

文章编号: 0253-2239(2004)11-1491-3

大范围光纤布拉格光栅温度传感器增敏实验研究*

孙 安 乔学光 贾振安 郭 团 陈长勇

(西安石油大学光纤传感实验室, 西安 710065)

摘要: 简要分析了光纤布拉格光栅的温度响应及增敏原理, 采用特殊耐高温有机聚合物对光纤光栅进行温度增敏封装, 并通过改进光纤光栅的聚合物封装固化工艺, 使用某种有机硅导热胶减小有机聚合物与套管材料的粘合度, 消除了封装过程中由于聚合物材料不均匀收缩引起的光纤光栅反射谱啁啾化, 实现 20~180 °C 范围内光纤光栅传感器对温度高灵敏度测量。实验结果表明, 聚合物封装光纤光栅传感器温度响应灵敏度在 20~130 °C 为 0.05 nm/°C, 在 130~180 °C 达到了 0.22 nm/°C, 并在两个区域保持较好的线性与重复性。此结构传感器封装工艺简单, 易于实现, 可用于高温恶劣环境下的温度单参量测量。

关键词: 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 温度传感器; 温度增敏

中图分类号: TN253 文献标识码: A

The Experimental Study of Large Range Enhanced Temperature Sensitivity Concerning Fiber Bragg Grating Temperature Sensor

Sun An Qiao Xueguang Jia Zhen'an Guo Tuan Chen Changyong

(Optical Fiber Sensing Laboratory, Xian Shiyou University, Xian 710065)

(Received 18 July 2003; revised 23 March 2004)

Abstract: The temperature response and sensitivity enhancing technology concerning fiber Bragg grating (FBG) is analyzed. A special kind of heat-resistant polymer is used to coat FBG to enhance the temperature sensitivity of FBG sensor. The polymer coating and solidifying process of FBG is improved. A kind of heat-conducted adhesive is used to reduce the friction between tube and polymer, and eliminate the chirp effect of FBG caused by the asymmetric shrinkage of polymer during the package process. The experimental results show that the FBG sensor can measure temperature from 20 °C to 180 °C. The temperature response sensitivity is 0.05 nm/°C from 20 °C to 130 °C and 0.22 nm/°C from 130 °C to 180 °C, respectively, and the response trend line has good linearity in both areas. This kind of sensor is easy to fabricate and can be used for high temperature measurement.

Key words: fiber optics; fiber Bragg grating; temperature sensor; enhanced temperature sensitivity

1 引 言

自 20 世纪 80 年代以来, 随着紫外光写入光栅技术的趋于成熟, 光纤光栅作为一种具有优良光学传感元件, 引起了人们的广泛重视。目前, 人们正研

究将光纤光栅应用于各领域中温度与压力等参量的测量^[1]。但是由于光纤光栅对于温度和压力的响应灵敏度较低, 例如, 裸光纤光栅对温度的响应灵敏度仅为 0.01 nm/°C 左右, 并且裸光栅本身易损坏, 这些问题严重影响着光纤光栅在传感领域的应用。针对这些问题, 许多方案都是通过采用有机聚合物封装来实现对光纤光栅的增敏^[2~6]以及保护。但大多数有机物加工工艺较复杂, 其成型需经过高温及高压处理, 难以实现对光纤光栅的封装。此外, 封装过程需保证有机物与光栅的粘接性要好, 且封装后光

* 国家自然科学基金(69877025)、国家 863 计划(2002AA313150)和国家教育部科学技术重点项目(02190)资助课题。

E-mail: sunan_1978@163.com

收稿日期: 2003-07-18; 收到修改稿日期: 2004-03-23

栅对温度和压力有较高的灵敏度,很多有机聚合物无法达到这些要求。此外,有些聚合物虽然可较大幅度提高光纤光栅温度响应灵敏度,但受到材料本身不耐高温以及光纤光栅反射峰中心波长最大漂移范围限制,大多只能进行 100℃ 范围内温度的测量。本文采用某种耐高温聚合物对光纤光栅封装,然后通过特殊工艺作进一步改善,可以实现 20~180℃ 内对温度的测量,可满足很多诸如油气井下等高温恶劣环境的要求。

2 原 理

温度对光纤材料的影响主要有两方面:一是热膨胀导致材料尺度变化,另一方面是热致折射率改变;当采用聚合物封装时,光纤布拉格光栅(FBG)反射峰中心波长变化为^[3]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = [\zeta_e + (1 - P_e)\alpha_{sub}]\Delta T, \quad (1)$$

式中 P_e 为光纤光栅弹光系数, ΔT 为温度变化, ζ_e 为光纤材料的热光比系数, α_{sub} 为粘贴光栅基底材料的热膨胀系数,根据温度范围的不同而改变。对于掺锗石英光纤来说, ζ_e 大约为 8.3×10^{-8} , P_e 为 0.22。

采用某种高热膨胀系数有机聚合物对光纤光栅封装,封装结构图如图 1 所示。

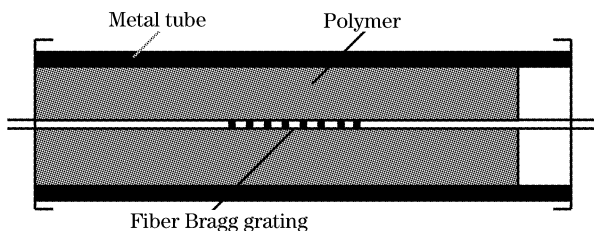


Fig. 1 Structure of polymer packaged FBG temperature sensor

将光纤光栅两端固定在金属套管内,先将套管一端封闭,然后取液体聚合物材料,添加热稳定剂以及抗氧化剂后,对光纤光栅进行灌封,在另一端留有一定的空间裕度,使聚合物材料的热膨胀性能不受影响。最后将封装好的光纤光栅高温固化 5 h。

3 实验及结果分析

封装光纤光栅的温度响应测试实验装置如图 2。将封装光纤光栅放入可控温箱中,宽带光源 BBS 发出的光经 3 dB 耦合器入射到光纤光栅中,被反射后又经 3 dB 耦合器送到光谱分析仪 OSA,通过光谱分析仪观察光纤光栅反射峰中心波长的变化。

掺铟光纤激光器的工作电流为 15 mA,峰值波

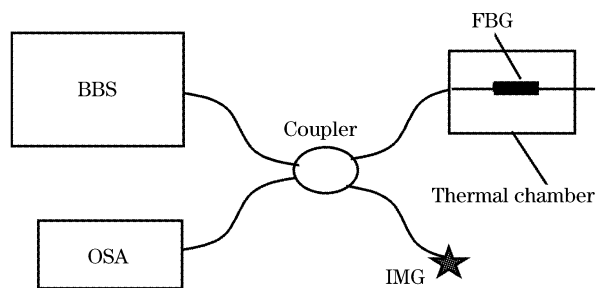


Fig. 2 Experimental setup for the proposed temperature measurement of coated FBG

长为 $\lambda = 1532$ nm,带宽 40 nm。与一 3 dB 耦合器连接的光谱分析仪 OSA 分辨力为 0.05 nm,用以监测光纤光栅反射峰值中心波长 λ_C 和带宽 $\Delta\lambda_{3\text{dB}}$ 。

封装后光纤光栅的初始中心波长由原来的 1550.48 nm 变为 1547.74 nm,且反射谱明显啁啾化,带宽 $\Delta\lambda_{3\text{dB}}$ 由 0.2 nm 变为 0.5 nm,这是因为此类封装材料热膨胀系数较大,热固化过程中会发生很大收缩,相当于给光纤光栅施加轴向压缩,导致了光纤光栅初始波长变化。

加温试验采用逐步升温法,由室温 22℃ 升至 180℃,每次升温幅度大致为 10℃ 左右,并通过温度计进行校正,以排除可控温箱的误差。由于有机聚合物的热传导系数一般比金属低,为了使封装材料充分受热,保证试验准确性,升温时间间隔为 5 min。封装后的光纤光栅增敏效果较理想,在 20~130℃ 的范围内温度响应系数约为 0.04 nm/℃,在 130~180℃ 范围内为 0.2 nm/℃,但温度响应不稳定,出现较大随机波动。

通过分析可知,封装光纤光栅反射谱啁啾化以及温度响应的波动主要是封装材料与金属套管的粘接和摩擦造成的。由于封装材料与金属套管的粘接性很高,所以在封装材料固化收缩过程中,由两端到中间,光纤光栅受力分布不均,造成了光纤光栅的啁啾化。此外,由于封装材料的热膨胀系数远大于金属套管的,封装材料与套管的粘接不但引起光纤光栅温度响应不稳定,还会在一定程度上阻碍聚合物材料的热膨胀,降低增敏效果。

为了减小聚合物材料与金属筒壁的粘接性及摩擦系数,采用某种导热型有机硅胶,在灌封光纤光栅前,先对金属内筒壁进行涂覆并固化。由于这种导热胶属于软弹性体,与金属粘接性较差,且导热性好,与封装材料无任何化学反应,所以对封装光栅的温度响应特性以及其它性能影响不大。这样可以有效地克服封装材料与金属筒壁的粘接问题。当聚合物封装

材料固化收缩以及受热膨胀时,不会受到金属套管的影响,保证了聚合物材料均匀的膨胀以及收缩。改进后的封装如图 3 所示。

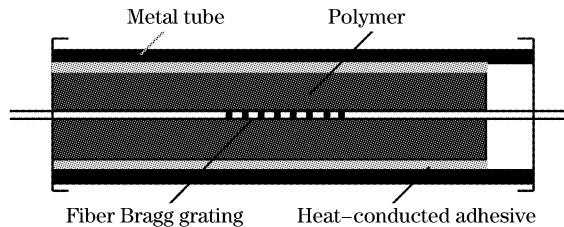


Fig. 3 Improved structure of polymer packaged FBG temperature sensor

通过这种方法对光纤光栅封装,观察改善后的封装光纤光栅反射谱,带宽 $\Delta\lambda_{3dB}$ 基本不变,保持在 0.2 nm 左右,由于与套管粘接度的减小,聚合物材料的热收缩更明显,使光纤光栅反射峰初始中心波长减小了约 5 nm,由 1550.76 nm 变为 1545.33 nm。对改善后的封装光纤光栅进行温度试验,温度响应特性曲线如图 4 所示。

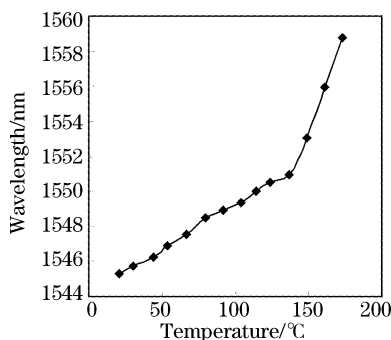


Fig. 4 Bragg wavelength shift versus temperature for polymer packaged fiber grating

温度范围在 20~130 °C 之间变化时,光纤光栅温度响应灵敏度为 0.051 nm/°C,而在 130~180 °C 则达到了 0.22 nm/°C,对两个不同范围的温度曲线分别进行数据拟合,拟合度达到了 0.9972 和 0.9947。

单次升降温过程中,光纤光栅的温度误差可保持在 0.5 °C。重复加温实验,封装光纤光栅温度响应灵敏度发生变化的温度始终为 130 °C 左右。在反复升降温的实验后,光纤光栅温度响应趋势基本保持不变,仅略有波动,与光纤光栅灵敏度比较,其波动所带来的误差约为 1 °C。而观察未使用导热胶预涂覆的光纤光栅,其波动约为 2~3 °C。

可以看出,通过改进封装工艺能有效地减小封装材料与金属筒壁的摩擦系数,提高封装光纤光栅的温度响应灵敏度并减小测量误差。这种结构封装的光纤光栅可以很好地实现较大范围内光纤光栅对温度

的高灵敏度测量。以光谱仪 0.05 nm 分辨力为例,在低温区测量精度可达 1 °C,高温区可达 0.25 °C。

通过研究聚合物材料性质可知,大多数聚合物材料均存在玻璃化温度 T_g ,当外界温度大于 T_g 时,材料的物理性质(例如热膨胀系数、弹性模量)会发生很大变化。不同的材料玻璃化温度差异很大,例如聚碳酸酯材料的 T_g 温度可达 220 °C,而本文所用的聚合物材料玻璃化温度 T_g 大约为 130 °C 左右,因此当温度大于 130 °C 后,封装光纤光栅的温度灵敏度变化很大。

当温度超过 180 °C 后,光纤光栅反射谱迅速衰减,这是光纤光栅已达到本身反射峰中心波长最大漂移范围,整个增温过程中,光纤光栅的反射峰中心波长共漂移了 13.47 nm,由 1545.33 nm 达到 1558.8 nm。可以看出,光纤光栅传感器灵敏度和测量范围是相互矛盾的,一般增敏方案主要集中在温度低于 100 °C 的环境中,所以强调温度增敏的倍数。这样,在提高光纤光栅温度响应灵敏度同时,缩小了光纤光栅的测量范围,不能满足高温测量的要求。而此类传感器由于在封装过程中聚合物材料热收缩导致光纤光栅初始波长减小,以及封装光纤光栅在低温区对温度的相对低敏感,均扩大了光纤光栅的测量范围。

结论 通过对光纤光栅进行封装设计,并通过实验证明,采用这种结构封装的光纤光栅,能够在有效地对光纤光栅进行增敏同时,保证了光纤光栅的测量范围,使其可应用于油气井以及其它温度变化范围较大的工程环境中。

参 考 文 献

- Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber grating sensors. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2002, **13**(4): 420~430 (in Chinese)
- Abramov A, Hale A, Windeler R S *et al.*. Widely tunable long-period fiber grating. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(1): 81~82
- Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Zhang Ying *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre Bragg grating. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(6): 564~566
- Zhang Ying, Feng Dejun, Liu Zhiguo. High sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fibre Bragg grating. *Photo. Technol. Lett.*, 2001, **13**(6): 618~619
- Aferreira L, Santos J L, Farahi F. Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fibre Bragg grating sensor. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(8): 2226~2233
- Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1): 89~91 (in Chinese)