

## A Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with High Temperature-Resistance \*

WANG Hong-liang<sup>\*</sup>, ZHANG Jing, QIAO Xue-guang, WANG Yu

(Key Laboratory of Photoelectric Gas-oil Logging and Detecting Ministry of Education, Xian Shiyou University, Xian 710065, China)

**Abstract:** The linear characteristics of fiber bragg grating in high temperature has been analyzed. A fiber bragg grating temperature sensor with high temperature-resistance is designed, the theoretical and experimental results showed: This sensor has good repeatability and linearity. The sensitivity is to 0.030 4 nm/℃, which is 3 times higher than the bare optical fiber grating. This sensor has high stability in the range of 0 ~ 230 ℃. After 10 equal observations, the fluctuation of sensitivity is less than 0.06%. This fiber bragg grating temperature sensor can be used in high-temperature environments measuring temperature changes.

**Key words:** Fiber Bragg Grating (FBG); temperature sensor; temperature-resistance; linearity  
**EEACC:** 7230E; 7320R

## 一种耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器 \*

王宏亮<sup>\*</sup>, 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, 西安 710065)

**摘 要:** 分析了光纤 Bragg 光栅在高温段的线性特征, 设计了一种高温光纤 Bragg 光栅的传感探头, 并进行了理论和实验研究, 结果表明: 该传感器有很好的重复性和良好的线性特性。其灵敏度为 0.030 4 nm/℃, 是裸栅的 3 倍, 可检测的温度范围为 0 ~ 230 ℃, 且具有很高的稳定性, 经 10 次等精度测量, 其灵敏度值的波动不超过 0.06%。可应用于高温环境下测量温度的变化。

**关键词:** 光纤 Bragg 光栅; 温度传感器; 耐高温; 线性度

**中图分类号:** TP212.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2008)06-0964-03

自 20 世纪 80 年代以来, 随着光纤光栅制造技术的不断完善, 在裸光纤上涂敷耐高温的保护层后, 可将光纤光栅传感器应用范围扩大到检测高温<sup>[1-4]</sup>, 例如高温油气井中的温度, 因为油井温度是确定油层的位置、厚度、含水层深度等的基本依据, 但随开采深度的增加, 温度不断升高<sup>[5]</sup>。目前用于动态监测的生产测井设备主要是电子测量仪器, 自身存在很多不足, 如井下电子部件长期工作受温度漂移影响, 易受电磁干扰, 可靠性差等; 每次测量时生产井须停产; 井下作业和生产成本过高; 测量数据不能实时、在线、准确地反映井下动态情况等。光纤 Bragg 光栅传感技术除了能很好地弥补这些缺点外, 还具有传输损耗

小、抗腐蚀、抗电磁干扰、可组网, 特别适合用于生产井中测量井下温度和压力等多种参数。因此, 研制耐高温的光纤光栅传感器势在必行。但是光纤光栅反射波长在高温段和大范围测温中, 与温度呈非线性关系式。因此, 研究大范围内温度变化量和波长漂移的线性响应, 降低 FBG 传感器的高温非线性效应, 是 FBG 温度传感器走向实用化的关键<sup>[6]</sup>。

本文提出了一种改进型耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器, 对其温度的传感机理进行了分析和实验研究。分析了在高温情况下影响 FBG 线性度的因素以及 FBG 的高温响应特性, 提出了在高温环境中提高 FBG 传感器的一阶响应灵敏度系数能有效

**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); 陕西省教育厅科学技术项目资助(02J K158); 中国石油天然气集团公司应用基础研究项目资助(20050719); 陕西省教育厅产业化培育项目资助(05JC23); 西安市重大技术创新项目资助(GG06004); 西安市科技局信息技术专项项目资助(ZX05041)

**收稿日期:** 2007-10-21 **修改日期:** 2007-12-26

优化温度-波长的线性响应。实验表明:此种结构的温度传感器具有温度测量范围宽,重复性好,光纤光栅的温度灵敏度可达 0.030 4 nm/ ,性能稳定,可以满足实际应用中许多高温环境诸如油气井下等工程的需要。

### 1 光纤布拉格光栅温度传感的理论模型

由光栅方程

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \tag{1}$$

式中:  $n_{eff}$  是光纤纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  是光栅周期(栅距)。当外界温度变化时,  $\lambda_B$ 、 $n_{eff}$  和  $\Lambda$  只是温度  $T$  的函数,低温段 ( $< 100$  ) 时,中心波长与温度的变化量呈现较好的线性关系;但在高温段 ( $> 100$  ) 时,应采用高阶多项式拟合中心波长与温度的关系<sup>[7-10]</sup>。将  $\lambda_B(T)$  作泰勒展开式

$$\lambda_B(T) = \lambda_B(T_0) + \frac{d\lambda_B(T)}{dT} T + \frac{1}{2} \frac{d^2\lambda_B(T)}{dT^2} T^2 + \dots \tag{2}$$

式中:  $T = T - T_0$ ,  $T_0$  为初始时光栅所处的温度场温度。由式(1) 和式(2) 得

$$\frac{\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{dT} T + \frac{1}{2} \frac{d^2\lambda_B}{dT^2} T^2 + \dots \tag{3}$$

上式给出光纤光栅检测温度的线性响应特性和非线性响应特性。将 FBG 封装于热膨胀系数为  $s$  的基底材料中,检测外温度场的温度时保留到二次项,上式写为:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_B}{\lambda_B} = & [ P_{eff} + (1 - P_{eff}) s ] T + \frac{1}{2} \{ P_{eff} \frac{d}{dT} + \frac{d}{dT} + (1 - P_{eff}) \frac{d_s}{dT} + [ P_{eff} + (1 - P_{eff}) s ]^2 \} T^2 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\text{令 } K_{T1} = P_{eff} + (1 - P_{eff}) s \tag{5}$$

$$K_{T2} = \frac{1}{2} \{ P_{eff} \frac{d}{dT} + \frac{d}{dT} + (1 - P_{eff}) \frac{d_s}{dT} + [ P_{eff} + (1 - P_{eff}) s ]^2 \} T \tag{6}$$

$K_{T1}$  和  $K_{T2}$  分别是一阶和二阶响应灵敏度系数,则封装后的 FBG 有效线性灵敏度系数为:

$$K_T = K_{T1} + K_{T2} \tag{7}$$

式中  $\alpha$  是光纤材料的热膨胀系数,  $\beta$  为光纤材料的热光系数,  $P_e$  为光纤材料的有效弹光系数,  $s$  为基底材料的热膨胀系数,对于硅基质掺锗光纤材料<sup>[11]</sup>,  $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} /$ ,  $\beta = 6.67 \times 10^{-6} /$ ,  $P_e = 0.22$ ,  $K_T$  为光纤光栅的温度灵敏度系数,不同的弹性元件与光纤光栅耦合成不同的温度传感器,  $K_T$  是研究设计光纤光栅温度传感器的关键。封装后  $K_T$  的理论值为

$$K_T = (6.791 \times 10^{-6} + 0.78 s) + \frac{1}{2} [ \frac{d}{dT} + (6.791 \times 10^{-6} + 0.78 s)^2 ] T \tag{8}$$

由式(8) 可知封装后的 FBG 温度响应灵敏度并不是常数,而是温度的函数。由式(5)、式(6) 分析知:  $s$  为定值时,  $K_{T1}$  不受温度的影响,  $K_{T2}$  随温度的变化而变化;  $s$  越大,  $K_{T2}$  相对  $K_{T1}$  的变化越小,则  $K_T$  变化越小,线性越好。

### 2 实验及结果分析

光纤光栅温度传感器结构图如图 1 所示,用耐高温胶将 FBG 封装于一定热膨胀系数的铍青铜毛细管中,  $s = 17.8 \times 10^{-6} /$ 。并用密封胶对聚四氟圆柱筒两端进行密封,以避免外压力直接作用于光纤光栅引起横向和纵向应变。整体传感器尺寸是按油井下管柱与套管之间的最大空间设计,其中外径为 20 mm,长度为 100 mm。使用聚四氟材料封装是为了防止油气井中的各种腐蚀性物质的腐蚀。封装时,为了防止有机应变胶在粘流态温度下变软而使光纤光栅产生啾啾,引起非线性效应,在封装过程中,对光纤光栅稍许施加一定的预应力,传感光纤光栅在有效长度上产生均匀的热应变,以保证光纤光栅反射波长与温度有良好的线性关系。

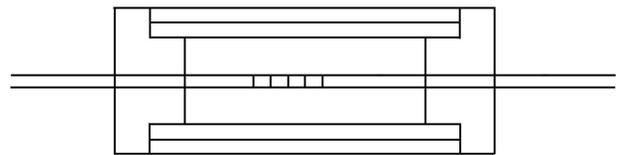


图 1 封装光纤光栅温度传感器结构

实验中,FBG 是用准分子激光器的紫外光在掺 Ge 单模光纤上采用相位掩模板技术外侧写入的,用掺 Er 光纤宽带光源作为入射波,用光谱仪(OA) (分辨率为 0.01) 测量反射波。FBG 的初始中心波长为  $\lambda = 1547.8592$  nm,初始温度为 17.5 。将封装好的光纤光栅传感器放入高温控制箱中,其测试装置如图 2 所示,从宽带光源(BBS) 发出的光经过 3 dB 耦合器入射到光纤光栅,再经其反射由 3 dB 耦合器输入光谱分析仪,通过光谱分析仪观测光纤光栅反射峰中心波长的变化。

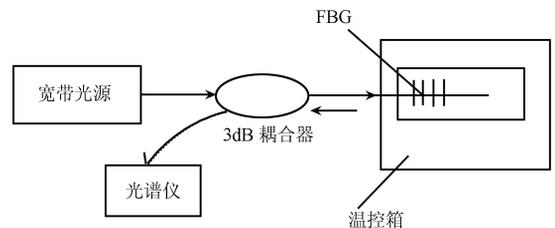


图 2 FBG 温度传感实验装置

实验中,温度变化范围为 17.5 ~ 230 ,100 以内温度每变化 15 记录一个 c,温度高于 100 时,每变化 20 记录一个 c,在该温度变化范围内,光纤光栅中

心反射波长随温度变化的响应曲线如图3所示。

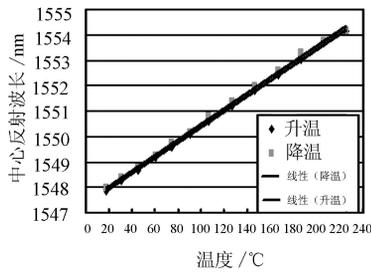


图3 升温与降温过程反射波长漂移曲线

对实验数据进行线性拟合,升温 and 降温的曲线均为  $y = 0.0304x + 1547$ 。且线性拟合度分别为 0.9997 和 0.9984,线性响应灵敏度为  $0.0304 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ ,实验表明温度在  $0 \sim 230$  范围内,依然体现了良好的一阶线性的温度响应特性,且未产生升温与降温过程中的回线。由式(5)、式(6)、式(7)代入有关参数可计算出,裸 FBG 的一阶响应灵敏度系数仅为  $6.791 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,线性响应灵敏度的理论值为  $0.01 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ ;封装后的一阶响应灵敏度系数  $K_{T_1} = 20.675 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $K_{T_2} = 4.916 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$ ,与  $K_{T_1}$  相比较可忽略不计,因此  $K_T = K_{T_1} + K_{T_2} = 20.675 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。线性响应灵敏度的理论值为  $K_T \times B = 20.675 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \times 1547.8592 \text{ nm} = 0.032 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。与实验值  $0.0304 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  相比,其相对误差较小约为 5%。引起线性响应灵敏度相对误差的主要原因是一阶响应灵敏度系数相对二阶响应灵敏度系数的大小。封装后的一阶响应灵敏度系数大于裸 FBG 的一阶响应灵敏度系数,二阶响应灵敏度系数是温度的函数,因此一阶响应灵敏度系数越大,其线性度越好,在高温段的非线性现象越不明显,即基体材料的热膨胀系数越大,在高温段的非线性的影响越小,线性度相对越好,其测量值相应较准确,这与推导的理论公式相吻合。

由于在实验室中模拟油气井下的环境,将传感器放入油中进行实验,当温度升至  $230$  时,油开始冒烟,所以未能再进行更高温度的测试。光纤光栅温度响应灵敏度为  $0.0304 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ ,约为裸光纤光栅的 3 倍。经过 10 次等精度测量,对温度响应的灵敏度稳定在  $0.06\%$  之内。

### 3 结论

对光纤布拉格光栅的温度传感特性进行了理论分析和实验研究,推导了封装后的 FBG 的温度灵敏度系数的解析表达式。实验表明:提高一阶响应灵敏度系数能有效降低 FBG 传感器在高温测量中的非线性效应的影响,使得二阶非线性特性的影响

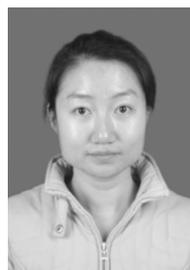
并不显著。该光纤光栅的涂敷层材料对  $230$  的高温无任何碳化反应。可用于高温下检测  $0 \sim 230$  内的温度。该高温光纤 Bragg 光栅传感器可推广到油气井下监测高温分布。

### 参考文献:

- [1] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber Optic Bragg Grating Sensors [C]// Proc. SPIE. 1989, 1169:98-107.
- [2] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber Grating Sensors [J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(8):1442-1463.
- [3] Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing et al. Study on High Resolution Fiber Bragg Grating Temperature Sensor [J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32(1):83-86(in Chinese).
- [4] Zhao Yong, Rong Min, Liao Yanbiao. Reflex Optical Fiber Sensor and Compensation Technique for Temperature Measurement Under Offshore Oil Well [J]. Chinese J. Lasers, 2003, 30(1):75-78(in Chinese).
- [5] Kluth Ed. L., Malcolm P. Varnham, John R. Clowes et al. Upgradeable Sensing System for the Oil and Gas in Dusty [C]// SPIE, 1999, 3860:262-272.
- [6] WANG Wei-hua, SONG Shi-de, WANG Xiao-xu, et al. Study on High Temperature Characteristics of Fiber Bragg Gratings [J]. Journal of Optoelectronics. laser (光电子. 激光), 2005, 16(7):806-808(in Chinese).
- [7] QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, FU Hai-wei, et al. Theory and Experiment About in-Fiber Bragg Grating Temperature Sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(2):494-497(in Chinese).
- [8] JIA Zhen-an, QIAO Xue-guang, LI Ming, et al. Nonlinear Phenomena of fiber Bragg Grating Temperature Sensing [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(7):844-847(in Chinese).
- [9] ZHANG Xiao-jing, WU Zhan-jun, ZHANG Bo-ming, et al. Experimental Investigation on Temperature Sensitivity of Fiber Bragg Grating [J]. Optical Technique, 2005, 31(4):497-499.
- [10] ZHANG Cui. Temperature Measurement Precision of Fiber Bragg Grating Improved by Quadratic Polynomial Fitting Arithmetic [J]. Journal of Transducer Technology, 2005, 24(7):25-26.
- [11] Jung J, Nam H, Lee B. Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with Controllable Sensitivity [J]. Applied Optics, 1999, 38(13):2752-2754.



王宏亮(1951-),男,陕西横山人,西安石油大学理学院教授,主要研究方向为光纤传感、光功能材料等,whl@xsyu.edu.cn



张晶(1982-),女,山东东营人,硕士研究生,主要从事光纤通信,光纤传感及信号解调方面的研究,susan820515@163.com