

非轴向力下粘贴式 FBG 传感器应变传递机制研究^①李银玉^{②*} 邱 野^{③**} 王全保^{**} 赵海涛^{**}

(* 沈阳理工大学应用技术学院 沈阳 113122)

(** 上海交通大学航空航天学院 上海 200240)

摘 要 研究了结构监测中粘贴式光纤布拉格光栅(FBG)传感器轴线方向与基体结构主应力方向成一定角度时,传感器测量的应变与基体结构实际应变的关系。建立了非轴向力作用下粘贴式 FBG 传感器应变传递方程和应变传递理论模型,并得到沿传感器标距各点的应变传递率、最大应变传递率和平均应变传递率。通过有限元仿真验证了理论模型的有效性,通过参数分析得到平均应变传递率随传感器角度变化的规律。研究结果表明:平均应变传递率随传感器角度的增大而减小,当传感器角度为零时,平均应变传递率最大,且方程形式与轴向力情况相同,因此推导所得的方程可归结为平均应变传递率的一般表达式;当传感器角度为 90°时,平均应变传递率为零,此时传感器不能测出基体结构的应变。给出的理论模型及仿真结果对指导粘贴式 FBG 传感器在结构健康监测中的实际应用有参考价值。

关键词 光纤布拉格光栅(FBG)传感器,非轴向力,粘贴式,应变传递,平均应变传递率

0 引 言

表面粘贴式^[1]封装是国际上光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器的主流封装形式之一,主要应用于船舶、航空航天结构^[2,3]的应变监测。当传感器粘贴到被测结构表面后,由于光纤保护层及黏结剂的存在,且它们与裸光纤的弹性模量相差较大,导致光纤测得的应变与被测结构实际应变之间存在一个传递系数^[4]。1991 年, Nanni^[5]首次通过试验方法提出了 FBG 传感器与混凝土之间存在的应变传递系数;1992 年, Pak^[6]研究了考虑涂敷层的 FBG 传感器埋入基体结构后,从基体结构到光纤传感器的应变传递关系;1998 年, Ansari 等^[7]根据短纤维复合材料的剪滞理论推导出 FBG 传感器的应变传递方程,实现了对实际工程中光纤传感器应变传递系数的量化计算;2003 年,周智^[8]研究了 FBG 传感器的界面应变传递机制和误差修正,并推导了相应的多层界面应变传递和误差修正公式。

2012 年, Wang 等^[9]总结了埋入式 FBG 传感器应变传递机制的研究成果,推导了粘贴式 FBG 传感器六层结构的应变传递方程及平均应变传递率方程。以往对粘贴式 FBG 传感器应变传递机制研究的一个主要假设是传感器轴向与基体结构主应力方向平行^[10-12]。然而,在结构健康监测的实际应用中,粘贴式 FBG 传感器的主应力方向有时不是沿着传感器的轴向,而是与其成一定角度,主要原因是:(1)实际结构受力情况与理论计算的有出入;(2)传感器受实际工程的限制无法安装在结构主应力方向上;(3)传感器在长期使用中其结构主应力方向发生了变化;(4)实际应用中会受到随机荷载的影响。例如,在结构健康监测实际工程中,结构的设计和施工机械的布置有时没有考虑到安装传感器所需要的空间,无法将 FBG 传感器安装在结构的主应力方向上,只能根据具体情况将其安装在一个易于粘贴的方向上。综上所述,被测结构主应力方向与 FBG 传感器轴向成一定角度的情况是不可避免的,因此研究非轴向力作用下粘贴式 FBG 的应变传递机制具

① 863 计划(2011AA7051001)和国家自然科学基金(51205253)资助项目。

② 女,1965 年生,教授;研究方向:机械设计及理论;E-mail: liyinyu000@163.com

③ 通讯作者,E-mail: qiuye@sjtu.edu.cn

(收稿日期:2012-07-19)

有重要的理论和实际意义。

为了研究非轴向力下 FBG 传感器的应变传递机制,本文提出了粘贴式 FBG 传感器轴向与基体结构主应力方向成一定角度的分析模型,推导出了应变传递方程,并得到了沿传感器标距各点的应变传递率、最大应变传递率和平均应变传递率。在此基础上,对所得理论结果进行了有限元仿真验证,同时对平均应变传递率随传感器角度的变化规律进行了分析。

1 应变传递分析

非轴向力作用下粘贴式 FBG 传感器俯视图如图 1 所示。其中,被测结构长度为 L_m , 宽度为 D_m , 厚度为 H_m , 其受到的主应力为 σ , 方向沿其长度方向, FBG 粘贴方向与被测结构的主应力方向成 α 角 ($0 < \alpha < \pi/2$)。

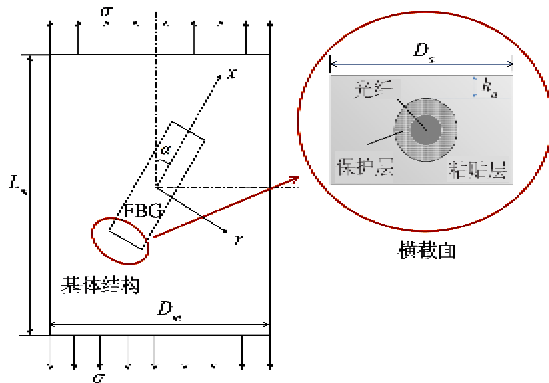


图 1 非轴向力作用下粘贴式 FBG 俯视图

本节模型的分析采用的假设如下^[13]:

(1) 组成光纤的纤芯和包层的材料属性相同, 在分析时当作同一种材料处理。由于光栅是在光纤上进行激光刻写后形成的, 其特性改变不大, 因此也将两者等同处理。

(2) 各层材料(包括光纤、保护层、粘贴层和基体)均为线弹性, 且各向同性。

(3) 光纤的变形是由基体通过中间层的剪切变形来传递的, 而粘贴层、保护层和光纤不直接受力, 且只有轴向位移, 没有径向位移。

(4) 由于 FBG 传感器粘贴的影响, 基体结构在一定范围内也存在剪应力。

(5) 传感器各层(光纤-保护层-粘贴层-基体结构)交界面结合紧密, 没有脱落。

光纤、保护层、粘贴层和基体结构的受力情况如图 2 所示。其中, 下标 f 、 p 、 a 、 m 分别表示与光纤、保护层、粘贴层和基体结构相关的物理量; E 、 G 、 λ 分别表示弹性模量、剪切模量和泊松比; u 和 w 分别表示轴向位移和径向位移; σ 、 τ 、 ε 、 γ 分别表示轴向应力、剪应力、应变和剪应变; L_f 、 h_a 、 D_a 分别表示半粘贴长度、粘贴层上部厚度和粘贴层宽厚; L_m 、 D_m 、 H_m 分别表示基体结构的长度、宽度和厚度; r 表示沿光纤径向方向长度的变量。

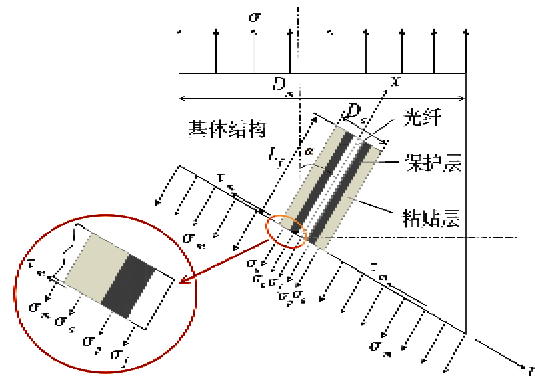


图 2 非轴向力作用下粘贴式 FBG 各层受力

对光纤微元段进行受力分析, 得

$$\pi r_f^2 \sigma_f = \pi r_f^2 (\sigma_f + d\sigma_f) + 2\pi r_f dx \tau(x, r_f) \quad (1)$$

即

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{\tau(x, r_f)}{r_f} \quad (2)$$

同理, 分别对保护层和粘贴层微元段及整体结构 (y 方向) 进行受力分析, 得

$$\frac{d\sigma_p}{dx} = \frac{2[r_f \tau(x, r_f) - r_p \tau(x, r_p)]}{r_p^2 - r_f^2} \quad (3)$$

$$\frac{d\sigma_a}{dx} = \frac{2\pi r_p \tau(x, r_p) - \tau(x, r_a) D_a}{D_a(h_a + r_p + r_a) - \pi r_p^2} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \sigma \cos^2 \alpha - \frac{\cos \alpha}{D_m H_m} \{ \pi r_f^2 \sigma_f + \pi(r_p^2 - r_f^2) \sigma_p + [D_a(h_a + r_p + r_a) - \pi r_p^2] \sigma_a \} \quad (5)$$

由式(2)和(3), 得

$$\tau(x, r_p) = -\frac{r_f^2}{2r_p} \frac{d\sigma_f}{dx} - \left(\frac{r_p}{2} - \frac{r_f^2}{2r_p} \right) \frac{d\sigma_p}{dx} \quad (6)$$

由式(4)和(6), 得

$$\tau(x, r_a) = -\frac{2\pi r_f^2}{D_a} \frac{d\sigma_f}{dx} - \frac{\pi(r_p^2 - r_f^2)}{D_a} \frac{d\sigma_p}{dx} - (h_a + r_p + r_a - \frac{\pi r_p^2}{D_a}) \frac{d\sigma_a}{dx} \quad (7)$$

由式(6)和(7)可知

$$\tau(x, r) = \begin{cases} -\frac{r_f^2}{2r} \frac{d\sigma_f}{dx} - \left(\frac{r}{2} - \frac{r_f^2}{2r}\right) \frac{d\sigma_p}{dx} & (r_f < r < r_p) \\ -\frac{2\pi r_f^2}{D_a} \frac{d\sigma_f}{dx} - \frac{\pi(r_p^2 - r_f^2)}{D_a} \frac{d\sigma_p}{dx} \\ - (h_a + r_p + r - \frac{\pi r_p^2}{D_a}) \frac{d\sigma_a}{dx} & (r_p < r < r_a) \end{cases} \quad (8)$$

张立群等^[14]提出了短纤维橡胶复合材料应变传递的剪滞理论,即从基体到纤维的负荷传递依靠两者间实际位移的差异。因此光纤和基体结构的相对位移可以根据中间层(包括保护层和粘贴层)的剪切应变 γ 来确定,可得

$$u_m - u_f = \int_{r_f}^{r_p} \gamma_p(r) dr + \int_{r_p}^{r_m} \gamma_a(r) dr \quad (9)$$

式中, u_f 和 u_m 分别表示光纤和基体结构上表面沿 x 方向的位移, γ_p 和 γ_a 分别表示保护层和粘贴层的剪应变。将式(9)两边同时对 x 求导,并将式 $\sigma = E\varepsilon$ 及 $\tau = G\gamma$ 代入式(9)得

$$\frac{\sigma_m}{E_m} - \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{1}{G_p} \int_{r_f}^{r_p} \frac{d\tau_p(r)}{dx} dr + \frac{1}{G_a} \int_{r_p}^{r_m} \frac{d\tau_a(r)}{dx} dr \quad (10)$$

把式(5)和(8)分别代入式(10),得到光纤、保护层、粘贴层和基体结构的应力关系式,并积分,得

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma \cos^2 \alpha}{E_m} - \frac{\cos \alpha}{D_m H_m E_m} \{ \pi r_f^2 \sigma_f + \pi(r_p^2 - r_f^2) \sigma_p \\ & + [D_a(h_a + r_p + r_a) - \pi r_p^2] \sigma_a \} - \frac{\sigma_f}{E_f} \\ & = -\frac{1}{G_p} \left[\frac{1}{2} r_f^2 \ln(r_p/r_f) \frac{d\sigma_f^2}{dx^2} + \frac{1}{4} (r_p^2 - r_f^2) \frac{d\sigma_p^2}{dx^2} \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{2} r_f^2 \ln(r_p/r_f) \frac{d\sigma_p^2}{dx^2} \right] - \frac{r_m - r_p}{G_a} \left[\frac{\pi r_f^2}{D_a} \frac{d\sigma_f^2}{dx^2} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\pi(r_p^2 - r_f^2)}{D_a} \frac{d\sigma_p^2}{dx^2} + (h_a - \frac{\pi r_p^2}{D_a} + \frac{3}{2} r_p + \frac{1}{2} r_m) \frac{d\sigma_a^2}{dx^2} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

由于光纤的长径比很大,可忽略 Poisson 效应^[15]。将式 $\sigma = E\varepsilon$ 分别代入式(11)中($\varepsilon = du/dx$ 表示轴向应变, $u = u(x)$ 表示轴向位移),又由于光纤与其他各层同步变形,可认为 $\frac{d\varepsilon_a^2}{dx^2} \cong \frac{d\varepsilon_p^2}{dx^2} \cong \frac{d\varepsilon_f^2}{dx^2}$, 并假定 $\varepsilon_f \cong \varepsilon_p$ 及 $\varepsilon_m \cong \varepsilon_a$, 得到式(11)的简化形式为

$$\left\{ -\left[\frac{r_f^2 \ln(r_p/r_f)}{2G_p} + \frac{\pi r_f^2 (r_m - r_p)}{G_a D_a} \right] E_f \right.$$

$$\begin{aligned} & - \left[\frac{r_p^2 - r_f^2 - 2r_f^2 \ln(r_p/r_f)}{4G_p} + \frac{\pi(r_p^2 - r_f^2)(r_m - r_p)}{G_a D_a} \right] E_p \\ & - \frac{r_m - r_p}{G_a} \left(h_a - \frac{\pi r_p^2}{D_a} + \frac{3}{2} r_p + \frac{1}{2} r_m \right) E_a \} \frac{d\varepsilon_f^2}{dx^2} \\ & - \left\{ \frac{\cos \alpha}{D_m H_m E_m} [\pi r_f^2 E_f + \pi(r_p^2 - r_f^2) E_p] + 1 \right\} \varepsilon_f \\ & = - \left\{ \cos^2 \alpha - \frac{\cos \alpha E_a}{D_m H_m E_m} [D_a(h_a + r_p + r_a) - \pi r_p^2] \right\} \varepsilon_m \end{aligned} \quad (12)$$

令

$$\begin{aligned} A &= - \left[\frac{r_f^2 \ln(r_p/r_f)}{2G_p} + \frac{\pi r_f^2 (r_m - r_p)}{G_a D_a} \right] E_f \\ & - \left[\frac{r_p^2 - r_f^2 - 2r_f^2 \ln(r_p/r_f)}{4G_p} + \frac{\pi(r_p^2 - r_f^2)(r_m - r_p)}{G_a D_a} \right] E_p \\ & - \frac{r_m - r_p}{G_a} \left(h_a - \frac{\pi r_p^2}{D_a} + \frac{3}{2} r_p + \frac{1}{2} r_m \right) E_a \end{aligned} \quad (13)$$

$$B = \frac{\cos \alpha}{D_m H_m E_m} [\pi r_f^2 E_f + \pi(r_p^2 - r_f^2) E_p] + 1 \quad (14)$$

$$C = \cos^2 \alpha - \frac{\cos \alpha E_a}{D_m H_m E_m} [D_a(h_a + r_p + r_a) - \pi r_p^2] \quad (15)$$

及

$$\eta^2 = B/A, \xi^2 = C/A \quad (16)$$

则方程(12)可化简为

$$\frac{d^2 \varepsilon_f}{dx^2} - \eta^2 \varepsilon_f = -\xi^2 \varepsilon_m \quad (17)$$

式(17)即为非轴向力作用下粘贴式 FBG 传感器光纤与基体应变沿轴向分布关系的微分方程。参数 η 和 ξ 中包含了光纤、保护层、粘贴层和基体结构物理参数的影响。方程(17)的通解为

$$\varepsilon_f(x) = C_1 \sinh(\eta x) + C_2 \cosh(\eta x) + \frac{\xi^2}{\eta^2} \varepsilon_m \quad (18)$$

其中, C_1 和 C_2 为积分常数。由于光纤、保护层和粘贴层不直接受力,故其端部为自由端,没有应力传递;又由 FBG 传感器的对称性可知,光纤粘贴长度的中点处没有剪应力,可得方程(17)的边界条件为

$$\varepsilon_f(L_f) = \varepsilon_f(-L_f) = 0, \dot{\varepsilon}_f(0) = 0 \quad (19)$$

将边界条件代入微分方程(17),可得积分常数的值

$$C_1 = 0, C_2 = -\frac{\xi^2 \varepsilon_m}{\eta^2 \cosh(\eta L_f)} \quad (20)$$

从而,方程(17)的解,即 FBG 传感器光纤轴向应变分布为

$$\varepsilon_f(x) = \frac{\xi^2}{\eta^2} \left(1 - \frac{\cosh(\eta x)}{\cosh(\eta L_f)} \right) \varepsilon_m \quad (21)$$

一般来说,保护层的弹性模量 E_p 比光纤的弹性模量 E_f 小 4 个数量级以上,因此保护层弹性模量 E_p 所在项可算作无穷小量,在实际应用中可忽略。又由于基体结构的尺寸要比传感器的尺寸大得多,因此 D_m 和 H_m 所在项可忽略不计。这样,式 η^2 和 ξ^2 可分别简化为

$$\eta^2 = - \frac{1}{\left[\frac{r_f^2 \ln(r_p/r_f)}{2G_p} + \frac{\pi r_f^2 (r_m - r_p)}{G_a D_a} \right] E_f} + \frac{r_m - r_p}{G_a} \left(h_a - \frac{\pi r_p^2}{D_a} + \frac{3}{2} r_p + \frac{1}{2} r_m \right) E_a \quad (22)$$

$$\xi^2 = - \frac{\cos^2 \alpha}{\left[\frac{r_f^2 \ln(r_p/r_f)}{2G_p} + \frac{\pi r_f^2 (r_m - r_p)}{G_a D_a} \right] E_f} + \frac{r_m - r_p}{G_a} \left(h_a - \frac{\pi r_p^2}{D_a} + \frac{3}{2} r_p + \frac{1}{2} r_m \right) E_a \quad (23)$$

将式(22)和(23)代入式(21),得

$$\varepsilon_f(x) = \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{\cosh(\eta x)}{\cosh(\eta L_f)} \right) \varepsilon_m \quad (24)$$

式(24)即为非轴向力作用下粘贴式 FBG 传感器各点的应变与基体结构应变之间的关系式。从参数 η 和 ξ 的简化过程中可以看出,非轴向力情况下的平均应变传递率受基体结构弹性模量 E_m 的影响很小,主要与传感器的角度 α 有关。

FBG 传感器沿传感器标距各点的应变传递率表示为

$$\phi(x) = \frac{\varepsilon_f(x)}{\varepsilon_m} = \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{\cosh(\eta x)}{\cosh(\eta L_f)} \right) \quad (25)$$

其中,应变传递率最大的点在 FBG 传感器的中间位置 ($x = 0$ 的点),即

$$\phi_{\max}(0) = \frac{\varepsilon_f(0)}{\varepsilon_m} = \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{1}{\cosh(\eta L_f)} \right) \quad (26)$$

FBG 传感器所测得的应变为粘贴长度范围内的平均应变,平均应变传递率表示为

$$\bar{\phi} = \frac{\varepsilon_f(x)}{\varepsilon_m} = \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{\sinh(\eta L_f)}{\eta L_f \cosh(\eta L_f)} \right) \quad (27)$$

从式(27)中可以看出,当传感器角度为零(即 $\alpha = 0$)时,平均应变传递率公式与参考文献[9]的公式形式相同。因此,可认为式(27)为平均应变传递率的一般形式。

2 有限元仿真

本节研究在传感器角度 α 为 30° 时,沿标距长度各点的应变传递率的有限元仿真结果和理论值的对比情况。主要物理参数如下:光纤、保护层和粘贴层弹性模量和泊松比分别为 7.2×10^{10} Pa、0.17, 2.55×10^6 Pa、0.48 和 4×10^9 Pa、0.34;光纤半径和保护层外半径分别为 0.0625mm 和 0.125mm;粘贴层上部厚度和下部厚度分别为 0.2mm 和 0.25mm;半粘贴长度和粘贴宽度分别为 40mm 和 2mm;基体结构宽度为 60mm。将以上数据分别代入式(26)和(27),得到最大应变传递率为 0.7500,平均应变传递率为 0.7343。对于沿传感器标距长度的应变传递率的理论与仿真分析如下:

非轴向力作用下粘贴式 FBG 传感器的有限元网格化分情况如图 3 所示,理论值和仿真结果在沿传感器标距长度的应变传递率的分布情况如图 4 所示。从图 4 中可以看出,仿真结果与理论值吻合程度较好,应变传递率在传感器标距长度中间位置最大,最大应变传递率只能达到 0.7500;在半粘贴长度大于 36mm 时急剧减小,在传感器的标距长度两端减小到零(即没有应变传递)。

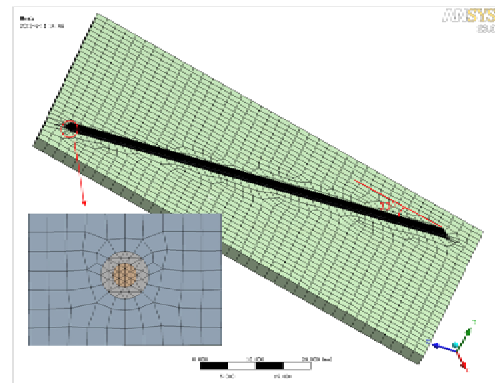


图 3 非轴向力作用下粘贴式 FBG 有限元模型

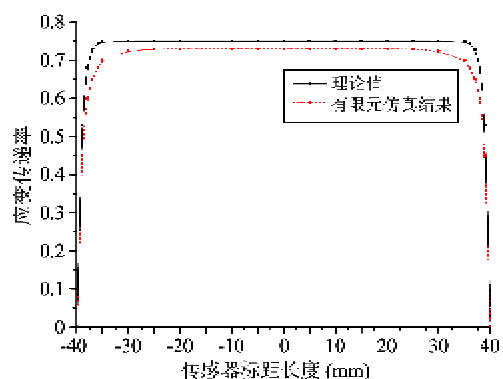


图 4 理论值和仿真结果在沿传感器标距长度的应变传递率分布

3 影响参数分析

本节的研究内容是非轴向力作用下传感器角度与平均应变传递率的关系。光纤、保护层和粘贴层的物理参数分别与上节相同,另外还需补充基体结构受传感器粘贴影响的厚度为 0.3mm。

非轴向力作用下平均应变传递率随传感器角度的变化关系如图 5 所示。从图中可知,传感器角度对平均应变传递率的影响非常显著,平均应变传递率随传感器角度的增加而减小。当传感器角度为 0 (即基体结构受轴向力作用)时,平均应变传递率最大;当传感器角度为 90°(即传感器轴向与基体结构主应力方向垂直)时,平均应变传递率为零,此时传感器不能测出基体结构的应变,因此在实际应用中要注意避免这种情况的发生。

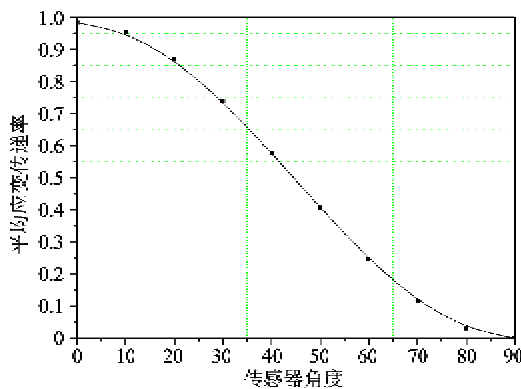


图 5 非轴向力作用下平均应变传递率随传感器角度的变化关系

4 结论

本文提出了非轴向力作用下粘贴式 FBG 传感器从光纤到基体结构的应变传递模型,建立了应变传递方程,并得到沿传感器标距各点的应变传递率、最大应变传递率和平均应变传递率。通过有限元软件 ANSYS Workbench 将沿传感器标距长度的应变传递率分布的理论结果与仿真结果进行了比较,从而验证了理论方程的有效性。同时,对平均应变传递率随传感器角度的变化情况进行了分析,平均应变传递率最大值出现在传感器轴向与基体结构主应力方向平行时,此时的应变传递方程形式上与轴向力情况相同,为平均应变传递率的一般表达式;平均应变传递率最小值出现在传感器轴向与基体结构主应力方向垂直时,此时平均应变传递率为零,即没有应变

传递。

参考文献

- [1] 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. *Smart Material and Structures*, 1999, 8: 175-181
- [2] Her S C, Tsai C Y. Strain measurement of fiber optic sensor surface bonding on host material. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009: s143-s149
- [3] 郭伟, 李新良, 宋昊. 表面粘贴式光纤光栅传感器的应变传递分析. *计测技术*, 2011, 31(4): 1-4
- [4] 李宏男, 任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. 151-159
- [5] Nanni T, Yang C C, Pan K, et al. Fiber-optic sensor for concrete strain/stress measurement. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(3): 257-264
- [6] Pak Y E. Longitudinal shear transfer in fiber optic sensors. *Smart Materials and Structures*, 1992, 1(1): 57-62
- [7] Ansari F, Yuan L B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1998, 4: 385-394
- [8] Li J L, Zhou Z, Ou J P. Interface transferring mechanism and error modification of embedded FBG strain sensor based on creep Part I: linear viscoelasticity. In: *Proceeding of SPIE, Smart Materials and Structures: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil Mechanical Aerospace Systems*, San Diego, USA, 2005. 5765-6117
- [9] Wang Q B, Qiu Y, Zhao H T, et al. Analysis of strain transfer of six-layer surface-bonded fiber Bragg gratings. *Applied Optics*, 2012, 51(18): 4129-4138
- [10] Her S C, Huang C Y. Effect of coating on strain transfer of optical fiber Bragg sensors. *Sensors*, 2011, 11(7): 6926-6941
- [11] Wan K T, Leung C K Y, Olson N G. Investigation of strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors. *Smart Materials and Structures*, 2008, 17(3): 035037
- [12] Cheng C C, Lo Y L, Pun B S, et al. An investigation of bonding-layer characteristics of substrate-bonded fiber Bragg grating. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11): 3907-3915
- [13] Zhou J, Zhou Z, Zhang D. Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(11): 1117-1122
- [14] 张立群, 金日光, 耿海萍. 短纤维橡胶复合材料结构性能关系理论研究现状 II 短纤维橡胶复合材料应力

传递模式. 弹性体, 1997, 7(2): 43-49

[15] Li D, Li H, Ren L, et al. Strain transfer analysis of fiber

Bragg grating sensors. *Optical Engineering*, 2006, 45

(2): 024402

Strain transfer mechanism analysis of a surface-bonded FBG sensor under non-axial force

Li Yinyu^{*}, Qiu Ye^{**}, Wang Quanbao^{**}, Zhao Haitao^{**}

(^{*} Polytechnic School, Shenyang Ligong University, Shenyang 113122)

(^{**} School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract

The relationship in structural health monitoring between the strain measured by a surface-bonded fiber Bragg grating (FBG) sensor and the actual strain of the matrix structure when the direction of the sensor axis is at a certain angle to the main stress direction of the matrix structure was investigated. The strain transfer equation and the theoretical strain-transfer model of a surface-bonded FBG sensor were established, and the strain transfer rate along the sensor gauge, the maximum strain transfer rate and the average strain transfer rate were obtained. The validation of the theoretical model was verified by the finite element method (FEM), and the change of the average strain transfer rate with the sensor angle was obtained by the parameter analysis. The results of the study show that the average strain transfer rate decreases with the increase of the sensor angle. When the sensor angle is zero, the average strain transfer rate is the largest, and its equation form is the same as the axial force case. Therefore, the theoretical model could be attributed to the general expression. When the sensor angle is 90° (the direction of the sensor axis is vertical to the principal stress direction of the matrix structure), the average strain transfer rate drops to zero. In this case, the measurement result is invalid. The theoretical model and simulation results are of referential significance to guiding the practical application of the surface-bonded FBG sensor in structural health monitoring.

Key words: fiber Bragg grating (FBG) sensor, non-axial force, surface-bonded, strain transfer, average strain transfer rate