

文章编号: 1002-2082(2008)05-0804-04

光纤 Bragg 光栅应变、温度交叉敏感问题的研究

王宏亮, 张 晶, 乔学光, 王 瑜

(西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 解决应变和温度的交叉敏感, 实现应变和温度同时测量一直是光纤光栅传感器研究的关键问题。从应变和温度交叉敏感的物理机制出发, 较为全面地介绍了几种主要解决方案: 双波长矩阵法、2 个包层直径不同的 FBG 法、啁啾光栅法等。并且基于双波长矩阵法, 提出了一种基于管式弹性应变敏感元件的光纤光栅传感器结构, 很好地实现了温度 150 °C, 压力 20 MPa 的同时区分测量, 其温度灵敏度为 0.02 nm/°C。解决了温度和应变同时区分测量这一技术难题。

关键词: 光纤 Bragg 光栅; 交叉敏感; 区分测量

中图分类号: TN253

文献标志码: A

Study on strain and temperature cross sensitivity of fiber Bragg grating sensor

WANG Hong-liang, ZHANG Jing, QIAO Xue-guang, WANG Yu

(Key Laboratory of Photoelectric Gas-oil Logging and Detecting Ministry of Education,

Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The cross sensitivity of strain and temperature is a key problem for fiber Bragg grating (FBG) sensors. Based on the physical mechanism of the strain and temperature cross sensitivity, several schemes for the discrimination measurement of temperature and strain are presented. They are dual-wavelength matrix, two FBGs with different cladding diameters and chirped Bragg grating techniques. Based on dual-wavelength matrix technique, a new structure of FBG sensor based on an elastic strain-sensitive element is proposed. Simultaneous discrimination measurements of the pressure and temperature are demonstrated in 20 MPa and 150 °C, and its temperature sensitivity is 0.02 nm/°C.

Key words: fiber Bragg grating (FBG); cross-sensitivity; discrimination measurement

引言

20 世纪 90 年代, 光纤光栅传感技术呈产业化发展, 在许多应用领域中 FBG 传感器倍受青睐^[1-2]。但是, 由于光纤光栅对温度与应变同时敏感, 即温度与应变同时引起光纤光栅耦合波长移动, 使得通过测量光纤光栅耦合波长移动无法对温

度与应变加以区分, 这种交叉敏感效应严重影响着光纤光栅在传感领域的应用。因此, 解决交叉敏感问题对于 FBG 的实际应用具有十分重要的意义。近 10 多年来, 世界各国学者为解决 FBG 交叉敏感问题做了大量工作, 提出许多解决方案。本文从理论上分析引起 FBG 交叉敏感问题的物理机制, 研

收稿日期: 2007-08-27; 修回日期: 2007-11-01

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA06Z210); 国家自然科学基金资助项目(60654001); 陕西省教育厅项目(02JK158); 中国石油天然气集团公司应用基础研究项目(20050719); 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司资助项目(A-2006-JS-003); 陕西省教育厅产业化培育项目(05JC23); 西安市重大技术创新(GG06004); 西安市科技局信息技术专项项目(ZX05041)

作者简介: 王宏亮(1951—), 男, 陕西横山人, 教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感及光电检测方面的研究。

论文联系人: 张晶 E-mail: susan820515@163.com

究交叉敏感问题,提出解决交叉敏感和实现温度和应变区分测量的有效方案,以期有助于光纤光栅传感器的实用化及其推广。

1 基本原理分析

由模式耦合理论可知,满足布拉格条件的光波被 FBG 反射。其反射中心波长 λ_B 可由下式确定:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率; Λ 是光栅周期(栅距)。由于应变和温度的变化都将导致 n_{eff} 和 Λ 发生改变,当外界温度和应变发生变化时,相应的波长改变为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left(\left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \Delta\epsilon + [\alpha + \xi] \Delta T \right) \quad (2)$$

式中: $\Delta\epsilon$ 和 ΔT 分别为应变变化和温度变化量; P_{ij} 是光纤材料的弹光张量分量; α 是光纤材料的热膨胀系数; ξ 为光纤材料的热光系数; ν 为光纤材料泊松(Poisson)比系数。若将光纤布拉格光栅粘贴于弹性衬底材料之上,则作用在光纤光栅上的应变与温度可通过弹性衬底材料的形变和热膨胀间接产生,于是(2)式变为

$$\Delta\lambda = \lambda_B (1 - P_e) \epsilon + \lambda_B [\alpha + \xi + (1 - P_e) (\alpha_s - \alpha)] \Delta T \quad (3)$$

式中: P_e 为光纤的有效弹光系数; α_s 为弹性衬底材料的热膨胀系数。当温度和应变同时发生变化时,FBG 本身无法分辨出到底谁引起 Bragg 波长变化。因此,测量其中一个量时,必然会受到另一个量的影响,同样也无法实现应变和温度的同时测量。由此可见,解决应变、温度交叉敏感问题是 FBG 传感检测技术实用化的关键。

2 温度、应变区分测量的技术方案

2.1 双波长矩阵法

这种方法的基本思想是通过一定方式在 1 个传感头中获得 2 个不同的 Bragg 波长,并通过检测这 2 个 Bragg 波长的位移,实现对温度和应变的同时区分测量。其原理是在应变和温度同时变化的情况下,2 个不同 Bragg 波长的变化可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\epsilon 1} K_{T1} \\ K_{\epsilon 2} K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: K_ϵ 为 Bragg 波长的应变灵敏系数,是与光纤泊松比、弹光系数和纤芯有效折射率有关的常

数; K_T 为 Bragg 波长的温度灵敏系数,是与热膨胀系数和热光系数有关的常数。(4)式有解的条件是 $\frac{K_{\epsilon 1}}{K_{\epsilon 2}} \neq \frac{K_{T1}}{K_{T2}}$,因此该方案要求 2 个 Bragg 波长具有不同的应变或温度灵敏系数。

2.1.1 双光栅法实验理论模型

将 2 个布拉格反射波长不同的光纤布拉格光栅 FBG1 和 FBG2 串联熔接在一起并粘贴固化在以镍基合金为弹性元件的基底材料上,构成基于弹性衬底的双光纤布拉格光栅对压力温度同时测量的传感器系统^[3]。将该传感器置于温度和压力场中,FBG1 对温度和压力同时敏感,由(3)式得:

$$\Delta\lambda_1 = \lambda_{B1} (1 - P_e) \epsilon_1 + \lambda_{B1} [\alpha + \xi + (1 - P_e) (\alpha_s - \alpha)] \Delta T \quad (5)$$

因为衬底材料的热膨胀系数远大于光纤的热膨胀系数,即 $\alpha_s \gg \alpha$,上式可化简为

$$\Delta\lambda_1 = \lambda_{B1} (1 - P_e) \epsilon_1 + \lambda_{B1} [\xi + (1 - P_e) \alpha_s] \Delta T \quad (6)$$

对于 FBG2,通过对传感器结构的优化设计,使其只对温度敏感,将 FBG2 粘贴于底厚为 2 cm 的应变金属圆柱管靠近管底外侧且距管底 0.5 cm 处,管内流体作用于管壁各个方向的压力都不会引起底厚为 2 cm 位置处的环向应变。即 $\epsilon_2 = 0$,则由(3)式可得:

$$\Delta\lambda_2 = \lambda_{B2} [\xi + (1 - P_e) \alpha_s] \Delta T \quad (7)$$

假定压力和温度共同引起的布拉格波长漂移量 $\Delta\lambda$ 是线性的且独立无关,则由(4)式可看出,只要分别测出 λ_{B1} 与 λ_{B2} 2 个反射峰对应的漂移量 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$,便可测得场内的温度和压力。

2.1.2 实验及结果分析

实验装置如图 1 所示,宽带光源(BBS)发出的光经耦合器到达光纤布拉格光栅,其反射波长的变化由光谱仪(OSA)测量。

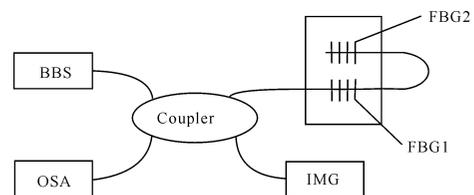


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

图 2 给出了温度一定(室温 20 ℃)时压力在 0 ~ 20 MPa 范围内, λ_{B1} 与 λ_{B2} 随压力变化的实验曲线。 λ_{B1} 随压力 P 的变化成线性关系,其线性拟合方

程为 $\lambda_{B1} = -0.0619P + 1530.8$, 线性拟合度为 $R^2 = 0.9996$, 而 λ_{B2} 几乎不随压力变化而改变。

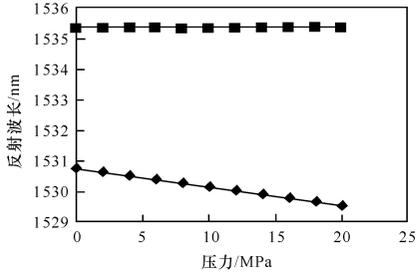


图2 双光纤布拉格光栅反射波长随压力变化关系

Fig. 2 Dual-fiber Bragg grating reflective wavelength versus measured pressure

在压力为一个标准大气压下, 通过温控箱将传感器的温度由室温升至 150 °C 进行实验, λ_{B1} 与 λ_{B2} 随温度变化的实验曲线如图 3 所示。

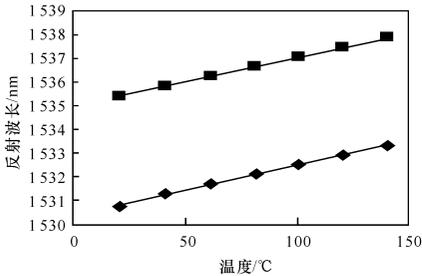


图3 双光纤布拉格光栅反射波长随温度变化关系

Fig. 3 Dual-fiber Bragg grating reflective wavelength versus measured temperature

λ_{B1} 与 λ_{B2} 随温度的变化均呈良好的线性关系。其线性拟合方程分别为 $\lambda_{B1} = 0.0212T + 1530.4$; $\lambda_{B2} = 0.0201T + 1535$ 。线性拟合度分别为 0.9972 和 0.9995。这种方法可以很好地实现温度 150 °C, 压力 20 MPa 的同时区分测量, 其温度灵敏度为 0.02 nm/°C。

2.2 采用 2 个包层直径不同的 FBG

由光纤光栅温度与应变的响应原理可知, 在 2 个包层直径不同而材料相同的光纤中分别写入 2 个 Bragg 光栅, 这 2 个光栅将具有不同的应变响应和相同的温度响应特性^[4-5]。利用这一点, 我们将在不同包层直径光纤中写入 2 个光栅, 分别记为 FBG1 和 FBG2, 如图 4 所示。

当光纤光栅所感知的温度和应变同时改变时, 由于这 2 个光栅是由相同材料构成, 所以它们具有相同的温度响应特性; 但又因为 2 个光纤的包层直

径不同, 导致其应变响应特性不同。对光纤施加轴向应变时, 应变引起的 FBG 耦合波长移动为

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{co}}} \Delta n_{\text{co}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{cl}}} \Delta n_{\text{cl}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial r} \Delta r \right] + \lambda_B \epsilon_z \quad (8)$$

式中: n_{co} 和 n_{cl} 分别为纤芯和包层的折射率; r 为纤芯的直径; ϵ_z 为轴向应变分量。这样, 总体结果表现为 2 个光栅对温度不敏感, 而对应变敏感, 从而实现区分测量。实验中在 2 500 $\mu\epsilon$ 和 120 °C 的应变和温度范围内实现了同时测量, 其中应变测量的灵敏度为 17 $\mu\epsilon$, 温度测量的灵敏度为 1 °C。此外, 还可采用相同直径、不同纤芯材料的光纤光栅进行区分测量, 将光栅写入 2 段光纤的连接处, 其区分测量机理与上述原理相似。其差别仅在于 2 段光纤的直径相同, 而纤芯材料不同, 所以 2 个光栅具有相同的应变响应; 而纤芯材料的差异导致折射率不同, 从而使光栅具有不同的温度响应特性^[6]。利用这一特性, 可达到同时区分测量的目的。

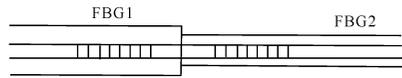


图4 不同包层直径的光纤光栅熔接示意图

Fig. 4 Fusion of fiber gratings with different cladding diameters

2.3 啁啾光栅法

光纤布拉格光栅的光栅常数(光纤折射率调制的周期和幅度)不均匀被称为啁啾光纤光栅。对于一个啁啾光栅, 当沿光栅长度方向引入应变梯度时, 光栅的有效带宽具有随应变而变化且对温度不敏感的特性, 利用这一特性就可以实现温度不敏感的应变测量^[7]。实验装置图如图 5 所示。

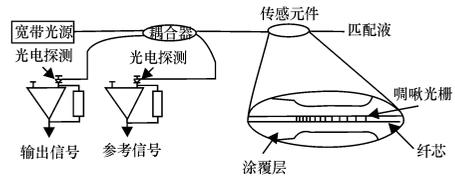


图5 啁啾光栅法实验装置图

Fig. 5 Schematic diagram of experiment arrangement for simultaneous measurement with chirped fiber grating

线性啁啾光栅的峰值反射率约为 100%, 其反射光强度可以表示为

$$|\Delta I_R| = k(1-k)\sigma_s \zeta \Delta \epsilon_{av} \quad (9)$$

式中: k 为耦合的分光比; σ_s 为光源的光谱密度;

ζ 为与弹光系数和锥形光纤参数有关的常数; $\Delta\varepsilon_{av}$ 为平均应变,定义为沿光纤方向各点应变的积分除以光栅长度。由(9)式可知,当应变和温度同时变化时,啁啾光栅的反射光强度仅随应变发生变化。实验中在 $4\ 066\ \mu\varepsilon$ 应变范围内,输出信号(信号光与参考光之比)与应变变化呈良好的线性关系,测量应变的精度可达 $4.4\ \mu\varepsilon$ 。在 $10\ ^\circ\text{C}\sim 50\ ^\circ\text{C}$ 之间,输出信号不随温度而发生变化。这种方法只需1个光纤光栅就可以在较大的应变范围内实现高精度的应变测量,结合光栅中心反射波长的移动,还可以同时测量温度,但这种传感测量不再具有波长编码的特点,容易受其他因素(光源波动、弯曲等)影响。在实际应用中必须同时测量参考信号,以消除光源输出功率起伏等因素引起的测量误差。

3 结束语

交叉敏感问题是FBG传感器发展的“瓶颈”,能否有效地解决这一问题是FBG传感器实用化的关键。本文从物理机制的角度分析了引起交叉敏感的原因,对已有几种主要的解决方案进行了简单的介绍,并对双光栅法进行了实验研究,实验结果说明,利用基于弹性衬底材料的双光纤布拉格光栅传感系统,能够很好地对温度和压力进行区分测量,且灵敏度较高,复用性好。随着FBG应用领域的进一步扩展,根据具体的应用目的,设计更为有效的解决方案业已成为各国学者竞相研究的热点。相信在未来几年中会研究开发出更多精度更高、结构更简单、成本更低的实用的解决方案,进一步促进FBG传感检测技术的应用。

参考文献:

- [1] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber-grating sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8):1442-1463.
- [2] RAO Y J. Recent progress in applications of in-fiber Bragg grating sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, 31(4):297-324.
- [3] CHIANG Y J, WANG L K, LIU W F, et al. Temperature insensitive linear strain measurement using two fiber Bragg gratings in a power detection scheme [J]. *Optics Communications*, 2001, 197(4): 327-330.
- [4] 孔梅,石邦任. 光纤光栅温度与轴向应变响应机制分析[J]. *光子学报*, 2001, 30(2):188-191.
KONG Mei, SHI Bang-ren. Responsive mechanism of fibre gratings to temperature and axial strain[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(2): 188-191. (in Chinese)
- [5] SONG M, LEE B. Interferometric temperature-insensitive strain measurement with different-diameter fibre Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(11):790-792.
- [6] 关柏鸥, TAM H Y, HO S L. 用一根光纤光栅实现温度与应变的同时测量[J]. *光学学报*, 2000, 20(6): 827-830.
GUAN Bai-ou, TAM H Y, HO S L. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single fibre Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6):827-830. (in Chinese)
- [7] XU M G, DONG L, REEKIE L, et al. Temperature-independent strain sensor using a chirped Bragg grating in tapered optical fibre [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(10):823-825.