

表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究

田石柱 张国庆 王大鹏

(苏州科技学院土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要 建立了组合梁与光纤布拉格光栅(FBG)传感器应变传递的力学试验模型, 得出组合梁结构实际应变与表面式光纤布拉格光栅传感器应变的关系。对影响表面式光纤布拉格光栅传感器平均应变传递率的影响因素进行了理论分析, 得出胶接层弹性模量, 胶接层的宽度以及光纤的粘贴长度对应变传递率影响较大, 通过实验确定它们之间的最佳组合, 为以后的实际工程应用提供了参考。

关键词 表面式光纤布拉格光栅传感器; 胶接层; 弹性模量; 粘贴长度; 应变传递

中图分类号 TP212.9; P315.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0805005

Study on Strain Transfer Mechanism of Surface Fiber Bragg Grating Sensor

Tian Shizhu Zhang Guoqing Wang Dapeng

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou, Jiangsu 215011, China)

Abstract The mechanic model of surface fiber Bragg grating (FBG) sensor is built to study the strain transfer between the composite beam and the surface FBG sensor. The relationship between the actual strain of composite beam and the strain of surface FBG sensor is deduced. Various factors which influence the average strain transfer rate of surface FBG sensor have been analyzed. Modulus elasticity, width of the cementing layers length of the fiber pate are primary factors to influence the strain transfer rate. A optimum combination of the three factors is determined through an experiment, which proides reference for practical engineering application in future.

Key words surface fiber Bragg grating sensor; cementing layer; modulus of elasticity; paste length; strain transfer

OCIS codes 050.2770; 060.3735; 130.6010

1 引言

随着我国经济的飞速发展, 建筑事业得到了迅猛发展, 一大批重大工程结构如雨后春笋般出现。这些重要结构受到自然灾害以及一些偶然荷载作用, 一旦失效将会造成重大人员伤亡和经济损失, 因此为重大工程结构建立一套健康监测系统很有必要。结构健康检测(SHM)通过包括结构响应在内的结构系统特性分析, 达到检测结构损伤的目的^[1]。光纤光栅具有体积小、不受电磁干扰、复用性强、能实现绝对测量等许多独特的优点, 在土木工程中得到了广泛应用^[2]。但是, 在光纤光栅的研究以及实际应用中发现, 由于被测基体与光纤之间并没有直接接触, 而是通过胶体来粘接, 那么被测基体的实际

应变是否与光纤测得的应变相等是一个问题。通过实验和理论分析表明光纤测得的应变不等于被测基体的应变^[3]。这一结果对光纤布拉格光栅(FBG)传感器应变传递机理的研究具有重大意义。Ansari等^[4]假定埋入式光纤粘贴长度中心的应变与基体应变相同而得出了光纤的轴向应变和剪应力分布。周智等^[5]对埋入式和表面式多层粘结光纤光栅传感器情况进行了分析, 得出了更一般的结果, 但同样假定粘贴长度中心的应变与基体应变相同。周广东等^[6]在已有应变传递理论的基础上, 经过分析得出影响光纤光栅传感器应变传递的主要因素, 即光纤光栅传感器的长度、中间层的厚度、弹性模量和泊松比, 并得到了各因素对光纤光栅测量精度的影响。王为

收稿日期: 2014-02-24; 收到修改稿日期: 2014-03-19

基金项目: 第八批江苏省“六大人才高峰”项目(2011-JZ-013)、国家自然科学基金青年基金(51308369)

作者简介: 田石柱(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构智能健康监测、结构抗震试验及振动控制等方面的研究。E-mail: tianshizhu@mail.usts.edu.cn

等^[7]研究了表面式光纤光栅传感器传递过程中衬底对应变传递率的影响。刘德华等^[8]研究了三点加压下光纤光栅的传递模型,利用有限元软件分析了应变传递公式的准确性以及误差修正公式。孙丽等^[9]研究了温度和角度对光纤光栅传感的影响,推导出应变传递公式。张文晓等^[10]研究了粘贴式光纤光栅传感器应变传递的影响因素,得出各因素对应变传递率的影响程度。

本文建立了组合梁与光纤布拉格光栅传感器应变传递的力学实验模型,并推导出组合梁结构实际应变与表面式光纤布拉格光栅传感器应变的关系。从实验角度对影响表面式光纤布拉格光栅传感器平均应变传递率的影响因素进行了分析,得出除了光纤光栅自身原因及封装外,有3个因素影响平均应变传递率,即胶接层弹性模量、胶接层宽度以及光纤粘贴长度。通过实验确定它们之间的最佳组合,为以后的实验提供了指导。

2 应变传递原理

首先建立了表面式光纤布拉格光栅传感器的力学模型,建立光纤传感器结构基体层——胶结层——传感光纤层的力学实验传递模型(图1),由Cox等^[11]提出的剪滞理论可知,光纤光栅的应变通过基体传给胶结层,胶结层再传给光纤。

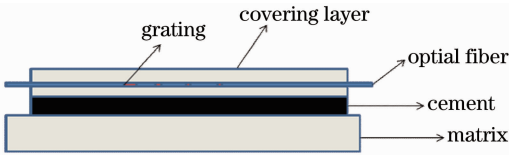


图1 表面粘贴式光纤光栅传感器结构模型

Fig. 1 Structure model of the surface FBG sensor

作如下假定^[4]:

1)材料均为线弹性,基体材料仅沿光纤方向承受均匀应变,然后通过粘接层和保护层使光纤产生应变,光纤不直接受力;

2)光纤和保护层,粘结层与基体的交界处结合紧密,没有脱落;

3)认为光纤光栅粘贴长度中点的应变变化率和基体的应变变化率相同。

图2为实验中的应变传递示意图。光纤光栅传感器的半径为 r_g ,胶接层的厚度为 h_c ,上部胶结层、光纤光栅单元的微应力分别为 $d\sigma_c$ 、 $d\sigma_g$,各层间的剪切应力分别为 τ_{gc} 、 τ_{cm} ,粘贴长度设为 $2L$,传感器粘贴的宽度为 D 。

由第一层光纤布拉格光栅受力平衡的原理分析

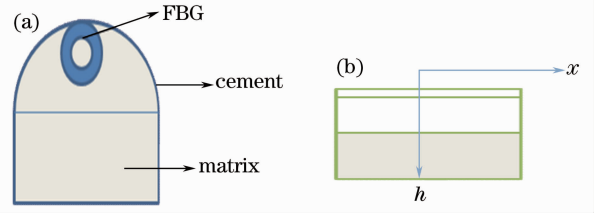


图2 应变传递结构示意图。(a)横截面图;(b)剖面图及坐标系

Fig. 2 Schematic of strain transfer. (a) Cross section view; (b) section view and coordinate system

可得 x 方向的平衡方程为

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

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

同样对中间层微元段,取 $2r_g < h < 2r_g + h_c$,根据实际实验和胶的性质假设中间层凝结后所形成的形状为抛物线,设顶点为 $(0, 0)$,则抛物线上其他两点为 $(-D/2, 2r_g + h_c)$ 、 $(D/2, 2r_g + h_c)$ 。设抛物线方程为 $y = ax^2 + bx + c$,把三点带入得抛物线的方程为

$$y = \frac{8r_g + 4h_c}{D^2} X^2. \quad (3)$$

对胶结层微单元进行应力分析,可得 x 方向平衡方程为

$$\pi r_g^2 d\sigma_g + \left[\int_{-\sqrt{\frac{h}{8r_g + 4h_c} D^2}}^{\sqrt{\frac{h}{8r_g + 4h_c} D^2}} \left(\frac{8r_g + 4h_c}{D^2} x^2 \right) dh \right] d\sigma_c = 2D \sqrt{\frac{h}{8r_g + 4h_c}} dx \tau_{c(x, h)}. \quad (4)$$

对(4)式化简可得

$$\tau_{c(x, h)} = \frac{\pi r_g^2 d\sigma_g}{D \sqrt{\frac{h}{8r_g + 4h_c}} dx} + \frac{h}{3} \frac{d\sigma_c}{dx}. \quad (5)$$

由于光纤与中间层一起变形,二者应变变化率相近,且因为光纤和中间层的弹性模量相差较大,故认为^[4] $\frac{d\epsilon_g}{dx} = \frac{d\epsilon_c}{dx}$, $\frac{E_c}{E_g} = 0$,可得到

$$\tau_{c(x, h)} = \frac{E_g \pi r_g^2 d\epsilon_g}{D \sqrt{\frac{h}{8r_g + 4h_c}} dx}. \quad (6)$$

依据剪滞模型的实质可知

$$\mu_m - \mu_g = \int_{h_p/(2-r_g)}^{h_p} \gamma_c(y) dy. \quad (7)$$

对(7)式进行积分可得

$$\varepsilon_m = \varepsilon_g(x) - \frac{1}{k^2} \frac{d^2 \varepsilon}{dx^2}, \quad (8)$$

$$k^2 = \frac{E_c D}{4\pi r_g^2 E_g (1 + \mu_c) (2r_g + h_c - \sqrt{4r_g^2 + 2r_g h_c})}. \quad (9)$$

由于光纤光栅与胶结层相交的端面为自由端,没有应力传递,即 $\varepsilon_g(-L) = \varepsilon_g(L) = 0$, 由此初始条件,求微分方程(8)式得

$$\alpha(x) = 1 - \cosh(kx) / \cosh(kL). \quad (10)$$

由(10)式可得表面式光纤布拉格光栅传感器所测得的平均应变传递率为

$$\alpha = 1 - \sinh(kL) / [KL \cosh(kL)]. \quad (11)$$

3 应变传递影响因素分析

由(11)式可得在实际实验方面,影响平均应变传递率的因素有胶接层的弹性模量、胶接层的宽度以及光纤布拉格光栅的粘贴长度。它们对应变传递率有着很大的影响,在实验中如何选择这些因素使得传递达到最优显得特别重要,因此有必要研究这

个因素之间的相关性,以及它们之间的组合对传递率的影响程度。

在实际工程应用中,把光纤自身及封装参数当成已知参数,即 $r_g = 125 \mu\text{m}$, $E_g = 7.2 \times 10^{10} \text{ Pa}$; 在实际粘贴过程中胶的宽度很难控制,由实际工程及相关研究可取为 $h_c = 5 \text{ mm}$; 中间层的泊松比对平均应变传递率的影响很小,可取为 $\mu_c = 0.3$; 实际工程和相关研究得到胶结层弹性模量 E_c 取值范围为 $2.2 \times 10^9 \sim 5.2 \times 10^9 \text{ Pa}$, 胶的粘贴宽度 $1 \sim 20 \text{ mm}$, 粘贴长度为在 $1 \sim 100 \text{ mm}$ 。这个范围内选择这些因素以及它们之间的组合以分析对传递率的影响。

当固定胶的粘贴长度为 40 mm 时,其他两个因素的组合对传递率的影响如图 3(a) 所示。当宽度为 1 mm 时,不管选何种胶,平均应变传递率都在 90% 以下,平均应变传递率相对较低,取胶的宽度为 5 mm 以上较为合适。胶的弹性模量和宽度的组合对平均应变传递率的影响比较大。总体来说,平均应变传递率随胶接层弹性模量的增大而增大,随胶的宽度的增大而增大。

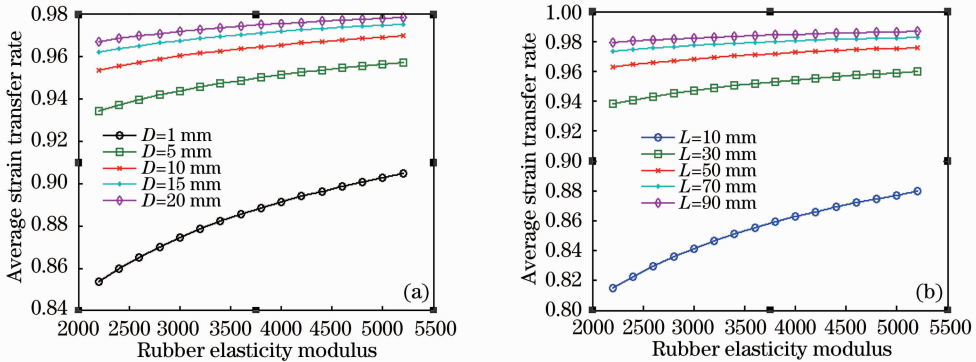


图 3 平均应变传递率随胶接层弹性模量的变化

Fig. 3 Variation in the average strain transfer rate with the elasticity modulus of the cementing layer

当固定胶的粘贴宽度为 10 mm 时,其他两个因素的组合对传递率的影响如图 3(b) 所示。当粘贴长度为 10 mm 时,不管选何种胶,平均应变传递率都在 90% 以下,平均应变传递率相对较低,取胶的粘贴长度为 50 mm 以上较为合适。胶的弹性模量和粘贴长度的组合对平均应变传递率的影响比较大。总体来说,平均应变传递率随胶接层弹性模量的增大而增大,随胶的粘贴长度的增大而增大。

4 实验方法与结果

由(9)式和(11)式可知,在实验中除了光纤光栅自身及封装的因素外,影响粘贴式光纤布拉格光栅

传感器平均应变传递率的因素主要有传感部分的粘贴长度、胶接层宽度以及中间层的弹性模量。在实验中如何选取这些参数尤为重要。

实验基于光纤布拉格光栅传感器的组合梁的应变传递影响参数的选取进行研究。利用布拉格光纤光栅传感器、光纤解调仪、计算机、反力架建立一个健康监测系统,实验系统如图 4 所示。基于表面式 FBG 光纤布拉格光栅传感器应变传递因素的影响程度,利用组合梁模型进行实验参数的选取。影响应变传递的外在因素主要有胶的弹性模量、胶的宽度以及光纤光栅的粘贴长度。从实际工程经验可得,常见胶体主要有 502、AB 胶以及 504 环氧胶。

胶的宽度取为 5、10、15 mm，胶的粘贴长度为 40、70、100 mm。由于实验涉及 3 个因子 3 个水平，对各个因子的每一种水平进行实验需要做 27 组实验，如果进行正交实验，可以在全部 27 种组合中选取 9 种组合，做 9 次实验。通过实验来检验各个因素的作用是否显著，找出这 3 个因素中对应变传递影响较为显著的因素，并找出它们之间的最优水平组合。



图 4 实验系统图
Fig. 4 Photo of the testing system

4.1 实验构件

实验构件是一个简支钢-混凝土组合梁，跨度为 1700 mm，钢筋采用 HPB235，混凝土板设计强度为 C25，工字钢型号为 20#，Q235。组合梁按弹性方法设计，试件横截面尺寸及配筋详图如图 5 所示^[12]。

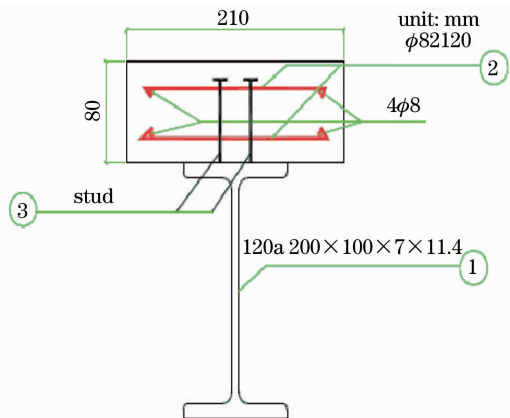


图 5 实件横截面尺寸详图

Fig. 5 Cross section size of the specimen

4.2 实验方案

首先在组合梁结构的中心处分别对这 9 组数据进行光纤光栅的粘贴，然后对结构进行加载，可以得到这 9 组数据测得的 FBG 的应变值。然后在组合梁结构对称轴的中心处粘贴电阻应变片，可以得到电阻应变片测得的基体应变值。通过对比可以测得这 9 种情况下光纤光栅的平均应变传递率。最后检验因子的作用是否显著，并找出最优水平组合。

4.3 实验加载制度

实验采用逐级加载方式，每 2 kN 为一级，加载至 40 kN 后待波长稳定再加下一级荷载。加载如图 6 所示。

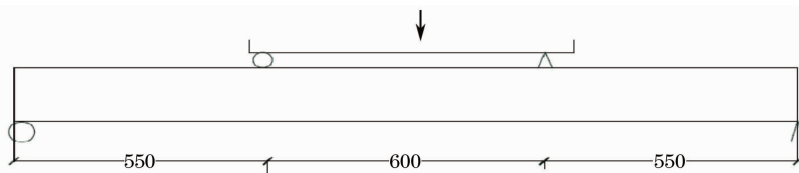


图 6 实验加载示意图

Fig. 6 Schematic of test loading

4.4 实验结果与分析

通过实验测得，利用 502 胶且胶的宽度为 5 mm、粘贴长度为 40 mm 时传感器的应变传递率为 67%。利用 502 胶，胶的宽度为 10 mm、粘贴长度为 70 mm 时传感器的应变传递率为 70%。利用 502 胶，胶的宽度为 15 mm、粘贴长度为 100 mm 时传感器的应变传递率为 95%。利用 AB 胶，胶的宽度为 5 mm、胶的粘贴长度为 70 mm 时传感器的应变传递率为 89%。利用 AB 胶，胶的宽度为 10 mm、粘贴长度为 70 mm 时传感器的应变传递率为 80%。利用 AB 胶，胶的宽度为 15 mm、粘贴长度为 40 mm 时传感器的应变传递率为 84%。利用 504 环氧胶，胶的宽度为 5 mm、粘贴长度为 100 mm 时传感器的

应变传递率为 49%。利用 504 环氧胶，胶的宽度为 10 mm、粘贴长度为 40 mm 时传感器的应变传递率为 40%。利用 504 环氧胶，胶的宽度为 15 mm、粘贴长度为 70 mm 时传感器的应变传递率为 45%。

按照设计完成实验，取得实验观测值，然后做方差分析，列出方差分析表，显著性分析如表 1 所示。

对于胶的种类来说，因为 A_1 的均值 $\bar{X}_{11} = 78$ ， A_2 的均值 $\bar{X}_{21} = 85$ ， A_3 的均值 $\bar{X}_{31} = 45$ ，其中 $\bar{X}_{21} = 85$ 最大，所以 A_2 的水平最优，即 AB 胶是最优水平。

对于胶的宽度来说，因为 B_1 的均值 $\bar{X}_{12} = 68$ ， B_2 的均值 $\bar{X}_{22} = 63$ ， B_3 的均值 $\bar{X}_{32} = 75$ ，所以 B_3 的水平最优，即胶的宽度取 15 mm 是最优水平。

表 1 实验结果显著性分析

Table 1 Significance analysis of the experimental results

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Square value	F value	Quantile
A (rubber)	$SS_A = 2739$	$r-1=2$	1370	$F_A = 21.75$	$F_{0.95}(2,2) = 19.0$
B (thickness)	$SS_B = 219$	$r-1=2$	110	$F_B = 1.75$	$F_{0.95}(2,2) = 19.0$
C (paste length)	$SS_C = 186$	$r-1=2$	93	$F_C = 1.48$	$F_{0.95}(2,2) = 19.0$
Error	$SS_e = 126$	$8-2-2-2=2$	63		
Total	$SS_T = 3270$	$n-1=8$			

注： $F_A = 21.75 > 19.0 = F_{0.95}(2,2)$ ，所以胶的种类作用显著。 $F_B = 1.75 < 19.0 = F_{0.95}(2,2)$ ，胶的宽度作用不显著。

$F_C = 1.48 < 19.0 = F_{0.95}(2,2)$ ，所以胶的粘贴长度作用不显著。

对于胶的粘贴长度来说，因为 C_1 的均值 $\bar{X}_{13} = 65$ ， C_2 的均值 $\bar{X}_{23} = 68$ ， C_3 的均值 $\bar{X}_{33} = 74$ ，所以 C_3 的水平最优，即胶的粘贴长度为 100 mm 最优。

把 3 个因子的最优水平组合起来就得到最优水平组合 (A_2, B_3, C_3)，即胶的种类取 AB 胶，胶的宽度取 15 mm，胶的粘贴长度取 100 mm。

按照这种组合再做一次实验，测量结果和电阻应变片测量结果进行比较，如图 7 所示。

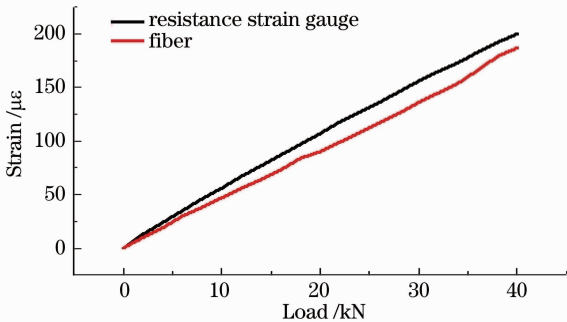


图 7 光纤测量结果和电阻应变片测量结果对比

Fig.7 Comparison of fiber measurement results and resistance strain gauge measurement result

当胶的种类取 AB 胶，胶的宽度取 15 mm，胶的粘贴长度取 100 mm 时，光纤光栅的测量结果与电阻应变片的测量结果比较接近。因此在以后的实验中这 3 个参数可以这样组合以达到光纤光栅的测量精度。

5 结 论

建立了组合梁与光纤布拉格光栅传感器应变传递的力学模型，推导出组合梁结构实际应变与表面式光纤布拉格光栅传感器应变的关系，对影响表面式光纤布拉格光栅传感器平均应变传递率的影响因素进行了理论分析和实验验证，得出以下结论：

1) 影响粘贴式光纤光栅传感器平均应变传递率的因素主要有传感部分的粘贴长度、胶接层宽度、胶接层厚度、中间层的弹性模量 E 以及中间层的泊

松比等。而在实际应用中胶接层弹性模量、胶接层宽度以及光纤的粘贴长度对应变传递率影响较大，其中胶的影响最为显著，因此要注重胶的选取。

2) 平均应变传递率随厚度的增加而减小，随着弹性模量的增大而增大，随泊松比的增大而减小，随宽度的增加而增大，随粘贴长度增加而增大。

3) 在以后的实验及工程应用中，可以取胶的种类为 AB 胶，胶的宽度为 15 mm，胶的粘贴长度为 100 mm，这种组合下光纤光栅的应变传递率较好，可达到 95%。

参 考 文 献

- Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, *et al.*. Structural control: Past, present, and future [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 123(9): 897-971.
- Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, 等. 结构控制: 过去现在和未来 [J]. *工程力学*, 1997, 123(9): 897-971.
- Li Hongnan, Li Dongsheng, Zhao Baidong. Progress on study and application of smart health monitoring method by fiber optic sensor in civil engineering [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(6): 76-83.
- 李宏男, 李东升, 赵柏东. 光纤健康监测方法在土木工程中的研究与应用进展 [J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(6): 76-83.
- Li Hongnan, Ren Liang. *Structural Health Monitoring of Fiber Grating Sensing Technology* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008. 151-153.
- 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. 151-153.
- Farhad Ansari, YuanLibo. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 385-394.
- Farhad Ansari, 苑立波. 光纤传感器基体界面剪切力学传递模型 [J]. *工程力学*, 1998, 124(4): 385-394.
- Zhou Zhi, Tian Shizhu, Ou Jinping. Study on mechanism of optical fiber Bragg grating sensing [C]. In: *Proceedings of the 4th Conference on Functional Materials and Application*, 2001. 377-381.
- 周智, 田石柱, 欧进萍. 光纤布拉格光栅传感机理研究 [C]. 第四届中国功能材料及其应用技术学术会议论文集, 2001. 377-381.
- Zhou Guangdong, Li Hongnan, Ren Liang, *et al.*. Told fiber Bragg grating strain sensor transfer impact parameter study [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 24(6): 169-173.
- 周广东, 李宏男, 任亮, 等. 光纤光栅传感器应变传递影响参数研究 [J]. *工程力学*, 2007. 169-173.
- Wang Wei, Lin Yuchi, Huang Yuguo. Surface optical fiber Bragg grating strain sensor transfer study [J]. *Laser and*

- Infrared, 2008, 38(12): 1218-1220.
- 王 为, 林玉池. 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.
- 8 Andy Lau, Jin Weiliang, Zhang Yuxiang. Strain transfer relationship between optical fiber sensor and structure matrix[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 40(11): 1847-1851.
- 刘德华, 金伟良, 张玉香. 光纤传感器与结构基体的应变传递关系[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(11): 1847-1851.
- 9 Sun Li, Ren Xueling, Zhou Peng, *et al.*. Impact analysis of temperature and non-axial force on fiber grating strain transfer [J]. Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Suppl): 231-234.
- 孙 丽, 任学玲, 周 鹏, 等. 温度与非轴向力对光纤光栅应变传递影响的分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30 (Suppl): 231-234.
- 10 Zhang Wenxiao, He Xiufeng. Analysis of strain transfer factors of pasted optical fiber Bragg grating sensor [J]. Geotechnical Investigation and Survey, 2013, (6): 82-86.
- 张文晓, 何秀凤. 粘贴式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析 [J]. 工程勘察, 2013, (6): 82-86.
- 11 Cox H L. The Elasticity and Strength of Paper and Other Fibrous Materials [J]. Britain Journal of Applied Physics, 1952, 72-79.
- 12 Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage detection based on long-gage fiber Bragg grating sensor [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2014, 57(1): 010604.
- 田石柱, 温 科, 王大鹏. 基于长标距 FBG 传感器宏应变技术的损伤识别研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 57(1): 010604

栏目编辑: 殷建芳