

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

权志桥¹, 方新秋^{1*}, 薛广哲², 胡秀坤³, 谷超⁴

¹中国矿业大学矿业工程学院深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;

²中国矿业大学管理学院, 江苏 徐州 221116;

³中广核工程有限公司施工管理中心, 广东 深圳 518124;

⁴山西大同大学煤炭工程学院, 山西 大同 037003

摘要 建立表面粘贴布拉格光纤光栅(FBG)传感器、黏结层、被测物体三者间应变耦合传递的分离式模型, 推导出 FBG 测量应变与被测应变真值之间的修正关系。通过有限元模拟和实验, 验证该理论模型的精确性, 并在不同粘贴条件下讨论理论解的精确程度和适用性。结果表明: 理论值与实验值稳合良好, 误差普遍低于 1.6%; 应变感知率及精度与粘贴长度和涂层弹性模量呈正相关, 与被测物体力学强度呈负相关; 应变感知率对保护涂层、黏结层的几何特性不敏感, 但其精度与两者呈负相关。研究成果对表面粘贴 FBG 应变测量、误差修正和传感器设计具有重要的参考意义。

关键词 测量; 光纤传感器; 表面粘贴布拉格光纤光栅; 应变传递耦合; 应变感知率; 测量精度

中图分类号 TN253; TH89

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0104004

Strain Transfer Coupling Mechanism of Surface-Bonded Fiber Bragg Grating Sensor

Quan Zhiqiao¹, Fang Xinqiu^{1*}, Xue Guangzhe², Hu Xiukun³, Gu Chao⁴

¹State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, School of Mines,
China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

²School of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

³Construction Management Center, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518124, China;

⁴School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037003, China

Abstract A segregated model for strain transfer coupling in a surface-bonded fiber Bragg grating (FBG), adhesive, and measured object was established. In addition, the correction relationship between the FBG-measured and true strains on the surface was derived. The theoretical values were verified by finite element simulation and experimental results. Its accuracy and viability under various installation conditions were also discussed. The theoretical results match the experimental results well, with errors below 1.6%. The strain sensing coefficient and its accuracy are positively correlated with the adhesive length and elastic modulus of the protective recoating, while they are negatively correlated with the mechanical strength of the measured object. In addition, the accuracy of theoretical strain sensing coefficient is negatively correlated with geometrical features of protective recoating and adhesive, with an insensitive strain sensing coefficient. This study provides reference for strain measurements using a surface-bonded FBG, error correction, and design of relevant sensors.

Key words measurement; fiber optics sensors; surface-bonded fiber Bragg grating; strain transfer coupling; strain sensing coefficient; accuracy measurement

OCIS codes 120.4570; 060.2370; 280.4788

收稿日期: 2019-07-04; **修回日期:** 2019-08-10; **录用日期:** 2019-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(51874276)、中国矿业大学中央高校基本科研业务费专项资金(2017CXNL01)、中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题资助(SKLCRSM16X01)

* **E-mail:** xinqiufang@163.com

1 引 言

布拉格光纤光栅(FBG)由于具有对电磁干扰免疫、轻质径小、灵敏度高、适应广泛等优点,已在航空航天、市政工程、智能结构与材料等诸多领域获得了广泛应用^[1-3],加之其无源特性,更是对煤矿井下潮湿、高危险气体的测量具有先天优势^[4-5]。基于FBG的传感器,现已实现了煤矿井下的锚杆锚索载荷测量^[6]、动态压力感知^[7]、岩层沉降^[8-9]、煤矿顶板安全监测^[4,10-11]、实验室测试^[12]以及相似模拟试验^[13]等,具有良好的适用性。究其测量原理,以上功能均是基于FBG对应变(和温度)敏感来实现的。植入和表面粘贴^[14-15]是FBG最常用的两种直接应用方式。对于表面粘贴式FBG传感器,黏结层和FBG保护层共同构成应变传递的中间环节,各层材料的特性差异导致FBG纤芯和被测表面在应变发生时存在损耗不一致的情形^[16],同时FBG和黏结层的存在也改变了被测表面的区域应变分布状态^[17],以上两因素共同形成了FBG、黏结层、被测物体三者之间的耦合作用,致使FBG应变值(测量应变)被低估。因此,研究表面粘贴FBG、黏结层、被测表面三者之间的应变传递耦合作用,建立具有普适意义的FBG应变与被测应变真值间的协调关系,对提高应变测量精度和修正误差具有重要意义。

在表面粘贴和植入两种方式下的FBG应变传递耦合结构是完全不同的。植入式FBG的截面应变传递结构关于圆心轴对称(侧视),FBG、封装材料和被测面作为全封闭形态全部参与了应变耦合传递,采用剪滞理论并由内而外地积分,即可获得精确的光纤纤芯应变分布解析解。而表面粘贴FBG传感器的黏结层却是开放的,除粘贴于被测物体承受剪滞作用的下表面和内嵌FBG的形成面之外,其他表面均为自由面。该结构使一部分黏结层参与了应变传递,且不同的简化模型会使理论解存在差异。

不区分FBG应用方式,Ansari等^[18]基于受力平衡原理,假设光纤粘贴段中心应变与被测表面的应变相等,推导出干涉型应变测量的光纤纤芯轴向应变解析解。李东升等^[19]修正了Ansari等的理论假定,得出了更广为接受的光纤轴向应变分布方程,并推广至多中间层结构模型。在表面粘贴FBG黏结层简化模型方面,田石柱等^[20]、Zhao等^[21]、吴入军等^[14-15]、黄肖迪等^[22]假定黏结层整体参与了应变传递,刘明尧等^[23]、陈光等^[24]基于同类模型得出了FBG纤芯轴向应变分布的黏弹性解。实际上,因黏

结层内嵌FBG的形成面上应变不均等,下侧应变并不能代表该界面传递至FBG涂层的平均应变,加之FBG涂层在黏结层内产生的局部剪应力集中效应和被测面的刚性假设,致使该类简化模型得出的理论值被高估。与此相反,Duck等^[25]假设光纤向被测面投影所形成的空间为粘贴空隙,Li等^[26]、Her等^[27]假定光纤向被测面投影所形成空间内的黏结层为应变传递的有效耦合媒介,并推导出了纤芯轴向应变分布解析解。但在应用中,黏结层均能覆盖光纤而不留空隙,故该类模型与实际不相符,得出的理论值常被低估。

针对表面粘贴式布拉格光纤光栅传感器,本文提出一种分离式应变传递耦合分析模型。并考虑黏结层对被测表面应变分布的影响,基于剪滞理论和弹性力学反平面剪应力理论,建立表面粘贴FBG、黏结层与被测面三者间的应变耦合关系,并对各种粘贴条件下的适用性进行分析。本研究可用于表面粘贴式FBG的应变测量精度评估和误差修正。

2 理论分析

2.1 模型和理论推导

表面粘贴FBG的截面形态如图1所示,经固化后形成的黏结层呈半梭形,由中部向两翼尖灭,表面粘贴FBG、黏结层和被测物体的黏合度高,无空隙。考虑到黏结层两翼远离FBG的部位,对应变传递耦合的影响较小,假定黏结层为如图2(a)所示的规则矩形,则所产生的误差可忽略不计^[28]。鉴于FBG与黏结层、黏结层与被测物体间的应变耦合力学表达方式不同,提出分离式应变传递耦合分析模型,如图2(b)所示,基于线弹性材料、轴向单向同步变形、忽略掺杂微量元素和紫外光刻写产生的极微小力学性质改变^[19]等假设^[14-15],另作出以下假设修正:1)表面粘贴FBG传感器的应变传递过程由两个子过程组成,分别为FBG涂层内和黏结层内的应变传递;2)黏结层内存在一个假想平面,定义为等效应变耦合面,一方面将黏结层的应变传递至涂层,另一方

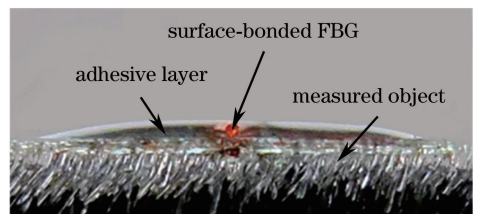


图1 表面粘贴FBG截面照片

Fig. 1 Photograph of cross-section of surface-bonded FBG

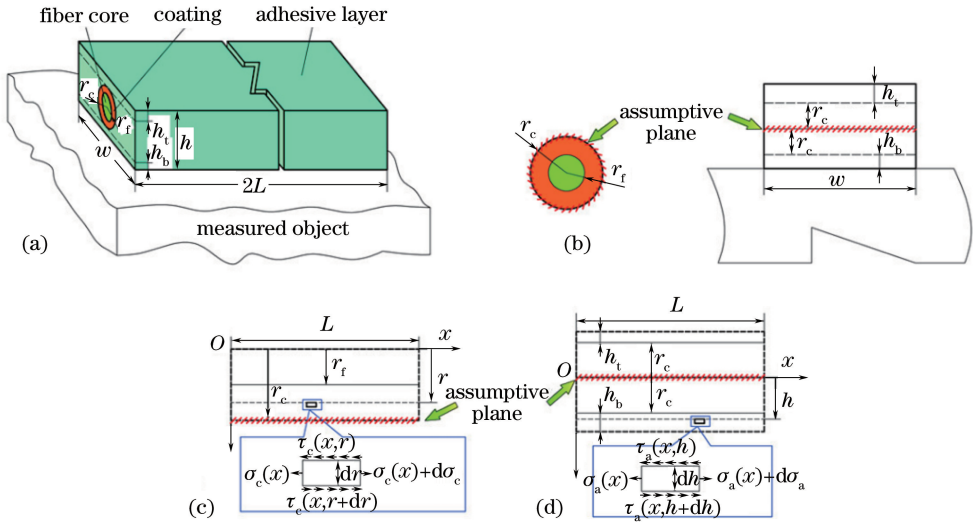


图 2 表面粘贴 FBG 分离式应变传递耦合分析模型及坐标系。(a) 表面粘贴 FBG 黏结层简化模型；(b) 分离式应变传递分析模型；(c) FBG 涂覆层内微元受力和坐标系；(d) 黏结层内微元受力和坐标系

Fig. 2 Separate coupling analysis model and coordinate system for strain transfer of surface-bonded FBG. (a) Simplified model for adhesive of surface-bonded FBG; (b) separate analysis model for strain transfer; (c) infinitesimal force acting and coordinate system in coating of FBG; (d) infinitesimal force acting and coordinate system in adhesive of FBG

面承受来自于涂层的反作用剪应力，即两个子过程由该平面衔接；3) 黏结层仅受一对分布于下表面和等效应变耦合面上的反平面剪应力影响，该剪应力在宽度方向上均匀分布；4) 等效应变耦合面的位置取决于 FBG 高度，本推导假定为 FBG 的几何中心。本模型可将表面粘贴 FBG 的应变传递耦合问题表达为涂层内的轴对称问题、黏结层内的平面应力问题和被测表面的半平面体问题，并涵盖耦合对象的全部力学特性和几何特性，包括裸 FBG、涂层、黏结层、被测物体的弹性模量 E_f, E_c, E_a, E_m ，裸 FBG、涂层的半径 r_f, r_c ，黏结层的宽度、长度、顶、底厚度 $w, 2L, h_t, h_b$ ，其中下标 f、c、a、m 分别代表裸 FBG、涂层、黏结层、被测物体， $E, G, \mu, r, \epsilon, \sigma$ 和 τ 分别为弹性模量、剪切模量、泊松比、半径、轴向应变、轴向

应力和剪应力。

如图 2(c) 所示，表面粘贴 FBG 涂层内任一点的剪应力 $\tau_c(x, r)$ 为^[28]

$$\tau_c(x, r) = -\frac{r_f^2 E_f}{2r} \left[\frac{d\epsilon_f(x)}{dx} + \frac{(r^2 - r_f^2)}{r_f^2} \frac{E_c}{E_f} \frac{d\epsilon_c(x)}{dx} \right]. \quad (1)$$

假定 FBG 涂层对黏结层的反作用剪应力在 w 方向均匀分布于等效受力面，考虑到界面剪应力集中效应，引入圆周长与径向投影的比值 π 作为修正系数，故等效应变耦合面的剪应力分布为涂层外缘剪应力积分值的修正： $\tau_a(x) = 2\pi^2 r_c \tau_c(x, r_c) / w$ 。取黏结层任一纵截面为研究对象，建立坐标系如图 2(d) 所示，则下部黏结层内任一点的剪应力 $\tau_a(x, h)$ 表示为

$$\tau_a(x, h) = -\frac{r_f^2 E_f}{w} \left[\pi^2 \frac{d\epsilon_f}{dx} + \frac{\pi^2 (r_c^2 - r_f^2)}{r_f^2} \frac{E_c}{E_f} \frac{d\epsilon_c}{dx} + \frac{\pi w (h + r_c + h_t)}{r_f^2} \frac{E_a}{E_f} \frac{d\epsilon_a}{dx} \right]. \quad (2)$$

表面粘贴 FBG 传感器的内部各结构间的轴向应变是连续的，处于同一个数量级。另外，FBG 涂层一般采用较柔软的高分子材料保护 FBG 不致脆断，故认为玻璃丝的弹性模量远大于另外两者，如下变换所产生的误差可忽略不计。

$$\frac{E_c}{E_f} \frac{d\epsilon_c}{dx} \approx \frac{E_c}{E_f} \frac{d\epsilon_f}{dx}, \quad \frac{E_a}{E_f} \frac{d\epsilon_a}{dx} \approx \frac{E_a}{E_f} \frac{d\epsilon_f}{dx}. \quad (3)$$

FBG 涂层和黏结层内任一点的剪应力可简化为关于纤芯轴向应变的函数，即

$$\tau_c(x, r) = -\left[\frac{r_f^2 E_f}{2r} + \frac{(r^2 - r_f^2)}{2r} \right] \frac{d\epsilon_f(x)}{dx}, \quad (4)$$

$$\tau_a(x, h) = - \left[\frac{\pi^2 r_f^2 E_f}{\omega} + \frac{\pi^2 (r_c^2 - r_f^2) E_c}{\omega} \right] \frac{d\epsilon_f(x)}{dx} - [(h + r_c + h_t) E_a] \frac{d\epsilon_f(x)}{dx}. \quad (5)$$

根据上述假设,基于剪滞理论,将剪应力分别沿图 2(c)的 Y 轴和图 2(d)的 H 轴正向积分,解非齐次线性微分方程^[14]可得 FBG 纤芯与黏结层下部界面应变的线性关系,即

$$\epsilon_f(x) = \epsilon_a(x) \left[1 - \frac{\cosh(\alpha x)}{\cosh(\alpha L)} \right], \quad (6)$$

式中: α 为 FBG 和黏结层间应变耦合的表征系数。 α 表示为

$$\alpha = \left\{ \frac{r_f^2 (E_f - E_c) \ln(r_c/r_f)}{2G_c} + \frac{\pi^2 (h_b + r_c) [r_f^2 E_f + (r_c^2 - r_f^2) E_c]}{\omega G_a} \right. \\ \left. (1 + \mu_a) [h_0^2 - (h_t + r_c)^2] + \frac{1}{2} (1 + \mu_c) (r_c^2 - r_f^2) \right\}^{-\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

为便于表达表面粘贴 FBG 传感器与被测物体间的应变耦合关系,假设被测面为弹性力学意义上的半空间无限体,粘贴区域均分布于反平面剪应力。将 (6) 式代入 (5) 式,假设 $\epsilon'_a(x) = 0$ 产生的误差忽略不计^[28],可得反平面剪应力 $\tau_a(x)$ 为

$$\tau_a(x) = \frac{\alpha A_E \sinh(\alpha x)}{\omega \cosh(\alpha L)} \epsilon_a(x), \quad (8)$$

式中: A_E 为 FBG、涂层和黏结层三者整体的等效拉压刚度系数,表示为 $A_E = \pi^2 r_f^2 E_f + \pi^2 (r_c^2 - r_f^2) E_c + \omega h_0 E_a$, h_0 为黏结层总厚度, $h_0 \geq 2c_t$ 。黏结层与被测物体间的应变耦合关系可表述为

$$\epsilon_a(x) = \epsilon_m \left\{ 1 + \frac{4\alpha A_E (1 + \mu_m)}{\pi E_m \cosh(\alpha L)} \int_0^L \frac{\sinh(\alpha x) [(\mu_m - 1)\omega^2 - 4x^2]}{x (4x^2 + \omega^2)^{1.5}} dx \right\}. \quad (9)$$

将两者线性关系的系数定义为 β ,由 (9) 式可见,其取值主要由黏结层的拉压刚度和几何尺寸决定,所以 β 可用来表征表面粘贴 FBG 对被测物体原有应变场的耦合作用。 β 表示为

$$\beta = 1 + \frac{4\alpha A_E (1 + \mu_m)}{\pi E_m \cosh(\alpha L)} \int_0^L \frac{\sinh(\alpha x) [(\mu_m - 1)\omega^2 - 4x^2]}{x (4x^2 + \omega^2)^{1.5}} dx. \quad (10)$$

可得光纤应变分布为

$$\epsilon_f(x) = \beta \left[1 - \frac{\cosh(\alpha x)}{\cosh(\alpha L)} \right] \epsilon_m. \quad (11)$$

光纤光栅解调仪以 FBG 反射光谱主峰中心波长的漂移量来识别温度、应变等外界参量的变化,在非均匀调制时,该波长漂移量实际上反映的是刻栅区分布最广的应变区间,而不是标距内的应变均值。粘贴段纤芯的轴向应变分布不均匀,变化梯度自中心向两翼递增。在实际应用中,FBG 一般均会粘贴于粘贴段的几何中心位置。因此,本文对 FBG 的感

知应变进行修正,认为选取区间 $[-L_f/2, L_f/2]$ 内的平均应变较为合理^[28],得出表面粘贴 FBG 的感知应变 ϵ_{L_f} 为

$$\epsilon_{L_f} = \frac{2 \int_0^{L_f/2} \epsilon_f(x) dx}{2L_f} = \beta \left[1 - \frac{2 \sinh\left(\frac{\alpha L_f}{2}\right)}{\alpha L_f \cosh(\alpha L)} \right] \epsilon_m. \quad (12)$$

表面粘贴 FBG 传感器的应变感知率可表征 FBG 的应变测量精度,也可用于应变测量误差修正,表示为

$$\eta_{\text{FBG}} = \beta - \frac{2\beta \sinh\left(\frac{\alpha L_f}{2}\right)}{\alpha L_f \cosh(\alpha L)}. \quad (13)$$

虽然以上理论解是由基于如图 2 所示有保护涂层的光纤光栅所建力学模型推导得出的,但这些理论具有较强普适性,令 $r_f = r_c$ 时,理论解可适用于裸 FBG(无保护涂层)的应变传感。

2.2 与现有成果的对比如

本文采用剪滞理论和弹性力学理论,将表面粘贴 FBG 传感器的应变传递耦合问题进行精细化表达,以期提高理论解的精确性。图 3 为在参量取值 $E_f = 72 \text{ GPa}$, $r_c = 0.125 \text{ mm}$, $E_c = 17 \text{ MPa}$, $\mu_c =$

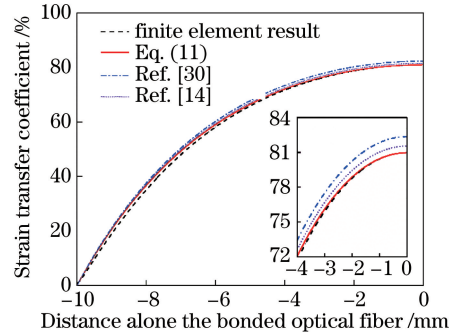


图 3 光纤纤芯轴向应变传递率分布的对比
Fig. 3 Comparison of distributions of axial strain transfer coefficients in fiber core

0.48、 $\omega = 2 \text{ mm}$ 、 $h_t = h_b = 0.2 \text{ mm}$ 、 $E_a = 4 \text{ GPa}$ 、 $\mu_a = 0.34$ 、粘贴长度 $2L = 20 \text{ mm}$ ，被测物体为砂岩，其 $E_m = 27.5 \text{ GPa}$ 、 $\mu_m = 0.18$ 的条件下，(11)式与文献[14,30]表面粘贴 FBG 传感器的纤芯轴向应变传递率分布的对比图。由图可见，本文的理论与仿真解一致性更好，从而验证了在此粘贴条件下，本文的修正假设和模型更具有实际意义。

图中 FBG 应变传递率的理论值在粘贴段两端与有限元分析(FEA)值有一定差异，其原因是 FEA 作了两个假设：FBG 涂层、黏结层的弹性模量小于光纤纤芯和他们只受剪应力影响，但随着光纤轴向应力自两侧向中部累积，这些差异也逐渐消弭。FBG 相较于干涉型光纤传感器的优势之一在于应变敏感区仅为中部刻栅区，所以在粘贴长度超过一定值时可规避这种因理论假设、界面端应力奇异性等引起的理论误差。

3 理论验证和参数分析

3.1 试验验证

为进一步验证修正假设和理论模型的正确性，实施单轴拉伸锚杆表面应变的 FBG 测量对比试验。分别将栅长为 10、15 mm 的 FBG 轴向粘贴于锚杆无横肋处，同时分别粘贴电阻应变片作为数据参照，温补 FBG 自由放置，黏结层的几何特性由游标卡尺量出。FBG 涂层材料为丙烯酸脂，弹性模量为 17 MPa，涂覆后外表面直径为 250 μm ；黏结剂采用奥斯邦 EP05，弹性模量约为 4 GPa，室温固化。FBG 在加载过程中的全历程应变和应变感知率 (FBG 解调应变除以电阻应变片的测量值) 如图 4 所示。经测量，栅长 10 mm 的 FBG1 粘贴长度为 21.38 mm、宽度为 2.85 mm，栅长为 15 mm 的 FBG2 粘贴长度为 23.06 mm、宽度为 4.05 mm，因

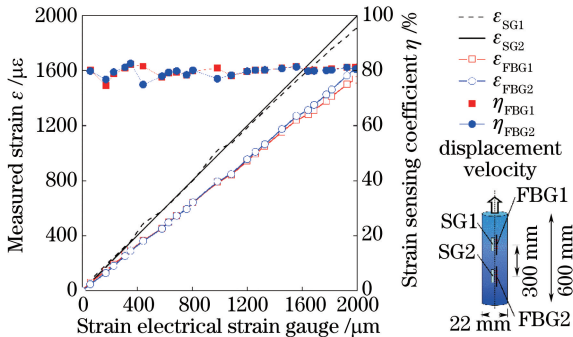


图 4 表面粘贴 FBG 的应变感知率曲线

Fig. 4 Curve of strain sensing coefficient of surface-bonded FBG

FBG 粘贴时采用覆膜按压法，与被测表面紧密接触，故认为黏结层的顶、底厚度均为 0。由图 4 可见，FBG 的解调应变均与应变真值有明显差异，表明在该粘贴条件下，表面粘贴 FBG 的应变传递耦合效果较差，损伤了其测量精度，若直接将之作为锚杆表面应变将会造成较大的误差。FBG1 和 FBG2 的应变感知率实验值分别为 80.41%、79.99%，与本文理论值 79.86%、78.71% 符合良好，仅存在 0.55%、1.28% 的差值，误差分别为 0.7%、1.6%。考虑到电阻应变片具有 3%~7% 的测量误差^[18]，黏结层的存在也会减小比值基数等原因，实验值必定有稍高的估计，这与实验值稍大于理论值的结果相符。由此可见，本文的应变传递耦合模型具有较高的准确性，可有效修正 FBG 的应变测量结果。

3.2 参数仿真分析

考虑到黏结层几何和力学特性的干扰，在各种粘贴条件下仍需对理论模型的适用性进行探讨，以指导表面粘贴 FBG 应变测量与修正。采用有限元模拟软件 ANSYS workbench，分别以 FBG 涂层的弹性模量、厚度、粘贴长度、黏结层的宽度、顶厚度、底厚度 6 个主要影响因素为变量，对 FBG 应变感知率的理论值 η_{FBG} 和模拟值 η_{FEA} 进行对比。根据图 1 所示的黏结层截面形态建立仿真模型，如图 5 所示，被测物体沿轴向施加压应力而产生应变，各主要影响参数的基准值和取值区间见表 1，FBG 长度为 10 mm，其余参数取值与 2.2 节一致。定义 FBG 应变感知率误差为 $\Delta\eta$ ，以表征理论模型的精确性。

$$\Delta\eta = \frac{|\eta_{\text{FBG}} - \eta_{\text{FEA}}|}{\eta_{\text{FEA}}} \times 100\% \quad (14)$$

图 6 为(13)式 FBG 应变感知率理论解及其误差相对于 FBG 涂层弹性模量和直径的分布曲线，图 7、图 8 分别为两者相对于粘贴长度和黏结层几

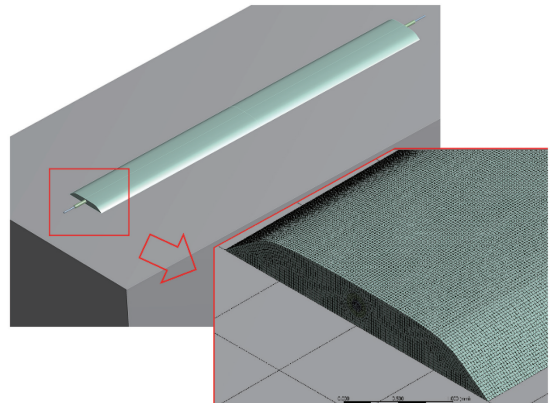


图 5 表面粘贴 FBG 的有限元模型

Fig. 5 Finite element model for surface-bonded FBG

何参数的分布曲线。由图可见,表面粘贴 FBG 的应变感知率与粘贴长度和涂层弹性模量呈现正相关性,与涂层厚度(直径)呈现负相关性,这与文献[29]中的相关结论相符,对黏结层宽度、厚度不敏感。与之相对,理论值的误差与粘贴长度、涂层物理参数呈现正相关性,对于涂层、黏结层的几何特性呈现负相关性,并表现出明显的拐点效应,原因为黏结物刚度提高导致对被测物体的耦合作用加强,放大了理论假设的偏差。但除粘贴长度极短和涂层极软两种情况外,本文理论解具有较高的精确性,精度普遍高于 0.4%,粘贴长度越长、涂层弹性模量越大,精确性越高。当粘贴长度 $2L \geq 2 \times 2L_f$ 、 $2L \geq 2 \times 2L_f$ 、涂层弹性模量 $E_c \geq 15$ MPa 时,理论值的精度可超过

0.1%,表明该理论模型具有良好的适用性,完全能够满足各种粘贴条件下的应用需求。

表 1 应变误差修正系数的主要影响参量的取值

Table 1 Values of main parameters affecting modification coefficient of strain error

Parameter symbol	Standard value	Value range
Elastic modulus of coating E_c /MPa	2.55/50/300	2-300
Diameter of coating d_c /μm	250	155-500
Adhesive length $2L$ /mm	50	10-150
Adhesive width w /mm	2	0.25-5
Adhesive top thickness h_t /mm	0	0-1
Adhesive bottom thickness h_b /mm	0	0-1

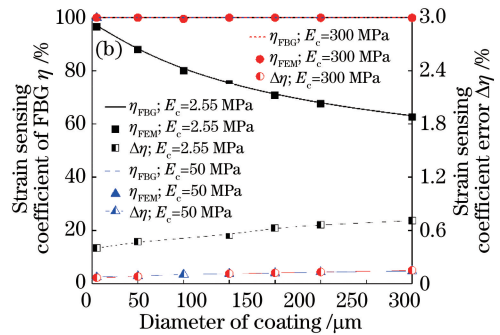
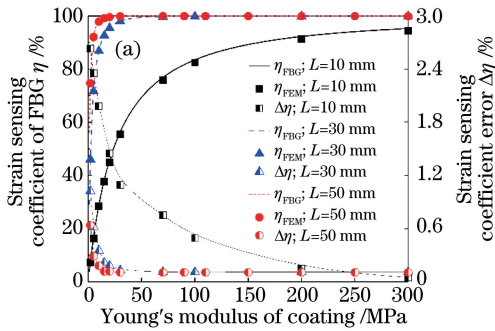


图 6 FBG 涂层对应变测量误差修正精度的影响。(a)涂层弹性模量;(b)涂层直径

Fig. 6 Influence of FBG coating on modification accuracy of measured strain error.

(a) Young's modulus of coating; (b) diameter of coating

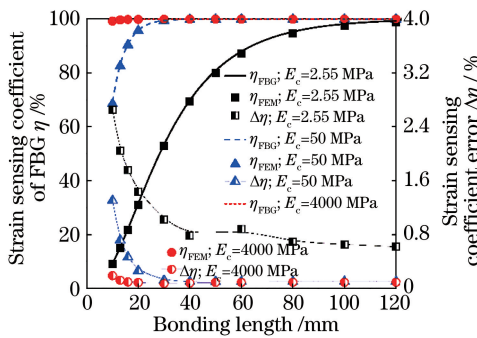


图 7 粘贴长度对应变测量误差修正精度的影响

Fig. 7 Influence of adhesive length on modification accuracy of measured strain error

相较于粘贴宽度,黏结层的厚度对理论模型的精度影响较明显,1 mm 厚度的损失量约为 0.036% 和 0.3%。这就要求实际应用时,在保证粘贴质量的条件下,应尽量使 FBG 紧贴于被测物体表面并限制覆盖于 FBG 上的黏结物厚度。

3.3 参数试验分析

鉴于模拟环境与 FBG 真实测量实践存在的客观偏差,仅采用仿真解对本文理论模型进行验证会

存在不足,需探究表面粘贴 FBG 应变感知率的主要影响因素对其理论解精度的影响。实验以被测物体力学性质、粘贴长度、保护涂层强度为变量,研究本文理论模型对不同被测物体、不同粘贴条件的适用性。设计实验包括以下两个内容。

I)以 Q235 普通碳钢锚杆为被测物体($E_m = 220$ GPa),在 MTS 试验机上进行单轴拉伸实验。改变 FBG 的粘贴长度,并分别采用重涂覆丙烯酸酯的 FBG 和裸 FBG,用以对比保护涂层强度对模型精度的影响(裸 FBG 可等效为由胶黏剂重涂覆)。实验过程如图 9(a)所示,采用位移控制方法,以 1 mm/s 施加变形直至锚杆弹性强度约 200 MPa。FBG 解调仪与 MTS 试验机扫描频率为 2 Hz,以如图 4 所示的弹性阶段内平均应变传递效率为该实践条件下的实验值。

II)以尼龙棒为被测物($E_m = 1.299$ GPa),在位移试验台上进行给定变形拉伸实验。同样改变粘贴长度,并且分别采用重涂覆丙烯酸酯的 FBG 和裸 FBG。实验过程如图 9(b)所示,尼龙棒的自由段长

度为 87.8 mm,以 0.05 mm 为增量记录 FBG 的应变测量值。以实验过程中的 FBG 平均应变传递效率为该实践条件下的实验值。

以碳钢锚杆为被测物体的 FBG 应变感知率实验结果如表 2 所示。表面粘贴 FBG 的应变感知率随粘贴长度的增加整体上呈加强趋势,如图 10 所示,本文理论模型的误差也逐渐减小。当粘贴长度超过

15 mm,理论解的精确程度普遍超过 1%。保护涂层的强度对 FBG 应变感知率具有突出的影响,裸 FBG 粘贴范围超过栅区即可获得较好的感知效果,原因为黏结层的抗剪强度较高、光纤几何尺寸极小和不存在薄弱结构。在 FBG 的表面粘贴应变测量实践中,减少应变传递的中间环节、加大粘贴长度等措施可获得较好的应变感知效果及较高的理论模型精度。

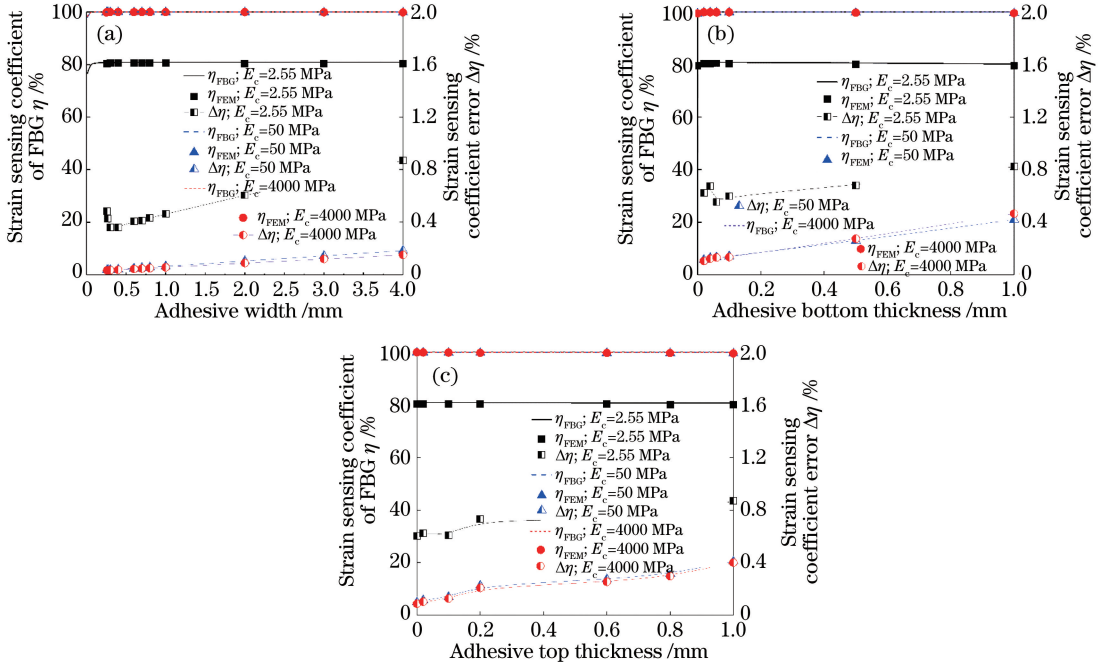


图 8 黏结层的几何参数对应变测量误差修正精度的影响。(a)粘贴宽度的影响; (b)黏结层底厚度的影响;(c)黏结层顶厚度的影响

Fig. 8 Influences of geometrical parameters of adhesive on modification accuracy of measured strain error.

(a) Influence of adhesive width; (b) influence of adhesive bottom thickness; (c) influence of adhesive top thickness

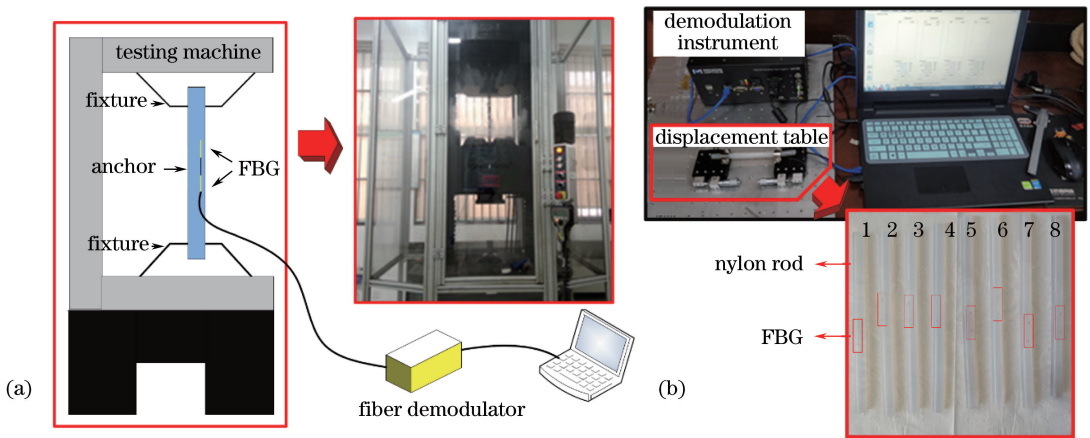


图 9 表面粘贴 FBG 应变感知率的理论解精度实验。(a)碳钢锚杆为被测物体;(b)尼龙棒为被测物体

(a) Carbon steel anchor used as measured object; (b) nylon rod used as measured object

以尼龙棒为被测物体的 FBG 应变感知率实验结果见表 3 所示。在软性被测面条件下,相同粘贴

几何特性所提供的 FBG 应变感知率稍小。随着粘贴长度的增加,FBG 应变感知率的理论模型误差呈

现出明显的拐点效应,先减小后增大,如图 11 所示。该现象发生的原因是因为被测表面半空间无限体假设对软性材料的适用性不强,尤其在较大干扰下,这种不

表 2 实验 I FBG 应变感知率的实验解与理论解对比

Table 2 Comparison of experimental and theoretical solutions for strain sensing coefficient of FBG in experiment I

No.	2L /mm	w /mm	η_{FEM} /%	η_{FBG} /%	$\Delta\eta$ /%
I-1	11.32	1.88	50.14	49.27	1.735
I-2 ^a	11.68	2.96	101.20	99.99	1.196
I-3	13.68	3.12	62.69	60.91	2.839
I-4 ^a	14.02	3.46	99.96	99.99	0.030
I-5	15.08	3.02	67.13	66.67	0.685
I-6 ^a	14.94	2.88	100.05	99.99	0.060
I-7	22.02	2.64	86.17	85.31	0.998
I-8	24.98	2.12	89.40	89.46	0.067
I-9	28.32	3.24	93.31	93.13	0.193

Note: "a" stands for bare FBG.

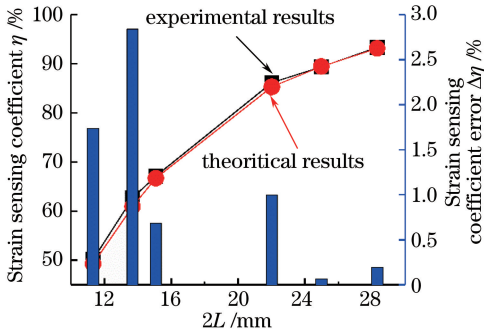


图 10 实验 I FBG 应变感知率(曲线)及理论模型误差(条形图)

Fig. 10 Strain sensing coefficient of FBG (curve) and error of theoretical model (bar chart) in experiment I

表 3 实验 II FBG 应变感知率的实验解与理论解对比

Table 3 Comparison of experimental and theoretical results of strain sensing coefficient of FBG in experiment II

No.	2L /mm	w /mm	η_{FEM} /%	η_{FBG} /%	$\Delta\eta$ /%
II-1	10.82	2.52	44.01	44.97	2.181
II-2 ^a	11.02	1.86	97.14	97.08	0.062
II-3	16.58	3.34	69.77	70.46	0.989
II-4 ^a	15.92	2.54	98.68	98.72	0.041
II-5	21.34	3.00	81.08	82.75	2.060
II-6 ^a	21.78	3.24	98.85	98.95	-0.101
II-7	26.06	2.86	92.13	89.97	2.345
II-8	30.22	3.02	90.79	93.8	3.315

Note: "a" stands for bare FBG.

4 结 论

采用剪滞理论和弹性力学理论,建立了表面粘贴 FBG 的传感器、黏结层、被测物体三者间应变耦合传递的分离式模型,推导出光纤光栅测量应变与

足更加明显,但在粘贴长度小于 20 mm 时,本文理论模型的误差约为 2%,仍维持在较高水平,能够满足 FBG 的应变测量实践需求。

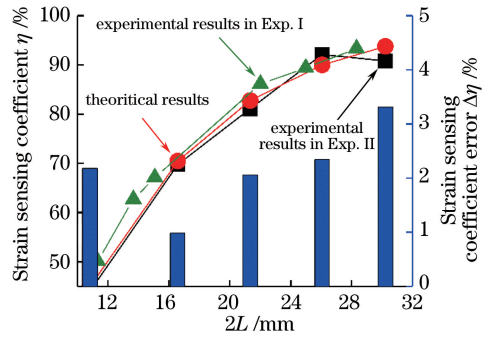


图 11 实验 II FBG 应变感知率(曲线)及理论模型误差(条形图)

Fig. 11 Strain sensing coefficient of FBG (curve) and error of theoretical model (bar chart) in experiment II

被测面应变真值的修正关系,并研究了该理论模型对各种粘贴条件的适用性。

1) 分离式应变传递耦合模型可将 FBG 传感器的应变传递结构间的应变耦合机理作涂层内轴对称问题、黏结层内平面应力问题和被测表面半平面体问题表述,使之更加符合实际,所得理论解的误差低于 1.6%。

2) 表面粘贴 FBG 的应变感知率与粘贴长度和涂层弹性模量呈正相关性,与涂层厚度(直径)呈负相关性,对黏结层宽度、厚度不敏感,提高涂层弹性模量和粘贴长度能够获得更理想的测量效果。

3) 理论模型误差与粘贴长度、涂层物理参数呈正相关性,与涂层、黏结层的几何特性呈负相关性,除粘贴长度极短和涂层极软两种极限情况外,理论模型精度均普遍高于 0.4%,具有良好的适用性。

4) 针对软性被测材料,表面粘贴 FBG 传感器的应变感知率的理论模型精度稍小,原因为被测表面半空间无限体假设对软性材料的适用性不强,但其精度仍能够满足 FBG 的应变测量实践需求。

参 考 文 献

[1] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328001.
 廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.

[2] Morsy R, Marzouk H, Haddara M, et al. Multi-channel random decrement smart sensing system for concrete bridge girders damage location identification [J]. Engineering Structures, 2017, 143: 469-476.

[3] Rao C F, Zhang H, Feng Y, et al. Heat treatment

- on fiber Bragg grating with Ni coating for elevated temperature sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2006-2013.
- 饶春芳, 张华, 冯艳, 等. 镍金属保护光纤布拉格光栅的热处理及高温传感[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2006-2013.
- [4] Zhao Y M, Zhang N, Si G Y. A fiber Bragg grating-based monitoring system for roof safety control in underground coal mining [J]. *Sensors*, 2016, 16(10): 1759.
- [5] Liang M F, Fang X Q. Application of fiber Bragg grating sensing technology for bolt force status monitoring in roadways[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(1): 107.
- [6] Liang M F, Fang X Q, Chen N N, et al. Strain sensing mechanism of surface bonded fiber Bragg grating bolt and its application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(6): 1243-1251.
- 梁敏富, 方新秋, 陈宁宁, 等. 表贴式光纤光栅锚杆应变感知机理与应用研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(6): 1243-1251.
- [7] Liang M F, Fang X Q, Ning Y S. Temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor based on plane diaphragm [J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(2): 157-167.
- [8] Zhang D D, Chai J, Li Y, et al. Strain transfer function of embedded fiber Bragg grating sensors for unconsolidated layer settlement deformation detector and its application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 3289-3297.
- 张丁丁, 柴敬, 李毅, 等. 松散层沉降光纤光栅监测的应变传递及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 3289-3297.
- [9] Chai J, Qiu B, Wei S M, et al. Strain transfer of embedded fiber Bragg grating sensors for rock deformation and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2551-2556.
- 柴敬, 邱标, 魏世明, 等. 岩层变形检测的植入式光纤 Bragg 光栅应变传递分析与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12): 2551-2556.
- [10] Tang S C, Zhang J, Zhang H, et al. Application of fiber grating sensing technology in mine safety monitoring system [J]. *Industry and Mine Automation*, 2014, 40(7): 41-44.
- 汤树成, 张杰, 张恒, 等. 光纤光栅传感技术在煤矿安全监测系统中的应用[J]. *工矿自动化*, 2014, 40(7): 41-44.
- [11] Zhu Z H, Ren D C, Li X W, et al. Application of fiber Bragg grating displacement meter groups in continuous monitoring of deformation of surrounding rock [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(11): 2093-2100.
- 朱赵辉, 任大春, 李秀文, 等. 光纤光栅位移计组在围岩变形连续监测中的应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(11): 2093-2100.
- [12] Chai J, Zhao W H, Li Y, et al. Pull out tests of fiber Bragg grating sensor fitted bolts[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(5): 719-724.
- 柴敬, 赵文华, 李毅, 等. 光纤光栅检测的锚杆拉拔实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41(5): 719-724.
- [13] Li S C, Wang D C, Wang Q, et al. Development and application of large-scale geomechanical model test system for deep thick top coal roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(9): 1522-1530.
- 李术才, 王德超, 王琦, 等. 深部厚顶煤巷道大型地质力学模型试验系统研制与应用[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(9): 1522-1530.
- [14] 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.
- [15] Wu R J, Zheng B L, Chen T, et al. Coupled mechanism analysis of strain transfer of fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(10): 1006003.
- 吴入军, 郑百林, 陈田, 等. 光纤布拉格光栅传感器应变传递耦合机理分析[J]. *光子学报*, 2017, 46(10): 1006003.
- [16] 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.
- [17] Wu R J, Fu K K, Zheng B L, et al. Error modification of FBG strain sensors bonded on plates [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 747-755.
- 吴入军, 付昆昆, 郑百林, 等. 粘贴于薄板表面的光纤布拉格光栅应变传感器误差修正[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 747-755.
- [18] 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.
- [19] Li D S, Li H N. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors [J]. Chinese Journal of 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.
- [20] Tian S Z, Zhang G Q, Wang D P. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of 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.
- [21] 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.
- [22] Huang X D, Wang Y, Sun Y Y, et al. Mechanism analysis on the impact of coating to fiber Bragg grating strain transfer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1233-1240.
黄肖迪, 王源, 孙阳阳, 等. 涂覆层对光纤布拉格光栅应变传递的影响机理分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1233-1240.
- [23] Liu M Y, Ji D L, Xiao S, et al. Effect of adhesive viscoelasticity on strain transfer mechanism of bonded FBG[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(6): 1307-1318.
刘明尧, 季冬亮, 肖爽, 等. 胶黏剂黏弹性对粘贴式FBG应变传递的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1307-1318.
- [24] Chen G, Ding K Q, Feng Q B, et al. Strain transfer mechanism of end-bonding fibre Bragg grating sensors based on linear viscoelasticity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110604.
陈光, 丁克勤, 冯其波, 等. 线黏弹性端接布拉格光纤光栅传感器应变传递机理[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110604.
- [25] Duck G, Renaud G, Measures R. The mechanical load transfer into a distributed optical fiber sensor due to a linear strain gradient: embedded and surface bonded cases [J]. Smart Materials and Structures, 1999, 8(2): 175-181.
- [26] Li W Y, Cheng C C, Lo Y L. Investigation of strain transmission of surface-bonded FBGs used as strain sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 149(2): 201-207.
- [27] Her S C, Huang C Y. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors [J]. Sensors, 2011, 11(7): 6926-6941.
- [28] Xue G Z, Fang X Q, Hu X K, et al. Measurement accuracy of FBG used as a surface-bonded strain sensor installed by adhesive [J]. Applied Optics, 2018, 57(11): 2939-2946.
- [29] 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.
- [30] Wan K T, Leung C K Y, Olson N G. Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors [J]. Smart Materials and Structures, 2008(17): 035037.