

用于结构损伤诊断的实用型光纤光栅传感器研究*

董兴法^{1,2} 付圣贵¹ 姜莉¹ 开桂云¹ 董孝义¹

(1 南开大学现代光学研究所,天津 300071)

(2 苏州科技学院电子系,苏州 215011)

摘要 提出了一种适用于建筑结构传感的光纤光栅传感器.用细的不锈钢管匹配叠套方式保护光纤光栅,它能与建筑结构有很好的融合.这样的传感器对应力和温度响应具有良好的线性关系,其线性拟合度达0.9996和0.9985.分段封装光纤光栅使之具有双反射峰,通过测量两反射峰的漂移能够消除温度交扰效应.

关键词 建筑结构;光纤光栅传感器;钢管匹配封装

中图分类号 TP212.74

文献标识码 A

0 引言

建筑结构的施工监理和评估疲劳寿命都需要测量关键点应变的分布.传统的应变测量多采用电阻应变片的方法,应变片本身容易受外界环境腐蚀,测量结果也容易受电磁干扰,一般情况下,只能测量构件表面上应变.作为一种新型光纤传感器,光纤布喇格光栅(FBG)是近年来出现的一种新的光纤器件,它除具有一般光纤传感器优点外,还具有波长编码、绝对值测量、易于在线阵面阵等拓扑结构中复用、可借助光纤通信线路远程诊断等优点,但由于FBG对温度与应变同时敏感,即温度与应变均可引起FBG反射波长的移动而无法对它们的作用加以区分,这种交扰效应严重影响了光纤光栅在传感领域的应用.为此人们提出了一些解决方案^[1-4],但其中大多数是用两种性质的光纤光栅克服交叉敏感.这些既给FBG的制作增加了不便又都没有解决好封装问题,因此不适合于钢混建筑结构的传感.为使传感器与结构具有良好的相容性,本文研制了一种新颖的FBG传感器封装技术,用一个光纤光栅就可排除温度与应变的交扰,并且特别适合于钢混结构应变的监测与传感.

1 设计原理

FBG应变传感器工作的基本原理可以归纳为布喇格中心波长的测量.FBG周围的温度场和作用在光栅上的应变都能够导致布喇格中心反射波长的漂移.应变影响波长是由于FBG周期的变化及由此产生的弹光效应改变了有效折射率.温度导致波

长漂移则是由于热光效应和光纤的热膨胀.不封装的光纤光栅测量应变与温度时,其布喇格波长的移动可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [1 - (n_{eff}^2/2)(p_{12} - \nu p_{11} - \nu p_{12})] \epsilon + (\alpha_s + \xi_s) \Delta T \quad (1)$$

式中 p_{11} 、 p_{12} 为弹光系数; ν 为纤芯材料的泊松比;因此,其中 $(n_{eff}^2/2)(p_{12} - \nu p_{11} - \nu p_{12}) = p_e$ 为光纤的有效弹光系数. ϵ 为应力引起的FBG轴向应变, $\alpha_s = (1/\Lambda)(d\Lambda/dT)$ 为光纤的热膨胀系数, $\xi_s = (1/n_{eff})(dn_{eff}/dT)$ 为热光系数.式(1)成立的前提是应力应变与热膨胀应变互不交扰.对于普通硅基光纤, p_e 约为0.22, $\alpha_s \sim 0.5 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\xi_s \sim 7 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$.用于建筑结构的光纤光栅传感器,为增强应变测量值的可靠性,应充分考虑封装材料与钢混结构的相容性^[5],并且安装后不能影响原结构受力的分布.目前,还没有一种封装技术能够同时解决温度交扰效应以及同构件良好融合的问题.本文选用匹配的细不锈钢管封装FBG,可有效地解决上述问题,结构如图1.一半长度的FBG用 $\Phi 0.5 \text{ mm}$ 的不锈钢

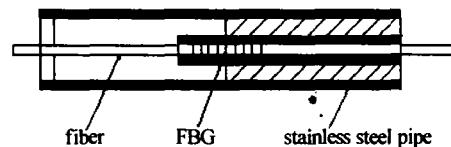


图1 FBG封装方案图

Fig.1 Schematic diagram of packaged FBG

管紧包封装,另一部分用外径小一点的不锈钢管松套封装,然后共同套入匹配的不锈钢管内部,这样只有第一部分FBG接受外套管传感的受力,另一部分FBG就可以进行温度补偿.此技术已申请专利.紧包封装的FBG除接受基体应变外,它的热膨胀系数因封装而变化,所以波长移动变为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon + [\alpha_s + \xi_s + (1 - p_e)(\alpha_{s1} - \alpha_s)] \Delta T \quad (2)$$

式中 α_{s1} 为不锈钢管的线膨胀系数, $\alpha_{s1} \sim 0.2 \cdot$

*国家自然科学基金(60077012)、建设部信息化(01-4-048)资助项目
Tel:0512-65551462 Email:dongxf@eyou.com
收稿日期:2003-02-19

$10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. 因此粘置因素对 α_i 的修正可表示为 $(1 - p_e) \cdot (\alpha_{i1} - \alpha_i)$, 由于两段 FBG 封装方式不同, 温度敏感系数也不同. 在自由 FBG 周围填充粉末或液体介质可以使修正因子趋于 0. 当 FBG 传感器埋入或贴置基体结构表面时, 其传感段的温度系数仍有变化. 这还可以通过改变自由段的填充材料来匹配, 从而两部分光栅对应变和温度响应达到最佳. 更有利于输出信号的解调, 监测过程中只测量两个峰之间相对波长差就可以换算为应力. 封装后的光纤光栅作为应变传感器, 与被测基体结构结合紧密, 能快速响应应变. 采用不锈钢管保护 FBG, 克服了裸光纤光栅脆弱、容易折断的缺点, 便于操作和安装. 它可以直接埋入结构内部或粘贴于材料表面.

2 实验结果及讨论

按上述方法, 选用 4 cm 长的 $\Phi 0.5$ mm 不锈钢管封装 FBG. 实验所用 FBG 长度为 8 mm, 使 4 mm 长的 FBG 插入不锈钢管, 再封上外匹配钢管. 在两端加上法兰, 外形总长 9 cm. 在自由状态时, FBG 的布喇格波长为 1551.16 nm, 3 dB 带宽为 0.24 nm. 恒温 23 $^{\circ}\text{C}$ 时, 宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器入射到 FBG, 然后用 Anritsu 的 MS9710B 光谱分析仪测量其反射光谱. 实验装置如图 2 所示. FBG 经封

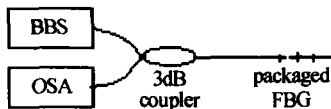


图 2 实验装置
Fig. 2 Experiment setup

装并经热稳定后, 反射峰分裂为 1550.68 nm 和 1551.24 nm 两个, 分别记为 λ_B 和 λ_{B1} , 每一个峰的 3 dB 带宽不变; 给 FBG 传感器加入 620 N 张力时, λ_{B1} 变化很大. 观察到的反射光谱如图 3 所示. 由图可以看出, 一个反射峰维持在原来位置, 而另一个反射波长移动了 2.68 nm. 峰的半宽度没有变化, 由此说明这种形式的封装严格地把 FBG 分成了两部分, 每一部分都无啁啾. 室温下测试受力响应, 结果如图 4(a) 所示. 由图可知 λ_B 基本不变, 受力灵敏度仅为 $1.832 \cdot 10^{-4}$ nm/N 而不为 0, 这可能是由于封装过程中自由光纤段预留长度不够, 导致在一定温度时它感应了一部分力. λ_{B1} 与受力成线性关系, 它的力灵敏度为 0.00425 nm/N. 由于这种方式封装的 FBG 可以直接加轴向的拉力和压力, 在加压力过程中, 将封装钢管置于直角槽内使它保持 FBG 不弯曲, 所以, 在 -698 ~ 620 N 的变化范围内测量到两端的反射峰波长分别是 1548.28 nm 和 1553.92 nm. 由数据拟合结果可知, λ_{B1} 的力灵敏度远大于 λ_B 的, 曲线的线性拟合度分别为 0.9996 和 0.9400. 不加

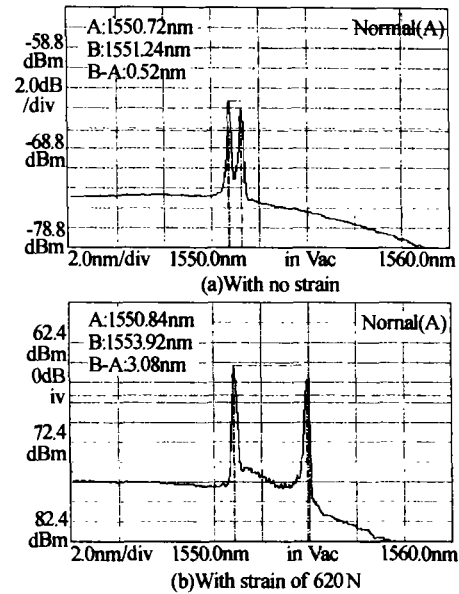


图 3 反射光谱图

Fig. 3 Reflective spectrum

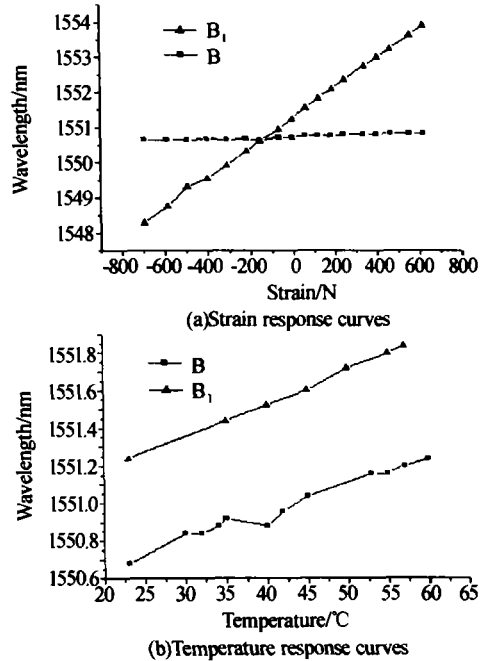


图 4 波长响应曲线

Fig. 4 Response curves of FBG

应力条件下, λ_B 和 λ_{B1} 与温度的关系如图 4(b) 所示. 由实验数据拟合可以得出 λ_B 和 λ_{B1} 的温度灵敏度分别为 0.01446 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 和 0.01776 nm/ $^{\circ}\text{C}$, 曲线的线性拟合度分别为 0.9811 和 0.9985. 实验还对几个固定受力下温度响应进行了测量, 结果表明 λ_B 和 λ_{B1} 的温度灵敏度基本不变. λ_B 与 λ_{B1} 有近似相等的温度灵敏度, 说明封装过程中已使修正因子接近为 0. 由以上测量结果得出波长变化与受力、温度的关系矩阵为

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{B1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.832 \cdot 10^{-4} \text{ nm/N} & 0.01446 \text{ nm}/^{\circ}\text{C} \\ 0.00425 \text{ nm/N} & 0.01776 \text{ nm}/^{\circ}\text{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta F \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (3)$$

在受力响应曲线上任选一点: $\Delta F = 465 \text{ N}$, $\Delta \lambda_{\text{Bl}} = 2 \text{ nm}$, 由此可知, FBG 的应变 ε 为 0.00167. 由于套管和光纤可以认为是复合材料, 根据以上数据估算出该复合材料的杨氏模量为 $5 \cdot 10^{11}$, 此值大于钢材料的杨氏模量. 产生此现象的原因可以归结为两方面, 一是材料复合增大了杨氏模量, 另一方面是钢管受力时 FBG 在其内部有蠕动.

3 结论

提出了一种适用于钢混结构传感的 FBG 封装技术, 用一个光纤光栅解决了温度交扰问题. 用不锈钢管封装后的光纤光栅作为应变传感器, 与被测基体结合紧密, 能够快速响应应变变化. 这样封装的光纤光栅传感器, 具有抵抗破坏和冲击的能力, 适合于实际工程的应用. 它可以贴置于基体表面或埋置于体内, 用于结构损伤诊断. 模拟实验中将它应用于受力测量和温度测量, 分辨率分别达到了 25 N 和 5.8°C. 因为该设计主要用于传感钢混结构的应变, 25 N 的力已很精确, 温度测量只是为了补偿, 因此 25 N 的受力分辨率已经表征了该设计的优越性.

参考文献

- 1 Patrik H J, Williams G M, Kersey A D, et al. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, 8(9):1223
- 2 James S W, Dockney M L, Tatam R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fiber Bragg grating sensors. *Electron Lett*, 1996, 32(12): 1133 ~ 1134
- 3 Kanellopoulos S E, Handerek V A, Rogers A J. Simultaneous strain and temperature sensing with photogenerated in-fiber gratings. *Opt Lett*, 1995, 20(3): 333 ~ 335
- 4 Dong Xinyong, Liu Yunqi, Liu Zhiguo, et al. Simultaneous displacement and temperature measurement with cantilever-based fiber Bragg grating sensor. *Opt Commun*, 2001, 192: 213 ~ 217
- 5 万里冰, 张博明, 等. 结构健康监测用光纤布拉格光栅应变传感器研究. *激光技术*, 2002, 26(5): 385
Wan L B, Zhang B M, et al. *Laser Technology*, 2002, 26(5): 385

Research on Grating-type Fiber Sensor Used in Monitoring of Building Structure

Dong Xingfa^{1,2}, Fu Shenggui¹, Jiang Li¹, Kai Guiyun¹, Dong Xiaoyi¹

1 Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

2 Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011

Received date: 2003-02-19

Abstract For monitoring building structure, one kind of more fitful FBG sensors is presented. The FBG is protected by a section of thin stainless steel pipe, so it is compatible with building structure. The sensor has a good linearity to stress and temperature, the correlation coefficients of fitting lines are 0.9996 and 0.9985. The FBG is divided into two parts which have different package, so it has two peaks. By measuring the shifts of two reflection peaks, the crosstalk effect of temperature can be canceled.

Keywords Building structure; Grating-type fiber sensor; Packaged by matched steel pipes

Dong Xingfa was born in 1963 in Henan Province. He received the M. S. degree from Institute of Modern Optics, Nankai University in 1988. Now he is a Ph. D. candidate of the same institute. His interests of research are fiber grating sensors and optical fiber communication.

