

文章编号 1004-924X(2010)01-0001-08

应用光学低相干反射测量术实现 光纤光栅分布式复杂应变测量

沈小燕, 林玉池, 赵美蓉, 王 为

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:用光纤布拉格光栅 FBG 测量非均匀轴向应变时, 会由于反射波谱形状的改变而无法用测量 Bragg 波长的方法来解调, 因此, 研究了用光学低相干反射测量(OLCR)实现光纤 Bragg 光栅复杂应变测量的原理和方法。分析了以扫描 Michelson 干涉仪为核心的时分复用光学低相干反射测量系统的测量原理和实现过程。通过傅里叶变换, 将脉冲响应转化为失调范围内的频率响应, 采用光栅重构技术, 获得光栅沿轴向各段的复耦合系数; 然后, 由各复耦合系数得到沿轴向各段的 Bragg 波长; 最后, 根据 FBG 的传感模型获得沿轴向的应变分布。将该系统用于复合层板 I 型层分断裂试验中应变测量, 得到了断裂过程中的轴向非均匀应变分布, 结果切实可靠。FBG 的平均应变测量精度为 13.2 μm , 系统的轴向扫描精度可达 100 nm。实验表明, OLCR 能够很好地实现 FBG 的复杂应变测量, 具有很好的应用前景。

关键词:光学低相干反射测量术; 光纤布拉格光栅; 非均匀应变测量; 层分

中图分类号: TB93; TN253 **文献标识码:** A

Measurement of distributed non-uniform strains by fiber bragg grating sensing with OLCR technology

SHEN Xiao-yan, LIN Yu-chi, ZHAO Mei-rong, WANG Wei

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The Optical Low Coherence Reflectometry (OLCR) is proposed to solve a problem that the reflective spectrum of a Fiber Bragg Grating (FBG) can be out of a shape under non-uniform strain loading. Based on a Michelson interferometer, an OLCR system is set to measure the pulse response of the FBG, and the time domain pulse response of FBG is converted into the frequency domain reflection response by Fourier transform. Then the spatial response of FBG relevant to Bragg wavelength is reconstructed with a lay peeling technology. Thus, the non-uniform strain distribution is calculated from the sensing model of FBG. With an effective system, the OLCR is illustrated in detail. An experiment of composite delamination in mode I is conducted, and the non-uniform strain distribution is obtained with reliability. The axial measurement resolution in the FBG is 13.2 μm , and the scanning precision of the system reaches 100 nm. The OLCR system demonstrates an excellent performance in

收稿日期: 2009-06-15; 修订日期: 2009-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60874106)

demodulating the FBG non-uniform strain sensing, which shows that the system has a promising application prospect.

Key words: Optical Low Coherent Reflectometry(OLCR); Fiber Bragg Grating(FBG); non-uniform strain measurement; delamination

1 引言

光纤 Bragg 光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 在传感领域应用广泛, 可用于应变、温度、位移、压力、加速度、曲面形状等测量^[1-3]。用 FBG 测量均匀应变原理简单, 只要测得 Bragg 波长 λ_B 的变化量 $\Delta\lambda_B$, 就可以依据两者的线性关系得到应变值。测量 $\Delta\lambda_B$ 的方法很多^[4-5], 也比较成熟, 因此用 FBG 来测量均匀应变已在工程领域广为应用。但用 FBG 测量复杂应变环境(如材料的断裂、剥离、分层、不均匀收缩、弯曲等)时, FBG 会发生严重啁啾, 反射波形发生变化, 无法通过测量整体的 Bragg 波长来实现解调。可靠的方法是采用光学低相干反射技术 (Optical Low Coherence Reflectometry, OLCR), 沿轴向逐段的获得 FBG 的 Bragg 波长, 然后根据 FBG 传感模型来获得沿轴向的应变分布。

OLCR 技术实现光栅应变解调的本质就是实现光栅反射波谱重构, 其最大的特点是获得关于轴向位置的反射波功率函数, 从而实现 FBG 逐段分布式测量。K. Takada^[6] 等以及 B. L. Danielson^[7] 等首次将 OLCR 技术应用到单模光纤的标定中, 经过多年探索, OLCR 技术^[8] 可以有效应用于均匀 FBG 参数检测(位置、长度、耦合系数等), 空间 FBG 复用解析和复波谱反应等。其中最有前途的当属 FBG 分布式测量中沿轴向空间信息恢复来实现复杂应变测量^[9]。目前国内已有人将 OLCR 技术用于 FBG 传感, 如浙江大学及电磁波研究中心^[10-11] 已将低反射率 FBG 组成 F-P 腔并组网, 利用 OLCR 技术实现对 FBG 阵列传感器的解调。但在该项研究中, FBG 承受的仍是均匀应变或温度, 并没有实现真正意义上的沿 FBG 轴向非均匀应变的分布式测量。本文提出用一套实用型时分复用 OLCR 系统来实现埋入式长 FBG 的轴向应变测量。复合层板 I 型

层分实验证明, OLCR 测量方案行之有效, 且轴向测量精度较高, 真正实现了 FBG 沿轴向非均匀应变分布测量。

2 OLCR 测试系统

2.1 OLCR 测量技术原理

区别于 FBG 受均匀应变时的简单传感模型 $\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon_z$ ^[12] (其中 $P_e = 0.216$, 为有效弹光系数, ϵ_z 为轴向均匀应变), FBG 受非均匀应变时的传感模型要从其折射率调制模型入手: $n(z) = n_0 + \Delta n_{ac}(z) \cos((2\pi/\Lambda_d)z + \theta(z)) + \Delta n_{dc}(z)$ ^[13], 这是因为与沿纤芯轴向 z 分布的 Bragg 波长 $\lambda_B(z)$ 密切相关的量, 即光纤光栅空间复耦合系数 $q(z)$ 的幅值 $A_q(z)$ 与光栅纤芯折射率交流调制幅度 $\Delta n_{ac}(z)$ 成正比, 它的相位 $\phi_q(z)$ 是有关折射率直流调制幅度 $\Delta n_{dc}(z)$ 以及光栅栅格周期 Λ_d 的函数。另外, n_0 是未调制前的纤芯折射率, $\theta(z)$ 是折射率调制相位函数。 $q(z)$ 与 $\Delta\lambda_B(z)$ 有^[9]:

$$\lambda_B(z) = \left\{ \frac{1}{\lambda_B} + \frac{1}{4\pi n_{eff}} \cdot \frac{d\phi_q(z)}{dz} \right\}^{-1}, \quad (1)$$

其中有效折射率 $n_{eff} = n_0 + \Delta n_{dc}(z)$ 。实际上, 光栅可以从空间(z)、频域(ν)和时域(τ)三方面来描述^[14], 见图 1。时域脉冲 $h(\tau)$ 经傅里叶转换成波谱函数 $r(\nu)$, 利用层剥技术 (Lay-peeling, LP)^[15-16], 计算获得空间耦合系数 $q(z)$, 最后利用 $q(z)$ 与 $\lambda_B(z)$ 的关系得到 $\lambda_B(z)$ 。只要得到 $\lambda_B(z)$ 就可以通过应变传感模型获得非均匀应变 $\epsilon_z(z)$ 。因此, FBG 非均匀应变测量的关键就是获得时域脉冲 $h(\tau)$ 。

OLCR 测试系统实现上述过程的核心就是获得时域脉冲 $h(\tau)$, 常用扫描 Michelson 干涉仪或 Mach-Zender 干涉仪来实现。图 2 为一套简易全光纤 Michelson 型 OLCR 系统。3 dB 耦合器 X 将低相干光源 L 分成两路, 分别入射到参考臂和测试臂, 可移动反射镜 M 和 FBG 反射回来的

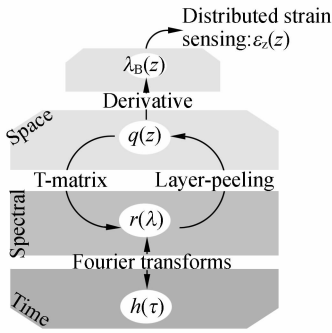
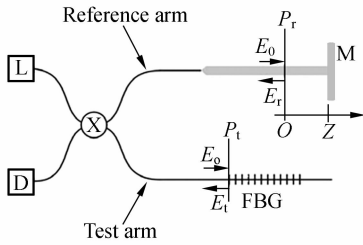


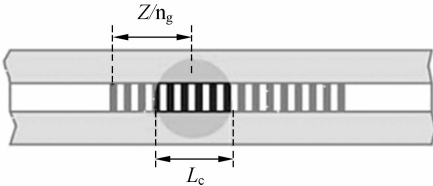
图 1 FBG 的 3 种不同描述方法以及转换路径

Fig. 1 Different paths between the two FBG representations



(a) 基本 OLCR 设置

(a) Basic OLCR set-up for FBG characterization



(b) FBG 在反射镜为 z 时的干涉

(b) Main interfering region in FBG for a mirror position z

图 2 全光纤 Michelson 型 OLCR 系统

Fig. 2 All optical fiber Michelson OLCR system

两路光又经 X 入射到探测器 D 上。P_r 是反射镜 M 的位置, P_t 是测试臂中 FBG 入口位置。若 P_r 到 X 的光程差和 P_t 到 X 的光程差相等(由于光传输介质不同,故物理路程并不相等),则输入电磁场 E₀ 在 P_r 和 P_t 位置具有相同的相位。此时反射电磁场 E_r 和 E_t 因具有相同的延迟时间而在 D 处具有相同相位,且光强因经过 X 而各自减为原来的一半。当 M 横向运动时, D 测得光强 I(z) 为:

$$I(z) = \frac{|E_r(z) + E_t|^2}{2} = \frac{(|E_r(z)|^2 + |E_t|^2)}{2} + \text{Re}(E_r(z)E_t^*), \quad (2)$$

其中, z 是 M 的位置, $z=0$ 对应 P_r, 式(2)中右边第一项是总光强,第二项是干涉光光强,即 OLCR 系统所要测的量。* 表示复数的共轭。干涉光强可看成是镜子反射光和 FBG 以 z/n_{eff} 处为中心,宽度为 L_c (L_c 是光在光纤中传播的相干长度) 的小段光栅反射光的合成,且有:

$$I_{\text{OLCR}} = \text{Re}(E_r(z)E_t^*) = \frac{1}{2} I_s \text{Re}(\gamma(\tau) \times h(\tau)), \quad (3)$$

其中, I_s 是光源强度, $\gamma(\tau)$ 是低相干光源归一化傅里叶变换值, h(τ) 是 FBG 的脉冲反应, c₀ 是真空中光速,且 $\tau = 2z/c_0$ 。h(τ) 定义在 FBG 入口 P_t 处,它与傅里叶变换后的反射率 r(ν) 相对应。实际工作中为便于描述,用光程差 (OPLD) ζ 来代替时间脉冲,有 $\tau = \zeta/c_0$,它决定了光纤上平均应变的范围,即光纤应变测量精度 L_r:

$$L_r = L_c / (2n_{\text{eff}}) = 0.882 \lambda_{\text{SLD}}^2 / (2n_{\text{eff}} \Delta\lambda_{\text{SLD}}), \quad (4)$$

其中 λ_{SLD} 和 Δλ_{SLD} 相分别是低相干光源的中心波长和半高带宽。一般取光纤纤芯折射率 n_{eff} = 1.45。

2.2 OLCR 测试系统及其工作原理

实验采用一套全光纤 Michelson 型时分复用系统(见图 3)。低相干光源 SLD 中心波长 1 318 nm,半高带宽 40 nm,由式(4)计算得到系统的光纤应变测量精度为 L_r = 13.2 mm。可调参考激光 TL 设定为 Bragg 波长。移动台 TS 控制反射镜 MIR 的移动,调节范围有 25 cm。压电陶瓷 PZT 对参考信号进行频率为 f = 178 Hz 的锯齿波相位调制。通过光开关 OpS 将低相干光和参考激光分开实现时分复用,分别测得 OLCR 信号以及参考激光干涉信号。与图 2 相比,系统还具

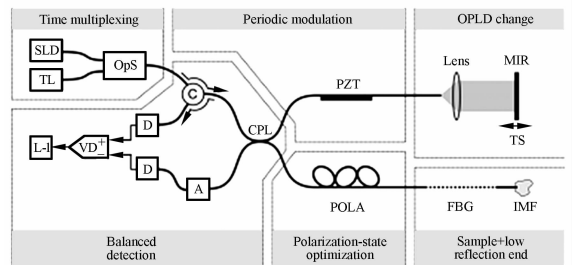


图 3 时分系统测量方案

Fig. 3 Time multiplexing OLCR set-up

有:补偿探测结构,不仅消去了直流常量,更将交流干涉信号两倍化,有效提取干涉信号;偏振装置 POLA 可以调节测试信号的偏振态,使其与参考信号的偏振态一致;双稳态放大器 L-I 直接提取了 OLCR 信号和参考激光信号的相位和幅值信息。OLCR 系统的光程差 ζ 由 TS 步进马达控制系统给出,最小步进距离为 100 nm,精确度高,运行几厘米后准确度仍 $< 1 \mu\text{m}$ 。

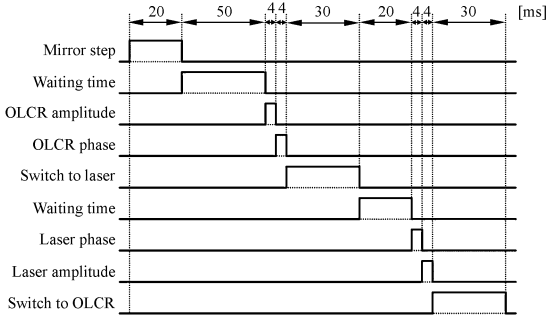


图 4 时分复用系统测量时序

Fig. 4 Measurement chronology for OLCR set-up

图 4 是系统测量时序。首先给定光程差,测量低相干光源下干涉信号(标记为 OLCR 信号)的幅值 A_{lc} 和相位 Φ_{lc} ,然后光源经光开关换成参考激光,测量激光干涉信号的幅值 A_L 和相位 Φ_L ,接着在步进马达的推动下给出下一个光程差,如此反复。

图 5(a)中是在不同 ζ 下 OLCR 系统测得的信号 $I_{OLCR}(\zeta)$,其周期是低相干光源半宽中心波长。对于定值 ζ ,OPLD 被调制成频率为 f 的锯齿波,见图 5(b)。系统信号 $I_{OLCR}(\zeta, t)$ 是连接一个周期内的分段干涉信号重建而成的正弦时域信

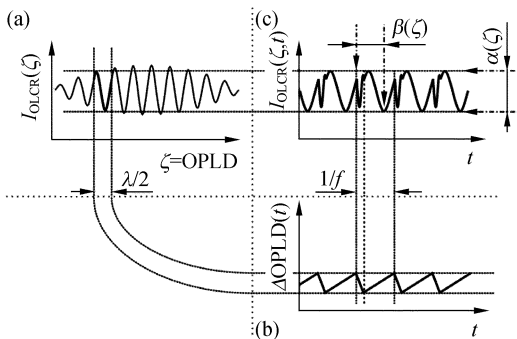


图 5 OLCR 方法生成的信号

Fig. 5 Signal generation for OLCR set-up with static method

号,其幅值为 $\alpha(\zeta)$;同时,图 5(b)中锯齿波峰与图 5(c)中信号最小值相位差为 $\beta(\zeta)$ 。锯齿波过渡时间(左虚线和点线之间)会引起信号变形,从而规定了调制频率极限。

定义缓变 OLCR 复函数信号 $f(\zeta)$:

$$f(\zeta) = A_{OLCR}(\zeta) \cdot \exp(-i \cdot \Delta\phi(\zeta)), \quad (5)$$

其中 $A_{OLCR}(\zeta) = A_{SLD}(\zeta) / A_{L, 2nd\ order}(\zeta)$,即将低相干光源干涉信号幅值除以激光干涉信号二阶拟合幅值,其包络线与 $\alpha(\zeta)$ 同; $\Delta\Phi(\zeta) = \phi_{SLD}(\zeta) - \phi_L(\zeta)$ 是 $f(\zeta)$ 的相位信息,即 $\beta(\zeta)$,它消除了所有相位漂移的相位差。 $f(\zeta)$ 与 FBG 的复函数反射率 $r(\nu)$ 和低相干光源有效波谱功率密度 $S(\nu)$ 相关:

$$f(\zeta) \cdot e^{i \cdot 2\pi\nu_0 \frac{\zeta}{c}} = A_{OLCR}(\zeta) \cdot e^{i\phi_{lc}(\zeta)} \sim \int d\nu S(\nu) \cdot r(\nu) f(\zeta) \cdot e^{-i2\pi\nu \frac{\zeta}{c}}, \quad (6)$$

其中 \sim 表示正比例关系。由式(6)知,缓变 OLCR 复函数信号 $f(\zeta)$ 反傅里叶变换后的 $F(\nu)$ 是与 $(S(\nu)r(\nu))$ 成比例的。因此 $r(\nu)$ 可以简单表示为频域里一个除法: $F(\nu)/S(\nu)$ 。 $S(\nu)$ 的值是当 FBG 端替换为光纤时确定的,其反射率在整个光源频率范围内为常量。

$$r(\nu) \sim \frac{FT^{-1}(F(\zeta))}{FT^{-1}(S(\zeta))} = r_{nc}(\nu), \quad (7)$$

其中, FT 是傅里叶变换, FT^{-1} 是反傅里叶变换。 $r_{nc}(\nu)$ 是未标定 FBG 反射率。 $S(\nu)$ 是实函数,故 $FT^{-1}(S(\zeta))$ 是一个实数。最后,通过可调激光测与反射率无关的 FBG 透射率获得最大反射强度 $R_{FBG, max}$, 得到归一化反射率:

$$r(\nu) = \frac{r_{nc}(\nu)}{\text{Max}(|r_{nc}(\nu)|)} \cdot \sqrt{R_{FBG, max}}. \quad (8)$$

得到归一化反射率 $r(\nu)$ 后,采用 LP 重构方法计算耦合系数 $q(z)$ 。

3 实验过程及结果

OLCR 应变测试系统用于测量复合层板 I 型层分实验中的断裂应变分布状态。实验中所用的双悬臂梁(Double Cantilever Beam, DCB)由 AS4/PPS 材料采用常规做法制成,铝箔埋入复合板厚度的中间位置以生成预裂纹。20~35 mm 长的 FBG 埋在分裂层上约两个光纤直径处(约 0.264 mm),这个厚度既能保证层分时光栅不被

拉断,又能保证足够的传感灵敏度。总长度为 200 mm,厚度为 $2h=3.7$ mm,在受到垂直拉伸力 P 时,打开的上下距离为 Δ ,受力点到板材端部的距离 $l=5$ mm,预裂纹长度 $a_0=60\sim 70$ mm,受力点到裂纹顶端距离为 a ,见图 6。

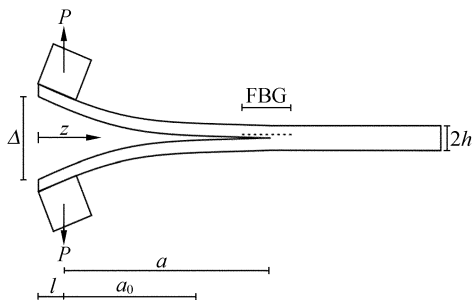


图 6 DCB 复合层板结构

Fig. 6 Schematic of DCB specimen

实验严格按照 ASTM D-5528 中对 I 型层分实验的要求,具体设置如图 7。实验时,通过配套软件控制 Δ ,进给速率为 0.01 mm/min,直到位置 a 处。裂纹顶端的生长过程通过 CCD 数码相机记录。当裂纹顶端位于 a 处时,系统开始测量,保持 Δ 不变,持续观察。接着,再增加 Δ ,系统再次测量。图 8 是当裂纹顶端到达一定位置时,DCB 试验板的层分情况,层中的桥接纤维清晰可见。

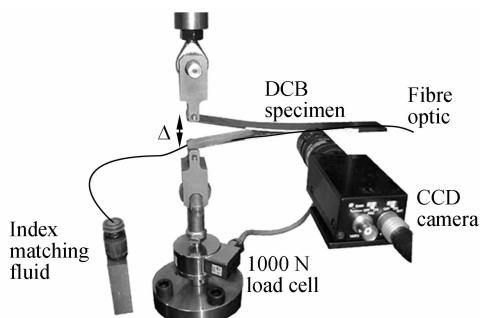


图 7 层分实验测试系统

Fig. 7 Set-up for delamination testing

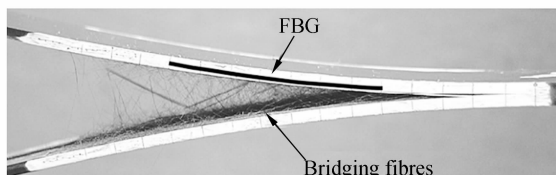


图 8 层分实验实例

Fig. 8 Example of fibre bridge for a DCB specimen

在复杂应变环境中最常出现 FBG 横向受力满足泊松方程而轴向受力不均匀,即 $\epsilon_x(z) = \epsilon_y(z) = -\nu_f \epsilon_z(z)$,此时有 $\Delta\lambda_B(z)/\lambda_B = (1 - \nu_f)\epsilon_z(z)$ 。图 9 给出了当裂纹顶端生长到 FBG 中间时的典型轴向应变分布^[17-18],从中看出所测得的波谱在高波长位置有一波峰,相应于裂纹顶端生长过的部分;在低波长位置有一波峰,且为原始波峰,相应于裂纹顶端尚未到达的地方;两峰之间波长变化也相应于应变变化。图 10 是由光谱仪测得的实际波谱,与理论推测相符。

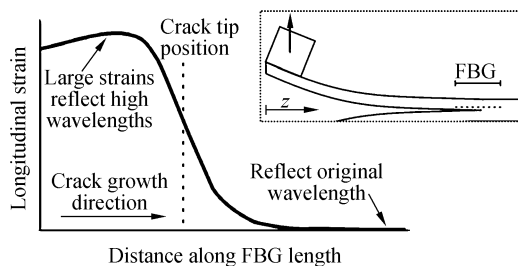


图 9 FBG 轴向应力分布^[17-18]

Fig. 9 Schematic of longitudinal strain $\epsilon_z(z)$ distribution in a FBG^[17-18]

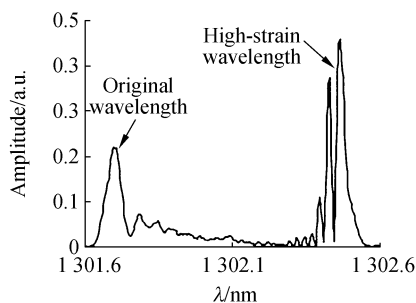


图 10 光谱仪测得的真实反射波谱

Fig. 10 Actual spectral distribution measured for a given crack length

很明显,通过简单测量波谱只能看出 FBG 受到了啁啾,不能具体知道出现啁啾的原因;而通过 OLCR 的测量,就可以得到 FBG 沿轴向分布的受力状况。OLCR 测量方法的优势显而易见。图 11 是当裂纹顶端分别生长到位置 1($a=82.8$ mm)、2($a=96.3$ mm)、3($a=106.3$ mm)时,由 OLCR 系统测量计算得到的 FBG 沿轴向的 Bragg 波长移动量。从曲线 1、曲线 2、曲线 3 可以看出,FBG 在位置 1、2、3 处均受到了非均匀的应变。随着裂纹顶端向右生长,轴向的应变分布

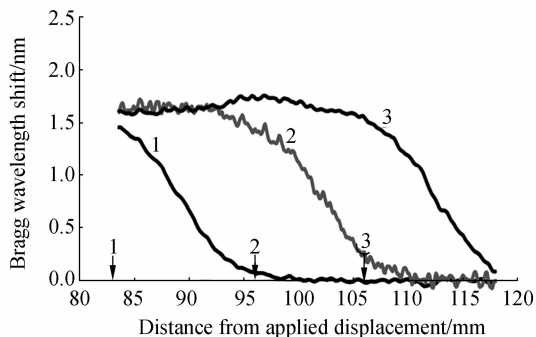


图 11 裂纹增长时位置 1,2,3 处 FBG 波长沿轴向变化

Fig. 11 Wavelength shift measurements for increasing crack lengths in positions 1, 2, and 3

发生相应变化。在位置 1 时,裂纹顶端刚刚接近 FBG,FBG 的一小部分开始感受层裂产生的渐变应力,FBG 的一大部分还处于初始状态;到达位置 2 时,裂纹顶端正处于 FBG 下方,原来感受层间渐变应力的部分 FBG 开始感受趋于常态的层间应力,原先处于初始态的 FBG 开始感受层间渐变应力;在位置 3 时,裂纹顶端基本上已经经过了整个 FBG,FBG 的一大部分感受趋于常态的层间应力,小部分感受裂纹附近渐变的层间应力。图 11 的结果清晰地给出了裂纹生长过程中裂纹顶端前后的层间桥接应力变化过程。

参考文献:

- [1] KIESEL S M, PETERS K, HASSAN T, *et al.*. Single-mode polymer optical fiber sensors for large strain applications[J]. *Heterogeneous Integration of Materials for Passive Components and Smart Systems*, 2007, 969:125-130.
- [2] 樊红朝,钱晋武,章亚男,等. 柔性曲面形状检测传感网络设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 1087-1092.
FAN H CH, QIAN J W, ZHANG Y N, *et al.*. Sensor network design for flexible surface shape measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1087-1092. (in Chinese)
- [3] 王为,林玉池,朱萍玉. 光纤光栅在低阻抗材料动态性能测试中的应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3):488-492.
WANG W, LIN Y CH, ZHU P Y. Application of

4 结 论

本文详细介绍了采用 OLCR 技术实现光纤 Bragg 光栅复杂应变测量的原理和方法,着重分析了一套以 Michelson 干涉仪为核心的实用时分复用 OLCR 系统的工作原理和测量实现过程。分析表明,低相干光源相干长度 L_c 决定了 FBG 轴向应变测量精度 L_r ,有 $L_r = 13.2$ mm;系统的轴向扫描精度由步进马达的步进距离决定,目前可以达到 100 nm,两者共同影响了 OLCR 系统的轴向应变测量精度。进行了复合层板 I 型层分实验,由 OLCR 系统测量 FBG 轴向 Bragg 波长变化,获得了裂纹增长过程中轴向应变分布,结果切实可靠,表明 OLCR 技术可以有效测量 FBG 复杂应变,具有很好的应用前景。

OLCR 技术还有很大的研究和进步空间,如改进光程差控制系统来提高测量精度,控制程序的优化,应用范围扩展等。OLCR 以其独特的测量优势引得人们的关注,但是不得不指出,OLCR 系统离工程应用还有一定的距离,因为它对测试环境要求较高,测量时要求整个系统防震防尘且恒温,目前多用于实验室。

FBG sensor to measurement of dynamic performance of low Impedance material [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):488-492. (in Chinese)

- [4] 方福波. 基于单片机的光纤 Bragg 光栅传感器的解调系统[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(4):383-387.
FANG F B. Application of a single chip microprocessor in the optical fiber Bragg grating sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4): 383-387. (in Chinese)
- [5] 杨先辉,张秋华,于永森,等. 可调谐 F-P 腔进行锥形光栅反射带宽解调的应力测量方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5):651-655.
YANG X H, ZHANG Q H, YU Y S. Measurement of temperature-insensitive strain based on reflected bandwidth demodulation of tapered fiber grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 651-655. (in Chinese)
- [6] TAKADA K, YOKOHAMA I, CHIDA K, *et al.*.

- New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique[J]. *Appl. Opt.*, 1987,26:1603-1606.
- [7] DANIELSON B L, WHITTENBERG C D. Guided-wave reflectometry with micrometer resolution[J]. *Appl. Opt.*, 1987,26:2836-2842.
- [8] OBATON A F, PALAVICINI C, JAOUEN Y, *et al.*. Characterization of fiber bragg gratings by phase-sensitive optical low-coherence reflectometry [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006,55(5):1696-1703.
- [9] COLPO F, HUMBERT L, BOTSIS J. Characterisation of residual stresses in a single fibre composite with FBG sensor[J]. *Composites Science and Technology*, 2007,67:1830-1841.
- [10] WEISHEN LIU Z G, GUORONG LIU, CHUNSHENG YAN, *et al.*. Optical low-coherence reflectometry for a distributed sensor array of fiber bragg grating[J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 144:64-68.
- [11] LIU W S, GUAN Z G, LIU G R, *et al.*. Distributed sensing system of optical low-coherence reflectometry using an array of identical fiber bragg gratings[J]. *IEEE Sensors*, 2007,1-3:391-394.
- [12] 李丽, 林玉池, 付鲁华, 等. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2007,15(4):473-477.
- LI L, LIN Y C, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber bragg grating sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(4):473-477. (in Chinese)
- [13] OTHONOS A. Fiber bragg gratings[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997,68(12):4309-4341.
- [14] BOTSIS J, HUMBERT L, COLPO F, *et al.*. Embedded fiber bragg grating sensor for internal strain measurements in polymeric materials[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005,43:491-510.
- [15] 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):2439-2444.
- CHEN ZH M, CHEN J, SHU R J. Simulation and reconstruction for nonuniform strain profile of fiber bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006,19(6):2439-2444. (in Chinese)
- [16] SKAAR J, WAAGAARD O H. Design and characterization of finite-length fiber gratings [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003,39(10):1238-1245.
- [17] DIAZ DIAZ A, CARON J F, EHRLACHER A. Analytical determination of the modes I, II and III energy release rates in a delaminated laminate and validation of a delamination criterion[J]. *Composite Structures*, 2007,78(3):424-432.
- [18] ATODARIA D R, PUTATUNDA S K, MALLICK P K. Delamination growth behavior of a fabric reinforced laminated composite under mode I fatigue[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 1999,121(3):381-385.

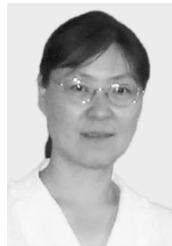
作者简介:



沈小燕(1982—),女,浙江湖州人,博士研究生,主要从事光纤传感和精密测试技术等方面的研究。E-mail: shenxiaoyan@tju.edu.cn



林玉池(1946—),男,福建莆田人,教授,博士生导师,主要从事光电测控与视觉检测技术、现代传感与测试信息技术等方面的研究。E-mail: ychlin@tju.edu.cn



赵美蓉(1967—),女,天津人,博士,教授,主要从事光电检测技术、纳米测量技术及现代传感技术的研究。E-mail: meirongzhao@eyou.com



王 为(1980—),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事光纤传感及检测技术的研究。E-mail: wangweivip@tju.edu.cn

●下期预告

个体眼结构的横向色差随外置光阑偏心和视场的变化

王肇圻^{1,2},张 梅^{1,2},王 雁³,左 彤³

(1.南开大学 现代光学研究所,天津 300071;

2.南开大学 光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071;

3.天津医科大学 天津眼科医院屈光手术中心,天津 300020)

为了研究工光阑偏心和轴外物点等外界因素引入的人眼横向色差的变化规律,构建了个体眼结构并基于此来进行研究。由角膜地形图计算了 8 只人眼视轴与光轴的夹角。依据实际测得的角膜地形图数据、人眼波像差、眼轴数据以及计算的视轴与光轴间夹角,运用 ZEMAX 光学设计软件构建了考虑视轴方向的个体化眼模型。基于这些眼模型,研究了外置人工光阑相对视轴偏移在中心凹附近所引入的横向色差变化规律,然后研究了 420~700 nm 波段边缘横向色差随入射视场角的变化规律。研究表明,横向色差随人工光阑的偏移量线性增加;8 只人眼存在一定的个体差异,横向色差随人工光阑偏移量增加的速率在 5.46~5.95'/mm 之间,平均值为 5.7'/mm。在鼻侧和颞侧 20°视场内,8 只人眼的横向色差平均以 0.36'/°的速率随视场角增加而增加,不同个体的增长速率有所差别,变化在 0.32~0.44'/°之间。同时横向色差在长波段的变化要比短波段处缓慢。横向色差随外置光阑偏心和视场有较大的增长,因此在视网膜成像系统和现代头盔系统的设计中应当考虑横向色差的影响。