

外贴啁啾光栅监测带双缺口复合材料静态拉伸损伤

卢少微 张海军 李朝华 王继杰

(沈阳航空航天大学航空航天工程学部 辽宁省光纤传感工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110136)

摘要 啁啾光栅对沿其纵向的非均匀应变分布十分敏感,这种特性会反映在啁啾光栅的反射光谱图中。提出了一种利用外贴啁啾光栅监测带双缺口碳纤维复合材料损伤的新技术。实验结果表明,复合材料结构静态拉伸应变为 $4500\ \mu\epsilon$ 与 $8500\ \mu\epsilon$ 时,啁啾光栅反射光谱变化明显,这与复合材料应力-应变关系曲线在应变 $8000\ \mu\epsilon$ 时产生突变完全吻合,同时光栅反射光谱光强突变点位置与光栅几何位置完全一致,可实现对复合材料缺口位置损伤的定位及扩展监测。

关键词 测量;啁啾光栅;带双缺口复合材料;反射光谱;损伤

中图分类号 O439;TG249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1105004

Damage Monitoring of the Double-Notched Carbon Fiber Reinforced Polymers with Surface Bonded Chirped Fiber Bragg Grating Sensor

Lu Shaowei Zhang Haijun Li Zhaohua Wang Jijie

(Centre of Optical Fiber Sensing Technique Engineering of Liaoning Province, Department of Aerospace, Shenyang Aerospace University, Shenyang, Liaoning 110136, China)

Abstract Chirped fiber Bragg grating (CFBG) sensors are sensitive to a non-uniform strain distribution along their longitudinal directions, and this effect is manifested in the power spectrum of the reflected light from the gage section. This paper describes a novel technique to monitor the damage of double-notched carbon fiber reinforced polymers (CFRP) lamination using the surface bonded CFBG sensor. The experimental results show that the reflection spectra of the CFBG sensor change distinctively within certain wavelength when the static strains of CFRP reach to $4500\ \mu\epsilon$ and $8500\ \mu\epsilon$, which coincides with the strain change point of $8000\ \mu\epsilon$ in stress-strain relationship curve of CFRP laminates. The sudden change points of the reflected spectra have an one-to-one correspondence with the location of CFBG. So the proposed approach is useful for predicting the damage states and location of the notch in composite laminates.

Key words measurement; chirped fiber Bragg grating; double-notched carbon fiber reinforced polymers; reflected spectrum; damage

OCIS codes 350.2770; 160.2290; 240.5698; 350.1820

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器的波长位移对温度和应变响应十分灵敏,当光栅部分处于均匀应变场时,因为光栅周期与有效光折射指数在沿光栅长度方向是均匀变化的,反射光谱形状保持其原有的窄波形状,但当光栅处于非均匀应变场时,非均匀应

变分布会引起光栅反射光谱(可以用波长、波宽、光强、多峰等光谱参数的变化来表征)变形^[1,2]。

通过测量光栅反射光谱可对非均匀应变场进行监测和表征,而复合材料结构中产生的非均匀应变场往往是由各种损伤(包括分层、横向裂纹等)引起的。国外学者利用均匀 FBG 的内传感特性监测复

收稿日期: 2012-06-11; **收到修改稿日期**: 2012-08-01

基金项目: 基础科研项目,航空科学基金(2009ZA54001),中国博士后基金(20090450882),沈阳科学计划项目(F11-237-1-00, F11-264-1-26)和辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2011018)资助课题。

作者简介: 卢少微(1973—),男,博士,副教授,主要从事光纤智能材料与结构健康监测等方面的研究。

E-mail: shaowei9132@sina.com

合材料损伤问题。英国 Ussorio 等^[3]将均匀 FBG 传感器埋入玻璃纤维正交层板,监测非轴向层基体开裂。裂纹形成后,光谱形状变为铃型,长波长一侧光谱变宽,随应变增加,长波长一侧反射光谱的第二反射峰更加明显。日本 Takeda 等^[4,5]通过预埋小芯径 FBG 传感器检测分层,光纤光栅被埋入 0° 和 90° 纤维层间,通过建立分层带端部位置与反射光谱关系,来检测分层进展。复合材料机翼结构耐久性实验研究表明,FBG 反射光谱形状会被复合材料内部非均匀应变场改变,由 FBG 反射光谱可推测复合材料的不可见损伤^[6]。Y. Okabe 等^[7]通过 FBG 传感器监测碳纤维复合材料(CFRP)正交层板 90° 层横向裂纹,研究表明 FBG 传感器反射光谱形状被横向裂纹改变,随横向裂纹密度增加,光谱变宽且出现了很多反射峰,光谱可作为横向裂纹密度实时定量评估的指示器,由光谱宽度可定量评估横向裂纹密度。香港理工大学 Ling 等^[8]在端边切口(ENF)实验中,通过埋入 FBG 传感器监测沿不同厚度方向分层的复合材料层板梁的 II 型屈服行为。通过分析 FBG 反射光谱的漂移、形状、波形宽度与光强变化,

监测复合材料不同位置分层的损伤。近年来国内很多学者开展了基于光栅反射光谱的损伤监测及重构的算法研究^[9-11]。

啁啾光栅(CFBG)传感器是一种光栅周期单调分布的特殊类型的 FBG 传感器,与均匀 FBG 传感器相比,CFBG 传感器的光栅长度及其反射光谱宽度都比均匀 FBG 宽,其反射光谱的波长与光栅传感器位置是一一对应的。所以当啁啾光栅某一位置的应变场变化时,啁啾光栅的反射光谱与沿光栅几何位置的应变分布是一一对应的。本文将啁啾光栅外贴于带双缺口复合材料的缺口附近,通过监测复合材料静态拉伸实验过程中缺口附近的啁啾光栅反射光谱的变化,来监测该位置复合材料损伤的产生及扩展。

2 实 验

实验用碳纤维正交铺层复合材料,其铺层顺序设计为 $[90_1/0_6/90_1]$,啁啾光栅(北京 MOI 公司提供)传感器长度为 30 mm,光纤外径为 $125\ \mu\text{m}$,距离缺口端 2 mm,见图 1。

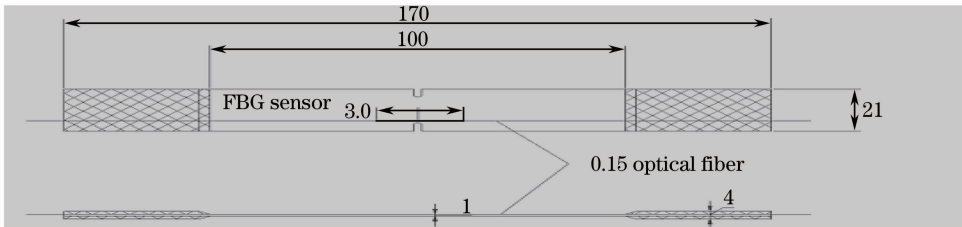


图 1 外贴光纤光栅的双缺口复合材料拉伸标准件示意图

Fig. 1 Schematic of the double notched CFRP with surface CFBG sensor

复合材料结构损伤时,损伤区域应变场是非均匀的,且结构呈高应变状态(超过 $10000\ \mu\epsilon$),此时光纤光栅与复合材料结构外表面结合位置易于剥离,影响结构损伤监测。

用环氧 353ND 光纤胶在复合材料外表面粘接啁啾光栅,控制表面粘接树脂厚度,实验中复合材料结构应变超过 $10000\ \mu\epsilon$ 时,啁啾光栅信号正常,外贴啁啾光栅的带双缺口复合材料件见图 2。



图 2 复合材料外贴啁啾光栅

Fig. 2 CFBG sensors surface bonded on the CFRP

选用美国 MOI 公司 SM125 静态光纤解调仪(具备全光谱监测功能)和 MTS Landmark 材料万能试验机,复合材料静态拉伸速率为 $0.1\ \text{mm/min}$,监测不同应变时啁啾光栅反射全光谱。复合材料静态拉伸光栅光谱监测装置如图 3 所示。

如图 4 所示,啁啾光栅具有一个渐变分布的光栅周期,因反射波长与光栅周期成正比,所以其反射光谱比光栅周期均匀分布的传统 FBG 宽,其光栅周期的不同使其光谱中不同波长与光栅不同位置一一对应,这就是啁啾光栅优于传统 FBG 之处。

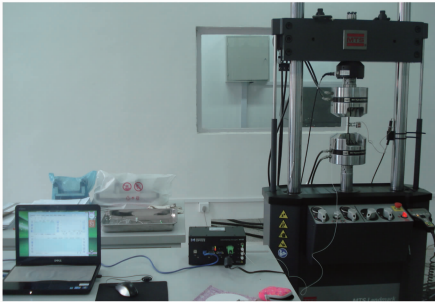


图3 复合材料静态拉伸实验及啁啾光栅监测装置
Fig. 3 Stretching test and CFBG monitoring experiment device

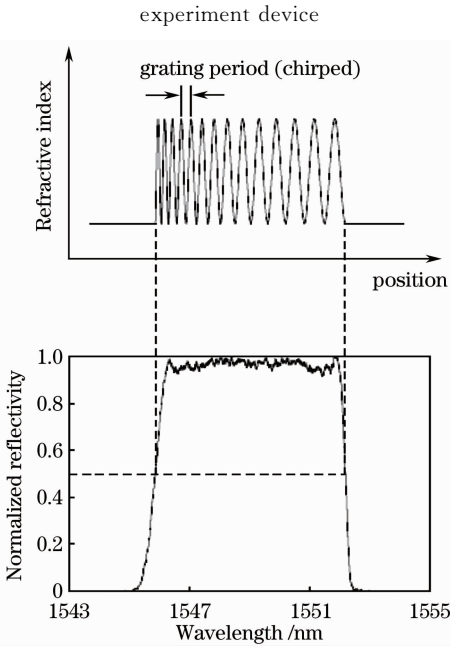


图4 啁啾光栅光谱反射原理示意图

Fig. 4 Principle sketch map of CFBG reflection spectrum

3 实验结果与讨论

3.1 复合材料静态拉伸实验外贴啁啾光栅反射光谱监测

拉伸过程中啁啾光栅反射光谱波长整体向右偏移,拉伸过程分4个阶段进行分析:1) 静态拉伸前,啁啾光栅反射光谱非常平滑,光谱中心波长位于1525~1555 nm间,反射光强为-5 dB,如图5(a)所示;2) 随静态拉伸应变增加,应变从0增加到4500 $\mu\epsilon$,光谱中心波长逐渐向右运动。由于双缺口位置存在应变集中,光栅反射光强产生微小变化;当静态拉伸应变达到4500 $\mu\epsilon$ 时,由于缺口右侧复合材料有分层产生,整个啁啾光栅反射光谱发生较大变化,光栅反射光谱在1549 nm位置出现裂解,光谱右侧从1549 nm到1562 nm处,光栅反射光强从-5 dB下降到-15 dB,见图5(b);3) 静态拉伸应变

从4500 $\mu\epsilon$ 增加到8000 $\mu\epsilon$,光栅反射光谱波长整体向右漂移5 nm,其光谱形状基本保持不变,但右侧部分从1550 nm增加到1565 nm处,光谱反射光强从-15 dB下降到-23 dB,见图5(c);4) 静态拉伸应变从8500 $\mu\epsilon$ 增加到12000 $\mu\epsilon$,光栅反射光谱在1545~1565 nm间的反射光强进一步衰减到与底部反射光强大小近似的-30 dB,见图5(d)。此后应变增加到12000 $\mu\epsilon$,光栅反射光谱形状基本保持不变,见图5(e)。

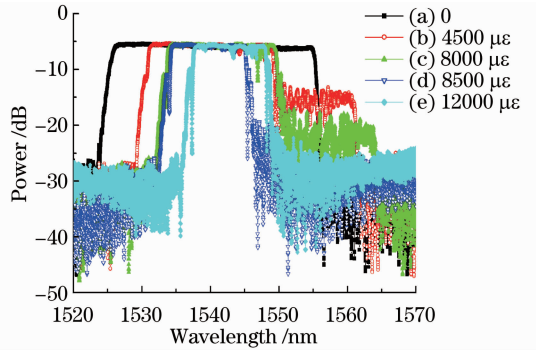


图5 复合材料静态拉伸实验不同应变时啁啾光栅反射光谱

Fig. 5 Reflection spectra of CFBG at the different strain stages of CFBG

图5中整个静态拉伸过程(0~12000 $\mu\epsilon$),光栅反射光谱宽度为30 nm,而反射光强下降的位置正好位于光栅反射光谱的中心,这与本实验中啁啾光栅长度为30 mm,其中心位置对应复合材料缺口中心是完全一致的,通过啁啾光栅反射光谱光强下降点的位置可实现对缺口及分层的精确定位。

3.2 复合材料静态拉伸实验应力-应变曲线

图6为复合材料静态拉伸应力-应变关系曲线。可见在静态拉伸初期,应力-应变曲线的线性关系良好;当应变达到8000 $\mu\epsilon$ 时,应力-应变关系曲线出现拐点,这与啁啾光栅反射光谱形状在8000~8500 $\mu\epsilon$

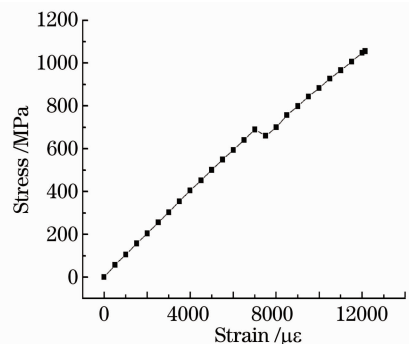


图6 复合材料静态拉伸实验的应变-应力曲线
Fig. 6 Stress-strain relationship curve of CFRP

之间开始出现较大的改变十分吻合,说明复合材料结构在该应变状态时出现了较大损伤(实验中啾啾光栅下部复合材料出现分层),通过啾啾光栅反射光谱的异化也可以实时监测到该点损伤的发生并对其进行定位。

啾啾光栅的断裂伸长率为 1.5%,所以利用啾啾光栅进行复合材料结构拉伸损伤监测时,拉伸损伤的监测范围为应变 $0\sim 15000\ \mu\epsilon$ 区间,超过该区间啾啾光栅将会断裂,影响监测,在该区间内损伤监测精度最佳,可实现精确定位;传感器物理位置外复合材料损伤也会对光栅反射光谱产生影响,通过与有限元模拟相结合可实现损伤定位,但存在一定误差。

4 结 论

利用外贴啾啾光栅可实现对带双缺口复合材料结构静态拉伸损伤的实时原位监测,监测到光谱变化与静态拉伸应力-应变关系曲线十分一致。该方法可解决内埋光栅影响复合材料结构完整性及在役结构无法再埋入的技术难题。同时啾啾光栅具有的长光栅及光栅位置与光谱一一对应特性,提高了基于光栅反射光谱理论的复合材料微观损伤的监测精度及后续的损伤量化研究,对复合材料微观损伤监测具有重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Yiping Wang, Yiping Cui. Effects of distributed birefringence on fiber Bragg grating under non-uniform transverse load[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2008, **40**(8): 1037~1040
- 2 F. Bosia, P. Giaccari. Characterization of the response of fibre

- Bragg grating sensors subjected to a two-dimensional strain field [J]. *Smart Materials and Structures*, 2003, **12**(6): 925~934
- 3 M. Ussorio, H. Wang, S. L. Ogin *et al.*. Modifications to FBG sensor spectra due to matrix cracking in a GFRP composite[J]. *Construction and Building Material*, 2006, **20**(1-2): 111~118
- 4 S. Takeda, Y. Okabe, N. Takeda. Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors[J]. *Composites: Part A*, 2002, **33**(7): 971~980
- 5 S. Takeda, Y. Okabe, T. Yamamoto. Detection of edge delamination in CFRP laminates under cyclic loading using small diameter FBG sensor[J]. *Composite Science and Technology*, 2003, **63**(13): 1885~1894
- 6 S. Takada, Y. Aoki, T. Ishikawa. Structural health monitoring of composite wing structure during durability test[J]. *Composite Structures*, 2007, **79**(1): 133~139
- 7 Y. Okabe, T. Mizutani, S. Yashiro. Detection of microscopic damages in composite laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors [J]. *Composites Science and Technology*, 2002, **62**(7,8): 951~958
- 8 Hang Yin Ling, Kin Tak Lau, Li Cheng. Monitoring mode II fracture behavior of composite laminates using embedded fiber optic sensors[J]. *Composite: Part B*, 2007, **38**(4): 488~497
- 9 Wang Jing, Wang Zhengfang, Sui Qingmei *et al.*. Study of FBG strain distribution reconstruction based on improved genetic algorithm dual constraint[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0305004
王 静, 王正方, 隋青美 等. 基于改进遗传算法双重约束的 FBG 应变分布重构研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0305004
- 10 Wu Fei, Kuang Minmin, Zhao Jing *et al.*. Application of ant colony algorithm in analyzing of traverse uniform strain reflective spectrum of fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 477~483
吴 飞, 邝敏敏, 赵 静 等. 蚁群算法在光纤布拉格光栅横向均匀受压反射谱分析中的应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 477~483
- 11 Wei Fuya, Liu Hongwu, Fu Chunlin. Reconstruction of fiber grating parameters from reflectivity using quantum particle swarm optimization algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 153~158
韦芙芽, 刘洪武, 付春林. 基于量子粒子群优化算法的光纤光栅参数重构[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 153~158