

光栅粘贴长度对应变传递影响的实验研究

赵鹏冲,段建立,孙阳阳,张文渊,岳 音,章征林

(解放军理工大学 国防工程学院,江苏 南京 210007)

摘 要:表面粘贴作为光栅主要的粘贴方式之一,简单方便,应用广泛。光纤光栅实际栅区长约 1.0~1.5 cm,解调仪反映的是栅区的综合变化,实际粘贴长度影响测量结果。该文就光纤光栅不同粘贴长度影响应变测量结果作了实验研究,发现粘贴长度越长,结果与实际应变的误差就越小,实验结果将为光纤光栅封装等提供参考。

关键词:光纤光栅;表面粘贴;粘贴长度;应变传递率

中图分类号: TN253; TP212.6 **文献标识码:** A

The Experimental Study on the Influence of Bonding Length on FBG Strain Transfer

ZHAO Pengchong, DUAN Jianli, SUN Yangyang, ZHANG Wenyuan, YUE Yin, ZHANG Zhenglin

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

Abstract: As one of the main pasting way of fiber optical grating (FBG), the surface bonding has the feature of easy-to-use and widely used. The raster grid area of FBG is about 1.0 cm to 1.5 cm centimeter. The result reflected by the interrogator is the overall change of the raster grid area and the actual bonding length will affect measuring result. The influences of different bonding lengths of FBG on the are experimentally studied in this paper. It has been found that the longer of bonding length, the less error of the measuring result and the actual strain. The result will provide a reference for FBG packaging.

Key words: fiber optical grating; surface bonded; bonding length; strain transfer rate

0 引言

由于光栅较脆弱,在实际工程中需进行封装,主要封装方式有埋入式和表面粘贴式。对已建结构中,表面粘贴式应用较多。但国内、外学者对埋入式封装已进行广泛研究^[1-3],且取得了可观的成果。对于表面粘贴式,梁磊等^[4]仿真分析了不同粘接剂、材料的弹性模量及其厚度对应变传递系数的影响,得出粘接层厚度越小,应变传递率越大,存在最优的粘贴层弹性模量。王为等^[5]建立了表面式光纤光栅传感器力学模型,推导了应变传递规律,仿真并实验分析了衬底厚度和粘贴长度对应变传递效果的影响。郭伟等^[6]建立了“基体结构-胶粘体-光纤传感器”的应变传递简化模型,推导了应变传递率,并对影响传递率的各种参数进行分析和模拟,根据实际条件得到了粘贴的最佳参数。张文晓等^[7]建立了混凝土结

构与粘贴式光纤光栅传感器应变传递简化模型,并推导了实际应变与所测应变的关系。本文就光纤光栅粘贴在等强度梁表面,对不同粘贴长度进行实验分析,得出最佳粘贴长度。

1 应变传递原理分析

光纤光栅由纤芯、包层和涂敷层组成,由于实际应用中大都将涂敷层去除,本实验认为纤芯和包层材质基本相同,可一同处理,其示意图如图 1 所示。

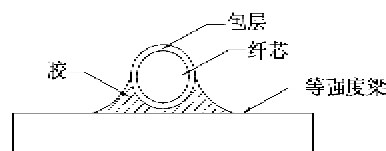


图 1 光纤光栅等强度梁表面粘贴示意图

图 2 为光纤光栅应变传递简图。等强度梁应变通过胶传递到光纤光栅,通过解调读取波长数据。

收稿日期:2015-06-18

基金项目:国家重点基础研究发展(“九七三”)计划基金资助项目(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:赵鹏冲(1991-),男,山东人,硕士生,主要从事光纤传感监测的研究。E-mail:blouson@163.com。导师简介:段建立(1971-),男,河北赵县人,副教授,主要从事地下工程施工与测试等方面的研究。E-mail:duan_jianli@163.com。

胶体的性质(弹性模量、剪切模量等)、胶粘贴参数(长度、宽度、厚度等)均对光纤光栅应变产生影响。

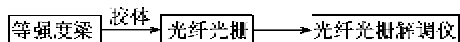


图2 光纤光栅应变传递简图

由 Bragg 原理, 光纤光栅中心波长^[8]可表达为

$$\lambda = 2n\Lambda \quad (1)$$

$$\Delta\lambda = \alpha_\epsilon \cdot \epsilon \quad (2)$$

式中: λ 为光栅中心波长; n 为光栅芯区的有效折射率; Λ 为光纤周期; ϵ 为光纤光栅自身的应变; $\alpha_\epsilon = \lambda(1-P)$, 对于纤芯是纯石英的光纤, $P \approx 0.22$ ^[9] 为光纤的弹光系数。取 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, 则 $\alpha_\epsilon \approx 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

图3为等强度梁测量裸光栅应变传递率图。图中, L 为荷重支点至梁支承的距离, r 为裸光栅的半径, t 为胶层厚度, R 为梁的弯曲半径, h 为梁的厚度。

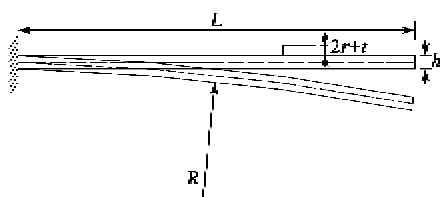


图3 等强度梁测量裸光栅应变传递率图

根据等强度梁应变误差分析可得修正系数^[10]为

$$\alpha_{\text{修正}} = 1 + 2 \frac{r-t}{h} \quad (3)$$

由式(3)可得 $\alpha_{\text{修正}} = 1.036$ 。通过测量可得 $t = 0.03 \text{ mm}$, $r = 0.12 \text{ mm}$ 。

设 ϵ_s 为等强度梁上表面应变, K 为应变传递率, 则有

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_{\text{理论}}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_s \cdot \alpha_{\text{修正}}} \quad (4)$$

2 实验方案

2.1 试验设计及其准备

试验采用江苏溧阳市生产的 TJ-2 型等强度梁, 梁的工作尺寸 $L \times B \times h = 300 \text{ mm} \times 45.9 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ (见图4)。其中, B 为支承处的宽度。解调设备采用美国微光公司生产的光纤光栅传感解调仪 SM125, 采样频率 2 Hz, 采样范围 1510~1590 nm。光栅采用美国微光公司生产的 SWF-28C 型号的光纤。电子天平精确称量砝码的质量, 加载采用 0.5 kg 分级加载。

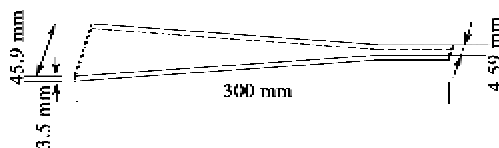


图4 等强度梁尺寸示意图

2.2 实验方法

为分析不同粘贴长度对光栅应变传递率的影响程度, 实验取 3 段光栅的粘贴长度分别为 15 mm、25 mm、35 mm, 图5中由上至下。统一粘贴所用的胶水为 401 胶。待胶水凝固后, 测量砝码加载后不同光栅的波长。图6为等强度梁光栅粘贴图。

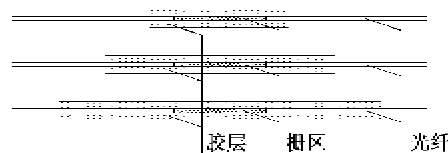


图5 等强度梁表面光栅粘贴示意图

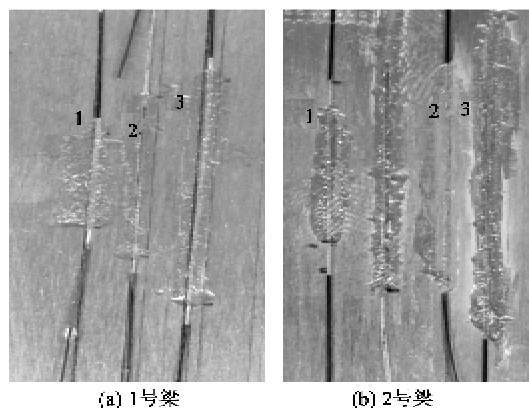


图6 等强度梁光栅粘贴图

2.3 实验结果分析

以 1525 nm 的光栅为例分析其过程。光纤轴向应变灵敏度系数取 0.78^[11]。1520 nm 光栅的应变灵敏度系数为 1.186 $\mu\epsilon/\text{pm}$, 测量应变由波长变化量除以应变灵敏度系数得到。应变传递率由理论应变与实测应变线性回归得到。表1为不同粘贴长度应变传递率。

表1 不同粘贴长度应变传递率

时间/h	粘贴长度/mm		
	15	25	35
24(1号梁)	0.978	0.979	0.988
24(2号梁)	0.954	0.965	0.971
3(2号梁)	0.950	0.961	0.969

由表1可知, 两组数据表明, 随着粘贴长度的增加, 应变传递率也随之增加。1号梁 15 mm 和

25 mm 的值相差较小,可能是 15 mm 组光栅胶层更宽。1 号梁的值比 2 号梁的值大,可能受胶层固化时间等因素的影响。对比 2 号梁固化 3 h 和 24 h 两组数据,发现随着胶层固化时间变长,应变传递率增加。

图 7 为不同粘贴长度应变灵敏度系数对比图。

表 2 为 1 525 nm 光栅标定实验数据。

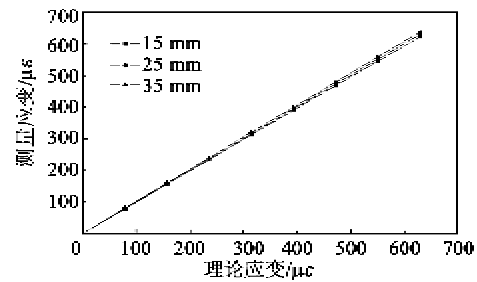


图 7 不同粘贴长度应变灵敏度系数对比图

表 2 1 525 nm 光栅标定实验数据

砝码质量/g	累计质量/g	理论应变/ $\mu\epsilon$	波长/nm	测量应变/ $\mu\epsilon$	应变传递率
502.69	502.69	81.65	1 525.388	78.17	0.978
502.30	1 004.99	163.24	1 525.483	158.02	
500.53	1 505.52	244.53	1 525.578	237.87	
502.22	2 007.74	326.11	1 525.673	317.72	
502.41	2 510.15	407.71	1 525.768	397.57	
502.32	3 012.47	489.30	1 525.861	475.74	
502.72	3 515.19	570.96	1 525.957	556.43	
502.70	4 017.89	652.61	1 526.053	637.12	

3 结论

1) 光纤光栅中心波长和应变有很好的线性关系。

2) 随着粘贴胶固化时间的延长,胶层所起效果越好。实际应用中,建议等固化 24 h 后使用。

3) 随着光栅粘贴长度的增加,光栅的应变传递率越高。

4) 通过对不同粘贴长度光栅的应变传递率进行分析,得出的结论对光栅应变传感器的设计、封装等具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] FARHAD A, YUAN L. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 385-394.
- [2] 李东升, 李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. 力学学报, 2005, 37(4): 435-441.
LI Dongsheng, LI Hongnan. Strain transferring analysis of embedded fiber bragg grating sensors[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 37(4): 435-441.
- [3] 周智, 李冀龙, 欧进萍. 埋入式光纤光栅界面应变传递机理与误差修正[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(1): 49-55.
ZHOU Zhi, LI Jilong, OU Jinping. Interface strain transfer mechanism and error modification of embedded

FBG strain sensors[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(1): 49-55.

- [4] 梁磊, 王艳妮, 刘德力. 粘贴式光纤光栅应变传感器的应变传递分析[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(10): 144-146.
LIANG Lei, WANG Yanni, LIU Deli. Strain transferring analysis of pasted strain fiber bragg grating sensor [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(10): 144-146.
- [5] 王为, 林玉池, 黄银国. 表面式光纤光栅传感器应变传递研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 1218-1220.
WANG Wei, LIN Yuchi, HUANG Yinguo. Research on strain transferring of surface FBG sensor[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(12): 1218-1220.
- [6] 郭伟, 李新良, 宋昊. 表面粘贴光纤光栅传感器的应变传递分析[J]. 计测技术, 2011, 31(4): 1-4.
GUO Wei, LI Xinliang, SONG Hao. Analysis of strain transfer of fiber grating sensors adhered to the structure surface[J]. Metrology & Measurement Technology, 2011, 31(4): 1-4.
- [7] 张文晓, 何秀凤. 粘贴式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析[J]. 工程勘察, 2013, (6): 82-86.
ZHANG Wenxiao, HE Xiufeng. Analysis of strain transfer factors of pasted optical fiber bragg grating sensor[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, (6): 82-86.

(下转第 256 页)