

doi: 10.3788/gzxb20164508.0806003

光纤光栅自动化金属粘接性能

王楚虹, 陈伟民, 傅志芳, 张伟, 雷小华, 刘显明

(重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 用超级电镀技术将光纤光栅应变传感元件自动粘接在金属基体上, 力学模型分析表明该方法可以有效提升应变传递效率. 为了检测该方法的可行性, 从光纤光栅自动化粘接的主要工艺环节出发, 以光纤光栅的光谱特性为研究对象, 以材料力学试验为手段, 对自动化金属粘接后的 3 个光纤光栅进行了光学特性分析和力学特性试验. 结果表明: 自动化金属粘接光纤光栅的成活率为 100%, 光纤光栅粘接后的应变测量灵敏度保持在 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 应变传递效率在 0.98 以上, 线性度达 0.99, 光纤光栅在加卸中的一致性偏差仅为 10^{-6} 、漂移仅为 0.05, 优于传统手工粘接.

关键词: 光纤光栅应变传感器; 自动粘接技术; 超级电镀; 应变传递效率; 一致性

中图分类号: TH89; TH706; TH929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2016)08-0806003-7

Characteristics of Automatic Bonded Fiber Bragg Grating with Metal Materials

WANG Chu-hong, CHEN Wei-min, FU Zhi-fang, ZHANG Wei, LEI Xiao-hua, LIU Xian-ming

(Key Lab of Optoelectronic Technology & Systems Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The super electroplating technique was used to bond the fiber Bragg grating strain-sensing transducer with metal materials automatically, which can enhance the strain transfer efficiency showed by the theoretical analysis. In order to evaluate its effectiveness, started with the technology process and focused on the spectral characteristics, a mechanical experiment was conducted to test mechanical properties of 3 electroplate-bonding fiber Bragg grating strain sensors. The results show that the survival rate of electroplate-bonding fiber Bragg grating strain sensors is 100%, the strain sensitivity is $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, the strain transfer efficiency and linearity are higher than 0.98 and 0.99 respectively, the consistency bias is 10^{-6} , and the zero drift is only 0.05. The performances of electroplate-bonding fiber Bragg grating strain sensors are better than that of manual-bonding fiber Bragg grating sensors.

Key words: FBG strain sensors; Automatic bonding technique; Super electroplating; Strain transfer efficiency; Consistency bias

OCIS Codes: 060.2370; 060.2300; 060.2280

0 引言

光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为一种特殊的敏感元件, 具有质量轻、尺寸小、抗电磁干扰能力强、多路复用等优点, 已被广泛用于桥梁^[1-2]、隧道^[3-4]、建筑^[5-6]等领域.

为了准确感受到被测对象的应变信息, 需要将光纤光栅应变传感元件与被测对象融为一体, 使它们可

以协同形变. 由于光纤极为纤细, 力学强度脆弱, 粘接成活率极低, 因此, 在实际应用中, 通常是先将光纤光栅应变传感元件通过环氧胶等粘接剂封装在金属基片上或者金属管内^[2,7-8], 使其封装成强度可靠的 FBG 应变传感器, 再将封装好的 FBG 应变传感器通过一定的方式安装在待测结构上, 从而保证光纤光栅安装的存活率.

由于环氧胶等粘接剂在长周期应变作用下, 容易

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50975301)资助

第一作者: 王楚虹(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: 543140693@qq.com

导师(通讯作者): 陈伟民(1955-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电技术、光纤传感. Email: wmchen0802@126.com

收稿日期: 2016-02-22; 录用日期: 2016-06-02

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

出现老化、蠕变等问题,这将对应变测量造成一定影响.为了解决此问题,FBG 金属化封装^[9]被提出:在 FBG 的封装中,用金属材料替代环氧胶等有机粘接剂.研究者们用真空蒸镀^[10]、磁控溅射^[11]、化学镀^[12]等方法将 FBG 表面沉积一层薄的金属物质(金属化处理),再用焊接^[11,13-14]等方法将金属化的 FBG 粘接在金属封装结构上.而在整个操作过程中需要将 FBG 放置于高温环境中,这会对光纤光栅造成一定的热损伤,对 FBG 的使用寿命造成影响,并且焊接的人为影响和工艺不确定性也难以保证 FBG 封装的一致性.除此之外,FBG 应变传感器在现场安装时,安装工艺很难控制,特别是安装环境较为复杂时,安装的一致性更难得到保证.而这种先封装再安装 FBG 的方法存在着多级应变传递过程^[15]:被测对象→安装机构→封装结构→FBG.其中,每一级都存在一定的应变损失,会降低 FBG 的应变传递效率,使其感受到的应变与被测结构的真实应变存在差异,最终引起 FBG 的应变测量误差.可见,采用金属材料封装 FBG,虽然可以避免环氧胶蠕变和老化,但仍存在粘接一致性、应变传递效率、应变测量误差等问题.

为了解决封装与安装引起的这些问题,本文从力学模型上简化了 FBG 的安装,从 FBG 的粘接材料和粘接方法中进一步提高粘接一致性和应变传递效率,从理论上减少了 FBG 应变测量误差.并通过相关实验来验证该方法的可行性,并对其粘接效果进行了评价.

1 FBG 封装

当光纤光栅受到轴向应变作用时,在忽略温度影响的条件下,中心波长的变化与应变的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = K_\epsilon \cdot \epsilon_{\text{FBG}} \quad (1)$$

式中, λ_b 、 $\Delta\lambda_b$ 分别为 FBG 应变传感器的中心波长及其变化量, ϵ_{FBG} 为 FBG 轴向应变, K_ϵ 为 FBG 轴向应变与中心波长变化量的灵敏度系数.可见,FBG 的轴向应变与中心波长的变化量呈比例关系,通过检测中心波长变化量就可以得知 FBG 的轴向应变.

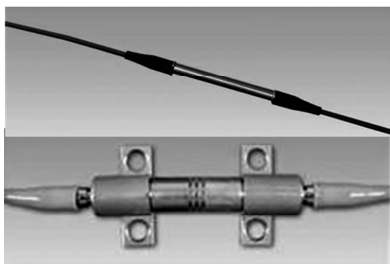


图1 封装的 FBG 传感器

Fig.1 Packaged FBG sensors

但在实际使用中,为了确保 FBG 的存活率,必须事先将 FBG 元件封装成如图 1 的应变传感器,然后再

将这样的 FBG 应变传感器安装在被测结构对象上.但这使得 FBG 不能直接感受被测结构的应变,只能通过封装与安装机构间接地感受被测结构的应变,因此 FBG 应变传感器的封装与安装环节必然会影响应变测量.为了分析这个影响程度,将 FBG 应变传感器简化为如图 2 的等效力学模型.

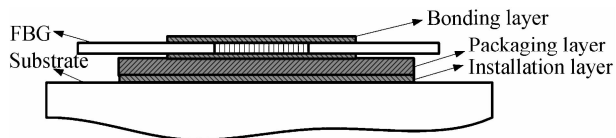


图2 FBG 封装传感器安装的简化力学模型

Fig.2 Simplified mechanical model of installation of packed FBG sensor

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = K_\epsilon \cdot \epsilon_{\text{FBG}} = K_\epsilon \cdot (\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdots \eta_n) \cdot \epsilon_{\text{sub}} \quad (2)$$

式中, ϵ_{sub} 为待测基体的应变, η_i 为各个应变传递层的应变传递效率.在图 2 中,应变的每一层传递过程都可能存在一定的应变损失,则 FBG 应变传感器实际的测量关系就由式(1)演化为式(2).在式(2)中,由于 $\eta_1 \neq \eta_2 \neq \eta_3 \neq 1$,因此 $\epsilon_{\text{FBG}} < \epsilon_{\text{sub}}$,光纤光栅应变传感器的这种多层应变传递结构降低了 FBG 传感器的应变测量灵敏度,而且粘接材料与安装机构的蠕变会引起各个传递层效率 η_i 的变化,从而影响其测量稳定性.

由此看来,FBG 的封装虽然可以增加其机械强度,保证其安装成活率,但 FBG 传感器的应变测量灵敏度和测量稳定性降低了,而造成该后果的主要原因在于多个传递过程中的应变损失.而且,由于各个传递层应变损失的不确定性、因蠕变引起传递效率的波动性、各个传递层的累积性,使得实际应用中每支 FBG 传感器的应变测量灵敏度及其稳定性存在较大差异.因此,减少应变传递层不仅可以增大应变测量灵敏度,还可以减少测量的不稳定因素,提高测量可靠性.

若将图 2 的多层结构简化为图 3 的单层结构,则待测基体的应变 ϵ_{sub} 只需通过单个粘接层即可传递给 FBG 应变传感元件,FBG 的传感公式由式(2)简化为式(3).



图3 直接粘接 FBG 的简化模型

Fig.3 Simplified model of direct-bonding FBG

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = K_\epsilon \cdot \epsilon_{\text{FBG}} = K_\epsilon \cdot (\eta \cdot \epsilon_{\text{sub}}) = k \cdot \epsilon_{\text{sub}} \quad (3)$$

比较式(2)与式(3)可知,这种粘接方式有利于 FBG 传感器高精度应变测量,对于提高应变测量系数 k 有很大帮助.

2 FBG 自动化金属粘接

2.1 FBG 的粘接材料

与图 2 的模型相比,虽然图 3 的模型应变传递环节更少,理论上应该更合理,但是因为其中粘接层是作为被测结构向 FBG 传递应力的唯一途径,其性能的好坏会对式(3)中的粘接层应变传递效率 η 造成直接影响,从而影响着整个力学传递效果.因此,合理地选择粘接材料定会对 FBG 传感器应变传递效率有效提升,从而增加 FBG 传感器的应变测量灵敏度.

目前最常用的环氧粘接剂是一种有机粘接剂,其本身的理化性能就受到配方与工艺、环境温度与湿度的影响,在长期疲劳情况下,更易出现老化、蠕变等问题,这势必引起材料的弹性模量等物理特性发生变化,最终导致不同的应变传递效果.这对于高精度应变测量是绝对不能容忍的,必须予以解决.

为了解决这个问题,根据材料力学关系可知,图 3 中粘接层的应变传递效率 η 与粘接层弹性模量 E 、厚度 t 、以及粘接长度 L 有关^[16],即

$$\eta = f(E, t, L) \quad (4)$$

若在确定其他参数情况下,可得出 η 与粘接层弹性模量 E 之间的关系如图 4^[16].

由图 4 可看出,粘接层弹性模量 E 越大,应变传递效率 η 越大;而且弹性模量 E 越大,其弹性模量的波动 ΔE 造成的传递效率波动 $\Delta \eta$ 越小.因此要保证粘接层的应变传递效率高,稳定性好,就应该选择弹性模量 E 大的材料作为粘接材料.

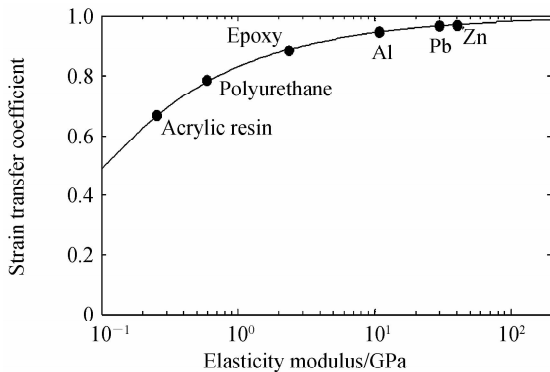


图 4 粘接层弹性模量对应变传递效率的影响

Fig. 4 Influence of elasticity modulus of bonding layer on strain transfer coefficient

根据材料手册可知,环氧的弹性模量 E 约为 3.4 GPa,由图 4 可知,它的应变传递效率 η 约为 0.88;但金属的弹性模量 E 约为 82 GPa,其应变传递效率 η 约为 0.95.显然,金属粘接层的应变传递效率远高于环氧等粘接材料,其因材料弹性模量变化引起的传递效率波动也远低于环氧(如图 4).因此,金属作为粘接材料具有环氧等粘接材料所不具备的独特优势:可以保

证高的传感精度和稳定性.因此,使用高弹性模量的金属来粘接 FBG 肯定会提高 FBG 传感器的稳定性和测量精度.

2.2 FBG 的金属化粘接方法与粘接设备

图 3 的单层粘接结构在应变传递效率及其稳定性方面优于图 2 的多层结构,但图 2 的多层结构却在光纤光栅的安装存活率方面优于图 3 的单层粘接结构.因此如果只是将粘接材料从环氧胶换为金属材料,仍然采用传统环氧粘接的手工工艺,这依然不能保证其安装的存活率,也不能保证粘接的均匀性,势必会影响到其传感精度和稳定性,不能发挥金属粘接层的优势.除此之外,传统的手工粘接工艺也不能保证所粘接的每支 FBG 传感器具有较好的一致性,即使经过大量粘接训练的技术人员也难以做到,偶然误差仍难以消除,而且人工成本也比较昂贵.

因此要发挥金属粘接/安装方式的优势,并从根本上解决手工粘接的存活率、均匀性、一致性三大问题,就必须采用机器设备替代人工操作,实现 FBG 从传统手工粘接向自动化粘接的跨越,以保证应变传感精度.而基于金属微粒扩散机理的金属化连接技术^[17-18],基于电镀原理建立起来的超级电镀技术^[19],都是针对这一目标提出的技术方案,但是它们的效果如何、是否可行,都需要通过实验加以验证,用实验数据进行评判,检验其粘接性能和传感性能.

电镀就是利用电解原理在金属表面镀上一薄层其它金属或合金的过程.如图 5,当阳极、电镀液、阴极、电源构成导电回路时,电镀液中的正价金属离子会在阴极附近得到电子,最终在阴极上沉积金属.若将阴极替换成 FBG 和待测基体,那么在电解原理的作用下,FBG 和待测基体的表面就会慢慢沉积一层薄薄的金属,镀层金属的厚度随着电镀时间的加长而增加,达到一定厚度时,FBG 和待测基体被金属紧紧地包裹并融为一体,这样就实现了金属粘接 FBG 的功能.

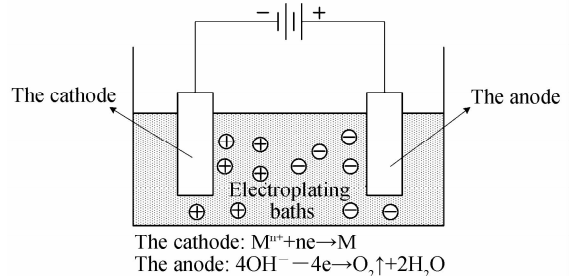


图 5 电镀原理

Fig. 5 Principle diagram of electroplating

但 FBG 是非金属材料,对于阳极而言并不能构成导电回路,阴极处的 FBG 表面并不会沉积金属离子,因此在进行电镀前必须对 FBG 进行金属化处理.由于电镀对象多样,形状各异,待镀物件难以放置在电镀槽

内,而且在进行现场施工时,电镀槽难以携带,为此改进电镀装置,如图 6 利用巧妙的设计将电镀槽倒贴在待镀物件上,使其有更加广阔适用性,而且通过镀液、设备、工艺的改进,形成了一套超级电镀技术,为 FBG 自动化金属粘接奠定了基础。

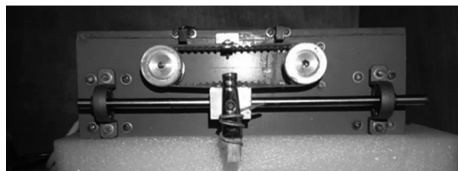


图 6 改进后的电镀装置

Fig. 6 The improved plating equipment

3 FBG 自动化金属粘接性能分析

3.1 金属化粘接实验

在实际应用中,FBG 应变传感器粘接在被测结构的表面上,这些表面可归结为两大类,一类是钢箱梁、钢桁梁类似的平面,另一类是钢管、钢缆一样的曲面,如图 7 的粘接示意图.为了更加切合实际应用条件、便于进行性能测试实验,分别选取金属板和金属棒这两种粘接对象模拟两类表面,并以 H62 铜板和直径为 7 mm 的 45 号钢柱棒为粘接基体来模拟两类不同应用对象.由于金属锌无毒、光亮,具有较好的装饰作用,而且在干燥的空气中较稳定,在潮湿的空气与含有二氧化碳和氧的水中,表面上会生成一层致密的碱式碳酸锌盐为主的覆盖膜,可以保护内部金属不再受腐蚀,因此粘接材料选用金属锌.光栅采用栅段无涂覆层、中心波长为 1545 ± 0.3 nm 单模光纤光栅(深圳太辰光通信有限公司)。

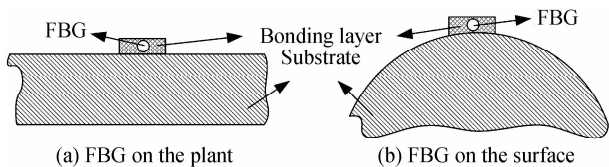


图 7 粘接示意图

Fig. 7 Schematic diagram of FBG bonding

首先对光纤光栅进行预处理:表面除油、粗化、敏化活化、银镜反应.然后对粘接基体表面进行预处理:刻小槽、电净液清洗、蒸馏水清洗、活化液清洗、蒸馏水清洗.最后进行超级电镀,超级电镀电流控制在 200~300 mA,镀锌液温度控制在 35~50℃.经过一段时间摸索、工艺改进,最终分别在 H62 铜板和直径为 7 mm 的 45 号钢柱棒上成功粘接上一批光纤光栅样品。

3.2 FBG 金属化粘接效果的定性评价

为了定性评价 FBG 金属自动化粘接后的表现效果,采用放大 50 倍的显微镜直接观察两批样品,其宏观效果如图 8、微观效果如图 9.观察粘接表面,无论基

体是钢柱棒还是铜板,FBG 与基体结合在了一起。

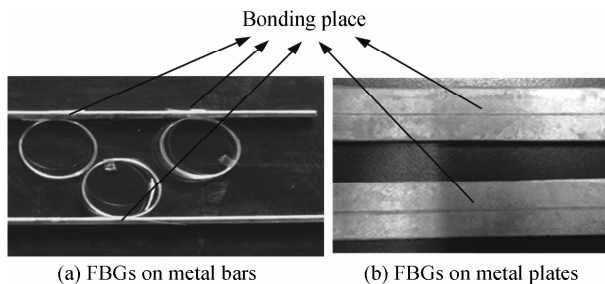


图 8 FBG 金属化自动粘接实物

Fig. 8 The picture of automatic metal bonding of FBG

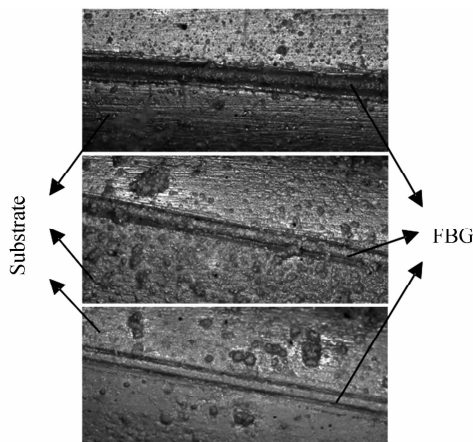
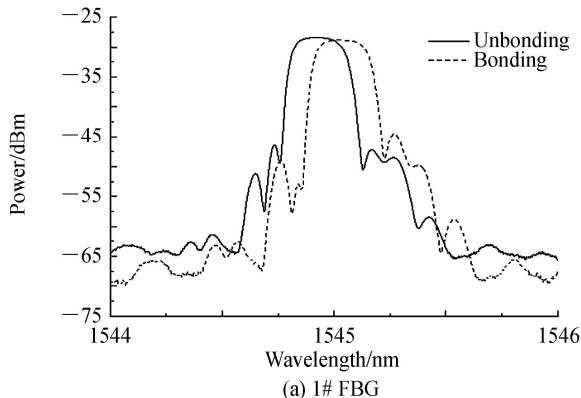


图 9 FBG 与基体粘接处放大图(50×)

Fig. 9 Detail view of the bonding parts (50×)

为了定性评价 FBG 金属自动化粘接对光纤光栅的性能影响,用 SI720 高精度光纤传感分析仪(波长分辨率 0.25 pm,精度 1 pm)测量其粘接前后的输出光谱,其结果如图 10.由图 10 可知,光谱形状大致相同,表明在整个粘接过程中对 FBG 没有造成损害,而粘接后的 FBG 光谱相对粘接前的 FBG 光谱有一定平移,表明在粘接过程中有一定的应力产生,但这并不影响 FBG 的力学传递性能.经以上判断,FBG 自动化金属粘接的成活率为 100%,完全可以保证 FBG 粘接的成活率.在整个电镀过程中,超级电镀最短用时大约 10 min,如果继续优化超级电镀参数,缩短超级电镀时间,则有可能实现现场自动化金属粘接 FBG.



(a) 1# FBG

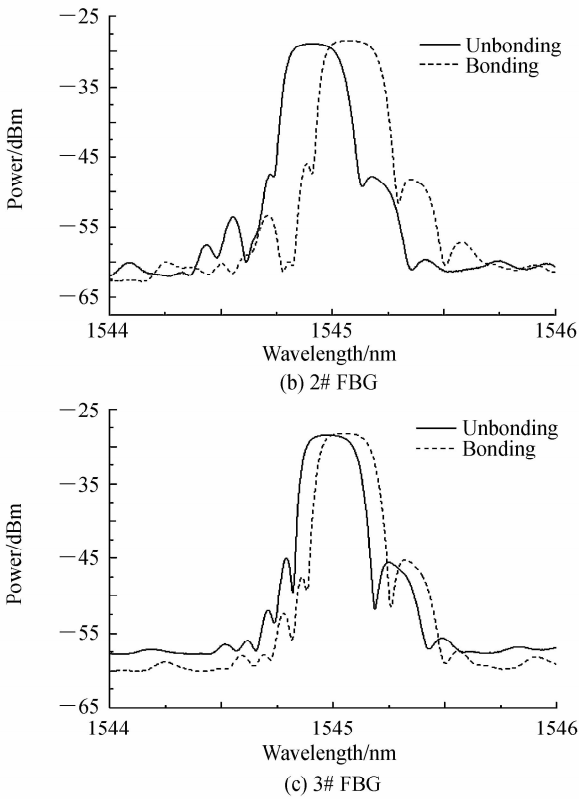


图 10 粘接前后 FBG 光谱对比

Fig. 10 Comparison diagram between unbonding FBGs and bonding FBGs of spectrums

3.3 FBG 金属化粘接质量的定量评估

为了进一步定量评估 FBG 自动化金属粘接技术的传感性能,对其力学特性进行了实验,随机选取粘接好的 3 支 FBG 传感器进行拉力实验,实现应变传递评估.采用自行开发的如图 11 的高精度拉力实验系统,将粘接有 FBG 的钢柱棒样品固定在拉力机上,通过加载不同的砝码来精确控制给样品施加的应变,从 $260 \mu\epsilon$ 开始,在每加载 $260 \mu\epsilon$ 时读取 FBG 的反射光谱,一直加载到 $3120 \mu\epsilon$ 时停止加载,再依次卸载到 $260 \mu\epsilon$ 并读取光谱,此为一次加卸载过程,如此往复三次,进行三次加卸载,图 12 为实验的实物图.

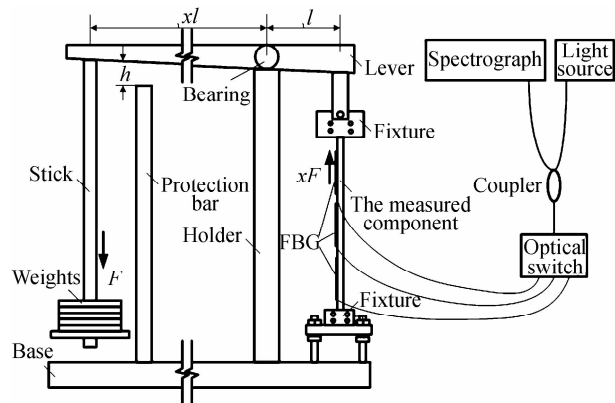


图 11 实验系统

Fig. 11 System diagram of the experiment

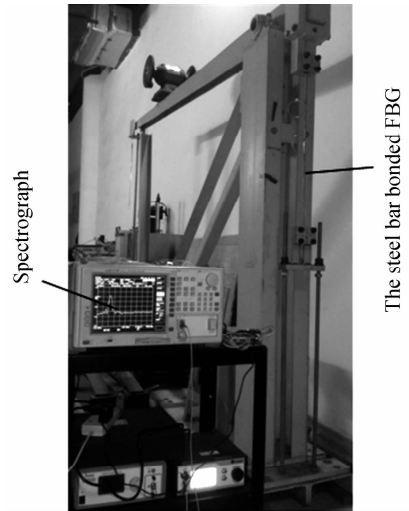


图 12 实验实物

Fig. 12 The picture of the experiment

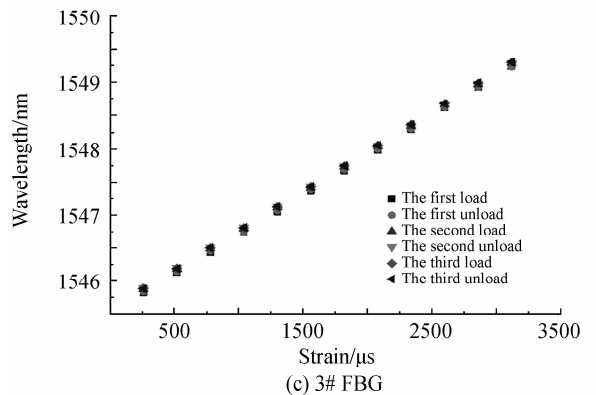
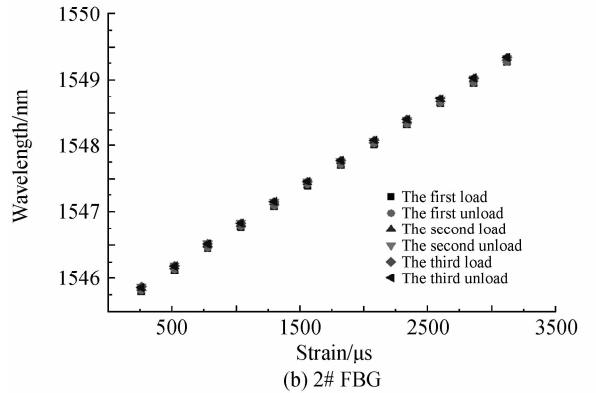
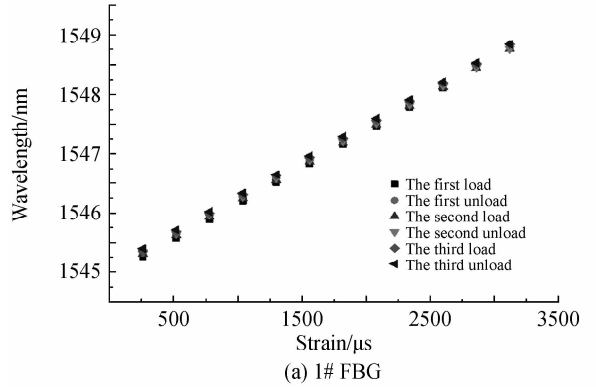


图 13 FBG 中心波长与基体应变关系

Fig. 13 The relationship between central wavelength and the strain of objects

对以上拉力实验的光谱数据,利用 LabVIEW 软件解调出 FBG 中心波长,得到中心波长与基体应变之间的关系如图 13,在相同的应变下,每次加卸载的中心波长基本重叠,并且在每次加卸载过程中,中心波长与应变之间呈现良好线性度,没有滞回,表明光纤光栅能够准确地感受基体的应变值,且光纤光栅与基体结合牢固。

为了能更准确地评价其应变传递效果,光纤光栅的中心波长与基体应变之间的关系,通过 6 次加载、卸载的平均值进行直线拟合,其结果如表 1。拟合直线的斜率表示待测基体的应变与中心波长的灵敏度系数,都处于 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 左右,表明自动化金属粘接的 FBG 一致性较好,拟合直线的线性相关度也达 0.99 以上,这说明力学传递线性度好。根据式(3)得出应变传递效率 η 也都在 0.99 以上,接近于 1,与有机胶粘接的实际传递效率 0.475^[14]相比,得到了较大提升,由此可以看出,自动化金属粘接 FBG 可以展现出金属良好的力学传递关系。在实验刚开始时,FBG 处于小应变环境,此时的力学传递过程较为理想,FBG 的反射光谱也无畸变,随着实验的进行,FBG 处于大应变环境,此时 FBG

的力学传递差异很容易得到放大,而这些差异都会在 FBG 的光谱中表现出来。为了找出力学传递的缺陷,单独查看大应变下 FBG 的光谱,并将其与小应变下的光谱进行对比,得到它们的相关度,结果显示,在小应变和大应变下 FBG 的光谱相关度达 0.9 以上,表明无论是大应变还是小应变,应变从基体传递到 FBG 的力学途径是一样的,而且在 FBG 在大应变条件下,金属粘接层依然表现出良好的应变传递性能。为了分析 FBG 在 6 次加卸载过程中应变传递系数 k 的一致性,对 6 次加卸载分别进行直线拟合,得出 $k_1 \sim k_6$ 6 个斜率,并求出 6 个斜率的标准差,其数量级在 10^{-6} ,说明 6 个斜率相差非常小,每次加卸载应变传递一致,而用胶粘接光栅,加卸载的应变传递系数 k 是不一致的(加载 $0.78 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、卸载 $0.88 \text{ pm}/\mu\epsilon$,标准差为 0.05)^[19],相差较大。与此同时,6 个截距 $b_1 \sim b_6$ 的标准差没有超过 0.05,说明每次加卸载过程中没有滞回,而使用胶粘光栅,加卸载中的截距却差别很大,有明显的滞回现象^[14]。由此可得出:利用超级电镀技术实现的自动化金属粘接 FBG 可以实现光纤光栅与基体协同变形的目的。

表 1 各项指标

Table 1 Indicators of FBG

Number	Fitting	Linearity	Transfer efficiency	The standard deviation of slope	The standard deviation of intercept	Spectral correlation
1#	$y=0.001210x+1545.016$	0.99996	0.9986	9.24×10^{-6}	0.0500	0.9899
2#	$y=0.001208x+1545.547$	0.99996	0.9973	2.82×10^{-6}	0.0269	0.9418
3#	$y=0.001192x+1545.553$	0.99980	0.9836	3.58×10^{-6}	0.0270	0.9511

综上所述,实验中自动化金属粘接 FBG 后的表面形态良好,在粘接过程中没有造成损伤,存活率达到了 100%,其应变测量灵敏度达到 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 左右,应变传递效率在 0.98 以上,线性度达 0.99 以上,无论是大应变还是小应变,金属粘接层依然表现出良好的应变传递性能。

4 结论

在超级电镀技术下,光纤光栅应变传感元件可以自动粘接在金属基体上,粘接层的材料为金属锌,粘接的表面效果良好,其成活率达到了 100%。在力学性能测试中,这种粘接方法不仅可以使 FBG 应变测量灵敏度提高到 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 左右,线性度达 0.99 以上,而且其应变传递效率也都在 0.98 以上,与有机粘接剂较低的应变传递效率相比具有很大优势;在每次加卸载过程中,无滞回现象,重复性和一致性也表现优良;甚至在大应变条件下,应变传递依然很好。由此可知:超级电镀技术可以比较好地实现光纤光栅传感元件自动化金属粘接,力学性能表现优异。若继续深入探讨镀液的优化、装置的改进、工艺的优化等问题,超级电镀将有

望实现现场自动化金属粘接 FBG 传感元件,并在实际应用中得到推广。

参考文献

- [1] XIA Q, TIAN Y D, ZHU X W, *et al.* Structural damage detection by principle component analysis of long-gauge dynamic strains[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2015, **54**(2): 379-392.
- [2] WU J, CHEN W M, SHU Y J, *et al.* Embedded strain homogenized FBG sensor for smart cables [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(07): 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**(07): 0706002.
- [3] SUN L, SUN Q Q, REN L, *et al.* A new method for underground pipeline corrosion monitoring applied FBG [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 6-10.
孙丽,孙茜茜,任亮,等. 应用光纤布喇格光栅传感器监测地下管道腐蚀的新方法研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(1): 6-10.
- [4] TONDINI N, BURSI O S, BONELLI A, *et al.* Capabilities of a fiber Bragg grating sensor system to monitor the inelastic response of concrete sections in new tunnel linings subjected to earthquake loading [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015, **30**(8): 636-653.
- [5] KESAVAN K, RAVISANKAR K, SENTHIL R, *et al.* FBG Sensor technology to interfacial strain measurement in CFRP-strengthened concrete beam [J]. *Experimental Techniques*, 2015, **39**(5): 21-29.

- [6] HU Z X, MA Y B, TAN D J, *et al.* Oil pipeline sliding monitoring system based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 33-36.
胡志新, 马云宾, 谭东杰, 等. 基于光纤光栅传感的管道滑坡监测方法研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 33-36.
- [7] YU X J, YU Y L, ZHANG M, *et al.* Study on the strain and temperature densing characteristics of FBG packaged by the copper slice [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1325-1328.
于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1325-1328.
- [8] ZHAO X F, LV X Y, WANG L, *et al.* Research of concrete residual strains monitoring based on WLI and FBG following exposure to freeze-thaw tests[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, **116**: 40-48.
- [9] FAN D. Experimental study of sense characteristic based on metalized package fiber bragg grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuator*, 2006, **19**(4): 1234-1237.
范典. 光纤光栅金属化封装及传感特性试验研究[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(4): 1234-1237.
- [10] SEKAR R, SHIVANANJU B N, LAKSHMI K P, *et al.* Dual functional performance of fiber Bragg gratings coated with metals using flash evaporation technique[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, **18**(4): 183-185.
- [11] 水彪, 金属化封装光纤光栅传感技术研究[D]. 湖北:武汉理工大学, 2012, 13-16.
- [12] PENG G, ZHANG H, LI Y L, *et al.* Research on electroless Cu-plating on fiber Bragg grating sensor [J]. *Materials Review*, 2008, **22**(9): 77-79.
彭刚, 张华, 李玉龙, 等. 光纤 Bragg 光栅传感器化学镀铜研究[J]. *材料导报*, 2008, **22**(9): 77-79.
- [13] 姜智超, 金属化光纤 Bragg 光栅钎焊智能金属结构[D]. 江西:南昌大学, 2012, 35-36.
- [14] HUANG G J, YIN Y G, DAI F, *et al.* Investigation on the sensibility and fatigue reliability of fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(6): 45-47.
黄国君, 殷昉毓, 戴锋, 等. 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研究[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(6): 45-47.
- [15] SHU Y J, CHEN W M, ZHANG P, *et al.* Investigation on evaluation theory of fiber Bragg grating tensile fatigue property[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 805-811.
舒岳阶, 陈伟民, 章鹏, 等. 光纤布喇格光栅器件应力疲劳评价理论研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(7): 805-811.
- [16] LIU H, CHEN W M, ZHANG P, *et al.* Influence of metal bonding layer on strain sensing performance of FBG [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(4): 642-648.
刘浩, 陈伟民, 章鹏, 等. 金属化粘接层对 FBG 应变传感性能的影响[J]. *光电子·激光*, 2013, **24**(4): 642-648.
- [17] WU J, CHEN W M, ZHANG P, *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. 金属直接连接的布拉格光纤光栅应变测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2012, **33**(12): 2709-2713.
- [18] CHEN W M, WU J, ZHANG P, *et al.* Metallized bonding technology of Fiber Bragg Grating strain sensor [J]. *Sensor Letters*, 2012, **10**(7): 1476-1479.
- [19] 张桂花, 表面黏贴式光纤光栅传感原理及其实验研究[D]. 西安:西安科技大学, 2013, 46-48.