4×4 无损试件 X 轴应变云图
Fig. 9 The X axis strain of 4×4 intact specimen

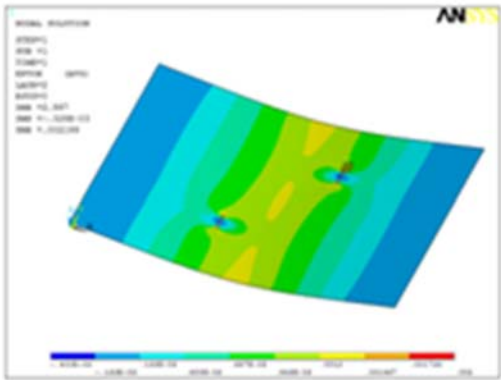


图 10 4×4 有损试件 X 轴应变云图
Fig. 10 The X axis strain of 4×4 lossy specimen

图 9 为 4×4 的 X 方向应变云图,取自 10 层复合材料板模型中的第三层底部应力分布云图。从图中可以看出,无损板的应力分布具有上下、左右几何对称性,并且应力有从两端往中间呈现递增的趋势,与理论分析相符。从图 10 损伤试件的 X 方向应变云图可以看出,在损伤位置处有明显的应力集中现象,尤其在矩形损伤位置的两个端头显得格外明显,应变分布总体呈现中心对称,并且在损伤位置应变较大。

从表 1 和表 2 可以看出,两次加载应变误差在 $5\mu\epsilon$ 之内,说明 FBG 传感网络测量复合材料内部应变具有良好的稳定性与重复性。与 ANSYS 数值模拟结果对比,对于无损试件从表 1 可以看出,相对误差在 0.1%~4.8%之间,对于有损试件从表 2 可以看出,相对误差在 3.5%~8.3%之间。主要原因在于试件在人工损伤制作过程中,由于工艺问题,损伤位置处会产生额外的加工损伤,也就是除了试验制定时的预定损伤外,在加工过程中其周围又会产生额外的应力集中现象,误差较大的点基本都分布于损伤附近。

4 总结

本文主要通过无损试件与有损试件的准静态弯曲对比试验研究,得到结论如下:

(1) 通过无损与有损试件的弯曲试验,可以看出在加载过程中,各光纤光栅测试数据呈现很好的线性关系,并呈现很好的中心对称关系,而在损伤位置处应变值异常,与理论分析相符。通过分析,试验中可以通过光纤光栅所测量的应变绝对值、应变曲线斜率的大小来很好地推断出损伤位置。

(2) 通过 ANSYS 有限元数值模拟计算结果对比发现,相对于无损试件,有损试件的误差稳定在相对较大的区间范围之内,主要原因是在试件在人工损伤制作过程中,由于工艺问题,损伤位置处会产生额外的应力集中现象,但是对于复合材料结构而言,FBG 传感器监测到的层间应变与理论计算值的相对误差不超过 10%,是完全可以接受的。

(3) 若在光纤光栅解调仪的内部集成数据传输模块,那么光纤光栅解调仪可以将采集到的数据通过该模块向事先指定的目标点主动发送内容,这样可以对实际工程结构的健康状态实现远程监测。

参考文献:

- [1] Timoshenko S, Goodier J N. Theory of elasticity (second ed)[M]. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1951:372—82.
- [2] 李伟. 结构损伤识别技术的发展现状与展望[J]. 山西建筑, 2008, 34(8):66—67 (LI Wei. The development present situation and prospect of structural damage identification technology[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(8):66—67(in Chinese))
- [3] 朱启荣, 沈维亮, 解明如等. 基于准分布式 FBG 传感器的均质材料内部应变测试的试验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(4):475—480 (ZHU Qirong, SHEN Weiliang, XIE Mingru, et al. Experimental study on strain measurement of homogeneous materials based on quasi distributed FBG sensors[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(4):475—480 (in Chinese))
- [4] 于秀娟, 余有龙, 张敏等. 光纤光栅传感器在航空航天复合材料/结构健康监测中的应用[J]. 激光杂志, 2006, 27(1):1—3 (YU Xiujian, YU Youlong, ZHANG Min, et al. Application of fiber Bragg grating sensors in the health monitoring of aerospace composite materials and structures[J]. Laser Journal, 2006, 27(1):1—3 (in Chinese))
- [5] Wolfgang E, Stephan G. Optical fiber grating sensor network basing on high-reliable fiber and components for space-craft health monitoring [C]. SPIE, 2004, 3986:134—143.
- [6] 杨建良, 郭照华, 向清等. 智能复合材料内光纤的埋置技术[J]. 纤维复合材料, 1998, 15(1):33—35 (YANG Jianliang, GUO Zhaozhua, XIANG Qing, et al. Embedded technology of optical fiber in smart composite material [J]. Fiber Composites, 1998, 15(1):33—35 (in Chinese))
- [7] Ecker W, Latka L, Willsch R, et al. Optical fiber grating strain sensor network for X-38 spacecraft health monitoring [J]. Proceedings of International Society for Optical Engineering, 2000, 4185:888—891.
- [8] 陈长征, 罗跃纲. 结构损伤监测与智能诊断[M]. 北京:科学出版社, 2001(CHEN Changzheng, LUO Yuegang. Structural damage monitoring and intelligent diagnosis[M]. Beijing: Science Press, 2001(in Chinese))
- [9] 滕军, 卢伟. 基于多类型传感器信息的结构损伤识别方法[J]. 东南大学学报, 2010, 40(3):538—540 (TENG Jun, LU Wei. Structural damage identification method based on multi sensor information[J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(3):538—540(in Chinese))
- [10] 常琦, 袁慎芳, 苗苗等. 基于布拉格光纤光栅的碳纤维壁板损伤监测研究[J]. 中国工程机械, 2009, 20(1):64—67 (CHANG Qi, YUAN Shenfang, MIAO Miao, et al. Damage monitoring of carbon fiber panel based on Prague fiber grating[J]. China Construction Machinery, 2009, 20(1):64—67(in Chinese))
- [11] 张悦华, 程开东. 结构缺损的识别[J]. 吉林工业大学学报, 1999, 29(2):67—72 (ZHANG Yuehua, CHENG Kaidong. Identification of structural defects[J]. Journal of Jilin Polytechnic University, 1999, 29(2):67—72 (in Chinese))

Experimental Research on Damage Detection of Glass-fiber Composite Materials with FBG Sensing Network

CHEN kun, ZHU Qi-rong, SHEN Wei-liang

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: After fiber Bragg grating (FBG) sensing network is embedded into glass fiber composite specimens, through comparative experimental study of quasi-static bending between nondestructive and lossy specimens, the analyses of fiber Bragg grating parameters, which reflect damage position and damage degree in measurement process, was carried out. Then, ANSYS finite element software was used for numerical simulation and the results of numerical simulation was compared with that from experimental measurement. Then, the feasibility and accuracy of FBG sensing network method applied to damage monitoring of composite material specimen were verified. Above results may provide an experimental basis for online health monitoring of composite structure in practical engineering.

Keywords: Fiber Bragg grating (FBG) sensor; glass fiber; bending test; damage measurement