

激光与光电子学进展

基于 OFDR 裸光纤表面粘贴式应变传递的分析及试验研究

王钰茹*, 田石柱

苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215000

摘要 分析了光纤传感器应变传递率的影响因素,进行了粘贴式光纤传感器等强度梁试验。光纤传感器监测结构材料中应变分布的能力取决于材料与光纤之间的键合特性。取粘贴长度和胶体剪切模量两个参数,研究了分布式光纤传感器应变传递的顶端效应。结果表明:延长粘贴的光纤长度或提高胶体的剪切模量,可以使高应变传递段加长。工程应用中应选用剪切模量高的胶黏剂,粘贴长度应在粘贴测量段两端多粘贴 5 cm,以保证测量段可以得到相对精确的应变结果。

关键词 光纤光学; 光纤测量; 光纤传感器; 瑞利散射; 光频域反射技术; 应变传递率; 等强度梁

中图分类号 TP212.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1906005

Analysis of Surface-Bonded Strain Transfer Using Optical Frequency Domain Reflectometry Bare Fiber

Wang Yuru*, Tian Shizhu

College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215000, China

Abstract In this study, the influential factors that impact the strain transfer rate of the optical fiber sensor are analyzed. The fiber sensors' ability to monitor strain distribution in structural materials depends on the bonding characteristic between the material and fiber. The strain transfer tip effect of the distributed fiber sensor is studied; the two parameters, paste length and colloidal shear modulus, are examined to assess the impact on the strain transfer rate. The results show that the strain transfer length can be increased by prolonging the length of the pasted fiber or increasing the shear modulus of the colloid. Adhesive with high shear modulus should be selected in the engineering application, and the paste length (greater than 5 cm) should be pasted at both ends of the paste measuring section to ensure that the strain results are accurate in the measuring section.

Key words fiber optics; fiber measurements; fiber optics sensors; Rayleigh scattering; optical frequency domain reflection technology; strain transfer rate; equal strength beam

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 290.5870

1 引言

光纤传感器正成为土木工程结构状态评价的

一种优良无损检测手段,准确掌握应变场经待测结构转移到光纤传感器上并在光纤纤芯中传输的信号特性变化,可以精准测量当前结构的应变,这对

收稿日期: 2020-12-19; 修回日期: 2021-02-26; 录用日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778394)

通信作者: *529416481@qq.com

结构的健康监测极其重要。Nanni 等^[1]通过监测分布式光纤自身应变和结构表面应变,发现光纤的护套和涂覆层会对应变传递率产生影响。Ansari 等^[2]基于 Cox 等^[3]提出的剪滞理论建立了一个新模型,仿真结果表明光纤的应变传递特性取决于纤芯的力学性能、保护涂层和光纤的量规长度。周智等^[4]研究了埋入式光纤光栅的应变传感问题,推导出了光纤光栅应变传感的误差与修正公式。权志桥等^[5]建立了表面粘贴式布拉格光纤光栅(FBG)应变耦合传递的分离式模型,推导得出 FBG 测量应变与被测应变真值之间的修正关系。高俊启等^[6]发现了分布光纤在粘贴端应变传递效率低的问题。章征林等^[7]发现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。毛江鸿等^[8]分析了传感光纤特性、胶黏剂物理性能和传感器结构特性对分布式光纤传感器应变传递性能的影响。吴入军等^[9]通过有限元模拟及试验验证的方法研究了不同种类的涂

覆层和粘贴层对平均应变传递率的影响。曾鹏等^[10]认为胶黏剂的选取对其测量结果有直接的影响,并对表面粘贴式应变传递模型进行了改进,建立了更为合理的模型。

本文基于光频域反射技术(OFDR)在等强度梁上粘贴分布式裸光纤,对比分析了不同粘贴长度和不同胶体剪切模量对分布式裸光纤应变传递性能顶端效应的影响。

2 应变传递特性分析

2.1 应变传递规律

根据表面粘贴式光纤布设形式,建立如图 1 所示的应变传递简化模型,模型包含以下假设^[11]: 1) 光纤层、胶结层和基体层均视为线弹性各向同性材料; 2) 所有接触的部分已完美粘合,因此沿接触部分的位移是一致的; 3) 仅结构表面受到均匀的轴向应力,而光纤层、胶结层不直接承受任何外部荷载。

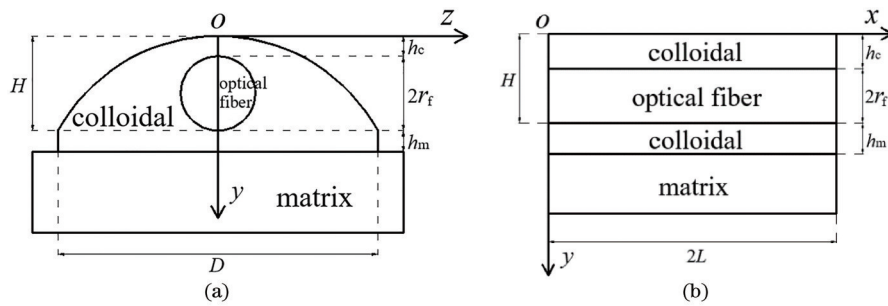


图 1 应变传递分析模型。(a)横截面;(b)纵截面

Fig. 1 Strain transfer analysis model. (a) Cross section; (b) longitudinal section

建立 zoy 坐标系, D 为胶结层粘贴宽度, h_c 为上部胶结层的厚度, r_f 为光纤半径, h_m 为下部胶结层的厚度。图 1(b) 为应变传递分析模型的纵截面, $2L$ 为光纤粘贴段的总长度。

由图 1(a) 可知, 抛物线顶点 $(0, 0)$, 另外两点 $(\frac{D}{2}, H), (-\frac{D}{2}, H)$, 其函数表达式为

$$y(z) = \frac{4H}{D^2} z^2, \quad (1)$$

式中, $H = 2r_f + h_c$ 。

由于上部胶结层厚度对于光纤的应变传递率的影响不明显^[12], 故只对下 3 层(光纤-胶体-基体)进行应变传感特性研究。各层微单元受力情况如图 2 所示。

由于模型对称, 取 y 轴右半部分进行应力分析。光纤微元段 x 方向的平衡方程为

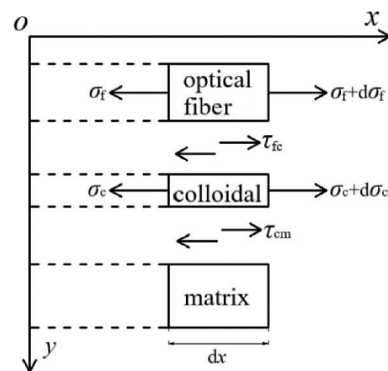


图 2 各层微单元受力图

Fig. 2 Microelement force diagram of each layer

$$\frac{1}{2} \pi r_f^2 \sigma_f = \frac{1}{2} \pi r_f^2 (\sigma_f + d\sigma_f) + \pi r_f dx \tau_{fc}(x, r_f), \quad (2)$$

式中: σ_f 为光纤沿 x 方向的正应力; $d\sigma_f$ 为光纤微元段沿 x 方向的正应力; τ_{fc} 为光纤与胶结层之间的剪切应力。

简化(2)式为

$$\pi r_f dx \tau_{fc}(x, r_f) = -\frac{1}{2} \pi r_f^2 d\sigma_f, \quad (3)$$

同理,对图 2 中胶结层微元段进行应力分析,可得 x 方向的平衡方程为

$$\left[\frac{D}{2} (H + h_m) - \frac{1}{2} \pi r_f^2 - \int_0^{\frac{D}{2}} \frac{4H}{D^2} z^2 dz \right] d\sigma_c + \tau_{cm}(x, r_c) \frac{D}{2} dx = \pi r_f dx \tau_{fc}(x, r_f), \quad (4)$$

式中, $d\sigma_c$ 为胶结层微元段沿 x 方向的正应力, τ_{cm} 为光纤与胶结层之间的剪切应力。

将(3)式代入(4)式并化简,可得

$$\tau_{cm}(x, r_c) = -\frac{\pi r_f^2}{D} \cdot \frac{d\sigma_f}{dx} - \frac{2DH + 3Dh_m - 3\pi r_f^2}{3D} \cdot \frac{d\sigma_c}{dx}. \quad (5)$$

由于光纤径向变形很小,泊松比效应可忽略。而应力与应变的关系为 $\sigma = E\epsilon$, E 为弹性模量, ϵ 为应变变量,故(5)式也可表示为

$$\tau_{cm}(x, r_c) = -\frac{\pi r_f^2}{D} \left(\frac{d\epsilon_f}{dx} + \frac{2DH + 3Dh_m - 3}{3\pi r_f^2} \cdot \frac{E_c}{E_f} \cdot \frac{d\epsilon_c}{dx} \right), \quad (6)$$

式中: E_f 为光纤弹性模量; ϵ_f 为光纤应变; E_c 为胶结层弹性模量; ϵ_c 为胶结层应变。

由于光纤与胶结层同时变形,应变变化率相近,即 $\frac{d\epsilon_f}{dx} \approx \frac{d\epsilon_c}{dx}$,又由于光纤与胶结层的弹性模量相差 10 倍以上,故可认为 $\frac{E_c}{E_f} = 0$,则(6)式可简化为

$$\tau_{cm}(x, r_c) = -\frac{\pi r_f^2 E_f}{D} \cdot \frac{d\epsilon_f}{dx}. \quad (7)$$

依据剪滞模型的本质,基体结构和光纤之间存在相对位移,使得中间的胶结层具有一定的剪应变,从而使得基体的应变能够传递到分布式裸光纤上。胶体的剪应变是由基体和分布式光纤的位移差产生的,可表示为

$$\delta_m - \delta_f = \int_0^{h_m} \gamma_c(h) dh = \int_0^{h_m} \frac{\tau_{cm}(x, r_c)}{G_c} dh, \quad (8)$$

式中: δ_m 为基体形变; δ_f 为光纤形变; γ_c 为胶结层的剪应变; G_c 为胶结层的剪切模量。

将(8)式代入(9)式并积分,可得

$$\delta_m - \delta_f = -\frac{\pi r_f^2 E_f h_m}{DG_c} \cdot \frac{d\epsilon_f}{dx} = -\frac{1}{k^2} \cdot \frac{d\epsilon_f}{dx}, \quad (9)$$

其中,

$$k^2 = \frac{DG_c}{\pi r_f^2 E_f h_m} = \frac{DE_c}{2\pi r_f^2 E_f h_m (1 + \mu_c)}, \quad (10)$$

(10)式两边对 x 求导,可得

$$\frac{d^2 \epsilon_f(x)}{dx^2} + k^2 \epsilon_m - k^2 \epsilon_f = 0, \quad (11)$$

其通解为 $\epsilon_f(x) = c_1 \exp(kx) + c_2 \exp(-kx) + \epsilon_m$ 。光纤与胶结层之间没有应力传递,即 $\epsilon_f(L) = \epsilon_f(-L) = 0^{[13]}$ 。因此,光纤的轴向应变分布为

$$\epsilon_f = \epsilon_m \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right], \quad (12)$$

光纤粘贴部分各点的应变传递率可表示为

$$\alpha(x) = \frac{\epsilon_f(x)}{\epsilon_m} = 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)}, \quad (13)$$

光纤粘贴段平均应变传递率为

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\epsilon}_f(x)}{\epsilon_m} = \frac{2 \int_0^L \epsilon_f(x) dx}{2L\epsilon_m} = 1 - \frac{\sinh(kx)}{kL \cosh(kL)}. \quad (14)$$

2.2 应变传递影响因素

从(10)式和(13)式可知,影响分布式裸光纤表面粘贴的应变传递率 α 的因素主要有光纤半径 r_f 、光纤弹性模量 E_f 、胶结层粘贴宽度 D 、总粘贴长度 $2L$ 、胶体剪切模量 G_c (胶结层弹性模量及泊松比) 及胶结层下部厚度 h_m 。

重点研究了总粘贴长度 $2L$ 与胶体剪切模量 G_c 对光纤应变传递率的影响,分析时固定物理参数如表 1 所示。

表 1 应变传递影响因素的物理参数

Table 1 Physical parameters of factors affecting strain transfer

Parameter	Value
Fiber optical radii r_f /mm	0.125
Fiber optical elastic modulus E_f /(10^{10} Pa)	7.2
Paste width of colloidal layer D /mm	5
Thickness of lower part of colloidal layer h_m /mm	0.1

当总粘贴长度为 200 mm,即 L 为 100 mm 时,不同的胶体剪切模量与应变传递率的变化关系如图 3 所示。当胶体剪切模量为 1×10^7 Pa 时,光纤长度为 10~300 mm,每隔 10 mm 进行应变传递分析的变化关系如图 4 所示。

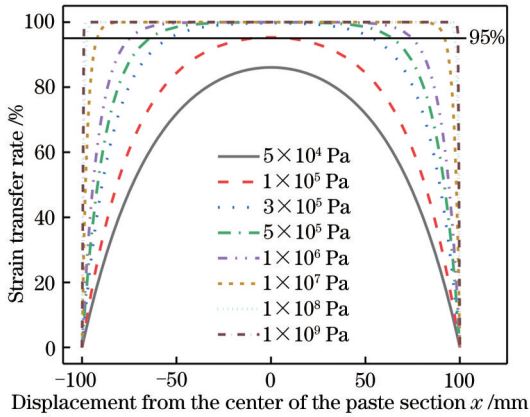


图 3 不同胶体剪切模量的应变传递率曲线 ($2L=200$ mm)
Fig. 3 Strain transfer rate curves of different colloidal shear modulus ($2L=200$ mm)

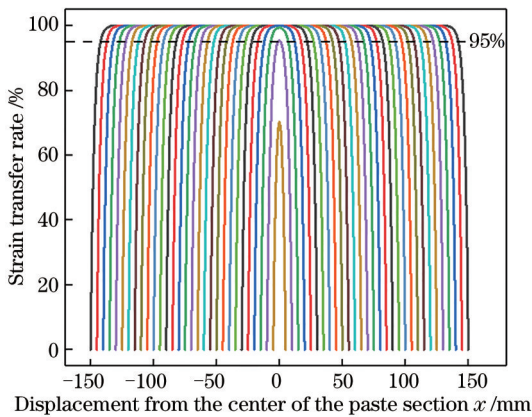


图 4 应变传递率受粘贴段长度 (从中心到两边 $2L=10, 20, 30, \dots, 300$ mm) 的影响
Fig. 4 Effect of strain transfer rate on length of paste section ($2L=10, 20, 30, \dots, 300$ mm from center to the sides)

通过对比图 3 和图 4 发现, 光纤监测应变具有顶端效应。将光纤应变传递率低于 95% 的区域定义为低应变传递段, 其应变监测数据的误差较大。由图 3 和图 4 可知: 当总粘贴长度为 20 mm、胶体剪切模量小于 1×10^5 Pa 时, 该光纤几乎无高应变传递段; 当胶体剪切模量为 1×10^7 Pa、总粘贴长度为 20 mm 以上时, 高应变传递段才开始出现。

在不同胶体剪切模量下, 光纤低应变段与光纤粘贴长度变化的关系如图 5 所示, 随着粘贴长度的增大, 低应变传递段先逐渐增大后减小, 然后趋于定值; 粘贴长度越长, 胶体剪切模量越高, 低应变传递段越短。高应变传递段占总粘贴长度的比例与粘贴长度变化的关系如图 6 所示, 当胶体弹性模量较高时, 总粘贴长度 $2L$ 为 160 mm 时, 高传递率段与总长度的比值达到了 90%; 当总粘贴长度较长

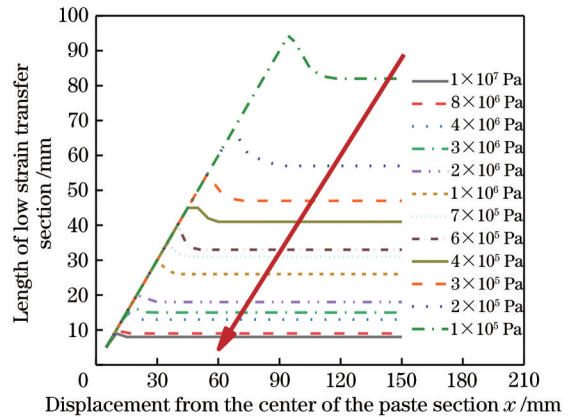


图 5 低应变传递段随光纤粘贴长度变化 (剪切模量沿箭头方向依次增大, $L=150$ mm)

Fig. 5 Low strain transfer section varies with the paste length of fiber (hear modulus increases in turn in the direction of the arrow, $L=150$ mm)

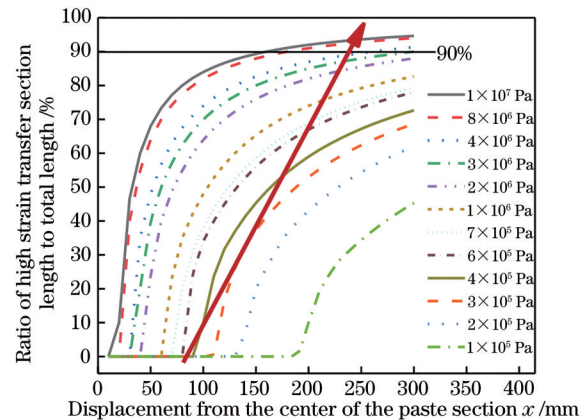


图 6 高应变传递段随光纤粘贴长度变化 (剪切模量沿箭头方向依次增大, $2L=300$ mm)

Fig. 6 High strain transfer section varies with the paste length of fiber (shear modulus increases in turn in the direction of the arrow, $2L=300$ mm)

时, 胶体剪切模量达到 3×10^6 Pa 以上, 高传递率段与总长度的比值也可以达到 90%。这表明通过选择较大的剪切模量的胶体或者加长粘贴长度可以极大地降低低应变传递段, 得到良好的应变监测数据。

3 应变传递特性试验研究分析

3.1 OFDR 测量原理

OFDR 技术由 Eickhoff 等^[14]于 1981 年首次提出, 它起源于连续波调频雷达探测技术。它是利用光纤中的瑞利背向散射光谱的漂移与温度、应变变化的线性关系实现传感。

光源被耦合器分为两路, 一路为测试光, 另一

路为参考光。测试光进入待测光纤后不断产生瑞利散射信号并作为信号光,该信号光通过耦合器耦合到探测器上。参考光经反射后也通过耦合器耦合到探测器上。由于参考光与测试光(瑞利散射)携带的光频不同,它们会在光电探测器上发生混频产生拍频信号,再通过快速傅里叶变换(FFT)进行解析获得拍频信号的频谱特性,从而在空间和时间层面上得到待测信息^[15-16]。

3.2 试验组成与材料

如图 7 所示,本文试验采用的是苏州南智传感科技有限公司生产的 OSI-C 型分布式高精度光频域应变温度分析仪,仪器的最大测量距离为 100 m,空间分辨率在 50 m 传感范围内最大可达 1 mm,100 m 传感范围内空间分辨率可达 1 cm。

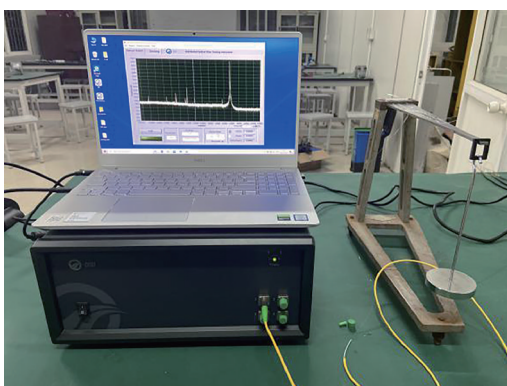


图 7 OSI-C 型分布式高精光频域应变温度分析仪
Fig. 7 OSI-C distributed high precision frequency domain strain temperature analyzer

温度和应变的传感精度分别为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $\pm 1.0\text{ }\mu\text{e}$ 。传感光纤选用 G652.D 型直径为 125 μm 的单模光纤。熔接机采用古河 FITELE-S1778 如图 8 所示。



图 8 古河 FITELE-S1778 熔接机
Fig. 8 Guhe FITELE-S1778 welding machine

等强度梁的工作尺寸为: $l \times B \times h = 300\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 3.48\text{ mm}$,其中 l 为等强度梁的长度, B 为承重处的宽度, h 为等强度梁厚度。

等强度梁的应变计算式为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6}{E} \cdot \frac{P}{h^2} \cdot \frac{l}{B}, \quad (15)$$

式中: E 为等强度梁的弹性模量, $E = 200\text{ GPa}$; σ 为梁截面受到的拉应力; P 为等强度梁受到的作用力。

试验中胶黏剂选用的是环氧树脂 E44 及聚酰胺树脂 650 固化剂。主要参数如表 2 所示。

表 2 胶黏剂主要参数

Table 2 Main parameters of adhesive

Glue type	Shear strength /MPa	Viscosity at 25 $^\circ\text{C}$ /(mPa·s)	Curing time at 25 $^\circ\text{C}$
E44 Resin	≥ 12	40000-45000	4-6 hours of initial curing
650 Curing agent		40000-45000	24 hours of complete curing

3.3 等强度梁试验

3.3.1 分布式光纤传感器标定试验

为了验证分布式光纤传感器的精度,采用等强度梁试验方式进行标定。将等强度梁表面打磨光滑,并用乙醇擦拭干净。在等强度梁中轴线处用记号笔标出 20 cm 长度。以中轴线为对称轴,用纸胶带围出 5 mm \times 200 mm 的区域,将裸纤进行预拉伸并固定到标示处,用固化剂和黏结剂以体积比 1:1 调制的环氧树脂胶涂抹,放置 24 h,等待粘贴完全后撕去胶带,将裸纤连接上光纤解调仪,逐级加载,并记下裸纤测量的应变值。

在等强度梁端部施加集中荷载,在一定的加载条件下及梁强度不变的情况下,梁表面应变相等,其理论应变可通过(15)式得到。试验采用逐级加载,分为 6 个等级,每级为 0.5 kg。

由表 3 可知,分布式光纤测量的平均应变与等强度梁的理论应变误差均在 1% 左右。图 9 为理论应变与光纤平均应变的拟合曲线,该线性相关系数为 0.9997,测量结果与理论结果高度相关。考虑到试验中存在的测量误差,可以认为分布式光纤传感器测量稳定。

表 3 分布式光纤应变与理论应变的对比分析

Table 3 Comparative analysis of fiber strain and theoretical strain

Load /kg	Theoretical response / $\mu\epsilon$	Average strain of fiber / $\mu\epsilon$	Optical fiber error /%
0.5	82.5736	81.84700	0.8799
1.0	165.1473	163.4884	1.0049
1.5	247.7209	245.7467	0.7969
2.0	330.2946	326.9767	1.0045
2.5	412.8682	409.2250	0.8824
3.0	495.4419	490.4561	1.0063

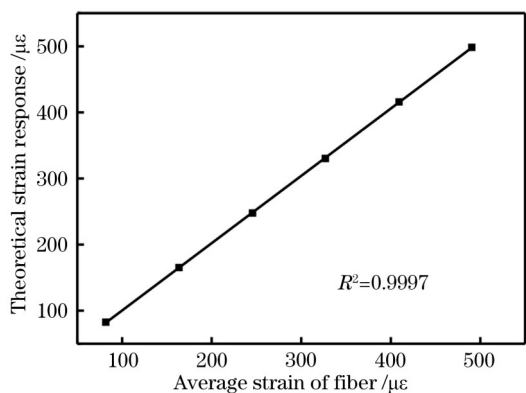


图 9 理论应变与光纤平均应变的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve between theoretical strain and fiber average strain

3.3.2 试验方案

为了研究不同长度的分布式光纤的应变传递率,用胶带沿等强度梁轴向贴出宽度都为 5 mm,长度分别为 30, 50, 100, 150, 200 mm 的槽,将普通单模光纤进行预拉伸后固定于槽内。由于胶体剪切模量难以准确获取,本研究将通过改变环氧树脂的混合

比来改变胶体剪切模量进行试验。将固化剂和黏结剂以体积比 1:1 和 1:2 调制的环氧树脂胶分别涂抹于槽内,然后刮平,放置 48 h,等待裸光纤与等强度梁粘贴完全,撕去四周胶带,光纤粘贴图如图 10 所示。

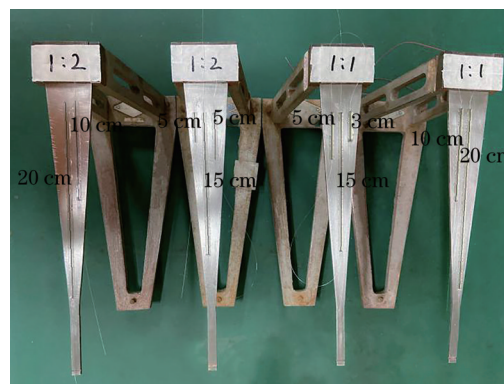


图 10 粘有不同长度光纤的等强度梁

Fig. 10 Equal strength beams bonded with different lengths of fiber

3.3.3 试验数据与处理

图 11(a)和图 11(b)为固化剂和黏结剂以体积比 1:1 和 1:2 调制的环氧树脂胶在不同的粘贴长度下得到的应变传递规律。由图可知:总粘贴长度为 30 mm 和 50 mm 时,整体的应变传递率都很低,并且没有高应变传递段;当总粘贴长度大于 100 mm 时,都出现了高应变传递段,并且粘贴长度越长,高应变传递段也越长。

图 12(a)~(e)为总粘贴长度 2L 为 200, 150, 100, 50, 30 mm 时,胶体剪切模量不同(固化剂和黏结剂以体积比 1:1 和 1:2 调制的环氧树脂胶)时产生的应变传递率变化图。由图可知:不同的粘贴长度

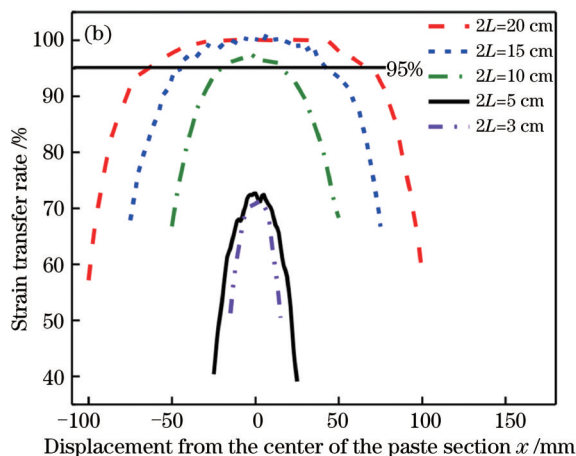
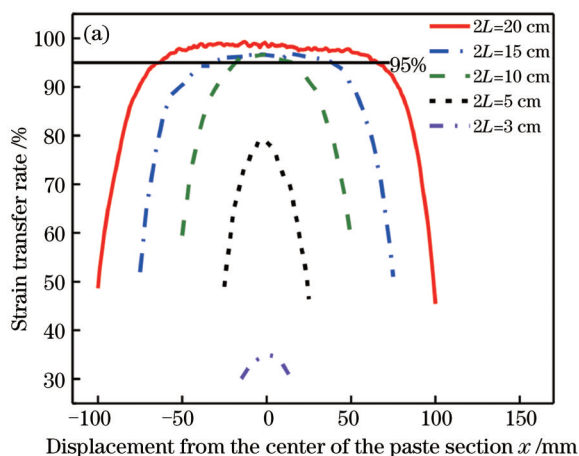


图 11 应变传递率随着不同粘贴长度的变化曲线。(a)固化剂和黏结剂的体积比为 1:1;(b)固化剂和黏结剂的体积比为 1:2

Fig. 11 Curves of strain transfer rate with different paste lengths. (a) Volume ratio of curing agent to binder is 1:1; (b) volum ratio of curing agent to binder is 1:2

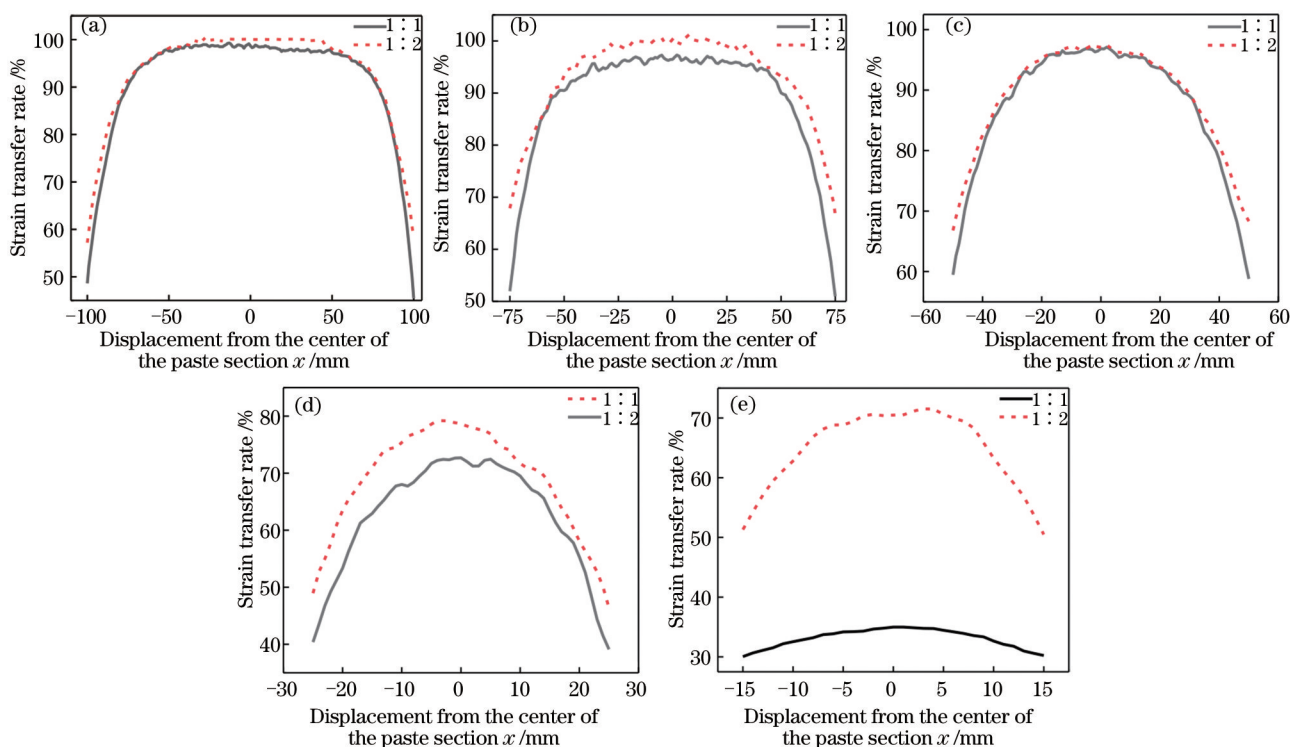


图 12 应变传递率随着不同胶黏剂(由体积比为 1:1 和 1:2 的固化剂和黏结剂组成)剪切模量的变化曲线。(a) 粘贴长度 $2L$ 为 200 mm; (b) 粘贴长度 $2L$ 为 150 mm; (c) 粘贴长度 $2L$ 为 100 mm; (d) 粘贴长度 $2L$ 为 50 mm; (e) 粘贴长度 $2L$ 为 30 mm

Fig. 12 Changes of strain transfer rate with shear modulus of different adhesives prepared by curing agent and binder (volume ratio of 1:1 and 1:2). (a) Paste length $2L=200$ mm; (b) paste length $2L=150$ mm; (c) paste length $2L=100$ mm; (d) paste length $2L=50$ mm; (e) paste length $2L=30$ mm

下, 增大胶体剪切模量, 使分布式裸光纤的应变传递率明显增大; 粘贴长度越短, 胶黏剂的剪切模量越高, 越能大幅度提高分布式光纤的应变传递率。

图 13 为不同粘贴长度与不同胶体剪切模量下,

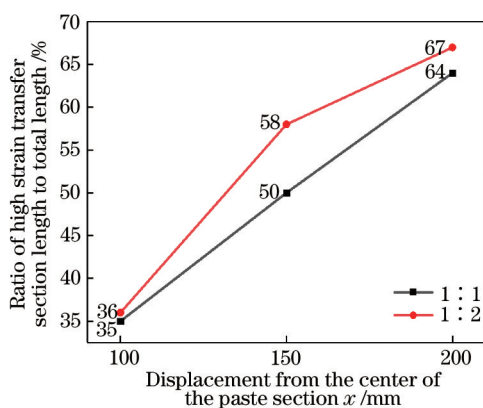


图 13 不同粘贴长度与不同胶黏剂(由体积比为 1:1 和 1:2 的固化剂和黏结剂组成)剪切模量对高应变传递段的影响 ($2L=200$ mm)

Fig. 13 Effect of different paste length and shear modulus of different adhesives prepared by curing agent and binder (volume ratio of 1:1 and 1:2) on high strain transfer section ($2L=200$ mm)

高应变传递段与总长度的比值变化图。从图中可知: 总粘贴长度大于 100 mm 时, 出现了高应变传递段, 但其只占总长度的 35%; 当总粘贴长度增长至 200 mm 时, 高应变传递段与总长度的比值增大到 67%, 可见增大粘贴长度和增大胶体剪切模量均可增长高应变传递段, 这与理论结论相吻合。

4 结 论

基于 OFDR 技术, 分析了应变传递模型中粘贴长度与胶体剪切模量对分布式裸光纤应变传递率的影响, 结果表明: 分布式裸光纤监测应变具有顶端效应, 光纤两端对应低应变传递率段, 光纤中部对应高应变传递率段; 当总粘贴长度大于 300 mm 时, 胶体的剪切模量只需大于 3×10^6 Pa 即可; 而当胶体剪切模量大于 1×10^7 Pa 时, 总粘贴长度只需大于 160 mm 即可。此时分布式裸光纤的高应变传递率段都可达到总长度的 90%, 可保证监测数据的准确性。

通过对等强度梁的试验研究表明: 高应变传递率段与粘贴长度成正比, 总粘贴长度应至少大于 200 mm; 胶体的剪切模量的高低影响着高应变传递

率段的长短。为了增加高应变传递段的长度,减小测量误差,应选用剪切模量高的胶体。

模型分析与试验结果都显示:分布式裸光纤粘贴长度越长,高应变传递率段越长;胶体剪切模量越高,高应变传递率段越长。并且随着胶体剪切模量的增大,分布式裸光纤粘贴长度可相对减小。等强度梁试验验证了应变传递模型分析的正确性和适用性。

参 考 文 献

- [1] Nanni A, Yang C C, Pan K, et al. Fiber-optic sensors for concrete strain-stress measurement[J]. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(3): 257-264.
- [2] 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.
- [3] Cox H L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials[J]. *British Journal of Applied Physics*, 1952, 3(3): 72-79.
- [4] 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.
- [5] Quan Z Q, Fang X Q, Xue G Z, et al. Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0104004.
权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0104004.
- [6] Gao J Q, Zhang W, Shi B. Influence of coating and jacket of distributed fiber optic sensor on strain measurement[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(8): 188-192.
高俊启, 张巍, 施斌. 涂敷和护套对分布式光纤应变检测的影响研究[J]. *工程力学*, 2007, 24(8): 188-192.
- [7] Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0410001.
章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0410001.
- [8] Mao J H, He Y, Jin W L, et al. Theoretical and experimental analyses on strain transferring of distributed optical fiber sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(10): 1406-1411.
毛江鸿, 何勇, 金伟良, 等. 分布式光纤传感器应变传递性能分析及试验研究[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(10): 1406-1411.
- [9] 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.
- [10] Zeng P, Wang Y, Chen F Q, et al. Analysis of the effect of adhesives on strain transfer for surface bonded polyimide fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(1): 43-49.
曾鹏, 王源, 陈飞琼, 等. 胶粘剂对表贴式聚酰亚胺光纤布拉格光栅应变传递的影响分析[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(1): 43-49.
- [11] Li J. Theoretical and experimental studies on strain transfer based on distributed optical fiber[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
李洁. 基于分布式光纤的应变传递理论及实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [12] Bao T F, Li J M, Zhao J L. Modeling and sensitivity analysis of strain transfer between surface-bonded POFs and concrete[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(5): 59-64.
包腾飞, 李润鸣, 赵津磊. 表面粘贴式塑料光纤与混凝土间应变传递模型及敏感性分析[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(5): 59-64.
- [13] 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.
- [14] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency-domain reflectometry in single-mode fibers[C]//*Optical Fiber Communication Conference 1981*, April 27-29, 1981, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 1981: WF3.
- [15] Wu J H, Liu H, Yang P, et al. Identification and monitoring of concrete cracks based on optical frequency domain reflectometry technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 241201.
吴静红, 刘浩, 杨鹏, 等. 基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 241201.
- [16] Ding Z Y. Methods for improving OFDR performances and their experimental verifications[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
丁振扬. 几种改进 OFDR 性能方法的提出及验证[D]. 天津: 天津大学, 2013.