

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.05.017

光纤光栅传感器对非均匀应变场的响应特性

高超干, 白瑜芳, 梁大开, 周储伟

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要: 提出利用测量位置处光栅传感器的光谱特征反推该处对应的应变分布状态的方法。采用改进的传递矩阵方法, 模拟了不同应变分布函数对应的光谱响应, 分析了其基本特征参数同应变分布之间的变化规律。通过有限元仿真计算试验件在弯曲载荷下光栅粘贴处的应变分布, 重构了传感器的光谱, 并将其和应变分布函数的理论计算光谱图进行比较, 验证了应变分布形式与反射光谱特征的关联性。构建带有不同半径圆孔的铝合金板孔口弯曲加载试验系统, 测试试验件弯曲挠度和孔径大小与反射谱特性的关系。理论及试验结果表明, 实测与仿真计算的谱图变化具有相同规律, 光谱特征参数可作为预测铝合金孔径的有效指标, 并为其他类型结构的应变场变化规律的监测提供参考依据。

关键词: 光谱响应分析; 非均匀应变分布; 有限元方法; 光谱特征; 挠度-比强度斜率

中图分类号: O433.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)05-0800-08

Response Characteristics of Fiber Bragg Grating Sensor to Non-uniform Strain Fields

GAO Chaogan, BAI Yufang, LIANG Dakai, ZHOU Churwei

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: An inverse method is introduced to estimate the strain distribution by using the reflection spectra characteristics measured from the grating sensor. The improved transfer matrix method is used to simulate the spectral response of various strain distribution functions, and the variations between the spectrum shapes and the strain distributions are analyzed. The finite element method is used to calculate the strain fields of the specimens subjected to static bending loads, then the spectrum of the sensor is reconstructed. Furthermore, the correlation between the strain distribution and the form of the spectrum is verified by comparing it with that obtained by numerical simulation with the strain distribution function. In addition, a flexure test system for aluminum alloy plates with different radii holes is constructed to test the relationship among bending deflection, hole radius and the reflection spectrum characteristics. From theoretical calculation and experimental results, the measured spectra are found to reproduce the change in the simulation results very well, and the spectral feature parameters are proposed as effective indicators for the quantitative evaluation of the hole size, which has a potential to be applied to other configurations.

Key words: spectral response analysis; non-uniform strain distribution; finite element method; spectral feature; slope of deflection/intensity ratio

光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、可复用和体积小等优良的特性, 利用该传感技术进行损伤检测

基金项目: 国家自然科学基金(11872205)资助项目; 江苏省高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期: 2020-01-18; **修订日期:** 2020-05-25

通信作者: 周储伟, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zcw@nuaa.edu.cn。

引用格式: 高超干, 白瑜芳, 梁大开, 等. 光纤光栅传感器对非均匀应变场的响应特性[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(5): 800-807. GAO Chaogan, BAI Yufang, LIANG Dakai, et al. Response characteristics of fiber bragg grating sensor to non-uniform strain fields[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(5): 800-807.

是目前的发展方向^[1-2]。光栅传感器的反射谱对其长度方向的非均匀应变较为敏感,不同类型光栅传感器现已用来监测结构的健康状态,如啁啾光纤光栅传感器^[3-4]、变迹光纤光栅传感器^[5]和均匀光纤光栅传感器^[6]等。为了获得光纤光栅传感器的反射光谱,一般通过耦合模式方程的近似方法——传输矩阵(T-matrix)方法求解,该方法可以高效地计算出均匀、啁啾的光纤光栅光谱响应^[7],并广泛应用于构建已知应变场下光栅传感器的反射光谱^[8]。Ling等^[9]通过该经典方法计算了带有涂覆层的光纤传感器的应变传递效率,并比较仿真与试验得到的反射谱,验证了该方法的准确性和有效性。然而,当测试区域存在显著应变梯度时计算误差会较大。因此,Prabhugoud等^[10]提出了用于T矩阵法的改进的局部周期函数,并将其推广到初始啁啾光纤光栅在非均匀应变场作用下的情况。

结构的损伤状态会对其周围应变场的分布产生影响,如复合材料受冲击产生的分层、脱胶及裂纹等损伤,金属或复合材料钻孔等机械加工引起的结构变化,这些损伤或结构变化会引起其附近的应力集中及较大的应变梯度。目前已经有学者采用光纤传感器的光谱特性,针对层合板横向裂纹^[11]以及裂纹扩展的监测^[12-13],断裂行为监测^[14]、循环载荷下的搭接接头的脱粘区测试^[15]等进行探究,并将光谱的中心波长位移、半峰全宽(Full width half maximum, FWHM)^[16]等特性参数作为判定损伤的依据。结构内(变化或损伤附近)的应变分布形式可以作为判定结构变化或损伤类型的重要参数,但目前对于不同应变分布形式与光谱响应的对应规律,并进一步通过测量光谱特征反推对应的传感器测量位置应变分布状态的方法较少。

本文首先采用改进的传递矩阵方法计算光谱,并针对常见的几种典型应变场,从光谱形状、强度以及旁瓣变化规律等特征探究其对应的光谱规律,作为后续推测应变分布形式的依据;然后制备了带有不同孔径圆孔的铝合金板试验件,进行三点弯曲准静态加载试验,并采用ABAQUS平台建立试验件有限元模型进行计算分析,重构不同试验件在不同加载条件下的光谱,验证光谱特性反推应变场形式的可行性及有效性;最后通过分析粘贴在结构件上光栅的光谱变化,建立光谱特性参数和结构孔径的关系。

1 光纤传感器谱响应分析

1.1 非均匀应变场的光谱响应

当非均匀应变场作用于光栅上,其反射光谱不

再符合保持一个尖峰且带宽不变的假设,此时反射光谱峰值会变宽,且应变梯度的形式会使反射谱分裂为多个峰值。因此,研究非均匀轴向力对光纤光栅的影响,可反向判断作用于光栅上的应变分布状况,并根据畸变响应谱的形状和变化趋势推断应变分布梯度。目前部分研究已将受非恒定应变场作用的初始均匀光栅模拟为受恒定应变场作用的等效初始啁啾光纤光栅。将 x 定义为沿光纤轴的变量,啁啾光纤光栅有效折射率的变化为^[17]

$$\delta n_{\text{eff}}(x) = \overline{\delta n_{\text{eff}}(x)} \left\{ 1 + \zeta \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda_0} x + \phi(x) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: ζ 为折射率变化的条纹能见度,一般为常数; $\overline{\delta n_{\text{eff}}(x)}$ 为空间上一个周期内折射率的直流平均变化量; Λ_0 为光栅的初始周期; $\phi(x)$ 为长度方向一个周期的折射率变化相位。若式(1)采用非均匀应变场的有效周期表示,可得相位调制为

$$\phi(x) = -\frac{2\pi}{\Lambda_0} \frac{(1 - P_e) \epsilon_{xx}(x)}{[1 + (1 - P_e) \epsilon_{xx}(x)]} x \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{xx}(x)$ 为 x 的任意函数; P_e 为光弹系数。根据耦合模理论,沿光纤长度方向 x 的一阶微分方程组为

$$\begin{aligned} \frac{dR(x)}{dx} &= i\hat{\sigma}R(x) + i\kappa S(x) \\ \frac{dS(x)}{dx} &= -i\hat{\sigma}S(x) - i\kappa R(x) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $R(x)$ 为前向传输模的幅值, $R(x) = A(x) \exp(i\delta x - \phi/2)$; $S(x)$ 为后向传输模的幅值, $S(x) = B(x) \exp(-i\delta x + \phi/2)$; κ 为“AC”耦合参数; $\hat{\sigma}$ 为“DC”参数。直流自耦合系数是和光栅波长相关的一个系数,两个耦合参数的计算公式为

$$\begin{aligned} \kappa &= \pi/\lambda \zeta \overline{\delta n_{\text{eff}}} \\ \hat{\sigma} &= 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}} - \frac{1}{2} \phi' \end{aligned} \quad (4)$$

式中: λ 表示传播波长,光栅设计波长为 $\lambda_0 = 2n_{\text{eff}}\Lambda_0$ 。啁啾系数 $\phi' = d\phi/dx$,若 $\phi'(x) = 0$,则表示该光栅为均匀光栅。

假设光栅长度为 L_B ,光纤光栅坐标位置可设为 $-L_B/2 \leq x \leq L_B/2$,并满足边界条件: $R(-L_B/2) = 1, S(L_B/2) = 0$ 。结合式(2)和(4),使用数值迭代计算(四阶龙格-库达)一阶微分方程组(3)可获得光栅长度范围内向前向后传输模的幅值。光纤光栅反射率可定义为

$$r(\lambda) = \left| \frac{S(-L_B/2)}{R(-L_B/2)} \right|^2 \quad (5)$$

一般采用数值方法求解上述问题时耗时较多,且不适合分析大量的试验数据。因此可使用T-矩

阵公式来近似计算研究受非均匀力作用的光纤传感器反射光谱,它具有快速收敛性。该方法是将一个非均匀光栅近似为由 M 小段的均匀光栅段构成,根据已知的解析解求得每一小段光栅的 2×2 的传输特性矩阵,然后把这些矩阵相乘可得到整个

$$F_i(\lambda) = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_i \Delta x) - i \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_i} \sinh(\gamma_i \Delta x) & -i \frac{\kappa}{\gamma_i} \sinh(\gamma_i \Delta x) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_i} \sinh(\gamma_i \Delta x) & \cosh(\gamma_i \Delta x) + i \frac{\hat{\sigma}_i}{\gamma_i} \sinh(\gamma_i \Delta x) \end{bmatrix} \quad (7)$$

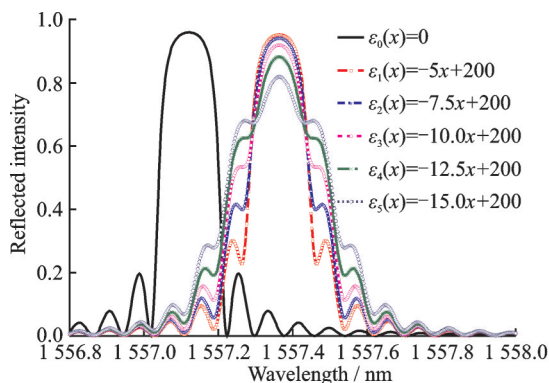
计算出所有光栅段的传递矩阵后,可得整个光栅的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} R(-L_B/2) \\ S(-L_B/2) \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R(L_B/2) \\ S(L_B/2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $F = F_M(\lambda) \cdot F_{M-1}(\lambda) \cdot \dots \cdot F_i(\lambda) \cdot \dots \cdot F_1(\lambda)$; $\gamma_i = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}_i^2}$; Δx 为光栅分割的每部分的长度。由于将每一小分段的光栅看为均匀光栅,所以有 $\phi'(x) = 0$ 。

从式(2)和(4)可以看出,求解耦合模方程时,需引入应变函数一阶导数的变量,而对于应变梯度较大的应变场,若使用传递矩阵求解耦合方程时仍假设 $\phi'(x) = 0$ 会引起较大的误差,因此,需要将该变量增加到计算公式中。本文采用改进的直流耦合系数(结合传递矩阵)^[10],对光纤传感器的光谱重构结果进行分析。采用含有应变分布函数一阶导数的直流耦合系数重构的结果与 Runge-Kutta 数值计算结果相比误差很小,因此在后续的分析中,均采用此改进的传递矩阵方法对实际结构的应变分布所产生的光谱畸变程度进行研究。对应的直流耦合系数计算公式为

$$\hat{\sigma}_i = 2\pi n_{\text{eff}} \frac{1}{\lambda} - \frac{\pi}{\hat{\Lambda}_i(x)} + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}} \quad (9)$$



(a) Reflected spectra due to the applied linear strain fields along the grating length

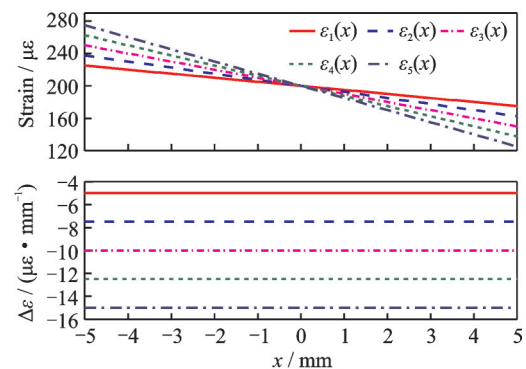
光栅的传递特性矩阵。定义 R_i 和 S_i 经过 i 段光栅段后的振幅,使用矩阵 $F_i(\lambda)$ 来描述第 i 段光栅段的传递特性为

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = F_i(\lambda) \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\hat{\Lambda}_i(x) = \Lambda_0 [1 + (1 - P_e) \epsilon_{xx}(x) + (1 - P_e) \epsilon'_{xx}(x)x]$ 。

1.2 光谱重构结果分析

本文对几种具有明显特征的应变分布函数(一次函数、二次函数和指数函数)对应的光谱形态进行理论计算分析,考察光谱与传感器轴向应变分布的关系。定义沿光纤方向为 x 方向,重构结果如图 1—3 所示,一次函数的应变分布的应变梯度为常数,和 x 无关,对应的光谱旁瓣变化为对称变化,且旁瓣的峰值、主峰和旁瓣峰值之间的峰谷都会随着应变梯度的增加而增加;当应变分布函数为二次函数,即沿光栅长度方向的应变对 x 求导的应变梯度 $\Delta \epsilon$ 为单调递增变化时,右侧旁瓣变化较为明显,旁瓣的峰值随着变化梯度的增大而增大;指数函数形式的应变场可按照多项式分解为一次、二次以及高阶项,当沿光栅长度方向的应变梯度 $\Delta \epsilon$ 单调递减时,左侧旁瓣随着应变梯度的增加而增加,其计算的光谱特性变化包含所有阶次项对应光谱的特性。对比以上结果可得到,不同应变分布函数对应的光谱形状变化显著不同,因此光谱形状可作为判定结构应变分布的参考依据。其中,光栅的初始中心波长为 $1557.0 \mu\text{m}$,栅区长度为 10 mm ,折射率 $n_{\text{eff}} = 1.46$, $P_e = 0.26$, $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 1.131 \times 10^{-4}$ 。



(b) Linear strain fields and the strain gradient $\Delta \epsilon$

图1 均匀光栅在线性应变场下的响应

Fig.1 Response of a uniform grating subjected to the applied linear strain fields

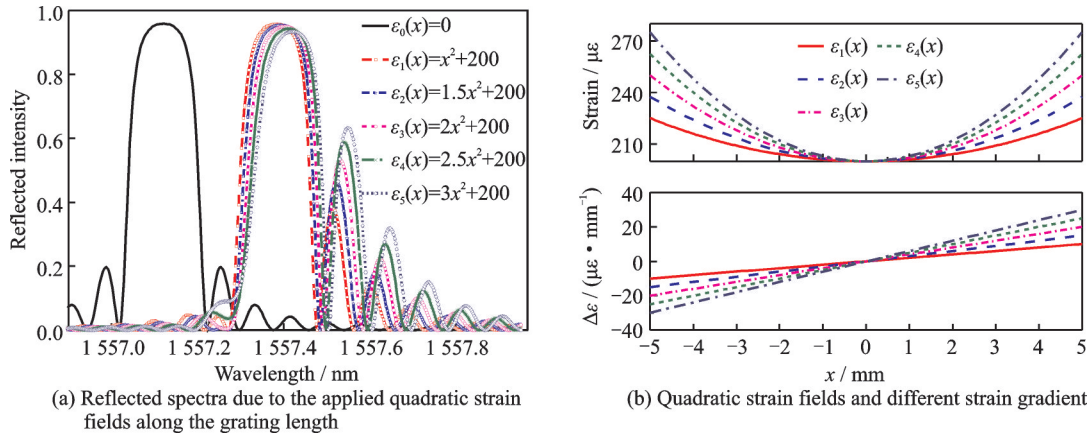


图 2 均匀光栅在二次应变场下的响应

Fig.2 Response of a uniform grating subjected to the applied quadratic strain fields

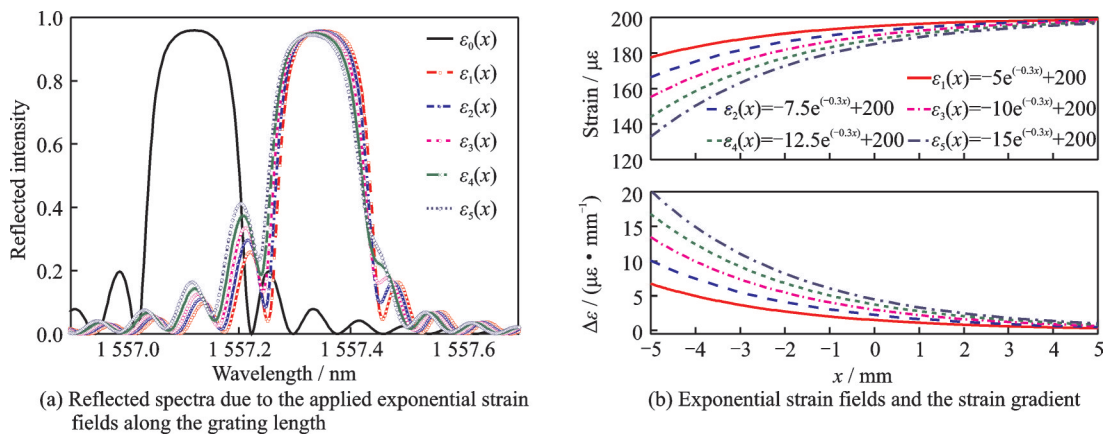


图 3 均匀光栅在指数应变场下的响应

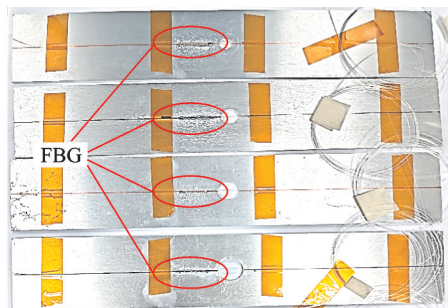
Fig.3 Response of a uniform grating subjected to the applied exponential strain fields

2 试验系统构建及有限元仿真

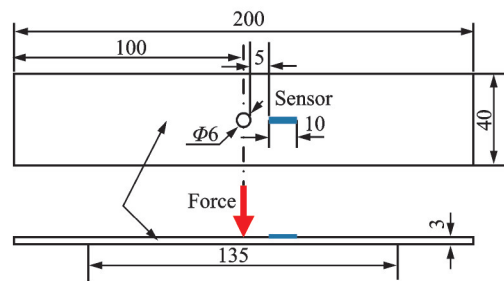
2.1 系统构建

带孔铝合金试验件在弯曲载荷作用下,其孔口附近试验件表面沿长度方向的应变分布近似指数分布。因此,本文制备了4个含有不同孔径圆孔的板结构试验件(图4(a))进行弯曲试验,验证1.2节理论分析的正确性。三点弯曲准静态加载试验在室

温下进行,弯曲试验的跨距为135 mm。试验件所用材料为铝合金,其杨氏模量和泊松比分别为71 GPa和0.33,圆孔位于板的几何中心,其半径依次为3,4,5和6 mm,试验件几何尺寸为200 mm × 40 mm × 3 mm。传感器放置于距离圆孔边缘5 mm处,以避免加载装置的影响,同时保证传感器处于应变梯度较大的非均匀应变场内,示意图如图4(b)所示(3 mm孔径)。



(a) Four plate specimen with holes of different diameters



(b) Geometric dimensions of the test specimen(Unit:mm)

图 4 弯曲试验件及其示意图

Fig.4 Bending test specimen and its schematic diagram

构建整个测量系统如图5所示。其中,三点弯曲试验加载系统为INSTRON2360多功能材料力学性能试验机,加载方式为速率0.1 mm/min的位移加载,位移-载荷曲线通过试验机连接的电脑实时记录。光学测量系统的光源为一个宽带范围为

60 nm的ASE光源,并采用光学光谱分析仪(YOKOGAWA,AQ-6317C)记录光谱。光栅应变沿光栅的分布由光纤光栅传感器记录,并以反射光谱的形式显示在光谱分析仪上,每间隔0.2 mm的位移记录一次,当加载挠度为2.0 mm时,停止试验。

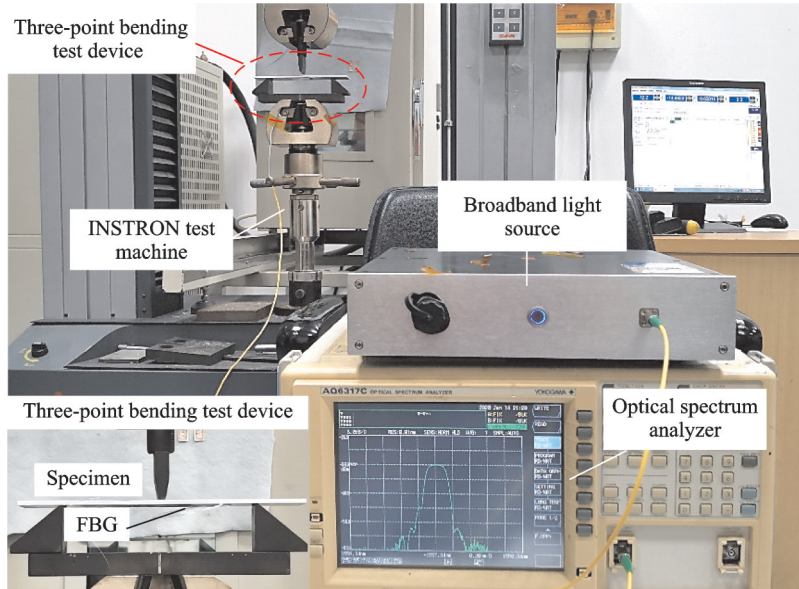


图5 试验测试装置实物图

Fig.5 Experiment setup for the sensor response detection system

2.2 模型分析及反射谱计算

为了分析试验件的反射光谱,本文采用ABAQUS三维实体单元建立试验件1/4有限元(Finite element, FE)模型,设置各结构件的几何尺寸和物理参数,使之与设计变量相一致,并对不同孔径试验件模型的应变分布进行模拟计算,如图6

所示。在计算中,假设传感器仅受轴向应力的影响,且光纤与试验件基体的粘合力较好,即传感器与试验件表面的轴向应变分布相同。利用上述有限元分析结果,采用改进的传递矩阵公式模拟不同孔径试验件在不同弯曲载荷作用下的光纤传感器的反射光谱。

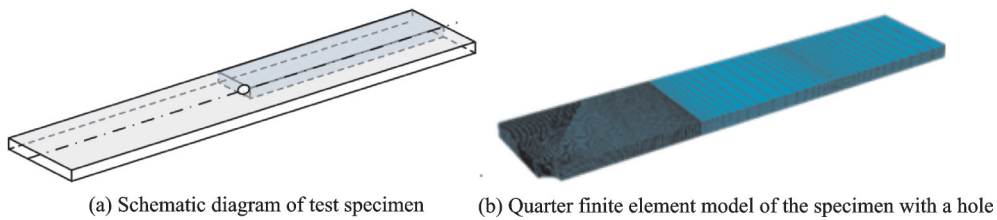


图6 有限元模型

Fig.6 Finite element model

根据有限元计算,试验件在不同弯曲载荷作用下的孔口附近表面单元节点处的应变分布如图7(a)所示(以3 mm直径圆孔为例)。孔口附近的应变场会随着载荷的变化而发生改变,对应的传感器反射光谱也会表现出不同的失真程度,如图7(b)所示。从图中可以看出,当施加的弯曲载荷变化时,光纤光栅传感器在弯曲试验中受到拉伸应力,其原始波形的中心窄峰会向更大的波长发生偏移,且对应旁瓣的峰值变化为非对称变化,左侧旁瓣变化较为明显。根据上述光谱的变化趋势,结合1.2节的

光谱仿真结果,可以推测出应变分布函数近似为指数函数,这与试验设计预期一致,说明光谱响应特征可以作为结构应变场形式的表征。

根据不同孔径的试验件有限元分析结果(以挠度1.0 mm的弯曲载荷为例),在相同的弯曲挠度下,孔口附近应变梯度随着圆孔尺寸的增大而增大,如图8(a)所示。从图8(b)中可以看出,随着孔径的增大,反射谱的中心窄峰会向左移动,其强度变化很小,而光谱的左侧旁瓣的峰值变化相对较大,

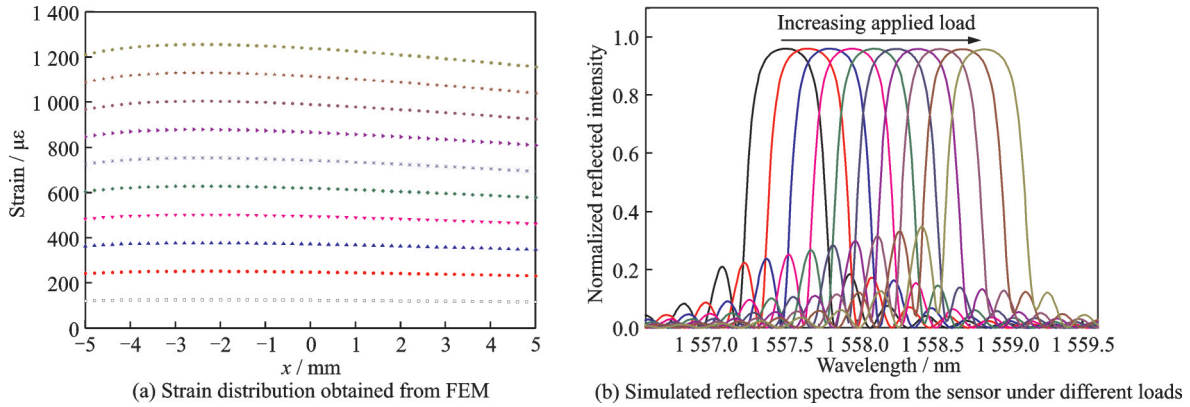


图 7 不同载荷下的传感器响应

Fig.7 Response of sensor subjected to the different loads

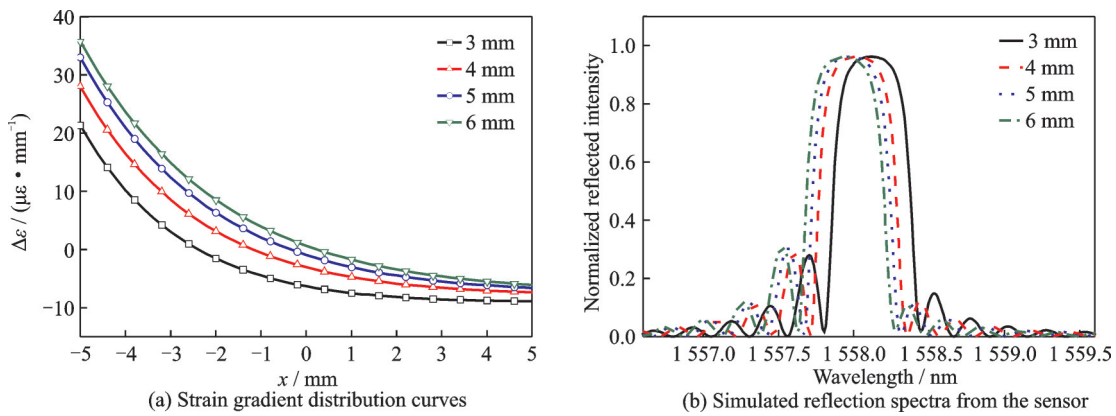


图 8 不同孔径试验件的传感器响应

Fig.8 Response of the sensor based on the strain distribution of specimens with different radius of hole

且随着孔径半径越大其峰值也越高,由此可推测出反射谱的峰值变化趋势和孔径的大小也具有明显的相关性,后文对此有详细的讨论。

3 结果分析

记录试验件的挠度及对应的传感器光谱响应,图 9 为(3 mm 圆孔试验件)试验加载过程各阶段得到的反射光谱,反射光谱的强度按最高分量的强度归一化。当试样在无载荷状态下,反射光谱有一个尖锐的窄峰。随着载荷的逐步增加,反射谱中心窄峰周围较低的分量峰值强度也逐渐变高,与 1.2 节有限元分析应变场对应的的光谱变化一致。由于这种趋势同时出现在测量和计算的光谱中,证实了这些反射光谱形式的变化是由弯曲效应引起的,即左侧旁瓣强度和应变梯度为正相关。其余孔径的试验件在加载过程中的光谱响应呈现相同的规律,这里不再一一列出。

将测量谱中的中心窄缝左侧第一个旁瓣峰(图 9)强度 I_L 和中心窄峰(波长较长)强度 I_R 的比值 I_L/I_R 定义为参数指标——比强度,分析不同孔径下的光谱在不同挠度下强度的变化趋势。有限元和试验

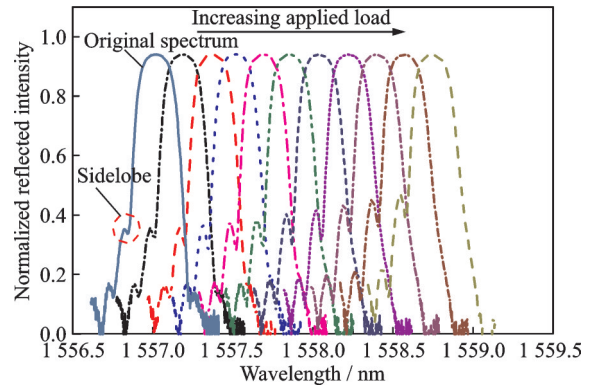


图 9 不同载荷下的光谱测量结果

Fig.9 Spectral measurement results of sensor subject to different loads

获得的光谱的挠度-比强度及拟合曲线如图 10 所示,可以看出,随着弯曲载荷的增大,比强度也逐渐增大,且弯曲载荷和强度比近似为线性关系。图 11(a)给出了试验件的孔径大小与比强度的曲线图(以 1 mm 位移载荷下的测试结果为例),其中红色曲线是基于有限元分析的计算结果,黑色曲线是试验测量分析结果。试验和仿真都显示 I_L/I_R 与圆孔半径大小成正相关,因此这两个峰强度的比值可以

作为预测圆孔半径尺寸的有效指标。除此之外,从图10可以看出,随着孔径变大,挠度-比强度线性关系的斜率逐渐变大,因此也可将此斜率的变化作为孔径大小的判定指标,其关系曲线如图11(b)所示。

本文试验中,粘贴光栅的树脂固化收缩会影响原始光谱旁瓣峰的峰值强度,光纤光栅制备中的紫

外光辐照不均匀会造成光栅的折射率直流平均变化量呈高斯分布,导致制作的光栅光谱短波边会出现较高的旁瓣。而在仿真计算分析中,光纤光栅的原始光谱使用了完全对称的模型,且数值求解模式耦合理论也会引起少量误差,因此仿真计算的光谱中旁瓣峰的峰值强度要不同于实测光谱处的峰值强度。

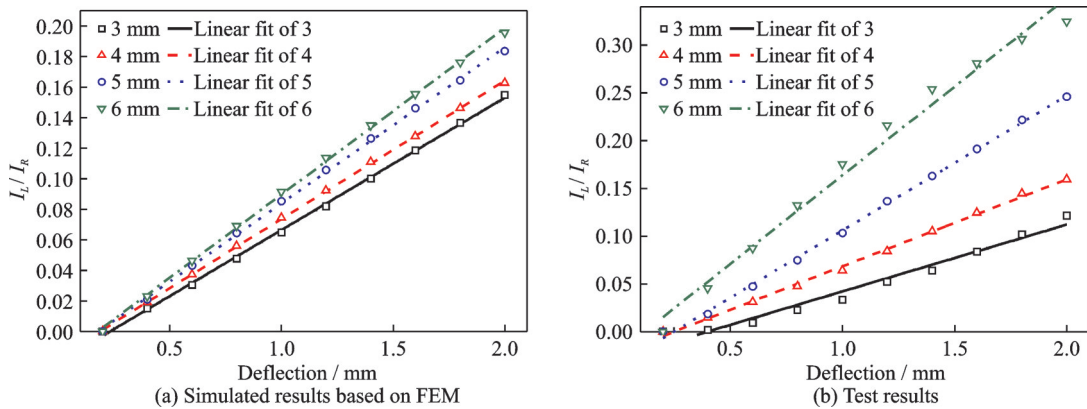


图10 不同孔径试验件的比强度和挠度关系曲线

Fig.10 Relationship between intensity ratio and deflection of specimens with different radius

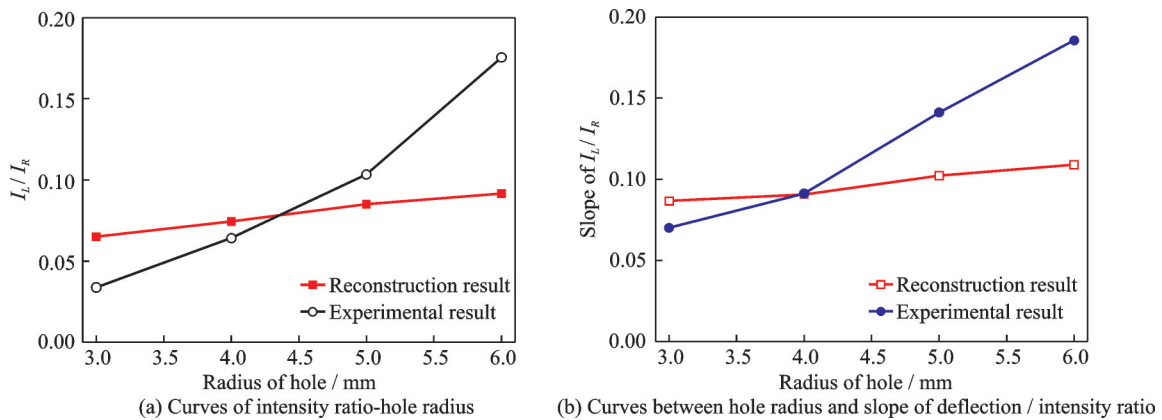


图11 圆孔半径和比强度关系曲线

Fig.11 Curves of circle hole radius and intensity ratio

4 结 论

本文对不同应变分布函数对应的光谱变化进行了计算分析,然后采用表贴式的光纤光栅传感器对准静态三点弯曲加载下的带孔铝合金板应变变化进行监测,得到如下结论:光栅传感器的光谱的强度、旁瓣、位移在不同的分布函数下会有明显差异,反射光谱特征可以用来推断结构的应变分布形式;基于有限元仿真重构和试验监测到的反射光谱,其旁瓣峰值均会随着弯曲载荷的增加而升高;当传感器处于孔口附近应变梯度非线性变化范围内时,光谱中的挠度/比强度为线性关系,该线性关系的斜率以及光谱中两个峰强度的比值可以作为

评价圆孔大小的指标。

参考文献:

- [1] RAMAKRISHNAN M, RAJAN G, SEMENOVA Y, et al. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials[J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 99.
- [2] 王永洪, 张明义, 马加骁, 等. 光纤布拉格光栅用于黏质土中静压沉桩贯入特性的测量研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0706004-1-0706004-10.
WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, MA Jiaxiao, et al. Measurements of penetration characteristics of jacked piles in clayey soil based on fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0706004-1-

- 0706004-10.
- [3] 戴慧芳,陈鹏,赵靖寅,等.啁啾体布拉格光栅的脉冲响应特性[J].光学学报,2019,39(10):1005002-1-1005002-7.
DAI Huifang, CHEN Peng, ZHAO Jingyin, et al. Impulse response characteristics of chirped volume Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1005002-1-1005002-7.
- [4] YASHIRO S, OKABE T. Damage identification in a holed CFRP laminate using a chirped fiber Bragg grating sensor[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67: 286-295.
- [5] JIN X, YUAN S, CHEN J. On crack propagation monitoring by using reflection spectra of AFBG and UFBG sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 491-500.
- [6] TAKEDA S, OKABE Y, YAMAMOTO T, et al. Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors[J]. Composites Part A (Applied Science and Manufacturing), 2002, 33: 971-980.
- [7] PETERS K, STUDER M, BOTSIS J, et al. Embedded optical fiber Bragg grating sensor in a nonuniform strain field: Measurements and simulations[J]. Experimental Mechanics, 2001, 41(1): 19-28.
- [8] 张荣祥,郑世杰,夏彦君,等.支持向量回归算法在光纤光栅非均匀应变重构中的应用[J].光学学报,2008,28(8):1513-1517.
ZHANG Rongxiang, ZHENG Shijie, XIA Yanjun, et al. Application of support vector regression for reconstruction of non-uniform strain profile along the fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1513-1517.
- [9] LING H, LAU K, CHENG L, et al. Embedded fibre Bragg grating sensors for non-uniform strain sensing in composite structures[J]. Measurement Science & Technology, 2005, 16(12): 2415.
- [10] PRABHUGOUD M, PETERS K. Modified transfer matrix formulation for Bragg grating strain sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(10): 2302-2309.
- [11] AYDIN R, RICHARD H, HENDRIKS R C, et al. Characterization of transverse matrix cracks in composite materials using fibre Bragg grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4720-4727.
- [12] 袁慎芳,金鑫,邱雷,等.基于FBG反射谱特征的修补结构裂纹扩展监测[J].光谱学与光谱分析,2015(3):724-729.
YUAN Shenfang, JIN Xin, QIU Lei, et al. Monitoring of crack propagation in repaired structures based on characteristics of FBG sensors reflecting spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015(3): 724-729.
- [13] HUANG G, WEI C, CHEN S, et al. Reconstruction of structural damage based on reflection intensity spectra of fiber Bragg gratings[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(12):125109.
- [14] LING H Y, LAU K T, SU Z, et al. Monitoring mode II fracture behavior of composite laminates using embedded fiber-optic sensors[J]. Composites Part B (Engineering), 2007, 38(4): 488-497.
- [15] YASHIRO S, WADA J, SAKAIDA Y. A monitoring technique for disbond area in carbon fiber-reinforced polymer bonded joints using embedded fiber Bragg grating sensors: Development and experimental validation[J]. Structural Health Monitoring, 2017, 16(2): 185-201.
- [16] 江灏,周清旭,陈静,等.畸变光谱下光纤布拉格光栅传感网络波长检测优化方法[J].光学学报,2019,39(10):1006002-1-1006002-10.
JIANG Hao, ZHOU Qingxu, CHEN Jing, et al. Wavelength detection optimization of fiber Bragg grating sensing networks based on distortion spectrum[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006002-1-1006002-10.
- [17] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.

(编辑:胥橙庭)