

基片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究

张桂花 柴敬 李旭娟 弥旭锋 李毅 郝蕾

西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054

摘要 为了实现光纤光栅传感器对基体表面应变的准确监测,以基片式光纤布拉格光栅(FBG)传感器为研究对象,推导了基片式FBG应变传感器所测应变与基体应变之间的关系,即应变传递系数表达式。实验上,将实验室封装的铜基片式应变传感器黏贴在圆柱形试件上,测定了该传感器的应变传递系数。结果表明,理论所得的应变传递系数与实验所测的应变传递系数之间的误差很小,证明了应变传递系数推导的合理性,为基片式传感器的封装和使用提供了理论指导。

关键词 光纤光学;基片式光纤光栅传感器;应变传递;传感器封装

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.010601

Research on Strain Transfer of Surface Fiber Grating Sensor

Zhang Guihua Chai Jing Li Xujuan Mi Xufeng Li Yi Hao Lei

School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract To accurately monitor the strain of surface of host materials, taking the surface fiber Bragg grating (FBG) sensor as an example, the relationship between the strain measured by the surface FBG sensor and the actual strain of the host material is deduced. The general expression of strain transfer coefficient of the surface FBG sensor is got. In experiment, the copper slice packaged FBG sensor by is adhered to the cylindrical sample surface and its strain transfer coefficient is got. The experimental result proves that the difference between strain transfer coefficients obtained in theory and in experiment is small and the theoretical derivation of the strain transfer coefficient is rational. The research results provide the theory guidance for the FBG sensor packaging and application.

Key words fiber optics; surface fiber grating sensor; strain transfer; sensor packaging

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.3738

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是近年来迅速发展起来的一种新型传感器,由于其具有灵敏度高、重量轻、体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀、便于复用组网而在结构的健康监测^[1-2]、地下工程^[3]、航天工程^[4]、石油井下的勘测^[5]等领域有着广泛的应用前景。

光纤光栅易脆断,在实际的监测中经常需要进行封装,封装的方法有基片式封装、管式封装和嵌入式封装。但是无论何种封装方式,光纤与基体之间都存在多层介质,使得光纤光栅所测得的应变与基体的应变不同,即存在应变传递的问题。对于这个问题国内外已有许多学者做了研究,如 Ansari 等^[6]假定埋入式光纤传感器黏贴中心的应变与基体应变相同而得出光纤的轴向应变;李东升等^[7]修正了光纤传感器黏贴中心的应变与基体应变相同的假设,认为光纤传感器黏贴中心的应变变化率与基体应变变化率相同,导出了埋入式传感器各点的应变;周智等^[8]导出了有保护层的光纤光栅应变传感公式,即埋入式光纤光栅传感器多层应变传递的应变表达式。吴永红等^[9]通过构造静定应变传递特征方程,得到光纤光栅封装结构统一的应变传递关系,建立了光纤光栅标准化埋入式封装设计的基本理论模型。梁德志等^[10]通过有限元法分析发现埋入式光纤光栅传感器所测

收稿日期: 2013-07-26; 收到修改稿日期: 2013-08-01; 网络出版日期: 2013-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(51174280)、国家自然科学基金科学仪器专项(41027002)、西安市碑林区2013年科技计划(GX1312)

作者简介: 张桂花(1979—),女,硕士,讲师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhangguihua@xust.edu.cn

应变与实际应变并不相同。但大多数研究都是针对埋入式的光纤光栅传感器的应变传递研究,对于表面黏贴的光纤光栅的应变传递研究较少。魏世明等^[1]指出裸光纤光栅贴在岩石表面的应变传递系数是2.3。本文研究了基片式封装的光纤光栅传感器的应变传递问题,推导应变传递的一般表达式,并针对封装的铜基片式光纤光栅传感器黏贴在试件表面的情况,测定了其应变传递系数,证实了理论分析。

2 基片式传感器的应变传递的理论模型

2.1 封装的基本结构及其分析模型

基片式光纤光栅传感器的基本结构如图1所示,其应变传递如图2所示。

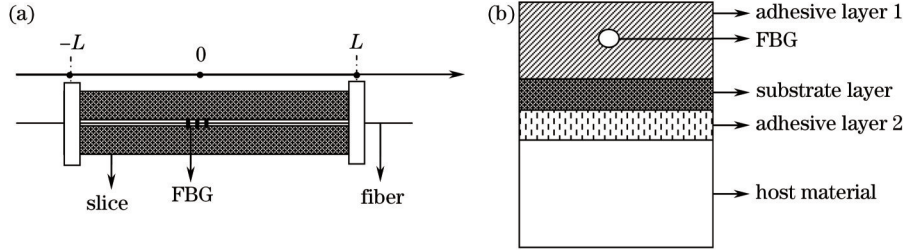


图1 基片式光纤光栅传感器的结构图。(a) 俯视图; (b) 侧视图

Fig.1 Structural drawing of the surface FBG sensor. (a) Top view; (b) side view

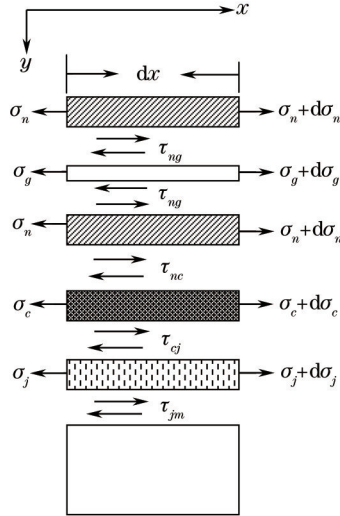


图2 光纤光栅传感器的各层应变传递图

Fig.2 Strain transfer among layers of the surface FBG sensor

图2中 σ_n 、 σ_g 、 σ_c 、 σ_j 表示黏结层1、光纤层、衬底层和黏结层2的轴向应力, τ_n 、 τ_g 、 τ_c 、 τ_j 表示黏结层1、光纤层、衬底层和黏结层2的剪切应力, u_n 、 u_g 、 u_c 、 u_j 表示黏结层1、光纤层、衬底层和黏结层2的轴向位移, τ_{ng} 、 τ_{nc} 、 τ_{cj} 、 τ_{jm} 表示黏结层1和光纤层界面之间、黏结层1和衬底层界面之间、衬底层与黏结层2界面之间、黏结层2与基体界面之间的剪应力, E_n 、 E_g 、 E_c 、 E_j 表示黏结层1、光纤层、衬底层和黏结层2的弹性模量, G_n 、 G_g 、 G_c 、 G_j 表示黏结层1、光纤层、衬底层和黏结层2的剪切模量, r_g 表示光纤的半径。传感器的宽度为 b ,长度为 $2L$ 。

2.2 基片式光纤光栅传感器应变传递的理论模型

在基片式光纤光栅传感器沿 x 方向任取微元 dx ,对各层进行力学分析。按照力的平衡原理,分析黏结层1得

$$d\sigma_n(bh_n - \pi r_g^2) + \tau_{ng} 2\pi r_g dx + \tau_{nc} b dx = 0. \tag{1}$$

化简得

$$\frac{d\sigma_n}{dx} = \frac{-\tau_{nc} b - \tau_{ng} 2\pi r_g}{bh_n - \pi r_g^2}. \tag{2}$$

同理得到光纤层、衬底层和黏结层2的力的平衡方程分别为

$$\frac{d\sigma_g}{dx} = \frac{2}{r_g} \tau_{ng}, \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma_c}{dx} = \frac{\tau_{nc} - \tau_{cj}}{h_c}, \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_j}{dx} = \frac{\tau_{ej} - \tau_{jm}}{h_j}. \quad (5)$$

将(2)~(4)代入(5)式,并化简得

$$\tau_{jm} = -\frac{h_j d\sigma_j}{dx} - \frac{h_c d\sigma_c}{dx} - \frac{d\sigma_n}{dx} \left(h_n - \frac{\pi r_g^2}{b} \right) - \frac{d\sigma_g}{dx} \frac{\pi r_g^2}{b}. \quad (6)$$

假定光纤光栅传感器各层的应变梯度相同,即

$$\frac{d\varepsilon_g}{dx} = \frac{d\varepsilon_n}{dx} = \frac{d\varepsilon_c}{dx} = \frac{d\varepsilon_j}{dx}, \quad (7)$$

又由于各层的轴应力与轴向应变之间的关系为

$$\frac{d\sigma_g}{dx} = E_g \frac{d\varepsilon_g}{dx}, \quad \frac{d\sigma_n}{dx} = E_n \frac{d\varepsilon_n}{dx}, \quad \frac{d\sigma_c}{dx} = E_c \frac{d\varepsilon_c}{dx}, \quad \frac{d\sigma_j}{dx} = E_j \frac{d\varepsilon_j}{dx}, \quad (8)$$

将(7)式和(8)式代入(6)式,得到

$$\tau_{jm} = -E_c \frac{d\varepsilon_g}{dx} \left[\frac{h_j E_j}{E_c} + h_c - \frac{E_n}{E_c} \left(h_n - \frac{\pi r_g^2}{b} \right) + \frac{E_g}{E_c} \frac{\pi r_g^2}{b} \right]. \quad (9)$$

由于 $E_c \gg E_n$ 和 $E_c \gg E_j$,故(9)式变为

$$\tau_{jm} = -E_c \left(h_c + \frac{E_g}{E_c} \frac{\pi r_g^2}{b} \right) \frac{d\varepsilon_g}{dx}. \quad (10)$$

同理得到

$$\tau_{cj} = -E_c \left(h_c + \frac{E_g}{E_c} \frac{\pi r_g^2}{b} \right) \frac{d\varepsilon_g}{dx} = \tau_{jm}, \quad (11)$$

$$\tau_{nc} = E_g \frac{\pi r_g^2}{b} \frac{d\varepsilon_g}{dx}, \quad (12)$$

$$\tau_{ng} = \frac{E_g r_g}{2} \frac{d\varepsilon_g}{dx}. \quad (13)$$

假定各层的剪应力随厚度线性变化,则对于黏结层1的剪应力 τ_n 为

$$\tau_n = \frac{\tau_{nc} - \tau_{ng}}{h_n/2 - r_g} y + \frac{\tau_{nc}(-r_g - h_n/2) + \tau_{ng} h_n}{h_n/2 - r_g}, \quad (14)$$

式中 $\frac{h_n}{2} + r_g \leq y \leq h_n$ 。

对于衬底层的剪应力 τ_c 为

$$\tau_c = \frac{\tau_{ej} - \tau_{nc}}{h_c} (y - h_n) + \tau_{nc}, \quad (15)$$

式中 $h_n \leq y \leq h_n + h_c$ 。

对于黏结层2的剪应力 τ_j 为

$$\tau_j = \frac{\tau_{jm} - \tau_{ej}}{h_j} (y - h_n - h_c) + \tau_{ej}, \quad (16)$$

式中 $h_n + h_c \leq y \leq h_n + h_c + h_j$ 。

(16)式联立 $\tau_j = G_j \frac{du}{dy}$, 并且两边对 y 积分,得

$$\int_{h_n+h_c}^{h_n+h_c+h_j} G_j \frac{du}{dy} dy = \int_{h_n+h_c}^{h_n+h_c+h_j} \left[\frac{\tau_{jm} - \tau_{ej}}{h_j} (y - h_n - h_c) + \tau_{ej} \right] dy,$$

即

$$G_j(u_h - u_j) = -E_c h_j \left(h_c + \frac{E_g \pi r_g^2}{E_c b} \right) \frac{d\varepsilon_g}{dx}. \quad (17)$$

再将(17)式两边对 x 求导,得

$$\varepsilon_j = \varepsilon_m + \frac{E_c h_j}{G_j} \left(h_c + \frac{E_g \pi r_g^2}{E_c b} \right) \frac{d^2 \varepsilon_g}{dx^2}. \quad (18)$$

对于衬底层,联立(15)式和 $\tau_c = G_c \frac{du}{dy}$, 并且先两边对 y 积分,然后再两边对 x 求导可得

$$\varepsilon_c = \varepsilon_j + \frac{E_c}{2G_c} h_c^2 \frac{d^2 \varepsilon_g}{dx^2}. \quad (19)$$

将(18)式代入(19)式得

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m + \left[\frac{E_c h_j}{G_j} \left(h_c + \frac{E_g \pi r_g^2}{E_c b} \right) + \frac{E_c h_c^2}{2G_c} \right] \frac{d^2 \varepsilon_g}{dx^2}. \quad (20)$$

对于黏结层1,联立(14)式和 $\tau_n = G_n \frac{du}{dy}$, 并且先两边对 y 积分,然后再两边对 x 求导可得

$$\varepsilon_n = \varepsilon_c - \frac{E_g}{G_n} \left(\frac{\pi r_g^2}{b} + \frac{r_g}{2} \right) \left(\frac{h_n}{4} - \frac{r_g}{2} \right) \frac{d^2 \varepsilon_g}{dx^2}. \quad (21)$$

将(20)式代入(21)式得

$$\varepsilon_n = \varepsilon_m + \left[\frac{E_c h_j}{G_j} \left(h_c + \frac{E_g \pi r_g^2}{E_c b} \right) + \frac{E_c h_c^2}{2G_c} - \frac{E_g}{G_n} \left(\frac{\pi r_g^2}{b} + \frac{r_g}{2} \right) \left(\frac{h_n}{4} - \frac{r_g}{2} \right) \right] \frac{d^2 \varepsilon_g}{dx^2}. \quad (22)$$

由于 $E_n \ll E_g$, 所以

$$\varepsilon_n = \varepsilon_g. \quad (23)$$

将(23)式代入(22)式得

$$\varepsilon_g = \varepsilon_m + \left[\frac{E_c h_j}{G_j} \left(h_c + \frac{E_g \pi r_g^2}{E_c b} \right) + \frac{E_c h_c^2}{2G_c} - \frac{E_g}{G_n} \left(\frac{\pi r_g^2}{b} + \frac{r_g}{2} \right) \left(\frac{h_n}{4} - \frac{r_g}{2} \right) \right] \frac{d^2 \varepsilon_g}{dx^2}. \quad (24)$$

令

$$\frac{1}{k^2} = \frac{E_c h_j}{G_j} \left(h_c + \frac{E_g \pi r_g^2}{E_c b} \right) + \frac{E_c h_c^2}{2G_c} - \frac{E_g}{G_n} \left(\frac{\pi r_g^2}{b} + \frac{r_g}{2} \right) \left(\frac{h_n}{4} - \frac{r_g}{2} \right), \quad (25)$$

则(24)式化为

$$\frac{d^2 \varepsilon_g(x)}{dx^2} - k^2 \varepsilon_g(x) = -k^2 \varepsilon_m, \quad (26)$$

其通解为

$$\varepsilon_g(x) = C_1 \exp(kx) + C_2 \exp(-kx) + \varepsilon_m, \quad (27)$$

式中 C_1 和 C_2 是由边界条件决定的积分常数,边界条件为 $\varepsilon_g(L) = \varepsilon_g(-L) = 0$, 于是得到

$$C_1 = C_2 = -\frac{\varepsilon_m}{2 \cosh(kL)}.$$

因此(27)式化为

$$\varepsilon_g(x) = \varepsilon_m(x) \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]. \quad (28)$$

在整个黏贴长度上光纤的平均应变为

$$\varepsilon_g = \frac{2 \int_0^L \{1 - [\cosh(kx)/\cosh(kL)]\} dx}{2L} \varepsilon_m = \left[1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)} \right] \varepsilon_m. \quad (29)$$

整个光纤黏结长度上的平均应变传递系数为

$$\alpha = \frac{\varepsilon_m(x)}{\varepsilon_g(x)} = \frac{1}{1 - \sinh(kL)/[kL \cosh(kL)]} \quad (30)$$

由(30)式可得,光纤光栅的应变传递系数与黏结长度和各层的厚度和剪切模量有关,并且基片式光纤光栅应变传感器的应变传递公式与管式封装的光纤光栅应变传感器的应变传递公式在形式上相同,只是 k 的表达式不同而已。

3 实验验证

铜基片式光纤光栅传感器的封装方法如下:先在铜片上刻细槽,然后将光纤光栅放在铜片的细槽中,并给光纤一定的预应力,将胶注在铜片的细槽中,并保证胶不要溢出细槽,待胶完全固化后,在铜片的两端加上保护套。

为了验证理论推导的正确性,将封装好的铜基片式光纤光栅传感器黏贴在岩石试件 P1,P2 和 P3 的表面,试件中灰的质量和水的质量之比为 1.9:1,平均弹性模量为 10.24 GPa。岩石试件是直径为 50 mm,高为 100 mm 的圆柱形标准试件。将铜基片式光纤光栅传感器在试件表面沿轴向黏贴中心纵轴处,并在贴近传感器近平行的黏贴上应变片,然后在万能材料试验机上进行加载,用应变片感测试件的真实应变 ε_{sa} ,用 SM125 型解调仪来测量试件在各级加载下光纤光栅的波长漂移量 $\Delta\lambda$,利用 $\varepsilon_{fiber} = \frac{\Delta\lambda(\text{pm})}{1.2}$ 得到光纤所测的应变,则应变传递系数 $\alpha = \frac{\varepsilon_{sa}}{\varepsilon_{fiber}}$ 。P3 试件在各级压力下的基片式光纤传感器所测应变与应变片所测应变的对比如图 3 所示。

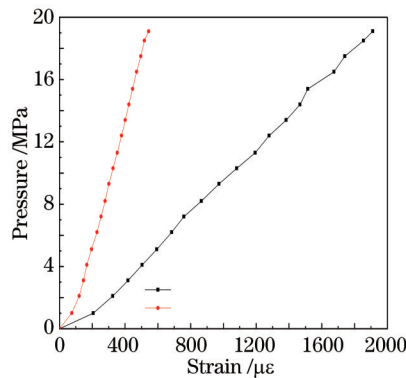


图3 P3试件基片式光纤传感器所测应变与应变片所测应变的对比

Fig.3 Contrast analyses of strain measurement of sample P3 between ESG and slice FBG sensor

实验中得到的应变传递系数为应变片所测应变除以光纤所测的应变之比,P1,P2,P3试件的应变传递系数分别为

$$\alpha_{P1} = \frac{\varepsilon_{sa,P1}}{\varepsilon_{fiber,P1}} = 4.6,$$

$$\alpha_{P2} = \frac{\varepsilon_{sa,P2}}{\varepsilon_{fiber,P2}} = 3.74,$$

$$\alpha_{P3} = \frac{\varepsilon_{sa,P3}}{\varepsilon_{fiber,P3}} = 4.29.$$

三个试件的平均应变传递系数为 $\alpha = \frac{\alpha_{P1} + \alpha_{P2} + \alpha_{P3}}{3} = 4.21$ 。

实验中所用光纤层、黏结层1、衬底层、黏结层2以及光纤光栅传感器的常数为 $r_g = 62.5 \mu\text{m}$, $L = 2 \text{ cm}$, $b = 1 \text{ cm}$, $h_n = h_j = h_c = 0.2 \text{ mm}$, $E_c = 10^5 \text{ MPa}$, $E_g = 7.2 \times 10^4 \text{ MPa}$, $G_j = G_n = 10 \text{ MPa}$, $G_c = 4 \times 10^4 \text{ MPa}$,将这些数值代入(25)式中,得到 $k = 50$,将 k 值代入到(30)式得到 $\alpha = 4.16$,可见理论计算所得应变传递系数与实验所得的应变传递系数的误差为 1.2%。

4 结 论

建立了多层基片式光纤光栅传感器应变传递的力学模型,推导了基片式光纤光栅传感器的应变传递规律,并通过实验测定了铜基片式传感器的应变传递系数。结果发现,理论所得的应变传递系数与实验所得应变传递系数的误差为1.2%,证实了理论分析的正确性。本文结果对基片式光纤光栅传感器的封装和应变的测定有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Li Hongnan, Ji Xueheng, Ren Liang, *et al.*. Application of FBG strain sensors to experiments of artificial concrete dam models[J]. *J Dalian University of Technology*, 2011, 51(1): 103-108.
李宏男, 嵇雪衡, 任 亮. 光纤光栅应变传感器在仿真混凝土拱坝模型试验中应用[J]. *大连理工大学学报*, 2011, 51(1): 103-108.
- 2 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study of fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土筒支梁裂缝的实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0114001.
- 3 Chai Jing, Liu Jinxuan, Qiu Biao, *et al.*. Detecting deformations in uncompacted strata by fiber Bragg grating sensors incorporated into GFRP[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(1): 92-96.
- 4 Yang Zhangchen, Xu Hanfeng, Dong Xinyong. Research development of high-temperature resistant fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050003.
杨樟成, 徐汉锋, 董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050003.
- 5 Wang Hongliang, Wu Huachun, Feng Dequan, *et al.*. Research on the FBG sensor used for high temperature-pressure wells[J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(1): 16-19.
王宏亮, 邬华春, 冯德全, 等. 高温高压油气井下光纤光栅传感器的应用研究[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(1): 16-19.
- 6 Farhad Ansari, Yuan Libo. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. *J Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 385-394.
- 7 Li Dongsheng, Li Hongnan. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg Grating sensors[J]. *Chinese J 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 Zhou Zhi, Li Jilong, Ou Jinping. Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded FBG strain sensors[J]. *J 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.
- 9 Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun, *et al.*. Basic theoretical model and its experimental investigation for standard embedded sensing fiber Bragg grating packaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1290-1293.
吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 传感光纤光栅标准化埋入式封装的理论及实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1290-1293.
- 10 Liang Dezhi, Sun Li, Huang Changtie, *et al.*. Comparison of strain transfer of embedded FBG sensors calculated by FEM and theory formula[J]. *J Shenyang Jianzhu University*, 2008, 24(1): 72-76.
梁德志, 孙 丽, 黄昌铁, 等. 埋入式FBG传感器应变传递的有限元计算与理论分析比较[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2008, 24(1): 72-76.
- 11 Wei Shiming, Chai Jing. Surface pasting methods and analyses of strain transfer in rock deformation tests using FBG [J]. *Chinese J Geotechnical Engineering*, 2011, 33(4): 587-592.
魏世明, 柴 敬. 岩石变形光栅检测的表面粘贴法及应变传递分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(4): 587-592.