

文章编号: 0258-7025(2008)04-0573-04

# 新型快速自修复光纤传感器的设计与性能

李 鹏 赵志敏 洪小芹

(南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 针对光纤微弯传感器在强扰动信号作用下,因光纤受损而丧失部分或全部功能的问题,进行了关于传感器自修复的研究。该传感器采用自制的具有良好光学、机械和粘接性能的短波光固化修复剂,将其注入预置有传感光纤的柔性空心纤维中,设计了一种可以实现在线自诊断和实时自修复的双窗口(长波检测、短波修复)智能光纤微弯传感器。对修复时间、修复效果进行了实验和分析。结果表明,该传感器自修复时间短,修复后机械和光学性能良好,并能实现多点修复。

**关键词** 光纤光学;光纤微弯传感器;自修复;短波光固化

**中图分类号** TP 212.14 **文献标识码** A

## Design and Study on a New Fiber Sensor with Self-Repairing Functions

Li Peng Zhao Zhimin Hong Xiaoqin

(College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** Fiber optic microbend sensors under the strong signal will bring about the fiber rupture, and the sensor will invalidate. To solve this problem, the self-repairing of the fiber optic microbend sensor was researched. A short wavelength light curing adhesive was designed. It has good optical, mechanical and adhesive performances. We put it into the hollow-center fiber embodied with fiber optical sensor. And an intelligent fiber optic microbend sensor with self-diagnosing and self-repairing functions was designed. Experimental results show this sensor has little repairing time, good repairing effect.

**Key words** fiber optics; fiber optic microbend sensors; self-repairing; short wavelength light curing

## 1 引 言

光纤微弯传感器已在温度、位置、流量和速度等物理量的测量中得到了广泛的应用。根据耦合波理论<sup>[1,2]</sup>,当被测信号作用于光纤传感器时,传感光纤发生弯曲,部分芯模能量将转化为包层模式能量,通过测量包层模式或芯模能量的变化就能测量外界物理量。在实际使用中,当传感器受到强信号冲击时,如果光纤弯曲半径小于极限值,则光纤会受损出现裂纹或断裂等现象,使传感器失效<sup>[3,4]</sup>。

本文研究和设计了一种具有快速自修复功能的光纤微弯传感器。在传感器失效前,对其进行快速修复,以保证检测系统的永续使用。根据设计要求,研制了一种具有良好光学、力学和粘接性能的光固

化修复剂。并对传感器的传感和自修复性能进行了研究和分析。

## 2 智能光纤微弯传感器的设计

图 1 为智能光纤微弯传感器的结构示意图,主要由传感光纤、柔性空心纤维和光固化修复剂三部分组成。实验选择宽波段石英光纤作为传感光纤,该光纤在 300~700 nm 波段的透光率为 85%~95%,包层外径为 200  $\mu\text{m}$ ;柔性空心纤维的内径为 500  $\mu\text{m}$ ,壁厚 100  $\mu\text{m}$ ;以自研制的光固化修复剂作为修复液。将光固化修复剂封装至已预置有传感光纤的柔性空心纤维中。

该传感器使用双光源:长波检测光源和短波修

收稿日期:2007-08-16;收到修改稿日期:2007-11-05

基金项目:国家自然科学基金(10172043)、航空科学基金(05G52047)和教育部博士点专项基金(20040287012)资助项目。

作者简介:李 鹏(1976—),男,江西人,博士研究生,主要从事光纤智能结构的研究。E-mail:bodyguard\_008@163.com

导师简介:赵志敏(1955—),女,辽宁人,教授,博士生导师,主要从事光纤智能结构的研究。

E-mail:zhaozhimin@nuaa.edu.cn (通信作者)

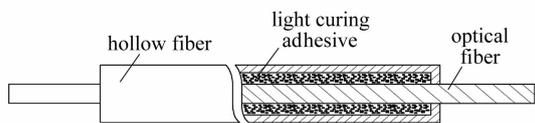


图1 智能光纤微弯传感器的结构示意图

Fig. 1 Structural schematic of the intelligent fiber optic microbend sensor

microbend sensor

复光源。长波检测光源测量被测信号同时监测传感光纤的受损情况。当传感光纤由于弯曲半径过小而出现损伤时,更换短波修复光源,利用损伤处的短波泄漏模固化受损部位的光固化修复剂,实现传感器的自诊断和自修复。

### 3 光固化剂的制备及性能

光固化材料的品种繁多,性能各异,其主要成分一般包括光引发剂、反应性低聚物、活性稀释剂和各种添加剂<sup>[5~8]</sup>。

实验研制了几种短波光固化修复剂,通过对比其吸收光谱、衰减、固化速度、力学和粘接性能等,确定并优化了其成分和制备工艺,最终制备了符合传感器设计要求的光固化修复剂<sup>[9,10]</sup>。性能检测表明,该光固化修复剂具有:1) 光学性能好。短波(300~400 nm)吸收较强,且在322 nm和379.5 nm波长处有吸收极大值,而长波吸收很小。图2为光固化修复剂的吸收光谱(ABS)(纵坐标为 $ABS = -\lg(I_t/I_0)$ , $I_t$ 为透射光强, $I_0$ 为入射光强);2) 固化速度快。使用发光二极管(LED)(375 nm, 2 mW)

短波光源进行固化,固化时间小于1 min;3) 机械、粘接性能好。分别根据铅笔硬度法和 GB1720-79 对光固化修复剂的硬度和附着力进行测试。结果表明所制备的光固化修复剂具有良好的机械、粘接性能:铅笔硬度大于4H;附着力1~2级。

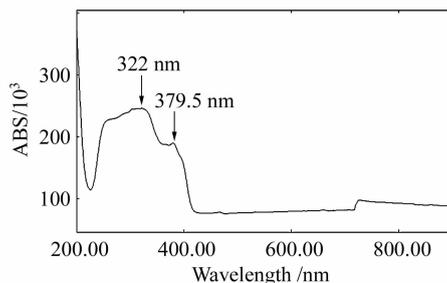


图2 自制光固化修复剂的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectrum of the light curing adhesive

## 4 微弯传感和自修复性能的实验与分析

### 4.1 实验装置

图3为智能光纤微弯传感器的微弯传感和自修复性能的实验装置。光源部分包括长波检测光源氦氖激光器(波长632.8 nm);短波修复光源紫外高压汞灯;光束经过聚光装置耦合<sup>[11]</sup>至长度为10 m的传感光纤;使用光功率计作为光探测器。通过调节微位移加载器对传感器进行加载,测量输出光强的变化,分析传感器的传感和自修复性能。

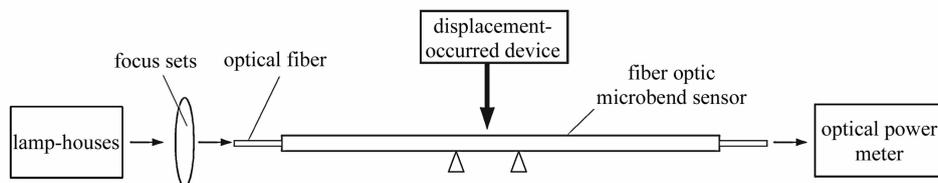


图3 微弯传感和自修复性能实验装置图

Fig. 3 Testing device for sensing and self-repairing performances

### 4.2 微弯传感性能

实验对比了石英光纤和智能光纤微弯传感器的微弯传感性能,图4为两者的光强归一化输出与加载微位移的变化趋势。

实验数据表明,随着加载微位移的增加,两者输出光强都表现出了不同程度的减小。石英光纤从开始承载时光强就迅速减小,加载位移为150  $\mu\text{m}$ 时光强突降,光纤断裂,表现出较差的传感性能;智能光纤微弯传感器的光强-位移曲线出现了具有明显特征三个区域:1) 光纤完好区(A-B)。该阶段由于

空心纤维和传感光纤之间充满液态光固化修复剂,载荷通过修复剂传递给光纤,光纤所受应力较小,单位位移的光强变化不大。实验表明该阶段光纤没有受损,当负载消失后,输出光强能快速并且完全恢复;2) 光纤损伤区(B-C)。该阶段由于光纤和空心纤维之间的间隙已经消失,载荷主要由光纤包层和空心纤维壁吸收并传递给光纤,光纤所受应力变大,单位位移的光强变化较大。实验表明该阶段光纤虽部分受损,但没有发生断裂,当负载消失后,输出光强能部分恢复;3) 光纤断裂区(C-D)。该阶段光强-

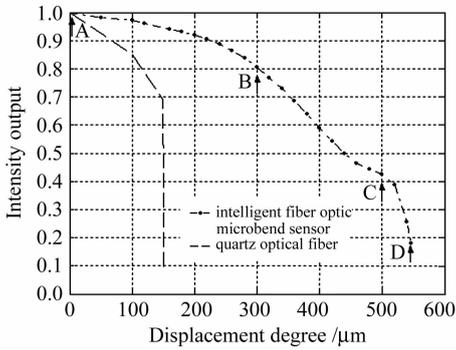


图4 石英光纤与智能光纤微弯传感器的传感性能

Fig. 4 Sensing performance of the quartz optical fiber and the intelligent fiber optic microbend sensor

位移曲线和石英光纤相似,载荷直接作用于石英光纤纤芯,光纤所受应力最大,载荷稍有增加,光纤即断裂,负载消失后,光强只能维持一个很小的水平,该区域基本没有传感功能。

这些现象与石英光纤和传感器的材料、尺寸和结构均有很大的关系。石英光纤纤芯的材料主要是 $\text{SiO}_2$ ,所以其刚度、硬度比较大,在承载时表现出脆性材料的特征。而传感器由于空心纤维的柔韧性好,以及空心纤维和传感光纤之间充满光固化修复剂,在传递载荷时减小了作用于传感光纤的应力,改善了传感器的传感性能。

可以看出,智能光纤微弯传感器具有较宽的测量范围,其传感性能优于普通石英光纤。在一定范围内,通过其输出光强的变化,可以判断出其承载的大小,该型光纤微弯传感器具有良好的传感性能。

#### 4.3 自修复性能

选择光纤损伤区(B-C)进行修复实验,实验选择传感器承载位移为 $400\ \mu\text{m}$ 时,去除负载,使用短波光源进行修复。光强在出现小幅波动后最终趋于一个稳定值,说明光固化修复剂已经全部固化,完成了对光纤的修复。由于具体的固化时间受到众多因素的影响(损伤点距离光源的位置、光源功率的大小、光纤受损的程度等),所以要准确给出固化时间具有一定困难。本实验中,固化时间小于 $1\text{min}$ ,基本可以满足快速修复的要求。

图5为修复后传感器的光强归一化输出与加载位移的变化趋势。对比修复前后传感器的传感性能,可以看出,两者具有相似的传感性能。不同的是由于光固化修复剂固化后,传感器的结构和材料发生了明显的变化,使修复后传感器所能承受的加载位移比修复前要小,然而在一定范围内( $0\sim 400\ \mu\text{m}$ ),修复后的智能光纤微弯传感器仍然具有

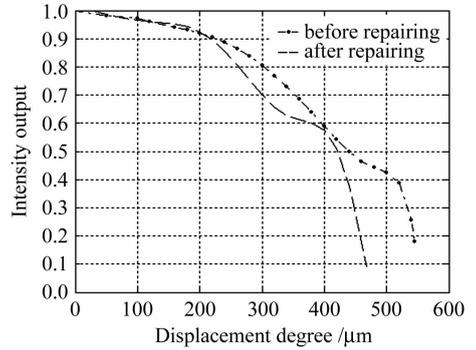


图5 智能光纤微弯传感器修复前后的传感性能

Fig. 5 Sensing performance of the intelligent fiber optic microbend sensor before and after repairing

良好的传感性能,可以满足传感器的传感要求。实验表明,该型光纤微弯传感器具有良好的自修复性能。

## 5 结论

基于光化学理论,制备了一种可用于光纤修复的光固化修复剂,并成功地研制了一种新型的具有自诊断、自修复功能的智能光纤微弯传感器。实验结果表明,光纤微弯传感器具有良好的传感性能;自修复时间短;修复后机械、光学性能良好,可以满足传感需要。光固化修复剂固化前具有良好的稳定性,能保证该传感器具有长时间的修复功能;光固化修复剂固化后性能稳定,与石英基质有良好的附着力,在正常情况下,修复后的传感器寿命和未受损传感器相当。若选择适当功率的修复光源能实现多损伤点修复,可应用于分布式光纤微弯传感器系统。该型传感器可用于复合材料智能结构等众多领域,为扩展光纤微弯传感器的应用提供了一种新的途径。

## 参考文献

- 1 Zhao Shigang, Wang Xue, Yuan Libo. Four-core fiber based bending sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1001~1006  
赵士刚,王雪,苑立波. 四芯光纤微弯传感器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1001~1006
- 2 Xin Sijin, Liang Lei. Novel optic fiber micro bend sensor for smart structure [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 2005, **20**(2):41~43  
信思金,梁磊. 一种新型的光纤微弯传感器的研究[J]. *湖北工业大学学报*, 2005, **20**(2):41~43
- 3 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Influence of bending diameter on the output capability of multimode fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):324~326  
李立波,楼祺洪,周军等. 弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):324~326
- 4 Ma Junyan, Zhao Zhimin, Guo Linfeng *et al.*. Experimental

- study on microbend performance of special liquid-core optical fiber [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(4):265~266  
马军艳,赵志敏,郭林峰等. 特种液芯光纤微弯性能实验研究[J]. *应用激光*, 2006, **26**(4):265~266
- 5 Wang Lexin, Zhao Zhimin, Shi Lei *et al.*. Study on light-wave wavelength selection in repairing composites materials [J]. *PTCA (Part A: Physical Testing)*, 2002, **38**(1):10~13  
王乐新,赵志敏,石磊等. 复合材料损伤的光修复波长选择研究[J]. *理化检验物理分册*, 2002, **38**(1):10~13
- 6 Han Junfeng, Lu Shuang, Wang Zhengping. Effect of photoinitiator on free radical UV-curing reaction [J]. *Applied Science and Technology*, 2006, **33**(4):57~59  
韩俊凤,卢双,王正平. 光引发剂对自由基型UV固化反应的影响[J]. *应用科技*, 2006, **33**(4):57~59
- 7 Xia Lanying, Sun Fang, Huang Yuli *et al.*. A study on photoinitiator systems in UV curing adhesives [J]. *J. Radiat. Res. Radiat. Process*, 2003, **21**(3):184~187  
夏兰英,孙芳,黄毓礼等. 光引发剂对紫外光固化胶粘剂性能的影响[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2003, **21**(3):184~187
- 8 Guo Linfeng, Zhao Zhimin, Hou Yongfei *et al.*. Parameter measurement and load performance analysis of special optical fiber [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, **41**(10):1647~1649  
郭林峰,赵志敏,侯永飞等. 特种光纤参数检测及承载性能分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2007, **41**(10):1647~1649
- 9 Zhang Na, Feng Xia. Using of fiber optical sensor to measure liquid parameters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):68~71  
张娜,冯霞. 光纤传感器在液体参量测量中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):68~71
- 10 Guo Linfeng, Zhao Zhimin, Gao Mingjuan *et al.*. Study of the compatibility between light-cured repair materials and composite materials by holographic interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(10):105602
- 11 Wu Maoliang, Zhao Wanhua, Yu Dianhong *et al.*. Coupling research on the UV light and optic fiber in stereolithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11):1366~1370  
吴懋亮,赵万华,于殿泓等. 光固化成型中紫外光源-光纤耦合研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(11):1366~1370