

双涂层光纤应变传感器的理论与实验研究*

杨 军 刘志海 裴雅鹏 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要 对带有聚合物涂敷层和缓冲层的光纤应变传感器的力学特性进行了研究, 建立了双涂层光纤与基体材料相互作用的线弹性理论模型. 理论研究表明: 在小半径近似条件下, 双涂层光纤的力学传递特性决定于涂覆层和缓冲层的弹性模量的相对值; 当缓冲层的弹性模量远大于涂覆层时, 其作用可忽略. 实验中, 将光纤传感器埋入基体材料内部, 利用白光干涉应变测量方法, 对平均应变传递系数进行了实验研究. 实验结果与理论仿真具有较好的一致性.

关键词 光纤传感器; 双涂覆层; 应变; 灵敏度系数

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

光纤传感器已被广泛用于桥梁、道路、水电站大坝、大型结构与关键部位的应变和变形测量, 用于监测和评估承载能力、剩余使用寿命、健全度等课题的研究^[1~4]. 埋入式的光纤传感器引起了许多研究者的关注, Ansari^[5]和 Yuan^[6]首先研究了带有单聚合物涂覆层(coating)的光纤传感器在混凝土中的力学行为; Yuan^[7]又将此模型推广到线性应变分布的基体材料; Li 和 Yuan 还分别研究了光纤传感器的温度表观应变效应^[8,9], 并对其热膨胀系数进行了测量; Li 等人将线弹性模型加以推广, 考虑低模量涂覆层的塑性行为, 建立了混凝土内部光纤传感器的弹塑性力学模型^[10,11].

文献[5~11]中的模型很好地描述了埋入混凝土或者环氧树脂材料中光纤传感器的力学行为, 但是对于土基体材料, 例如: 土壤材料、边坡和滑坡体, 由于光纤与基体材料弹性模量差异过大, 如果将光纤直接埋入, 势必由于界面滑脱, 而导致灵敏度过低; 另外, 土体变形量一般也较大, 使传感器的测量范围受到限制. 本文对一种双涂层的光纤土力学传感器的力学特性进行研究, 建立了线弹性理论模型; 并利用白光干涉测量原理^[13], 对光纤传感器的应变灵敏度系数进行了实验研究.

1 理论模型

埋入基体材料中的光纤传感器如图 1, 若以光纤中光的传播方向(光纤轴线)作为 z 轴建立柱坐标

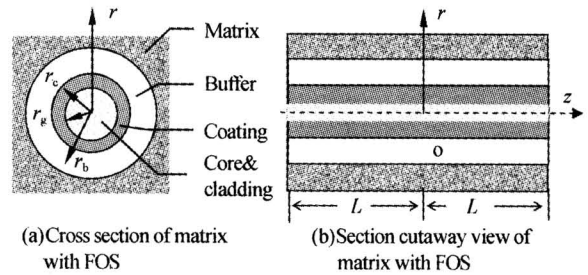


图 1 双涂层光纤传感器与基体材料相互作用的空间坐标系
Fig. 1 Spatial coordinate of interaction between fiber optic sensor with double-coating and the matrix material

系, r_g 、 r_c 、 r_b 分别表示光纤、涂覆层、缓冲层的半径, $2L$ 表示埋入基体内部传感器的长度, (r, x) 表示空间任意点坐标. 根据上述坐标系, 建立的力学模型如图 2. 考虑力学平衡方程, 对涂覆层和缓冲层中任

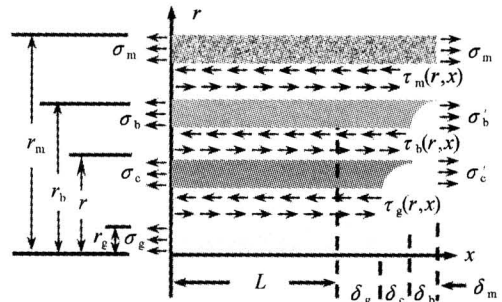


图 2 双涂层光纤力学模型结构
Fig. 2 Structure demonstration of mechanical model of fiber optic with double-cladding

意半径 r 和任意位置 x , 可以写出方程式

$$\pi(r^2 - r_g^2)(\sigma_c - \sigma'_c) + 2\pi r_g \int_0^L \tau_g(x, r_g) dx - 2\pi r \int_0^L \tau(x, r) dx = 0, r_g \leq r \leq r_c \quad (1a)$$

$$\pi(r^2 - r_c^2)(\sigma_b - \sigma'_b) + 2\pi r_c \int_0^L \tau_c(x, r_c) dx - 2\pi r \int_0^L \tau(x, r) dx = 0, r_c \leq r \leq r_b \quad (1b)$$

式中 σ_b 和 σ'_b 分别为 $x=0$ 处和任意坐标 x 处缓冲层横断面的均匀主应力; $\tau(x, r)$ 为涂覆层或者缓冲

*香港理工大学基金(G. 34. 37. YD33)和国家自然科学基金(50179007)及教育部“高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划”资助

Tel: 0451-82519850 Email: yangjun141@263.net

收稿日期: 2005-03-28

层产生的在任意坐标 (x, r) 处横断面的剪切应力; r_c 为缓冲层半径.

从图 2 中可知, 任意坐标 x 位置的基体伸长量可以表示成为

$$\delta_m(x) = \delta_g(x) + \delta_c(x) + \delta_b(x) \quad (2)$$

式中 $\delta_m(x)$ 为基体材料的变形量; $\delta_g(x)$ 为光纤的变形量; $\delta_c(x)$ 为涂覆层与缓冲层界面处, 涂覆层的变形量; $\delta_b(x)$ 为缓冲层与基体材料界面处缓冲层的位移伸长量.

由于光纤传感器满足 $L \gg r$, 考虑小变形和位移连续性条件, 结合式(1)和式(2), 可以得到界面剪切应力 $\tau(x, r_g)$ 满足二阶齐次微分方程^[5]

$$\tau_g''(x, r_g) - K_{II}^2 \tau_g(x, r_g) = 0 \quad (3)$$

式中

$$K_{II} = \sqrt{\frac{2}{r_g^2 E_g \left[\frac{\ln(r_c/r_g)}{G_c} + \frac{\ln(r_b/r_c)}{G_b} \right]}} \quad (4)$$

K_{II} 中符号的意义及数值由表 1 给出.

表 1

材料参量	符号	数值	单位
光纤杨氏模量	E_g	7.2×10^{10}	Pa
光纤泊松比	ν_g	0.16	—
涂覆层杨氏模量	E_c	2.55×10^6	Pa
涂覆层泊松比	ν_c	0.499	—
缓冲层杨氏模量	E_b	1.2×10^9	Pa
光纤半径	r_g	62.5	μm
涂覆层外径	r_c	122.5	μm
缓冲层外径	r_b	450	μm

光纤的应变传递系数(即应变灵敏度系数)可以表示为

$$\alpha(k, L) = \frac{\bar{\epsilon}_g}{\epsilon_m} = \left[1 - \frac{\cosh(K_{II}L) - 1}{\sinh(K_{II}L)} \right] \quad (5)$$

式中: ϵ_m 为基体的平均应变, $\bar{\epsilon}_g$ 表示光纤的轴向平均应变.

2 实验研究

利用白光干涉的光学测量原理^[12], 对双涂层光纤传感器的应变传递系数进行测量. 光纤感测应变值的大小是通过光程改变来表达的. 光程改变量 ΔS 与应变 ϵ 的转换关系为^[13]

$$\epsilon = \frac{\Delta S}{2n_{\text{eff}}l} \quad (6)$$

式中: ϵ 为基体的平均应变; ΔS 表示光程的改变量; l 为传感器标距; n_{eff} 表示等效折射率, $n_{\text{eff}} = 1.159$.

实验中将光纤传感器粘贴于 PVC 材料的表面, 进行拉伸实验, 测量得到应变传递(灵敏度)系数.

实验装置如图 3, 由光纤应变测试系统、微机、数字示波器、单轴拉伸实验机、电阻应变测试仪等几部分组成. 光源采用中心波长 $1.31 \mu\text{m}$, 谱宽 40 nm (相干长度 $42 \mu\text{m}$)、出纤功率 $100 \mu\text{W}$ 的 LED 光源, 探测器采用 InGaAs 材料的 PIN 光电二极管; 光纤应变仪将传感器光程改变量转换为应变值, 并将测试结果上传至微机存储; 数字示波器用来观察白光干涉的波形; 单轴材料实验机负责对 PVC 试样加载; 电阻应变片和测量仪用于光纤应变测量结果的对比和标定.

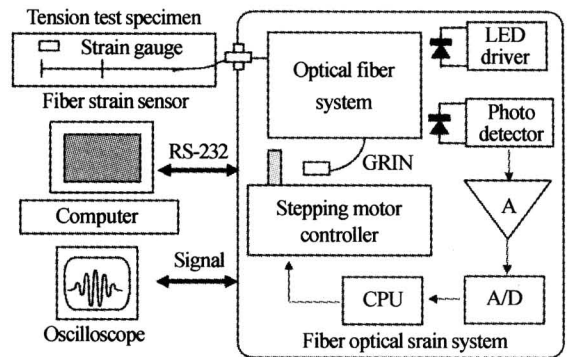


图 3 光纤应变测量实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of fiber optic strain

3 实验结果

实验中, 将传感器用环氧树脂粘贴于长、宽、厚分别为 $254 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 PVC 材料一侧的中央位置, 另一侧的中心粘贴电阻应变片 (Strain gauge). 使用 MTS Alliance -RT/50 单轴材料实验机对 PVC 材料进行拉伸实验, 加载速率 0.24 mm/min . 分别选取 6 段不同长度的光纤传感器, 即标度为 30 mm 、 60 mm 、 90 mm 、 120 mm 、 150 mm 、 180 mm 进行实验, 其结果如图 4, 图 5.

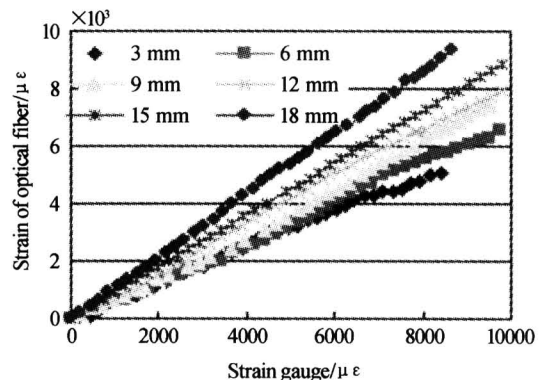


图 4 不同长度光纤传感器的标定结果

Fig. 4 Scaling results of sensors with different length

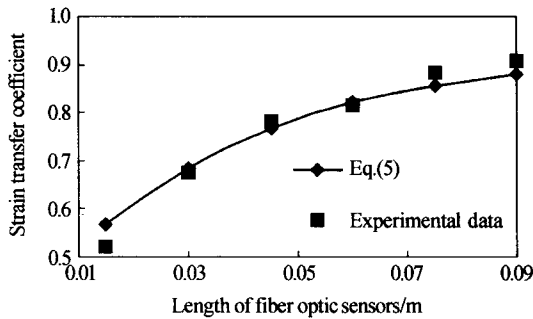


图5 光纤应变传递系数理论与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between the theoretical and experimental results of strain transfer coefficient

4 结论

双涂层模型与单涂层线弹性力学模型^[5~11]相比,主要区别在于力学方程中常量 K_{II} 的形式不同。双涂层模型描述的力学传递特性,本质上由涂覆层与缓冲层弹性模量的相对值决定。在小半径近似条件下,当缓冲层的弹性模量远大于涂覆层时,常量 K_{II} 的形式与单涂层模型中趋于一致,其缓冲层的作用可忽略,表明与缓冲层的外径尺寸和杨氏模量具体数值大小无关;但是,当涂覆层和缓冲层的弹性模量相比拟时,缓冲层的作用不可忽略,其外径大小对力学性能产生影响。

参考文献

- Measures R M. Fiber optic strain sensing, in: E. Udd (Ed.), *Fiber Optic Smart Structures*, New York: Wiley, 1995, 205~209
- 江建,饶云江,牛永昌,等. 应用 LPFG/EFPI 集成式光纤传感器实现温度及应变的同时测量. *光子学报*, 2003, **32**(9):1063~1066
Jiang J, Rao Y J, Niu Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1063~1066
- 董兴法,付圣贵,姜莉,等. 用于结构损伤诊断的实用型光纤光栅传感器研究. *光子学报*, 2004, **33**(1):28~30
Dong X F, Fu S G, Jiang L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):28~30
- Yuan L B, Ansari F. Embedded white light interferometer fiber optic strain sensor for monitoring crack-tip opening in concrete beams. *J Meas Sci Technol*, 1998, **9**(2):261~266
- Ansari F, Yuan L B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors. *J Eng Mech*, 1998, **124**(4):385~394
- Zhou L M, Yuan L B. Sensitivity coefficient evaluation of an embedded fiber-optic strain sensor. *Sensors Actuators*, 1998, **A69**(1):5~11
- Yuan L B, Zhou L M, Wu J. Investigation of a coated optical fiber strain sensor embedded in a linear strain matrix material. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**(4):251~260
- Li Q B, Yuan L B, Ansari F. Model for measurement of thermal expansion coefficient of concrete by fiber optic sensor. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, **39**(11):2927~2937
- Yuan L B, Zhou L M, Jin W, et al. Effect of thermally induced strain on optical fiber sensors embedded in cement-based composites. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**(2):95~106
- Li Q B, Li G, Wang G L, et al. Elasto-elastic bonding of embedded optical fiber sensors in concrete. *J Eng Mech*, 2002, **128**(4):471~478
- Li Q B, Li G, Wang G L. Effect of the plastic coating on strain measurement of concrete by fiber optic sensor. *Measurement*, 2003, **34**(3):215~227
- 苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响. *光学学报*, 1997, **17**(12):1713~1717
Yuan L B. *Acta Opt Sinica*, 1997, **17**(12):1713~1717
- 杨军,刘志海,梁艺军,等. 混凝土内部应变光纤测量结果及分析. *实验力学*, 2000, **15**(4):421~428
Yang J, Liu Z H, Liang Y J, et al. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, **15**(4):421~428

Theoretical and Experimental Study on Optical Fiber Strain Sensors with Double Coating

Yang Jun, Liu Zhihai, Pei Yapeng, Yuan Libo

Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001

Received date: 2005-03-28

Abstract The mechanical transfer characteristics of single mode quartz fiber optic sensor with double coating is studied. The theoretical model of linear elasticity between quartz fiber optic with double polymer cladding coating and buffer are presented. The theoretical results demonstrates that the mechanical transfer characteristics of double coating depend on the relative magnitude of elastic modulus between cladding and buffer under the small radius approximation compared with the model of single coating. When the elastic modulus of buffer is much bigger than that of cladding, its action can be neglected. In the experiment, the experimental study on the average transfer coefficient of different scale fiber optic sensors embedded in the matrix material has been carried out based on white light interference method and the result of experiment accords well with that of theory.

Keywords Optical fiber sensors(OFS); Double coating, ; Strain; Sensitivity coefficient



Yang Jun was born in 1976 in Heilongjiang Province, China. He received his B. S. degree in 1999 and M. S. degree in 2003 from Harbin Engineering University(HEU). He works in the Department of Physics, School of Sciences, HEU from 2000. Now his interests are optical fiber sensors and it's application, and published more than 30 research papers.