

不同表面粘贴方式对光纤光栅应变传递的影响

王 源,章征林,孙阳阳,张清华

(解放军理工大学 国防工程学院,江苏 南京 210007)

摘 要: 光纤布喇格光栅(FBG)具有体积小,精度高,耐腐蚀及不受电磁干扰等优点,在土木工程中运用广泛。但在实际监测中,需要通过胶接材料把光纤光栅与基体粘结,以达到测量的目的,不同的粘贴方式对应变的测量造成不同的影响。该文对比了光纤光栅不同表面粘贴方式的应变测量结果发现胶接层粘贴长度越长,应变测量结果与实际应变的误差就越小。

关键词: 光纤布喇格光栅(FBG);不同表面粘贴方式;应变测量;胶结层

中图分类号: TP212.6;TN253

文献标识码: A

The Influence of Different Surface Paste on FBG Strain Transfer

WANG Yuan,ZHANG Zhenglin,SUN Yangyang,ZHANG Qinghua

(College of Defense Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007,China)

Abstract: The fiber Bragg grating(FBG) has the advantages of small size, high accuracy, corrosion resistance, and the immunity to electromagnetic interference. It has been widely used in civil engineering. But in the actual monitoring, we should bond the FBG with the substrate via the bonding material to achieve the purpose of the measurement. The different ways of paste will have different impacts on measurement of strain. By comparing the results of different surface strain measurement mode for fiber grating paste, it has been found that the solidification shrinkage of bonding layer will result in bond strength. The greater the bond strength is, the smaller the error between the strain measurements and the actual strain.

Key words: fiber Bragg grating(FBG);different surface paste;strain measurement;cementation layer

0 引言

利用光纤布喇格光栅(FBG)^[1-2]传感器对结构性能进行监测和及时准确发现结构损伤,是土木工程结构健康监测领域发展的一个重要方向。对于已建成的结构,更多的是选用表面式传感器进行监测。表面式传感器是将光纤光栅粘贴在被测物表面,光栅与被测物体之间存在着粘结层。由于光纤、胶接材料及基体的材料属性差异,使得光纤光栅所测得的应变并非实际物体的应变。因此,从理论和实验上分析不同表面粘贴方式传感器测量应变和实际应变的关系对传感器的实际应用具有指导意义。

国内外学者对这个问题的研究多数是通过建立光纤光栅传递理论模型,建立应变传递关系,对比应变片和光纤光栅测量结果,分析应变传递过程中的剪切损失。Ansari等^[3]假定光纤粘贴长度中心的

应变与基体应变相同,从而得到应变传递系数 α 受纤芯的弹性模量、涂覆层材料的力学参数及测量标距的共同影响。周智等^[4]对埋入式和表面式多层粘结光纤光栅传感器模型进行了分析。孙丽^[5]研究了温度和角度对光纤光栅传感的影响,推导出应变传递公式且对应变传递系数进行了修正。吴永红等^[6]通过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,建立了光纤光栅标准化埋入式封装设计的基本理论模型。

电阻应变片测量本身就存在一定的误差,建立的理论模型均关于纤芯对称,这与实际不符,表面粘贴对称轴另一半并不存在基体影响^[7]。本文通过在等强度梁上粘贴光纤光栅传感器,对比了光纤光栅不同粘贴方式下的测量结果。通过实验方法,分析光纤光栅应变测量传递机理,得出满粘比点粘结果

收稿日期:2015-04-15

基金项目:国家“九七三”基金资助项目(2010CB732003,2013CB036005);教育部长江学者和创新团队发展计划基金资助项目(IRT13071)

作者简介:王源(1970-),男,湖北仙桃人,教授,研究生导师,博士,主要从事国防工程勘察与安全监测方面的研究。

更准确的结论。

1 等强度梁实验应变传递影响因素

1.1 等强度梁变形影响

由于光纤与胶接层有一定厚度,在等强度梁受弯变形下,其拉应变比等强度梁表面大。从等强度梁上截取相距为 dx 的两个截面(见图 1),变形后各自绕中心相对旋转 $d\theta$,此时距中性层为 y 的纤维 bb 的长度为

$$\widehat{bb} = (\rho + y)d\theta \quad (1)$$

式中 ρ 为等强度梁受弯变形的曲率半径。

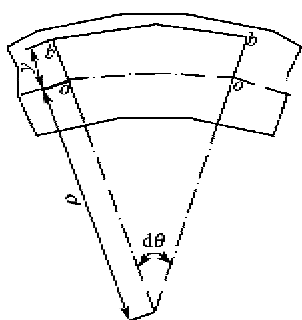


图 1 等强度梁截面受弯变形图

纤维 bb 的原长为 dx ,且变形前后中性层内纤维 oo 的长度不变,故有

$$\overline{bb} = \overline{oo} = \widehat{oo} = \rho d\theta \quad (2)$$

根据应变的定义,可得纤维 bb 的应变为

$$\varepsilon_{bb} = \frac{\widehat{bb} - \overline{bb}}{\overline{bb}} = \frac{y}{\rho} \quad (3)$$

根据等强度梁工作原理并结合力学分析:

$$\alpha_{\text{变形修正}} = \frac{\varepsilon_{\text{光栅}}}{\varepsilon_{\text{表面}}} = 1 + \frac{2h}{H} \quad (4)$$

式中: h 为光纤截面中心到基体的距离; $H = 3.5 \text{ mm}$ 为等强度梁厚度。

由于等强度梁变形影响,需要对应变灵敏度系数进行修正。

1.2 胶接层传递影响

光纤通过胶接层与基体粘结,胶凝结硬化时体积收缩,将光纤裹紧而产生摩擦力,这种摩擦力的大小取决于握裹力和光纤与胶表面的摩擦系数。对光纤产生的垂直于接触面的正应力越大,握裹力就越大。基体发生应变,通过胶的这种握裹力作用,带动光纤产生相应的应变,在此过程中,胶的作用力越大,两者的应变越接近,其测量结果越准确。

由于胶的弹性模量相对于光纤和基体(等强度梁)较小,在所有接触面均未出现滑移的情况下,当

施加荷载时,胶在传递应变的过程中会发生一定程度的剪切变形,如图 2 所示,假定光纤粘贴长度中心的应变与基体应变相同, L 为粘贴端部距粘贴中心距离,虚线为光纤在两端粘结的情况下,基体受拉变形后胶结层及光纤出现的变形。胶结层与基体的接触面产生的变形保持一致,但由于胶的剪切变形,使传递到光纤表面的变形 ΔL_g 明显小于基体变形 ΔL 。

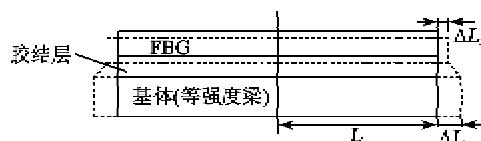


图 2 FBG 表面测量应变损失示意图

由分析可知,这种传递过程中的应变损失主要与胶结层的弹性模量、凝结固化产生的握裹力及胶结层的厚度有关。胶结层的弹性模量越大、握裹力越大、胶结层的厚度越小,应变传递中的剪切损失就越小。

2 实验原理及方案

2.1 实验原理

2.1.1 光纤传感应变测量原理

FBG 传感技术是利用光纤对环境变化的敏感性原理^[8-9],由激光器发出光信号,在传感区域经调制解调后进入耦合器,待测参数与进入调制区的光相互作用,产生模式耦合,当满足 Bragg 条件时,光栅起到了一个反射镜的作用,反射回一个窄带光波(其余的光波从光栅的另一端透射出去),通过检测满足 Bragg 条件的反射波中心波长发生的位移 $\Delta\lambda_B$ 来检测作用在光纤光栅上的温度、应变、应力等测点被测信号。

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\varepsilon \varepsilon + \alpha_T \Delta T \quad (5)$$

式中 $\alpha_\varepsilon = 0.78 \times 10^{-6}$ 为 FBG 应变灵敏度系数,通常取。实验选用 3 根光纤光栅波长均为 1545 nm , $\alpha_\varepsilon = 1.205 \times 10^{-3}$ 。

α_T 为 FBG 温度灵敏度系数,由于实验过程持续时间较短,温度变化对波长的影响可忽略。因此

$$\varepsilon = \Delta\lambda / \alpha_\varepsilon \quad (6)$$

2.1.2 等强度梁参数

梁的工作尺寸:

$$l \times B \times H = 300 \text{ mm} \times 45.9 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm} \quad (7)$$

式中: l 为荷重支点至梁支承的距离; B 为支承处的宽度。

梁的表面应变计算公式:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{E} \times \frac{M}{W} = \frac{6}{E} \times \frac{P}{H^2} \times \frac{l}{B} \quad (8)$$

式中: σ 为梁上表面拉应力; M 为梁支承处的弯矩; P 为梁端部荷载; W 为拉伸剪切强度; $E=200$ GPa。

根据计算可知, 在等强度梁末端每加载 1 kg, 等强度梁的表面应变:

$$\varepsilon = 156.781 \times 10^{-6} \quad (9)$$

通过在等强度梁末端增加砝码数量以达到逐渐施加荷载的目的, 等强度梁参数已知, 利用式(8)计算可得到梁表面相应的实际应变。

2.2 实验方法

2.2.1 粘贴方案

等强度梁实验粘贴方案如图 3 所示, 3 根裸光纤光栅均粘贴在上表面轴线上:

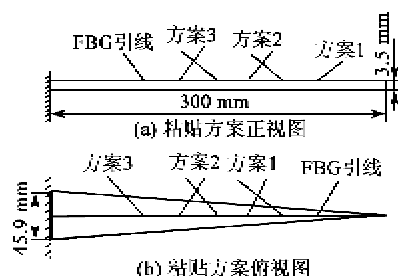


图 3 等强度梁表面粘贴方案示意图

方案 1: 用胶在等强度梁上表面轴线上粘贴裸光纤光栅(剥去光栅表面涂覆层), 使胶在光栅表面形成一层很薄的保护层, 达到满粘的效果, 其横截面如图 4(a)所示, $h=0.0925$ mm, 其中光纤半径 $r_g=0.0625$ mm。

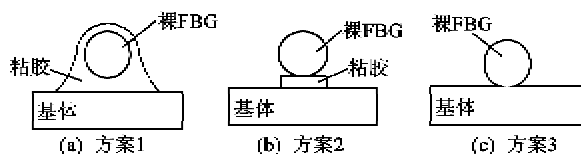


图 4 3 种方案粘贴简图

方案 2: 用胶在等强度梁上表面轴线上粘贴裸光纤光栅, 为达到对比的目的, 光栅粘贴位置处先涂一层胶(其涂覆厚度与方案 1 中光栅和等强度梁接触面厚度相同), 其横截面如图 4(b)所示, 待胶层凝固后再固定光纤栅区两个端点。

方案 3: 用胶在等强度上表面梁轴线上粘贴裸光纤光栅, 仅固定裸光纤光栅栅区两个端点的方法, 在等强度梁上表面轴线位置处粘贴, 裸光纤光栅与等强度梁无缝贴合, 其横截面如图 4(c)所示, $h=$

0.0625 mm。

实验所用胶均为乐高乐泰生产的 401 型瞬干胶, 其粘度 $\eta=110 \times 10^{-3}$ Pa·s, $W=22$ MPa。

2.3 加载方案

实验采用逐级加载方式, 每 0.5 kg 为一级, 加载至 4 kg。待波长变化稳定后读取数据, 再加下一级荷载。

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

图 5、6 为方案 1 第 1 次实验的结果及拟合残差图。图 7、8 为方案 2 第 3 次实验的结果及拟合残差图。图 9、10 为方案 3 第 3 次的实验的结果及拟合残差图。图中, R 为拟合曲线线性相关系数。

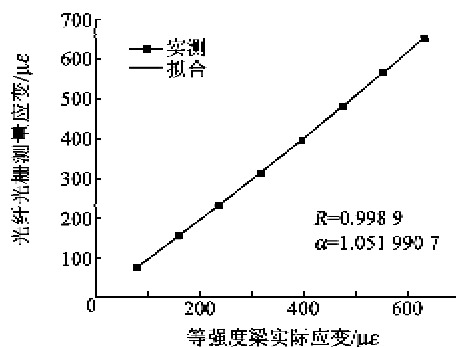


图 5 方案 1 第 1 次实验结果

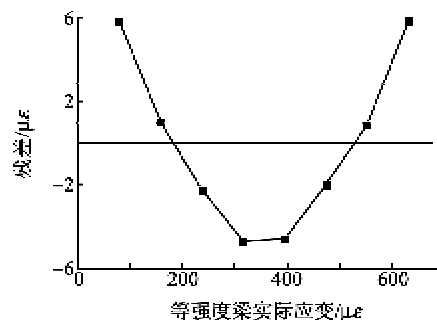


图 6 方案 1 第 1 次实验结果拟合残差

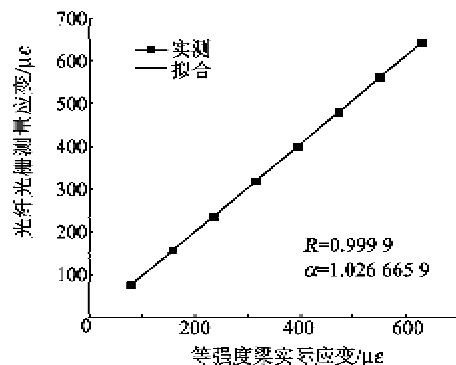


图 7 方案 2 第 3 次实验结果

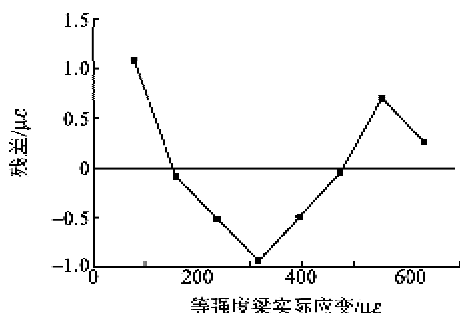


图8 方案2第3次实验结果拟合残差

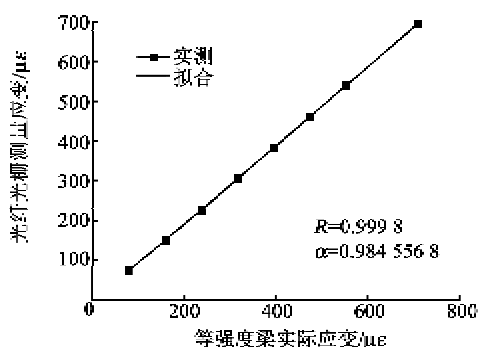


图9 方案3第3次实验结果

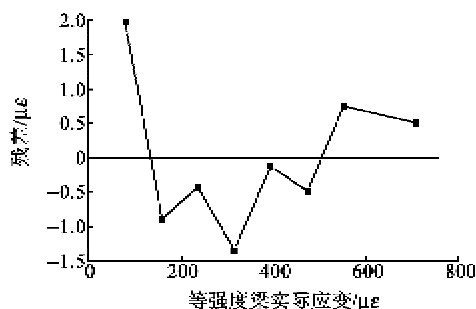


图10 方案3第3次实验结果拟合残差

3.2 实验结果分析

通过实验数据分析,利用401胶在等强度梁表面粘贴裸FBG传感器,方案1的胶结层应变传递损失最小,仅为0.09395%,方案3损失最大,达到5.01603%。实验结果如表1所示。

表1 实验结果分析记录表

方案	实测 传递率	平均实测 传递率	α 变形修正	误差/%
1	1.05199	1.05187	1.052857	0.0939
	1.05675			
	1.04687			
2	1.01342	1.02561	1.052857	2.5880
	1.03674			
	1.02667			
3	0.97658	0.98376	1.035714	5.0160
	0.99015			
	0.98456			

对比方案1、2可见,两者胶层厚度相同,即消除胶结层与光纤厚度带来的结构变形影响,方案1的光纤光栅栅区光纤周围全部涂覆401胶,胶结层固化产生的握裹力较大,基体应变可以很好地传递到光纤。方案3仅两端涂覆401胶,胶的强度及握裹力明显不足以维持光纤与基体变形一致,故出现了测量值偏小,误差偏大的现象。

4 结论

1) 对于表面粘贴裸光纤光栅,两点粘贴造成的测量比满粘误差要大,其粘贴长度短,胶结层与光纤间的握裹力,胶结层与基体之间的粘结力偏小,光纤光栅与胶结层的变形就越难保持一致,测量结果误差也就越大。

2) 几何模型分析可知,胶结层的剪切模量越大,胶结层的厚度越小,剪应力在胶结层的传递损失就越小,应变传递过程中的损失也就越小,但强度过大,在基体剪应力作用下不发生变形或变形很小,同样也会影响其传递性能。

3) 表面粘贴式光纤光栅应变测量必须依靠胶结层使得光纤与基体粘结,这就不可避免地存在传递损失,分析可知胶的粘度、强度等都对这种传递过程造成的应变损失有很大的影响,因此无论是封装还是表贴,都必须选用合适的胶。

4) 通过结构变形修正和胶结层的传递损失修正可以实现光纤光栅测量的测量值与实际应变的一致。

参考文献:

- [1] 张桂花,柴敬,李旭娟,等.基片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究[J].激光与光电子学进展,2014,51(5):010601.
ZHANG Guihua, CHAI Jing, LI Xujuan, et al. Research on strain transfer of surface fiber grating sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 010601.
- [2] 周广东,李宏男,任亮,等.光纤光栅传感器应变传递影响参数研究[J].工程力学,2007,21(6):169-173.
ZHOU Guangdong, LI Hongnan, REN Liang, et al. Told fiber Bragg grating strain sensor transfer impact parameter study [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 21(6): 169-173.
- [3] ANSARI F,苑立波.光纤传感器基体界面剪切力学传递模型[J].工程力学,1998,124(4):385-394.
ANSARI F, YUAN Libo. Mechanics of bond and in-

- terface shear transfer in optical fiber sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 385-394.
- [4] 周智, 田石柱, 欧进萍. 光纤布喇格光栅传感机理研究[C]//S. 1. : 第四届中国功能材料及其应用学术会议论文集, 2001.
- [5] 孙丽. 光纤光栅传感应用问题解析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [6] 吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 传感光纤光栅标准化埋入式封装的理论与实验研究[J], 中国激光, 2010, 37(6): 1290-1293.
- WU Yonghong, SHAO Changjiang, QU Wenjun, et al. Basic theoretical model and its experimental investigation for standard embedded sensing fiber Bragg grating packaging[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1290-1293.
- [7] ZHOU J, ZHOU Z, ZHANG D. Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(7): 1117-1122.
- [8] 田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805005.
- TIAN Shizhu, ZHANG Guoqing, WANG Dapeng. Study on Strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805005.
- [9] 杨光, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 低频光纤 Bragg 光栅加速度传感器实验[J]. 四川兵工学报, 2011(7): 99-101.
- (上接第 98 页)
- [9] DIE H, CHUNNIAN Z, HONG L. Auto calibration method of MEMS accelerometer[C]//Jilin: Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 1348-1351.
- [10] REKIK A A, AZAIS F, MAILLY F, et al. Self-test and self-calibration of a MEMS convective accelerometer[C]//Porto de Galinhas, Design Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2013 Symposium on IEEE, 2013: 1-4.
- [11] BRASCA L M C, BERNARDI P, REORDA M S, et al. A parallel tester architecture for accelerometer and gyroscope MEMS calibration and test[J]. Journal of Electronic Testing, 2011, 27(3): 389-402.
- [12] SONG L, QIN Y. Six-position testing of MEMS accelerometer[J]. Measurement & Control Technology, 2009, 7: 5.

《压电与声光》广告免费咨询卡

姓名: _____ 职务: _____ 职称: _____ 单位: _____
地址: _____ 邮编: _____ 电话: _____
您对本刊 _____ 年 _____ 期的 ☐ 彩色 ☐ 黑白 ☐ 刊花广告
_____ 公司(厂家) _____ 产品/技术感兴趣
希望: ☐ 索取公司资料 ☐ 索取产品资料 ☐ 询问价格 ☐ 建立业务联系 ☐ 其他 _____
请将卡片寄往(或传真): 《压电与声光》编辑部 读者服务部
通讯地址: 重庆南坪 2513 信箱(400060) 电话: 023-62919570

复印有效