

文章编号 1004-924X(2016)06-1307-12

## 胶黏剂黏弹性对粘贴式 FBG 应变传递的影响

刘明尧, 季冬亮\*, 肖爽, 张志建, 易仁慧  
(武汉理工大学机电工程学院, 湖北武汉 430070)

**摘要:** 考虑到 FBG 传感器用于机床应变监测时, 胶黏剂蠕变对静态载荷下 FBG 应变传递的影响, 研究了胶黏剂线黏弹性对粘贴式 FBG 应变传递的影响规律。基于粘贴层为线黏弹性材料重新建立了粘贴式 FBG 应变传递模型, 并将粘贴层简化为三参量固体模型, 得到了粘贴式 FBG 传感器瞬时和准静态的应变传递关系。然后, 通过理论和实验分析了粘贴长度、宽度、高度和中间层厚度对瞬时和准静态应变传递的影响。实验结果表明: 在恒定应力作用下, 黏接剂蠕变会导致 FBG 的应变随时间而变化, 当粘贴长度在 30 mm 以上时, FBG 应变传递率随时间的变化在 4% 左右; 当粘贴长度为 15 mm 时, 应变传递率变化接近 7%。分析该结果得出: 适当增加粘贴长度, 减小粘贴中间层厚度可以减小胶黏剂蠕变对应变传递的影响。该结论对基于粘贴式 FBG 的高精密测量具有指导意义。

**关键词:** 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 应变监测; 线黏弹性; 蠕变; 应变传递率

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1307

## Effect of adhesive viscoelasticity on strain transfer mechanism of bonded FBG

LIU Ming-yao, JI Dong-liang\*, XIAO Shuang, ZHANG Zhi-jian, YI Ren-hui

(College of Mechanical and Electronic Engineering,  
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

\* Corresponding author, E-mail: 1534150508@qq.com

**Abstract:** The effect law of adhesive visco-elasticity on bonded FBG strain transfer was studied in consideration of the effect of adhesive creep on FBG strain transfer under static load during the application of FBG sensor to machine tool strain monitoring. The bonded FBG strain transfer model was re-established for the linear visco-elastic material based on the bonding layer which is simplified as a three-parameter solid model, thus the instant and quasi-static strain transfer relation of the bonded FBG sensor was obtained. Then, the effects of the bonding length, width and height and thickness of interlayer on the instant and quasi-static strain transfer were analyzed through theory and experiment. The experimental results show that: the adhesive creep will lead to the variation of FBG strain with time under the constant stress action; when the bonding length is above 30 mm, the FBG strain transfer ratio change with time is about 4%; when the bonding length is 15 mm, the strain transfer ratio change is approximate 7%. The analysis implies that the appropriate increase of bonding length and decrease

收稿日期: 2016-01-08; 修订日期: 2016-03-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51375359); 湖北省自然科学基金重点项目 (No. 2013CFA047); 武汉理工大学自主创新研究基金资助项目 (No. 155204006)

of the thickness of bonding interlayer can reduce the effect of adhesive creep on strain transfer. This conclusion has guiding significance for the high-precision measurement based on bonded FBG.

**Key words:** fiber optical sensor; Fiber Bragg Grating (FBG); strain monitoring; linear visco-elasticity; creep; strain transfer ratio

## 1 引言

光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感器以光纤为媒介, 以光为载体, 通过检测波长的漂移反映被测应变或者温度的变化。它具有体积小、重量轻、寿命长、抗电磁干扰以及易于实现远程分布式监测等优点, 被广泛应用于工程结构、航空航天器件、大型旋转机械和高端数控机床状态监测等领域<sup>[1-5]</sup>。

在结构应变监测中, 通常用胶黏剂将 FBG 直接粘贴在被测结构表面, 故粘贴层的工艺直接影响测量精度。国内外学者对 FBG 应变界面传递机理进行了大量研究, Ansari 等人假设埋入式光纤光栅粘贴长度中心的应变与基体应变相同, 推导了光纤光栅的轴向应变和剪应力分布<sup>[6]</sup>。李东升等对 Ansari 的假设进行了修正, 认为光纤光栅粘贴长度中心的应变变化率与基体应变变化率相同, 获得了埋入式 FBG 传感器各点的应变传递率和平均应变传递率<sup>[7]</sup>。LI 等考虑了基体结构弹性模量对表面粘贴式 FBG 应变传递的影响, 得到新的应变传递关系, 并通过有限元仿真和实验验证了理论, 得出当基体的弹性模量与厚度相对粘贴层较大时, 应变传递损失较小的结论<sup>[8]</sup>。孙丽等人建立了基体结构-胶体-基片-胶体的 FBG 传感器的应变传递模型, 进一步推导了表面粘贴式 FBG 传感器的应变传递公式, 并采用有限元分析验证了理论计算的正确性<sup>[9]</sup>。李红等推导了表面粘贴式裸光纤光栅的应变传递率, 仿真分析了粘贴层弹性模量、厚度、长度、宽度等粘贴参数对平均应变传递率的影响, 得到裸光纤光栅表面粘贴结构中粘贴层的优化参数, 并通过实验得到 FBG 在铝基片上的应变传递呈良好的线性关系<sup>[10]</sup>。田石柱等建立了组合梁与光纤布拉格光栅传感器应变传递的力学试验模型, 理论分析了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, 通过实验确定粘贴宽度以及光纤的粘贴长度的最佳组合<sup>[11]</sup>。李天梁等研究了粘贴式 FBG

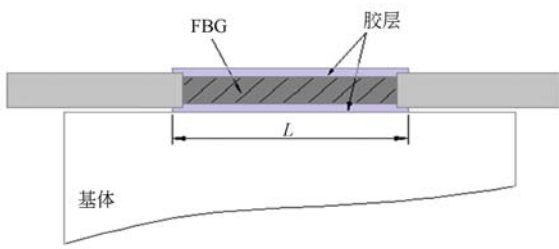
用于受弯件时的应变传递规律, 得到粘贴长度与粘接中间层厚度是影响受弯件粘贴型 FBG 应变传递率的主要因素; 并且粘接中间层厚度增加, FBG 的应变传递率随之增大, 因此增大中间层厚度可用于粘贴型 FBG 传感器在受弯件应变监测中的增敏<sup>[12]</sup>。

上述关于 FBG 传感器应变传递率的研究都将粘贴层假设为线弹性材料, 而事实上, 粘贴层为高分子聚合物, 其力学特性表现为黏弹性。在恒定应力作用下, 粘贴层会产生应变随时间增加的蠕变现象, 导致 FBG 应变随时间的变化。黏弹性材料蠕变过程通常包括瞬时蠕变、稳态蠕变和加速蠕变三个阶段<sup>[13]</sup>。本文针对粘贴式 FBG, 假设粘贴层为线黏弹性材料, 纤芯层为线弹性材料, 重新建立粘贴式 FBG 传感器的应变传递模型, 推导了粘贴式 FBG 瞬时和准静态的应变传递关系, 并分析了粘贴层各参数对瞬时和准静态的应变传递影响。最后, 通过悬臂梁实验监测短时间内的应变变化, 分析了不同粘贴长度, 粘贴厚度以及中间层厚度对瞬时和准静态应变传递的影响, 验证了理论模型的正确性。

## 2 应变传递模型

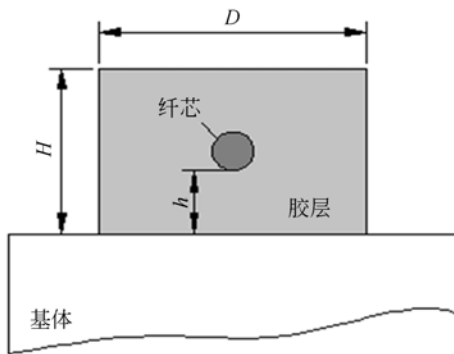
粘贴式 FBG 在测量被测表面时, 通常会去除涂覆层, 其粘贴模型如图 1 所示。其中  $L$  为粘贴长度,  $D$  为粘贴宽度,  $H$  为胶层高度,  $h$  为粘贴中间层厚度。分析时采用假设如下:

- (1) 光纤光栅纤芯和基体为线弹性材料, 粘贴层为线黏弹性材料;
- (2) 光纤光栅纤芯与中间粘贴层, 中间粘贴层与基体之间结合完好;
- (3) 只有基体结构受到均匀轴向外力作用, 粘贴层和光纤不直接受力;
- (4) 粘贴层反作用于基体, 它对基体的影响深度用  $h_m$  表示,  $h_m = 1 \text{ mm}$ ;
- (5) 不考虑温度湿度等环境因素对粘贴层的影响。



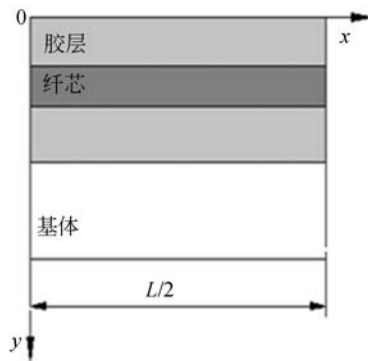
(a) 光纤光栅粘贴模型

(a) Model of surface-bonded FBG



(b) 光纤光栅粘贴侧视图

(b) Lateral view



(c) 坐标方向

(c) Coordinate system

图 1 表贴式 FBG 应变传递模型

Fig. 1 Strain sensing model of surface-bonded FBG

根据剪滞理论思想,由于基体结构与纤芯之间存在相对位移,所以从基体到粘贴层都存在剪应变,基体应变通过剪应变传递到光纤纤芯上,各层的相对位移如图 2 所示。其中,  $u$  表示位移量,  $f, a, m$  作为下标分别表示光纤,粘贴层,基体结构的相关变量。

由于粘贴层具有较大的长径比,径向位移可

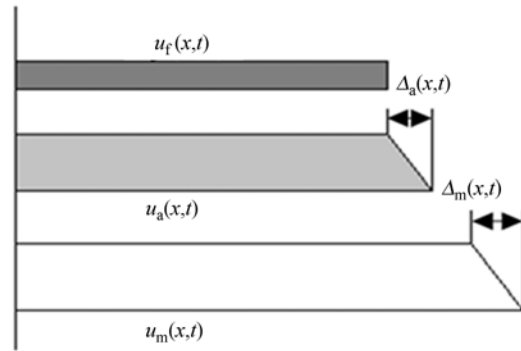


图 2 各层相对位移图

Fig. 2 Relative displacement of each layer of surface-bonded FBG

以忽略,从基体层到光纤的相对位移可表示为:

$$u_m(x, t) - u_f(x, t) = \Delta_a(x, t) + \Delta_m(x, t) = \int_{H-h}^H \gamma_a(x, y, t) dy + \int_H^{H+h_m} \gamma_m(x, y, t) dy, \quad (1)$$

其中:  $u(x, t)$  为各层的轴向位移,  $\gamma(x, y, t)$  为各层的剪应变。

光纤纤芯、粘贴层和基体结构的受力情况如图 3 所示,  $\sigma$  为轴向应力,  $\tau_{af}$  和  $\tau_{am}$  分别表示粘贴层与纤芯,粘贴层与基体间界面上的剪应力。

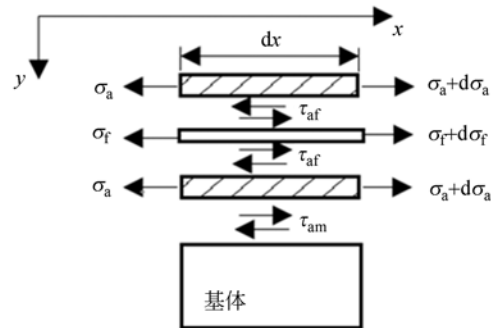


图 3 各层与界面间受力分析图

Fig. 3 Stress situation between layers of surface-bonded FBG

对光纤纤芯微元段进行受力分析,得到:

$$\pi r_f^2 d\sigma_f(x, t) + 2\pi r_f \cdot \tau_{af}(x, t) \cdot dx = 0, \quad (2)$$

即:

$$\tau_{af}(x, t) = -\frac{r_f}{2} \frac{d\sigma_f(x, t)}{dx}, \quad (3)$$

其中:  $r_f$  为光栅纤芯半径,  $d\sigma$  为轴向应变的增量。

对整体粘贴层微元段进行受力分析,得到:

$$(DH - \pi r_f^2) d\sigma_a(x, t) - 2\pi r_f \tau_{af}(x, t) dx + \tau_{am}(x, t) D dx = 0. \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可得:

$$\tau_{am}(x, t) = -\left(H - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{d\sigma_a(x, t)}{dx} - \frac{\pi r_1^2}{D} \frac{d\sigma_f(x, t)}{dx}. \quad (5)$$

当  $H-h \leq y \leq H$  时:

$$\tau_a(x, y, t) = -\left(y - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{d\sigma_a(x, t)}{dx} - \frac{\pi r_1^2}{D} \frac{d\sigma_f(x, t)}{dx}. \quad (6)$$

当  $y=H-h$  时:

$$\tau_a(x, H-h, t) = \tau_{af}(x, t). \quad (7)$$

由式(3)、式(6)、式(7)可得:

$$\frac{d\sigma_a(x, t)}{dx} = \frac{1}{2} \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} \frac{d\sigma_f(x, t)}{dx} = \frac{E_f}{2} \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} \frac{d\varepsilon_f(x, t)}{dx}. \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)、式(6)可得:

$$\tau_{am}(x, t) = -\left[\frac{1}{2} \left(H - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} + \frac{\pi r_1^2}{D}\right] \times E_f \frac{d\varepsilon_f(x, t)}{dx}, \quad (9)$$

$$\tau_a(x, y, t) = -\left[\frac{1}{2} \left(y - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} + \frac{\pi r_1^2}{D}\right] \times E_f \frac{d\varepsilon_f(x, t)}{dx}, \quad H-h \leq y \leq H. \quad (10)$$

假设基体层剪应力  $\tau_m$  随  $y$  线性变化, 并满足边界条件: 当  $y=H+h_m$  时,  $\tau_m=0$ ; 当  $y=H$  时,  $\tau_m=\tau_{am}$ 。则当  $H \leq y \leq H+h_m$  时:

$$\tau_m(x, y, t) = \frac{\tau_{am}(x, t)}{h_m} (H+h_m-y). \quad (11)$$

将式(9)代入式(11)可得:

$$\tau_m(x, y, t) = -\frac{(H+h_m-y)}{2h_m} \times \left[\left(H - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} + \frac{2\pi r_1^2}{D}\right] E_f \frac{d\varepsilon_f(x, t)}{dx}, \quad (12)$$

$$\gamma_m(x, y, t) = -\frac{(H+h_m-y)}{2h_m G_m} \times \left[\left(H - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} + \frac{2\pi r_1^2}{D}\right] E_f \frac{d\varepsilon_f(x, t)}{dx}, \quad (13)$$

其中  $G_m$  为基体材料的剪切模量。

根据线黏弹性材料的积分型本构方程<sup>[13]</sup>, 得到粘贴层的应力与应变关系可用 Stieltjes 卷积表示为:

$$\gamma_a(x, y, t) = X_a(t) * d\tau_a(x, y, t), \quad (14)$$

$$\varepsilon_a(x, t) = B_a(t) * d\sigma_a(x, t), \quad (15)$$

式中:  $X_a(t)$  和  $B_a(t)$  分别为材料剪切蠕变柔量和

拉压蠕变柔量, “\*”表示卷积运算。

对式(10)和式(14)两端进行 Laplace 变换, 得到:

$$\bar{\gamma}_a(x, y, s) = -s \cdot \bar{X}_a(s) \left[ \frac{1}{2} \left(y - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} + \frac{\pi r_1^2}{D} \right] \times E_f \frac{d\bar{\varepsilon}_f(x, s)}{dx}. \quad (16)$$

由积分型本构方程弹性-黏弹性对应原理可得:

$$\bar{X}_a(s) = 2 \bar{B}_a(s) \cdot (1 + \bar{\mu}_a(s) \cdot s). \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得:

$$\bar{\gamma}_a(x, y, s) = -s \cdot \bar{B}_a(s) (1 + \bar{\mu}_a(s) \cdot s) \times \left[ \left(y - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} + \frac{2\pi r_1^2}{D} \right] E_f \frac{d\bar{\varepsilon}_f(x, s)}{dx}, \quad (18)$$

式中  $\bar{\mu}_a(s) \cdot s$  为粘贴层泊松比。

对式(1)、式(13)两端进行 Laplace 变换, 得:

$$\bar{u}_m(x, s) - \bar{u}_f(x, s) = \int_{H-h}^H \bar{\gamma}_a(x, y, s) dy + \int_H^{H+h_m} \bar{\gamma}_m(x, y, s) dy, \quad (19)$$

$$\bar{\gamma}_m(x, y, s) = -\frac{(H+h_m-y)}{2h_m G_m} \times \left[ \left(H - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} + \frac{2\pi r_1^2}{D} \right] E_f \frac{d\bar{\varepsilon}_f(x, s)}{dx}. \quad (20)$$

由式(18)、(19)和(20)可得:

$$\bar{u}_m(x, s) - \bar{u}_f(x, s) = -\frac{1}{k^2} \frac{d\bar{\varepsilon}_f(x, s)}{dx}, \quad (21)$$

$$\frac{1}{k^2} = s \cdot \bar{B}_a(s) \cdot (1 + \bar{\mu}_a(s) \cdot s) \cdot h \cdot E_f \cdot \left[ \frac{1}{2} \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} \cdot (2H-h - \frac{2\pi r_1^2}{D}) + \frac{2\pi r_1^2}{D} \right] + \frac{h_m E_f}{4G_m} \left[ \left(H - \frac{\pi r_1^2}{D}\right) \frac{Dr_1 - 2\pi r_1^2}{D(H-h) - \pi r_1^2} + \frac{2\pi r_1^2}{D} \right]. \quad (22)$$

式(21)对  $x$  求导, 得:

$$\frac{d^2 \bar{\varepsilon}_f(x, s)}{dx^2} - \bar{k}^2 \bar{\varepsilon}_f(x, s) = -\bar{k}^2 \bar{\varepsilon}_m(x, s). \quad (23)$$

其通解为:

$$\bar{\varepsilon}_f(x, s) = C_1 e^{\bar{k}s} + C_2 e^{-\bar{k}s} + \bar{\varepsilon}_m(x, s). \quad (24)$$

根据边界条件:

$$\varepsilon_f\left(-\frac{L}{2}, t\right) = \varepsilon_f\left(\frac{L}{2}, t\right) = 0, \quad (25)$$

通过 Laplace 变换得:

$$\bar{\varepsilon}_f\left(-\frac{L}{2}, s\right) = \bar{\varepsilon}_f\left(\frac{L}{2}, s\right) = 0. \quad (26)$$

将式(26)带入式(24),得:

$$C_1 = C_2 = -\frac{\bar{\epsilon}_m(x, s)}{2\cosh(\bar{k}L/2)}. \quad (27)$$

将式(27)带入式(24),得:

$$\bar{\epsilon}_f(x, s) = \left[1 - \frac{\cosh(\bar{k}x)}{\cosh(\bar{k}L/2)}\right] \bar{\epsilon}_m(x, s). \quad (28)$$

基体受到应力  $\delta(t) = \sigma_0 H(t)$  作用下,其中  $H(t)$  定义为:

$$H(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}. \quad (29)$$

则基体应变为:

$$\bar{\epsilon}_m(x, s) = \epsilon_0 \cdot \frac{1}{s}. \quad (30)$$

光纤光栅应变传递率可表示为:

$$\alpha(x, t) = \frac{\epsilon_f(x, t)}{\epsilon_0} = L^{-1} \left[ \frac{1}{s} \left( 1 - \frac{\cosh(\bar{k}x)}{\cosh(\bar{k}L/2)} \right) \right]. \quad (31)$$

由于 FBG 传感器监测的应变为粘贴长度内的平均应变,所以 FBG 传感器的应变传递率可以表示为:

$$\bar{\alpha}(x, t) = \frac{\bar{\epsilon}_f(x, t)}{\epsilon_0} = L^{-1} \left[ \frac{1}{s} \left( 1 - \frac{2\sinh(\bar{k}L/2)}{\bar{k}L\cosh(\bar{k}L/2)} \right) \right]. \quad (32)$$

由式(31)可知,由于胶黏剂蠕变的影响,在长期载荷作用下 FBG 传感器的应变传递率随时间变化。将胶黏剂的黏弹性模型简化为标准线性固体模型,模型由一个 Kelvin 模型和一个弹簧串联而成,如图 4 所示。 $E_{a1}$  和  $E_{a2}$  分别为 Kelvin 单元和弹簧单元的弹性模量, $\eta_1$  为 Kelvin 单元的黏度系数<sup>[13]</sup>。

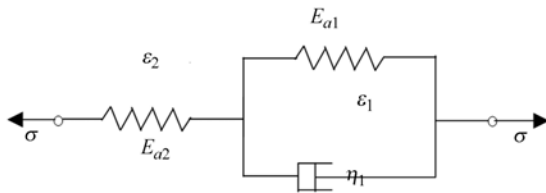


图 4 胶黏剂标准线性固体模型

Fig. 4 Standard linear solid model of adhesive

对于标准线性固体模型,在应力  $\sigma(t) = \sigma_0 H(t)$  作用下可得:

$$B_a(t) = \frac{1}{E_{a2}} + \frac{1}{E_{a1}}(1 - e^{-t/\tau}), \quad (33)$$

其中  $\tau = \eta_1 / E_{a1}$ ,为松弛时间。

瞬时蠕变柔量为:

$$B_a(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \bar{B}_a(s) = \frac{1}{E_{a2}}. \quad (34)$$

准静态蠕变柔量为:

$$B_a(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0^+} s \bar{B}_a(s) = \frac{E_{a1} + E_{a2}}{E_{a1} E_{a2}}. \quad (35)$$

则由式(22)和式(32)可得 FBG 瞬时和准静态的应变传递率分别为:

$$\bar{\alpha}(0^+) = \frac{\bar{\epsilon}_f(x, 0^+)}{\epsilon_0} = 1 - \frac{2\sinh(k_0 L/2)}{k_0 L \cosh(k_0 L/2)}, \quad (36)$$

$$\bar{\alpha}(\infty) = \frac{\bar{\epsilon}_f(x, \infty)}{\epsilon_0} = 1 - \frac{2\sinh(k_\infty L/2)}{k_\infty L \cosh(k_\infty L/2)}, \quad (37)$$

其中:  $k_0 = \lim_{s \rightarrow \infty} \bar{k}$ ,  $k_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} \bar{k}$ 。

### 3 粘贴参数影响分析

光纤光栅的参数为常量,取 FBG 的弹性模量  $E_f = 72$  GPa,纤芯半径  $r_f = 0.0625$  mm,基体材料为 45# 钢,剪切模量  $G_m = 80$  GPa。选定的胶黏剂的弹性模量和泊松比可看作常量,取  $E_{a1} = E_{a2} = 3$  GPa,泊松比  $\mu = 0.35$ 。由推导可知,影响 FBG 应变传递的因素包括胶黏剂的粘贴长度  $L$ ,粘贴高度  $H$ ,粘贴宽度  $D$  和粘贴中间层厚度  $h$ 。

#### 3.1 粘贴长度的影响

图 5 所示为粘贴长度对 FBG 应变传递率的影响,瞬时和准静态的应变传递率都随粘贴长度的增加而显著变大,并且粘贴长度越大,FBG 瞬时应变传递率相对准静态应变传递率的变化减

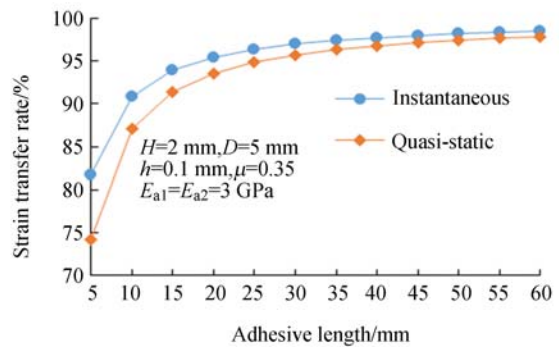


图 5 粘贴长度对瞬时和准静态应变传递率的影响

Fig. 5 Influence of adhesive length on strain transfer rates of instantaneous and quasi-static strains

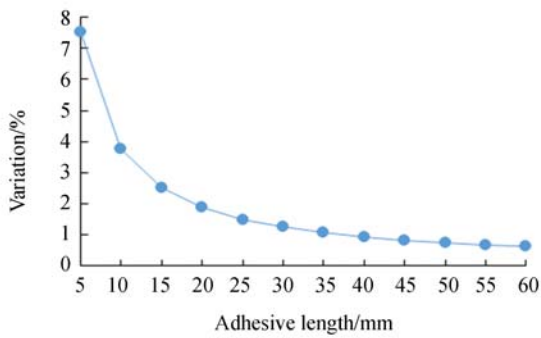


图 6 粘贴长度对应变传递率变化的影响

Fig. 6 Influence of adhesive length on variation of strain transfer rate

小,如图 6 所示。在粘贴长度为 5 mm 时应变传递率的相对变化接近 8%,而粘贴长度在 30 mm 以上时,应变传递率的相对变化减小到 1%左右,即增加粘贴长度可以减小胶黏剂蠕变对应变传递率的影响。

### 3.2 粘贴中间层厚度的影响

如图 7 所示,随着中间层厚度的增加,瞬时和

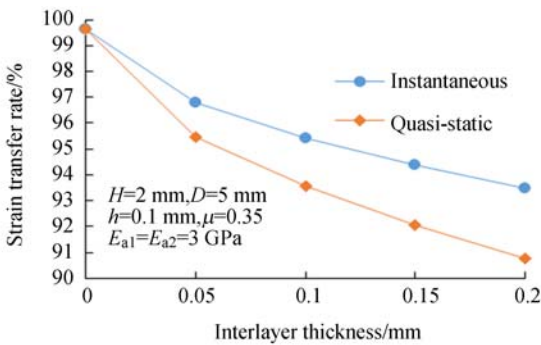


图 7 粘贴中间层厚度对瞬时和准静态应变传递率的影响

Fig. 7 Influence of interlayer thickness on strain transfer rates of instantaneous and quasi-static strains

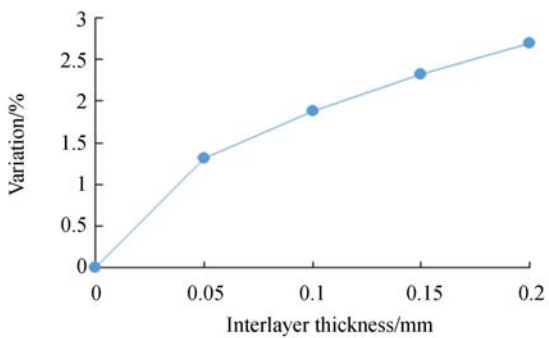


图 8 粘贴中间层厚度对应变传递率变化的影响

Fig. 8 Influence of interlayer thickness on variation of strain transfer rate

准静态的应变传递率都逐渐降低。如图 8 所示,FBG 的瞬时应变传递率与准静态应变传递率的相对变化量随中间层厚度的增加而增大。当中间层厚度为 0 时,瞬时应变与准静态应变一致,此时胶黏剂蠕变不影响应变传递,FBG 应变传递率接近 1。

### 3.3 粘贴高度/宽度的影响

图 9 为粘贴高度对应变传递率的影响,图 10 为瞬时应变传递率与准静态应变传递率的差值与粘贴高度的关系。从图中可知,FBG 瞬时和稳态的应变传递率随粘贴层高度的变化都非常小。

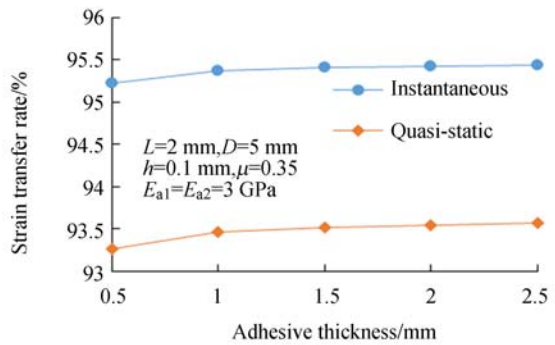


图 9 粘贴高度对瞬时和准静态应变传递率的影响

Fig. 9 Influence of adhesive thickness on strain transfer rates of instantaneous and quasi-static strains

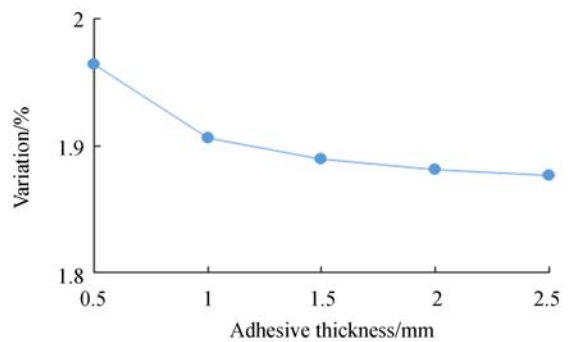


图 10 粘胶高度对应变传递率变化的影响

Fig. 10 Influence of adhesive thickness on variation of strain transfer rate

图 11 所示为粘贴宽度对应变传递率的影响,图 12 为瞬时应变传递率相对准静态应变传递率的变化值与粘贴宽度的关系,其变化非常小。

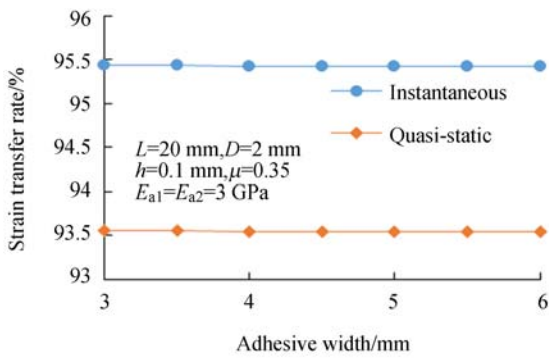


图 11 粘贴宽度对瞬时和准静态应变传递率的影响  
Fig. 11 Influence of adhesive width on strain transfer rates of instantaneous and quasi-static strains

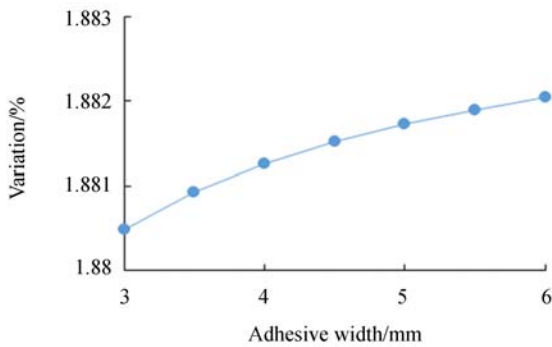


图 12 粘贴宽度对应变传递率变化的影响  
Fig. 12 Influence of adhesive width on variation of strain transfer rate

### 4 实验分析

实验中将光纤光栅粘贴在等强度梁表面,等强度梁尺寸如图 13 所示,胶黏剂为 302 型 AB 胶,光纤光栅的栅长为 10 mm,光栅处无涂覆层,实验系统如图 14 所示。由分析可知,粘贴长度,粘贴高度和粘贴中间层厚度是影响应变传递的主要因素,因此这 3 个参数是实验控制的主要对象。

胶黏剂蠕变分为瞬时蠕变,稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段。在温度较低时,稳态蠕变时间非常长且变化较小。张军等研究了环氧树脂胶黏剂对接结构的蠕变特性,指出室温下环氧树脂胶黏剂受到恒定载荷时,在 0.5 h 内胶黏剂蠕变已进入稳态蠕变阶段,即其应变在 0.5 h 内发生较大变化,0.5 h 后胶黏剂应变随时间的变化较小<sup>[14]</sup>。考虑到 FBG 对温度非常敏感,在长期监测时无法

排除温度对 FBG 波长变化的影响,故实验只恒定加载 0.5 h,主要研究瞬时蠕变对 FBG 应变传递的影响。实验中使用 FBG 解调仪在加载前开始记录 FBG 中心波长,数据采集频率为 1 000 Hz,然后在等强度梁端部依次瞬时施加 4.5,6.7,9 kg 负载,加载时尽可能保证冲击较小,每次加载持续时间 0.5 h。

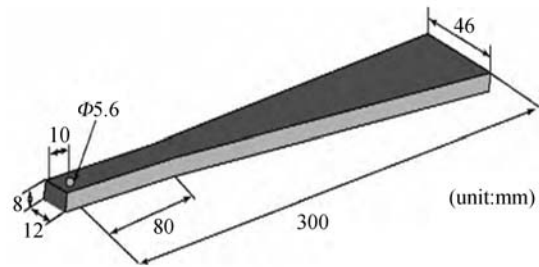


图 13 等强度梁三维尺寸图  
Fig. 13 Three dimensional chart of cantilever beam

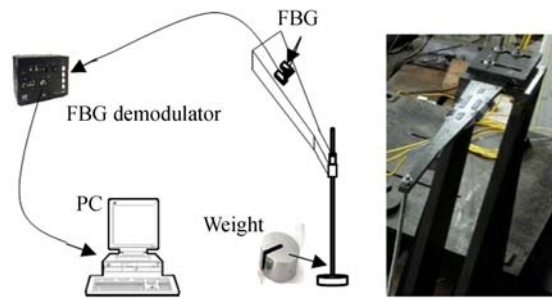


图 14 实验系统与实物图  
Fig. 14 Schematic and physical diagrams of test system

#### 4.1 粘贴长度实验

实验中粘贴高度为 1 mm,宽度为 5 mm,中间层厚度约为 0.1 mm,粘贴长度分别为 15,20,30,40 mm。图 15 所示为加载 9 kg 负载,粘贴长度为 40 mm 时 FBG 传感器中心波长突变的变化部分。在加载瞬间光纤光栅的中心波长发生突变达到最大值,然后随时间的减小趋于稳定。

瞬时波长变化量和准静态波长变化量分别为:

$$\Delta\lambda(0) = \lambda_{\max} - \lambda_0, \quad (38)$$

$$\Delta\lambda(\infty) = \lambda_{\infty} - \lambda_0, \quad (39)$$

其中: $\lambda_0$  为 FBG 的初始波长, $\lambda_{\max}$  为瞬时最大波长, $\lambda_{\infty}$  为准静态波长。

瞬时应变和准静态应变分别为:

$$\epsilon_0 = \frac{\Delta\lambda(0)}{\lambda_0(1 - P_e)}, \quad (40)$$

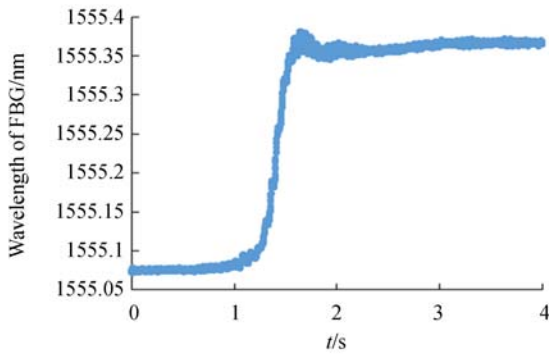


图 15 FBG 波长随时间的变化

Fig. 15 Variation of FBG wavelength with time

$$\epsilon_{\infty} = \frac{\Delta\lambda(\infty)}{\lambda_0(1-P_e)}, \quad (41)$$

其中:  $P_e$  为光纤光栅的有效弹光系数, 石英光栅常取  $P_e=0.22$ 。

等强度梁表面的应变处处相等, 由图 14 可得其理论值为:

$$\epsilon = \frac{6Fx}{Ebh^2} \approx 2.8F\mu\epsilon, \quad (42)$$

其中:  $F$  为等强度梁端部负载,  $x$  为光纤光栅粘贴中心与加载端的距离,  $E$  为等强度梁的弹性模量,  $h$  为等强度梁的厚度,  $b$  为光纤光栅粘贴中心处等强度梁的截面宽度。

FBG 瞬时和准静态应变传递率为:

$$\frac{\alpha(0^+)}{\epsilon} = \frac{\epsilon_0}{\epsilon} = \frac{\Delta\lambda(0)}{2.8F\lambda_0(1-P_e)} \times 10^6, \quad (43)$$

$$\frac{\alpha(\infty)}{\epsilon} = \frac{\epsilon_{\infty}}{\epsilon} = \frac{\Delta\lambda(\infty)}{2.8F\lambda_0(1-P_e)} \times 10^6. \quad (44)$$

如图 16 所示, 不同粘贴长度, 不同负载时的 FBG 传感器瞬时应变传递率与准静态应变传递率, 瞬时应变传递率和准静态应变传递率都随着粘贴长度的增加而上升。如图 17 所示, 瞬时应变传递率相对准静态应变传递率的变化值随粘贴长度的增加而下降。在粘贴长度为 15 mm 时, 瞬时应变传递率和准静态应变传递率的相对变化较大, 接近 7% 左右; 在粘贴长度为 40 mm 时, 瞬时应变传递率和准静态应变传递率的相对变化减小到 4% 左右。

#### 4.2 粘贴中间层厚度实验

在悬臂梁上粘贴 5 个 FBG, 粘贴长度为 30 mm, 宽度为 5 mm, 高度为 2 mm, 粘贴时首先在悬臂梁上涂一定厚度的胶黏剂, 待其半凝固时, 用游标卡尺测得其厚度, 用刀片刮去表层一定厚度,

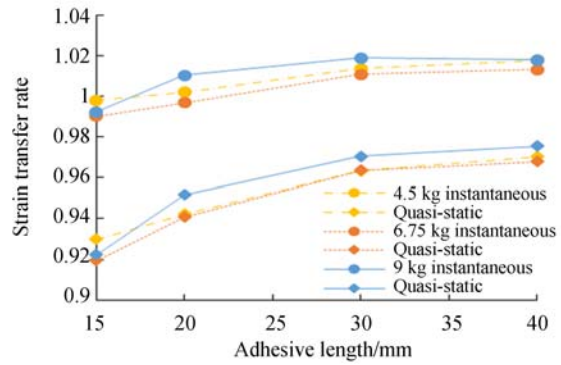


图 16 FBG 瞬时和准静态应变传递率与粘贴长度的关系

Fig. 16 Strain transfer rates of instantaneous strain and quasi-static strain versus adhesive length respectively

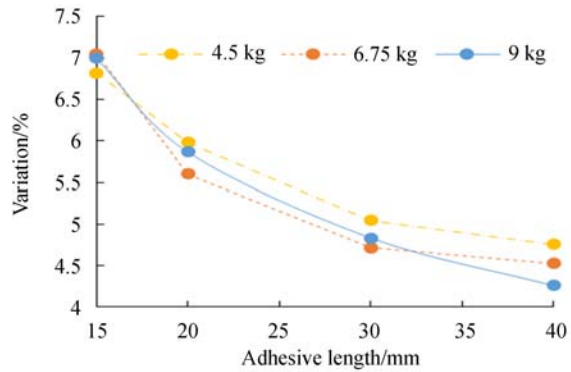


图 17 FBG 应变传递率变化与粘贴长度的关系

Fig. 17 Variation of strain transfer rate versus adhesive length

分别控制最终厚度约为 0.05, 0.2, 0.5, 0.8 和 1.2 mm, 然后将光栅放在胶层上粘贴, 控制总粘贴高度约为 2 mm。图 18 为不同负载下, FBG 瞬时和准静态应变传递率随中间层厚度的变化曲线。图中 FBG 瞬时和准静态的应变传递率随中间层厚度的增加而增大, 这与理论分析相反, 其原因是理论分析中假设基体受到轴向力作用, 而实验中悬臂梁受弯矩作用, 这导致粘贴中间层厚度的变化引起了光纤光栅的纤芯中心与被测基体中性层距离的改变, 进而导致由式 (42) 得到的理论应变随中间层厚度的增加而减小, 以及 FBG 的应变传递率随中间层厚度的增加而增大<sup>[12]</sup>。图 19 为 FBG 应变传递率变化值随中间层厚度的变化曲线, 瞬时和准静态应变传递率的相对变化随中间层厚度的增加而变大, 这与理论分析相吻合, 进

一步说明减小中间层厚度可以降低胶黏剂瞬时蠕变对 FBG 应变传递率的影响。

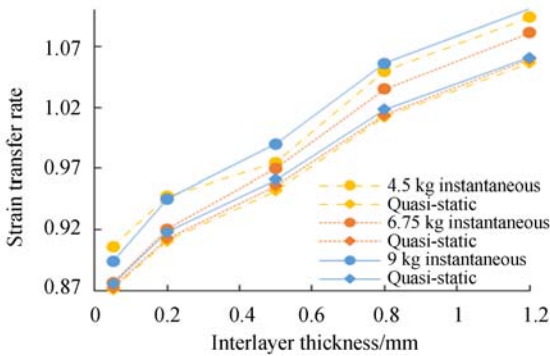


图 18 粘贴中间层厚度对瞬时和准静态应变传递率的影响

Fig. 18 Influence of interlayer thickness on strain transfer rates of instantaneous and quasi-static strains

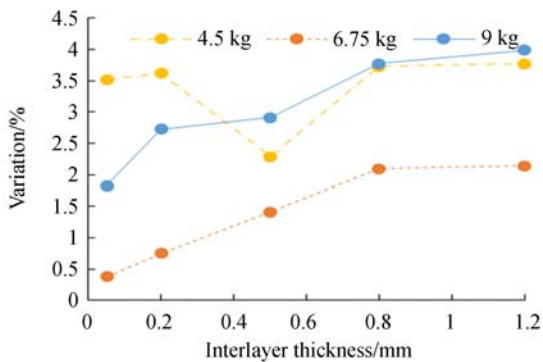


图 19 粘贴中间层厚度对应变传递率变化的影响

Fig. 19 Influence of interlayer thickness on variation of strain transfer rate

### 4.3 粘贴高度实验

在悬臂梁上粘贴 5 个 FBG, 粘贴长度为 30 mm, 宽度为 5 mm, 将 FBG 紧贴在悬臂梁上, 中间层厚度约为 0.1 mm, 待胶黏剂半凝固时用刀片刮去一定厚度, 最终测得粘贴总厚度为 0.2, 1, 1.4, 2.0 和 2.6 mm。

图 20 所示为不同负载下, FBG 瞬时和准静态应变传递率随中间层厚度的变化曲线, 图 21 为 FBG 应变传递率变化值随粘贴高度的变化曲线。由图可知, FBG 瞬时应变传递率在 95% 左右变化, 准静态应变传递率在 93%~94%, FBG 应变传递率随粘贴高度的变化较小, 并且 FBG 瞬时和准静态应变传递率的相对变化随粘贴高度的增加呈下降趋势。

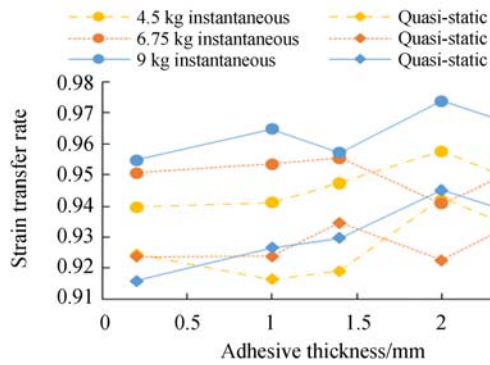


图 20 粘贴高度对瞬时和准静态应变传递率的影响

Fig. 20 Influence of adhesive thickness on strain transfer rates of instantaneous and quasi-static strains

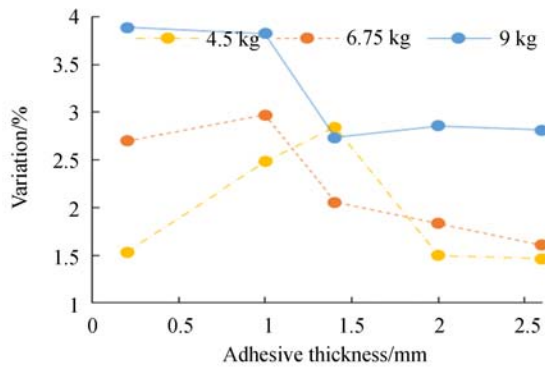


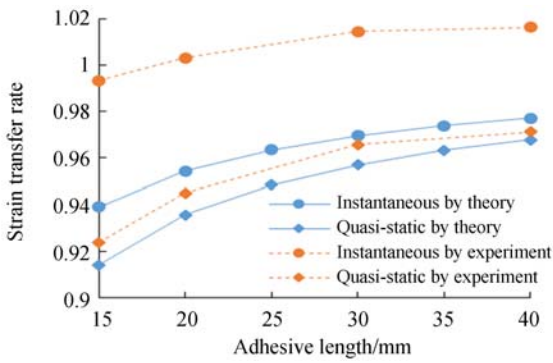
图 21 粘胶高度对应变传递率变化的影响

Fig. 21 Influence of adhesive thickness on variation of strain transfer rate

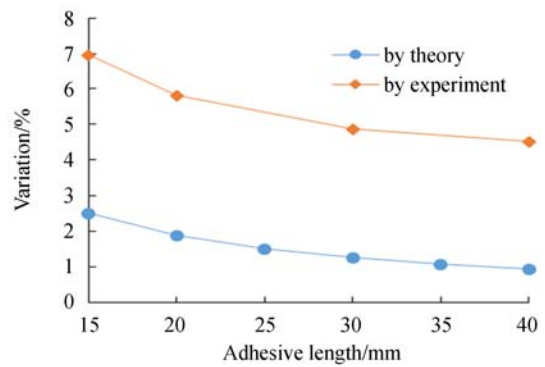
## 5 讨论

实验中对不同负载下的瞬时和准静态的应变传递率分别求平均值, 再与理论应变传递率对比, 结果如图 22 所示。图 23 所示为实验中的平均瞬时应变传递率与平均准静态应变传递率的差值与理论应变传递率相对变化的对比结果。

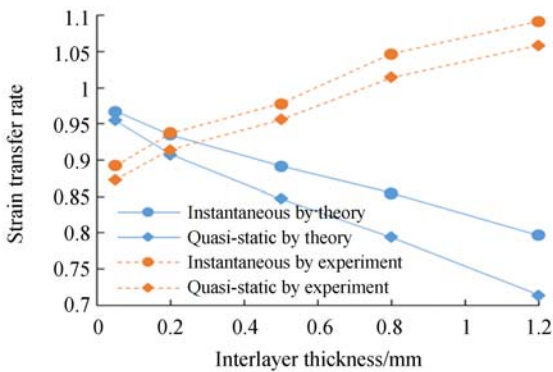
由图 22(a)可知, 瞬时和准静态的应变传递率随粘贴长度的变化趋势与理论一致, 随粘贴长度的增大, FBG 应变传递率增加。由图 23(a)可知, 实验的瞬时应变传递率相对准静态应变传递率的变化值随粘贴长度的变化趋势与理论一致, 在粘贴长度为 15 mm 时, 瞬时和准静态的应变传递率相差接近 7%, 胶黏剂的瞬时蠕变对应变传递有较大影响。



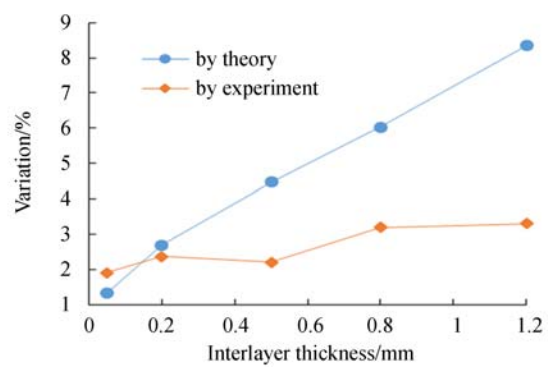
(a) 粘贴长度  
(a) Adhesive length



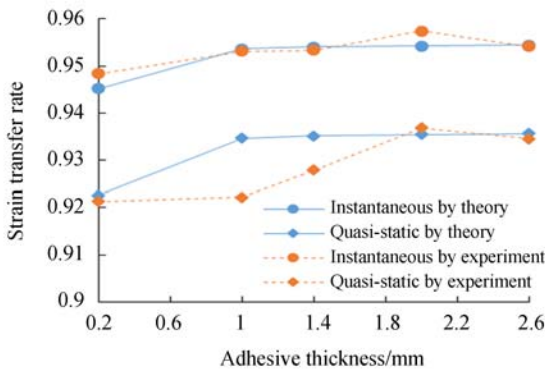
(a) 粘贴长度  
(a) Adhesive length



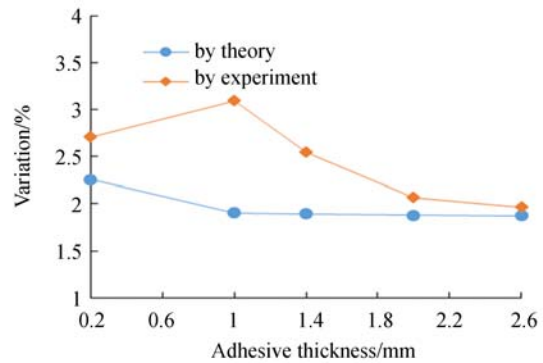
(b) 中间层厚度  
(b) Interlayer thickness



(b) 中间层厚度  
(b) Interlayer thickness



(c) 粘贴高度  
(c) Adhesive thickness



(c) 粘贴高度  
(c) Adhesive thicknesses

图 22 不同粘贴参数下的应变传递率

Fig. 22 Average strain transfer rates of instantaneous strain and quasi-static strain with different adhesive parameters

由图 22(b)可知,当被测体受弯矩作用时,FBG 应变传递率随粘贴中间层厚度的增加而增加,产生应变增敏的效果。由图 23(b)可知,瞬时

图 23 不同粘贴参数下的应变传递率变化

Fig. 23 Average variation of strain transfer rates with different adhesive parameters

和准静态应变传递率的相对变化随中间层厚度的增加而减小,与理论吻合。由图 22(c)和图 23(c)可知,粘贴高度对 FBG 应变传递的影响较小。

实验结果与理论存在一定误差,其主要原因为:(1)理论假设基体受力为轴向力,而实验采用

的基体为受弯件,受力方式不一致。在受弯件上FBG应变传递率随粘贴中间层厚度的增加而上升<sup>[12]</sup>。受中间层厚度的影响,实验得到的应变传递率相比理论值偏大;(2)由于实验条件限制,实验中加载一定的冲击,瞬时应变传递率相比理论值偏大;(3)理论分析中的假设物理参数与实际有一定误差;(4)实验中粘贴参数控制与理论有一定误差。

## 6 结 论

本文将粘贴层假设为线黏弹性材料,建立了更符合实际情况的粘贴式FBG应变传递模型,将粘贴层简化为三参量固体模型,得到了粘贴式FBG的瞬时和准静态的应变传递关系。理论分

析了胶黏剂的粘贴长度、粘贴宽度、粘贴高度和粘贴中间层厚度对瞬时和稳态应变传递率的影响,并通过实验分析了这些参数对FBG应变传递率变化的影响。实验和理论分析结果表明:胶黏剂的粘贴长度和粘贴中间层厚度是影响瞬时和准静态应变传递率变化的主要因素。当粘贴长度为15 mm时,瞬时应变传递率相对准静态应变传递率的变化达到7%;当粘贴长度在30 mm以上时,应变传递率的相对变化减小到4%,粘贴中间层厚度接近0时FBG应变传递率变化值小于2%;当中间层厚度达到1.2 mm时,FBG应变传递率变化值达到3%以上。在使用粘贴式FBG测量应变时,为减小胶黏剂蠕变对应变传递的影响,应该增大粘贴长度,并将光纤光栅紧贴在被测基体表面以减小粘贴中间层的厚度。

### 参考文献:

- [1] 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.  
JIANG D SH, HE W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(4):420-430. (in Chinese)
- [2] LEE J Y, RYU C Y, KOO B Y, et al.. In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2003, 12(1):147-155.
- [3] KIM K, LEE J M, HWANG Y. Determination of engineering strain distribution in a rotor blade with fiber Bragg grating array and a rotary optic coupler [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 758-762.
- [4] MIZUTANI Y, GROVES R M. Multi-functional measurement using a single FBG sensors [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(9): 1489-1498.
- [5] LIU M Y, ZHANG ZH J, ZHOU Z D, et al.. A new method based on fiber Bragg grating sensor for the milling force measurement [J]. *Mechatronics*, 2015,33:22-29.
- [6] ANSARI F, LIBO Y. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 385-394.
- [7] 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.  
LI D SH, 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. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] 孙丽,岳川云,宋岩升. 晶片式光纤布拉格光栅传感器应变传递分析[J]. 光电子·激光,2013,24(5): 849-854.  
SUN L, YUE CH Y, SONG Y SH. Strain transfer analysis of substrate fiber Bragg grating sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(5): 849-854. (in Chinese)
- [10] 李红,祝连庆,刘峰,等. 裸光纤光栅贴片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.  
LI H, ZHU L Q, LIU F, et al.. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014,35(8): 1744-1750. (in Chinese)
- [11] 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.  
TIAN SH ZH, 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. (in Chinese)
- [12] 李天梁,谭跃钢,张翔,等. 受弯件上粘贴型光纤布

拉格光栅的应变传递规律[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(5):1254-1264.

LI T L, TAN Y G, ZHANG X, *et al.*. Strain transfer factors of passed FBG on bending part surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1254-1264. (in Chinese)

[13] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1990.

YANG T Q. *Theory of Viscoelasticity* [M]. Wu-

han: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990. (in Chinese)

[14] 张军,杨军,张永祥. 环氧树脂胶粘剂及其胶接件对接结构的蠕变性能研究[J]. 中国胶粘剂,2014, 23(9):497-501.

ZHANG J, YANG J, ZHANG Y X. Study on creep property of epoxy resin adhesive and its glue joint docking structure [J]. *China Adhesives*, 2014, 23(9): 497-501. (in Chinese)

#### 作者简介:



季冬亮(1990—),男,河南孟州人,硕士研究生,2014年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事数控机床切削力监测技术的研究。E-mail: 1534150508@qq.com

#### 导师简介:



刘明尧(1963—),男,教授,博士生导师,1984于郑州轻工业学院获得学士学位,1989年于重庆大学获得硕士学位,2002年于中国科学院沈阳自动化研究所获得博士学位,主要从事数控机床状态监测、机器人技术、机电一体化技术等方面研究。E-mail: lmylyf@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)