

光纤光栅温度增敏技术

贾振安, 乔学光, 傅海威, 周 红

(西安石油学院 信息科学系, 陕西 西安 710065)

摘要: 选用热膨胀系数较大的聚合物材料, 采用特殊工艺用其对裸光纤光栅进行封装, 极大地提高了光纤光栅的温度灵敏度。在 20~90℃ 范围内, 聚合物封装光纤光栅的平均灵敏度系数 $\bar{\eta} = 112.447 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$, 比裸光纤光栅增加了 15.804 倍; 温度灵敏度为 0.176 nm/°C, 比裸光纤光栅增加了 16 倍; 反射波长漂移量增加了 15.95 倍。裸光纤光栅和聚合物封装光纤光栅的温度响应曲线均具有很好的线性。

关键词: 光纤光栅; 光纤传感; 温度传感; 温度增敏

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-274 X (2003)04-0413-03

用于传感的光纤光栅(FBG)是以其谐振耦合波长随外界参量变化而移动为基础的, 属于波长调制型传感器, 与传统的“光强型”和“干涉型”相比, 具有以下优点^[1]: 首先, 光纤光栅传感的感应信息用波长编码, 与光源强度、光源起伏、光纤弯曲损耗、光纤连接损耗、光波偏振态无关, 所以它具有很强的抗干扰能力; 其次, 易于采用波分复用、时分复用和空间复用技术构成光纤光栅智能传感网络; 第三, 光纤光栅是一种本征型传感器, 无机械损耗, 可靠性高, 寿命长, 易于埋入材料内部, 实现分布式多点实时在线传感。自 1989 年 Morey 首次报道将光纤光栅用于传感以来^[2], 理论和应用研究取得了迅速发展^[3~10]。光纤光栅传感器测量的是 FBG 反射波长的漂移量, 当环境因素变化时, 光纤光栅的反射波长将会漂移, 通过检测波长漂移量就可以获得被测量。温度、应力、应变等物理量都可以引起光纤光栅反射波长的移动, 因此用光纤光栅可以实现对这些物理量的测量^[11,12]。

温度是能直接引起 Bragg 反射波长 λ_B 漂移的物理量之一, 作为温度传感器件, 总是希望光纤光栅具有大的温度灵敏度, 以便获得高的温度分辨率。但是, 由于光纤材料的热光系数和热膨胀系数都较小, 所以光纤光栅的温度灵敏性很低, 直接用裸光纤光

栅作温度传感元件, 需要复杂的波长解调技术, 不仅价格昂贵, 而且不易获得高的温度分辨率, 严重影响了光纤光栅在温度传感方面的应用。因此, 研究光纤光栅的温度增敏技术, 改善光纤光栅的温度敏感性能, 是光纤光栅温度传感器走向实用化的关键, 近年来对此进行了大量研究^[13~17]。我们在光纤光栅温度增敏的研究中, 选用一种热膨胀系数较大的聚合物材料, 用特殊的封装工艺将光纤光栅镶嵌于聚合物中, 有效地增大了光纤光栅的温度灵敏度。

1 光纤光栅温度增敏技术

1.1 光纤光栅温度传感原理

光纤光栅是用紫外光改变光敏光纤芯区折射率, 产生小的周期性调制而形成一种芯内体光栅, 这种光栅具有独特的波长选择性, 它只反射入射光中满足 Bragg 衍射条件的光。温度是通过影响光栅周期和光栅反向耦合模的有效折射率导致光纤光栅响应波长的移动, 通过检测波长移动量就可以得到被测温度。

光纤光栅的 Bragg 方程为

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

式中: n_{eff} 为光纤光栅反向耦合模的有效折射率; Λ 是

收稿日期: 2002-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69877025); 国家“863”计划资助项目(2002AA313150); 教育部科学技术重点资助项目(02190); 陕西省自然科学基金资助项目(2000C34); 陕西省教育厅科学技术资助项目(02JK158); 西安市科技攻关资助项目(GG200126)。

作者简介: 贾振安(1959-), 男, 陕西西安人, 西安石油学院副教授, 从事光纤传感的理论、实验及应用研究。

光纤光栅的周期。外界温度改变时,光栅的反射 Bragg 波长 λ_B 发生漂移,这就是光栅的温变效应。由式(1)得 Bragg 方程的变分形式为

$$\Delta\lambda_B = 2(\Delta n_{eff}\Lambda + n_{eff}\Delta\Lambda) = 2\left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right] \cdot \Delta T. \quad (2)$$

由式(1,2),得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right] \cdot \Delta T. \quad (3)$$

式中: $\frac{1}{n_{eff}} \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ 代表光纤光栅热光系数,用 ξ 表示; $\frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ 代表光纤的热膨胀系数,用 α 表示。因此,式(3)可以写成

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [\xi + \alpha] \cdot \Delta T = \eta \cdot \Delta T. \quad (4)$$

其中 $\eta = \xi + \alpha$, (5) 是裸光纤光栅的温度灵敏度系数。当材料确定后, η 基本上为一与材料参数相关的常数,所以光纤光栅温度传感器具有很好的线性输出。石英的 $\alpha \approx 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\xi = 6.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ [18], 所以 η 的理论值为 $\eta \approx 7.35 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。若忽略温度对热膨胀系数 α 和热光系数 ξ 的影响,则光纤光栅温度灵敏度系数 η 为一常量。由式(4)可以得出,光纤光栅反射波长相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与温度改变量 ΔT 成正比,比例系数就是温度灵敏度系数 η 。

由式(4),得

$$\Delta\lambda_B = \eta\lambda_B \cdot \Delta T = \kappa \cdot \Delta T, \quad (6)$$

$$\kappa = \eta\lambda_B. \quad (7)$$

式中 κ 是光纤光栅的温度灵敏度,表示每单位温度所对应的反射波长漂移值。

1.2 光纤光栅温度传感增敏技术

裸光纤光栅是用准分子激光器的紫外光在掺锗单模光纤上采用相位掩模板技术紫外侧写入的,20℃ 时,其反射波长 $\lambda_B = 1552.13 \text{ nm}$,用选定的聚合物将光纤光栅在模具中封装起来,图 1 为光纤光栅聚合物封装示意图。

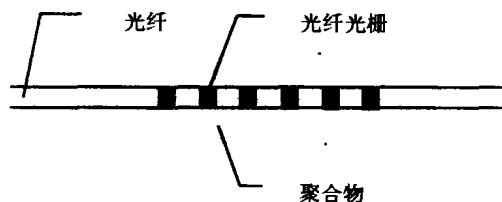


图 1 光纤光栅聚合物封装结构

Fig. 1 Structure of polymer packaged FBG

由于所选用聚合物的热膨胀系数远远大于光

纤芯的热膨胀系数,将封装后的光纤光栅置于被测温度场中时,光栅周期 Λ 除自身因热膨胀而伸长外,还将因为聚合物的热膨胀而伸长,使得光栅周期 Λ 的总伸长量大于裸光纤光栅在同一温度下的伸长值,引起反射波长漂移量或温度灵敏度的增大,达到温度增敏的效果。

用聚合物封装的光纤光栅,其大小和形状可根据实际应用环境设计,不会损坏光栅。聚合物一方面起增敏作用,另一方面对光纤光栅有保护效果,使光纤光栅能在更多的场合进行温度传感,增加了光纤光栅的应用范围。

2 实验结果

2.1 实验装置

实验装置如图 2 所示。从宽带光源发出的中心波长为 1545.1 nm(阈值为 7.7 dB,带宽为 40.0 nm)的红外光通过 3 dB 耦合器入射到单模光纤,进而入射到置于加热箱内的光纤光栅,经光纤光栅反射的光通过耦合器进入光谱分析仪(Anritsu MS9710C)。光纤光栅是用准分子激光器的紫外光在掺锗单模光纤上采用相位掩模板技术紫外侧写入的,光谱仪的分辨率为 0.05 nm,控温箱的温度由电子加热炉控制,温度大小由面板上的数字表读取。为了提高数据采集精确度,我们记录某一阈值时反射波长的中心值 λ_c 。

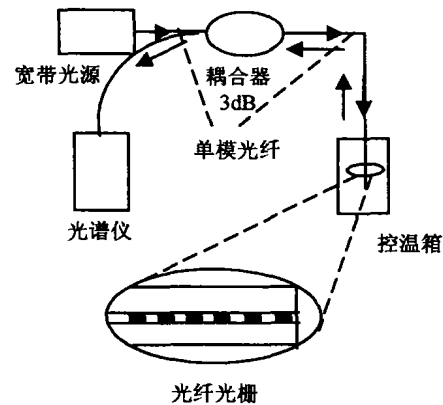


图 2 光纤光栅温度传感实验装置

Fig. 2 Schematic diagram for fiber grating temperature sensing

2.2 实验结果

在 20 ~ 90℃ 范围内对光纤光栅反射波中心波长的温度响应进行了测量,实验中,对反射中心波检测时,阈值取 10.0 dB,温度每变化 10℃ 记录一个 λ_c ,基准温度 $T_0 = 20^\circ\text{C}$,与其对应的基准反射波中

心波长 $\lambda_0 = 1552.13 \text{ nm}$, $\Delta T = T - T_0$, $\Delta \lambda_c = \lambda_c - \lambda_0$ 。图 3 是封装前后反射中心波长相对漂移量 $\Delta \lambda_c / \lambda_c$ 与温度改变量 ΔT 的实验曲线,其中点线为实验值,光滑直线为实验点的拟合直线。裸光纤光栅在该温度区间的平均灵敏度系数 $\bar{\eta} = 7.115 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$,与理论值吻合得比较好,聚合物封装光纤光栅的平均灵敏度系数 $\bar{\eta} = 112.447 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$,增加了 15.804 倍;裸光纤光栅温度灵敏度为 $0.011 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,聚合物封装光纤光栅温度灵敏度为 $0.176 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,增加了 16 倍;温度从 20°C 上升到 90°C 时,裸光纤光栅的反射波长漂移量为 0.76 nm ,聚合物封装光纤光栅反射波长漂移量为 12.12 nm ,增加了 15.95 倍;裸光纤光栅和聚合物封装光纤光栅的温度响应曲线均具有很好的线性,线性度分别为 0.9979 和 0.9987 。

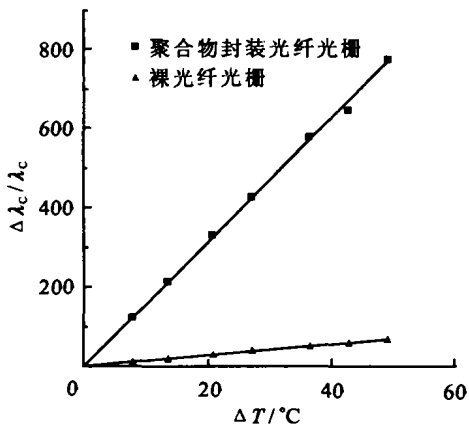


图 3 反射波长相对漂移与温度改变量实验曲线

Fig. 3 Experimental curves of relative reflected wavelength shift versus temperature increment

3 结 论

根据实验结果,可以得出如下结论:

- 1) 裸光纤光栅的温度敏感性很弱,不便于直接作温度传感元件;
- 2) 为了提高裸光纤光栅的温敏特性,需要将光纤光栅用热膨胀系数较大的材料进行封装,聚合物材料是一种较为理想的选择;
- 3) 聚合物封装光纤光栅不仅提高了光纤光栅的温度灵敏度,而且对光纤光栅起到很好的保护作用;
- 4) 聚合物封装技术不会损坏光栅,大小和形状可根据实际应用环境设计,使光纤光栅能在更多的场合进行温度传感,增加了光纤光栅的应用范围;

5) 裸光纤光栅和聚合物封装光纤光栅均具有很好的线性温度响应特性;

6) 不同的聚合物有不同的热膨胀系数,寻找具有较大热膨胀系数的聚合物,用其对光纤光栅进行封装,是增加光纤光栅温度灵敏度的有效途径。

参考文献:

- [1] 王启明,魏光辉,高以智. 光子学技术[M]. 北京:清华大学出版社;暨南大学出版社,2002. 91-107.
- [2] MOREY W W. Fiber optic Bragg grating sensors[J]. Proc SPIE,1989,1 169:98-107.
- [3] RAO Y J. In-fiber Bragg grating sensors[J]. Meas Sci & Technol,1997,8(4):355-375.
- [4] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensors[J]. J Lightwave Technol,1997, 15(8):1 442-1 463.
- [5] RAO Y J. Recent progress in application of in-fiber Bragg grating sensors[J]. Opt & Las, 1999, 31: 297-324.
- [6] QIAO Xue-guang, LI Yu-lin. Hybrid FBG/LPFG sensors for simultaneous measuring strain and temperature of oil/gas bottomline[J]. Journal of Optic electronics Laser,1999,10(1):42-45.
- [7] SPIRIN V V, SHLYAGIN M G, MIRDONOV S B, et al. Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon lake detection[J]. Opt Lasers Eng,2000,32:497-503.
- [8] KERSEY A D, DAVIS H J, PATRICK. Fiber grating sensors[J]. IEEE J of Light wave tech, 1997, 15: 1 442-1 463.
- [9] 万里冰,武湛君,张博明,等. 应用光纤 Bragg 光栅测量混凝土结构内部应变[J]. 光电子·激光,2002,13(7): 722-725.
- [10] 姜德生,何 伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光,2002,13(4):420-430.
- [11] GUAN Bai-ou, TAM Hwa-yaw, TAO Xiao-ming, et al. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating[J]. IEEE Photon Technol Lett,2000,12(6):675-677.
- [12] AFERREIRA L, SANTOS J L, FARAHI F. Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors[J]. Optic Engineering, 2000, 39 (8): 2 226-2 233.
- [13] DU Wei-chong, TAM H Y, DEMOKAN M S, et al. A simple method to enhance temperature sensitivity of fiber grating[J]. Chinese J Lasers,1997,24(1):75-77.

(下转第 420 页)

征及变化趋势。

4) 偏差矢量的方位决定了控制力的作用方向, 而偏差矢量的大小将决定控制力的大小。

5) 在井眼轨迹控制时, 采用比例-微分控制方法, 既可以使实际井眼偏差逐步减小, 而且还能抑制轨迹超调, 使实际轨迹围绕设计轨迹的波动具有一平缓的趋势。

参考文献:

[1] 狄勤丰, 张绍槐. 井下闭环钻井系统的研究与开发[J].

石油钻探技术, 1997, 25(2): 1-4.

[2] 张武攀. 自动导向旋转钻进南海 8 600 m 大位移井[J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(1): 7-10.

[3] 狄勤丰. 旋转导向中下闭环钻井技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. 12-19.

[4] 张绍槐, 狄勤丰. 用旋转导向钻井系统钻大位移井[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 76-80.

(编辑 姚远)

Research on the well trajectory bias vector control method of the rotary closed-loop drilling technology

YU Wen-ping¹, DI Qin-feng²

(1. Mechanics and Construction Institute, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The rotary steering mechanism of the well trajectory was studied intensively, and the bias vector control method was proposed. The calculation method of the bias vector was given, and the control mechanism of the bias vector control method and the control instruction were described.

Key words: rotary steering; drilling engineering; well trajectory; bias vector; well trajectory control; steering force

(上接第 415 页)

[14] REID M B O. Temperature dependence of fiber optic Bragg gratings at low temperature [J]. Opt Eng, 1998, 37(1): 237-240.

[15] GUPTA S, MIZUNAMI T, YAMAOKA T, *et al.* Fiber Bragg grating cryogenic temperature sensors[J]. Appl Opt, 1996, 35(25): 5 202-5 205.

[16] LIN G C, WANG L K, YANG C C, *et al.* Thermal

performance of metal-clad fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE Photon Tech Lett, 1998, 10(3): 406-408.

[17] CRUZ J L, DONG L, REEKIE L. Improved thermal sensitivity of fiber Bragg grating using a polymer overlayer[J]. Electron Lett, 1996, 32(4): 386-388.

[18] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

(编辑 曹大刚)

Temperature sensitivity enhancement technology of fiber Bragg gratings

JIA Zhen-an, QIAO Xue-guang, FU Hai-wei, ZHOU Hong

(Information Science Department, Xi'an Petroleum Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The temperature sensitivity of fiber Bragg gratings has been improved largely by a kind of polymer-package with big thermal expansion coefficient using a special technology. Within 20~90°C, it was obtained that the average temperature sensitivity coefficient of polymer-packaged fiber Bragg gratings was $\bar{\eta}' = 112.447 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, which enhanced 15.804 times as much as the value of bare fiber Bragg grating. The temperature sensitivity was 0.176 nm/°C, which enhanced 16 times. And the reflected wavelength shift enhanced 15.94 times. Both temperature response curves of bare and polymer-packaged fiber Bragg gratings have better linearity.

Key words: fiber Bragg gratings; optic fiber sensing; temperature sensing; temperature sensitivity enhancement