

文章编号 1004-924X(2018)10-2380-09

一步超声法金属化封装 FBG 的传感特性

戎丹丹¹, 张钰民^{1,2}, 宋言明¹, 孟凡勇¹, 骆 飞^{1,2*}

(1. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016;

2. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100192)

摘要:为解决传统胶封传感器普遍存在的蠕变、老化问题,本文提出基于一步超声法的光纤光栅表面金属化封装方法。在相同条件下分别对有聚酰亚胺涂覆层和无涂层的两种 FBG 进行金属化封装,研究了封装后 FBG 传感器的光谱、热学和力学特性,并利用扫描电子显微镜对其横截面的微观形貌进行了表征。结果表明:封装后有涂覆层 FBG 的反射光谱无明显畸变、边模抑制比大于 10 dB,温度灵敏系数达 34.63 pm/°C,应变灵敏系数为 1.18 pm/ $\mu\epsilon$,应变传递效率达 98.5%,线性度达 0.999,均优于无涂层的 FBG 传感器。当温度从 14.2 °C 突变到 80 °C 经过多次冲击试验,发现金属化封装无涂层的 FBG 的温度增敏结构被破坏,而有涂层的 FBG 传感器仍保持优异的温度响应特性。SEM 图显示,金属合金与有无涂覆层的光纤和金属基底都结合致密。该方法无需对光纤进行表面金属化预处理,操作简单易行,在恶劣环境、超长服役时间的光纤传感应用领域中具有重要的价值。

关键词: 光纤布拉格光栅;聚酰亚胺;一步超声法;应变传递效率;温度响应

中图分类号: TN253; TG496 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182610.2380

One-step ultrasonic method to investigate characteristics of metal-packaged FBG sensors

RONG Dan-dan¹, ZHANG Yu-min^{1,2}, SONG Yan-ming¹, MENG Fan-yong¹, LUO Fei^{1,2*}

(1. Beijing Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

* Corresponding author, E-mail: feiluomail@gmail.com

Abstract: A one-step ultrasonic welding approach for metal-packaged fiber Bragg grating (FBG) sensors was proposed to solve the problem of aging and creep in the field of traditional adhesive packaging. FBGs with and without polyimide coatings were bonded to the surface of an aluminum alloy substrate via one-step ultrasonic welding. The spectrum and thermal and mechanical properties of the bonded FBGs were studied. Additionally, the cross sections of the FBG sensors were analyzed by a Scanning Electron Microscope (SEM). The results reveal that the reflection spectrum of the coated FBG sensor has no obvious distortion, and the side-mode suppression ratio is higher than 10 dB. It is

收稿日期:2018-06-05;修订日期:2018-07-25.

基金项目:长江学者与创新团队发展计划(No. IRT_16R07);北京市优秀人才培养计划(No. 2015000020124G074);高等学校学科创新引智计划(No. D17021)

shown that the temperature sensitivity coefficient of the polyimide-coated FBG is $34.63 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, the strain sensitivity coefficient is $1.18 \text{ pm}/\mu\epsilon$, the strain transfer efficiency is 98.5% , and the linearity reaches 0.999 , the value of which is higher than that of the uncoated FBG sensor. After performing several repetitive temperature impact tests at temperatures ranging from 14.2°C to 80°C , it is found that the uncoated metal-packaged FBG sensor is destroyed, whereas the coated sensor maintains excellent temperature response characteristics. The SEM results show that the metal alloy bonded well to the surface of the coated and uncoated optical fibers. Furthermore, the one-step ultrasonic welding technique was confirmed to not require metallic pretreatment on the FBG surface; thus, the technique is relatively simple and requires less time to implement. The results indicate that the polyimide coating can effectively improve the reliability of metal-packaged FBG sensors for measuring temperature and strain, which would be useful in rigid-environments and for long-term sensing.

Key words: Fiber Bragg Grating (FBG); polyimide; one-step ultrasonic welding; strain transfer efficiency; temperature response

1 引言

光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 具有体积小、质轻、低损耗、不受电磁干扰、传感性能稳定、高精度、长期耐久性、可实现远程遥感和分布式传感等优点,因此成为高精度温度和应变测量的首选,广泛应用于水利、电力、石化、军工等领域的结构健康监测^[1-2]。为实现结构健康监测,FBG 传感器必须以一定的连接方式与待测件固定连接,通过热传递或协同变形,实现对待测件的温度和应变测量^[3]。但 FBG 本身过于纤细,抗剪切能力差,在实际测量应变或温度时,需要根据实际需求设计相应的封装来适应不同的基体结构,通常采用直接埋入式^[4]、封装后表粘式^[5]及直接表粘接^[6]等方式。其中,直接表粘接方式将 FBG 器件利用黏接剂直接固定于构件表面,减少了传递界面,是最直接、简单、可行的测量方法^[7]。黏接剂的性能好坏会直接影响基片热膨胀或弹性形变传递到 FBG 上的效果,因此,选择合适的黏接剂对 FBG 的测量准确性至关重要。

表贴式粘接一般选用高分子胶黏剂^[8],但这种黏结剂受到高温、高压、强腐蚀等恶劣环境影响易出现老化、蠕变等问题^[9],从而导致传感器与被测件结构形变不一致,测量结果失真甚至传感器失效。金属化封装技术用特性较为稳定的各向同性金属材料代替高分子胶黏剂,可有效解决上述问题^[10]。传统的 FBG 金属化封装方法无法直接在光纤非金属表面进行金属化封装,通常采用

物理^[11-13]或化学的方法^[14-15]将 FBG 表面沉积一层薄膜,使薄膜导电后再进行电镀^[16-17]等二次操作,以达到较厚的金属层要求。目前,常用的金属化封装方法主要有金属熔覆^[18]、电弧喷涂^[19]、激光焊接^[20]、钎焊^[21]和超声波焊^[22]等。其中,金属熔覆、激光焊接和电弧喷涂这些加工技术的加工温度较高,被加工基体金属会存在较大的温度梯度,易叠加残余应力从而造成光栅热损伤甚至断裂失效、反射光谱啾啾、降低传感器耐久性、成活率低等问题。相比之下,钎焊和超声波焊接过程中温度较低,因此更适用于 FBG 传感器的金属化封装^[23]。本文提出一种光纤表面金属化新方法——一步超声波焊接法^[24],可实现 FBG、金属合金和基底材料的直接有效结合,研究了聚酰亚胺涂覆层对一步超声法金属化封装 FBG 传感特性的影响。对相同条件下金属化封装的两支有无聚酰亚胺涂覆层的 FBG 传感器,进行了温度和应变传感特性对比测试,同时结合扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 微观分析。结果表明,有聚酰亚胺涂覆层的 FBG 金属化光纤传感器更具优势。

2 金属化封装 FBG 传感器原理

金属化封装 FBG 传感器的结构示意图如图 1 所示。该传感器采用一步超声法,将有聚酰亚胺涂覆层和无涂覆层的两种飞秒激光刻写的纯石英芯 FBG 在相同条件下直接金属化封装到等强度梁上。为减少 FBG 与被测物之间的应变传递

环节和热传导损失,选择将两支 FBGs 进行串联后,直接固定在被测物表面的单个粘接层结构。运用一步超声法将两支 FBGs 对称粘贴在等强度梁的两侧,使得等强度梁与光纤光栅器件形成一个传感系统。

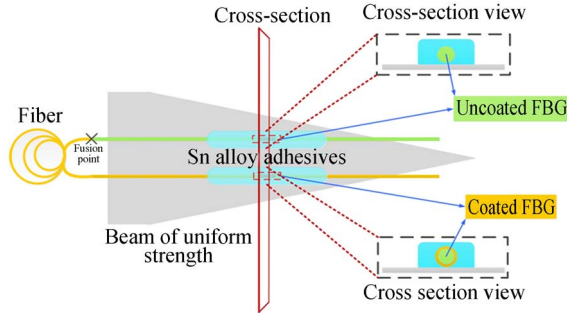


图 1 金属化封装 FBG 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metal-packaged FBG sensors

根据 FBG 耦合模理论,当宽带光源入射到 FBG 时,反射波长峰值与光栅的调制周期和纤芯的有效折射率有关。温度通过热光效应和热膨胀效应来影响反射波长峰值,而应变则通过弹光效应和光栅周期来改变反射峰值波长。所以光栅反射峰值波长随应变和温度的漂移为:

$$\Delta\lambda_B = K_T \Delta T + K_\epsilon \epsilon = (\alpha + \xi) \lambda_B \Delta T + (1 - P_e) \lambda_B \epsilon, \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 是反射中心波长; K_T 、 K_ϵ 分别为 FBG 的温度和应变灵敏度系数; $\alpha = (1/\lambda) (\Delta\lambda/\Delta T)$, 为光纤热膨胀系数; $\xi = (1/n_{eff}) (\partial n_{eff}/\partial T)$, 为光纤的热光系数; P_e 为光纤的有效弹光系数; ΔT 为温度变化量; ϵ 为轴向应变。对于单模石英芯光纤而言, $P_e = 0.22$, $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\xi = 6.67 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 都是常数。从而可知,FBG 中心波长的变化量与温度和应变的变化量均呈线性关系。

当单独改变温度时,由于 FBG 被金属粘接在热膨胀系数较大的基体表面,基体形变和热膨胀效应叠加会引起 λ_B 的漂移。封装基底材料为 Al7075-T6 铝合金,其热膨胀系数为 $23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,封装基底材料的热膨胀系数远大于光纤材料本身的热膨胀系数,即满足 $\alpha_{sub} \gg \alpha$,金属化封装增敏后 FBG 传感器的温度灵敏系数 K_{Tmetal} 可表示为^[25]:

$$K_{Tmetal} = \frac{\Delta\lambda_T}{\Delta T} = [\xi + (1 - P_e) \alpha_{sub}] \lambda_B, \quad (2)$$

其中: α_{sub} 是封装材料的热膨胀系数, $\Delta\lambda_T$ 为温度改变中心波长的偏移量。由此可见,温度灵敏系数 K_{Tmetal} 是一个与封装材料热膨胀特征有关的常数。

当待测基底只受轴向应变作用时,在忽略温度影响的条件下,金属粘接的 FBG 中心波长变化与轴向应变之间的关系为:

$$\Delta\lambda_\epsilon = (1 - P_e) \lambda_B \epsilon = K_{\epsilon metal} \epsilon, \quad (3)$$

式中: ϵ 为 FBG 的轴向应变, $\Delta\lambda_\epsilon$ 为应变改变中心波长的偏移量, $K_{\epsilon metal}$ 为应变灵敏系数。由于封装材料会极大地改变 FBG 的传感特性,因此金属化封装 FBG 传感器必须经过标定才能用作实际测量。

3 FBG 金属化封装方法及实验

封装前先用无水乙醇溶液对抛光处理后的等强度梁基底进行超声清洗,然后用蒸馏水反复清洗,将清洗干净的基体静置在空气中自然风干,然后放在加热平台上,加热平台的温度设置为 190°C 。选取两只由飞秒激光刻写的纯石英芯 FBG,用无尘纸沾取无水酒精对刻有栅区的光纤表面进行擦拭,栅区长度为 3.5 mm ,然后将两只 FBG 的两端分别固定在特制光纤夹具上。其中一支有聚酰亚胺涂覆层,厚度为 $15\ \mu\text{m}$,杨氏模量为 2.5 GPa ,剪切模量为 932.8 MPa ,用于增强光纤的力学强度和耐老化性能,中心波长为 1535.204 nm ,反射波谱半峰宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 0.327 nm ;另一支没有涂覆层,中心波长为 1545.276 nm ,FWHM 为 0.352 nm 。通过高精度三维微位移平台同时对两只 FBG 进行同条件预拉伸,启动超声波发生器,运用超声波、超高频振动的焊头将熔融状态的锡合金涂覆在 FBG 的全栅区。最后,关闭加热,让温度自然冷却至室温,完成两只 FBG 传感器的全金属化封装制作。为了提升金属化封装 FBG 传感器的直接金属粘接层与光纤和金属基体的结合力,减小甚至消除迟滞现象,将封装好的 FBG 传感器放入温度设定为 80°C 的恒温箱中,退火 24 h 。整个封装过程中用光谱分析仪进行反射光谱和透射光谱的在线监测,并保存实验数据。

为了对比评价金属化封装两只 FBG 传感器的温度和应变传感性能,同条件下先对传感器进

行温度标定实验。将封装在同一基底上的两只 FBG 传感器进行串联熔接放置在高低温试验箱内,设置高低温试验箱从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,每隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 1 h 。实验过程中,温度变化缓慢可以被认为是准静态的。接着对传感器的应变传感特性进行试验,将 FBG 传感器置于等强度梁基底下,表面固定在应变仪上进行应变传感实验,通过转动微分头从 0 开始,每次加载 $78.092\text{ }\mu\text{E}$ 时读取 FBG 的反射光谱,一直加载到 $702.828\text{ }\mu\text{E}$ 时停止加载,再依次卸载到 0 并读取光谱,完成一次拉伸加载卸载过程。如此往复 3 次,进行 3 次拉伸加卸载。然后,将传感器置于等强度梁上表面,重复加卸载 3 次,实现对两支 FBG 传感器同条件的 3 次压缩拉伸加载和卸载。在应变加卸载实验中,用光谱分析仪和 BaySpec 公司生产的光纤光栅解调仪同时对传感器的反射光谱形状和峰值波长进行监测并记录数据,实验装置如图 2 所示。其中,光谱分析仪型号为 AQ6370D,其分辨率为 0.02 nm ;高低温试验箱型号为 GDW-100,其温度范围为 $-60\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;光纤光栅解调仪的解调范围为 $1525\sim 1565\text{ nm}$,分辨率为 1 pm ;等强度梁基底材质为 Al7075-T6 铝合金,杨氏模量为 72 GPa ,热膨胀系数为 $23\times 10^{-6}/\text{ }^{\circ}\text{C}$,长度 $L=98\text{ mm}$,厚度 $h=3\text{ mm}$;焊接所用金属材料是锡铋(Sn-Bi)合金,共融熔点为 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$,杨氏模量为 54 GPa ,剪切模量为 20.3 GPa 。

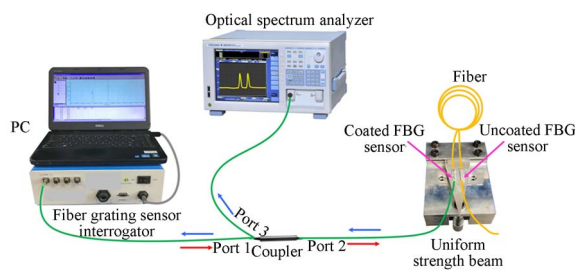


图 2 应变加卸载实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of strain loading and unloading experiment system

对金属化封装的 FBG 传感器进行多次温度冲击测试,对比两支金属化封装的 FBG 瞬时温度波长响应特性。为有效地调节与保持温度稳定,同时保证金属化封装的 FBG 能够均匀地感应温度,采用水浴法对 FBG 传感器进行温度冲击测

试。用热电偶测得室内环境温度为 $14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,将处于室温状态的传感器直接放入温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温水浴箱中,同时采用光纤光栅解调仪进行实时动态数据采集。其中,所用恒温水浴测试箱的温度范围为 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

将经过温度冲击测试后的金属化封装 FBG 的横截面金相组织进行 SEM 微观表征测试。本实验样品必须包含焊缝区、光纤和铝合金基体组织,因此金相样品制备方法与单一金属有异。金相和 SEM 的电子显微镜样品制备方法如下:采用线切割法将光纤传感器从中间截断,沿截面取样,取样包含两支有无涂覆层的光纤、焊缝区和基体组织的实验样品,对取样横截面进行镶样、研磨、抛光处理得到金相组织,再对样品进行喷碳,处理工件表面金相组织结构的几何形状,最后得到电子显微镜试样。使用日本捷欧路(JEOL)公司生产的 JSM-7001F 热场发射 SEM 对传感器横截面的金相组织进行微观形貌表征。

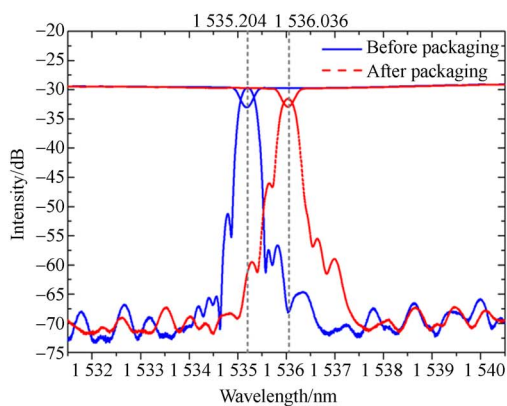
4 实验结果及分析

金属化封装前后两只 FBG 的反射/透射光谱变化如图 3 所示。经同条件拉伸封装后,两只 FBG 的反射光谱形状大致相同;封装前后有涂覆层 FBG 的反射光谱中心波长红移了 0.832 nm ,光谱未展宽,反射率不变;而无涂层的 FBG 反射光谱中心波长红移了 0.724 nm ,光谱出现展宽,反射率下降。相比之下,无涂覆层 FBG 在封装前后,其波谱发生较大畸变,而有涂覆层 FBG 的反射光谱啁啾程度较小,说明聚酰亚胺涂覆层可以有效减少非轴称热残余应力对 FBG 反射光谱的影响。另外,经过 24 h 退火后,金属化封装有涂覆层和无涂层的 FBG 反射中心波长分别出现 0.012 nm 和 0.088 nm 的蓝移,这主要源于传感器内部残余热应力的释放。

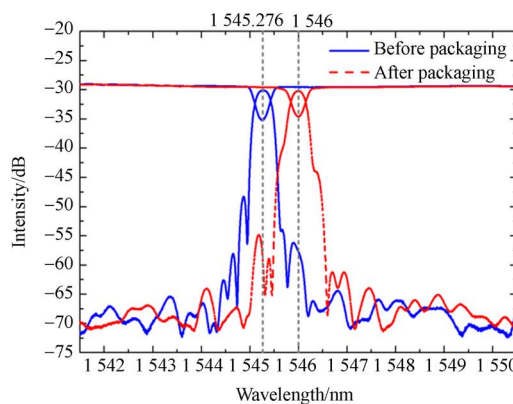
依据监测的峰值波长数据,绘制波长温度曲线如图 4 所示。从图中可以看出,二者呈现很好的线性关系,根据拟合结果可以看出,金属化封装后,有无涂覆层 FBG 传感器的温度灵敏系数分别为 $34.63\text{ pm}/\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $33.67\text{ pm}/\text{ }^{\circ}\text{C}$,是裸 FBG 的 3 倍,略低于理论分析值 $37.801\text{ pm}/\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $38.047\text{ pm}/\text{ }^{\circ}\text{C}$,线性度都超过 0.999 。实验值与理论值之间有一定的差异,原因除了温度控制的精度不

高外,主要是由于特种锡合金粘接层与金属基底的热膨胀系数不同,也就是说当温度变化导致等

强度梁基底发生形变时,并不能引起 FBG 发生同等程度的形变。



(a) 有涂覆层 FBG
(a) Coated FBG



(b) 无涂覆层 FBG
(b) Uncoated FBG

图 3 封装前后有涂覆和无涂覆 FBG 的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectra of polyimide coated and uncoated FBG during package process

由于全金属化封装的 FBG 传感器受到压缩

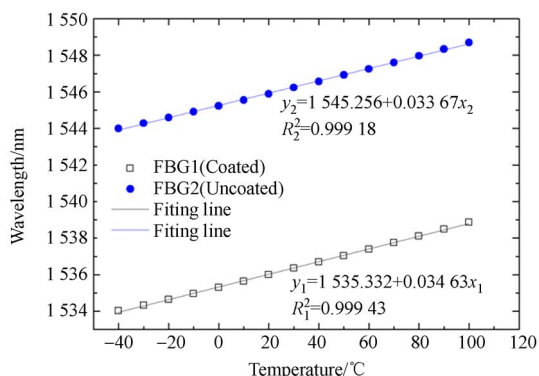
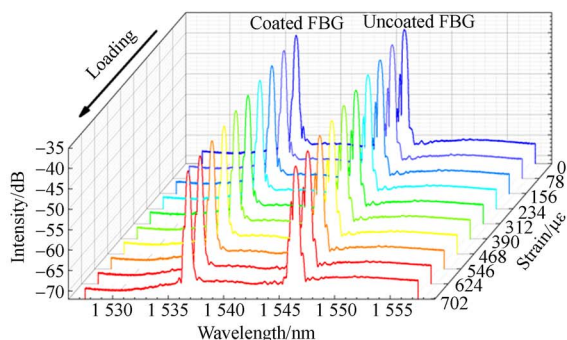


图 4 温度传感实验数据

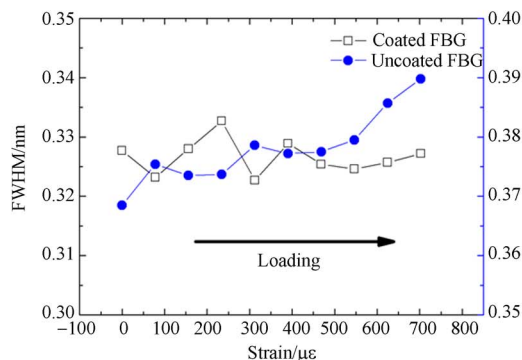
Fig. 4 Data of temperature sensing tests

或拉伸轴向应变时存在内部残余应力,光纤光栅反射光谱波形将发生展宽,应变拉伸和压缩的加载过程中光栅反射光谱和 FWHM 变化趋势如图 5 所示。由图 5(a)和 5(b)可知,在第一次应变拉伸加载过程中有无涂覆层 FBG 的反射光谱波形未发生明显改变,加载完成前后对应的边模抑制比分别有 1.5 dB 和 2 dB 的降低;有涂覆层 FBG 的 FWHM 在整个过程中未发生明显变化,而无涂覆层 FBG 的 FWHM 呈上升趋势。由图 5(c)和 5(d)可知,在第一次应变压缩加载前后两只 FBG 传感器的反射光谱边模抑制比都降低了 0.8 dB,无涂层的 FBG 的半峰宽随应变量的增大而缓慢减小,而有涂层的 FBG 的半峰宽变化趋势趋于平稳。



(a) 应变拉伸加载中的光谱

(a) Spectral during strain tensile



(b) 应变拉伸加载中的半峰宽

(b) FWHM of FBG sensors during strain tensile

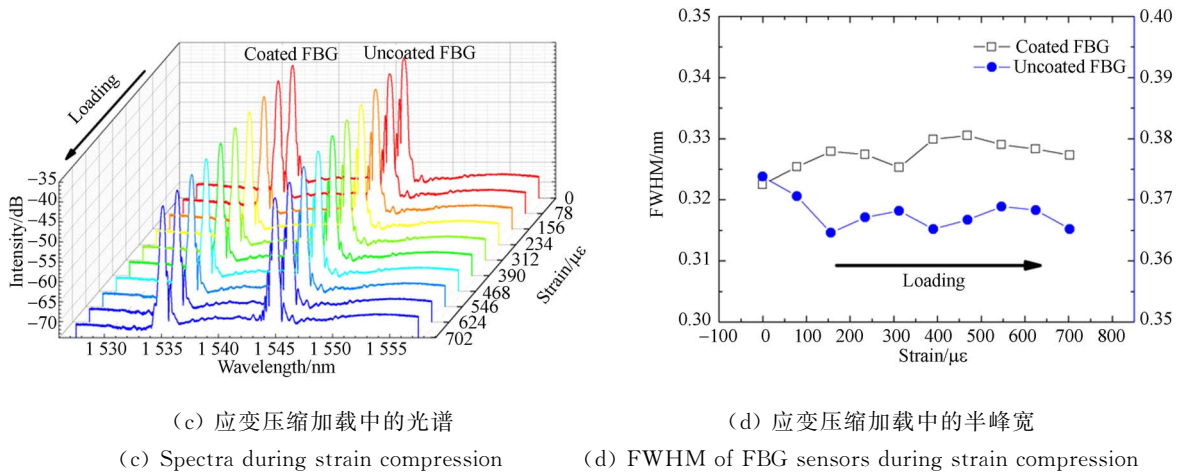


图 5 应变加载过程中两只 FBG 传感器的反射光谱和半峰宽的变化

Fig. 5 Reflectance spectra and FWHM of two FBG sensors during strain loading

对三次应变拉伸和压缩加卸载实验的光谱数据,利用 MATLAB 寻峰算法解调出金属化封装的两只 FBG 传感器的中心波长,得到中心波长与等强度梁基体应变之间的关系,如图 6 所示。其中,应变的正负号仅代表拉伸加载和压缩加载的方向。每次加卸载过程中,中心波长与应变之间呈现良好的线性关系,无回滞,表明光纤光栅能够准确感受基体的应变值,且 FBG 与基体结合牢靠。

在相同的应变下,每次拉伸和压缩加卸载的中心波长基本相等。将中心波长与基体应变的关系,通过 3 次拉伸加卸载和 3 次压缩加卸载的平均值分别进行直线拟合,得到有无聚酰亚胺涂层的 FBG 传感器的平均斜率,分别如图 6(a)和图 6(b)所示,计算出两支 FBG 传感器斜率的最大值和最小值偏差分别为 1.3 % 和 2.5 %,说明金属化封装的 FBG 传感器具有很好的应变重复传感能力。

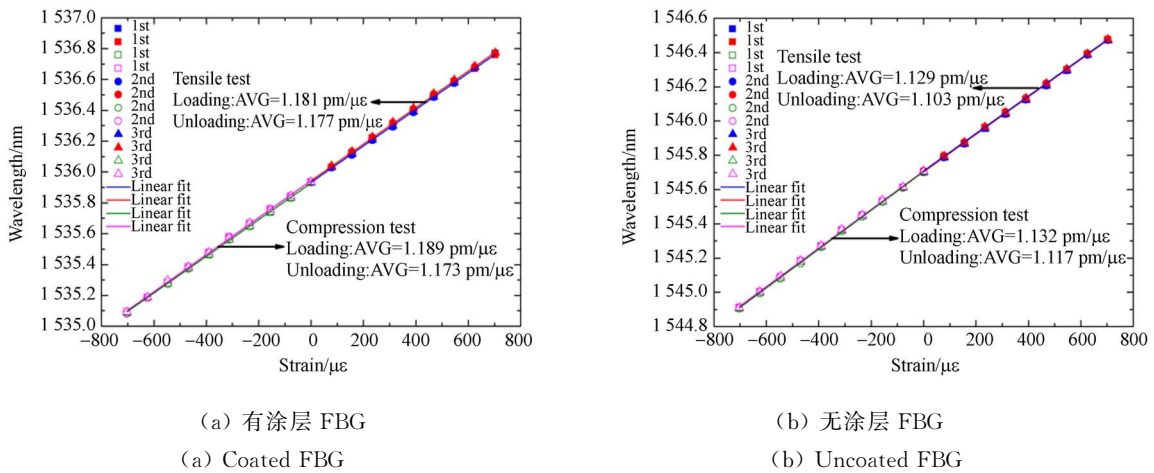


图 6 应变拉伸和压缩测试结果
Fig. 6 Strain tensile and compression test results

所有平均斜率的平均值分别为 $1.18 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $1.123 \text{ pm}/\mu\epsilon$,分别作为金属化封装的有涂覆层和无涂覆层 FBG 的应变灵敏系数,与理论值 $1.198 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 、 $1.206 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 相差很小。对于选择金属直接粘接 FBG 到基体的封装方式,待测基体的应变只需通过单个粘接层即可传递给 FBG 应

变传感元件,设应变传递系数为 ξ ,基底应变为 ϵ_{sub} ,FBG 传感器的轴向应变为 ϵ ,则有:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_\epsilon \epsilon = K_\epsilon g (\xi \epsilon_{\text{sub}}). \quad (4)$$

计算得到,金属化封装的有涂层 FBG 的应变传递系数 ξ_1 为 98.5 %,大于无涂层 FBG 的 ξ_2 (93.1 %)。经过线性拟合得到波长和应变的线

性相关系数都在 0.999 以上,说明金属化封装 FBG 具有良好的应变传感性能。另外,由于一步超声焊接材料是熔点较低的 Sn-Bi 合金,当金属化封装 FBG 传感器测量的环境温度低于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度升高对 Sn-Bi 合金的杨氏模量的影响较小^[26],因而不会造成应变传递系数的降低。

当温度从 $11.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 突然改变到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,金属化封装 FBG 传感器的波长漂移量和温度响应关系如图 7 所示。由图可知,两只金属化封装 FBG 从初始波长到波长稳定的时间小于 4.5 s ,而用铜管和高温陶瓷黏接剂封装 FBG^[27] 的响应时间为 50 s ,由此说明该金属化封装 FBG 传感器用于温度动态监测具有优异的响应特性。经过多次温

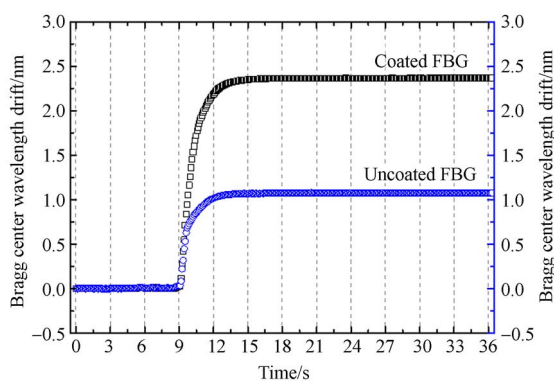
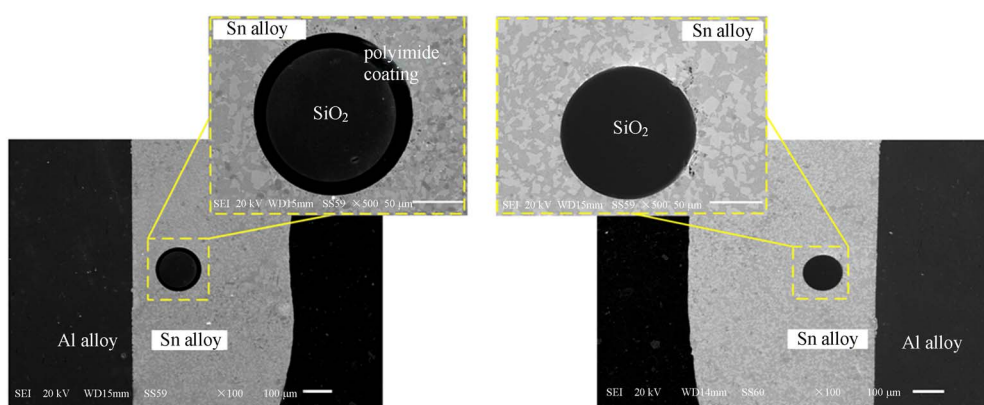


图 7 波长温度响应时间特性

Fig. 7 Response of center wavelength of two FBG sensors to temperature change

度冲击实验后,发现去涂覆的 FBG 的中心波长漂移量突变为 1.077 nm ,远小于根据式(2)和式(3)得到的理论漂移量 $(80 - 11.6)\text{ }^{\circ}\text{C} \times 0.03367\text{ nm}/^{\circ}\text{C} = 2.303\text{ nm}$,其原因在于光纤与锡合金的热膨胀系数差异过大,在多次瞬态升降温的过程中,金属黏接剂和无涂层的 FBG 之间出现相对滑动,因而温度灵敏度系数降低,增敏封装结构被破坏,测温结果失真。而有涂层的 FBG 传感器仍保持优异的温度响应特性,说明有聚酰亚胺涂层的 FBG 用于制作一步超声法金属化封装 FBG 传感器具有更高的传感测量可靠性。

用 SEM 对经过温度冲击测试后的金属化封装 FBG 传感器的截面金相组织进行微观表征,结果如图 8 所示。其中,图 8(a)所示为金属化封装聚酰亚胺涂覆层 FBG,图 8(b)所示为金属化封装无涂覆层的 FBG。结果表明,一步超声法金属化封装对光纤无损伤;锡合金与基底之间结合致密;锡合金与有聚酰亚胺涂覆层以及无涂覆层的 FBG 之间结合紧密、无裂纹、断层、分层等现象,说明该金属化封装方法比其它方法更有优势。由于裸 FBG 本身易折、脆弱,在没有涂覆层保护的情况下进行一步超声波焊接很容易发生机械损坏,成功率低于有聚酰亚胺涂覆层保护 FBG。因此,在实际封装工艺中选取有聚酰亚胺涂层保护的 FBG 能有效提高封装成功率和安装成活率。



(a) 有涂层 FBG 传感器的 SEM 图

(b) 无涂层 FBG 传感器的 SEM 图

(a) SEM images of coated FBG sensor

(b) SEM images of uncoated FBG sensor

图 8 两只 FBG 传感器横截面金相组织的 SEM 图

Fig. 8 SEM images of transverse section of two FBG sensors

5 结 论

本文运用一步超声法在相同条件下分别对有无聚酰亚胺涂覆层的两种 FBG 进行金属化封装,对封装后的 FBG 传感器进行温度、应变特性测试和 SEM 表征分析。试验结果表明,金属化封装有涂覆层 FBG 的温度灵敏系数为 $34.63 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是裸 FBG 的 3 倍;应变灵敏系数为 $1.19 \text{ pm}/\mu\epsilon$,应变传

递效率为 0.984;拟合线性度均达 0.999 以上,优于无涂覆层 FBG 的传感测量特性。SEM 结果显示,金属合金与有无涂覆层的光纤和金属基底结合得很好。相比于无涂覆层 FBG,有涂覆层 FBG 在瞬时温度冲击测试中的表现更加稳定。该金属化封装方法无需对光纤表面进行预处理,操作简单易行,采用有聚酰亚胺涂覆层 FBG 进行金属化封装,可以获得传感性能更可靠、结构更简单、寿命更长的全金属化封装 FBG 智能传感器。

参考文献:

- [1] KIM S W. Characteristics of strain transfer and the reflected spectrum of a metal-coated fiber Bragg grating sensor [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 96:83-93.
- [2] 敬世美,张轩宇,梁居发,等. 飞秒激光刻写的超短光纤布拉格光栅及其传感特性[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 449-454.
JING SH M, ZHANG X Y, LIANG J F, *et al.*. Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 449-454. (in Chinese)
- [3] 李红,祝连庆,刘锋,等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8): 1744-1750.
LI H, ZHU L Q, LIU F, *et al.*. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1744-1750. (in Chinese)
- [4] JOHN J S, ADAM J H, MARCELO J D. Characterization of embedded fiber optic strain sensors into metallic structures via ultrasonic additive manufacturing [J]. *SPIE*, 2016, 9803(20): 1-10.
- [5] 刘士华,陈涛,李瑞亚,等. 基片式 FBG 温度传感器胶粘贴效果对其性能影响的研究[J]. *光子·激光*, 2016, 27(7): 692-698.
LIU SH H, CHEN T, LI R Y, *et al.*. Research on the influence of adhesive stick effect on the performance of substrate FBG temperature sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2016, 27(7): 692-698. (in Chinese)
- [6] 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): 145-150.
TAIN SH ZH, ZHANG G Q, WANG D P. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2014, 41(8): 145-150. (in Chinese)
- [7] 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]. *光子·激光*, 2013, 24(4): 642-648.
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. (in Chinese)
- [8] MOU C, SAFFARI P, LI D, *et al.*. Smart structure sensors based on embedded fiber Bragg grating arrays in aluminum alloy matrix by ultrasonic consolidation [J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(3): 54-57.
- [9] 刘明尧,季冬亮,肖爽,等. 胶黏剂黏弹性对粘贴式 FBG 应变传递的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1307-1318.
LIU M Y, JI D L, XIAO SH, *et al.*. Effect of adhesive viscoelasticity on strain transfer mechanism of bonded FBG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1307-1318. (in Chinese)
- [10] 王楚虹,陈伟民,傅志芳,等. 光纤光栅自动化金属粘接性能[J]. *光子学报*, 2016, 45(8): 63-69.
WANG CH H, CHEN W M, FU ZH F, *et al.*. Characteristics of automatic bonded fiber Bragg grating with metal materials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 63-69. (in Chinese)
- [11] HSIAO T C, HSIEH T S, CHEN Y C, *et al.*. Metal-coated fiber Bragg grating for dynamic temperature sensor [J]. *Optik*, 2016, 127(22): 10740-10745.
- [12] GONZALEZ T G, ZORNOZA A, FRAGA S, *et al.*. Laser cladding-based metallic embedding technique for fiber optic sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 1018-

- 1025.
- [13] ZHANG X, ALEMOHAMMAD H, TOYSERKANI E. Sensitivity alteration of fiber Bragg grating sensors with additive micro-scale bi-material coatings [J]. *Measurement Science & Technology*, 2013, 24(2): 025106.
- [14] LI Y, WANG Y, WEN C. Temperature and strain sensing properties of the zinc coated FBG [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(16): 6463-6469.
- [15] KIM S W, JEONG M S, LEE I, *et al.*. Static mechanical characteristics of tin-coated fiber Bragg grating sensors [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2014, 214:156-162.
- [16] WEN C J, LI Y L. Effects of metal coating on the fiber Bragg grating temperature sensing characteristics [J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 63(8):762-770.
- [17] CHO W J, HWANG A R, KIM S W. Residual strain characteristics of nickel-coated FBG sensors [J]. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, 2017, 41(7):613-620.
- [18] HAVERMANN D, MATHEW J, MACPHERSON W N, *et al.*. Temperature and strain measurements with fiber Bragg gratings embedded in stainless steel 316 [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12):2474-2479.
- [19] DENG F, HUANG Y, AZARMI F, *et al.*. Pitted corrosion detection of thermal sprayed metallic coatings using fiber Bragg grating sensors [J]. *Coatings*, 2017, 7(3):35.
- [20] ALEMOHAMMAD H, TOYSERKANI E. Metal embedded optical fiber sensors: laser-based layered manufacturing procedures [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, 133(3): 031015.
- [21] MCKEEMAN I, NIEWCZAS P, KHAN S. A comparison of brazed metal and epoxied fiber Bragg grating strain sensors under high strain regimes[C]. *25th International Conference on Optical Fiber Sensor, IEEE*, 2017: 103233E.
- [22] ZHU Z, XIAO Q. Research on the ultrasonic welding of titanium alloy after embedding fiber Bragg grating [J]. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 2017:91-102.
- [23] 李玉龙, 胡勇涛. 光纤布拉格光栅在焊接监测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11):2803-2812.
- LI Y L, HU Y T. The application status of the optical fiber Bragg grating in the field of welding monitoring [J]. *Opt. Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2803-2812. (in Chinese)
- [24] ZHANG Y, ZHU L, LUO F, *et al.*. Fabrication and characterization of metal-packaged fiber Bragg grating sensor by one-step ultrasonic welding [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(6):067103.
- [25] LI H, ZHU L, DONG M, *et al.*. Analysis on strain transfer of surface-bonding FBG on Al 7075-T6 alloy host [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(3): 1233-1236.
- [26] GAIN A K, ZHANG L. Growth mechanism of intermetallic compound and mechanical properties of nickel (Ni) nanoparticle doped low melting temperature tin-bismuth (Sn-Bi) solder [J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2015, 27(1):781-794.
- [27] MAMIDI V R, KAMINENI S, RAVINUTHALA L N, *et al.*. Characterization of encapsulating materials for fiber Bragg grating-based temperature sensors [J]. *Fiber & Integrated Optics*, 2014, 33(4):325-335.

作者简介:



戎丹丹(1996—),女,安徽阜阳人,2011年于合肥师范学院获得学士学位,主要从事光纤光栅传感及其封装技术的研究。E-mail: 936501622@qq.com

导师简介:



骆飞(1962—),男,江苏扬州人,博士,教授,1982年和1987年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,1991年于重庆大学获得博士学位,主要从事光纤传感技术与光纤激光技术的研究。E-mail: feiluomail@gmail.com