

doi: 10.3788/gzxb20164502.0206004

非栅区封装光纤布喇格光栅应变传感特性研究

吴俊^{1,2}, 陈伟民², 余葵¹, 马希钦¹, 舒岳阶¹

(1 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

(2 重庆大学, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要: 针对表面粘贴式非栅区封装结构, 依据变形等效原理, 推导了该结构的应变传递函数, 仿真分析了非栅区封装中间段长度与封装材料弹性模量对应变传递效率的影响. 分别采用有机环氧树脂与金属锌, 将两只光纤布喇格光栅用非栅区封装方式固定在同一根钢丝上, 进行拉伸试验, 试验结果表明: 两种材料的拉伸曲线线性度均达到 0.99 以上, 表明两种封装材料的应变传递一致性较好; 金属锌封装结构的应力感知灵敏度平均值为 0.142 6 nm/KN, 环氧有机胶封装结构的应力感知灵敏度平均值为 0.130 4 nm/KN; 各种应变值下, 金属锌封装结构的应变传递系数均稳定在 0.995 左右, 而环氧有机胶封装结构的应变传递系数在 0.91 左右上下波动, 金属锌的应变传递效率较有机环氧树脂高了近 9.34%. 试验结果与数值仿真结果较为吻合, 可为非栅区封装光纤布喇格光栅传感器的设计提供依据.

关键词: 光纤传感; 光纤布喇格光栅; 表面粘贴式; 非栅区封装; 栅区封装; 弹性模量; 应变传递效率

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0206004-5

Strain Sensing Properties of Grating Ends Packaged FBG Sensors

WU Jun^{1,2}, CHEN Wei-min², YU Kui, MA Xi-qin¹, SHU Yue-jie¹

(1 Southwest Research Institute of Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400016, China)

(2 The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing, 400030, China)

Abstract: According to the grating ends packaged structure, based on the principle of equivalence deformation, the strain transfer function was deduced, the change tendency of strain transfer efficiency with length and bond layer elastic modulus was simulated. Two FBGs were fixed to steel wire of 7 mm with epoxy and Zn, and the tensile tests were carried out, the test results showed: The linearity of tensile curves of two packaging type are above 0.99. The average strain sensing sensitivity of epoxy is 0.130 4 nm/KN, while the average strain sensing sensitivity of Zn was 0.142 6 nm/KN. Under various strain values, the strain transfer efficiency of epoxy is about 0.91, while the Strain transfer efficiency of Zn is about 0.995, the latter is nearly 9.34% more than the former. The test results are in accord well with numerical simulation results.

Key words: Opticl fiber sensing; Fiber Bragg grating; Surface bonded sensor; Grating ends packaged structure; Grating packaged structure; Elastic modulus; Strain transfer efficiency

OCIS Codes: 060.3735; 050.2770; 060.2370; 130.6010

0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是迄今为止技术最成熟、应用最广泛的光纤应变测量技术, 已广泛应用于大型土工结构^[1-2]、军事设施、航天器^[3]、

船舶工业^[4]、及相关特种行业结构状态监测^[5-6]。

由于 FBG 纤细、质脆、易折断, 为了利用 FBG 进行参量监测, 必须将 FBG 元件进行合理封装. 应变监测是 FBG 的最主要功能之一, FBG 元件自身具有应变测量准确度高、灵敏度优越等突出优点, 但封装结构的

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51508059)、重庆市基础与前沿研究计划项目(No. CSTC2014JCYJA70006)和重庆市教委科学技术研究项目(No. KJ1500514)资助

第一作者: 吴俊(1981—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为光纤智能结构、水工量测技术. Email: wujun_gd@126.com

通讯作者: 陈伟民(1955—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电技术及系统. Email: wmchen0802@126.com

收稿日期: 2015-06-30; **录用日期:** 2015-10-26

<http://www.photon.ac.cn>

存在,使应变传递环节增加,FBG的应变测量优势被削弱.乔学光、周国鹏等人针对其研究对象的特点,对FBG的封装技术进行了深入研究,均认为FBG的封装技术是影响FBG元件与被测对象协同变形效果的最核心因素^[7-8],为了充分发挥FBG的优越性能,必须对FBG封装方式进行深入研究.

如何在保证FBG传感器成活率的前提下,使FBG与被测对象达到高效的协同变形,确保FBG的应变测量优势得以充分发挥,是光纤测量领域的研究重点,也是难点.目前,FBG传感器的封装方式主要有栅区封装与非栅区封装两种.栅区封装具有操作简单、工艺简便的优点,是目前应用最为广泛的FBG连接方式.Chih-Chun Cheng、李宏男、吴入均等人针对埋入式光纤布喇格光栅传感器封装结构的应变传递过程开展了大量的分析与研究,并定量分析了应变连接层的长度、厚度与材料弹性模量等参量对应变传递效率的影响,为FBG传感器的结构设计提供了理论依据^[9-13].吴俊针对FBG传感器多为有机胶封装的现状,定量分析并比较了有机胶封装与金属材料封装的利弊,为FBG传感器封装材料的优化选择提供了理论支撑^[13].

本文在实验室试验与多年工程实践中,通过对栅区封装与非栅区封装两种方式的深入分析与综合应用效果比较发现,在一定条件下,非栅区封装具有较栅区封装更为优越的性能.应变传递效率作为评价FBG封装方式优劣的关键指标,本文针对非栅区封装结构,以应变传递效率为核心评价指标,深入分析非栅区封装FBG传感器的应变传感特性,为FBG封装方式的选择提出指导意见.

1 非栅区封装结构的应变传递效率

1.1 表面粘贴式非栅区封装结构

FBG表面粘贴式非栅区封装方式结构如图1.

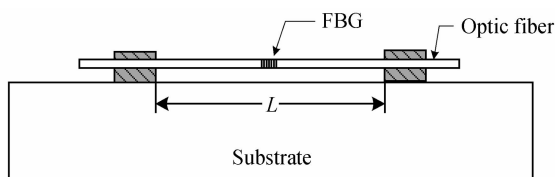


图1 表面粘贴式非栅区封装结构

Fig.1 Strain sensing principle of FBG

当基底受到 F 的拉伸力作用后,忽略FBG连接材料对基底应变的影响,可产生如图2所示的结构变形.

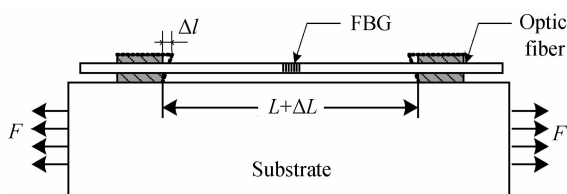


图2 受力后结构变形示意图

Fig.2 Structural deformation under the force

基体在受到 F 力作用后,发生了 ΔL 的变形,所以基体应变为

$$\epsilon_s = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

在变形传递过程中,栅区两端连接材料在光纤拉力作用下产生了 Δl 的微变形,不考虑封装材料与光纤之间的滑移,FBG实际感受到的应变为

$$\epsilon_f = \frac{\Delta L - 2\Delta l}{L} \quad (2)$$

所以,应力传递系数为

$$K = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_s} = \frac{\Delta L - 2\Delta l}{\Delta L} = 1 - \frac{2\Delta l}{\Delta L} \quad (3)$$

1.2 应变传递函数

封装材料对FBG两端尾纤的作用效果如图3.

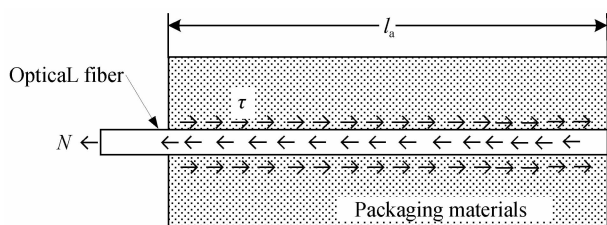


图3 封装材料对光纤的作用力示意图

Fig.3 Diagram of the force between optical fiber and bonding material

图3中,光纤受到的拉力为 N ,忽略封装材料变形的影响,其表达式为

$$N = \Delta L / LE_F A_F \quad (4)$$

式中,光纤弹性模量为 E_F ,光纤横截面面积为 A_F .

由于光纤与连接材料无相对滑移,光纤受到封装材料的剪应力与光纤端部受到的拉力 N 平衡,满足式(5).

$$N = \bar{\tau} \pi d l_a \quad (5)$$

式中, $\bar{\tau}$ 为平均剪应力, d 为光纤直径, l_a 为有效锚固长度.

有效锚固长度 l_a 为

$$l_a = 0.16 \frac{f_y}{f_t} d \quad (6)$$

式中, f_y 为光纤抗拉强度, f_t 为封装材料抗拉强度.

根据式(4)~(6),可得

$$\frac{\bar{\tau}}{\tau} = \frac{\Delta L \cdot E_F \cdot A_F \cdot f_t}{0.16 \cdot \pi \cdot L \cdot d^2 \cdot f_y} \quad (7)$$

由剪应力引起的连接材料变形量为

$$\Delta l = \frac{\bar{\tau}}{E_B} l_a \quad (8)$$

式中, E_B 为封装材料弹性模量.

将式(7)代入式(8),可得

$$\Delta l = \frac{\Delta L \cdot E_F \cdot A_F}{\pi \cdot L \cdot d \cdot E_B} \quad (9)$$

将式(9)代入式(3),可得

$$K = 1 - \frac{2 \cdot E_F \cdot A_F}{\pi \cdot L \cdot d \cdot E_B} = 1 - \frac{E_F \cdot d}{2 \cdot L \cdot E_B} \quad (10)$$

由式(10)可见,由于光纤弹性模量 E_F 与直径 d 均为常量,为此,应变传递效率仅与非栅区封装的 FBG 栅区段长度 L 与连接材料弹性模量 E_B 有关。

2 各参量对应变传递效率的影响分析

为了仿真分析非栅区封装中间段长度 L 对应变传递效率的影响,设光纤弹性模量为 70 GPa,直径为 0.125 mm,封装材料分别为有机环氧树脂与金属锌,其弹性模量分别为 1.88 GPa 与 82 GPa。

如图 4 所示,两种不同封装材料的应变传递系数均随着中间段长度 L 的增大而增大,对于有机环氧树脂而言,当 L 大于 24 mm 时,应变传递系数可达到 0.9 以上,对于金属锌而言,由于其弹性模量较大,即使中间段长度 L 仅与栅区长度相同,其应变传递系数也可达到 0.95 以上。

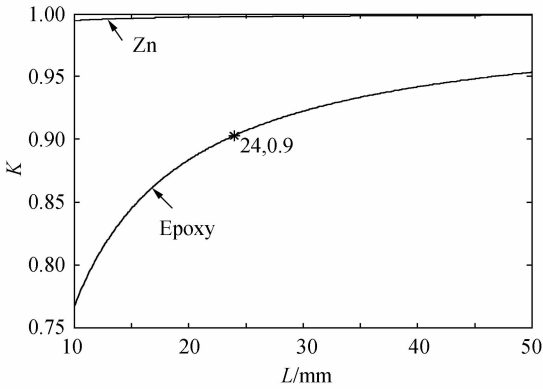


图 4 应变传递效率随中间段长度 L 的变化曲线

Fig. 4 Change curve of strain transfer efficiency with L

为了仿真分析连接层弹性模量对应变传递效率的影响,设光纤弹性模量为 70 GPa,直径为 0.125 mm,FBG 段长度 L 为 20 mm(见图 5)。

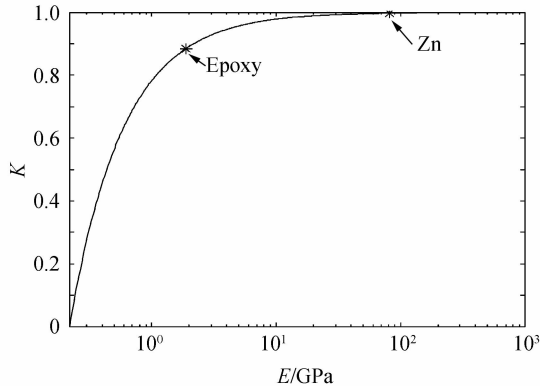


图 5 应变传递效率随封装材料弹性模量的变化曲线

Fig. 5 Change curve of strain transfer efficiency with bond layer elastic modulus

由图 5 可见,应变传递效率随封装材料弹性模量的增大而增大,有机环氧树脂的应变传递效率接近 0.9,

而金属锌的应变传递效率达到 0.99 以上。

3 实验研究

3.1 试样制备

为了验证非栅区封装结构的应变传递效果,采用有机环氧树脂与金属连接方法^[15],分别将两只 FBG 固定在同一根直径为 7 mm 的钢丝上,连接封装材料为分别为环氧有机胶与金属锌,如图 6。

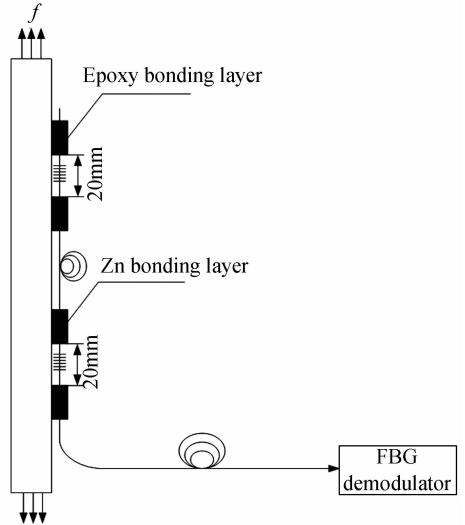


图 6 试验试样示意图

Fig. 6 Schematic diagram test sample

金属化连接原理示意图如图 7。

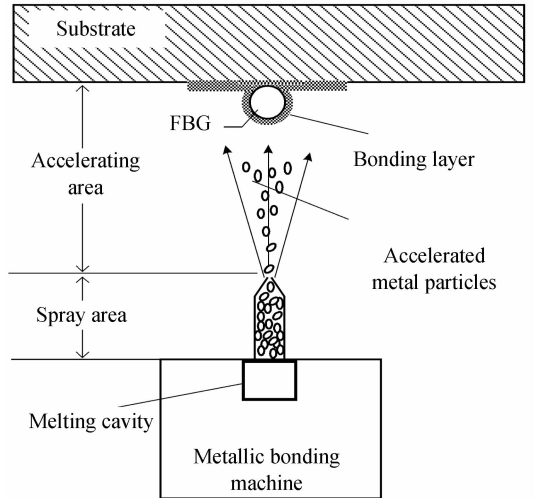


图 7 基于粒子扩散机理的金属化连接技术

Fig. 7 Directly Metallized Bonding FBG to Substrate

如图 7 所示,金属原材熔融雾化后,在金属基底、FBG 膜层表面形成性能较为一致且致密的金属结合体,通过金属结合体中微粒间的结合力,达到使 FBG 与金属基底紧密融合、协同变形的目的。

3.2 试验结果

为了比较两种封装材料的应变传递效果,利用材料试验机对固定有光纤光栅的钢丝进行了五次拉伸试

验,得到的实验结果如图 8.

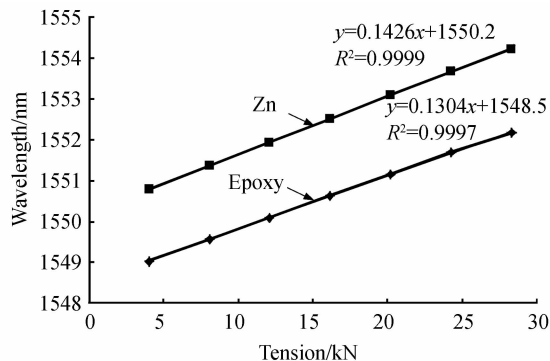


图 8 两种不同封装材料的拉伸实验结果

Fig. 8 Test results

由图 8 可见,利用环氧胶与金属锌封装的 FBG 非栅区封装传感结构,均具备较好的应力感知能力:1) 五次拉伸往复过程重复性均较好;2) 两种封装材料的线性度达到 0.99 以上,表明两种封装材料的应变传递一致性较好;3) 金属锌封装结构的应力感知灵敏度平均值为 0.1426nm/KN, 环氧有机胶封装结构的应力感知灵敏度平均值为 0.1304 nm/KN.

通过给材料试验机加装引伸计测得钢丝实际应变 ϵ_s , FBG 感知的应变 ϵ_f 可通过 FBG 的波长变化量除以 FBG 应变灵敏系数计算得到. 各种应变值下,两种封装材料的应变传递系数见图 9.

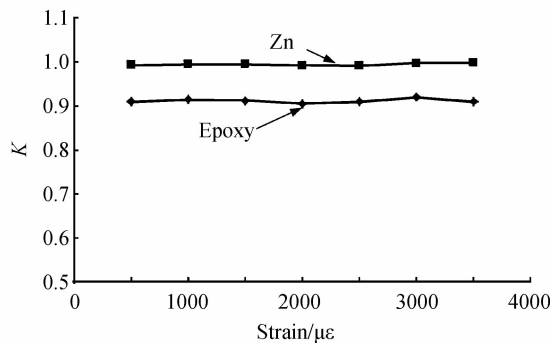


图 9 两种不同封装材料的应变传递系数对比

Fig. 9 Comparison of strain transfer coefficient between two different materials

由图 9 可见,金属锌封装结构的应变传递系数均稳定在 0.995 左右,而环氧有机胶封装结构的应变传递系数在 0.91 左右上下波动,金属锌的应力传递效率较有机环氧胶高了近 9.34%,该试验结果与数值仿真结果较为符合. 受万能试验机的拉力值精确性、环境温度等影响,应变传递系数发生微小的波动.

由此可见,非栅区封装与栅区封装存在较大的差别,并具有栅区封装无法比拟的优势:①非栅区封装传感器仅 FBG 栅区两端受力,栅区不受力;栅区封装是整个栅区受力,被测基体的应力在粘接剂作用下直接传递到 FBG 栅区. ②非栅区封装传感器 FBG 栅区不直接受力,栅区在两端粘接点作用力作用下,可保证栅

区各点受力的完全相等;栅区封装整个栅区受力,被测基体应变传递到栅区各点的应变受粘接层厚度、刚度与粘接层总长度等多参量影响,无法保证栅区受力的完全平均,容易引起 FBG 输出信号的抖动. ③非栅区封装 FBG 传感器的应变传递系数仅与封装中间段长度与封装材料刚度两个参量有关;栅区封装 FBG 传感器的应变传递系数与粘接层厚度、基体刚度、粘接层刚度、粘接层总长度等多参量均有关. 在同样封装材料的情况下,非栅区封装 FBG 传感器较非栅区封装的应变传递系数可提高 20%以上.

4 结论

根据表面粘贴式非栅区封装结构的力学传递过程,理论推导了应变传递函数公式,并仿真分析了应变传递效率的影响因素与变化趋势.

将两只 FBG 分别采用有机环氧胶与金属锌封装在同一根钢丝上,进行了拉伸试验. 两种材料的拉伸曲线线性度均达到 0.99 以上. 金属锌封装结构的应力感知灵敏度平均值为 0.1426 nm/KN, 环氧有机胶封装结构的应力感知灵敏度平均值为 0.1304 nm/KN. 金属锌封装结构的应变传递系数均稳定在 0.995 左右,而环氧有机胶封装结构的应变传递系数在 0.91 左右上下波动,金属锌的应力传递效率较有机环氧胶高了近 9.34%,该试验结果与数值仿真结果较为符合. 为了发挥非栅区封装结构的优势,应适当增大非栅区封装中间段长度并尽可能选用刚性较大的封装材料.

参考文献

- [1] WU Jun, CHEN Wei-min, SHU Yue-jie, *et al.* Embedded strain homogenized FBG sensor for smart cables [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7): 0706002.
吴俊,陈伟民,舒岳阶,等. 锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(7):0706002.
- [2] 李宏男,任亮. 结构健康监测光纤光栅传感技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] TANG Da-qing, YANG De-xing, LIAO Wei, *et al.* Joystick transducer based on fiber bragg gating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 1993-1997.
汤大卿,杨德兴,廖威,等. 光纤光栅式飞机驾驶杆杆力传感器研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11):1993-1997.
- [4] WU Jing, WU Han-ping, HUANG Jun-bin, *et al.* Large range FBG sensor for ship structure health monitoring [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(2): 311-317.
吴晶,吴晗平,黄俊斌,等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布喇格光栅应变传感器[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(2):311-317.
- [5] WU Hui-juan, LI Shan-shan, LU Xiang-lin, *et al.* A novel method for simultaneous intrusion detection and fire alarm in a single FBG-based fiber fence monitoring system configuration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1671-1676.
吴慧娟,李姗姗,卢祥林,等. 一种新型光纤光栅围栏防火入侵同步预警系统[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11):1671-1676.
- [6] LI Yu-long, HU Yong-tao. Application of optical fiber Bragg grating in welding monitoring [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(1): 2803-2812.

- 李玉龙,胡勇涛. 光纤布喇格光栅在焊接监测中的应用[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(1):2803-2812.
- [7] QIAO Xue-guang, FENG Fei, JIA Zhen-an, *et al.* Study on pressure sensing technology of a compensable fiber grating[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, **20**(1):9-11.
乔学光,冯飞,贾振安,等. 光纤光栅高压传感器封装技术实验研究[J]. 光电子激光, 2009, **20**(1):9-11.
- [8] ZHOU G P. Study of FBG sensor package technology[J]. *Piezoelectrics & Acou Stooptics*, 2010, **32**(4):534-538.
周国鹏. 光纤布喇格光栅(FBG)传感器封装技术的研究[J]. 压电与声光, 2010, **32**(4):534-538.
- [9] CHENG Chih-chun, LO Yu-lung, PUN B S, *et al.* An investigation of bonding-layer characteristics of substrate-bonded fiber bragg grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(11): 3907-3915.
- [10] LI Hong-nan, ZHOU Guang-dong, REN Liang. Strain transfer model of fiber sensors under non-axial stress[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):787-793.
李宏男,周广东,任亮. 非轴向力下埋入式光纤传感器应变传递分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(5):787-793.
- [11] WU Ru-jun, ZHEN Bai-lin, HE Peng-fei, *et al.* Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic bragg grating sensors on strain measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(1): 24-30.
吴入军,郑百林,贺鹏飞,等. 埋入式光纤布喇格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(1):24-30.
- [12] CHANG Xin-long, LI Ming, WANG Wei-ping, *et al.* Analyses of parameters influencing strain transfer of embedded polymer optical fiber sensors [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(5):515-519.
常新龙,李明,王渭平,等. 埋入式聚合物光纤传感器应变传递影响参量分析[J]. 激光与红外, 2010, **40**(5):515~519.
- [13] LI Dong-shen, LI Hong-nan. Strain transerring analysis of embedded Firber Bragg Graing sensors[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanic*, 2005, **37**(4): 435-441.
李东升,李宏男. 埋入式连接的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. 力学学报, 2005, **37**(4):435-441.
- [14] WU Jun, CHEN Wei-ming, ZHANG Peng, *et al.* Influence of bond layer characteristics on strain sensing properties of FBG sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(12): 2941-2946.
吴俊,陈伟民,章鹏,等. 粘接层弹性模量对FBG传感器应变传递性能的影响[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(12):2941-2946.
- [15] WU Jun, CHEN Wei-ming, ZHANG Peng, *et al.* Stain sensing method based on directly metallized bonding FBG to substrate [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(12): 2709-2713.
吴俊,陈伟民,章鹏,等. 金属直接连接的布喇格光纤光栅应变测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, **33**(12):2709-2713.