

文章编号:1002-2082(2007)02-0209-03

# 耐高温光纤 Bragg 光栅的响应特性研究

乔学光, 李 婷, 王宏亮, 贾振安, 刘钦朋, 王向宇

(西安石油大学 光纤传感重点实验室, 西安 710065)

**摘 要:** 以耐高温光纤光栅和普通的光纤光栅为实验研究对象,研究了其高温特性。普通的FBG,当温度超过300℃以上,光纤光栅已变黑变脆,虽然有传感特性,但已不能在实际中应用;通过对耐高温光栅裸栅进行300℃以上的高温实验,发现耐高温FBG处于20℃~350℃之间时反射波长与温度之间有着良好的线性关系,且光栅性能良好,没有出现被碳化现象,灵敏度为0.01 nm/MPa;随着温度进一步升高,FBG反射波长与温度开始呈现非线性关系。实验结果表明,耐高温光栅适合于高温油气井下应用。

**关键词:** 光纤布拉格光栅(FBG);反射波长;高温特性;温度灵敏度系数

中图分类号: TN253

文献标志码:A

## Response characteristics of high temperature resistant fiber Bragg grating

QIAO Xue-guang, LI Ting, WANG Hong-liang, JIA Zhen-an,  
LIU Qin-peng, WANG Xiang-yu

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

**Abstract:** The temperature characteristics of high temperature resistant FBG and the ordinary FBG were experimentally investigated. The ordinary FBG becomes black and brittle, and can not be used in practice even though it still has sensing feature, when temperature reaches more than 300℃. The experiment with the high temperature FBG indicates that the high temperature resistant FBG has good linearity from 20℃ to 350℃, and it is not carbonized, the sensitivity is 0.01 nm/MPa, but the linearity is deteriorated with the further increase of temperature. The result shows that the high temperature resistant FBG can be used for the high temperature oil downhole measurement.

**Key words:** fiber Bragg grating(FBG); reflection wavelength; high temperature characteristic; temperature sensitivity coefficient

## 引言

自1989年Morey首次提出将光纤光栅用作传感以来,FBG受到了世界范围内的广泛重视,并且已经取得了持续和快速的发展。近年来,光纤光栅在传感和通信领域的应用研究尤为引人注目<sup>[1-3]</sup>。

作为传感元件,光纤光栅被用于感测信息转化为其反射波长的移动,即用波长编码,因此不受光源功率波动和系统损耗的影响,具有很强的抗干扰能力,并且易于采用波分复用、时分复用和空间复用技术构成光纤光栅智能传感网络,实现分布式多点

收稿日期:2006-10-25; 修回日期:2006-11-16

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2002AA313150);国家自然科学基金资助项目(69877025);国家教育部科学技术重点项目(02190);陕西省教育厅产业化培育项目“光纤传感测井系统应用研究”(05J(23));西安市科技局信息技术专项项目“光纤传感测井系统应用研究”(ZX05041);中国石油天然气集团公司应用基础研究项目“井下永久光纤温度、压力传感器设计方法研究”(20050719)

作者简介:乔学光(1955—),男,陕西人,教授,博士生导师,主要从事光纤传感及光纤通信的研究工作;李婷(1982—),女,陕西人,硕士研究生,主要从事光纤传感及光电检测的研究。E-mail:liting0420@163.com

实时在线传感,广泛用于温度、应力、应变等物理量的测量<sup>[4-9]</sup>。温度传感是光纤光栅传感器最主要和最直接的应用之一,目前低温传感已相对成熟,但是在高温传感方面这还是一项难题。尤其是在油气井下,环境恶劣且高温高压,高温达 350 ℃ 以上,普通的光栅当温度超过 300 ℃ 以上,光栅已变黑变脆,虽有传感特性,但已不能在高温油气井下应用,因此研究耐高温光纤光栅的响应特性具有实际意义。

### 1 实验原理与装置

温度是通过影响光纤光栅反射波有效折射率  $n_{\text{eff}}$  和光栅周期  $\Lambda$  引起反射中心波长  $\lambda_B$  漂移的。光纤光栅的 Bragg 方程为

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

光纤光栅周围温度场的变化对光栅常数  $\Lambda$  和有效折射率  $n_{\text{eff}}$  均有影响,使得布拉格反射波长  $\lambda_B$  出现漂移。温度的变化对波长的影响如下式:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left[ \frac{n_{\text{eff}}\Delta\Lambda}{\Delta T} + \frac{\Lambda\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta T} \right] \tag{2}$$

光栅周期的变化是由热膨胀效应引起的:

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \alpha \cdot \Delta T$$

式中  $\alpha$  为光纤的热膨胀系数。有效折射率的变化是由热光效应引起的:

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = \zeta \cdot \Delta T$$

式中  $\zeta$  为光纤的热光系数。温度灵敏度系数为

$$K_T = \frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \alpha + \zeta \tag{3}$$

温度灵敏度系数反映了波长相对漂移量  $\Delta\lambda/\lambda_B$  与  $\Delta T$  之间的变化关系。当材料被确定后,灵敏度系数是与材料系数相关的常数。光纤光栅的纤芯为石英,石英的  $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6}/\text{C}$ ,  $\zeta = 8.3 \times 10^{-6}/\text{C} \sim 9.5 \times 10^{-6}/\text{C}$ ,所以温度灵敏度系数的理论值约为  $8.8 \times 10^{-6}/\text{C} \sim 10 \times 10^{-6}/\text{C}$ 。若忽略温度对热膨胀系数  $\alpha$  和热光系数  $\zeta$  的影响,则光纤光栅温度灵敏度系数为一常量,但实际上热膨胀系数和热光系数对温度有一定的依赖性,即温度变化量与波长漂移量的线性关系是一个近似式,其在某一个温度范围内比较接近,可以近似看成线性,灵敏度系数随温度变化按线性关系缓慢增加。

实验测量了中心波长为 1 548 nm 左右的耐高温光纤 Bragg 光栅和普通光纤光栅从常温到 400 ℃ 范围内的温度特性,利用高温温控箱提供环

境温度。高温是通过电子加热炉得到的,调节精度为 1 ℃,通过箱内的热电偶温度计测量温度的变化,从控制面板上的数字表可以读取温度值。带有光纤光栅的一端自由悬挂在高温箱内,经受环境温度的变化;另一端位于高温箱外接到光谱仪上,用于测量布拉格中心反射波长,它的检测精度为 0.05 nm,扫描频率为 50 Hz。实验过程中,高温箱内的温度每变化 10 ℃ 保持一段时间恒温,采集记录一次数据。

### 2 实验结果与讨论

从常温开始测量,高温温控箱的温度每变化 10 ℃,待温度恒定以后采集数据。最终得到 20 ℃ ~ 400 ℃ 范围内的耐高温 FBG 和普通 FBG 的反射波长与温度变化的响应特性曲线如图 1 所示,耐高温 FBG 曲线拟合度为 0.99。从图示可以看出,耐高温 FBG 在 30 ℃ ~ 350 ℃ 的温度范围内,反射波长与温度变化呈现良好的线性关系,但是温度在 350 ℃ 以上后波长漂移量与温度变化缓慢呈现非线性关系,许多文献都报道过温度灵敏度系数随温度的改变而变化,且随温度增加缓慢增大<sup>[10]</sup>。

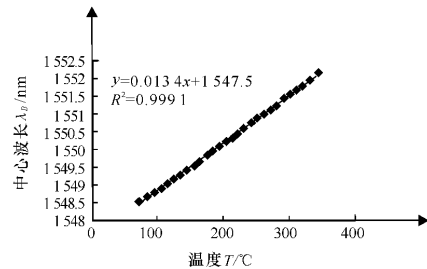


图 1(a) 耐高温 FBG 波长漂移随温度变化曲线(升温)

Fig. 1(a) Wavelength shift versus temperature rise for the temperature resistant FBG

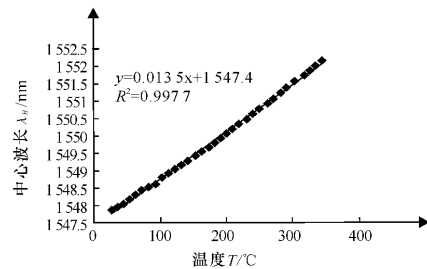


图 1(b) 耐高温 FBG 波长随温度变化曲线(降温)

Fig. 1(b) Wavelength shift versus temperature drop for the temperature resistant FBG

从图中我们可以计算出耐高温光栅的温度灵敏度系数为  $8.659 \times 10^{-6}/\text{C}$ , 与理论值吻合较好。说明耐高温光栅反射波长漂移与温度变化有着良好的线性关系和高的响应速度。通过图我们看到升温 and 降温耐高温光栅重复性和稳定性好。同时实验发现, 耐高温 FBG 在每次升温的时候, 出现短时间的啁啾现象, 随后很快恢复正常。这可能主要是由于耐高温光纤光栅部分有高温涂敷层, 它的热膨胀系数和光栅的热膨胀系数不一样, 当温度突然间升高而造成啁啾, 温度恒定后啁啾就会消失, 但随着温度的升高, 波长与温度之间的非线性慢慢明显起来。

对于普通光栅, 我们发现温度在室温  $\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  变化时, 反射波长的相对漂移与温度改变量成线性关系, 当温度上升到  $300\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  的油气井下温度时, FBG 反射波长漂移量与温度变化量开始呈现明显的非线性关系, 所以对应用在高温环境下的普通 FBG, 其温度的非线性校正是相当重要的。同时发现在  $300\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  的油气井下高温时光栅变黑变脆, 涂敷层和纤芯分不出来且特别容易损坏, 虽然还有传感特性, 但已不实用。对于耐高温光纤光栅, 由于在光纤表面有一层耐高温涂敷层, 加上耐高温光纤光栅与普通光栅的制作工艺不同, 在高温下不仅能正常工作而且性能良好, 没有出现碳化现象。

### 3 结论

分析研究了温度对耐高温光纤光栅和普通的 光纤光栅反射波长的影响, 结果表明: 普通的 FBG, 当温度超过  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上, 光纤光栅已变黑变脆, 虽然有传感特性, 但已不能在实际中应用; 而耐高温 FBG 处于  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  时反射波长与温度之间有着良好的线性关系, 且光栅性能良好, 没有出现碳化现象, 适合在高温油气井中应用。

#### 参考文献:

[1] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000:197-205.  
LIAO Yan-biao. Fiber optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 197-205. (in Chinese)

[2] 董孝义, 袁树忠, 开桂云, 等. 全光纤光子集成器件及系统[J]. 物理学进展, 2001,21(3): 303-316.

DONG Xiao-yi, YUAN Shu-zhong, KAI Gui-yun, et al. All-fiber photonic integrated devices and system[J]. Progress in Physics, 2001,21(3):303-316. (in Chinese)

[3] 乔学光, 贾振安, 傅海威, 等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. 物理学报, 2004,53(2):494-497.  
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)

[4] GUAN B, TAMHY, TAO X M, et al. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating[J]. IEEE Photon Technol. Lett., 2000,12(6):675-677.

[5] AFERREIRA L, SANTOS J L, RAHI F, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors [J]. Opt. Engin., 2000,39(8):2226-2233.

[6] BAI O G, TAM H Y, SIU L H. Simultaneous strain and temperature measurement using a single fiber Bragg grating[J]. Electron. Lett., 2000,3(12): 1008-1010.

[7] 乔学光, 李育林, 张培坤, 等. 光纤布拉格光栅和长周期光栅传感器对油气井下应力和温度的同时测量[J]. 光电子·激光, 1999,10(1):242-245.  
QIAO Xue-guang, LI Yu-lin, ZHANG Pei-kun, et al. Hybrid FBG/LPEG sensors for simultaneous measuring strain and temperature of oil/gas bottom line[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1999,10 (1):242-245. (in Chinese)

[8] 李志全, 汤敬, 康健楠, 等. 一种基于外差探测的光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 应用光学, 2006,27 (1): 66-72.  
LI Zhi-quan, TANG Jing, KANG Jian-nan, et al. A fiber Bragg grating temperature sensor based on heterodyne detection[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(1):66-72. (in Chinese)

[9] 禹大宽, 乔学光, 贾振安, 等. 一种测量温度和流速的光纤光栅传感器[J]. 应用光学, 2006,27(3):228-231.  
YU Da-kuan, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, et al. Fiber Bragg grating sensor for detecting temperature and flow-velocity [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3):228-231. (in Chinese)

[10] 贾振安, 乔学光, 傅海威. 光纤光栅温度灵敏度系数研究[J]. 光电子·激光, 2003,14(5):453-456.  
JIA Zhen-an, QIAO Xue-guang, FU Hai-wei. Study on temperature sensitivity coefficient of fiber Bragg gratings [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(5): 453-456. (in Chinese)