

# 预张拉光纤布拉格光栅应变传递规律实验研究

由泽伟 王 源 孙阳阳 黄肖迪 章征林

中国人民解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007

**摘要** 利用裸光纤布拉格光栅测量结构物表面应变,基于光纤层-胶结层-基体层的应变传递模型,从理论上分析了预张拉对应变传递率的影响,并通过实验进行了验证。利用预张拉光栅与未预张拉光栅同时测量了等强度梁正反两面的应变。实验中为排除黏贴长度及厚度的影响,采用LOCTITE点胶机控制滴胶量,得到应变随荷载变化的曲线,并与等强度梁理论应变值进行对比,得到应变传递率与荷载的关系曲线。结果表明,在测拉应变时,预张拉光栅的应变传递率高于未预张拉光栅的应变传递率,且两者都在96%以上;在测压应变时,预张拉光栅的应变传递率低于未预张拉光栅的应变传递率,且两者均在95%以上,与理论分析相符。这说明对测拉应变的实验,预张拉能提高应变传递率;而对测压应变的实验,预张拉会降低应变传递率。

**关键词** 光栅; 光纤布拉格光栅; 预张拉; 应变传递模型; 应变传递率

**中图分类号** TH823 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.110501

## Experimental Research on Strain Transfer Rules of Prestressing Fiber Bragg Grating

You Zewei Wang Yuan Sun Yangyang Huang Xiaodi Zhang Zhenglin

State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China

**Abstract** In view of measuring strain on the structure surface by the bare fiber Bragg grating(FBG), and based on the strain transfer model of fiber layer-cement layer-matrix layer, the prestressing effect on the strain transfer rate is studied theoretically and experimentally. The strain on both positive and negative sides of the equal strength beam is measured by means of the prestressing FBG as well as the normal FBG. In order to eliminate the effect of the length and thickness of the cement, the LOCTITE dispenser is used to control the amount of cement. The curve of strain changing with load is obtained. And through comparing with the theoretical strain value of equal strength beam, the curve of strain transfer rate changing with load is received. The results show that the rate of the prestressing FBG is higher than that of the normal FBG for tensile strain measurement, both of which are above 96%, while the rate of the prestressing FBG is lower than that of the normal FBG for compressive strain measurement, both of which are above 95%. It corresponds with the theoretical analysis. It proves that the strain transfer rate is improved thanks to the prestressing in the experiment of tensile strain. On the contrary, the rate is reduced because of the prestressing in the experiment of compressive strain.

**Key words** gratings; fiber Bragg grating; prestressing; strain transfer model; strain transfer rate

**OCIS codes** 050.2770; 060.3735; 130.6010

## 1 引言

自美国的 Morey 等<sup>[1]</sup>首次进行光纤光栅的应变和温度传感研究以来,光纤光栅的应用和发展十分迅

收稿日期: 2016-07-13; 收到修改稿日期: 2016-07-14; 网络出版日期: 2016-09-30

基金项目: 国家 973 计划(2013CB036005)、江苏省基础研究计划(SBK2016021801)

作者简介: 由泽伟(1993—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感监测方面的研究。E-mail: 1960680704@qq.com

导师简介: 王 源(1970—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事国防工程勘察与安全监测方面的研究。

E-mail: 13260731276@163.com(通信联系人)

速。与传统传感器相比,光纤光栅传感器具有许多无可比拟的优点<sup>[2]</sup>:灵敏度高,可实现分布式检测,可用于存在强电磁干扰、强腐蚀性的恶劣环境,已被广泛应用于土木工程及航空航天等领域的健康监测<sup>[3-5]</sup>。其中,应用光纤光栅传感器直接测量应变是其最重要的应用之一。但在实际应用中发现,由于被测物的应变通过胶结层传递给光栅,基于剪滞效应,所测的应变会小于基体的真实应变<sup>[6]</sup>,传递效率可用应变传递率描述。对应变传递规律的研究及如何提高应变传递率一直是光纤光栅传感器的研究热点。

为准确地分析应变传递规律,国内外学者建立了基于不同假设的应变传递模型。Ansari等<sup>[7]</sup>对埋入式光纤布拉格光栅(FBG)传感器进行分析,通过假定基体的真实应变与光栅黏贴长度中心处的应变相等,得到光栅沿长度方向的应变传递率的函数。Li等<sup>[8]</sup>假设基体的真实应变率与光栅黏贴长度中心处的应变率相等,得到更一般的应变传递公式。田石柱等<sup>[9]</sup>研究表面式FBG传感器的应变传递关系,建立了光纤层-胶结层-基体层的三层应变传递模型。吴永红等<sup>[10]</sup>基于弹塑性力学的基本理论,更为严密地建立了FBG传感器应变传递率的非线性方程。张桂花等<sup>[11]</sup>在以往研究的基础上,具体分析了基片式光纤光栅传感器不同材料的应变传递率公式。针对如何提高应变传递率的问题,李红等<sup>[12]</sup>对去涂覆层FBG(裸FBG)传感器进行了实验分析,提出了表贴式FBG传感器,简化了应变传递环节,能有效提高应变传递率。吴俊等<sup>[13]</sup>针对胶结层弹性模量对FBG传感器的影响进行了实验分析。目前,在进行光栅封装时,一般会对光栅进行预张拉,这类光栅主要应用于大标距内的平均应变测量<sup>[14]</sup>,而在实验室进行测量实验时,也会对光栅进行一定的预张拉。而预张拉对应变传递率的具体影响国内外尚无定量的分析,缺乏理论依据。

本文在光纤层-胶结层-基体层模型的基础上,分析了预张拉对FBG传感器应变传递率的影响,并进行了实验验证。将预张拉与未预张拉FBG传感器同时黏贴在等强度梁的正反面,通过使用点胶机排除胶结层其他因素对传递率的影响,得到不同情况下应变传递率与荷载的关系曲线,并对其应变传递效果进行比较分析。该结果为光纤光栅传感器封装时是否进行预张拉提供了理论支持。

## 2 基本原理

### 2.1 应变传递模型

利用裸FBG测量结构物表面应变,可将传感器与结构物简化为光纤层、胶结层和基体层的三层模型<sup>[15]</sup>,如图1所示。基体的轴向应变通过胶结层的剪切变形传递给光栅,胶黏剂的流动性良好,凝结后截面呈近似的三角形,边界为近似的抛物线形,如图2所示。

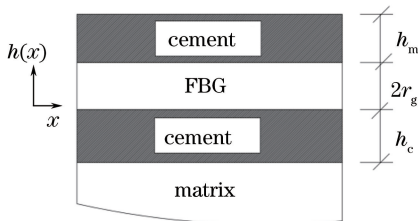


图1 裸FBG表面黏贴模型

Fig. 1 Surface bonding model of the bare FBG

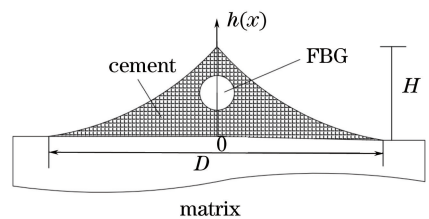


图2 表面黏贴模型横截面图

Fig. 2 Cross section view of the surface bonding model

该模型的建立基于以下三个假设:

- 1) 光纤层、胶结层、基体层均为线弹性材料;
- 2) 由于没有涂覆层,可认为光纤与胶体、胶体与相似材料各个界面之间接触完好,所受轴向应力不超过使界面之间产生相对滑移的最大应力;
- 3) FBG黏结中心处的应变传递率与基体的应变传递率相同。

由于模型左右对称,先取左半部分。对第一层光纤光栅,根据受力平衡的原理分析,可得 $x$ 方向的平衡方程为

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

式中 $r_g$ 为光纤光栅传感器的半径, $\tau_{gc}$ 为光纤光栅与胶结层之间的剪应力, $\sigma_g$ 为光纤光栅单元所受应力, $d\sigma_g$

为光纤光栅单元的微应力。对(1)式化简可得

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

同样,对下部胶结层微元段,取  $2r_g \leq h \leq 2r_g + h_c$ , 根据实际实验胶的性质,可用抛物线的右半段拟合胶的表面。设顶点为(0,0),且抛物线过点( $D/2, H$ ),则左边界的方程为

$$h(x) = \frac{4H}{D^2} x^2, \quad (3)$$

式中  $H$  为胶结层和光纤光栅总厚度,  $D$  为 FBG 黏贴的宽度。

对胶结层微单元进行应力分析,可得  $x$  方向的平衡方程为

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

式中  $\tau_c$  为胶结层与基体之间的剪应力。将(3)式代入(4)式并化简,可得

$$\tau_c(x, h) = \frac{\pi r_g^2 \sqrt{H} d\sigma_g}{D \sqrt{h} dx} + \frac{h d\sigma_c}{3 dx}, \quad (5)$$

式中  $d\sigma_c$  为胶结层的微应力。

由于光纤光栅与胶结层一起变形,二者应变变化率相近,且光纤的弹性模量  $E_g$  与胶结层的弹性模量  $E_c$  相差较大,故可认为  $\frac{d\epsilon_g}{dx} = \frac{d\epsilon_c}{dx}, \frac{E_c}{E_g} = 0^{[16]}$  ( $d\epsilon_g$  为光纤光栅单元微应变,  $d\epsilon_c$  为胶结层单元微应变),则有

$$\tau_c(x, h) = \frac{\pi r_g^2 \sqrt{H} d\epsilon_g}{D \sqrt{h} dx}. \quad (6)$$

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  $\delta_m$  为上部胶体的变形量,  $\delta_g$  为光纤的变形量,  $\gamma_c$  为  $h$  位置处的应变,  $G_c$  为胶体剪切模量。对(7)式在 FBG 黏贴宽度  $2L$  上积分,由对称性可得

$$\epsilon_m - \epsilon_g(x) = 1 / \left( k^2 \frac{d^2 \epsilon}{dx^2} \right), \quad (8)$$

式中  $\epsilon_m$  为上部胶体的应变,  $\epsilon_g$  为光纤光栅单元产生的应变,  $k$  为待定常数。解方程可得

$$k^2 = \frac{2G_c D}{E_g \pi r_g^2 \sqrt{H h_c}}. \quad (9)$$

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  $\epsilon_g(-L) = \epsilon_g(L) = 0$ , 代入(8)式可得

$$\alpha(x) = 1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)}. \quad (10)$$

由(10)式可得表面式光纤光栅应变传感器测得的平均应变传递率为

$$\alpha = 1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)}. \quad (11)$$

## 2.2 预张拉影响分析

预张拉光栅在胶黏剂凝固释放后,通过自身的回缩力对胶结层产生一个与光栅轴线方向平行的指向光栅中心的反作用力,即使胶贴层产生向中间收缩的趋势,如图 3 所示。在基体产生拉应变时,应变方向与胶体中的预应力方向相反,因此,要使 FBG 变形,需要先抵消胶结层中的预应力,如图 3(a)所示,即需更大的应力使胶结层胶结变形,可等效地视为提高了胶结层的剪切模量。同理,在测压应变时,应变方向与胶体中的预应力方向相同,如图 3(b)所示,可等效地视为提高了胶结层的剪切模量。

由(9)式及(11)式分析胶体剪切模量对应变传递率的影响,其中裸 FBG 的各项参数如下:FBG 的弹性模量  $E_g = 7.2 \times 10^{10}$  Pa,胶结层的弹性模量  $E_c = 3.5 \times 10^6$  Pa,胶结层的泊松比  $\mu = 0.35$ ,光纤光栅传感器的半

径  $r_g = 62.5 \mu\text{m}$ , FBG 黏贴宽度  $2L = 2 \sim 20 \text{ cm}$ 。

常用的 LOCTITE401 胶黏剂剪切模量约为  $18 \sim 26 \text{ MPa}$ , 计算所得的平均应变传递率随剪切模量的变化如图 4 所示。由图 4 可知, 随着剪切模量的增加, 平均应变传递率提高。因此, 在测拉应变时, 预张拉提高了光栅的应变传递率; 而在测压应变时, 预张拉会降低光栅的应变传递率。

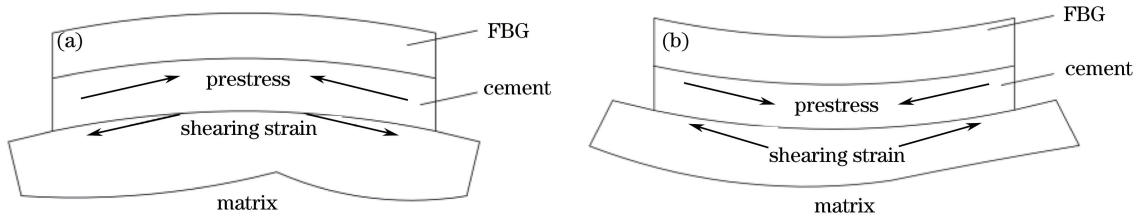


图 3 预张拉光栅受力示意图。(a)测量拉应变;(b)测量压应变

Fig. 3 Force schematic diagram of the prestressing FBG. (a) Measurement of the tensile strain; (b) measurement of the compressive strain

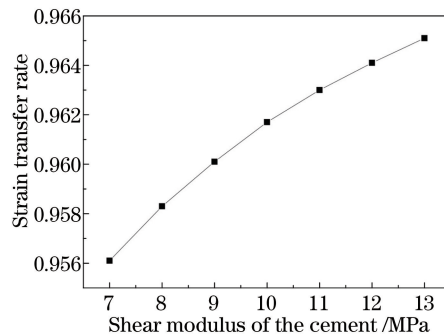


图 4 应变传递率与剪切模量的关系

Fig. 4 Strain transfer rate changing with shear modulus of the cement

### 3 实验过程

实验系统由等强度梁、4 个裸 FBG 以及光纤光栅解调仪组成, 所用解调仪为美国 MOI 公司生产的 SM125 静态解调仪。该解调仪可识别中心波长为  $1510 \sim 1590 \text{ nm}$  的光纤光栅传感器, 波长分辨率可达  $1 \text{ pm}$ , 能够实现 4 通道同步采样, 采样频率为  $2 \text{ Hz}$ , 外接扩展模块后最多可进行 16 通道同时测量。所用光栅栅区长度为  $10 \text{ mm}$ , 为保证应变传递率, 同时排除胶结层对实验的干扰, 采用 LOCTITE 点胶机控制滴胶速度及用胶量。

在等强度梁正反两面的中轴线处同时固定预张拉与未预张拉的 FBG, 正反两面所黏贴光栅的对应位置相同, 黏贴位置如图 5 所示。1, 2, 3, 4 所用光栅原始波长分别为  $1560.208, 1574.871, 1575.298, 1574.341 \text{ nm}$ 。通过操作台固定 FBG2、FBG4 一端, 拉伸另一端, 分别进行了  $924 \text{ pm}$  和  $1056 \text{ pm}$  的预张拉, 张拉完成后操作台可以维持恒定张拉水平, 用胶黏剂对 FBG 进行固定, 拉伸后的 FBG2、FBG4 波长分别为

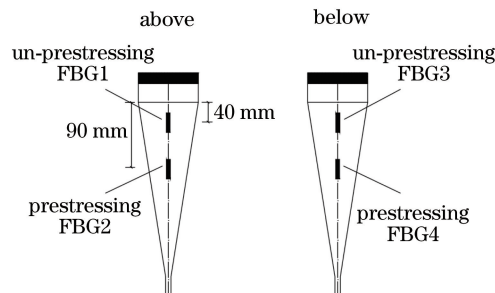


图 5 FBG 传感器黏贴位置

Fig. 5 Bonding position of the FBG sensor

1575.675 nm、1575.477 nm。

实验中采用 LOCTITE401 胶黏剂进行黏贴,黏结长度为 40 mm。待胶黏剂固化 20 min 后再进行测量,以消除短时固化带来的应力。在等强度梁自由端从 0.5 kg 到 5.5 kg 逐级加载。FBG 传感器对温度敏感,但该实验中温度对 4 个传感器的影响相同,互为补偿,因此可不考虑温度的影响。

## 4 实验结果与数据分析

对 FBG3 与 FBG4 测得的压应变取绝对值,由 4 个裸 FBG 测得的应变曲线如图 6 所示。由应变曲线可知,所使用的两个预张拉 FBG 传感器与加载砝码质量呈现良好的线性关系,且与未预张拉的 FBG 传感器测得曲线基本吻合,说明预张拉光栅可以较为精确地测量传感标距内的平均应变。

在该实验中,应变最后达到  $1000 \mu\epsilon$ ,测量误差在 0.1% 以内,满足对应变传递率分析的实验精度要求 (SM125 测量误差要求在  $1 \mu\epsilon$  以内)。

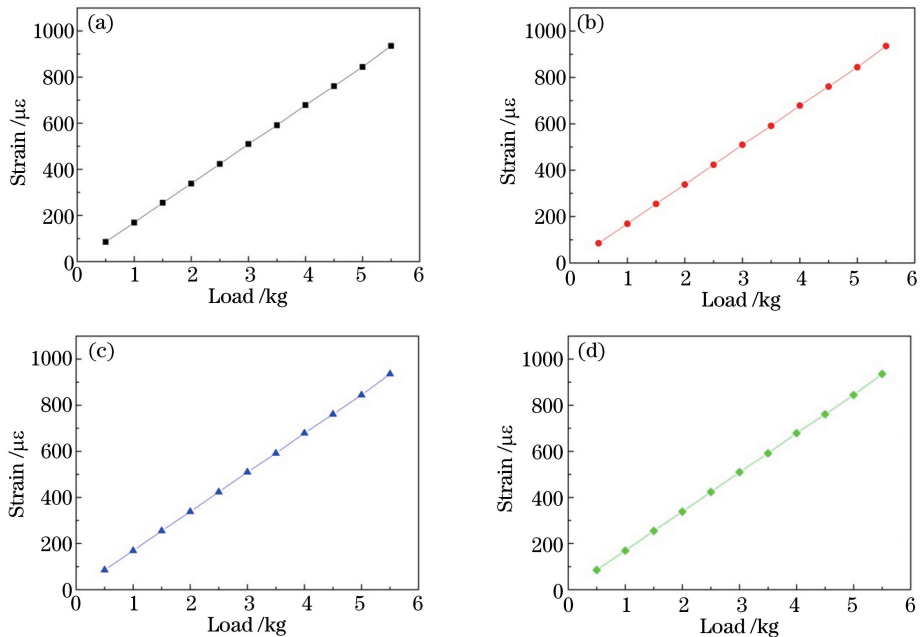


图 6 应变随荷载的变化曲线。(a) FBG1;(b) FBG2;(c) FBG3;(d) FBG4

Fig. 6 Curves of strain changing with load. (a) FBG1; (b) FBG2; (c) FBG3; (d) FBG4

与计算得到的等强度梁理论应变值进行对比,得到应变传递率随荷载的变化曲线如图 7 所示。

由图 7(a)可知,在测拉应变时,两曲线的应变传递率始终保持在 96% 以上,预张拉光栅的平均应变传递率为 97.6%,未预张拉光栅的平均应变传递率为 96.3%。表明预张拉与未预张拉 FBG 都可以较为准确地测

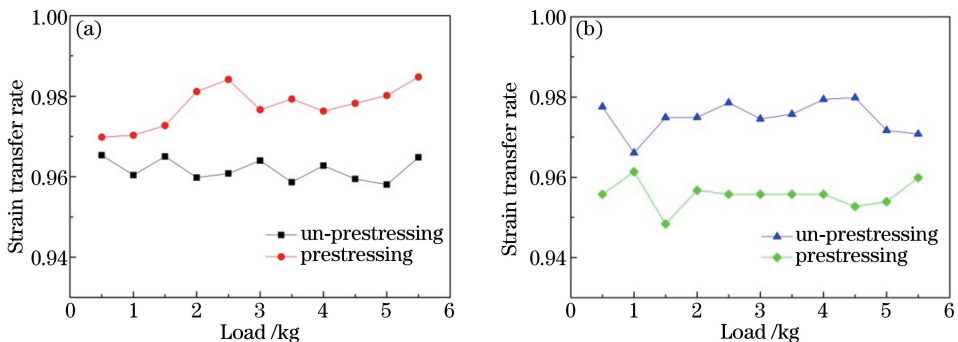


图 7 测拉应变时应变传递率随荷载变化曲线。(a) FBG1 和 FBG2;(b) FBG3 和 FBG4

Fig. 7 Curves of strain transfer rate changing with load when the matrix is in compression.

(a) FBG1 and FBG2; (b) FBG3 and FBG4

得结构物表面的拉应变,且预张拉光栅的应变传递率高于未预张拉光栅的应变传递率,这是由于应变预张拉光栅中的预应力提高了胶结层的剪切模量,进而提高了应变传递率。

由图 7(b)可知,在测压应变时,两曲线的应变传递率始终保持在 95% 以上,预张拉光栅的平均应变传递率为 95.7%,未预张拉光栅的平均应变传递率为 97.2%。表明预张拉与未预张拉 FBG 都可以测得结构物表面的压应变,但此时预张拉光栅的应变传递率低于未预张拉光栅的应变传递率,这是由于预张拉光栅中的预应力降低了胶结层的剪切模量,进而降低了应变传递率。

## 5 结 论

通过在等强度梁正反两面的中轴线处同时黏贴预张拉与未预张拉光栅,研究了预张拉对光栅应变传递率的影响,测得对等强度梁逐级加载后的应变-荷载曲线及应变传递率随荷载变化的曲线。通过对预张拉与未预张拉光栅测量结果进行对比,得到以下结论:当结构物产生拉应变时,预张拉与未预张拉光栅都可达到 96% 以上的应变传递率,同时预张拉光栅的应变传递率高于未预张拉光栅的应变传递率,即对测量拉应变而言,预张拉能提高应变传递率,因此在测量拉应变的实验中,为得到更为精确的结果,可对光栅进行预张拉;当结构物产生压应变时,预张拉与未预张拉光栅都可达到 95% 以上的应变传递率,但此时预张拉光栅的应变传递率低于未预张拉光栅的应变传递率,即对测压应变而言,预张拉会降低应变传递率,因此在测量压应变的实验中,尽量不对光栅进行预张拉。

## 参 考 文 献

- Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.
- 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.
- Leung C K Y, Wan K T, Inaudi D, *et al.* Review: optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. Materials and Structures, 2013, 48(4): 871-906.
- López-Higuera J M, Cobo L R, Incera A Q, *et al.* Fiber optic sensors in structural health monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(4): 587-608.
- Xiong Zhili, Liang Dakai, Li Tongwei, *et al.* Impact localization by using optical fiber Bragg grating sensors based on correlation dimension[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(8): 0804001.  
熊稚莉, 梁大开, 李彤韡, 等. 基于关联维数的冲击载荷光纤布拉格光栅定位[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0804001.
- Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Research on stress transferring rules for clad fiber Bragg grating by using shear lag theory[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(5): 636-640.  
赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 利用剪滞法对包覆光纤布拉格光栅应力传递规律的研究[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 636-640.
- 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.
- Li D S, Li H N, Ren L, *et al.* Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors[J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 402-409.
- Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese J 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.
- Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun, *et al.* Nonlinear opto-mechanical transformation equation for FBG strain sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1946-1951.  
吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的非线性方程[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1946-1951.
- Zhang Guihua, Chai Jing, Li Xujuan, *et al.* Research on strain transfer of surface fiber grating sensor[J]. Laser &

Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010601.

张桂花, 柴敬, 李旭娟, 等. 基片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010601.

- 12 Li Hong, Zhu Lianqing, Liu Feng, *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.

- 13 Wu Jun, Chen Weimin, Zhang Peng, *et al.* Strain sensing method based on directly metallized bonding FBG to substrate [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(12): 2709-2713.

吴俊, 陈伟民, 章鹏, 等. 金属直接连接的布拉格光纤光栅应变测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2709-2713.

- 14 Zhao Xuefeng, Song Gangbing, Michael Fernandez, *et al.* Research on one kind of long sensing gauge fiber Bragg grating sensor with pretension[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(5): 576-579.

赵雪峰, 宋钢兵, Michael Fernandez, 等. 一种预张拉大标距光纤光栅应变传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(5): 576-579.

- 15 Sun Yangyang, Wang Yuan, Zhang Zhenglin, *et al.* Analysis and experimental research on the principle of surface bonded FBG strain transfer[J]. Functional Materials, 2016, 47(7): 07046-07055.

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): 07046-07055.

- 16 Zhang Wenxiao, He Xiufeng. Analysis of strain transfer factors of pasted optical fiber Bragg grating sensor [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 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.