

文章编号: 0258-7025(2005)02-0224-04

# 聚合物封装光纤布拉格光栅传感器 温度压力特性研究

孙 安, 乔学光, 贾振安, 郭 团, 陈长勇

(西安石油大学光纤传感实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要** 分析了聚合物封装光纤布拉格光栅(FBG)传感器温度与压力响应特性。通过实验对某种特殊聚合物封装光纤光栅的温度与压力响应进行研究,发现当温度变化范围较大时,由于温度对材料弹性模量的影响,光纤光栅的压力响应灵敏度不再为常数,而是随温度变化的。当温度在 30℃ 时,其压力响应灵敏度为 0.036 nm/MPa,在 180℃ 时则变为 0.175 nm/MPa,且灵敏度系数随温度的变化呈分段线性变化。因此在使用聚合物封装实现光纤光栅传感器增敏以及大范围温度和压力的同时测量时,需要将弹性模量作为温度的函数,代入光纤光栅温度与压力响应灵敏度系数矩阵公式中以消除大范围温度变化对聚合物力学特性的影响。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 聚合物封装; 温度响应; 压力响应

**中图分类号** TN 253 **文献标识码** A

## Temperature and Pressure Responsive Characteristics of Polymer Packaged Fiber Bragg Grating with Large Dynamic Range

SUN An, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, GUO Tuan, CHEN Chang-yong

(Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract** The pressure and temperature response characteristics of polymer packaged fiber Bragg grating (FBG) sensor are analyzed. The experimental results show that the pressure sensitivity is not a constant but a variable because of the effect of temperature on elastic modulus of polymer when the change range of temperature is large. The pressure sensitivity is 0.036 nm/MPa at 30℃ and 0.175 nm/MPa at 180℃ and the change of sensitivity is piecewise linear at different temperature range. So elastic modulus should be treated as the function of temperature when using polymer to packaged FBG, the pressure coefficient in the coefficient matrix of FBG should also be the function of temperature in order to eliminate the error induced by the change of elastic modulus caused by large range temperature change.

**Key words** fiber optics; fibre Bragg grating; polymer package; temperture response; pressure response

## 1 引 言

近年来,光纤光栅作为一种新型的具有优良光学特性的传感器引起了人们极大的兴趣<sup>[1,2]</sup>。但光纤光栅对温度和压力响应灵敏度低以及对温度和压力同时敏感是困扰光纤光栅传感器实用化的两大难

题<sup>[3]</sup>。此外,光纤光栅由于紫外曝光或激光写入而强度大大降低,造成直接使用裸光栅作为传感器器件较困难。目前,使用聚合物封装光纤光栅传感器成为光纤光栅传感器实用化的一种重要方案。经过对聚合物封装后的光纤布拉格光栅(FBG)温度和压力响应特性研究,人们已将聚合物用于光纤光栅温度

收稿日期:2003-09-17; 收到修改稿日期:2003-12-25

基金项目:国家高科技 863 计划(2002AA313150)、国家自然科学基金(69877025)、国家教育部科学技术重点项目(02190)、陕西省教育厅项目(02JK158)和西安市工业科技攻关计划项目(GG200126)资助课题。

作者简介:孙 安(1978—),男,新疆石河子市人,西安石油大学硕士研究生,主要从事光纤传感与光纤通信的研究。  
E-mail:sunan\_1978@163.com

或压力增敏<sup>[4~6]</sup>和压力双参量区分测量<sup>[5,7,8]</sup>。很多对聚合物封装光纤光栅特性的研究仅限于较低温度以及压力范围,一般在 100℃ 范围内,因此温度对材料弹性模量影响有时被忽略,封装后光纤光栅的温度响应和压力响应被看成是相互独立的。但是在某些恶劣的高温、高压等动态变化范围较大的环境中(如油气井下),温度有时可达到 180℃ 甚至 200℃ 以上。在这种情况下,根据材料的热力学性质可知,温度对封装材料的弹性模量影响较大,使封装光纤光栅压力响应灵敏度不再为常数,此时光纤光栅的温度与压力响应不再是相互独立的分量,而是相互影响的。本文主要讨论聚合物封装光纤布拉格光栅传感器温度与压力响应灵敏度特性。

## 2 原 理

当对裸光纤布拉格光栅同时施加压力和温度时,一般情况下光纤光栅反射峰中心波长漂移为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon + [\zeta_e + \alpha_e]\Delta T. \quad (1)$$

采用聚合物封装以后,光纤光栅温度与压力响应公式变为<sup>[5]</sup>

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon + [\zeta_e + (1 - P_e)\alpha_{sub}]\Delta T = M_e\epsilon + M_T\Delta T, \quad (2)$$

$$\epsilon = -p_e(1 - 2\mu)P/E, \quad (3)$$

(1)~(3) 式中  $\epsilon$  为应变变化,  $p_e$  为光纤光栅弹光系数,  $\Delta T$  为温度变化,  $\zeta_e$  为光纤材料的热光比系数,  $\alpha_e$  为光纤的热膨胀系数,  $\mu$  为聚合物材料的泊松比系数,  $\alpha_{sub}$  为聚合物材料的热膨胀系数,  $P$  为封装光纤光栅所受压力,  $E$  为聚合物材料的弹性模量。对于掺锗石英光纤来说<sup>[5]</sup>,  $P_e$  取 0.22,  $\zeta_e$  取  $8.3 \times 10^{-8}$ 。

在一般情况下,聚合物封装光纤光栅的温度与压力响应灵敏度由封装材料的特性,主要是弹性模量和热膨胀系数来决定,而聚合物的弹性模量被看成是常数,因此光纤光栅的温度与压力响应为独立分量,即彼此互不影响。所以在使用聚合物封装实现温度和压力区分测量时,可采用两种不同的材料对单个或两个光纤光栅进行封装,改变其温度与压力响应系数,保证产生的两个光纤光栅反射峰中心波长的温度与压力响应灵敏度系数不同,然后,建立光纤光栅响应灵敏度矩阵,便可同时得出温度与压力。灵敏度矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{e1} & M_{T1} \\ M_{e2} & M_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (4)$$

矩阵元  $M_e$  和  $M_T$  为光纤光栅的压力和温度灵

敏度系数,可通过分别测量布拉格光栅波长随温度和应力的变化而得到。

但是由高分子材料性质以及材料力学可知,聚合物材料的弹性模量实际上不为常数,而是一个随温度不同而变化的变量<sup>[9]</sup>。当温度测量的范围较小时,弹性模量变化不大,引起聚合物封装光纤光栅传感器的压力响应系数变化较小,测量值与实际值偏差不大,可以近似将弹性模量作为常量来对待。当温度变化范围较大时,材料会由初始的玻璃态转化为高弹态<sup>[10]</sup>。材料的弹性模量也会随之下降。一般情况下,弹性模量随温度变化曲线如图 1 所示,图中,  $T_g$  为玻璃化温度,指聚合物材料热力学性质渐变区的温度。

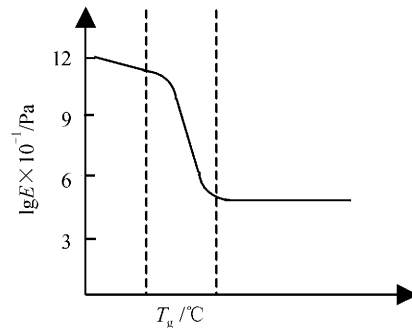


图 1 聚合物的温度-弹性模量曲线图

Fig. 1 Elastic modulus versus temperature for polymer

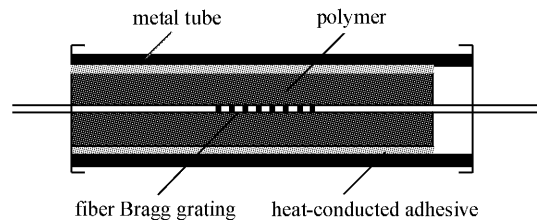


图 2 聚合物封装光纤光栅结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of polymer packaged FBG

在这种情况下,通过聚合物对光纤光栅进行封装后,光纤光栅灵敏度系数矩阵中的矩阵元  $M_{ei}$  不再是常数,而是温度的函数。

为进一步研究聚合物封装材料在不同温度下对光纤光栅压力响应特性的影响,利用某种聚合物对光纤光栅封装,进行温度与压力试验研究。光纤光栅的聚合物封装如图 2 所示。

利用金属套管对光纤光栅进行聚合物灌封,在聚合物以及套管之间涂覆一层有机硅导热胶,此类胶属于软弹性体,且与金属的粘接性较差,用来克服聚合物与金属材料之间的粘接与摩擦,保证封装

光纤光栅的充分受力。

### 3 实验和分析

将封装光纤光栅放入液压罐,将液压罐置于加温室中,以实现温度与压力的同时施加。宽带光源(BBS)发出的光经 3 dB 耦合器入射到光纤光栅中,被反射后又经 3 dB 耦合器送到光谱分析仪(OSA),通过光谱分析仪观察光纤光栅反射峰中心波长的变化。掺铒光纤激光器的工作电流为 15 mA,峰值波长为  $\lambda = 1532$  nm,带宽 40 nm。与 3 dB 耦合器连接的光谱分析仪分辨率为 0.05 nm,用以监测光纤光栅反射峰值中心波长  $\lambda_c$  和带宽  $\Delta\lambda_{3dB}$ 。封装光纤光栅的温度与压力响应特性测试实验装置如图 3 所示。

实验采用逐步升温法,先通过加温室对光纤光栅升温至不同温度,待光纤光栅反射峰中心波长稳定后,以液压在不同温度下对光纤光栅施加压力,得到一系列光纤光栅的压力响应灵敏度系数,如表 1 所示。

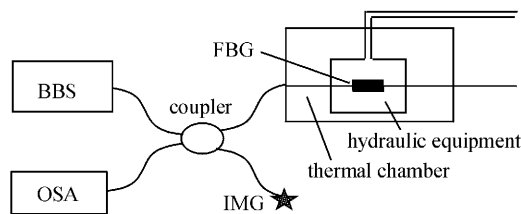


图 3 聚合物封装光纤光栅压力温度测量系统

Fig. 3 Experimental setup for the proposed pressure and temperature measurement of polymer coated FBG

表 1 聚合物封装光纤光栅压力响应灵敏度随温度的变化

Table 1 Test data of pressure sensitivity versus temperature for polymer packaged fiber grating

Temperature/°C	30	80	100	120	150	180
Pressure sensitivity / (nm/MPa)	0.036	0.043	0.09	0.154	0.17	0.175

将表 1 数据用平滑曲线拟合,得到聚合物封装光纤光栅压力响应灵敏度随温度的变化趋势,如图 4 所示。

从图 4 可知,封装后光纤光栅的压力响应灵敏度不为常数,而是随着温度的变化呈分段线性变化,在 30°C 时光纤光栅的压力响应灵敏度为 0.036 nm/MPa,而在 180°C 时则达到了 0.175 nm/MPa。重复

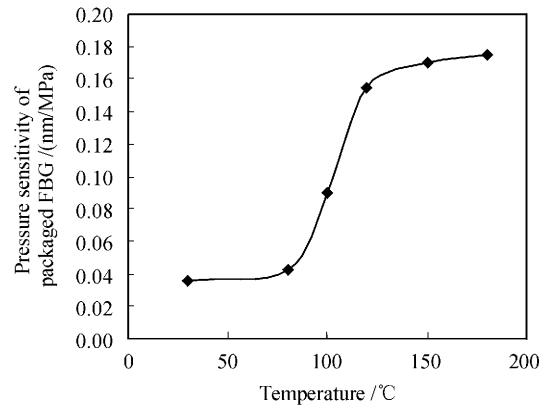


图 4 聚合物封装光纤光栅压力响应灵敏度随温度的变化

Fig. 4 Pressure sensitivity versus temperature for polymer packaged fiber grating

实验,灵敏度变化趋势基本保持稳定。这一变化主要是由聚合物材料的弹性模量改变引起的。聚合物分子的性质和程度取决于温度,不同的运动形式需要不同数量的能量来激发。因此不同形式的运动,存在不同的临界温度,在此温度之下该形式的运动处于“冻结”状态,主要表现为材料弹性模量的不同。在低温段,聚合物分子链段热运动不足以克服分子主链内旋转位垒,链段的运动为“冻结”状态,聚合物处于玻璃态,在力学行为上表现为弹性模量高,形变小。当升温至玻璃化温度  $T_g$  后,聚合物链段运动开始“解冻”,由玻璃态向高弹态转化,大分子链构象开始改变,弹性模量下降。弹性模量-温度的变化趋势见图 1。

由图 4 还可看出,光纤光栅响应灵敏度变化趋势与图 1 中聚合物弹性模量变化趋势相对应。因此,在使用聚合物封装光纤光栅实现区分测量时,不能将光纤光栅的温度与压力响应作为相互独立的分量,而应将温度作为弹性模量的函数来处理。这样公式(3)变为

$$\epsilon = -p_e(1 - 2\mu)P/E(t), \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)可得

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = -(1 - P_e)p_e(1 - 2\mu)P/E(t) + [\zeta_e + (1 - P_e)\alpha_{sub}]\Delta T. \quad (6)$$

在不同温度范围聚合物弹性模量随温度变化的函数可近似表示为

$$E(t) = \begin{cases} E_0 & t < 80^\circ\text{C} \\ E_0(0.028t - 0.1837) & 80^\circ\text{C} \leq t < 120^\circ\text{C} \\ 0.2057E_0 & 120^\circ\text{C} \leq t < 180^\circ\text{C} \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $E_0$  为常温下聚合物材料的弹性模量,  $t$  为温度变化。将式(7)代入式(6), 在不同温度下, 对光纤光栅传感器压力响应灵敏度进行测试, 得到的曲线与图 4 曲线基本一致, 光纤光栅反射峰中心波长也与由公式所得到的理论值基本吻合。

所采用的聚合物材料为某种特殊树脂, 这种聚合物的玻璃化温度  $T_g$  在  $120^\circ\text{C}$  左右, 与实验中封装光纤光栅压力响应特性发生改变的范围吻合。大多数聚合物材料均具有弹性模量随温度变化这一特性, 且特性曲线与图 1 基本相似, 只是玻璃化温度范围以及弹性模量随温度变化程度不同, 所以式(7)中具体参数反映的仅为本文所采用聚合物温度与弹性模量之间的关系。当使用其他聚合物材料进行封装时, 需要对材料的特性进行测试, 根据材料的玻璃化温度确定式(7)中的具体数值。

因此, 对于大多数使用聚合物对光纤光栅进行封装以实现区分测量的方案来说, 如果采用不同种聚合物封装光纤光栅, 需要对不同聚合物材料的弹性模量-温度函数分别进行计算, 然后代入压力响应公式中, 以消除温度对光纤光栅压力响应的影响, 弹性模量由式(6)中的分段函数决定。当测量温度范围较低时, 可近似认为光纤光栅的压力响应灵敏度为常数, 如测量范围较大, 则必须作为变量处理。灵敏度矩阵由式(4)变为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{e1}(t) & M_{T1} \\ M_{e2}(t) & M_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (8)$$

以往采用两种聚合物封装同时测量温度和压力时, 如果测量范围很大, 则需要对两种聚合物弹性模量函数分别测定, 然后将分段函数代入灵敏度响应矩阵, 导致矩阵系数复杂化。在此提出一种简单的封装光纤光栅进行温度和压力的同时测量, 只需选用一种聚合物材料, 将两个光纤光栅灌封到结构如图 2 的两个金属套管中, 然后将其中一个套管两端封闭, 实现压力屏蔽, 成为压力不敏感光栅, 可用来测量温度, 将另一个套管一端开口, 使其可受到温度和压力的同时作用。这样, 两个光栅具有相同的温度响应灵敏度, 但其中套管两端封闭的封装光纤光栅传感器压力响应灵敏度为 0。只需要知道这种材料的弹性模量-温度规律, 通过压力屏蔽光栅测量出温度值, 便可以得出此聚合物的压力响应系数, 这样, 灵敏度响应系数矩阵得到简化, 变为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{e1}(t) & M_{T1} \\ 0 & M_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (9)$$

有关此方面的实验正在进行中。

## 4 结 论

通过研究某种聚合物封装光纤光栅的温度与压力响应特性, 发现光纤光栅的压力响应特性随着温度的不同而呈规律的分段线性变化, 且变化的幅度较大, 对于本文所采用的聚合物, 在  $30\sim 180^\circ\text{C}$  的范围内, 光纤光栅的压力相应灵敏度由  $0.036\text{ nm/MPa}$  变为  $0.175\text{ nm/MPa}$ 。因此在将光纤光栅应用于油气井下等温度压力变化较大的环境中时, 需要对材料弹性模量-温度特性进行测定, 修正光纤光栅传感器灵敏度矩阵, 并设计合适的传感头结构以实现温度和压力的高精度测量。

## 参 考 文 献

- Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fibre grating sensors [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(4): 420~430  
姜德生, 何 伟. 光纤光栅传感器应用概况 [M]. 光电子·激光, 2002, **13**(4): 420~430
- Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Stress sensitivity enhanced in-fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 473~476  
傅海威, 乔学光, 贾振安 等. 应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器 [J]. 中国激光, 2004, **31**(4): 473~476
- Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Simultaneous discriminating measurement of temperature and strain by using fibre grating sensing technology [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(2): 210~214  
孙 安, 乔学光, 贾振安 等. 光纤光栅温度和应力同时区分测量传感技术 [J]. 光电子·激光, 2003, **14**(2): 210~214
- A. A. Abramov, A. Hale, R. S. Windeler *et al.*. Widely tunable long-period fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(1): 81~82
- Zhou Zhi, Zhao Xuefeng, Wu Zhanjun *et al.*. Study on FBG sensor's steel capillary encapsulating technique and sensing properties [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1089~1092  
周 智, 赵雪峰, 武湛君 等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究 [J]. 中国激光, 2002, **A29**(12): 1089~1092
- Ying Zhang, Dejun Feng, Zhiguo Liu *et al.*. High sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(6): 618~619
- Yunqi Liu, Zhuanyun Guo, Ying Zhang *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre Bragg grating [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(6): 564~566
- L. A. Ferreira, F. M. Araujo, Jose. L. Santos *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensor [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(8): 2226~2233
- Liu Hongwen. *Mechanics of Materials* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. 33~35  
刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 33~35
- Zhang Liucheng, Zhai Xiongwei, Ding Huili. *Macromolecule Materials Foundation* [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2002. 92~123  
张留成, 翟雄伟, 丁会利. 高分子材料基础 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 92~123