

光纤增敏温度传感器及其压力敏感性实验研究

陈海峰¹ 肖佃师¹ 陈红丽²

(¹东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; ²东北石油大学现代教育技术中心, 黑龙江 大庆 163318)

摘要 介绍并制作了一种光纤布拉格光栅(FBG)温度传感器。通过在不锈钢圆柱管内设置粘贴裸光栅的铜质支撑架,实现完全隔绝压力测量温度参数。在无压力情况下,在 35 ℃~85 ℃温度范围内,对传感器进行多次加减压温度实验。结果表明,传感器重复性、迟滞性及线性度较好,实测温度灵敏度为 30.98 pm/℃,与理论计算相对误差仅为 0.3%,约为裸光纤光栅的 2.83 倍,封装 FBG 温度传感器的分辨力约为 0.03 ℃。对传感器进行了压力敏感实验,在 35 ℃恒温及 5~45 MPa 压力环境下及在 35 ℃恒温及 40 MPa 恒压下对温度传感器进行 45 min 的压力实验,实验结果表明传感器中心波长无变化;另外,在 40 MPa 恒压下和在 35 ℃~85 ℃温度范围内对传感器进行测试,并和无压力情况对比,结果表明在相同温度测试点,传感器中心波长基本无变化。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;耐压性;封装技术;增敏;温度传感器

中图分类号 TN247

OCIS 050.2770 060.2270

文献标识码 A

Experimental Study on Fiber Bragg Grating Temperature Enhanced Sensor and Its Pressure Sensitivity

Chen Haifeng¹ Xiao Dianshi¹ Chen Hongli²

¹Geosciences College, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China

²Modern Educational-Technical Center, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China

Abstract A fiber Bragg grating (FBG) temperature sensor is presented. By setting bare grating support shelves, the temperature is measured with pressure isolation encapsulation. Multiple plus-minus temperature tests are carried out. Results show that the sensor under the condition of no press and the temperature of 35 ℃~85 ℃ has a good repeatability, hysteresis and linearity. The temperature sensitivity is 30.98 pm/℃ and the relative error is 0.3%, which is about 2.83 times of bare FBG. The accuracy is about 0.03 ℃. The pressure sensitivity tests are executed, and the results show that the sensor wavelength has no change under the condition of 35 ℃ and 5~45 MPa or the condition of 35 ℃ and 45 MPa. Moreover, compared the results under the condition of no press and 40 MPa, it is found that the sensor wavelength has no changes.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; pressure-resistance; encapsulation; sensitivity enhancement; temperature sensor

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种优良的传感元器件,具有许多优点,在很多领域都有广泛的应用^[1~3]。温度场的变化能直接引起光纤光栅中心波长漂移,因此光纤光栅最直接应用之一就是用来对温度进行传感。然而光纤光栅传感应用最大难点之一就是存在温度和应变(压力)交叉敏感问题,制约了温度传感的应用,很多学者提出了一些相应的解决方法^[3~8]。另外灵敏度低是限制光纤光栅温度传感器大规模应用的另一个因素,因此应设法提高光纤布拉格光栅的温度灵敏度,国内外学者对此进行了很多有意义的研究^[3~11]。

原油是维持国民经济正常运转的支柱之一,而对温度参数实时监测是保证油气正常产出的重要条件。虽然很多学者提出一些监测温度用光纤传感器,但针对温度传感器在高压液体围压环境下的敏感性研究甚

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-04-12

作者简介: 陈海峰(1974—),男,硕士,讲师,主要从事油气井光纤传感动态监测与石油地质综合应用等方面的研究。

E-mail: chf_bj@126.com

少。本文介绍一种独特的光纤布拉格光栅温度传感器,非常适合油气井下高压测量环境。通过特殊封装结构,不仅实现了增敏效果,在实验压力范围内能基本消除温度-应变(压力)交叉影响。重点对温度传感器压力敏感性进行了研究,并给出实验结果。

2 原 理

由耦合模理论可知,光纤布拉格光栅的中心反射波长为

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

式中 n_{eff} 为有效折射率, Λ 为光栅周期。当作用于光纤光栅的被测物理量(如温度、应力等)发生变化时,会引起 n_{eff} 和 Λ 的相应改变,从而导致光纤布拉格光栅中心反射波长 λ_B 的变化,即

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff}} \cdot \Lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left\{ \left[1 - \left(\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right] \cdot \epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \right\}, \quad (2)$$

式中 ϵ 为外加应力, P_{11} , P_{12} 为光纤的光弹张量系数, ν 为泊松比, α 为光纤材料(如石英)的热膨胀系数, ξ 为光纤材料的热光系数, ΔT 为温度变化量。利用纯熔融石英的参数, $P_{11}=0.121$, $P_{12}=0.270$, $\nu=0.17$, $n_{\text{eff}}=1.456$, $\alpha=0.5 \times 10^{-6}/\text{K}$, $\xi=6.7 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。(2)式中第一项为应变变化引起的光纤光栅波长变化量,第二项为温度变化引起的光纤光栅波长变化量。对于中心波长为 1537.18 nm 的光纤光栅来说,温度灵敏度系数为 11 pm/°C。当将光纤光栅粘贴在基底材料上时,基底材料的变形和热膨胀就会传递到光纤光栅上,光纤光栅中心波长就会发生偏移。

设 α_s 为基底材料的热膨胀系数,温度变化 ΔT 时光纤产生的应变为

$$\epsilon = (\alpha_s - \alpha) \cdot \Delta T, \quad (3)$$

该应变导致的布拉格中心波长的变化为

$$\Delta\lambda_{B1} = (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) \cdot \Delta T \cdot \lambda_B, \quad (4)$$

式中 P_e 为光纤材料的有效弹光系数,对于纯熔融石英来说,其值为 0.22。温度变化 ΔT 时由于光栅本身的热膨胀和热光效应产生的布拉格波长变化为

$$\Delta\lambda_{B2} = (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \cdot \lambda_B, \quad (5)$$

所以,光纤光栅的温度灵敏度为

$$K_T = (\Delta\lambda_{B1} + \Delta\lambda_{B2})/\Delta T = (\alpha + \xi) \cdot \lambda_B + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) \cdot \lambda_B. \quad (6)$$

例如,将掺锗石英光纤布拉格光栅牢固地粘接于铜质基底上,铜的热膨胀系数 $\alpha_s = 16.6 \times 10^{-6}/\text{K}$,常温下石英光纤的 $\alpha = 0.5 \times 10^{-6}/\text{K}$, $\xi = 6.7 \times 10^{-6}/\text{K}$,对于波长为 1537.18 nm 的光纤光栅来说,理论上可算得此时温度灵敏度系数为 30.38 pm/°C。

3 传感器结构模型及封装工艺

图 1 为光纤光栅温度传感器的封装结构,它由裸光纤光栅、裸光纤光栅支撑架、保护管、保护管堵头、管阀件、光纤连接头、中空管、传输段光纤和光纤用油膏等 9 部分组成。保护管的两端通过管阀件与分别与中

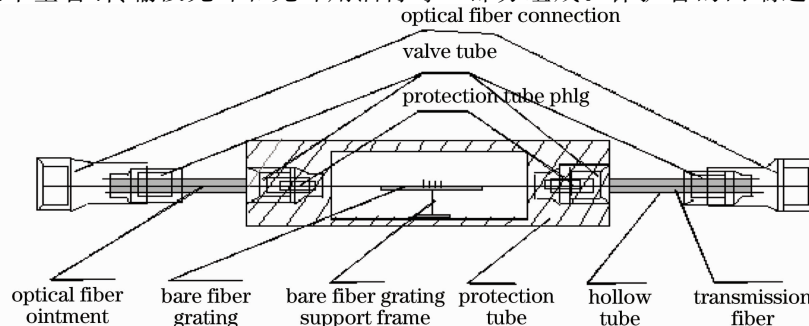


图 1 温度传感器封装结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature sensor encapsulation structure

空管密封连接,中空管的两端根据需要可通过管阀件与光纤接头密封连接;在保护管里面设有裸光纤光栅支撑架(如图2所示),其底座与保护管的内壁相粘贴或焊接接触,裸光纤光栅支撑杆的高度约等于保护管的内半径的一半,且越细越好,但应在长期使用条件下不变形。裸光纤光栅用特种胶粘贴在裸光纤光栅支撑架的凹槽内,其传输光纤部分通过中空管连接到光纤接头,且裸光纤光栅支撑架除底座和保护管内壁接触外,其余部分均不与保护管接触,这样光纤光栅和传输段光纤都仅受温度作用,完全消除应力对光纤光栅的影响。保护管堵头的作用是固定光纤,防止光纤横向移动,进一步消除应力的影响。光纤用油膏能防止水浸、氢浸对光纤的损害。

本次实验设计保护管为钢质圆柱形,内直径5 cm,耐压80 MPa。中空管为钢质,内直径2 mm,耐压80 MPa。裸光栅支撑架(图2)包括三部分,底座、支撑杆和粘贴板,底座和支撑杆为钢质,底座尺寸为6 mm×6 mm,连接杆为1 mm直径的圆柱状,高度为2.5 mm,粘贴板为铜质,尺寸为20 mm×8 mm×4 mm矩形。为了将光纤光栅牢固粘贴在粘贴板上,在粘贴板上预留一个凹槽,铜槽宽和深分别为1.5 mm和1.2 mm。在封装过程中,对光纤光栅施加适当的预应力,防止光纤光栅中心波长减小,并适当加热。另外为了增加粘贴强度,粘贴前需对基底凹槽表面打磨。

4 温度、压力测试及实验结果分析

4.1 实验原理

宽带光源发出的光经耦合器到达高温高压釜^[12]中温度控制箱内的温度传感器中,此时温度传感器中的光纤光栅会把携带有温度信息的、且满足布拉格条件的入射光反射回来,再经过耦合器,最后到达波长解调仪进行解调。实验原理如图3所示。

4.2 温度测试

实验用高温高压釜装置温控范围为室温至150 °C,精度为0.1 °C;压力量程160 MPa,精度1.5级,启动压力2 MPa。光纤光栅波长解调仪分辨率±1 pm,实验用裸光纤光栅中心波长为1537.18 nm,高温高压釜内液体为水,实验测试时不考虑传感器自身重量。温度实验采用逐级加减温方法,在传感器无围压压力作用下,以35 °C为起始,在35 °C~85 °C温度范围内,每次加或减温度10 °C测量一点。为了使高温高压釜内温度平衡,每点停留时间至少为15 min。

图4显示设计的温度传感器两次升温两次降温过程测量的数据曲线,第一次升温时拟合方程为 $y = 0.0311x + 1536.4, R^2 = 0.9998$;第一次降温时拟合方程为 $y = 0.0309x + 1536.4, R^2 = 0.9998$;第二次升温时拟合方程为 $y = 0.031x + 1536.4, R^2 = 0.9998$;第二次降温时拟合方程为 $y = 0.0309x + 1536.4, R^2 = 0.9996$ 。无论温度上升还是下降阶段,传感器中心波长在每个温度测量点都基本重合,说明设计传感器具有良好的重复性、迟滞性,线性度非常好。温度传感器的平均温度灵敏度为30.98 pm/°C,与计算理论值(30.38 pm/°C)的相对误差仅为0.3%,约为裸光纤光栅的2.83倍。而光纤光栅信号解调仪的精度为1 pm,因此,增敏封装光栅温度传感器的分辨力约为0.03 °C。存在误差原因:1)封装用特种胶与基底铜的热膨胀系数不同,虽然特种胶用量少,但不可避免地对测量结果产生一定影响;2)光谱分析仪的精度和温度表读数

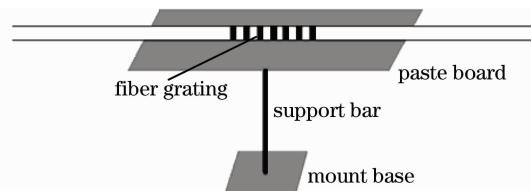


图2 裸光纤光栅支撑架结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of bare fiber grating support frame

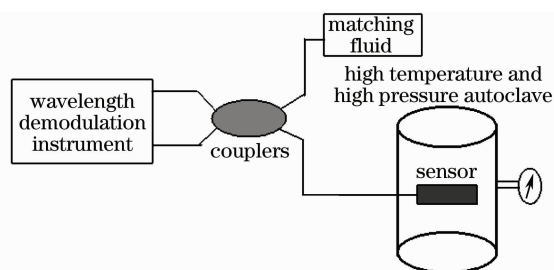


图3 实验原理框图

Fig.3 Frame diagram of experimental principles

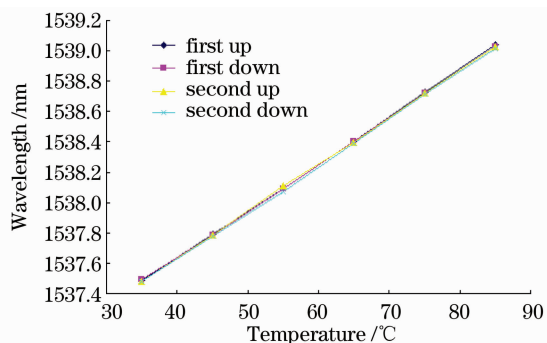


图4 温度传感器重复加减温实验

Fig.4 Temperature sensors repetitive increasing and decreasing temperature experiment

误差引起。

4.3 耐压性测试

对上述温度传感器在 35 °C 恒温下,在 0~45 MPa 压力范围内,压强每增加 5 MPa 测试一点,每点测试间隔 5 min,观察传感器中心波长对压力响应,如图 5 所示。从测试结果看,随着传感器围压变大,传感器中心波长漂移量在 5 pm 以内,考虑温度读数误差和解调仪精度问题,可认为波长无变化。

将施加给温度传感器的温度 (35 °C) 和压力 (45 MPa) 固定,每隔 300 s 测量一点,在 2700 s 时间范围内,观察传感器中心波长对时间的响应,如图 6 所示。从测试结果看,传感器中心波长漂移量小于 5 pm,在误差允许范围内,可认为中心波长没有变化。

在 40 MPa 恒压下,从 35 °C~85 °C 每隔 10 °C 测试一点,同样为了保持温度平衡,每点测试间隔至少 15 min。和没有压力下所测数据相比较(第二次升温),观察传感器中心波长对温度响应及相同温度测试点温度变化情况,如图 7 所示。从测试结果看,在相同温度测试点,传感器中心波长基本重合,误差在 ±5 pm;经拟合可得 40 MPa 恒压压力时温度传感器灵敏度为 30.9 pm/°C,与无压力测试时的 31 pm/°C 相比,相对误差为 0.3%;对比结果表明,在误差允许范围内,可认为温度传感器中心波长变化不受压力影响。

与其他学者用铜质基底封装的光纤光栅温度传感器相比,虽然在温度增敏、温度精度(和所用解调仪精度有关)方面几乎没有差异。但本次压力敏感实验研究不仅采用围压,且实验围压测试范围高达 40 MPa,能使温度传感器四周受力,很好模拟油气井下实际情况。然而很多学者对温度传感器的应力(压力)敏感研究都采用砝码、悬臂梁^[7]等使传感器受力,这样传感器不能四周受力,也不能模拟油气井下液体高压实际情况。当然也有学者利用液体围压对温度传感器进行围压敏感性研究,但压力最高仅为 2 MPa,远远不能满足油气井下几十兆帕高压环境的要求。

5 结 论

制作了一种不受压力影响的光纤光栅温度传感器,在 35 °C~85 °C 温度范围内传感器具有很好的重复性、迟滞性和线性度。对其耐压性进行了测试,结果显示传感器中心波长不受压力变化影响。由于实验中采用铜质基底,所以测试温度范围小于 100 °C,为了使设计的温度传感器能应用于更高使用温度环境,可用铂质基底代替铜质基底,但铂金属价格昂贵,会带来制作成本提高。也可从牺牲灵敏度的角度入手,考虑用和光纤同材质的玻璃做基底,由于玻璃的耐温性能很好,而且在高温时若膨胀系数也非常稳定,应该是一种比较好的基底替换材料。另外,为了更好隔绝压力,可对保护管内的传感段光纤弯曲封装。

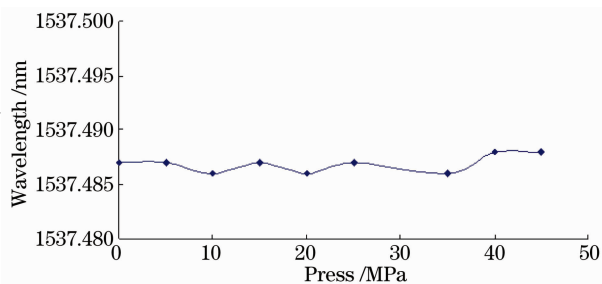


图 5 35 °C 恒温下压力和中心波长关系

Fig. 5 Relations between pressure and center wavelength under constant temperature of 35 °C

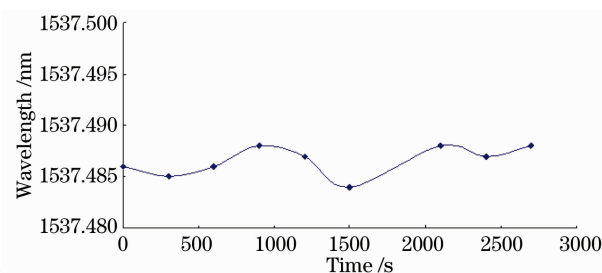


图 6 35 °C 恒温、40 MPa 恒压下在 45 min 内波长变化情况

Fig. 6 Changes of center wavelength in 45 min under constant temperature of 35 °C and constant pressure of 40 MPa

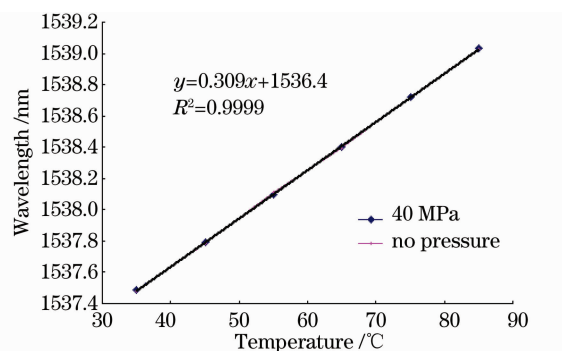


图 7 对比在 40 MPa 恒压和无压力下波长和温度变化情况

Fig. 7 Comparison of wavelength and temperature variation under constant pressure of 40 MPa and no pressure

参 考 文 献

- 1 Chang Tianying, Li Dongsheng, Sui Qingmei *et al.*. Experiment research of fiber grating sensor in the forked tunnel model [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(1): 103~108
常天英, 李东升, 隋青美 等. 光纤光栅传感技术在分岔隧道模型中的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, **29**(1): 103~108
- 2 T. Giallorenzi, J. Bucaro, A. Dandridge *et al.*. Optical fiber sensor technology[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(4): 626~665
- 3 Ph. M. Nellen, P. Mauron, A. Frank *et al.*. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications[J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2003, **103**(3): 364~376
- 4 L. A. Ferreira, F. M. Araujo, J. L. Santos *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(8): 2226~2234
- 5 Liu Yunqi, Zheng Jiancheng, Liu Zhiguo *et al.*. Pressure and temperature properties of fiber grating bourdon tube pressure sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(12): 1111~1115
刘云启, 郑建成, 刘志国 等. 光纤光栅弹簧管压力传感器的压力和温度特性[J]. 光子学报, 1998, **27**(12): 1111~1115
- 6 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. A novel in-fiber Bragg grating sensor for temperature and pressure simultaneous measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, **26**(11): 1149~1154
傅海威, 乔学光, 贾振安 等. 一种新颖的温度压强同时区分测量的光纤 Bragg 光栅传感器[J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(11): 1149~1154
- 7 Zhou Zhi, Wang Hezhe, Ou Jinping. Fiber Bragg grating packaged temperature sensor without exterior load affection[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, **25**(3): 57~59
周 智, 王赫喆, 欧进萍. 无外力影响光纤 Bragg 光栅封装温度传感器[J]. 传感器与微系统, 2006, **25**(3): 57~59
- 8 Li Yongwei, Han Xingde, Yu Guoqing. Enhancing-sensitivity packaging technique and experimental study for fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(3): 461~463
李永伟, 韩兴德, 于国庆. FBG 温度传感器增敏封装技术及实验研究[J]. 光学技术, 2009, **35**(3): 461~463
- 9 Du Weichong, Tan Huayao, Dai Wuqin *et al.*. A simple method to enhance temperature sensitivity of fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(1): 75~77
杜卫冲, 谭华耀, 戴务勤 等. 一种简单的增强光纤 Bragg 光栅温度灵敏度的方法[J]. 中国激光, 1997, **A24**(1): 75~77
- 10 Zang Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 84~86
詹亚歌, 蔡海文, 向世清 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 84~86
- 11 Yong Zhao, Yanbiao Liao, Shurong Lai. Simultaneous measurement of down-hole high press and temperature with a bulk-modulus and FBG sensor[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(110): 1584~1586
- 12 Xiao Lizhi, Chen Haifeng, Fu Jianwei *et al.*. High temperature and high pressure equipment of a fiber sensors[P]. Chinese patent, 200510124192.8, 2007-05-30
肖立志, 陈海峰, 付建伟 等. 一种用于光纤类传感器的高温高压釜装置[P]. 中国专利: 200510124192.8, 2007-05-30