

光纤传输与网络 ·

# 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研究\*

黄国君 殷昀毓 戴 锋 阚常珍

(中国科学院力学所工程科学部,北京 100080)

**摘要:**分别采用金属和聚合物材料研究了封装材料对布拉格光纤光栅(FBG)传感器灵敏性的影响,并通过加速疲劳实验对传感器安装工艺的疲劳可靠性进行了研究。结果表明:焊接安装金属封装 FBG 应变传感器具有良好的灵敏性及其长期稳定性,是海洋结构、桥梁等动载环境下工作的结构长期安全监测的理想器件。

**关键词:**光纤布拉格光栅,应变传感器,疲劳,安全监测

## Investigation on the sensibility and fatigue reliability of fiber Bragg grating strain sensors

Huang Guojun Yin Yunguo Dai Feng Kan Changzhen

(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** Effect of the package material property on the sensibility of Fiber Bragg grating (FBG) strain sensors was investigated with steel and polymer chips, respectively. In addition, a speedup fatigue test was conducted to evaluate the fatigue reliability of the sensors and corresponding installation method. Experimental results indicate that the FBG sensor with metal chip and welded onto a steel structure shows good performance and long-term stability, proved to be an ideal candidate for the safety monitoring of the structure under alternate loading, such as offshore platforms and bridges.

**Key words:** fiber Bragg gratings, strain sensor, fatigue, safety monitoring

### 1 引言\*

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新型光学器件,最初被应用于通讯领域,近年来又以其固有的自然特性及波长编码效果受到传感领域的青睐<sup>[1]</sup>。基于FBG的传感器较常规传感器有显著的优点:不受电磁场的干扰,这在电工行业中几乎是不可替代的<sup>[2]</sup>;其信息对波长编码决定了它不依赖系统的整体光强和光纤-耦合器的连接损耗以及其它器件的插入损耗;具有绝对值测量及在一路光纤上应用波分复用技术可以实现准分布式测量<sup>[3]</sup>。

FBG通常是由普通单模通讯光纤剥掉涂覆层后,放入高压氢气罐载氢,最后用相位掩模板法刻制而成。FBG可直接粘贴在结构表面或嵌入到结构材料内部测量结构的应变,这是最简单的FBG应变传感器。然而由于光栅裸露、细小而容易脆断,在实际工程应用中,直接粘贴的工艺不可靠,一般只用于实验室研究。另外,在工程钢结构上刻槽埋入FBG的操作一般是不允许的,因为这将人为地使结构引入损伤,破坏其完整性。由此可见:对于工程钢结构的应变监测,现实的工艺是将FBG封装起来,制成应变传感器器件,然后将其粘贴或焊接在结构上。

本文将重点研究封装材料对FBG应变传感器传感特性的影响以及传感器安装在结构上以后在交变载荷下的疲劳可靠性,以海洋平台监测为应用背景研制一种新型FBG应变传感器,为FBG光纤从实验室走向实际应用做出有益的探索。

### 2 传感原理

FBG在传感技术上的成功应用是基于一种选择反射的原理<sup>[4]</sup>:即一宽带光经过FBG时,部分光会反射回来,其波长 $\lambda_B$ (Bragg光栅波长)满足Bragg定理:

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

式中: $n_{eff}$ 为有效折射系数; $\Lambda$ 为光栅间距。当FBG产生一个轴向应变 $\epsilon_z$ 时,会引起 $\Lambda$ 以及 $n_{eff}$ (弹光效应)的变化,相应的 $\lambda_B$ 平移量 $\Delta\lambda_B$ 为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \epsilon_z = \lambda_B \epsilon_z \quad (2)$$

式中: $K_B = \lambda_B (1 - P_e)$ 称为FBG的应变敏感系数;

$P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [ P_{12} - \nu ( P_{11} + P_{12} ) ]$ 为有效弹光常数,其中 $P_{11}$ 和 $P_{12}$ 为弹光张量分量(Pockel系数), $\nu$ 为Poisson比。另外,环境温度发生变化 $\Delta T$ 时,由于热膨胀和热光效应,也将引起 $n_{eff}$ 的变化,相应的 $\lambda_B$ 平移为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B ( K_T + \alpha ) \Delta T = \lambda_B K_T \Delta T \quad (3)$$

式中: $K_T = \lambda_B ( K_B + \alpha )$ 称为FBG的温度敏感系数,其中 $\alpha$ 为热膨胀系数, $\beta = \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T}$ 为热光系数。由(2)和(3)式可知:可通过光学装置检测出 $\Delta\lambda_B$ 后获得应变和温度变化的信息。

FBG经封装制成应变传感器后粘贴/焊接在结构上,结构测点处的轴向应变 $\epsilon_z$ 通过粘贴/焊接和封装材料传递到光纤上,一般FBG感受到的平均应变 $\epsilon_z^0$ 不等于 $\epsilon_z$ ,可定义一个应变传递系数:

$$r = \frac{\epsilon_z^0}{\epsilon_z} \quad (4)$$

代入(2)式得:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \epsilon_z^0 = r \lambda_B \epsilon_z = \lambda_B K_B r \epsilon_z \quad (5)$$

式中, $K_B r$ 称为FBG传感器的应变敏感系数。另外,对于温度变化, $\lambda_B$ 除了(3)式裸栅的贡献以外,还有因光纤、封装材料和结构材料不同产生的非均匀膨胀导致的附加波长平移,对于线弹性材料它与 $\Delta T$ 成正比,记为 $\lambda_B \Delta T$ 。因此FBG应变传感器的温度效应为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B ( K_B r + \alpha ) \Delta T = \lambda_B K_T \Delta T \quad (6)$$

式中: $K_T = \lambda_B ( K_B r + \alpha )$ 称为FBG应变传感器的温度敏感系数; $r_T = 1 + \frac{\alpha}{K_B r}$ 为温度增敏系数。当应变和温度变化共同存在时:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B ( \epsilon_z + K_T \Delta T ) \quad (7)$$

需要采用温度补偿技术,将应变和温度变化分离出来。

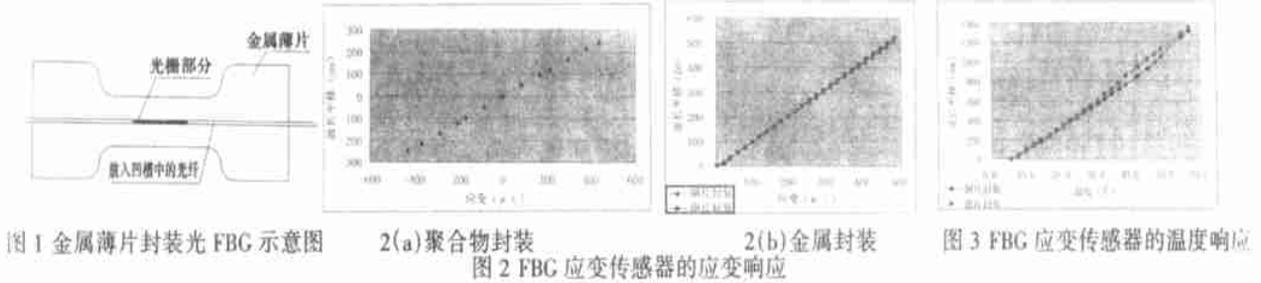
\* 2003年4月28日收稿  
中国科学院知识创新重要方向暨中国科学院与中国海洋石油总公司十五科技合作项目 KXCX2-SW-L03-01 资助



由(5)式可看到:当波长解调设备的分辨率和精度一定时,增加应变传递系数  $r$  可提高应变测量的分辨率和精度,  $r$  与传感器的封装材料性质、几何形状、光纤/封装材料/结构界面的粘结或焊接状况等有关。具有良好线性度的传感器使用起来较为方便,由于  $r$  线性度高,所以应使  $r$  也具有高的线性度,这要求封装材料和粘结/焊接材料尽可能使用线弹性材料。从长期监测的需要来说,还要求 FBG 传感器的

封装材料和粘贴/焊接材料力学性质稳定并且界面疲劳损伤小,以维持  $r$  的时间稳定性。另外,  $r_T > 0$  可提高  $r_T$  从而起到增敏的作用,这对于 FBG 温度传感器是所希望的,但对 FBG 应变传感器来说,  $r_T$  越小越好。以上分析对 FBG 应变传感器的选材、设计和安装提供了一个指导思想。

### 3 FBG 封装及传感特性



为考察封装材料性质对传感特性的影响,分别采用铜、不锈钢和聚合物材料对 FBG 进行封装,制成各类应变传感器。图 1 为金属薄片封装的 FBG 传感器,薄片的厚度为 0.8mm,长度为 25mm,在金属片的上表面刻槽,将光栅部分放入凹槽中,注入粘合剂固化成一体。另一种方法则是将 FBG 放入矩形模具中,倒入环氧树脂胶,固化后得到片状的 FBG 传感器。

以可得应变传递系数  $r$  分别为:0.891、0.891、0.583,它表明:两种金属封装传感器的  $r$  几乎相同并且显著大于高分子封装传感器。这是由于金属的弹性模量远高于所用聚合物,因而应变传递衰减减小,同时尽管铜和钢的弹性模量有些差异,但由于金属片薄,不足以使传递到光栅上的应变有明显不同。

将金属 FBG 传感器焊接到标准的低碳钢拉伸试样上,同时将聚合物 FBG 传感器粘贴到同样的试样上,试样的尺寸远大于传感器的尺寸,以避免传感器对试样变形的影响。对不同的 FBG 传感器各采用两个试样应用水浴法和标准拉伸实验来测定其温度和应变传感特性。FBG 波长变化的测量采用美国 Micron Optics 公司的四通道解调系统 FBG-SLI,该设备集成了扫频激光光源和可调光纤滤波器解调模块,波长分辨率为 1pm,精度为  $\pm 5\text{pm}$ ,采样率为 106Hz,采样点为 64/通道,工作波长范围:1525 - 1565nm。

图 3 表示金属封装 FBG 应变传感器的温度特性,也都具有良好的线性度。由实验结果拟合得到的温度敏感系数  $r_T$  分别为:24.34pm/°C (铜)、26.07pm/°C (钢),它们比聚合物封装 FBG 应变传感器的测定值  $r_T = 12.8\text{pm/}^\circ\text{C}$  高出近一倍。同时我们对裸光栅的测定结果为  $r_T = 9.7\text{pm/}^\circ\text{C}$ ,可得温度增敏系数  $r_T$  分别为:2.51(铜)、2.69(钢)和 1.32(聚合物),表明金属封装温度增敏效果非常显著,这是由于钢试样和金属封装材料线胀系数较大,带动光栅变形。相比之下聚合物封装温度增敏效果小,主要是由于聚合物相对较软,光栅产生的附加变形小。测定出 FBG 应变传感器的温度效应  $r_T$  后,就可以应用(7)式消除温度对波长变化的影响,测得结构的应变,这在后期的数据处理上很容易实现,此时温度的变化可由温度计或 FBG 温度传感器测到。

图 2(a) 和 (b) 分别表示聚合物和金属封装 FBG 应变传感器的应变特性,可看到它们都具有良好的线性度。根据实验结果拟合得到的应变敏感系数  $r$  分别为:为 1.076pm/ $\mu$  (铜)、1.069pm/ $\mu$  (钢)和 0.57pm/ $\mu$  (聚合物)。裸光栅应变敏感系数  $r$  的理论值<sup>[4]</sup>和我们的测定值均为 1.2pm/ $\mu$ ,所

### 4 疲劳可靠性

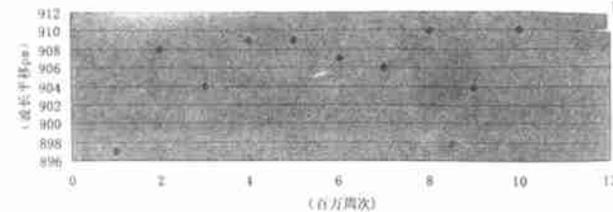


图 4 铜封装的传感器的疲劳试验(光栅波长为 1549nm)

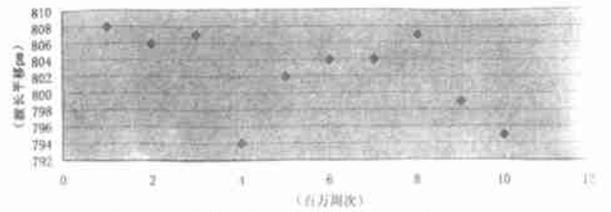


图 5 钢封装的传感器的疲劳实验

大型结构物造价昂贵,设计使用寿命长,一般海洋平台的使用年限都在 30 年左右,而普通钢结构建筑物的使用寿命还要更长。随着人们的安全意识越来越强,对结构健康进行长期监测就显得愈有必要。监测传感器的安装往往是与结构物的建造同时进行的,并且在结构服役过程中,结构许多部位传感器的更换非常困难,如海洋平台导管架水下部分应变监测。因此,对于结构健康监测用 FBG 应变传感器还要要求能长期可靠地工作。光纤中刻制的光栅能维持 20 年以上

不消褪,理论上 FBG 是结构长期监测的理想传感元件。但对于交变载荷环境下的结构,FBG 应变传感器中光栅与封装材料的界面以及封装材料与结构界面上的粘合剂或焊料会产生疲劳损伤,轻者会妨碍应变的传递,使得  $r$  和  $r_T$  降低,初始标定值和  $r_T$  变化,应变测量失真;重者则将使界面完全脱粘,传感器失效。因此,必须研究 FBG 应变传感器的疲劳可靠性。

为了考察我们研制的 FBG 应变传感器和安装工艺的抗

疲劳特性,采用了一种加速疲劳的方法对焊接安装的金属封装传感器进行了实验研究。针对南海海洋平台的设计应力值和使用环境和以往应变片监测的结果<sup>[5]</sup>,交变载荷主要为波浪载荷,正常情况下结构的动应变为几十微应变,只有在夏季大风暴的情况下,动应变才达到200-300微应变。因此设定疲劳实验的平均(静)应变为500 $\mu$ ,采用等幅值为200 $\mu$ ,实验在高速疲劳实验机上进行,实验频率为170赫兹,共进行1000万周。考虑到平台固有频率的基频只有1赫兹左右,可认为这种加速疲劳实验可考察FBG应变传感器应用于海洋平台长期监测的稳定性和可靠性。实验中每100万次停机,卸载至25kN,记录下FBG波长平移,同时记录环境温度,进行温度补偿。如果定载下波长有显著的漂移,则表示有疲劳损伤累积,由此可考查传感器的疲劳可靠性。整个疲劳实验持续了数天,记录时环境温度的差异有3 $^{\circ}$ C,大约带来70-80pm的波长变化,消除温度的影响后,可得到定载下波长的漂移情况如图4和图5所示。可以看到:直到1000万次的应力循环,波长平移比较稳定,变化量漂移量都在15pm内(约为15个微应变左右),略高于解调设备的精度范围(10pm),说明粘合和焊接界面都没有出现明显的疲劳损伤。

已研究了合适的水密封技术,可将这种传感器应用于海洋平台水下监测。

## 5 结论

结构健康监测用FBG应变传感器应具有高的灵敏度、良

好的线性度及其性能长期稳定性。

金属封装FBG应变传感器较聚合物封装具有高的应变和温度灵敏度。

在钢结构上采用焊接工艺安装金属封装FBG应变传感器可获得较高的疲劳可靠性。本文提出的FBG应变传感器制备方法工艺简单、成品性能离散小,工程安装方便可靠,能长期稳定的工作。它克服了普通应变计使用寿命短的缺点,非常适合海洋平台、桥梁等大型结构的长期健康监测。

## 参考文献

- [1] 涂亚庆,刘兴长. 光纤智能结构. 重庆:重庆出版社,2000年11月,188-190
- [2] 关柏鸥. 光纤光栅及其传感应用研究(博士论文),南开大学1999年,董孝义教授指导,1-3
- [3] 万里冰,张博明,王殿富,武湛君,赵雪峰. 结构健康监测用光纤布拉格光栅应变传感器研究,激光杂志,2002,10(4):47-48
- [4] Othono, A. Fiber Bragg gratings. Rev. Sci. Instrum., 1997, 68(12): 4309-4321
- [5] 申仲翰,赵强. 涸11-4平台应变和加速度监测数据处理与结构分析. 中国科学院力学研究所研究报告,IMCAS STR-96030, 1996

激光医学与医学(论文与临床报告)

# 临床专业课英语教学的体会

谭旭民 杨 桦 邓安春

(第三军医大学新桥医院耳鼻咽喉科教研室,重庆 400037)

医学本科公共英语教学已取得有目共睹的成就,大学本科生英语综合能力水平得到大幅度地提高。临床专业英语教学也势在必行。这是医学教育发展的必然需要,也是医学教育面向世界的需要。我们耳鼻咽喉科研究近两年在临床英语科学的摸索中,有以下几点体会。

首先加强临床教师的英语素质和专业英语水平。临床专业学科的教师不同于英语专业的教师。一般说来,其英语口语表达能力、读音准确度,距要求尚有一定的差距。因此,要搞好英语授课,绝非易事。对多数教员来说,尚有很长一段路要走,首先要扎扎实实地加强英语基本功的训练和学习。

临床专业英语教学,首先要明确不是教英语,而是介绍必要的专业英语,用必要的英语讲课。在现阶段应提倡以双语教学为主。首先从本专业的术语、词汇开始。要求教员对本专业教材中出现的解剖生理名词,专业检查、病征表现、诊断术语及疾病名称,准确地向学生讲授。并在讲课过程中重复使用,能用英语讲的词,不用汉语讲,以加强学生的记忆和掌握。

讲解剖生理课时,应尽量选用国外原版的英文图片、图像,直观接触英文文字。这是一种更为省力、高效的学习途径。

可以从国外合适的原版教科书中选择相关的章节为蓝本,教师反复读熟、读准后,在课堂讲授。对其中生僻的单词,可配以板书写明。也可选择精彩、精练的片段,作为一堂课的摘要或总结发言,

常能起到非常好的效果。

坚持课前试讲。教员相互评议,相互取长补短,相互提高,是一种备课的好方法。请有关的专家听取正式授课前的试讲,授课后收集反馈信息,组织教学示范,均有助于提高整体英语授课水平。

应有相应配套的教科书。目前第五版耳鼻咽喉科规划教材及供七年制学用的规划教材,给出的专业英语单词较前有了很大的增加。但仍显不够及缺欠。一是很多专业术语仍未给出相应的英词。二是缺乏相应的音标。这对教学双方都带来不便,应在再版中予以补充。

在实习及查房实践中,提倡用英语交流。特别对学过的专业术语、单词应反复应用。形成一个良好的英语学习和实践的氛围,教学相长,共同提高。

更新观念,改进教学,提倡以学生为中心的教学模式。所谓以学生为中心,是指课堂教学主要通过学生的个人或集体的语言实践完成教学内容。病例讨论课是这种教学模式的最佳场合。教师要及时地鼓励和引导学生用英语发言,调动学生的学习积极性,提高其应用专业英语的实际能力。

围绕以上的途径,经过两年的摸索实践,我们的经验初步得到了学生和教学主管部门的认可。学生完成专业课学习后,能掌握大部分专业词汇和用语。对毕业后迅速进入专业领域的研究和工,有很大的帮助。