

文章编号: 0253-2239(2010)s100304

埋入金属结构内部的光纤布拉格光栅横向 应力传感性能研究

冯 艳¹ 张 华¹ 李玉龙¹ 饶春芳¹ 徐 敏² 禹业晓¹

(¹ 南昌大学机电工程学院机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031)
² 中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 江西 南昌 330024)

摘要 将光纤布拉格光栅(FBG)传感器埋入金属结构内部可以获得光纤智能金属结构。埋入后的 FBG 传感器应变传感性能受到埋入工艺、中间层和基体材料性能的影响。采用化学镀镍再电镀镍的方法对 FBG 进行金属化保护,然后用钎焊法将镀镍保护的 FBG 埋入金属构件中,应用材料力学基本原理建立了埋入式 FBG 在受到横向应力情况下,中心波长变化与作用在基体上集中外力的关系模型,并进行了三点压弯实验。结果表明,该模型能较好地预测埋入式 FBG 中心波长在横向应力作用下的变化趋势。

关键词 埋入式光纤布拉格光栅;镀镍保护;钎焊;横向应力传感

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100304

Transversal Stress Sensing of Fiber Bragg Grating Embedded into Metal Component

Feng Yan¹ Zhang Hua¹ Li Yulong¹ Rao Chunfang¹ Xu Min² Yu Yexiao¹

¹ Key Laboratory of Robot and Welding Automation, School of Mechatronics Engineering,
Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

² Aviation Industry Corporation of China Jiangxi Hongdu Aviation Group Co. Ltd., Nanchang, Jiangxi 330024, China

Abstract Optical fiber smart metal structures can be formed by embedding fiber Bragg grating (FBG) sensors into the metal matrix can. The stress sensing of the FBG is affected by the embedding method and the characteristics of the interlayer and the matrix. FBG sensors with nickel protective coating are embedded into the metal component using soldering method. The theoretical model for embedded FBG's wavelength trend with external force is developed. Bending tests are carried out to test the transversal stress sensing of the embedded FBG sensors. The experimental results show, that the model is feasible to forecast the transversal stress sensing of embedded FBG.

Key words embedded fiber Bragg grating; nickel protective coating; soldering; transversal stress sensing

OCIS codes 060.2370; 350.2770; 310.1515

1 引 言

光纤布拉格光栅传感器(FBG)的光栅部分是裸光纤,其主要成分是二氧化硅,抗剪能力较差,容易折断。将 FBG 成功地埋入金属结构,需要对其进行保护,使其在埋入金属基体过程中不被损坏。金属镀层与其它保护层相比,具有良好的冶金性能和更高的熔点,是更为有效的保护方法。另一方面,埋入过程中会形成中间层。对钎焊埋入金属基体而言,在金属基体和 FBG

传感器之间的中间层包括金属保护镀层和钎料层。基体的应变传递到 FBG 传感器的过程中,有部分应变将会被中间层吸收,使得基体的应变和光纤光栅传感器所测得的应变不一致。因此,利用光纤光栅传感器对结构基体内部的应力/应变进行准确测量,必须首先明确光纤光栅传感器和结构基体之间的应力/应变传递关系。

对于光纤与基体界面处应变传递的分析已开展了

收稿日期: 2010-06-08; 收到修改稿日期: 2010-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(50905082)和江西省自然科学基金(2008GQC0013)资助课题。

作者简介: 冯 艳 (1976—),女,博士,主要从事光纤保护及智能金属等方面的研究。E-mail:confirmfyan@163.com

本文电子版彩色效果详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)相关文献

很多研究工作,并取得了一些成果。Pak^[1]分析了在平行于光纤的远场剪应力作用下,光纤涂敷层对应变传递的影响,得出当粘接层的弹性模量为基体弹性模量和光纤弹性模量的几何平均时,涂敷层能够传递最大的剪应力。Ansari等^[2]假定埋入式光纤粘贴长度中心的应变与混凝土基体应变相同而得出了光纤的轴向应变和剪应力分布。黄国君等^[3]将光纤光栅分别粘贴于铜、不锈钢和聚合物等材料的基体表面上,在拉伸试样上测得其应变传递系数分别为0.891,0.891和0.583,实验证明了不同的材料和封装方式对光纤光栅传感器应变传递率的影响。鲍吉龙等^[4]对埋入混凝土中的FBG传感器应用剪切滞后理论得出了应变传递系数。周智等^[5]在保护层与黏结层的剪应力近似相等的假设下,得出了光纤光栅埋入多层界面的应变传递表达式。李宏男等^[6]分析了埋入式FBG受到非轴向力的情况下应变传递的一般规律。刘德华等^[7]从理论上推导了基体结构与光纤传感器在轴向拉力和三点加压作用下的应变传递关系。R. Suresh等^[8,9]分析了在二维和三维剪切力作用下,埋入碳纤维复合材料的FBG传感器波长变化与外力的关系。Tadamichi Mawatari和Drew Nelson^[10]用实验分析了保偏光纤双布拉格光栅的波长变化对轴向载荷、横向载荷和温度载荷的关系,并建立了FBG预测轴向、横向载荷的模型。

以上研究是建立在光纤传感器埋入复合材料、混凝土基体中,或粘贴在基体表面的基础上得出,而且是以光纤受到轴向力作为分析重点。到目前为止尚没有埋入金属基体内部的光纤布拉格光栅传感器横向应力传感性能的研究报道。本文采用感应钎焊的方法将镀镍的FBG传感器分别埋入金属梁中性层上下对称位置处,然后对其进行三点压弯实验,建立了横向应力传递的理论模型,并分析了影响横向应力传递的因素。实验结果表明,该模型能较好地预测FBG中心波长在集中外力作用下的变化趋势。

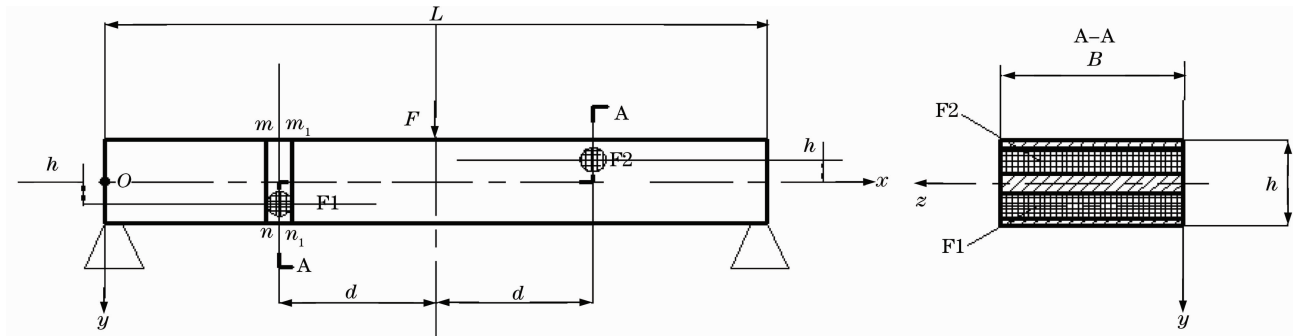


图2 金属基体结构示意图
Fig. 2 Metal component structure

2 埋入式FBG传感器横向应力传感分析

在分析时做以下假设:

- 1) 涉及材料均为正交各向同性的线弹性材料;
- 2) FBG传感器和金属镀层之间完全接触,没有相对滑动,视为线弹性的各向同性复合圆柱体;
- 3) 金属镀层与钎料层、钎料层和金属基体之间紧密结合,忽略层间的环向剪应力;
- 4) FBG、金属镀层钎料层和受力变形后横截面均为平面。

以 $i=1, 2, 3$ 分别表示FBG, 镀镍层和钎料层, 字母 $R_1=a, R_2=b, R_3=c$ 分别表示FBG、镀镍层和钎料层的半径。

FBG经金属镀层保护后,可视作各向同性的匀质复合圆柱体,如图1所示。根据复合材料混合法则^[11],具有金属镀层FBG的等效弹性模量 E^* 和泊松比 μ^* 为

$$E^* = E_1 V_1 + E_2 V_2, \mu^* = \mu_1 V_1 + \mu_2 V_2, \quad (1)$$

式中 E_1 和 E_2 分别为光纤布拉格光栅和金属镀层的弹性模量; V_1 和 V_2 分别为光纤布拉格光栅和金属镀层在复合圆柱体中所占的体积比例。

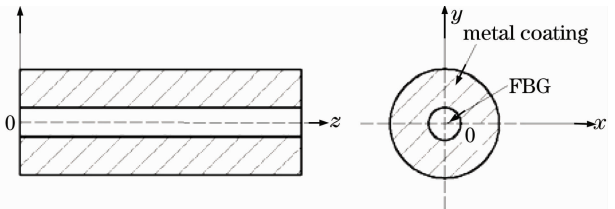


图1 镀层保护后的FBG示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metal coated FBG

2.1 受力分析

镀镍光纤布拉格光栅埋入位置如图2所示,将埋置在位置1处的复合FBG传感器记为F1,埋置在位置2处的复合FBG传感器记为F2,以梁的左

端中点处作为原点 O 建立坐标系。位置 1 位于金属梁中性层下部,受到拉应力作用,位置 2 位于金属梁中性层上部,受到压应力作用,它们的大小相等,方向相反。

以横截面 $m-n$ 和 m_1-n_1 从图 2 所示梁中取出 F1 埋入位置处的长为 $2c$ (小孔直径)的一段,再以平行于中性层且距中性层 y 轴距离为 h 的 $p-r$ 平面从这一段梁中截出一部分 $prnm_1$ (如图 3 所示)。根据文献[12],在这一截出部分的左侧面 $r-n$ 和右侧面 $p-n_1$ 上分别作用着弯矩

$$M = \frac{FL}{4} - \frac{Fd}{2}, \quad (2)$$

及其引起的正应力

$$\sigma_x = \frac{My}{I_z}, \quad (3)$$

这个正应力不仅与弯矩有关,还与距离中性层的距离和横截面的形状有关。在矩形梁的 $m-n$ 和 m_1-n_1 截面上都作用着相同的剪力 Q ,与 y 轴平行,

$$Q = F/2, \quad (4)$$

由此引起的剪应力

$$\tau_y = \frac{Q}{2I_z} \left(\frac{H^2}{4} - y^2 \right) \quad (5)$$

也与距离中性层的位置有关。

为简化计算,用小孔中心位置处的正应力来表示平均正应力,小孔中心位置处的剪应力来表示平均剪应力(如图 3 所示)。因为钎料层与金属基体间结合紧密, $\bar{\sigma}_x, \bar{\tau}_y$ 可认为是钎料层外径的 x, y 方向的应力。根据材料力学基本原理,钎料层外径的平均横向应力 q_{r3}^* 为

$$q_{r3}^* = \sqrt{(\bar{\sigma}_x)^2 + (\bar{\tau}_y)^2} = \frac{3F}{BH^3} \sqrt{(L-2d)^2 h^2 + \left(\frac{H^2}{4} - h^2 \right)^2}. \quad (6)$$

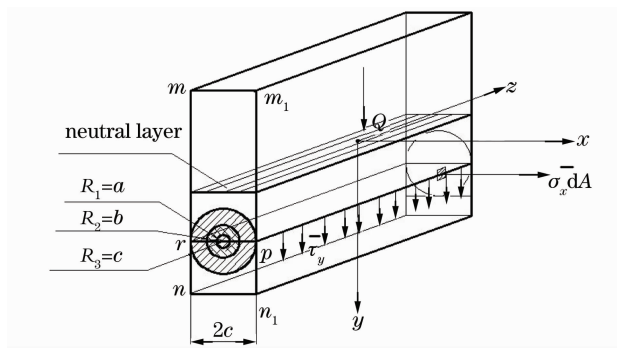


图 3 截面受力分析示意图

Fig. 3 Diagram of on cross section force analysis

2.2 横向应力传递分析

由以上分析可知,基体梁的弯曲应力以均匀横

向应力的方式作用在钎料层上,通过钎料层传递给 FBG 传感器。这属于轴对称的平面应变问题。以 F1 为例进行分析,如图 4 所示。对于钎料层,可视为受到均匀内、外拉力作用的厚壁圆筒,由 Lamé 解^[13]可得钎料层内径的径向变化为

$$\Delta r_{3b} = \frac{2bc^2 q_{r3}^* - bq_r^* [(1+\mu_3)c^2 + (1-\mu_3)b^2]}{E_3 (c^2 - b^2)}, \quad (7)$$

式中 q_r^* 为金属镀层 FBG 的平均等效横向应力。

对于具有金属镀层的 FBG,在半径 $r=b$ 处的径向变化为

$$\Delta r_b^* = (1 - \mu^*) \frac{q_r^*}{E^*} b, \quad (8)$$

边界约束条件为

$$\Delta r_b^* = \Delta r_{3b}. \quad (9)$$

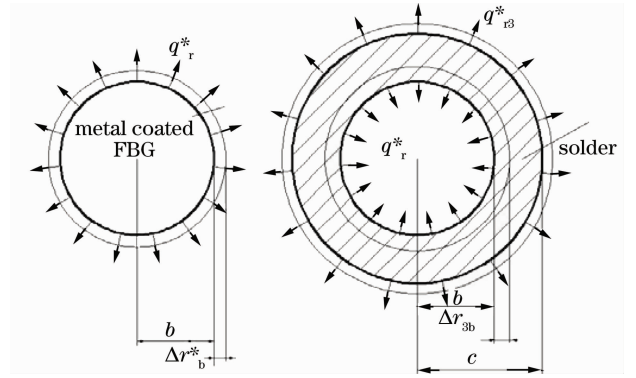


图 4 横向应力传递分析示意图

Fig. 4 Diagram of transversal stress transfer

将(7),(8)式代入(9)式中,可得到金属镀层 FBG 的平均等效横向应力

$$q_r^* = \frac{J_2}{J_1} q_{r3}^*, \quad (10)$$

式中

$$J_1 = E^* [(1 - \mu_3)b^2 + (1 + \mu_3)c^2] + E_3 (1 - \mu^*) (c^2 - b^2), \quad (11)$$

$$J_2 = 2E^* c^2. \quad (12)$$

对具有金属镀层的 FBG,由复合材料混合法则^[11]

$$q_r^* = q_1 V_1 + q_2 V_2, \quad (13)$$

式中 q_1, q_2 分别表示 FBG 和金属镀层所受横向应力,如图 5 所示。由力的平衡原则有

$$2\pi b l_f q_r^* = -2\pi a l_f q_1 + 2\pi b l_f q_2. \quad (14)$$

式中 l_f 为光栅长度。进一步可得到 FBG 的横向应力为

$$q_1 = \frac{J_3 J_2}{J_1} q_{r3}^*, \quad (15)$$

式中

$$J_3 = \frac{a^2 b}{a^2 b + (b^2 - a^2) a}. \quad (16)$$

q_{r3}^* 由(6)式确定。

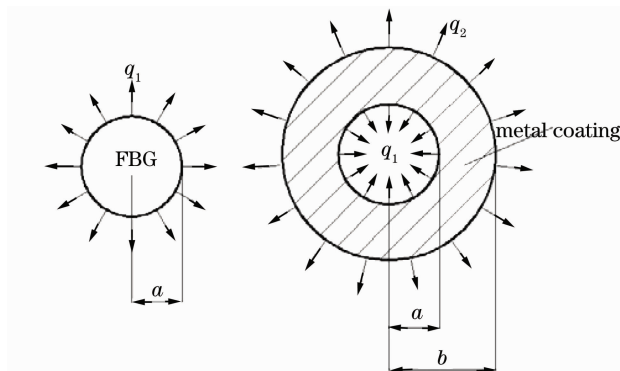


图 5 金属镀层的 FBG 分析示意图

Fig. 5 Transversal stress analytical diagram for metal coated FBG

2.3 FBG 传感器横向应力传感模型

均匀横向应力引起光栅的布拉格波长变化可表示^[14]为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \left[- (p_{11} + p_{12}) \frac{1-\mu}{2\mu} + p_{12} \right] \right\} \epsilon_z, \quad (17)$$

式中 p_{11} , p_{12} 是材料的弹光常数, μ 为 FBG 的泊松比,

$$\epsilon_{1z} = -2\mu_1 \frac{q_1}{E_1}, \quad (18)$$

为横向应力引起的轴向伸缩应变。利用纯熔融石英的参数, $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.27$, $n_{\text{eff}} = 1.456$, 将(15)式代入(17)式可得

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = -0.587 \frac{q_1}{E_1}, \quad (19)$$

再经(6), (15)式整理后得到

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = -1.761 \frac{J_3 J_2}{E_1 J_1} \sqrt{\frac{(L-2d)^2 h^2 + \left(\frac{H^2}{4} - h^2\right)^2}{BH^3}} F. \quad (20)$$

对于 F2, 它的中心波长随外力 F 变化的分析与 F1 类似, 只是与(20)式的结果相差负号。可见, 位于中性层下部的 FBG 传感器的中心波长随外力 F 的增大而变小, 而位于中性层上部的 FBG 传感器的中心波长随外力 F 的增大而增大。对于其它形式的梁, 只需更改 FBG 传感器有关参数及其埋入位置、截面形状和尺寸, 便可获知 FBG 传感器波长变化与外力的关系。

3 FBG 埋入金属基体及压弯传感实验

3.1 FBG 埋入金属基体

实验所需的 FBG 传感器由北京品傲光电科技有限公司提供, 热膨胀系数 $\alpha_2 = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 泊松比 $\mu_2 = 0.17$, 弹性模量 $E_2 = 7.4 \times 10^{10}$ Pa, 热光系数 $\zeta = 6.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 弹光系数 $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.27$, $n_{\text{eff}} = 1.456$, 光纤光栅半径 $a = 62.5 \mu\text{m}$ 。首先对 FBG 清洗、敏化和活化后, 放入化学镀镍溶液中进行化学镀 2 h, 放入电镀镍溶液中电镀镍 24 h^[15]。电镀镍后在无外载荷、室温 25°C 条件下, 用光纤光栅网络分析仪(上海紫栅光电, 型号: FONT-2004B)测得它们的中心波长分别为 $\lambda_{B1} = 1536.095 \text{ nm}$, $\lambda_{B2} = 1532.131 \text{ nm}$, 分别记为 F1 和 F2, 电镀镍后的形貌经体视显微镜(上海光学仪器厂, 型号: XTZ-E)放大 20 倍观察, 如图 6 所示。采用钎焊的方法^[16]将它们埋入长 $L = 120 \text{ mm}$, 宽 $B = 35 \text{ mm}$, 高 $H = 10 \text{ mm}$ 的 $20^\#$ 钢金属基体中, 位置 1, 2 的小孔相关尺寸分别为 $d = 48 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$, $c = 1.25 \text{ mm}$ 。F1 和 F2 的轴向均平行于梁的 B 边, 以实现进行横向应力的传感, F1 埋入位置 1 处, F2 埋入位置 2 处, 如图 7 所示。

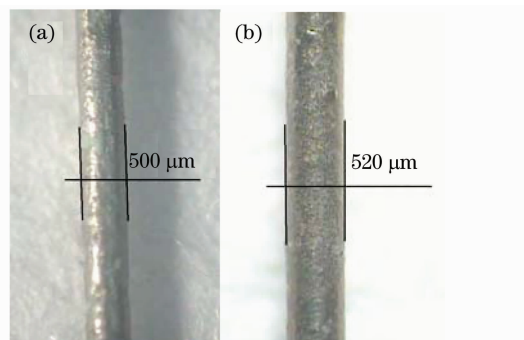


图 6 电镀镍后的 FBG 外观图. (a) F1; (b) F2

Fig. 6 FBG with nickel coating. (a) F1; (b) F2

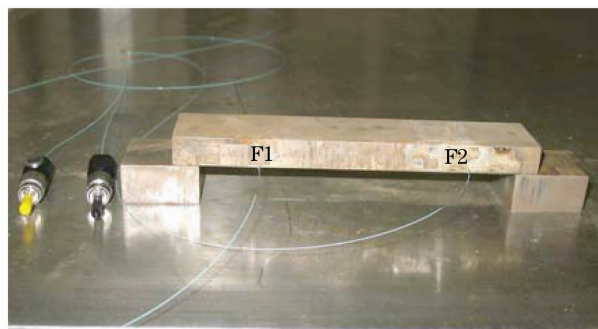


图 7 智能金属梁外观图

Fig. 7 FBG embedded into the smart metal component

3.2 压力传感实验

采用微机控制电子万能实验机(深圳新三思材料检测有限公司)对 FBG 智能金属梁进行三点压弯曲实验,实验时环境温度为 25 ℃,实验装置如图 8 所示。压力值从 0 加压至 4000 N,然后再从 4000 N 降压至 0,加压、减压速率为 2 mm/min,每个压力值保持 3 min,用光纤光栅网络分析仪记录 FBG 的波长变化,并求取平均值。实验结果如图 9 所示,图中红色+实线表示加压时测得的实验数据,蓝色*实线表示减压时测得的实验数据,黑色·细实线表示理论线性拟合结果。



图 8 智能金属梁压弯实验图

Fig. 8 Set-up of the bending test of the smart metal component

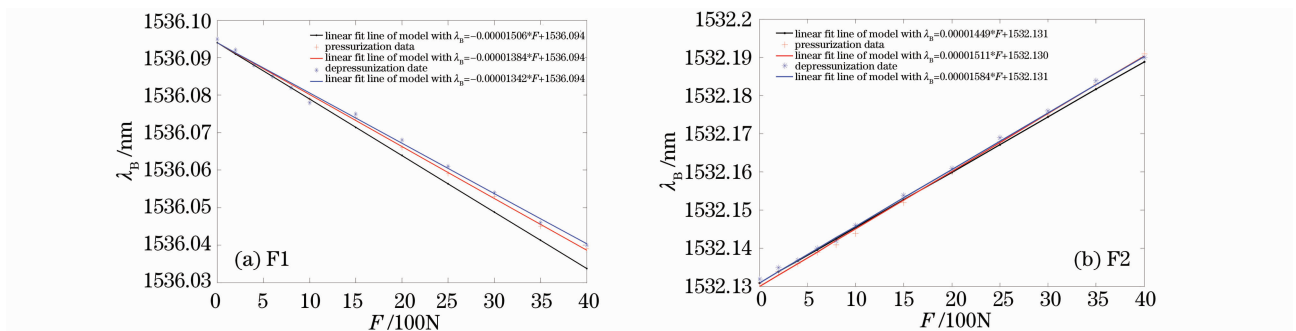


图 9 智能金属梁压弯实验数据

Fig. 9 Bending test data of the smart metal component

3.3 实验结果分析

实验中,F1 和 F2 的应变响应速度很快,几乎没

有响应滞后。F1 和 F2 实验测得的压力灵敏度与理论值如表 1 所示。

表 1 实验结果

Table1 Experimental results

FBG	Experimental value		Theoretical value		Relative error /%	
		(pm /kN)		(pm/ kN)		
F1	Pressurization	-13.84	-15.06	Pressurization	8.10	
	Depressurizaion	-13.42		Depressurizaion	10.89	
F2	Pressurization	15.11	14.49	Pressurization	4.28	
	Depressurizaion	14.84		Depressurizaion	2.42	

从实验结果来看,F2 的实验数据较 F1 更贴近理论预测结果,所建立的埋入金属基体 FBG 横向应力传感模型是合理的。从图 3.4 可知,无论 F1 还是 F2,在加压与减压过程中都存在不同程度的弹性迟滞现象,这与材料本身的性能以及异种材料之间的结合程度有关。除去前面分析的保护层、钎料层参数和埋入位置的影响因素,FBG 压力传感性能的优劣还要取决于与基体结合程度。由于钎焊埋入对手工操作技能要求较高,FBG 传感器与基体结合程度的优劣很大程度上取决于埋入过程的操作技能。

器的金属梁,应用材料力学和弹性力学原理分析了其受力情况,建立了横向应力下 FBG 传感器的应力模型,分析研究了影响 FBG 横向应力传感性能的因素(包括保护层、钎料层和埋入位置),并对矩形横截面的 FBG 智能金属梁做了三点压弯实验。F2 的理论模型结果与实验结果基本一致,F1 的理论模型结果与实验结果偏差较大,这与实验中手工埋入带来的位置误差有关。而且,FBG 传感性能在加压和减压过程中存在一定程度的迟滞现象,如何尽可能减少直至消除迟滞现象需要进一步探讨。

4 结 论

本文针对中部集中力作用下的埋有 FBG 传感

参 考 文 献

1 P. Y Eugene. Longitudinal shear transfer in fiber optic sensors

- [J]. *Smart Mater. Struct.*, 1992, 1: 57~62
- 2 F. Ansari, L. Yuan. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, **124**(4): 385~394
- 3 Huang Guojun, Yin Yunguo, Dai Feng *et al.*. Investigation on the sensibility and fatigue reliability of fiber Bragg grating strain sensors [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(6): 45~47
黄国君, 殷昉毓, 戴锋 等. 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研[J]. 激光杂志, 2003, **24**(6): 45~47
- 4 J. L. Bao, Y. Chen, H. X. Zhao. Stress-transfer characteristics of embedded fiber Bragg grating sensors [J]. *Optoelectronics Letters*, 2005, **1**(3): 0168~0171
- 5 Zhi Zhou, Li. Jilong, Qu. Jinping. Interface strain transfer mechanism and error modification of emedded FBG strain sensors [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, **38**(1): 49~54
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): 49~54
- 6 H. N. Li, G. D. Zhou, L. R. *et al.*. Strain transfer analysis of embedded fiber Bragg grating sensor under nonaxial stress [J]. *Opt. Engring.*, 2007, **46**(5): 054402
- 7 Liu Dehua, Jin Weiliang, Zhang Yuxiang. Strain transfer relationship between optical fiber sensor and structure matrix [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2006, **40**(11): 1847~1851
刘德华, 金伟良, 张玉香. 光纤传感器与结构基体的应变传递关系 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, **40**(11): 1847~1851
- 8 R. Suresh, S. C. T. jin, N. Q. Ngo. Shear force sensing by strain transformation using non-rectilinearly embedded fiber Bragg grating [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, **116**(1): 107~118
- 9 R. Suresh, S. C. T. jin, S. Bhalla. Mutli-component force measurement using embedded fiber Bragg grating [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2009, **41**(4): 431~440
- 10 T. Mawatari, D. Nelson. A multi-parameter Bragg grating fiber optic sensor and triaxial strain measurement [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2008, **17**: 0. 5033
- 11 Gu Jialing, Yang Zhigang, Deng Haijin. Introduction of Materials Science and Engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 126~130
顾家琳, 杨志刚, 邓海金 等. 材料科学与工程概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 126~130
- 12 Liu Hongwen. Mechanics of Materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 167~191
刘鸿文. 材料力学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 167~191
- 13 Y. -C. Zhou, Solid Mechanics Materials, Beijing: Science Press, 2004, 79~152
周益春. 材料固体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005, 79~152
- 14 Li Chuan, Zhang Yimo, Zhao Yonggui *et al.*. Fiber Grating: Principles, Techniques, and Sensing Applications [M]. Beijing: Science Press, 2005, 108~116
李 川, 张以馍, 赵永贵 等. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用 [M].北京: 科学出版社, 2005, 108~116
- 15 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg grating with metal coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 336~341
冯 艳, 张 华, 李玉龙 等. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 336~341
- 16 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong. Experiment on embedding FBG sensor into intelligent metal structures [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009, **31**(3): 334~336
冯 艳, 张 华, 李玉龙. 智能金属结构中 FBG 传感器的埋入实验[J]. 压电与声光, 2009, **31**(3): 334~336