

智能全分布式光纤应变传感精度的研究

吴永红, 邵长江, 周巍, 屈文俊

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 从力学的角度对分布式光纤应变传感的精度进行了系统的理论分析和实验研究, 基于考虑光纤-基材之间的力学耦合作用, 系统建立了两耦合效应即应变传递的分析方法和分析模型, 得到了应变传递关系的理论解答以及应变检测精度的范围. 应变检测精度的实验结果略低于理论分析结果, 表明所建立的理论分析方法具有一定的可靠性, 从而为分布式光纤应变传感的优化设计及性能分析提供了理论参考.

关键词: 应变传感; 分布式光纤; 固体力学; 力学耦合; 检测精度; 应变传递

中图分类号: TB 125

文献标识码: A

Study on Distributed Fiber Optical Strain Sensing Precision

WU Yonghong, SHAO Changjiang, ZHOU Wei, QU Wenjun

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A systematic theoretical analysis and experimental study are made of the distributed fiber optical strain sensing precision from the perspective of mechanics for the first time. Based on a consideration of the mechanical coupling action between optical fiber and matrix, the analytical approach and model for the coupling effect, namely, strain transfer relationship, are established systematically, the theoretical formulation and strain measurement precision range are obtained. The strain test precision results are slightly lower than those of the theoretical analysis, which validates certain reliability of the theoretical analytical method.

Key words: strain sensing; distributed optical fibre; solid mechanics; mechanical coupling; measurement precision; strain transfer

为提高工程结构的使用性能和寿命, 增强结构应对异常灾害和自然衰变的能力, 人们构想并付诸探索所谓智能结构. 这种结构具有对自身状况自感知、自诊断及自恢复或自适应的能力^[1]. 光纤传感器纤细、柔韧、质轻, 集信号感应和传输为一体, 可构成智能结构的神经系统, 加之具有抗腐蚀、电绝缘、抗电磁干扰等众多优点, 因而成为智能结构首选传感技术. 其中, 在此方面最具发展前景的是基于 Brillouin 散射原理的全分布式光纤应变传感技术^[2-3]. 将传感光纤埋入结构体内, 可以感知结构任何部位的运行状况, 捕捉任何部位的损伤信息. 这一技术随其自身检测精度和空间分辨率的不断提高(已达厘米级), 已日益显示出作为真正意义上的分布式光纤传感技术的优势以及工程实用化潜力. 该技术取得的最新进展已应用于航空和土木工程中的损伤探测研究^[4].

在实际应用中, 大部分工程结构的实际情况限制将裸光纤直接埋入其中(否则极易折断), 即需埋设带涂敷或保护层的光纤. 这样, 埋入光纤后就形成了光纤-基材复合体. 从力学的角度考虑, 这一复合体内包含“两刚(基材、裸纤)一柔(涂敷层)”3种材料. 刚性材料石英和基材的弹模一般高达 $7 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ MPa, 而柔性材料-涂敷的弹性模量不足 1 000 MPa. 彼此在刚度上存在量级上的差异^[5-6]. 柔性涂敷夹层会弱化其两边应变的传递, 导致光纤仅部分承受基材的应变值. 亦即涂层会钝化光纤对环境应变感知的灵敏性, 增加检测误差, 使得人们对光纤应变检测的精度及可靠性把握不定.

显见, 基材-光纤之间应变传递的效率是影响光纤应变检测精度的主要因素. 迄今, 对光纤-基材之间应变传递关系的定量研究主要着眼于光纤的点式应变检测^[7-8], 及准分布式检测. 点式与分布式检测

收稿日期: 2009-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878152); 中国博士后基金资助项目(20080440651)

作者简介: 吴永红(1966—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为结构健康监测与工程抗震. E-mail: wuyonghonghao@yahoo.com.cn

应变传递关系分析的主要区别在于,前者分析模型的空间维度有限,且不考虑边界条件的影响.但分布式光纤应变检测精度的分析最终要回落到沿光纤各点的应变检测分析上,并引用点式应变传递分析的基本方法.

从上述认识出发,笔者首次从力学的角度对分布式光纤应变传感的精度进行系统的理论分析和实验研究,基于考虑光纤-基材之间的力学耦合作用,系统建立两者耦合效应即应变传递的分析方法和分析模型,得到应变传递关系的理论解答以及应变检测精度的范围,以期为分布式光纤应变传感这一前沿技术的研究及工程应用提供优化设计和精度分析的理论依据.

1 光纤-基材应变传递的分析方法及耦合方程

1.1 分析方法与分析模型

图1a为光纤的分布式传感示意图,从结构内部图中虚线所示位置截取一小圆柱体(图1b),圆柱体以光纤为中心轴.图1b中, r_f 为光纤纤芯半径, r_c 为涂敷层半径, r_m 为所截取的光纤埋设基材半径, x 为光纤轴向, R 为光纤径向, l_r 为光探测系统的空间分辨率,由此建立了分布式光纤应变传感基材-光纤应变传递的离散化局部分析模型.

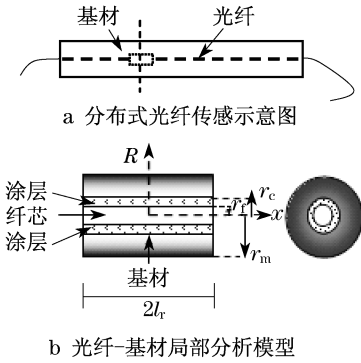


图1 分布式光纤传感及其应变传递分析模型

Fig.1 Distributed fiber optical strain sensing analytical model

1.2 应变传递模型

对以上结构的分析模型作假定:所有材料均为线弹性,且各向同性;传感器各层即光纤纤芯-涂敷层-基材之间结合紧密,变形协调;不考虑基材横向荷载的作用,并忽略温度效应.

基于上述假定,对于刚性基材,其内部应变传递

模型和变形协调模型如图2所示.图2中 $\Delta U_f(x)$, $\Delta U_m(x)$, $\Delta U_c(x)$ 分别为纤芯、基材的位移及两者的位移差,其中^[4]

$$\Delta U_c(x) = \frac{r_f}{G_c} \tau(x, r_f) \ln\left(\frac{r_c}{r_f}\right) \quad (1)$$

式中: G_c 为涂敷层的剪切模量; $\tau(x, r_f)$ 为涂敷层-纤芯接触面上的剪应力.

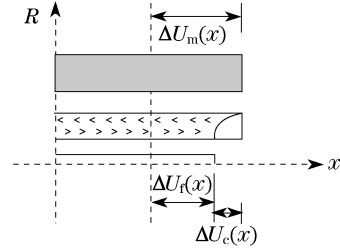


图2 基材-光纤变形协调示意图

Fig.2 Matrix-optical fiber deformation coordination

1.3 应变传递耦合方程

$$\Delta U_c(x) = \int_0^x \epsilon_f(\xi) d\xi = \int_0^x \frac{\sigma_f(\xi)}{E_f} d\xi \quad (2)$$

$$\Delta U_m(x) = \int_0^x \epsilon_m(\xi) d\xi = \int_0^x \frac{\sigma_m(\xi)}{E_m} d\xi \quad (3)$$

$$\Delta U_m(x) - \Delta U_f(x) = \Delta U_c(x) \quad (4)$$

式中: ξ 为纤芯任意位置变量; $\epsilon_f(\xi)$ 为纤芯的应变; $\epsilon_m(\xi)$ 为基材的应变; E_f 为纤芯的弹性模量; E_m 为基材的弹性模量.

由式(2)~(4)可得应变传递协调方程

$$\epsilon_m(x) - \epsilon_f(x) = \frac{r_c}{G_c} \frac{d\tau(x, r_f)}{dx} \ln\left(\frac{r_c}{r_f}\right) \quad (5)$$

在轴向 x 处,在纤芯和基材中各取一微元体(见图3),则有

$$t_m \frac{d\sigma_m(x)}{dx} = \tau(x, r_c) \quad (6)$$

$$r_f \frac{d\sigma_f(x)}{dx} = -2\tau(x, r_f) \quad (7)$$

式中: $\tau(x, r_c)$ 为涂敷层-基材接触面上的剪应力; $\sigma_f(x)$ 为纤芯 x 处轴向应力; $\sigma_m(x)$ 为基材 x 处轴向应力; $t_m = (r_m^2 - r_c^2)/2r_c$.

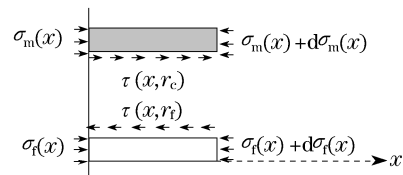


图3 基材和纤芯微元体示意图

Fig.3 Matrix and fiber core infinitesimal element

根据涂层的受力平衡条件,可得^[7]

$$\frac{(r_c^2 - r_f^2)[\sigma_c(0) - \sigma_c(l_r)]}{l_r} + 2r_f \tau(x, r_f) - 2r_c \tau(x, r_c) = 0 \quad (8)$$

式中: $\sigma_c(0)$ 、 $\sigma_c(l_r)$ 分别表示模型中心处和端部涂敷截面上的正应力,假定 $l_r \gg r^2$,则有^[7]

$$r_f \tau(x, r_f) = r_c \tau(x, r_c) \quad (9)$$

由胡克定律

$$\sigma_f(x) = E_f \epsilon_f(x) \quad (10)$$

$$\sigma_m(x) = E_m \epsilon_m(x) \quad (11)$$

对式(4)求导,并将式(5)~(11)代入其中,得到应变传递耦合控制方程

$$\frac{d^3 \epsilon_f(x)}{dx^3} - k^2 \frac{d \epsilon_f(x)}{dx} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d^3 \epsilon_m(x)}{dx^3} - k^2 \frac{d \epsilon_m(x)}{dx} = 0 \quad (13)$$

式中: k 为耦合系数.

$$k^2 = \frac{2G_c}{(\ln r_c - \ln r_f)} \left(\frac{1}{r_f^2 E_f} + \frac{1}{2r_c t_m E_m} \right) \quad (14)$$

应变传递控制耦合方程为一对方程组.

式(12)及式(13)的通解为

$$\epsilon_f(x) = A_1 + A_2 \sinh(kx) + A_3 \cosh(kx) \quad (15)$$

$$\epsilon_m(x) = B_1 + B_2 \sinh(kx) + B_3 \cosh(kx) \quad (16)$$

式中: $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ 为待定系数,由应变传递模型的边界条件和变形协调条件确定.

由式(5)~(11),进一步有

$$\epsilon_m(x) = B_1 + \alpha[A_2 \sinh(kx) + A_3 \cosh(kx)] \quad (17)$$

$$\alpha = - \frac{r_f^2 E_f}{2r_c t_m E_m} \quad (18)$$

式中: ϵ_m 为传感器所在观测点的环境应变; η 为观测区间端部应变传递系数.

2.2 应变传递关系及检测精度范围

由式(15)、式(17)以及式(19)、式(20)可得

$$A_1 = \eta \epsilon_m + \beta \cosh(kl_r)(1 - \eta) \epsilon_m \quad (21)$$

$$A_2 = 0, \quad A_3 = -\beta(1 - \eta) \epsilon_m \quad (22)$$

$$B_1 = \eta \epsilon_m + \beta[\alpha + \cosh(kl_r) - 1](1 - \eta) \epsilon_m \quad (23)$$

式中:

$$\beta = \frac{kl_r}{(\alpha - 1)kl_r + [kl_r \cosh(kl_r) - \alpha \sinh(kl_r)]}$$

将 A_1, A_2, A_3 代入式(13)得该区段光纤纤芯的应变分布

$$\epsilon_f(x) = \{\eta - \beta[\cosh(kx) - \cosh(kl_r)](1 - \eta)\} \epsilon_m \quad (24)$$

则纤芯各点的应变传递率 $\eta_r(x)$ 为

$$\eta_r(x) = \frac{\epsilon_f(x)}{\epsilon_m} = \eta - \beta[\cosh(kx) - \cosh(kl_r)](1 - \eta) \quad (25)$$

对于工程检测具有实际意义的是传感器所在区间的平均应变传递率 η_r

$$\eta_r = \frac{\int_0^{l_r} \epsilon_f(x) dx}{\epsilon_m l_r} = \eta - \frac{\beta[\sinh(kl_r) - kl_r \cosh(kl_r)]}{kl_r} (1 - \eta) \quad (26)$$

由式(26)可见,分布式光纤传感应变传递率的具体确定最终取决于各局部检测区间光纤边界应变传递系数 η . η 的取值范围为 $[0, 1]$.据此可估算应变传递率的数值范围.对于具有一定工程实用化价值的、规格为 $(10 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}/900 \mu\text{m})$ 的单模通讯光纤,将其埋入混凝土之中, l_r 取为光信号检测系统的应变空间分辨率 10 cm ,其他参数见表1.

表1 光纤-基材分析模型参数

Tab.1 Parameters for optical fiber matrix analytical model

几何参数/ μm		力学参数/GPa	
l_r	50 000	E_m	23
r_m	50 000	G_c	0.078
r_c	450	E_f	72
r_f	62.5		

则得此种情况下的光纤应变传递率在 $0.96 \sim 1.00$ 之间.在此分析的这种低模量、大直径的普通通讯光纤,应变传递率高达95%以上.可见,分布式光纤应变传感,在理论上具有很高的精度范围,因而无需分析各种特定的边界条件以及相应的精度值.具

2 应变传递关系及检测精度

2.1 应变传递模型的边界条件及变形协调条件

对于大型工程结构,可假定其空间内部应变沿传感器某局部观测区间的分布相同.因此,根据模型的对称性、应变传递协调方程的特征,考虑传感器与环境的协同作用,可建立下述边界条件及变形协调条件:

$$\epsilon_f(l_r) = \eta \epsilon_m, \quad \dot{\epsilon}_f(0) = 0 \quad (19)$$

$$\epsilon_f(0) = \epsilon_m(0) \frac{\int_0^{l_r} \epsilon_m(\xi) d\xi}{l_r} = \epsilon_m \quad (20)$$

体的实际测量精度由实验标定即可。

在材料上,传感光纤的本质是纤细、易折的玻璃体。目前,光纤传感的应用研究基本都是直接利用普通通讯光纤,这类光纤显然难以在大型土木、水利工程这类粗放恶劣的工程环境中生存。为此,需对现有光纤增厚加强,改善其涂敷状况,即需研制适应特定环境、满足特定要求的专用分布式光纤传感器。故有必要分析光纤涂敷层的力学和几何参数对其应变传递率的影响。

2.3 光纤涂敷层参数对应变检测精度的影响

利用式(24)及表1中的部分参数,可算得光纤应变传递率的下限值随其涂敷层主要参数的变化情况,见图4。

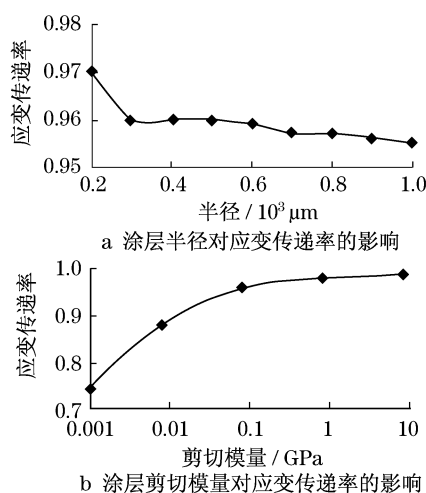


图4 涂层参数对光纤应变传递关系的影响

Fig.4 Effects of coating parameters on strain transfer

由图4可见,光纤的应变检测精度随涂敷层的增厚而减小,随涂敷剪切模量或弹性模量的增加而增加。但是,涂敷尺寸发生显著影响仅出现在半径较小的狭小范围内。这为研究设计具有较高稳定精度的工程实用化分布式光纤传感器奠定了理论支持。

3 实验研究

基于以上分析得到的结论,研制了一种具有较高工程存活率(现场试用达90%以上)的传感光纤。样本规格为 $10/125/1\ 200\ \mu\text{m}$,外层涂敷剪切模量约0.78 GPa。根据样本的力学和几何参数,计算出相应的理论应变传递率范围是0.98~1.00。

分别对二次涂敷型号为 $10\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}/900\ \mu\text{m}$ 光纤及研制的样本进行分布式应变传感实验。将光纤及样本埋入图5a所示的混凝土试件中。实验采用

全数字式MTS-816岩石和混凝土力学实验系统,对试件两端实施缓慢加载,并进行数据采集。光信号检测仪器采用高精度、高空间分辨率(10 cm)的DSTS (distributed strain and temperature system)系统。实验装置和实验结果见图5。对图示结果的简单分析可见:

(1) 各传感光纤所测得的应变值,均低于试件的实际应变分布,说明光纤涂层的确降低光纤和基材之间的应变传递。进一步的分析和测试同样显示光纤涂层对应变传递的影响与光纤在构件中布设的位置有关,远离构件端部,影响迅速减小。

(2) 仅二次涂敷光纤试件中心段(BC段)的应变检测精度在理论估算范围内,其他情况下的应变测试值均低于理论计算值,并且理论值越高,与实验结果的差别也越大,说明理论估算结果具有偏高倾向。

(3) 样本比二次涂敷光纤虽增厚近30%,但其剪切模量亦增加了约10%。样本参数改变的综合效应实际表现为应变检测精度提高了约1%,或检测误差平均降低了30%。

(4) 光纤应变检测精度理论值与实验值不相符合的原因主要在于理论模型、模型参数、光纤埋设状况与客观实际或预定目标间的差异。试件两端光纤检测应变之间的差异体现了光纤埋设状况对检测效果的影响以及光系统本身的误差。但是,总体来看,实验结果与理论下限相差不超过4%,属于可接受的范围,表明理论分析方法和结论具有一定的可靠性。

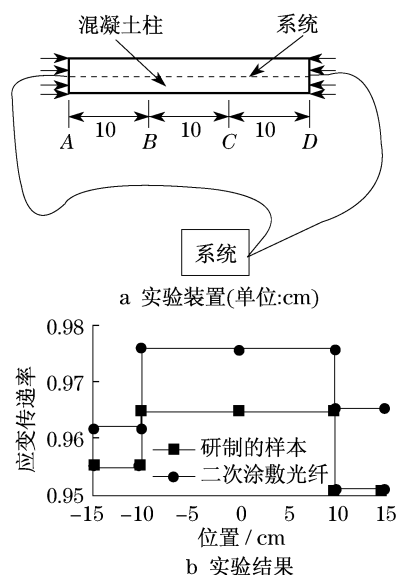


图5 实验与结果

Fig.5 Experiment and results

(下转第526页)