

分布式光纤传感器应变传递规律研究

章征林¹, 高磊^{1,2*}, 孙阳阳¹, 张清华¹, 曾鹏¹

¹陆军工程大学国防工程学院, 江苏 南京 210007;

²河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210007

摘要 基于光频域反射技术,建立一种应变传递模型,推导了光纤应变传递关系,分析了分布式光纤应变测量结果的影响因素。通过等强度梁弯曲实验,分别从粘贴长度和涂覆层剪切模量等方面研究了光纤传感器的测量结果。研究表明,粘贴长度越长,应变传递率越高,当粘贴长度达到一定值时,光纤中间区域的应变传递率为 1,两端的逐渐减小,涂覆层和胶粘剂的剪切模量越高,应变传递率越大。工程应用中应选用剪切模量高的涂覆层光纤及胶粘剂,粘贴长度应大于需测量区域的长度。

关键词 传感器; 应变传递规律; 分布式光纤; 光频域反射; 粘贴长度; 剪切模量

中图分类号 TH823

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0410001

Strain Transfer Law of Distributed Optical Fiber Sensor

Zhang Zhenglin¹, Gao Lei^{1,2*}, Sun Yangyang¹, Zhang Qinghua¹, Zeng Peng¹

¹National Defense engineering College, Army Engineering University, Nanjing, Jiangsu 210007, China;

²Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Dam Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210007, China

Abstract Based on the optical frequency domain reflection technology, we establish a strain transfer model, derive the strain transfer relationship of fiber, and analyze the influencing factors of the distributed fiber strain measurement results. Through the equal-strength beam bending experiment, we study the measurement results of the fiber-optic sensor from the aspects of the adhesion length and the shear modulus of the coating layer. The results show that the longer the adhesion length, the higher the strain transfer rate. When the adhesion length reaches a certain level, the strain transfer rate in the middle of the optical fiber is 1, and those of the both ends are gradually reduced. The higher the shear modulus of the coating layer and the adhesive, the greater the strain transfer rate. Therefore, coating fibers and adhesives with high shear modulus should be used in engineering applications, and the adhesion length should be greater than the length of the area to be measured.

Key words sensors; strain transfer law; distributed optical fiber; optical frequency domain reflectometer; adhesion length; shear modulus

OCIS codes 280.4788; 060.2370; 120.4570; 290.1350

1 引 言

传统的应变测量方法多采用电阻式应变片,但是应变片是单点测量,且在实际使用中需要大量的导线连接应变仪,耗时耗力。随着光学技术的发展,还出现了以光纤布拉格光栅(FBG)传感器等为代表的准分布式光纤传感器,然而 FBG 传感器的测点会

受到激光带宽的限制^[1]。如今,分布式光纤传感技术日渐成熟,基于背向瑞利散射的分布式光纤传感器已经具备了在诸多领域可取代传统电阻式应变片和 FBG 传感器的潜力^[2]。分布式光纤传感器具备测点密度极高,间距可控,质量小,耐腐蚀,电绝缘,精度高,及重复性好的特点。此外,基于其质地较柔软坚韧的特性,分布式光纤传感器对结构表面的形

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2018-12-17; 录用日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51608528)、江苏省自然科学基金(BK20161467)、岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放研究基金(201705)

* E-mail: bluejedy@163.com

状有较好的适应性。在实际工程应用中使用的是封装后的光纤传感器,常用的光纤封装方法有涂覆、镀膜和黏接等^[3],这会使基体与光纤之间形成一个涂覆层、黏接层或其他中间层,其物理特性与光纤存在较大差异,会对光纤应变传感造成一定的影响,因此,光纤传感器的应变传递规律的分析研究显得很有意义。

对于FBG的应变传递规律,国内外专家学者进行了大量研究工作^[4-17],并取得了重要的研究成果,建立了应变传递模型,分析了影响应变传递规律的因素,并给出了各种因素与传递率的关系。但是,FBG是在剥去涂覆层的单模光纤纤芯上刻写光栅,光纤退火后再在光栅区涂覆一层剪切模量较原有涂覆层低的保护层,从而形成一个个点式的传感区域。普通光纤没有这一结构,因此FBG的传递规律必然受到涂覆层的影响,且与分布式光纤的传递规律也

不尽相同。

由于FBG与光纤在结构及工作原理上存在差异,所以必须对分布式光纤的应变传递规律展开相应的研究。本文基于光频域反射(OFDR)技术的高性能光纤分布式应变监测方法,在已有的理论研究基础上,考虑光纤本身的影响,开展表面粘贴光纤传感器应变传递性能的理论分析与实验研究。通过建立光纤-胶结层-基体三层应变传递模型,推导应变传递的一般规律;同时在等强度梁表面粘贴不同长度和不同类型的光纤,通过应变测量实验,验证了应变传递模型的准确性和适用性。

2 应变传递规律

根据光纤在结构表面粘贴后形成的断面,建立如图1所示的光纤粘贴模型,其中 h_c 为光纤下表面距被测基体的距离, h_m 为光纤上表面胶层厚度。

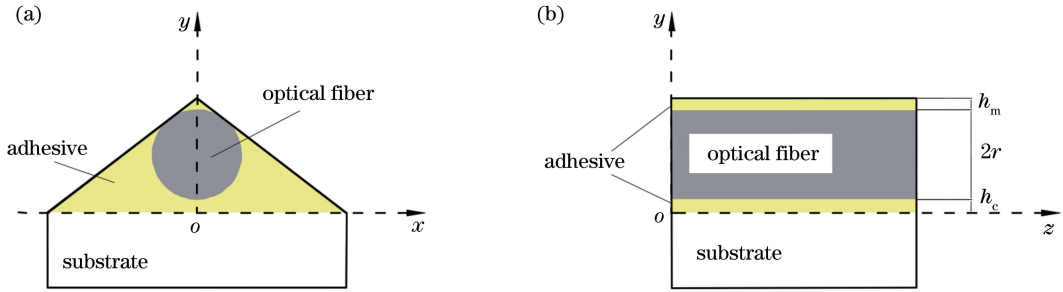


图1 光纤粘贴模型。(a) oxy 面;(b) oyz 面

Fig. 1 Model of optical fiber pasted. (a) oxy surface; (b) oyz surface

由于模型关于 y 轴对称,取右半部分进行分析。根据受力平衡的原理,对第一层光纤的受力进行分析,可得轴向 z 方向的平衡方程为

$$\pi r_g \tau_{gc}(z, r_g) + \frac{1}{2} \pi r_g^2 \sigma_g = \frac{1}{2} \pi r_g^2 (\sigma_g + d\sigma_g), \quad (1)$$

式中: r_g 为光纤半径; τ_{gc} 为光纤与胶结层之间的剪切应力; σ_g 为沿光纤长度方向的正应力; $d\sigma_g$ 为光纤单元微应力。

对(1)式进行化简,可得

$$\pi r_g \tau_{gc}(z, r_g) = \frac{1}{2} \pi r_g^2 d\sigma_g. \quad (2)$$

同样,对下部胶结层微元段,取 $2r_g \leq h \leq 2r_g + h_c$,其中 h 为光纤微元与被测基体之间的距离,如图1所示。根据实际实验和胶的性质,假设胶结层凝结后形成的形状为三角形,设顶点为 $(0, H)$,三角形另外两个端点为 $(-D/2, 0)$, $(D/2, 0)$ 。右边界方程为

$$h(x) = H - \frac{2H}{D}x. \quad (3)$$

式中: D 为胶结层宽度, H 为胶结层厚度, x 为胶结层微元在 x 方向上的坐标。对胶结层微单元进行应力分析可得, z 方向的平衡方程为

$$\pi r_g \tau_{gc}(x, r_g) + \left[\int_0^{D(H-h)/2H} \left(H - \frac{2H}{D}x \right) dx \right] d\sigma_c = \frac{D(H-h_c)}{2H} dz \cdot \tau_c(y, z), \quad (4)$$

式中: $d\sigma_c$ 为胶结层单元微应力; τ_c 为胶结层与基体之间的剪切应力。将(2)式代入(4)式并化简,可得

$$\tau_c(z, h) = \frac{\pi r_g^2 H d\sigma_g}{D(H-h) dz} + \frac{(H+h)d\sigma_c}{2 dz}. \quad (5)$$

由于光纤与胶结层一起变形,二者应变变化率相近,且光纤与胶结层的弹性模量相差较大,故认为 $\frac{d\epsilon_g}{dz} = \frac{d\epsilon_c}{dz}$, $E_c/E_g = 0$,式中: ϵ_g 为光纤应变, ϵ_c 为胶结层应变, E_g 为光纤弹性模量, E_c 为胶结层的弹性模量。则(5)式可化简为

$$\tau_c(z, h) = \frac{HE_g \pi r_g^2 d\epsilon_g}{D(H-h)dz} \quad (6)$$

式中： τ_c 为胶结层的剪应力。依据剪滞模型的实质可知：

$$\delta_m - \delta_g = \int_0^{h_c} \gamma_c(h) dh = \int_0^{h_c} \frac{\tau_c(x, h)}{G_c} dh, \quad (7)$$

式中： δ_m 为基体形变， δ_g 为光纤的形变， γ_c 为胶结层的剪应变， G_c 为胶结层的剪切模量。对(7)式在长度 $2L$ 上进行积分，又由对称性可得

$$\epsilon_m - \epsilon_g(z) = k^2 \frac{d^2 \epsilon}{dz^2}, \quad (8)$$

式中： ϵ_m 为被测基体表面的应变， k 为待定系数，其表达式为

$$k^2 = \frac{2G_c D}{HE_g \pi r_g^2 \ln[H/(H-h_c)]} \quad (9)$$

由于光纤与胶结层相交的端面为自由端，没有应力传递，即 $\epsilon_g(-L) = \epsilon_g(L) = 0$ ， $2L$ 为粘贴的光纤长度，代入(8)式，可得应变传递率 α ：

$$\alpha(z) = 1 - \frac{\cosh(kz)}{\cosh(kL)} \quad (10)$$

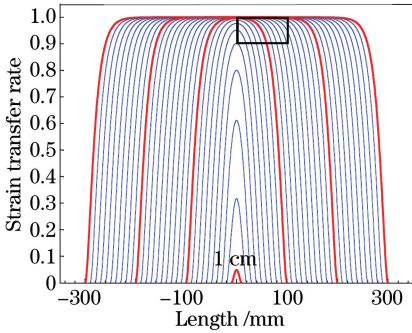


图2 不同粘贴长度的应变传递率曲线

3 应变传递影响因素分析

根据应变传递规律，对影响应变传递率的变量进行数值分析，主要包括粘贴长度和涂覆层剪切模量。固定其他变量，对单个变量的函数和应变传递率进行分析。

1) 分析粘贴长度的影响。光纤长度为 20~600 mm，每隔 10 mm 进行应变传递分析。图 2 所示为不同粘贴长度的应变传递率曲线，其中加粗曲线分别是 2, 20, 40, 60 cm 的粘贴长度的传递率，其他曲线为每隔 10 mm 测得的应变传递率。图 3 是图 2 中框线部分的放大图像。图 2 和图 3 表明：当粘贴长度小于 20 cm 时，应变传递率低且不稳定；当粘贴长度超过 20 cm 时，光纤存在一些应变传递率较好的部位，最适合于监测；无论粘贴长度是多少，光纤的端部效应都很明显，即两端的应变传递率急剧减少，为了解决端部效应，最好增加粘贴的长度。表 1 所示为普通单模光纤传感器的性能参数。将表 1 中的参数带入(10)式，可得不同粘贴长度的应变传递规律。

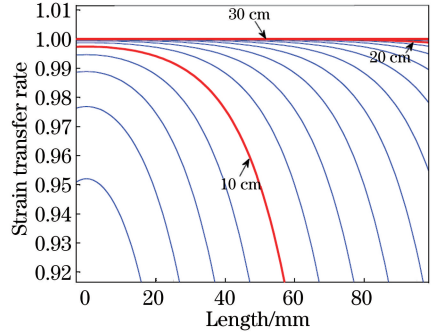


图3 应变传递率曲线的局部放大图

Fig. 2 Strain transfer rate curves of different adhesion lengths

Fig. 3 Partial enlargement of strain transfer rate curves

表 1 普通单模光纤传感器性能参数

Table 1 Performance parameters of common single-mode fiber sensor

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|--|-------|----------------------------------|-------|
| Fiber elastic modulus E_g /MPa | 72000 | Height after pasting H /mm | 1.5 |
| Bonding layer shear modulus G_c /MPa | 155 | Fiber diameter r_g /mm | 0.45 |
| Paste width D /mm | 8 | Cement layer thickness h_c /mm | 0.2 |

2) 分析涂覆层的剪切模量的影响。实验中，固定光纤的长度为 20 cm，涂覆层的剪切模量为 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^9$ Pa，间隔为 1×10^5 Pa，普通单模光纤涂覆层的剪切模量为 8.5×10^5 Pa。图 4 所示为不同剪切模量的应变传递率曲线， 8.5×10^5 Pa 对应普通单模光纤的应变传递率，其余三条粗线为涂覆光纤的应变传递率曲线，对应的剪切模量分别为 $1 \times$

$10^5, 1 \times 10^6, 1 \times 10^9$ Pa，图 4 中的细线依次为涂覆层的剪切模量为 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^9$ Pa 的光纤的应变传递率，间隔为 1×10^5 Pa。图 5 是图 4 中框线部分的放大图。从图 4 和 5 中可以看出：普通单模光纤具有较高的应变传递率；增加涂覆层的剪切模量可以进一步提高应变传递率。在固定粘贴长度的前提下，增加涂覆层的剪切模量可以削弱端部效应。

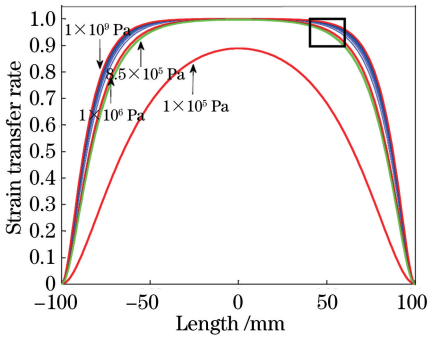


图 4 不同涂覆层剪切模量的应变传递率曲线

Fig. 4 Strain transfer rate curves of different shear moduli of coating layers

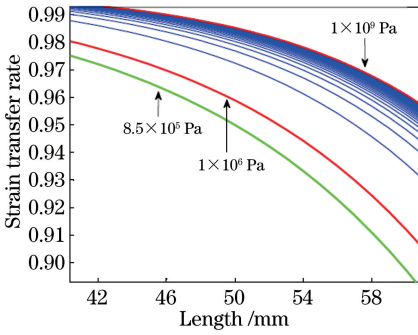


图 5 不同涂覆层剪切模量的应变传递率曲线的局部放大图
Fig. 5 Partial enlargement of strain transfer rate curves of different shear moduli of coating layers

4 实验原理

4.1 光纤传感测量原理

OFDR 传感测量的基本原理如图 6 所示,利用连续波频率扫描技术和外差干涉方法,采用周期性线性扫描光源,利用耦合器分别接入参考臂和信号臂^[18]。因为参考臂的本振光与信号臂的背向瑞利

散射信号的光程不同,且自身携带频率也不同,故二者会发生拍频干涉,干涉信号的拍频与信号臂发生背向散射的位置成正比,经过快速傅里叶变换(FFT),就可以得到距离域上光纤背向瑞利散射信号的信息。OFDR 技术的空间分辨率与频谱分析精度有关,与探测器带宽无关,因此通过高精度的频谱分析可以获得远高于传统光时域反射(OTDR)分析类分布式感测技术的空间分辨率与精度。

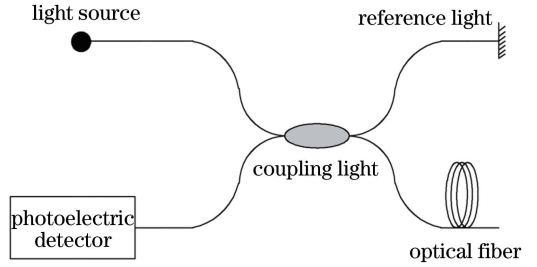


图 6 OFDR 传感测量原理

Fig. 6 OFDR sensing measurement principle

光纤中的瑞利散射是由光纤材料的折射率随机变化引起的,散射的振幅是距离的函数。这种随机分布的性质比较稳定,因此可以将光纤上每个位置都可以看作是一种具有随机周期的弱 FBG,当光纤产生应变时,背向瑞利散射信号的光谱就会发生漂移,漂移量与光纤所受的应变成正比。通过对测量信号(存在应变)与参考信号(没有应变)进行相关运算,可以得到光谱漂移值,再根据(15)式得到光纤应变变量。利用移动窗对光纤的各个部位进行扫描,就可以同时获得被测光纤各个位置的分布式应变信息,移动窗的大小为应变检测的空间分辨率,即测得的应变为该空间分辨率内的平均应变。分布式解调仪的主要参数如表 2 所示。

表 2 分布式解调仪主要参数

Table 2 Main parameters of distributed demodulator

| Parameter | Range | Parameter | Range |
|---------------------------------|-------|-------------------------|------------------------------------|
| Maximum sensing distance / m | 60 | Strain measurement | Range / 10^{-6} |
| Measurement frequency / Hz | 2.5 | | Repeatability / 10^{-6} |
| Minimum spatial resolution / mm | 1 | Temperature measurement | Range / $^{\circ}\text{C}$ |
| Maximum sampling point | 60000 | | Repeatability / $^{\circ}\text{C}$ |

应变 ϵ 所导致的光谱漂移为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_s \epsilon, \quad (11)$$

式中: λ 为平均光波长, $\Delta\lambda$ 为光的波长漂移量, ν 为平均光频率, $\Delta\nu$ 为光的频率漂移量, K_s 为应变校准常数。对大多锗硅酸盐玻璃纤芯光纤,应变校准常数可被设置为

$$K_s = 0.78. \quad (12)$$

K_s 主要由光纤纤芯的掺杂种类和浓度决定,但也受包层和涂覆层成分的影响。

应变可表示为

$$\epsilon = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_e} \Delta\nu, \quad (13)$$

式中: $\bar{\lambda}$ 为扫描的中心波长, c 为光速, K_e 为应变感

应系数。

4.2 等强度梁参数

梁的工作尺寸如下： $l \times B \times h = 300 \text{ mm} \times 45.9 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ ，式中： l 为荷重支点到支承梁的距离； B 为支承处的宽度。

梁的表面应变计算式为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{E} \cdot \frac{M}{W} = \frac{6}{E} \cdot \frac{P}{h^2} \cdot \frac{l}{B}, \quad (14)$$

式中： $E = 200 \text{ GPa}$ ，为等强度梁的弹性模量， σ 为梁截面受拉边缘的应力， M 为梁截面受拉边缘的弯矩， W 为梁截面受拉边缘的弹性抵抗矩， P 为等强度梁受到的作用力。

根据计算可知，在等强度梁的末端每加载 1 kg ，等强度梁的表面应变为

$$\epsilon = 156.781 \times 10^{-6}. \quad (15)$$

通过在等强度梁的末端增加砝码数量以达到逐渐施加荷载的目的，等强度梁的参数已知，利用(15)式计算可得到等强度梁表面相应的实际应变。

5 等强度梁实验

作为一种良好的力学传递结构，等强度悬臂梁结构简单且性能稳定，且对等强度悬臂梁自由端施加荷载时，其表面应变为均匀应变。因此，等强度悬臂梁被广泛用于光纤传感器的研发、制造和现场应用等方面^[19]。

本研究通过实验，对分布式光纤传感的影响因

表 3 不同荷载等级下等强度梁的理论应变

Table 3 Theoretical strains of equal-strength beams under different load levels

| Load level | #1 | #2 | #3 | #4 | #5 | #6 |
|--------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Theoretical strain / 10^{-6} | 78.391 | 156.781 | 235.172 | 313.562 | 391.953 | 470.343 |

5.1 粘贴长度的影响

为了研究不同长度的分布式光纤的应变传递率，将长度分别为 $5, 10, 15, 20 \text{ cm}$ 的普通单模光纤粘贴在等强度梁上表面。用于实验的胶为乐泰 401 瞬时干胶，黏度为 110 cP ，剪切强度为 22 MPa 。使用第三级荷载 #3 条件下光纤应变测量结果进行实验。通过比较实测应变值和等强度梁的应变，计算应变传递率。同时，利用本研究提出的传递模型，通过数值计算得到理论应变传递率。图 8 所示为粘贴在等强度梁上的不同长度光纤。图 9 所示为实验应变传递率和理论应变传递率的对比。表 4 为不同粘贴长度光纤的应变传递率的统计结果。

由图 8、图 9 和表 4 可知：1) 理论值是一条非常

素进行验证，将不同长度的光纤粘贴在图 7 所示的等强度梁的表面。对等强度梁进行加载，使等强度梁发生弯曲变形，在梁表面产生拉伸应变，利用分布式光纤传感器测量应变值，比较应变传递率。该部分由以下两个测量实验组成：

- 1) 分析粘贴长度分别为 $5, 10, 15, 20 \text{ cm}$ 的应变测量结果；
- 2) 涂覆层剪切模量的影响分析：采用普通光纤（剪切模量低）与聚酰亚胺光纤（剪切模量高）进行对比分析。

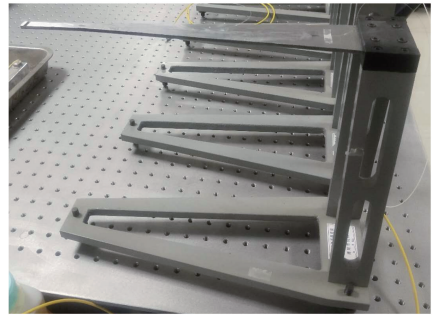


图 7 粘有不同光纤的等强度梁

Fig. 7 Equal-strength beam with different fibers

实验中，在等强度梁端部施加集中载荷，梁表面实际应变可通过(15)式计算得到。在一定的加载条件下，及梁强度不变的情况下，表面应变相等。在逐级加载过程中，每 0.5 kg 为一个等级，共 6 级，加载到 3 kg 。当应变稳定时，读取数据并加载至下一级。不同荷载等级下等强度梁上表面的理论应变如表 3 所示。

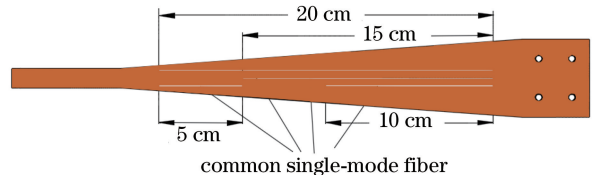


图 8 粘有不同长度光纤的等强度梁

Fig. 8 Equal-strength beam with fibers of different lengths
光滑的曲线，而测量值不是一条标准的平滑曲线，这可能是由胶水厚度不均匀引起的光纤不均匀变形造成的；2) 粘贴长度为 5 cm 时，测量值与理论值相差很大，随着光纤粘贴长度的增加，测量值与理论值吻合较好；3) 当使用分布式光纤传感技术测量应变时，推荐的粘贴长度最多为 20 cm 。

表 4 不同粘贴光纤长度的实验结果

Table 4 Experimental results of different adhesion fiber lengths

| Load level | Average strain transfer rate | | | | Theoretical relative error / % | | | |
|------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------|-------|-------|-------|
| | 5 cm | 10 cm | 15 cm | 20 cm | 5 cm | 10 cm | 15 cm | 20 cm |
| # 3 | 0.2593 | 0.6048 | 0.7521 | 0.8084 | 19.34 | 9.79 | 8.12 | 6.06 |

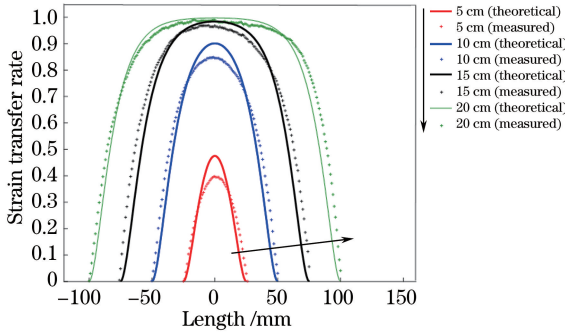


图 9 实验和理论应变传递率曲线

Fig. 9 Experimental and theoretical strain transfer rate curves

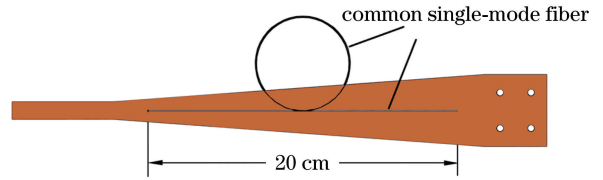


图 10 冗余零件的光纤连接示意图

Fig. 10 Schematic of fiber connection for redundant parts

实验在同一光纤上进行。将 40 cm 的单模光纤分成三段：第一段为 10 cm，粘贴在等强度梁上；第二段为 20 cm，是多余的；其余的 10 cm 粘贴在第一段光纤旁边。粘贴的示意图如图 10 所示。图 11 所示为不同加载水平下长度为 20 cm 的两段光纤的应变测量结果。图 12 所示为在不同加载水平下的两段光纤的应变传递率对比图，front 曲线为前面一段光纤(图 11 中 50~200 mm)的应变传递率，back 曲线为后一段光纤(图 11 中 380~530 mm)的应变传递率。图 13 所示为在不同加载水平下的两段光纤的应变传递率差值。由图 11~13 可知：1) 虽然所有长度为 20 cm 的光纤都粘贴在一起，但

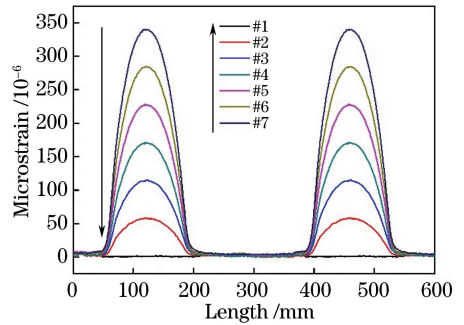


图 11 总长度为 20 cm 的两段光纤的应变测量结果

Fig. 11 Strain measurement results of two fibers with a length of 20 cm

多余部分使光纤存在两个应变范围，但差异很小；2) 无论加载程度如何，光纤前后两部分的应变传递系数差别不大；3) 粘贴光纤两端的应变传递系数差值大于中部的；4) 光纤固定长度的分布应变值的测量基本相同，测量实验具有良好的重复性。

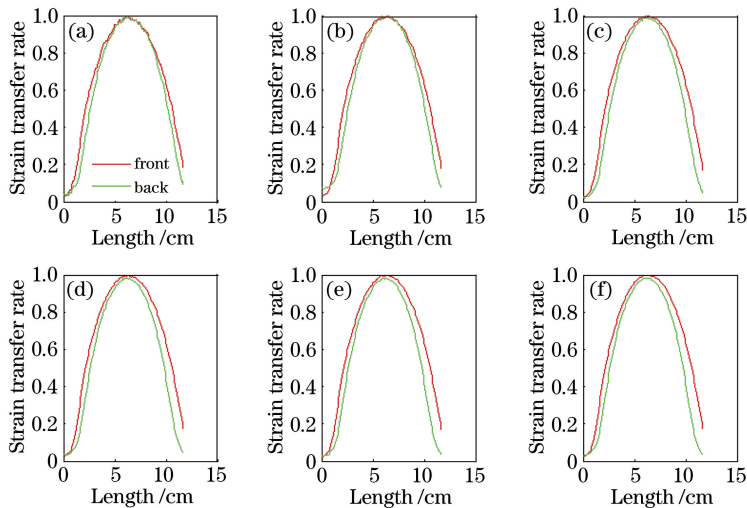


图 12 不同载荷下两段光纤应变传递率对比。(a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4; (e) #5; (f) #6

Fig. 12 Comparison of strain transfer rates of two segment fibers under different loads.

(a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4; (e) #5; (f) #6

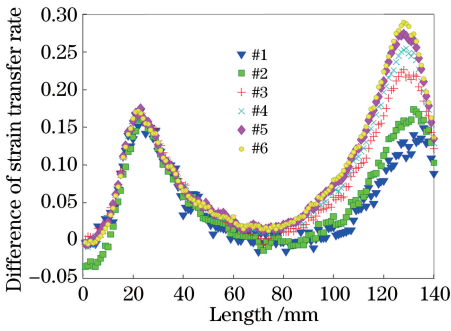


图 13 两根光纤的应变传递率的差值

Fig. 13 Difference of strain transfer rate of two fibers

5.2 涂覆层剪切模量影响

对光纤涂覆层剪切模量对应变传递率的影响进行研究。选择普通单模光纤和涂覆有聚酰亚胺光纤进行对比实验,它们的长度均为 20 cm,其他实验条件相同。单模光纤的剪切强度为 8.5×10^5 MPa,涂覆聚酰亚胺光纤的剪切强度为 5×10^9 MPa。图 14 所示为两种光纤的粘贴位置。图 15 所示为两种光纤的应变测量结果。图 16 所示为普通单模光纤和

涂覆聚酰亚胺光纤的应变传递率对比曲线图。图 17 所示为两种光纤两个不同涂覆层之间的应变传递率差值。由图 15~17 可知: 1)涂覆聚酰亚胺光纤的剪切模量远高于普通光纤的,因此具有较高的应变传递率,这与理论分析一致; 2)涂覆聚酰亚胺光纤的端部效应小得多; 3)在不同加载水平下,应变测试结果与理论计算一致,反映了基于 OFDR 技术的分布式传感光纤的性能非常稳定; 4)应用光纤测量结构应变时,建议采用高剪切模量涂覆层的光纤。

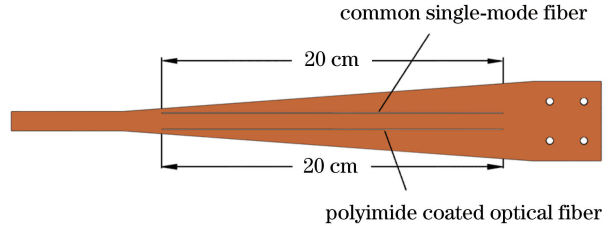


图 14 两种光纤的粘贴位置示意图

Fig. 14 Schematic of pasting position of two types of optical fibers

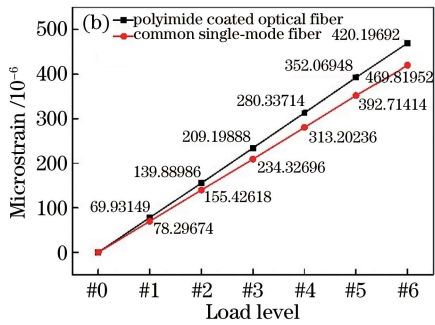
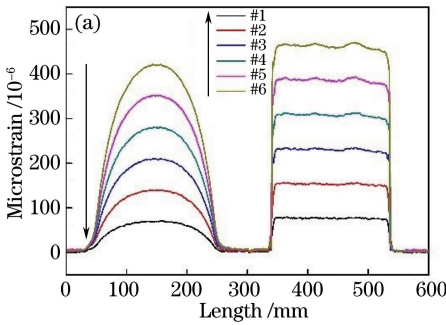


图 15 普通单模光纤和聚酰亚胺光纤的应变测量结果。(a)应变测量结果;(b)每级荷载两种光纤的最大应变对比
Fig. 15 Strain measurement results of common single-mode fiber and polyimide coated optical fiber. (a) Strain measurement results; (b) maximum strain comparison of two types of optical fibers under each load level

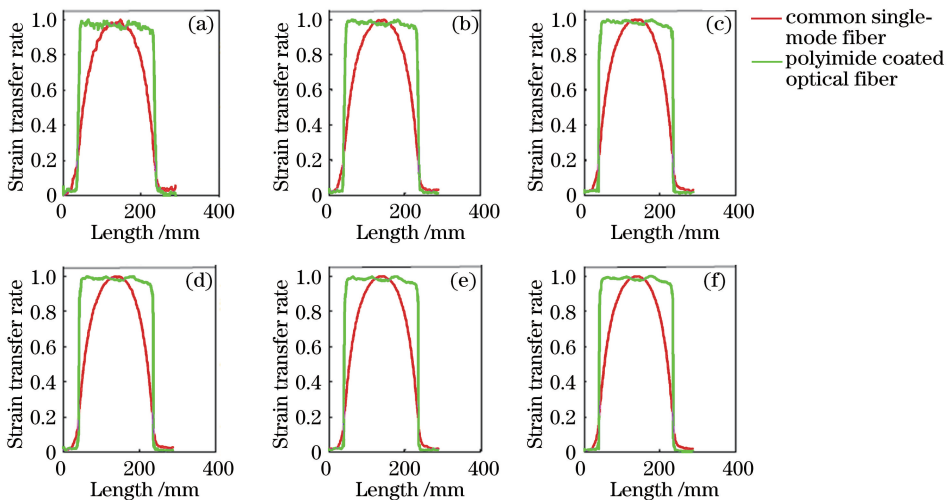


图 16 两种光纤的应变传递率。(a) #1;(b) #2;(c) #3;(d) #4;(e) #5;(f) #6

Fig. 16 Strain transfer rates of two types of fibers. (a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4; (e) #5; (f) #6

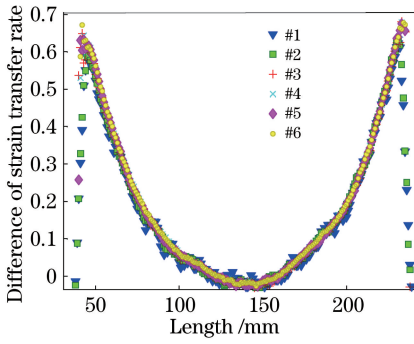


图 17 不同光纤涂覆层间应变传递率的差异

Fig. 17 Difference of strain transfer rate between different coating layers of fiber

6 结 论

基于 OFDR 技术,在理论分析基础上,重点对表面粘贴分布式光纤传感器应变传递性能进行了实验研究。结果表明:涂覆层与胶黏剂对光纤应变的传递效果有影响,光纤两端对应为低应变传递率段,光纤中部对应高应变传递率段;在不同粘贴长度下,低应变传递率段长度有峰值,而当粘贴长度增大到一定程度后,低应变传递率段可以控制在一定小范围内;同时,聚酰亚胺光纤涂覆层剪切强度高,应变传递过程几乎没有损失,应变测量结果与实际结果一致,在实际应用中,为减小测量误差,使传感器能够真实反映被测物体的应变变化,应选用剪切模量高的物质作为中间层。

参 考 文 献

- [1] Henault J M, Quiertant M, Delepine-Lesoille S, *et al.* Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37: 916-923.
- [2] Liu K, Feng B W, Liu T G, *et al.* Continuous distributed fiber strain location sensing based on optical frequency domain reflectometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0505006.
刘琨, 冯博文, 刘铁根, 等. 基于光频域反射技术的光纤连续分布式定位应变传感 [J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0505006.
- [3] Kim S H, Lee J J, Kwon I B. FEM analysis of surface-mounted distributed optical fiber sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4317: 211-216.
- [4] Ansari F, Yuan L B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 385-394.
- [5] Zhou Z, Li J L, Ou J P. 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.

- [6] Li H N, Zhou G D, Ren L, *et al.* Strain transfer coefficient analyses for embedded fiber Bragg grating sensors in different host materials [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(12): 1343-1353.
- [7] Li D S, Li H N. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, 37(4): 435-441.
李东升, 李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析 [J]. *力学学报*, 2005, 37(4): 435-441.
- [8] Zhang Z L, Wang Y, Sun Y Y, *et al.* Analysis and experimental study on the strain transfer mechanism of an embedded basalt fiber-encapsulated fiber Bragg grating sensor [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 017105.
- [9] Tian S Z, Zhang G Q, Wang D P. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0805005.
田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0805005.
- [10] Li H, Zhu L Q, Liu F, *et al.* Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1744-1750.
李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1744-1750.
- [11] Zhao H T, Wang Q B, Qiu Y, *et al.* Strain transfer of surface-bonded fiber Bragg grating sensors for airship envelope structural health monitoring [J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2012, 13(7): 538-545.
- [12] Wu R J, Zheng B L, Fu K K, *et al.* Influence of layered structure for surface-bonded FBG sensor on measured strain [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3183-3190.
吴入军, 郑百林, 付昆昆, 等. 表面粘贴式光纤布拉格光栅传感器层状结构对测量应变的影响 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3183-3190.
- [13] Wang W, Lin Y C, Huang Y G. Research on strain transferring of surface FBG sensor [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1218-1220.
王为, 林玉池, 黄银国. 表面式光纤光栅传感器应变

- 传递研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1218-1220.
- [14] Guo W, Li X L, Song H. Analysis of strain transfer of fiber grating sensors adhered to the structure surface[J]. Metrology & Measurement Technology, 2011, 31(4): 1-4.
郭伟, 李新良, 宋昊. 表面粘贴光纤光栅传感器的应变传递分析[J]. 计测技术, 2011, 31(4): 1-4.
- [15] Huang X D, Wang Y, Sun Y Y, *et al.* Mechanism analysis on the impact of coating to fiber Bragg grating strain transfer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1233-1240.
黄肖迪, 王源, 孙阳阳, 等. 涂覆层对光纤布拉格光栅应变传递的影响机理分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1233-1240.
- [16] Sun Y Y, Wang Y, Zhang Z L, *et al.* Analysis and experimental research on the principle of surface bonded FBG strain transfer[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(7): 7046-7050, 7055.
孙阳阳, 王源, 章征林, 等. 表面粘贴式光纤布拉格光栅应变传递规律分析与实验研究[J]. 功能材料, 2016, 47(7): 7046-7050, 7055.
- [17] Zhang Z L, Wang Y, Sun Y Y, *et al.* Influence of adhesive on surface-bonded FBG sensor strain transfer coefficient [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2537-2542.
章征林, 王源, 孙阳阳, 等. 胶粘剂对表贴式FBG传感器应变传递系数的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2537-2542.
- [18] Liu Q S, Wang J T, Xiao L G, *et al.* Application of OFDR-based sensing technology in geo-mechanical model test on tunnel excavation using cross rock pillar method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5): 1063-1075.
刘泉声, 王俊涛, 肖龙鸽, 等. OFDR 光纤传感技术在十字岩柱暗挖法物理模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1063-1075.
- [19] Yang S, Li J, Xu S M, *et al.* Strain transferring analysis of surface FBG sensor based on uniform cantilever beam [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15(2): 28-34.
杨爽, 李俊, 徐胜明, 等. 等截面悬臂梁FBG传感器应变传递规律研究[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(2): 28-34.