

doi:10.3788/gzxb20134207.0805

光纤布喇格光栅器件应力疲劳评价理论研究

舒岳阶, 陈伟民, 章鹏, 刘浩, 张伟, 刘显明

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 光纤布喇格光栅器件应力疲劳特性严重影响着光纤光栅应变传感器的长期可靠性, 为了评估光纤光栅器件的应力疲劳特性, 分析了光纤光栅应变传感器的封装结构对疲劳评价的影响, 并以表面直接粘接的简化模型评估了光纤光栅器件的应力疲劳特性. 从简化模型的基本力学与光学特性出发, 提出以光谱特性的边模抑制比和带宽作为评价光纤光栅器件疲劳的指标体系, 以传感特性的灵敏度、线性度和应变传递效率作为评价粘接层疲劳的指标体系. 设计了基于等强度梁的光纤光栅器件加速疲劳实验, 疲劳的应力幅度为 500 微应变, 频率为 18 赫兹; 1000 万次疲劳实验后, 三支光纤光栅的带宽平均增加 2.07%, 平均应变传递效率和平均灵敏度分别下降 4.5% 和 3.9%, 实验结果说明提出的指标体系能有效地区分粘接层和光纤光栅的疲劳, 从而验证了该评价理论的可行性.

关键词: 光纤布喇格光栅器件; 评价指标; 可靠性; 应力疲劳; 光谱特性; 传感特性; 等强度梁

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)07-0805-7

Investigation on Evaluation Theory of Fiber Bragg Grating Tensile Fatigue Property

SHU Yue-jie, CHEN Wei-min, ZHANG Peng, LIU Hao, ZHANG Wei, LIU Xian-ming
(The Key Laboratory for Opto-electronic Technology & Systems of Ministry of Education,
College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Fiber Bragg Grating (FBG) tensile fatigue property seriously affects the long term reliability of FBG strain sensors. To evaluate FBG tensile fatigue property, the package of FBG sensors is analyzed, and the surface mounting FBG is selected to study the FBG tensile fatigue property. To distinguish the tensile fatigue signal of FBG from the bonding layer, the property of the grating reflection spectrum is proposed as the evaluation index of FBG, and sensing characteristics is proposed as the evaluation index of bonding layer. The grating reflection spectrum evaluation index includes side mode suppression ratio and the 3 dB bandwidth. And the sensing characteristics evaluation index includes sensitivity, linearity and the strain transfer efficiency rate. To verify this theory, an experiment based on equal strength beam is conducted, in which the amplitude of "AC" strain is 500 micro strains, and the frequency is 18 Hz. After 10 million tensile fatigue tests on three FBG sensors, the average bandwidth increase 2.07%, the strain transfer efficiency rate decrease 4.5%, and the sensitivity decrease 3.9%. The experiment results show that this theory is workable.

Key words: Fiber Bragg Grating (FBG); Evaluation index; Reliability; Tensile fatigue; Reflection spectrum; Sensing characteristics; Equal strength beam

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50975301)资助

第一作者: 舒岳阶(1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: shuyuejie@yeah.net

导师(通讯作者): 陈伟民(1955-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: wmchen0802@126.com

收稿日期: 2013-04-28; 录用日期: 2013-06-05

0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)具有低功耗传输、抗电磁干扰、质轻、尺寸小以及便于多路复用等优点^[1-2],在应力应变测量领域有着广泛的应用情景,并受到了高度重视.从长远来看,光纤光栅工作在交变应变环境中可能产生一定的疲劳.特别是在足够大的交变应变作用下,光纤光栅性能更可能发生蜕化,影响其反射光谱的质量,甚至出现光谱裂变等现象,严重影响其传感性能.因此,很有必要研究光纤光栅器件的应力疲劳特性、掌握其疲劳与传感性能蜕化的规律.

为了评价光纤光栅器件的应力疲劳特性,需要研究相应的评价理论.目前已报道的光纤光栅应力疲劳理论主要有 Felix P. Kapron 和 Hakan H. Yuce 提出的探讨光纤强度与疲劳寿命之间关系的幂定律理论^[3].该理论重点关注于光纤表面裂纹的形成及扩散,研究光纤强度与疲劳次数之间的关系. J. Ang^[4]等在幂定律的基础上,对光纤光栅器件进行了疲劳实验,以断裂强度作为评价光纤光栅器件寿命的指标.但从其实验结果也可以看出,光纤光栅在疲劳过程中即使尚未断裂,也会产生性能蜕化,出现光谱畸变的现象.黄国君^[5]等对金属封装传感器进行了疲劳实验,以波长的漂移作为评价指标.但金属封装的光纤光栅应变传感器力学传递过程极其复杂,光纤光栅器件与传感器的其他结构(如粘接层)都会产生疲劳效应,波长漂移很难将其区分开来.

由此可见,现有的评价光纤光栅器件应力疲劳理论尚存在不足之处,有必要对光纤光栅器件的应力疲劳评价理论进行深入研究.

1 光纤光栅传感器简化模型

光纤光栅外径仅为 0.125 mm,石英材质属脆性材料,直接对光纤光栅施加交变应力是相当困难的.通过对光纤光栅应变传感器施加交变应力就能间接的使光纤光栅受到交变应力的作用.但由于光纤光栅传感器种类繁多,不同的封装结构,力学传递过程和应力疲劳评价方法也不同.

光纤光栅传感器封装形式主要有两种:一是表面粘接式^[6-7];二是标准传感器^[8-11].表面式结构和受力分析分别如图 1(a)和(b).基底受到外界作用力时,在它与粘接层的边界处产生剪切力,该剪切力通过粘接层和保护层传导至光纤光栅,使光纤光栅受到轴向的应力.标准传感器样式的结构如图 2(a)所示,标准传感器通过焊接或铆接等方式固定到对象上,焊接固定的标准传感器受力分析图如图 2

(b).基底的应力通过焊点、金属外壳、填充料后,传递到光纤光栅.

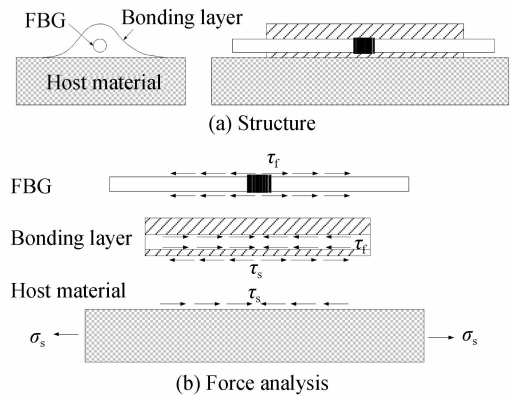


图 1 表面粘接式 FBG 的结构与受力分析

Fig. 1 Structure and force analysis for surface mounting FBG

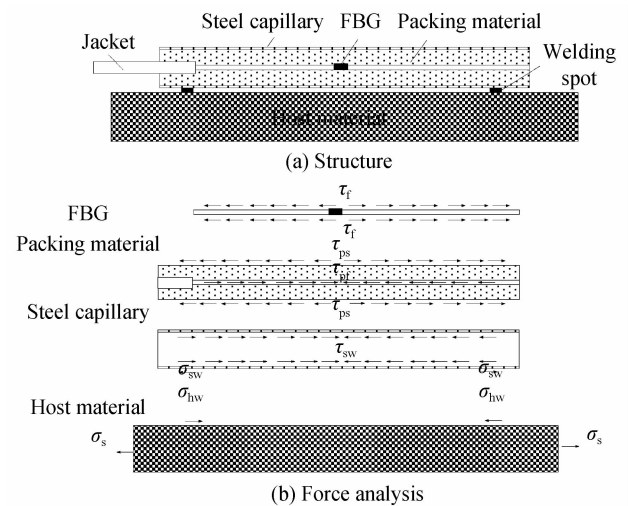


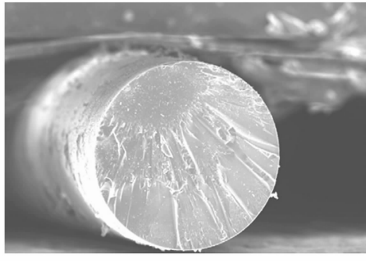
图 2 焊接固定的标准传感器结构与受力分析

Fig. 2 Structure and force analysis for welded standard FBG sensor

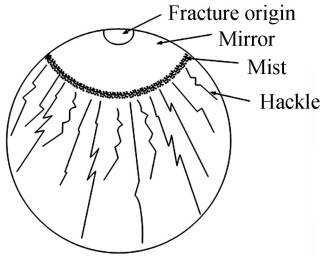
由前文分析可知,相对于标准传感器形式的封装,表面粘接式封装结构简单,力学传递中间过程较少.在交变应力作用下,传感器的各个结构都会产生疲劳效应,要想研究光纤光栅的疲劳,提出的疲劳评价理论必须能区分光纤光栅和传感器其它结构的疲劳.简单的结构为区分各部分的疲劳带来了便利.因此,选用表面粘接式的方式来研究光纤光栅器件的疲劳,其简化模型如图 1(a).在应力疲劳的作用下,该结构中光纤光栅和粘接层均能产生疲劳效应,应力疲劳评价理论需围绕如何区分两者展开.

2 光纤光栅的应力疲劳

光纤光栅属于脆性材料,在循环应力作用下,内部会出现微观裂纹,如图 3^[4,12].光纤光栅微观裂纹处是其外形突变的区域,很容易在此处产生应力集中现象,导致内部应力分布不均.



(a) Scanning electron micrograph of a broken FBG sensor



(b) Schematic representation of the fracture surface of a broken FBG sensor

图 3 疲劳破坏的 FBG

Fig. 3 Fatigue broken FBG

光纤布喇格光栅有效折射率的变化为

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \bar{\delta n}_{\text{eff}} \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_0} z + \varphi(z) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $\bar{\delta n}_{\text{eff}}$ 为平均的有效折射率变化, ν 为边缘条纹可见度, Λ_0 为光纤光栅未加应力时的光栅周期, $\varphi(z)$ 为光纤光栅轴向啁啾变化函数. 当 FBG 内部应力分布不均时, 将导致光纤光栅的平均折射率和周期的变化, 这两个方面的变化是可以线性叠加的. 设内应力分布函数为 $\epsilon(z)$, 此时光纤光栅的周期分布为^[13]

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 [1 + (1 - p_e)\epsilon(z)] \quad (2)$$

式中 p_e 为有效弹光系数. 由式(1)和(2)可知, 对应的啁啾变化函数为

$$\varphi(z) = -\frac{2\pi z}{\Lambda_0} \left[\frac{(1 - p_e)\epsilon(z)}{1 + (1 - p_e)\epsilon(z)} \right] \quad (3)$$

啁啾变化函数随内应力分布的变化而变化, 而这势必会对 FBG 的反射光谱造成影响.

为了得到应力分布不均对光纤光栅的影响, 采用传输矩阵法对其不均匀性影响进行分析^[14-16]. 将光纤光栅分成 M 段, 每段长度为 Δz . 设入射进光纤光栅的光束经过第 k 段时, 前向和后向传输光的模场振幅分别表示为 S_k 和 R_k . 通过第 k 个均匀小光栅段传播的模场振幅可由一个传输矩阵 T_k 描述为

$$\begin{bmatrix} S_k \\ R_k \end{bmatrix} = T_k \begin{bmatrix} S_{k-1} \\ R_{k-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, T_k 可表示为

$$T_k = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中

$$C_1 = \cosh [\gamma_B(\lambda) \Delta z] - i \frac{\sigma(\lambda)}{\gamma_B(\lambda)} \sinh [\gamma_B(\lambda) \Delta z]$$

$$C_2 = -i \frac{\pi \nu \bar{\delta n}_{\text{eff}}}{\gamma_B(\lambda) \lambda} \sinh [\gamma_B(\lambda) \Delta z]$$

$$C_3 = i \frac{\pi \nu \bar{\delta n}_{\text{eff}}}{\gamma_B(\lambda) \lambda} \sinh [\gamma_B(\lambda) \Delta z]$$

$$C_4 = \cosh [\gamma_B(\lambda) \Delta z] + i \frac{\sigma(\lambda)}{\gamma_B(\lambda)} \sinh [\gamma_B(\lambda) \Delta z]$$

$$\sigma(\lambda) = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda} + \frac{2\pi \bar{\delta n}_{\text{eff}}}{\lambda}$$

$$\gamma_B(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{\pi \nu \bar{\delta n}_{\text{eff}}}{\lambda} \right)^2 - \sigma^2(\lambda)}$$

FBG 总的传输矩阵可写为

$$T = T_M \cdot T_{M-1} \cdot \dots \cdot T_1 \quad (6)$$

初始条件为

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ R_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

则通过第 M 段的模场矩阵为

$$\begin{bmatrix} S_M \\ R_M \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} S_0 \\ R_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

反射率即为

$$R = \left| \frac{R_M}{S_M} \right|^2 \quad (9)$$

由式(9)即可得到在不同内应力分布情况下的 FBG 反射谱的情况.

设 FBG 相关参量如表 1, FBG 内应力分布如图 4. 利用传输矩阵法研究应力分布不均对光纤光栅反射光谱的影响.

表 1 FBG 相关参量

Table 1 Parameters of FBG

Parameter	Value
Length(L)/mm	10
Mode effective index of refraction(n_{eff})	1.46
Mean index variation($\bar{\delta n}_{\text{eff}}$)	2.5e-4
Initial period(Λ_0)/nm	530.82
Effective strain optic constant(p_e)	0.22

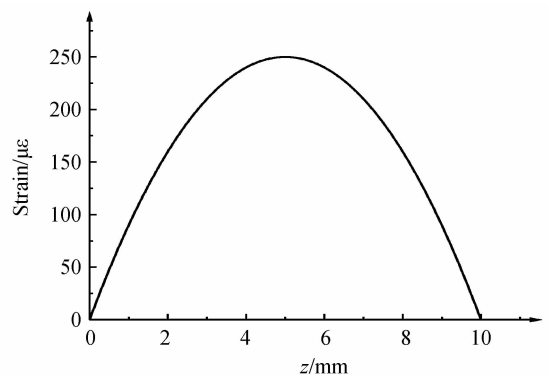
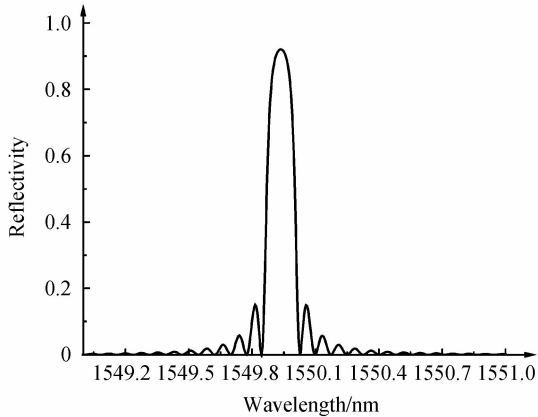


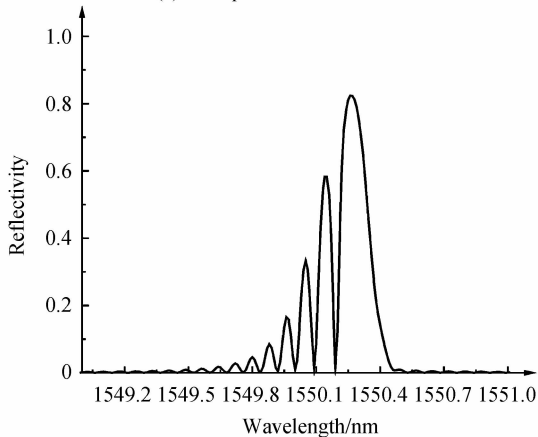
图 4 FBG 内应力分布

Fig. 4 FBG internal stress distribution

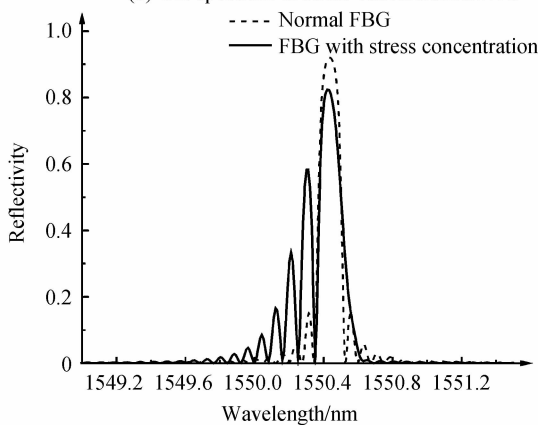
正常情况下的光纤光栅与应力集中的光纤光栅光谱如图 5(a)、(b)所示,为了比较两者之间的差别,将正常 FBG 的光谱横向位置偏移至与应力集中的 FBG 重叠,如图 5(c).由图 5 可以看出,相对于正常情况下的 FBG,内应力分布不均的光纤光栅反射光谱发生了性能蜕化,边模抑制比降低,带宽变宽.如果光谱畸变程度继续变大,势必会对最终的解调结果造成严重的影响.



(a) The spectrum of normal FBG



(b) The spectrum of stress concentration FBG



(c) Overlapped spectrums

图 5 光谱分析

Fig. 5 Spectrum analysis

另外, J Ang 等^[4]的疲劳实验表明:随着疲劳次

数的增大,光纤光栅反射光谱会发生性能蜕化,其边模抑制比会降低,带宽会变大.因此,光谱特性的边模抑制比和带宽反映了光纤光栅本质上的变化,是评价其疲劳特性的重要指标.

3 粘接层的应力疲劳

由表面式粘接受力分析可知,如图 1(b)所示,粘接层在起着传递应力的作用.光纤光栅表面式粘接应变传递效率 η 为^[11]

$$\eta = \frac{\cosh(\lambda l_f) - 1}{\lambda l_f \sinh(\lambda l_f)} \quad (10)$$

式中, λ 为粘接层的特征常量, l_f 为粘接层长度.

式(10)成立的前提是粘接层能准确地传递应变,但是,实践表明,随着疲劳次数的增加,粘接层的应变传递损耗会逐渐加大,最终疲劳失效.因此,应变传递系数将是反映应力疲劳的一个重要指标.应变传递系数的衰减同时会导致测得的传感特性性能发生蜕化.图 6 是一条典型的 FBG 传感特性曲线,评价传感特性的两个重要指标是灵敏度和线性度.

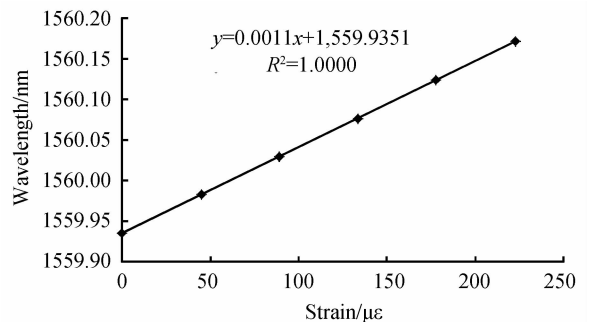


图 6 FBG 传感特性曲线

Fig. 6 FBG sensing curve

由分析可知,传感特性的灵敏度、线性度以及应变传递效率反映了粘接层的应力疲劳特性.

综上所述,通过光谱特性的边模抑制比和带宽,传感特性的灵敏度、线性度和应变传递效率的变化,将光纤光栅和粘接层的疲劳区分开来,最终达到研究光纤光栅器件应力疲劳特性的目的.

4 实验验证

4.1 方案

为了验证该评价理论的正确,选四支光纤光栅传感器件,按如图 7 所示,将它们分成两组,串联后分别粘接到等强度梁的上下两表面.用图 8 所示的偏心电机对等强度梁施加激励,使其以 18 Hz 的频率进行共振,从而给光纤光栅施加 500 微应变的交变振幅,进行加速疲劳实验.在疲劳过程中,每隔 100 万次

疲劳,停机进行一次静态加载试验,以测量光纤光栅在静态加载过程中的光谱特性及传感特性。

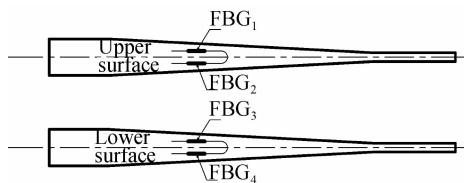


图 7 实验对象

Fig. 7 Experimental object

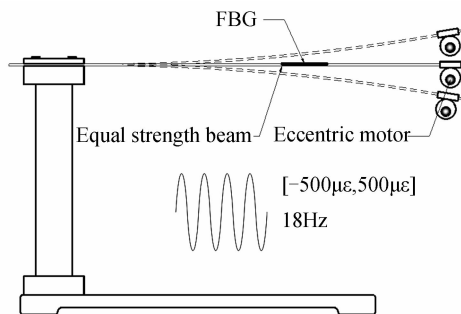


图 8 疲劳实验平台

Fig. 8 Fatigue test equipment

静态加载时,直接利用该等强度梁,在其尖端加砝码,并利用光纤光栅网络分析仪保存原始光谱数据与中心波长等关键数据. 测量光谱特性时,每次加载量为 2kg,共保存 0、2、4、6、8 kg 时的光谱(即 0、222.7、445.4、668.1、890.8 $\mu\epsilon$). 测量传感特性时,为减少等强度梁的塑性变形,每次加载量为 400 g,直到加载到 2 kg 为止(即 44.4、88.6、133.5、178.4、222.7 $\mu\epsilon$),并连续测量两个来回的数据,平均后求得相应的指标。

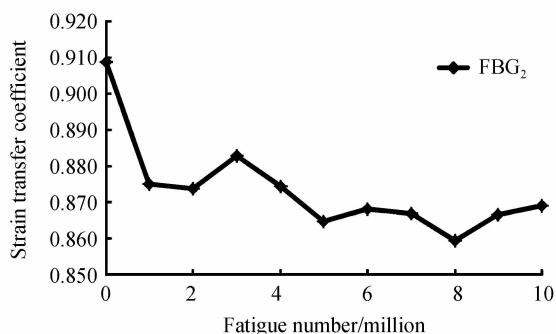
4.2 结果及分析

由于操作不当,FBG1 损坏,失去传感能力。

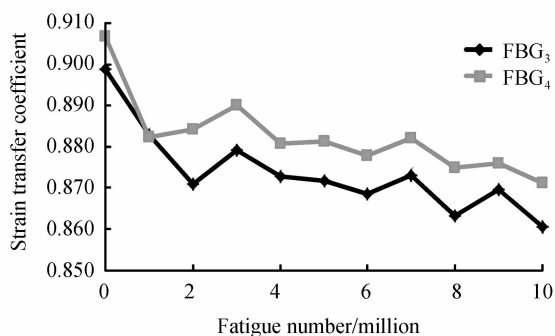
4.2.1 传感特性的变化

传感特性包括灵敏度、线性度以及应变传递效率,反映了粘接层的疲劳特性。

疲劳实验过程中,3 支传感器的线性度均保持在 1.0000 不变. 应变传递效率和灵敏的变化曲线如图 9 和图 10. 平均应变传递效率和平均灵敏度分别



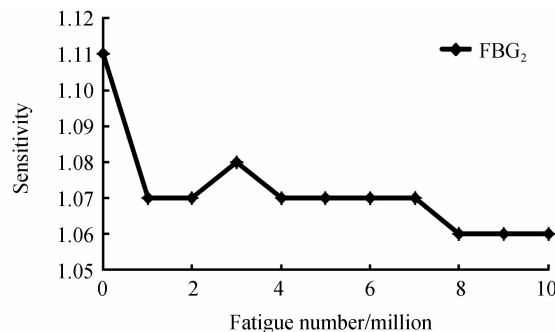
(a) FBG₂



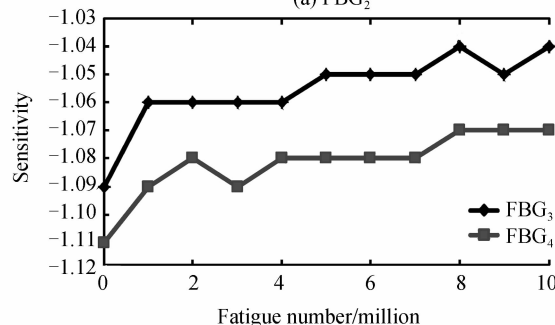
(b) FBG₃ and FBG₄

图 9 应变传递效率

Fig. 9 Strain transfer ratio



(a) FBG₂



(b) FBG₃ and FBG₄

图 10 灵敏度

Fig. 10 Sensitivity

下降 4.5% 和 3.9%。

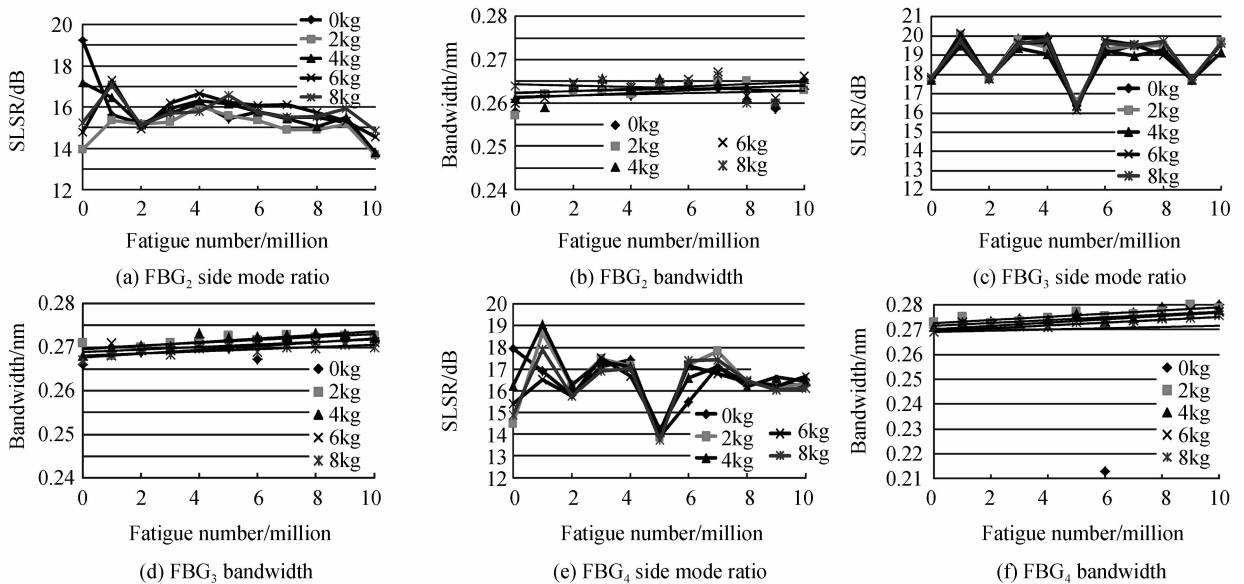
从传感特性来看,随着疲劳次数的增加,粘接层出现疲劳效应,应变传递系数和灵敏度均呈现下降的趋势。

4.2.2 光谱特性

光谱特性反映了应力疲劳后,FBG 本身的一些细微的变化. 图 11(a)~(f) 分别为 FBG₂、FBG₃、FBG₄ 的边模抑制比和带宽的变化图。

从整体上看,3 支传感器的边模抑制比在某一值附近跳动,规律性不强. 3 支传感器的带宽呈增大的趋势,平均增加 2.07%。可见,FBG 在疲劳的过程中,带宽呈增大的趋势,带宽比边模抑制比更适合作为表征 FBG 疲劳特性的指标。

综合传感特性和光谱特性的变化可知,提出的

图 11 FBG_2 、 FBG_3 和 FBG_4 的边模抑制比及带宽的变化Fig. 11 Side mode ratio and bandwidth of FBG_2 , FBG_3 and FBG_4

评价理论能有效地区分粘接层和光纤光栅的疲劳, 最终达到利用光谱特性的变化研究光纤光栅疲劳特性的目的。

5 结论

光纤光栅表面粘接简化模型能在很大程度上简化疲劳分析过程, 深入分析该模型发现, 疲劳效应会同时导致粘接层和光纤光栅的疲劳. 为了区分两者的疲劳, 从光纤光栅光谱特性和粘接层的力学传递过程出发, 分析了疲劳效应导致光谱的变化、传感的变化, 并提出以光谱特性的边模抑制比和带宽, 传感特性的灵敏度、线性度和应变传递效率作为评价指标. 为了验证该理论的正确性, 对 3 支表面粘接光纤光栅进行了疲劳实验. 实验结果表明, 提出的评价指标体系能有效地区分粘接层和光纤光栅的疲劳, 达到了预期的目标。

参考文献

[1] RAO Yun-jiang. In-fibre Bragg grating sensors [J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, **8**(4): 355-375.

[2] RAO Yun-jiang. Recent progress in applications of in-fibre Bragg GRATING Sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, **31**(4): 297-324.

[3] KAPRON F P, YUCE H H. Theory and Measurement for Predicting Stressed Fiber Lifetime[J]. *Optical Engineering*, 1994, **30**(6): 700-708.

[4] ANG J, LI H C H, HERSZBERG I, et al. Tensile fatigue properties of fibre Bragg grating optical fibre sensors [J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, **32**(4): 762-768.

[5] HUANG Guo-jun, YIN Yun-guo, DAI Feng, et al. Investigation on the sensibility and fatigue reliability of fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(6): 45-47.

黄国君, 殷鸣毓, 戴锋, 等. 光纤布喇格光栅应变传感器的灵敏度及疲劳可靠性研究[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(6): 45-47.

[6] WEI Shi-ming, CHAI Jing. A method of fiber Bragg grating sensing in rock deformation and damage test[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2010, **29**(2): 233-238.

魏世明, 柴敬. 岩石变形破坏过程的光纤光栅传感检测方法研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, **29**(2): 233-238.

[7] WEI Shi-ming, CHAI Jing. Study of application of optical fiber Bragg grating sensing to uniaxial compression experiments of rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(11): 3174-3177.

魏世明, 柴敬. 岩石单轴压缩光纤光栅传感检测方法研究[J]. *岩土力学*, 2008, **29**(11): 3174-3177.

[8] ZHOU Zhi, ZHAO Xue-feng, WU Zhan-jun, et al. Study on FBG sensors steel capillary encapsulating technique and sensing properties[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(12): 1089-1092.

周智, 赵雪峰, 武湛君, 等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(12): 1089-1092.

[9] WAN Li-bing, ZHANG Bo-ming, WANG Dian-fu, et al. Research on fiber Bragg grating strain sensor for structural health monitoring[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(4): 47-48.

万里冰, 张博明, 王殿富, 等. 结构健康监测用光纤布喇格光栅应变传感器研究[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(4): 47-48.

[10] HU Shu-yang, ZHAO Qi-da, HE Shi-ya, et al. Strain measurement in construction steel bar using a FBG sensor coated by a thin metal tube[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(6): 688-690.

胡曙阳, 赵启大, 何士雅, 等. 金属管封装光纤光栅用于建筑钢筋应变的测量[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(6): 688-690.

[11] ZHOU Zhi, LI Ji-long, OU Jin-ping. Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded FBG strain sensors[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, **38**(1): 49-55.

周智, 李冀龙, 欧进萍. 埋入式光纤光栅界面应变传递机理与误差修正[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, **38**(1): 49-55.

[12] CHEN C P, LEE J R, CHANG C N. Fracture mirror of optical fibers[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, **82**(3): 698-704.

[13] HUANG Hong-mei, YUAN Shen-fang. Study on the spectral response of fiber Bragg grating sensor under non-

- uniform strain distribution in structural health monitoring [J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, **7**(2): 109-112.
- [14] YUN Bin-feng, LÜ Chang-gui, WANG Zhu-yuan, *et al.* Numerical analysis of fiber Bragg grating under inhomogeneous strain fields[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(2): 151-154.
恽斌峰,吕昌贵,王著元,等. 非均匀应变场中光纤布喇格光栅的数值分析[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(2): 151-154.
- [15] YANG Guo-fu. Spectral characteristic analysis of FBG under the transverse inhomogeneous strain field [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(5): 1021-1024.
杨国福. 横向非均匀应变作用下光纤光栅的特性分析[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(5): 1021-1024.
- [16] CHEN Zhen-min, CHEN Jun, SHU Rui-jun. Simulation and reconstruction for nonuniform strain profile of fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(6): 2399-2404.
陈哲敏,陈军,舒睿俊. Bragg 光纤光栅传感器内不均匀应力分布的模拟和重构[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(6): 2399-2404.