

High sensitive fiber Bragg grating temperature sensors at high temperature

LI Kuo, ZHOU Zhen-an, LIU Aichung and WANG Xiuying

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085)

Abstract: A method of making full use of the durable strain which fiber Bragg grating (FBG) can undertake is presented, which hugely improves the sensitivities of FBG temperature sensors at high temperature. When a sensor is manufactured at room temperature, its FBG should be given a pre-relaxing length according to the temperature it is asked to measure; once the temperature rise to the asked one, its FBG starts to be stretched and it starts to work with high sensitivity. The relationship between the pre-relaxing length and the working temperature is analyzed. In experiments, when the pre-relaxing lengths are 0.2mm, 0.5mm, 0.6mm, the working temperatures rise 25°C, 50°C, 61°C, respectively, and the sensitivities are almost the same (675pm/°C). The facts that the experimental results agree well with the theoretical analyses verify this method's validity.

Keywords: optical measurement; high sensitivity; pre-relaxing length; fiber Bragg grating; high temperature; sensor;

一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法

李阔 周振安 刘爱春 王秀英

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 提出一种充分利用光纤光栅所能承受的应变量的方法, 其显著提高了光纤光栅温度传感器在高温下的灵敏度。其原理是: 在常温下制作传感器时, 根据传感器需要测量的温度设置光纤光栅的预松长度; 当温度升高到需要测量的温度时, 光纤光栅才开始被拉紧, 传感器才开始以高灵敏度方式工作。分析了预松长度和工作温度之间的关系。实验中, 当预松长度分别为 0.2mm、0.5mm、0.6mm 时, 工作温度分别上升了 25°C、50°C、61°C, 并且灵敏度(约 675pm/°C)基本不变。实验结果和理论分析吻合较好的事实证实了该方法的有效性。

关键词: 光学测量; 高灵敏度; 预松长度; 光纤光栅; 高温; 传感器;

一、引言

光纤 Bragg 光栅 (fiber Bragg grating, 简称光纤光栅) 作为新型温度、应变传感器, 具有不受电磁干扰, 寿命长, 可靠性好, 易于组网测量和信号传输距离远等诸多优点, 已广泛应用于石化、电力、水坝、桥梁和重要建筑的安全监测^[1-3]。与传统高温计相比, 光纤高温计具有抗腐蚀、使用寿命长的优点^[4]。但是, FBG 固有的温度分辨率很低, 约 0.1 °C/pm。这在很多应用领域都无法满足要求。J.L. Cruz 等^[5]通过将 FBG 直接粘贴在大膨胀系数材料上进行温度增敏。因为材料的热膨胀系数有限, 所以该方法能增加的温度灵敏度有限。Jeahoo Hung 等^[6,7]通过双金属进行温度增敏, 实现了可以选择的温度灵敏度。但是, 他们没有进一步研究如何使传感器在需要的温度才开始工作。

对于高灵敏度光纤光栅温度传感器, 因为光纤光栅热光系数对温度灵敏度的贡献 (10 pm/°C) 远小于光纤光栅应变变化产生的贡献, 所以在估算传感器的测温量程时, 可以忽略其影响。高灵敏度光纤光栅温度传感器的量程约等于光纤光栅能承受的最大应变与传感器灵敏度的商。因光纤光栅所能承受的应变有限, 致使高灵敏度光纤光栅温度传感器的量程有限。

如何把高灵敏度光纤光栅温度传感器有限的量程调整到需要的温度, 就显得尤为重要。目前, 现有的高温下高灵敏度光纤光栅温度传感器都是将 FBG 和大热膨胀系数材料直接封装到一起, 通过牺牲传感器的灵敏度、扩大其量程的方式, 达到使其能在需要的温度工作的目的^[8-11]。显然, 这种方法严重的降低了传感器的灵敏度。为了保证高灵敏度的温度测量, 我们提出了通过调节光纤光栅的预松长度以使其到需要测量的温度才开始被拉紧的方法, 使得传感器在需要的高温下能有很高的灵敏度。

二、方法

双金属的温度增敏方法的结构原理如图 1 所示。该结构由两种不同热膨胀系数(the coefficient of thermal extension, CTE)

资助项目: 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项 项目名称: 新型地震前兆观测传感器及设备研究

作者简介: 李阔 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅在观测领域的应用。Email: abmouse@126.com

导师简介: 周振安(1951-), 男, 研究员, 主要研究方向为地震前兆观测技术。Email: zza0825@126.com。

的材料和光纤光栅共同组成。温度变化时，双金属结构把两种热膨胀系数不同的金属的长度变化量的差转化成光纤光栅长度的变化量，通过提高单位温度变化下光纤光栅的应变变化量的方式，达到提高传感器温度灵敏度的目的。设 d 为光纤光栅的两个粘贴点间的距离， L 为大热膨胀系数金属上的两个固定点之间的长度， α_1 为大热膨胀系数金属的热膨胀系数， α_2 为小热膨胀系数金属的热膨胀系数。当温度升高 1°C 时，大热膨胀系数金属底座的伸长量为 $\alpha_1 L$ ，小热膨胀系数金属长条的伸长量为 $\alpha_2(L-d)$ ，光纤光栅的两个粘贴点间的距离 d 的增加量为 $\alpha_1 L - \alpha_2(L-d)$ 。在传感器的环境温度由制作传感器时的温度 T_r 上升到设计的传感器开始工作的温度 T_s 的过程中， d 增加量为：

$$\Delta d = [\alpha_1 L - \alpha_2(L-d)](T_s - T_r) \quad (1)$$

因此，为了使传感器在需要的高温下工作，在温度 T_r 下制作传感器时，光纤光栅在其两粘贴点之间的长度应比两粘贴点之间的距离长，且长的长度应等于 Δd 。我们将该长的长度称为光纤光栅的预松长度。

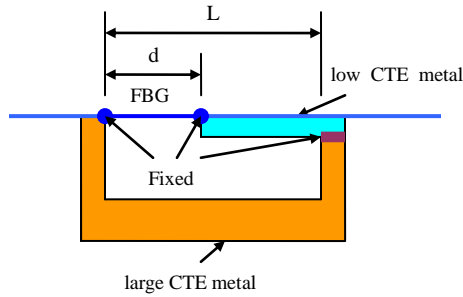


图1 高灵敏光纤光栅温度传感器结构示意图
Fig.1 High sensitive FBG sensor schematic structure

三、 实验与分析

为了实验验证光纤光栅的预松长度和传感器开始以高灵敏度方式工作的温度之间的关系，我们设计并制作了一支如图2所示的传感器。该传感器可以方便的控制预松长度。通过调整小热膨胀系数金属长条的位置，可以改变光纤光栅的两个粘贴点间的距离。配合使用波长解调仪，调整长条的位置使光纤光栅刚好开始被拉紧。设此时两粘贴点间的距离为 d' 。然后，再调整长条2的位置以缩短 d' ，缩短的量即为预松长度。当传感器的环境温度由 T_r 上升到 T_s 后，光纤光栅的两个粘贴点之间的长度增加至 d' ，光纤光栅才开始被拉紧。通过改变预松长度，就可以使传感器工作在不同的温度区间。制作传感器时环境温度为 20°C ，传感器的大热膨胀系数金属底座采用硬铝 ($\alpha \approx 19 \times 10^{-6}/\text{K}$) 制作，小热膨胀系数金属长条采用 invar ($\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6}/\text{K}$) 制作，两粘贴点间的距离 $d=15\text{mm}$ ，铝底座上的两个固定点之间的距离 $L=450\text{mm}$ 。实验使用的光纤光栅是通过相位掩模板方式制作的，栅区长度 15mm 。光纤光栅的热光系数为 $6.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，弹光系数为 0.22 。实验使用的波长解调器的分辨率为 1pm ，精度为 $\pm 3\text{pm}$ 。实验系统示意如图3所示。

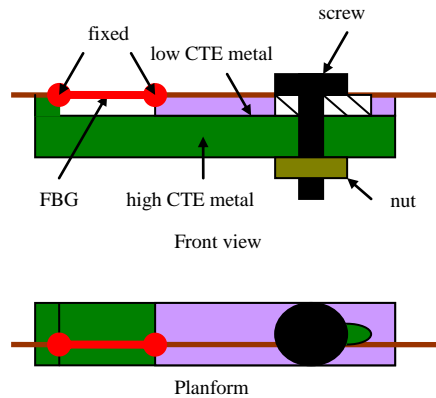


图2 可工作与高温的高灵敏光纤光栅温度传感器结构示意图

Fig.2 High sensitive FBG sensor suit for high temperature schematic structure

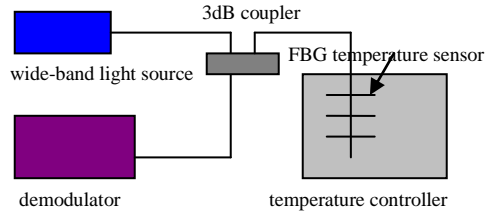


图3 实验系统示意图

Fig.3 Experimental system schematic setup

实验中，使预松长度分别为0mm、0.2mm、0.5mm、0.6mm，并对不同预松长度的传感器分别进行标定。实验结果如图4所示（数据均在稳定后半小时读取）。实验中，当d分别缩短0.2mm、0.5mm、0.6mm时，传感器开始工作的温度分别上升了25℃、50℃、61℃。这与理论上应分别上升的温度（20.7℃、51.6℃、62℃）基本吻合。此处的误差主要来源于d缩短长度的测量误差。当光纤光栅预松不同的长度时，传感器的温度灵敏度系数基本不变，且各条曲线的线性度均在0.999以上。实验结果表明，通过调整光纤光栅的预松长度，可以在保持灵敏度基本不变的条件下，提高光纤光栅温度传感器开始工作的温度。

因为双金属结构的光纤光栅温度传感器是通过增强光纤光栅随着温度的应变变化提高其温度灵敏度的，故在制作传感器时，必需使各固定点非常牢固，尽可能减小结构件长度变化在传递过程中的损失。实验中，我们采取以螺钉固定结构件、环氧树脂胶固定光纤光栅的方式，使传感器取得了较好的重复性和稳定性。因受光纤光栅能承受的最大应变（约4000 $\mu\epsilon$ ）的限制，该传感器的量程仅为7℃左右。为了保证光纤光栅不被拉断，实验中的环境温度变化控制在6℃。

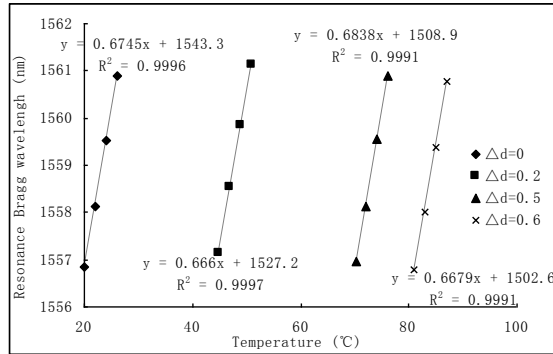


图4 当光纤光栅预松不同的长度时，该传感器温度灵敏度的实验结果

Fig.4 The experiment results of the sensor's sensitivity at different pre-relaxing length of FBG

四、 总结

提出了一种提高光纤光栅温度传感器在高温下的灵敏度的方法，理论分析和实验证明了它的有效性。其通过在常温下根据传感器需要测量的温度设置光纤光栅的预松长度，使光纤光栅在需要的高温下才开始被拉紧，充分的利用了光线光栅所能承受的应变变量，显著提高了光线光栅温度传感器在高温下的灵敏度，在高温下的高精度测温领域有着不错的应用前景。

References

- [1] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Opt. Lett. 1989, 14: 823~825.
- [2] W. Zhang, L. Liu, F. Li, and Y. Liu, "Fiber Bragg grating pressure sensor with enhanced sensitivity," Chin. Opt. Lett. 2007, 5: 507~508.
- [3] Y. Zhan, S. Xue, and Q. Yang, "Multiplexed reflective-matched optical fiber grating interrogation technique," Chin. Opt. Lett. 2007, 5: 135~137.
- [4] Liao Chuke, Chen Huarong. A study of new fiber optic pyrometer [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 23(8):27~29 (in Chinese).

- 廖楚柯, 陈华荣. 新型光纤高温计的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(8):27~29.
- [5] J.L. Cruz, L. Dong, I and L. Reekie. Improved thermal sensitivity of fibre Bragg gratings using a polymer overlayer [J]. Electronics Letters, 1996, 32(4):385~387.
- [6] Jaehoon Jung, Hui Nam, Byoung-ho Lee et al. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity [J]. Applied optics, 1999, 38(13):2752~2754.
- [7] Han Qun, Lu Kecheng, Li Jiafang et al. Research on a novel fiber Bragg grating thermal tuning scheme[J]. ACTA PHYSICA SINICA, 2004, 53(12):4253~4256. (in Chinese).
韩群, 吕可诚, 李家方 等. 一种新颖的光纤光栅温度调谐装置的原理与实验研究[J]. 物理学报, 2004, 53(12):4253~4256.
- [8] Xu Xiandong, He Wei, Yu Haihua et al. High-sensitivity Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with Polymer Jacket[J], Journal of Wuhan university of technology, 2003, 25(04): 14~16 (in Chinese).
徐先东, 何伟, 余海湖 等. 光纤布喇格光栅高温敏封装技术的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(04): 14~16.
- [9] Zhan Yage, Xiang Shiqing, He Hong et al.. Study on high temperature optic fiber grating sensor [J]. Chinese J. Lasers, 2005, 32(9):1235~1238 (in Chinese).
詹亚歌, 向世清, 何红 等. 光纤光栅高温传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(9):1235~1238.
- [10] Sun an, Qiao Xueguang, Jia zhen-an et al. The Experimental Study of Large Range Enhanced Temperature Sensitivity Concerning Fiber Bragg Grating Temperature Sensor, ACTA OPTICA SINICA, 2004 Vol. 24 No. 11 P. 1491~1493 (in Chinese).
孙安, 乔学光, 贾振安 等. 大范围光纤布拉格光栅温度传感器增敏实验研究[J]. 光学学报, 2004, 24(11): 1491~1493.
- [11] Yu Dakuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen-an et al. A novel packaged fiber bragg grating temperature sensor with high temperature-resistance[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(2):232~234. (in Chinese).
禹大宽, 乔学光, 贾振安 等. 一种新颖封装的耐高温光纤Bragg光栅温度传感器[J]. 光子学报, 2006, 35(2):232~234.