

文章编号: 0258-7025(2010)05-1290-04

传感光纤光栅标准化埋入式封装的理论及实验研究

吴永红¹ 邵长江¹ 屈文俊¹ 周 巍¹ 蔡海文²

(¹ 同济大学土木工程学院, 上海 200092; ² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 针对应用最为广泛、可靠的光纤光栅(FBG)埋入式封装,进行了光纤光栅标准化封装设计的理论和实验研究。通过对光纤应变传递分析模型的边界条件和变形协调条件,以及现有主要应变传递特征方程的分析,构造静定应变传递特征方程,得到光纤光栅封装结构统一的应变传递关系,从而建立光纤光栅标准化埋入式封装设计统一的基本理论模型。对封装元件的实验测试结果表明,基于经典剪滞理论及 Ansari 应变传递分析模型得到的理论模型,对由较低模量的粘接材料构成的封装元件的设计和 zwar 分析较为可靠。

关键词 光纤光学;封装设计理论;固体力学;光纤光栅应变传感

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1290

Basic Theoretical Model and Its Experimental Investigation for Standard Embedded Sensing Fiber Bragg Grating Packaging

Wu Yonghong¹ Shao Changjiang¹ Qu Wenjun¹ Zhou Wei¹ Cai Haiwen²

¹ College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Aiming at the most common and reliable way of packaging-embedded packaging, theoretical and experimental studies on standard packaging design are conducted. Through the analysis of boundary conditions and deformation compatibility conditions of established optical fiber strain transferring analytical model as well as existing main strain transferring characteristic equations, a determined strain transferring characteristic equation is developed, and thus an universal strain transferring relationship is established, which may serve as a basic theoretical model for standard embedded fiber Bragg grating (FBG) packaged structure design. The tested results of packaged models show that strain transferring relationship established according to classic shear lag theory and Ansari's fiber optical strain transferring analytical model are more reliable for packaged structures containing relative low modulus adhesive materials.

Key words fiber optics; packaging design theory; solid mechanics; fiber Bragg grating strain sensing

1 引 言

为保护细弱、易折的传感光纤,并有效地感受外界应变,一般需要对光纤光栅(FBG)进行封装,构成封装元件。将光纤光栅封装元件与其他外部构件连接,可构成光纤光栅应变传感器,以及其他各种力学类光纤光栅传感器,统称光纤光栅应变类传感器。可见,光纤光栅封装元件是此类传感器的核心部件。相应地,光纤光栅的封装为传感器加工制作的核心

工艺。其中光纤光栅的埋入式封装,是应用最为广泛、也最为可靠的封装形式。

光纤光栅应变是近年来发展最为活跃的检测技术。虽然已在航天、交通、土木、能源、化工和医疗等领域得到广泛的应用研究^[1~4],但迄今为止,作为各类传感器的核心部件和核心工艺,仍缺乏统一的设计理论和制作标准。传感器的整体封装制作,主要还是经验性的。目前,仅仅是光纤光栅应变传感器,

收稿日期: 2009-09-07; 收到修改稿日期: 2009-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(50878152)和中国博士后基金(20080440651)资助课题。

作者简介: 吴永红(1966—),男,博士,副研究员,主要从事结构健康监测与工程抗震等方面的研究。

E-mail: wuyonghonghao@yahoo.com.cn

就存在结构形式多样、规格不一的局面^[5]。光纤封装设计理论和标准的缺乏,无疑是造成这一纷繁局面的主要原因之一。

有关光纤光栅封装设计基本理论的研究,可追溯到对光纤应变传递规律的研究。光纤应变传递规律,可视为传感光纤封装设计的基本理论模型。要实现传感光纤的标准化封装设计,首先要建立统一的标准化设计理论。而目前相关的理论模型有多种^[6]。对于光纤光栅应变传感,目前两个主要的应变传递关系由文献[7,8]提出,并在文献[9,10]中得到应用。这两个应变传递关系,实际上都是基于 Ansari 等^[11]在分析白光干涉光纤应变传感时所提出的应变传递分析模型而建立的。文献[7,8]之所以得到不同的应变传递关系,在于求解所建立的超定应变传递特征方程时,分别选取了不同的边界条件。本文通过对光纤应变传递分析模型边界条件和变形协调条件以及现有主要应变传递特征方程的分析,构造静定应变传递特征方程,得到光纤光栅封装结构统一的应变传递关系,旨在建立制定光纤光栅应变类传感器标准化设计指南所需的可靠、实用基本理论模型。

2 光纤光栅封装设计统一的基本理论模型

2.1 封装的基本结构及分析模型

通常所说的光纤光栅传感器的基本结构^[4],实质上是光纤光栅封装元件的基本结构,如图 1 所示。

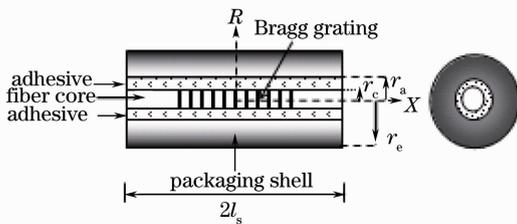


图 1 封装的基本结构

Fig. 1 Basic packaged structure of FBG

图 1 中 r_c , r_a 和 r_e 分别为光纤纤芯、粘接层和封装壳内、外半径, $2l_s$ 为封装长度。

2.2 分析模型的边界条件和变形协调条件

由文献[6]可知

$$\ddot{\epsilon}_c(x) - k^2 \epsilon_c(x) = k^2 \epsilon_m, \quad (1)$$

$$r_c \sigma_c(x) = -2\tau(x, r_c), \quad (2)$$

式中 $\sigma_c(x)$, $\epsilon_c(x)$ 分别为光纤纤芯的应力、应变, $\tau(x, r_c)$ 为纤芯表面的剪应变, ϵ_m 为封装基体的应变, k 为

$$k = \frac{1}{r_c} \sqrt{\frac{2G_a}{(\ln r_a - \ln r_c)E_c}}, \quad (3)$$

式中 E_c , G_a 分别为纤芯与粘接层的弹性模量与剪切模量。

根据虎克定律

$$\sigma_c(x) = E_c \epsilon_c(x), \quad (4)$$

根据(2)式与(4)式,有

$$\ddot{\epsilon}_c(x) = -\frac{2\dot{\tau}(x, r_c)}{r_c E_c}, \quad (5)$$

根据分析模型几何及荷载的对称性,存在

$$\tau(x, r_c) = \tau(-x, r_c), \quad x \neq 0 \quad (6)$$

故有

$$\dot{\tau}(0, r_c) = 0, \quad (7)$$

根据(5)式,进一步有

$$\ddot{\epsilon}_c(0) = 0, \quad (8)$$

由(1)式可知必有

$$\epsilon_c(0) = \epsilon_m, \quad (9)$$

综合起来,上述模型的边界条件和变形协调条件为

$$\dot{\epsilon}_c(0) = \epsilon_m, \quad \ddot{\epsilon}_c(0) = \epsilon_m \quad (10)$$

$$\epsilon_c(0) = \epsilon_m, \quad \epsilon_c(l_s) = 0 \quad (11)$$

2.3 应变传递特征方程

由文献[7,10]可知

$$\ddot{\tau}(x, r_c) - k^2 \tau(x, r_c) = 0, \quad (12)$$

根据(2)式与(4)式,有

$$\tau(x, r_c) = -\frac{r_c E_c \dot{\epsilon}_c(x)}{2}, \quad (13)$$

$$\epsilon_c(x) = -\int \frac{\tau(x, r_c)}{r_c E_c} dx + c, \quad (14)$$

式中 c 为常数,将(13)式代入(12)式后积分可得(1)式,将(14)式代入(1)式后求导可得(12)式。可见(1)式和(12)式是等效的,可互相转化。

根据(10), (11)和(1)式构造应变传递特征方程

$$\frac{d\epsilon_c^4(x)}{dx^4} - k^2 \frac{d\epsilon_c^2(x)}{dx^2} = 0. \quad (15)$$

2.4 统一的应变传递关系

(15)式的通解为

$$\epsilon_c(x) = A_1 + A_2 x + A_3 \sinh(kx) + A_4 \cosh(kx), \quad (16)$$

将(16)式分别代入(10)式和(11)式解得

$$A_1 = \epsilon_m, \quad (17)$$

$$A_2 = -\frac{k\epsilon_m}{kl_s - \sinh(kl_s)}, \quad (18)$$

$$A_3 = \frac{\epsilon_m}{kl_s - \sinh(kl_s)}, \quad (19)$$

$$A_4 = 0, \quad (20)$$

将 A_1, A_2, A_3 和 A_4 代入(16)式得

$$\epsilon_c(x) = \left[1 - \frac{kx}{kl_s - \sinh(kl_s)} + \frac{\sinh(kx)}{kl_s - \sinh(kl_s)} \right] \epsilon_m, \quad (21)$$

$$\bar{\epsilon}_c(x) = \left\{ 1 - \frac{kl_s}{2[kl_s - \sinh(kl_s)]} + \frac{\cosh(kl_s) - 1}{kl_s[kl_s - \sinh(kl_s)]} \right\} \epsilon_m, \quad (22)$$

将(22)式两边除以 ϵ_m 即得光纤光栅封装元件的平均应变传递率 $\bar{\eta}$

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{\epsilon}_c(x)}{\epsilon_m} = 1 - \frac{kl_s}{2[kl_s - \sinh(kl_s)]} + \frac{\cosh(kl_s) - 1}{kl_s[kl_s - \sinh(kl_s)]}. \quad (23)$$

2.5 封装设计与实验

为验证(23)式的可靠性,设计一组封装样本,并对样本进行实验测试。在此考虑制作和测试的方便,样本的设计主要改变粘接层剪切模量这一关键参数,其他封装参数基本一致,如表 1 所示。表中 λ_B 为光纤光栅中心反射波长。

表 1 封装参数

Table 1 Packaging parameters

Optical	Geometric		Mechanical	
λ_B/nm 1550	$r_c/\mu\text{m}$	62.5	E_c/GPa	200
	$r_e/\mu\text{m}$	2500	G_a/GPa	0.084~1.57
	$r_a/\mu\text{m}$	800	E_c/GPa	72

实验测试采用 Istron-5880 伺服加载系统,以及 Micron Optics 公司生产的型号为 Si425-500 光纤光栅波长解调仪,直接对封装样本进行加载测试。典型测试结果及相应的理论分析结果如图 2~图 4 所示。

由图 2~图 4 可见,在粘结层的剪切模量较低时,应变传递的计算值和测试值基本一致。而剪切

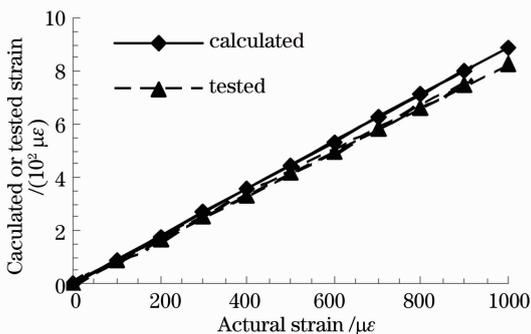


图 3 剪切模量为 $G_a=0.172$ GPa 时的理论值和实验值

Fig. 3 Theoretical and experimental values for shear modulus $G_a=0.172$ GPa

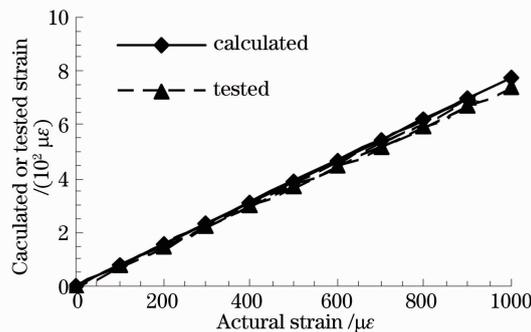


图 4 剪切模量为 $G_a=0.084$ GPa 时的理论值和实验值

Fig. 4 Theoretical and experimental values for shear modulus $G_a=0.084$ GPa

模量增大时,两者出现差异并呈现扩大趋势。表明基于经典剪滞理论及 Ansari 应变传递分析模型得到的基本理论模型,对由较低模量粘接材料构成的封装结构的应变传递分析较为可靠。对于高模量粘接材料的情况,封装元件的应变测试值和理论值相差最大达 10%。

2.6 封装设计的理论体系

传感光纤封装结构的优化设计,是通过设定或核算封装结构的应变传递、或光-力转换效率这一关键传感参数,优选封装材料的特性和规格。决定封装元件结构可靠性的物理性能,包括结构及其相互连接的力学强度和稳定性。故称应变传递关系为封装设计的基本理论模型。完整的理论体系,还包括结构分析的强度理论和稳定理论。封装结构的应变传递效率与其强度和规格之间,存在相互一致、又相互矛盾的约束关系,彼此之间需进行均衡优化,以达到封装结构的最佳设计。

3 结 论

光纤光栅传感器现有主要相异的应变传递关系,是由于在求解封装结构超定应变传递特征方程

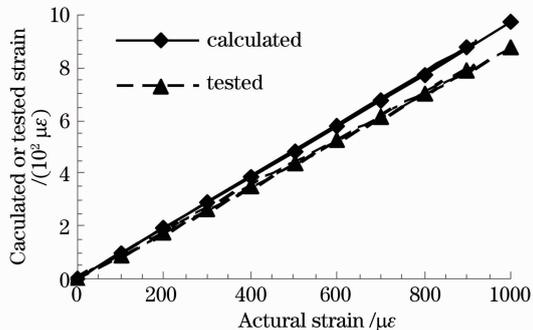


图 2 剪切模量为 $G_a=1.57$ GPa 时的理论值和实验值

Fig. 2 Theoretical and experimental values for shear modulus $G_a=1.57$ GPa

时,对应变传递分析模型边界条件的不同选取而产生的。通过对边界条件和变形协调条件,以及现有主要应变传递特征方程的分析,构造满足所有这些条件的应变传递特征方程,得到统一的光纤应变传递关系,建立光纤光栅的标准化封装设计统一的基本理论模型。对由不同模量的粘结材料构成的封装样本的实验测试表明,基于经典剪滞理论及 Ansari 应变传递分析模型得到的基本理论模型,对由较低模量的粘结材料构成的封装样本的设计和分析较为可靠。对于高模量粘接材料的情况,理论值和实测值相差较大。进一步的研究工作,将结合典型的传感器制作,提出封装结构的强度理论和稳定理论,以期建立光纤光栅标准化封装设计的理论体系。

参 考 文 献

- 1 Zhu Haohan, Qin Haikun, Zhang Min *et al.*. Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 893~897
朱浩瀚, 秦海琨, 张敏等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 893~897
- 2 Li Hongqiang, Yu Xiaogang, Miao Changyun *et al.*. Research of intelligent clothing for body temperature monitoring based on distributed optical fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 208~212
李鸿强, 于晓刚, 苗长云等. 光纤布拉格光栅人体测温的关键问题研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 208~212
- 3 Li Kuo, Zhou Zhen'an, Liu Ai'chun *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 249~251
李阔, 周振安, 刘爱春等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 249~251
- 4 Wu Yonghong, Qu Wenjun, Shao Changjiang *et al.*. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2067~2071
吴永红, 屈文俊, 邵长江等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2067~2071
- 5 Zhou Zhi, Ou Jinping. FBG sensors and their applications in structural health monitoring of large bridges. [EB/OL][2010-03-22] http://www.nbshangong.com/upload/papers/paper_g19.pdf
周智, 欧进萍. 光纤光栅传感器及其在桥梁结构健康监测中的应用. [EB/OL][2010-03-22] http://www.shangong.com/upload/papers/paper_g19.pdf
- 6 Lihui Liu, Yongtai He, Fang Li *et al.*. Analysis of the optimal package diameter of FBG pressure sensor [C]. *SPIE*, 2009, **7133**: D1~D7
- 7 Dongsheng Li, Hongnan Li. Strain transferring of embedded fiber Bragg grating sensors[C]. *SPIE*, 2005, **5765**: 1085~1094
- 8 Jilong Li, Zhi Zhou, Jinping Ou. Interface transferring mechanism and error modification of embedded FBG strain sensor [C]. *SPIE*, 2004, **5384**: 190~198
- 9 Chai Jing, Zhu Lei, Wei Shiming *et al.*. Settlement deformation detecting in deep unconsolidated soil layer by fiber Bragg grating sensing technology [J]. *J. China Coal Society*, 2009, **34**(6): 741~746
柴敬, 朱磊, 魏世明等. 松散地层深部沉降变形的光纤 Bragg 光栅监测[J]. *煤炭学报*, 2009, **34**(6): 741~746
- 10 Chai Jing, Qiu Biao, Wei Shiming *et al.*. Strain transfer of embedded fiber Bragg grating sensors for rock deformation and its application [J]. *Chinese J. Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(12): 2551~2556
柴敬, 邱标, 魏世明等. 岩层变形检测的植入式光纤 Bragg 光栅应变传递分析与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(12): 2551~2556
- 11 F. Ansari, Libao Yuan. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *J. Eng. Mech*, 1998, **124**(4): 385~394