

螺旋倾斜复合技术对光纤布拉格光栅传感器的减敏作用

覃荷瑛^{1,2}, 霍婷婷^{1,2*}, 朱万旭²

¹广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004;

²桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 降低光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器的应变灵敏度是解决传感器量程小、无法监测大应变问题的一种重要方法。为了监测构件在使用过程中的应力应变变化,提出了螺旋倾斜式光栅复合技术,建立了光栅实测应变与试样实际应变间的理论关系,在不同螺旋倾角下进行了光栅应变灵敏度的测量试验。试验结果表明,该方法能有效降低光栅应变灵敏度,增大光栅应变测量量程。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 大应变; 螺旋倾角; 灵敏度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.030601

Desensitization Effect of Helix-Slant Composite Technology on Fiber Bragg Grating Sensor

Qin Heying^{1,2}, Huo Tingting^{1,2}, Zhu Wanxu²

¹Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China;

²College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract Reducing the strain sensitivity of fiber Bragg grating (FBG) strain sensor is one important method to solve issues of small measurement range and undetectable large strain. In order to monitor stress and strain changes of components during use, one composite technology of spiral and slant gratings is proposed. The theoretical relationship between the measured strain by FBG and the actual strain of specimen is established. The measurement experiment of the grating strain sensitivity under different spiral-slant angles is done. The experimental results show that the proposed method can effectively reduce the strain sensitivity of FBG and increase the strain measurement range of FBG.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; large strain; spiral slant angle; sensitivity

OCIS codes 060.3735; 060.3738

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器是一种以光为载体、以光纤为媒质来感知和传输外界信号的新型传感器件^[1-2]。与传统电类传感器如电阻应变计相比,光纤光栅应变传感器具有体积小、损耗低、可抗电磁干扰、耐腐蚀、弯曲性能好,及可沿单根光纤串联复用等特点。因此,在各种结构体表面或内部放入光纤光栅形成光纤传感网络,利用光纤光栅应变传感器进行长期结构监测,可实现对大型结构的准分布传感测试^[3]。

在常规的应变传感测试中,被测体的应变范围一般不超过 2000 $\mu\epsilon$,而 FBG 应变传感器的极限应变约为 5000 $\mu\epsilon$,量程能满足实际需要。然而,对一些大型结构构件如桥梁中的拉索、吊杆等采用的预应力筋,其在使用期

收稿日期: 2016-09-28; 收到修改稿日期: 2016-11-01

基金项目: 桂林理工大学博士启动基金(002401003499)

作者简介: 覃荷瑛(1972—),女,博士,副教授,主要从事混凝土结构及其联结与锚固方面的研究。

E-mail: qinheyinglex@163.com

* 通信联系人。E-mail: 1058109130@qq.com

内的应变为 $6000 \sim 7000 \mu\epsilon$, 个别甚至达到 $10000 \mu\epsilon$ 。显然光纤光栅的极限应变已无法满足它们的全过程监测, 针对此问题, 本文提出了一种采用螺旋倾斜式耦合光纤光栅的方法来解决 FBG 应变传感器量程不足的问题。

2 光纤光栅应变传感理论

光纤光栅利用了掺锗光纤对紫外光敏的特性, 光纤经紫外光照射后, 光栅折射率会发生永久变化。它能反射波长满足以下条件的紫外光:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 Λ 为相位掩模光栅的周期, n_{eff} 是光纤纤芯对自由空间中心波长的折射率。

当光栅所处外界环境的物理量(应变、温度、浓度、压强、含水率等)发生变化时, 弹光效应会使光栅的折射率和周期发生改变, 从而引起波长的漂移^[4]。波长漂移量 $\Delta\lambda$ 与所受轴向应变的关系为

$$\Delta\lambda = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \cdot \lambda \cdot \epsilon = k \cdot \epsilon, \quad (2)$$

式中 p_{11} 、 p_{12} 为光弹效应系数, ν 为光纤材料泊松比, ϵ 为 FBG 应变, k 为 FBG 应变灵敏度^[5]。基于该原理可制成各种光纤光栅传感器。

3 螺旋倾斜式技术

以光圆钢筋作为 FBG 应变传感器的载体, 研究螺旋倾斜式光栅复合技术。将光纤光栅以一定倾角沿钢筋轴线方向呈螺旋线方式粘贴于钢筋表面, 如图 1(a) 所示, 其中 r 为钢筋的半径, h 为一个螺距, θ 为光纤光栅与钢筋轴向拉伸方向的夹角, F 为光圆钢筋受到的轴向拉伸力。将图 1(a) 中的螺旋缠绕图展开, 如图 1(b) 所示, 其中 S 为一个螺距内光纤光栅螺旋展开后的长度, 三角形中的两个直角边的长度分别为螺距 h 和钢筋圆截面周长 $2\pi r$ 。

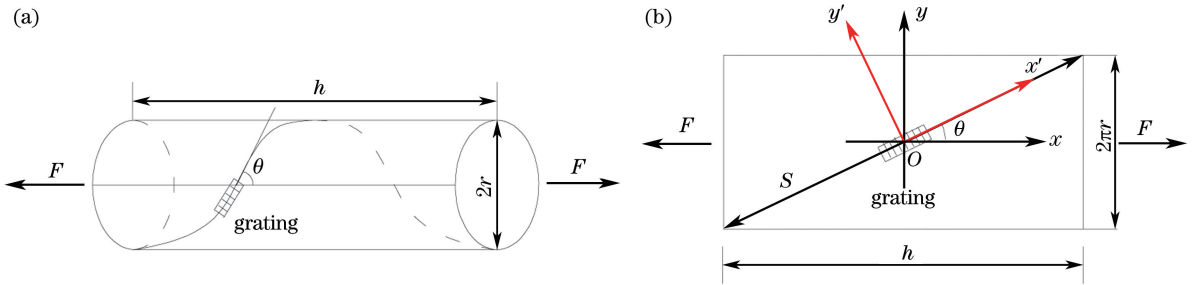


图 1 光纤光栅螺旋(a)缠绕和(b)展开图

Fig. 1 Schematic of (a) helically wound and (b) unfolded helically wound of fiber grating

建立图 1(b) 所示 xoy 和 $x'oy'$ 两个坐标系。两个坐标系间的转换关系^[6]为

$$\epsilon = (\cos^2\theta - \mu\sin^2\theta)\epsilon_s = k_r\epsilon_s, \quad (3)$$

式中 μ 为钢筋材料泊松比, k_r 为光栅应变灵敏度比值, ϵ_s 为 x 轴上的应变即钢筋轴向拉伸应变, ϵ 为 x' 轴上的应变即光栅应变。

由(3)式可知, 当 θ 和 μ 给定时, 光栅灵敏度比值 k_r 也就确定了, 可以得到光纤光栅的应变与钢筋应变之间的关系。当 θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化时 (0° 表示光纤光栅沿钢筋轴线方向, 90° 表示光纤光栅垂直钢筋轴线方向), $k_r = \cos^2\theta - \mu\sin^2\theta \leq 1$ 。由(3)式可知, 采用螺旋倾角复合技术, 光纤光栅所感知的应变 ϵ 小于被测体的实际应变 ϵ_s 。

将(3)式代入(2)式可得

$$\Delta\lambda = k \cdot k_r\epsilon_s = k' \cdot \epsilon_s, \quad (4)$$

式中 k' 为螺旋倾斜复合光栅的应变灵敏度。

对比(4)式和(2)式可知, 采用螺旋倾斜复合技术后, 光栅的应变灵敏度由原来的 k 降为 k' , 且 $k_r = k'/k = \cos^2\theta - \mu\sin^2\theta$ 。

综上, 采用螺旋倾斜式光栅复合技术, 可减小光纤光栅承受的拉应变, 从而降低其应变灵敏度, 进而达到

增大光栅应变测量量程的目的。

4 不同螺旋倾斜角度试验

4.1 试件设计及加载

光纤的强度分布呈韦布尔分布,其拉伸强度较为均匀^[7]。在光纤上制作光栅的过程中,需去除光纤表面涂覆层进行紫外写入,此过程会对光纤的强度产生一定程度的损伤^[8],因此一般刻有光栅的光纤强度会低于制作光栅之前的光纤强度。

为研究光纤光栅对应变的实际测量能力及螺旋倾斜式光栅复合技术对其应变敏感系数的影响,试验采用直径为 10 mm 的 HPB300 光圆钢筋作为光纤光栅载体(应变被测物体),将光纤光栅分别以不同倾角螺旋缠绕于钢筋外周,用黑胶带固定光纤两端;为了确保光栅与钢筋充分粘贴,在光栅及其左右各 20 mm 范围内的光纤上均匀涂抹环氧树脂。耦合好光纤光栅的钢筋试件按不同倾角(0° 、 30° 及 45°)分为三组,如图 2 所示。

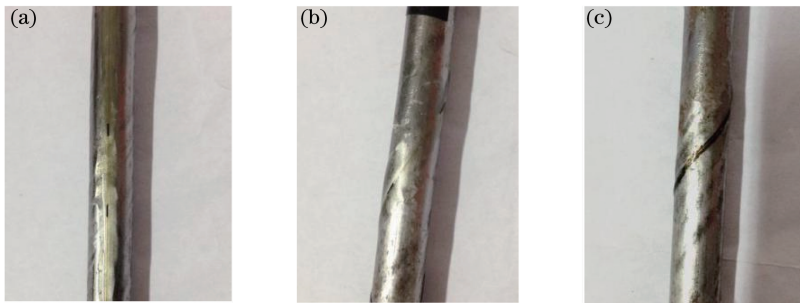


图 2 不同倾角下的螺旋粘贴光纤光栅。(a) 0° ;(b) 30° ;(c) 45°

Fig. 2 Fiber gratings with spirally stick under different spiral-slant angles. (a) 0° ; (b) 30° ; (c) 45°

拉伸钢筋的试验机为微机控制电子万能试验机;引伸计标距为 20 mm;光纤光栅解调仪为便携式解调仪,波长解调分辨率指标为 1 pm,波长解调精度为 ± 2.5 pm。

加载过程:1) 在对钢筋加载 2 kN 荷载时,安装引伸计,此时将引伸计的读数设为零;2) 试验机开始依次加载,幅度为 2 kN,同时记下对应的引伸计读数和波长变化值;3) 荷载加至 22 kN 后开始卸载,每次卸载 2 kN,同时记下对应的引伸计读数和波长变化值;4) 荷载卸载至 2 kN 后,开始以幅度 2 kN 依次加载直至光栅断裂,并记下最终波长读数。

4.2 试验结果及分析

三组 FBG 耦合于钢筋后,自由状态时透射谱中心波长分别为 1546.104,1546.072,1537.112 nm,3 dB 带宽为 0.12 nm,反射率为 99.64%。利用光谱仪监测试件拉伸过程中 FBG 的波长变化,试件拉伸过程中的试验数据见表 1。

表 1 钢筋应变值及 FBG 波长

Table 1 Strain values of reinforcing bar and wavelengths of FBG

Load /kN	Strain of steel	Wavelength /nm		
		0°	30°	45°
2	143.3	1546.238	1546.233	1537.206
4	286.6	1546.41	1546.383	1537.264
6	429.9	1546.596	1546.512	1537.34
8	573.4	1546.774	1546.636	1537.397
10	716.7	1546.949	1546.754	1537.462
12	860	1547.118	1546.873	1537.522
14	1003.4	1547.303	1546.988	1537.584
16	1146.7	1547.477	1547.108	1537.642
18	1290	1547.663	1547.222	1537.689
20	1433	1547.851	1547.343	1537.753
22	1576.3	1548.047	1547.464	1537.82

以引伸计测量的钢筋伸长应变为横坐标,以光栅反射波长值为纵坐标。对不同螺旋倾角试件的试验数据进行最小二乘法线性拟合,如图3所示,其中 R^2 为线性相关系数。

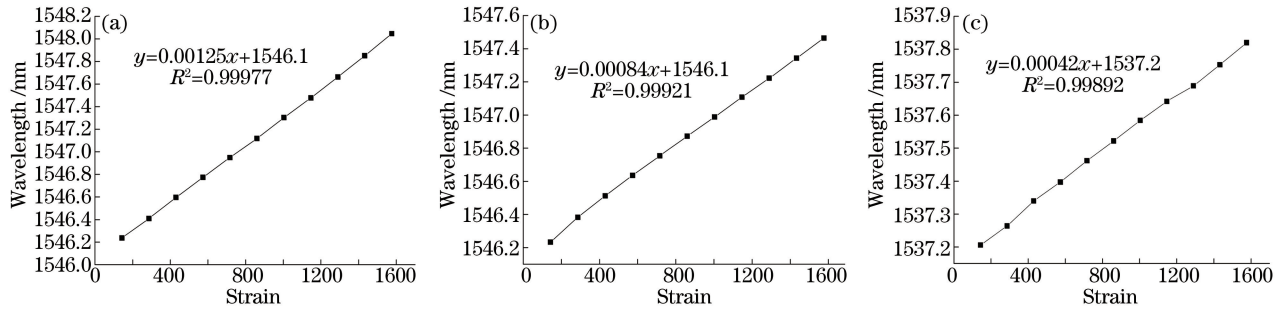


图3 不同螺旋倾角下的光纤光栅拉伸试验结果。(a) 0°;(b) 30°;(c) 45°

Fig. 3 Tensile test results of FBG under different spiral slant angles. (a) 0°; (b) 30°; (c) 45°

光纤光栅的应变灵敏度实测值与理论值对比见表2。

表2 FBG应变灵敏度实测值与理论值

Table 2 Relationship between measured sensitivity and theoretical sensitivity of FBG

Specimen groups number	Slant angle / (°)	Strain sensitivity / (pm/μ ϵ)		Ratio of measured value and theoretical value
		Measured value	Theoretical value	
I	0	1.25	1.212	1.031
II	30	0.84	0.818	1.027
III	45	0.42	0.420	1.000

由表2可知,光栅的应变灵敏度会随螺旋倾角的变化而变化,倾角越大,光栅应变灵敏度就越小,且应变灵敏度实测值与理论值较吻合。根据(2)式可知,当光栅波长变化范围一定时,光栅灵敏度的减小会使应变测量的量程增大。

另外,本试验分级加载至22 kN后再分级卸载,在此过程中,加载和卸载至同级荷载时对应的波长值基本一致,线性重复率达99%,可见光纤光栅在监测结构应变中可重复使用。三次试验断裂时波长分别为1551.337 nm(0°)、1551.487 nm(30°)、1541.526 nm(45°),波长漂移量 $\Delta\lambda$ 约为5 nm。螺旋倾斜处理前,光纤光栅传感器测量应变的总量程只能达到4300 $\mu\epsilon$;螺旋倾斜处理后,30°螺旋倾角的钢筋应变上限为6500 $\mu\epsilon$,45°螺旋倾角的钢筋应变上限为10500 $\mu\epsilon$,螺旋倾斜复合技术有效增大了光纤光栅监测应变量程。

5 结 论

光纤光栅在测量过程中具有良好的线性度和重复性,通过在钢筋上粘贴FBG,可以对钢筋的应变进行有效监测,实现对预应力筋应变状态的正确评估。螺旋倾斜粘贴光栅复合技术降低了光纤光栅应变灵敏度,光纤光栅只需受较小拉应力即可实现较大拉伸应变的测量,该技术确保了光栅能被长期、安全地使用。该光栅减敏技术为长期安全测量其他构件(如高强钢筋、钢绞线等)的大应变提供了新的手段。

参 考 文 献

- [1] Sun Shenghe. Development trend of modern sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(1): 1-10.
孙圣和. 现代传感器发展方向[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(1): 1-10.
- [2] Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2002, 13(4): 420-430.
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.
- [3] Jin Xiumei, Du Yanliang. Research on the FBG sensing technology for long-term measuring of the large strain of prestressed reinforcement[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2010, 32(4): 547-550.
金秀梅, 杜彦良. 预应力筋长期大应变测量的光栅传感技术研究[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 547-550.

- [4] Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, Li Xin, *et al.* Application of fiber Bragg grating sensor on measurement of tensile stress in a seven-wire prestressed steel strand[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2005, 16(10): 1235-1238.
刘铁根, 江俊峰, 李欣, 等. 光纤光栅在预应力钢绞线应力测量中的应用[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(10): 1235-1238.
- [5] Dai Qiaoli, Zhou Xuejun, Wu Jun. Analysis of fiber Bragg grating strain sensitive[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(8): 181-183.
代巧利, 周学军, 吴俊. 光纤 Bragg 光栅应变灵敏度的分析[J]. *舰船电子工程*, 2009, 29(8): 181-183.
- [6] Xie Yiquan, Lin Zhongxiang, Ding Haojiang. *Elastic mechanics*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1988.
谢贻权, 林钟祥, 丁皓江. *弹性力学*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1988.
- [7] Park U C, Schroeder C. Optical and mechanical properties of lightguide fibers coated at speed of 10 m/s[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 1056-1061.
- [8] Wang Qingya, Zhang Jian, Zhang Yushu. Progress of UV-writing fiber Bragg grating[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 1996(1): 69-72.
王庆亚, 张健, 张玉书. 紫外写入光纤光栅的进展[J]. *吉林大学学报(理学报)*, 1996(1): 69-72.