

文章编号: 1001-3806(2007)01-0012-03

## 应用在油气管线的光纤光栅温度压力传感系统

禹大宽, 乔学光\*, 贾振安, 傅海威, 赵大壮, 王 敏

(西安石油大学 陕西省光电传感测井重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** 为了提高光纤光栅的温度和压力灵敏度系数以满足实用化对灵敏度精度的要求, 对光纤光栅进行封装设计。得到封装后的光纤光栅温度和压力灵敏度系数分别为  $0.052\text{nm}/^\circ\text{C}$  和  $0.8208\text{nm}/\text{MPa}$ , 分别为裸光栅的 5 倍和 273 倍, 且传感器的温度和压力响应与光栅反射波长成良好的线性关系。通过半个月的油气管线现场实验, 测得光纤光栅温度压力传感器与油气管线的电类传感器的测量值符合得特别好, 该温度和压力传感系统满足了温度和压力的实时测量。

**关键词:** 光纤光学; 光纤布喇格光栅; 温度传感; 压力传感; 封装技术

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

### The fiber Bragg grating temperature and pressure sensing system applied in oil pipeline

YU Da-kuan, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, FU Hai-wei, ZHAO Da-zhuang, WANG Min  
(Shanxi Key Laboratory of Photoelectric Sensing Logging, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To improve the sensitivity of temperature sensor and pressure sensor so that they are applicable, the fiber Bragg grating (FBG) temperature sensor and FBG pressure sensor are encapsulated. The temperature sensitivity of the FBG temperature sensor is  $0.052\text{nm}/^\circ\text{C}$  and the pressure sensitivity of the FBG pressure sensor is  $0.8208\text{nm}/\text{MPa}$  from the experimental results. The temperature sensitivity and pressure sensitivity is 5.2 times and 273 times of that of bare FBG. The temperature and pressure response curve of FBG sensor is linear with reflective wavelength of FBG. After the FBG sensing system is used to detect the temperature and pressure of oil in pipeline about half month, the experimental results are consistent with those of electric sensor. The FBG sensing system can be used in pipeline on-line measurement.

**Key words:** fiber optics; fiber Bragg grating; temperature sensing; pressure sensing; encapsulation technology

## 引 言

光纤光栅是最近几年发展最为迅速的光纤无源器件, 具有抗电测干扰、耐腐蚀、重量轻、强度高、耐高温、寿命长、无连接损耗等优良特性<sup>[1]</sup>。而且光纤光栅还有一个明显优于其它光纤传感器的地方, 就是光纤光栅传感器的传感信号为波长调制, 测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗、能方便地使用波分复用技术<sup>[2]</sup>。光纤光栅轻巧柔软且可以制成光栅串, 可根据不同测量要求, 构建点阵、面阵和体阵等多种传感网络结构, 光纤光栅阵列与光通信系统的波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM)、时分复用

(time division multiplexing, TDM)、码分复用 (code division multiplexing, CDM) 技术相结合可构建多点多区域传感系统<sup>[3]</sup>, 实现传感系统的智能化。现在光纤光栅传感已经在桥梁<sup>[4]</sup>、公路<sup>[5]</sup>混凝土耐久性<sup>[6]</sup>等民用领域有报道, 实现了光纤光栅由实验室到现场的实际应用。作者根据油气管线实际应用的要求, 研制了一种适用于油气管线温度压力在线实时检测的光纤光栅传感系统, 并对该传感器进行了实验室研究和现场实验, 得到该传感器测量值与电类传感器的测量值符合得很好, 该光纤光栅传感系统能实现油气管线的环境的在线检测。

## 1 基本原理

### 1.1 光纤光栅温度应变传感原理

由耦合模理论<sup>[7]</sup>可知, 光纤布喇格光栅的中心波长为:

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

式中,  $n_{\text{eff}}$  是光纤纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  是光栅周期 (栅距)。改变纤芯折射率和光栅周期时, 光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 耦合波长的改变为:

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (2002AA313150); 国家自然科学基金资助项目 (60177028); 陕西省科技攻关资助项目 (2003K05-G23); 陕西省教育厅资助项目 (02JK158)

作者简介: 禹大宽 (1980-), 男, 硕士, 主要从事光纤传感及通信技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: qiaoxueguang@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2005-12-15; 收到修改稿日期: 2006-02-15

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

当外界温度和应力发生变化时,相应的波长改变为:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta\left\{ \left[ 1 - \left( n^2/2 \right) \left[ P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12}) \right] \right] \varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \right\} \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon$  和  $\Delta T$  分别为应变变化和温度变化,  $P_{ij}$  是光纤材料的弹光张量分量,  $\alpha$  是光纤材料的热膨胀系数,  $\xi$  为光纤材料的热光系数,  $\nu$  为光纤材料泊松比系数。对硅基质掺锗光纤材料,  $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $\xi \approx 6.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{eff}} = \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \approx 0.22$ ,  $P_{\text{eff}}$  是有效弹光系数。对材料为熔石英光纤, 对 1550nm 的光栅, 其温度和应变灵敏度系数分别为 0.01nm/°C 和 0.003nm/ $\mu\varepsilon$ , 所以其灵敏度系数很低, 而且由于光栅本身很脆弱, 必须通过一定的封装结构<sup>[8]</sup>对光栅进行有效的保护和提高其灵敏度系数, 以满足光纤光栅实用化测量的要求及提高传感器的精度。

## 1.2 光纤光栅温度传感器、压力传感器封装结构及分析

当 FBG 被粘贴于基底材料上时, 基底材料的变形和热膨胀都会传递到 FBG 上, 使其 Bragg 波长发生漂移。若用  $\alpha_{\text{sub}}$  表示基底材料的热膨胀系数, 则此时的 Bragg 反射波长漂移量与温度的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [(\xi + \alpha) + (1 - P_{\text{eff}})(\alpha_{\text{sub}} - \alpha)]\Delta T \quad (4)$$

由 (4) 式可知, FBG 的波长变化是一个仅与基底材料热膨胀系数有关的常数。通过选用热膨胀系数大的材料, 就可以对光纤光栅进行有效的增敏。通过将光纤光栅粘贴在金属基底材料上, 来提高封装的光纤光栅温度传感器温度灵敏度系数。封装的光纤光栅传感器结构图如图 1 所示。

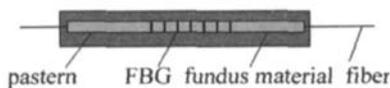


Fig 1 Structure of the sensing elements of the FBG temperature sensors

由于输油管线油压一般在 10MPa 以下, 设计了一种新的 FBG 压强增敏方法: 利用圆柱形容器和活塞组成密闭容器, 容器底部有标准接口与实验油压泵或管道阀门相连, 基底材料利用两端圆孔固定在圆柱形容器和活塞里, 就得到所要求的 FBG 压强传感器。图 2 是设计的 FBG 压强传感器示意图。圆柱形容器和活塞互相密合, 保证圆柱形容器中压强测量的稳定性。活塞在安装时涂上润滑剂保证在容器壁上自由滑动, 同时增加容器的密封性。圆柱形容器底部有阀门, 外界的油压通过此口进入圆柱形容器, 当油压变化时, 将引起活塞的上下运动, 从而活塞带动连接在弹性材料的变形, 从而带动 FBG<sub>1</sub> 的轴向应变。由于光纤光栅

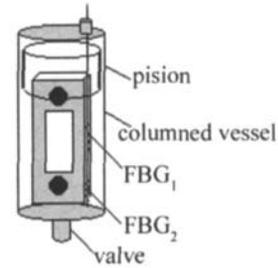


Fig 2 Schematic of FBG pressure sensor

同时对温度和应力敏感<sup>[9,10]</sup>, 因此, 在此传感器里装有两根光栅 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub>, FBG<sub>2</sub> 只对容器内的温度敏感, 另一个光栅 FBG<sub>1</sub> 同时对温度和压力敏感, 通过两根光栅, 利用温度补偿, 得到油压值。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 光纤光栅温度传感器及压力传感器的实验研究

图 3 为光纤光栅温度实验装置原理图。将封装固

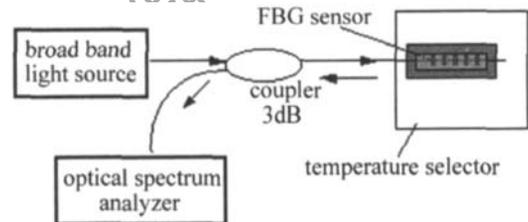


Fig 3 Schematic diagram of FBG temperature sensing

化好的传感温度头放入数字温度控制箱, 通过光纤接入 3dB 耦合器。光源和光谱分析仪通过光纤跳线接入耦合器。光源为宽带掺铒光源, 它发出的光经 3dB 耦合器被反射后又经 3dB 耦合器送到光谱分析仪, 通过光谱分析仪测量光纤光栅反射波峰值波长的变化。掺铒宽带光源的峰值波长为 1532nm, 带宽 40nm 左右。与耦合器相连的光谱分析仪采用日本安藤公司的 AQ6319 型光谱分析仪, 光谱分析仪的波长分辨率为 0.01nm, 用以监测传感器反射谱峰值波长的变化。温度箱上放置数字热电偶温度计, 用以矫正温箱内的温度, 温度的数值由该表读取, 该表的精度为 0.1°C。

实验中, 将室温作为温度起点, 控制温度控制箱的温度, 使箱内温度逐步升高, 温度每升高 10°C, 保持温箱温度 15min, 以保证 FBG 传感器温度的充分受热, 分别从温度计和光谱仪读取此时的温度和对应的 FBG 传感器的反射谱峰值波长。分别以温度 (单位 °C) 和峰值波长 (单位 nm) 相对偏移量为横轴和纵轴对该温度传感器在 150°C 之内进行了温度实验。得到波长随温度的变化关系如图 4 所示。经过多次重复实验, 封装的 FBG 温度传感器没有出现老化, 裂纹, FBG 与基底材料的脱离的等缺陷。结果表明, 该基底材料封装的传感器具有很好的温度稳定性和多次重复性, 与光纤光栅有很好的结合性。利用最小二乘法对测得的响

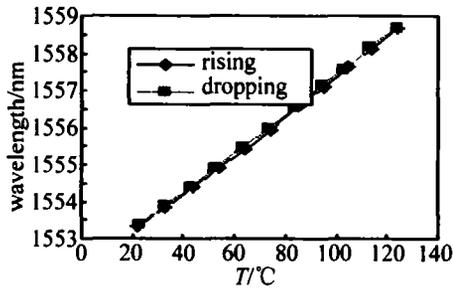


Fig 4 Temperature response of FBG temperature sensor

应曲线进行拟合,得到该传感器的升降温度响应灵敏度都为  $0.052 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,线性拟合度达到  $0.999$  以上,说明波长对温度有良好的线性。且封装后的传感器的灵敏度约为裸光栅的  $5$  倍,克服了使用中灵敏度低的要求提高传感器的精度。

实验中,将封装好的 FBG 压强传感器通过阀门接口连接到压力实验系统。其余仪器及连接与温度装置相同,在实验中,采用逐步加压,用标准压力表、温度计和光谱仪分别测量压强、温度和  $\text{FBG}_1$ 、 $\text{FBG}_2$  反射波峰值波长。测试中压强每增加  $0.5 \text{ MPa}$  记录一组数据,从  $0 \text{ MPa}$  一直加压到  $4 \text{ MPa}$ ,由于  $\text{FBG}_2$  只对温度敏感,实验室温度基本不变化,所以在压力测试过程中, $\text{FBG}_2$  波长基本无变化。分别以压强和峰值波长相对偏移量为横轴和纵轴,得到光栅波长与压强的关系如图 5 所示。由于  $\text{FBG}_1$  和  $\text{FBG}_2$  粘贴在同一基底材料

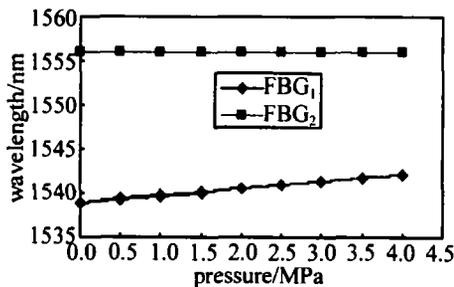


Fig 5 Relationship between FBG wavelength and pressure

上,它们在筒内压强为  $0$  的情况下,在温度变化过程中,其温度灵敏度系数相同,测得其温度灵敏度系数都为  $0.032 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,所以利用双光栅,可以得到筒内的温度和压强。

由  $\text{FBG}_1$  和  $\text{FBG}_2$  的压力波长响应关系可知,在温度一定的条件下, $\text{FBG}_1$  对圆柱筒内的压强灵敏, $\text{FBG}_2$  对压强不敏感,而且  $\text{FBG}_2$  波长与压强成良好的线性关系,压强灵敏度系数为  $0.8208 \text{ nm}/\text{MPa}$ ,线性拟合度系数为  $0.999$ ,压强灵敏度系数约为裸光栅  $273$  倍,有效地提高了光纤光栅的压力灵敏度。

## 2.2 光纤光栅温度传感器及压力传感器的现场研究

将封装好的温度和压强传感器按照波分复用的要求。每一个传感器选择一个不同的波长范围和一个波段,在输油站的进站口和出站口分别安装一个温度传

感器,在站中安装一个压力传感器,3个传感器通过光纤串连在一起,光源和显示系统在控制室,传感器到控制室大约  $100 \text{ m}$ ,通过检测系统和显示系统将不同温度和压强在计算机里时实的显示出来。实验系统连接装置如图 6 所示。

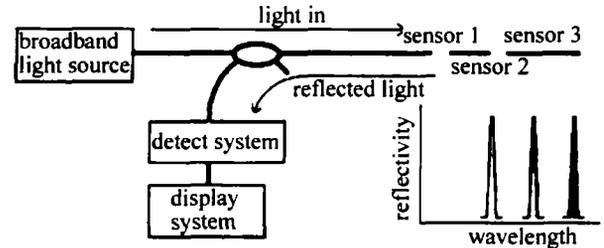


Fig 6 Diagram of FBG temperature/pressure sensing system

输油站管线中原油压力和温度时刻变化,通过光纤光栅压力传感器和温度传感器来测量的压力和温度变化,根据不同压力和温度值,在站中采取相应的加温加压或减压等措施,保证原油的在输油管线的顺利外输。通过近半个月的现场实验,得到 FBG 温度压力传感系统与该站中的安装的传统电类传感器测量值复合的很好,而且 FBG 传感系统不受电磁干扰,易于复用,一根光纤可以串联多个传感器,降低了系统的成本。图 7 是同一时间 FBG 传感器与电类传感器的压力随时间变化曲线。

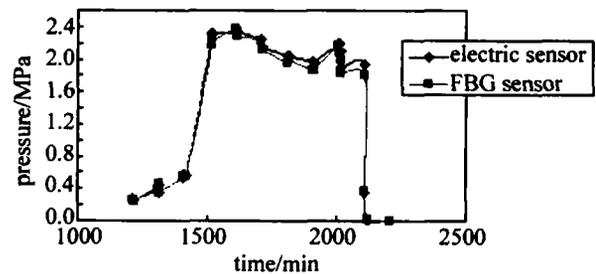


Fig 7 The pressure response of FBG sensor and electric sensor

## 3 结论

研制了一种光纤光栅温度压力传感系统,对系统中的温度和压力传感器进行了实验标定,测的温度传感器的灵敏度系数为  $0.052 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,压力灵敏度系数为  $0.8208 \text{ nm}/\text{MPa}$ ,且 FBG 的反射波长与温度和压力的都呈良好的线性关系。将在实验室标定好的传感器安装在输油管线进行了在线实时检测,通过半个月的在线测量得到 FBG 传感器与电子类传感器测量值相符,系统压力误差不超过  $0.05 \text{ MPa}$ ,温度误差不超过  $0.2^\circ\text{C}$ 。因此,该 FBG 温度压力传感系统在油气管线等环境有良好的应用前景。

## 参考文献

- [1] J A Zh A, Q AO X G, LIM *et al* The influence of temperature on re-

354.5U/L,经过 30 次传代培养,其蛋白酶活力正负相差为 4.6U/L。表明变异株产硫酸软骨素酶能力具有较好的遗传稳定性。

对变异株保存不同时间(3,6,9,12 个月)后,分别发酵测定酶活力,正负相差仅为 5.2U/L,说明该菌种保存稳定,见表 4。

Table 4 Induces strain retention time with to produce the enzyme activity

retention time (month)	3	6	9	12
enzyme activity (U · L <sup>-1</sup> )	352.6	350.6	345.8	350.9

以上结果表明,用 CO<sub>2</sub> 激光辐照沙雷氏菌,具有引起高产硫酸软骨素酶的作用。传代培养证明,诱变后的粘质沙雷氏菌高产硫酸软骨素酶能力稳定传代。

### 3 结 论

(1) CO<sub>2</sub> 激光辐照诱变菌株,诱变剂量与致死率正相关,并且不同的菌株的诱变剂量有种属差异,寻找合适的辐射剂量进行诱变是 CO<sub>2</sub> 激光辐照诱变菌株的首要条件。

(2) CO<sub>2</sub> 激光辐照诱变菌株获得高产硫酸软骨素酶的菌株,可能正向促进了细胞内硫酸软骨素酶代谢体系,达到高产硫酸软骨素酶的目的。

(3) 构建高活性酶制剂的生产菌株,采用基因工程的手段是努力的方向,但是运用在产该酶的菌株上存在许多难题有待克服。故一时还不能提供高产和稳定的生产菌株。而采用常规的诱变手段,由于菌株用

相同诱变剂重复诱变时,常出现饱和现象,处理效果往往不够理想。故通常采用几种诱变手段交替使用,方能提高诱变效率。但目前诱变剂种类虽多,而常用的却为数有限。激光诱变技术操作方法简便,使用安全,正突变效率较高,诱变效果甚佳,诱变后的变异性状能稳定遗传,故是一种切实可行的新型诱变手段,应用前景看好,值得推广使用。

### 参 考 文 献

- [1] TAN X S, WU Q H, LIANG Y J *et al* Research on the etiology of Kaschin-Beek disease [J]. Chinese Journal of Microecology, 1994, 6 (2): 44~45 (in Chinese).
- [2] QIL C, LIN X S, LI C S Study on composition and properties of glucosamine glycan in lung cancer [J]. Journal of Bethune Univity Medical Science, 1999, 25 (1): 44~46.
- [3] KATO F, WATE H, MAMASILL K *et al* Chondrolysis with chondroitinase ABC: comparative study with chymopapain [J]. The Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology, 1988 (31): 63.
- [4] YAMAGATA T, SAHIO H, HABUCHIO *et al* Purification and properties of bacterial chondroitinases and chondrosulfatases [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1968, 243 (7): 1523~1535.
- [5] ZONG R H. Infrared laser and organism mutual action mechanism discussion [J]. Laser Magazine, 1988, 9 (6): 47~48 (in Chinese).
- [6] WANG R L, OU J M, SHANG H L *et al* Laser illumination in fine root thunder strain selective breeding applied research [J]. Laser Magazine, 1998, 19 (4): 44~46 (in Chinese).
- [7] TAO K, WANG Zh Y, GUO J L *et al* Study on the screening of chondroitinase ABC producing strain and their fermentation technology [J]. Chinese Journal of Antibiotic, 2004, 29 (3): 138~141 (in Chinese).
- [8] HU W H, CHEN Y, YANG Z Sh *et al* CO<sub>2</sub> laser illumination yeast biology effect [J]. Laser Magazine, 2001, 21 (3): 31~33 (in Chinese).
- [9] (2): 162~166 (in Chinese).
- [6] XN S J, FAN W P. Research on durability detecting of high performance concrete structure with fiber grating sensor [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27 (6): 32~34 (in Chinese).
- [7] LAO Y B. Fiber of optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 198~204 (in Chinese).
- [8] FU H W, FU J M, QIAO X G *et al* Study about the stress sensitivity enhancement of fiber Bragg gratings [J]. Laser Technology, 2005, 29 (2): 159~161 (in Chinese).
- [9] WANG L B, ZHANG B M, WANG D F *et al* A kind of fiber Bragg grating strain sensor with jacket [J]. Laser Technology, 2002, 26 (5): 385~387 (in Chinese).
- [10] SUN A, QIAO X G, JIA Zh A *et al* Temperature and pressure responsive characteristics of polymer packaged fiber Bragg grating with large dynamic range [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32 (2): 224~227 (in Chinese).

(上接第 14 页)

- reflected wavelength shift of fiber Bragg gratings [J]. Laser Technology, 2004, 28 (3): 309~311 (in Chinese).
- [2] XIE F, ZHANG Sh L, LI Y *et al* Study on the reflected wavelength shift based on sensing elements of in-fiber Bragg gratings [J]. Laser Technology, 2002, 26 (2): 84~86 (in Chinese).
  - [3] ZHANG W G, KAI G Y, DONG X Y *et al* Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (3): 330~336 (in Chinese).
  - [4] GAO J Q, SHIB, ZHANG W *et al* Application of distributed fiber optic sensor to bridge and pavement health monitoring [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25 (1): 14~19 (in Chinese).
  - [5] XIA Y Y, RUI R, LIANG L *et al* An attempt of embedding fiber optic Bragg grating sensors in freeway foundation to detect the pore-water pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27