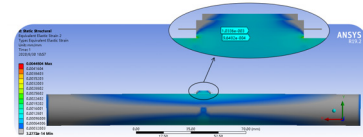




DOI: 10.12086/oe.2021.200195

毛细铜管封装的内嵌式镀金光纤布拉格光栅温度和应力传感器



张燕君, 高海川, 张龙图, 刘 强, 付兴虎*

燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室,
河北 秦皇岛 066004

摘要: 为了实现复杂、恶劣环境下工程机械表面无损的应力监测方式, 实现对大型工程机械的实时动态监测, 提出了基于磁控溅射技术的光纤布拉格光栅(FBG)应力传感器封装方法。并对完全嵌套(整个栅区嵌套毛细铜管)和两端嵌套(栅区两端嵌套毛细铜管)两种封装方法开展了研究。从理论分析和有限元仿真的角度比较了传感器的增敏效果, 前后结果一致。制备了传感器实物并进行了温度、应力和对比实验。仿真实验结果表明, 该模型下 FBG 传感器能提高约 7.5% 的灵敏度。温度实验表明第二种封装结构的温度反馈相关系数 R^2 达到了 0.99948, 在 30 °C~80 °C 范围内呈现良好的线性度; 应力实验的相关系数 R^2 也达到 0.99924, 灵敏度为 6.14 pm/MPa, 在该实验搭建的解调系统下精度达到 0.05 MPa, 可以快速、精确地解调应力。对比实验表明, 光栅解调仪组成的监测系统比应变片组成的监测系统具有更高的精度, 最大偏差值减小了 59.8%。嵌套毛细铜管的金属化方式结合有机胶固定的封装结构简单、灵敏度和精度高, 可以满足大型工程机械表面无损实时健康监测的需求。

关键词: 光纤布拉格光栅; 磁控溅射; 温度传感器; 应力传感器

中图分类号: TP253; TP212

文献标志码: A

张燕君, 高海川, 张龙图, 等. 毛细铜管封装的内嵌式镀金光纤布拉格光栅温度和应力传感器[J]. 光电工程, 2021, 48(3): 200195
Zhang Y J, Gao H C, Zhang L T, et al. Embedded gold-plated fiber Bragg grating temperature and stress sensors encapsulated in capillary copper tube[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(3): 200195

Embedded gold-plated fiber Bragg grating temperature and stress sensors encapsulated in capillary copper tube

Zhang Yanjun, Gao Haichuan, Zhang Longtu, Liu Qiang, Fu Xinghu*

School of Information Science and Engineering, Yanshan University; the Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract: In order to realize the non-destructive and real-time dynamic stress monitoring method of the construction machinery surface in complex and harsh environments, a fiber Bragg grating (FBG) stress sensor packaging method

收稿日期: 2020-05-30; 收到修改稿日期: 2020-09-24

基金项目: 国家海洋局多功能海洋风电安装平台创新示范项目; 国家自然科学基金资助项目(A030802); 燕山大学基础研究专项课题培育课题(16LG017)

作者简介: 张燕君(1973-), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤传感与信号处理的研究。E-mail: yjzhang@ysu.edu.cn

通信作者: 付兴虎(1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事特种光纤及其传感技术、微纳光纤器件及应用的研究。

E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

based on magnetron sputtering technology is proposed. Two packaging methods of complete embedding (the capillary copper tube embedded in the entire grating area) and two sides embedding (capillary copper tube nested at both ends of the grating area) are studied. The sensitization effect of the sensor is analyzed from the perspective of theory and finite element, and the results are consistent. The physical sensors are made, and temperature, stress, and comparison experiments are carried out. Simulation and experiment show that the FBG sensor improves the sensitivity by about 7.5% under this model. The temperature experiment shows that the temperature feedback correlation coefficient R^2 of the second package structure reaches 0.99948, which shows good linearity in the range of 30 °C~80 °C; the stress experiment correlation coefficient R^2 also reaches 0.99924, and the sensitivity is 6.14 pm/MPa. The accuracy of demodulation system reaches 0.05 MPa, it can demodulate stress quickly and accurately. Comparative experiments show that the monitoring system composed of grating demodulator has higher accuracy than the monitoring system composed of strain gauges, and maximum deviation value smaller 59.8%. The packaging structure of metallization method of embedded capillary copper tube combined with organic glue fixed is simple, high sensitivity, and precision, can meet the needs of large-scale construction machinery surface non-destructive real-time health monitoring.

Keywords: fiber Bragg grating(FBG); magnetron sputtering; temperature sensor; stress sensor

1 引言

传统的电磁式应力监测装置体积大、易受电磁干扰,无法胜任复杂环境。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg grating, FBG)作为一种新型的光学测量元件,体积小、抗电磁干扰、结构简单及易更换等优点,可对大型工程机械进行实时监测,广泛应用于土木工程^[1-4]、机械设备^[5]、医学^[6-7]、航空航天^[8-10]、资源开采和输送^[11-12]、地质^[13]和结构^[14]的监测、基建的安全监测^[15]等各领域^[16]。经过多年发展,布拉格光栅传感器的结构和形式已经多种多样^[17]。有机胶固定的玻璃、陶瓷的管式封装^[6-7]技术被用于测量温度,但其灵敏度均较低,有机胶固定方便快捷,但长期疲劳作用下容易老化、产生蠕变;激光焊接的石英套管封装技术^[18]、TIG焊接的金属封装技术^[19],解决了高温下聚合物粘结材料的不稳定问题,但若用焊接技术将传感器固定于待测物表面时,一定会损坏待测物表面结构,会对大型工程机械的作业安全埋下隐患;利用激光焊接将金属化后的光纤光栅封装在不锈钢基质中^[20]或特殊设计的基体上^[21],同样存在上述问题。将布拉格光栅封装于金属基质中可以显著提高布拉格光栅的机械强度,也会提高传感器的灵敏度;但普通金属在恶劣环境下容易腐蚀,长期可靠性较差,且制作过程过于复杂。若待测物表面不允许有任何损坏且不采用埋入式封装,文献中的焊接技术将无法使用。基于上述问题,需要探索出一种实用、安装便捷且能保持待测物表面无损的光纤光栅传感器封装方法。

光栅金属化封装技术方兴未艾,其中真空蒸发镀

膜技术^[22]较为成熟。利用气相沉积技术,通过电阻丝加热将待镀金属蒸发,金属蒸汽遇到低温材料冷凝制成,其成膜方法简单,膜纯度和致密度高,成膜结构及其性能优良,该技术较成熟但不能控制镀层厚度。磁控溅射技术^[23]是在高压和真空作用下,溅射气体发生电离,带正电的离子在电场的作用下轰击待镀金属,使部分表面原子或分子被轰击出来,从而沉积在施镀件上,溅射技术电子动能比蒸镀大很多,所以成膜致密性好、纯度高,而且可以通过控制溅射时间控制膜的厚度。化学镀膜技术是通过化学反应将待镀金属镀在施镀件上,该技术原理简单,但逐渐被蒸镀和溅射技术所取代。陈伟民团队提出一种基于超级电镀的金属化封装工艺,该方法将固定基片和光栅传感器整体置于电镀装置中,形成的金属镀层致密度高,传感器具有较高的灵敏度、一致性和重复性。王欢等^[24]提出了一种黄铜管封装光纤准直器的非本征法珀温度传感器,有效地提高了光纤传感器的灵敏度和分辨率。基于所提出的实际问题以及布拉格光栅传感器封装的现状,综合考虑了不同传感器结构和光栅金属化技术的优缺点,本文采用了磁控溅射技术结合圆铜管,利用有机胶固定,设计了两种不同的传感器封装结构。采用磁控溅射技术制作的金镀层有效地解决了普通镀层在恶劣环境下的腐蚀问题,同时兼具金属化封装技术的高灵敏度、优良重复性等优势。圆铜管封装光纤传感头能一定程度上增加灵敏度。有机胶固定起到了保护待测物表面结构的作用,同时兼顾经济效益和可更换性。因此,本文所设计的布拉格光栅传感器灵敏度较高,线性度好,经济实用,为工程机械的实时健康

监测提供了有力的技术支持。

2 传感器制备

实验制备了两种封装结构，首先采用相位掩膜法自制了光纤布拉格光栅。因 Au 不易与光纤材料相粘，故先将预制好的光栅利用磁控溅射镀膜技术把一层极薄的介质镍镀上，待其冷却后，再采用磁控溅射镀金防护层，达到了增加传感器机械强度及增加灵敏度的目的。金的理化性质极其稳定，但是造价较高，综合平衡后决定将金镀层的厚度控制在几个微米左右。为了增加传感器的灵敏度，提出在布拉格光栅外嵌套外径约 1.5 mm 的毛细铜管，内部填充铜粉，利用激光焊接使铜与光纤耦合达到密封管口的目的，同时小铜管也方便了传感器的固定。布拉格光栅传感器示意图如图 1 所示。

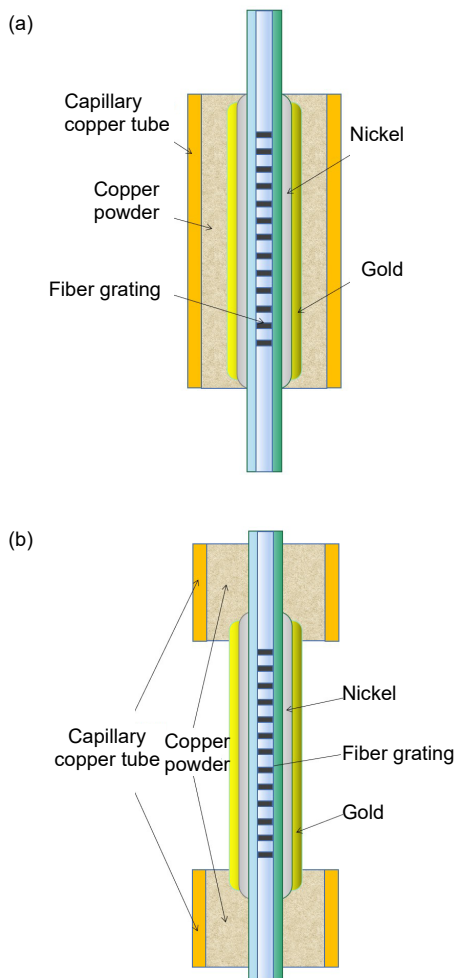


图 1 光纤光栅传感器示意图
Fig. 1 The diagram of fiber grating sensor

为研究毛细铜管的最佳安装位置，实验设计了两种不同位置的封装结构。第一种将长度 9 mm 的小铜管套在布拉格光栅的整个栅区，称为完全嵌套，内部填充铜粉，填充物有利于光栅保持原位，受弯曲应力时反射谱不至于失真。第二种结构将两个长度 5 mm 的毛细铜管固定于光栅的两端，称为两端嵌套，同样采用激光焊接固定毛细铜管。制备好的两种光纤布拉格传感器实物如图 2 所示。



图 2 传感器实物图
Fig. 2 The physical photo of sensors

3 理论及仿真分析

假设一根直径为 D ，长度为 L 的等强度轴受外力产生弯曲应变，图 3(a)、3(b)分别表示普通封装的光纤传感器和嵌套毛细铜管的光纤传感器示意图。

此时等强度轴产生极小的弯曲角度 θ ，假设中间部分长度不变仍为 L ，上下表面长度分别变为 $L + \Delta L$ 、 $L - \Delta L$ ，计算得到：

$$L = 2\pi r\theta \quad (1)$$

$$L + \Delta L = 2\pi r\theta + \pi D\theta \quad (2)$$

$$L - \Delta L = 2\pi r\theta - \pi D\theta \quad (3)$$

式中： r 是轴产生的弯曲半径， θ 是轴的弯曲角度。故 $\Delta L = \pi D\theta$ ，应变定义式为

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

式中： ΔL 是待测物的长度变化量， L 是待测物原来的长度。对于普通封装的光纤布拉格传感器，一般单模光纤直径仅为 125 μm ，对测量结果影响很小，此处忽略光纤直径起到的增敏作用，图 3(a)的应变经计算为

$$\varepsilon_1 = \frac{D}{2r} \quad (5)$$

对于嵌套毛细铜管的光纤布拉格传感器，图 3(b)所示，经过计算它的应变为

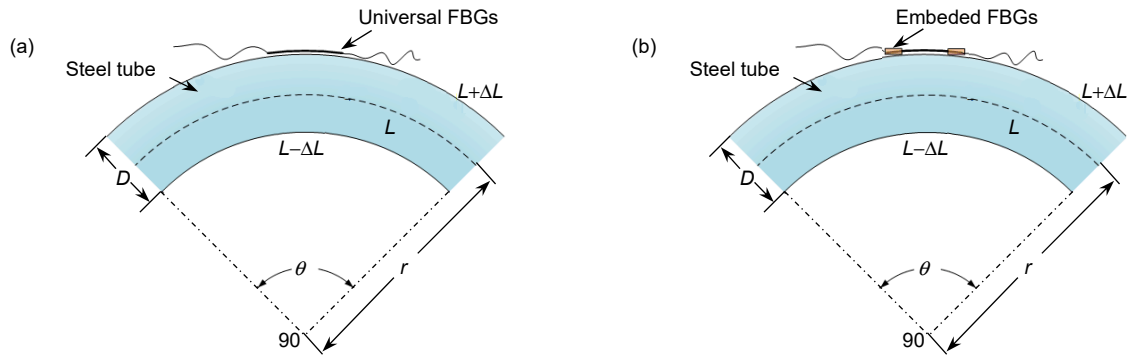


图3 理论分析示意图。(a) 普通封装的传感器；(b) 嵌套铜管的传感器

Fig. 3 Theoretical analysis diagram. (a) Universally encapsulated sensor; (b) Embedded copper tube sensor

$$\varepsilon_2 = \frac{D+d}{2r}, \quad (6)$$

式中 d 为光栅传感器圆铜管的直径。经过计算，嵌套铜管的传感器的应变灵敏度相对于普通封装的传感器提高了

$$\omega = \frac{d}{D}. \quad (7)$$

由弹性力学知识可知，等强度轴的应变变量 ε 和挠度 y 分别为

$$\varepsilon = \frac{6L}{ED_x^3} F, \quad (8)$$

$$y = \frac{6L^3}{ED_x^4} F, \quad (9)$$

其中： E 为等强度轴的弹性模量， F 为轴中部的作用力， D_x 为光纤光栅到轴远端的径向距离(对于图 3(a) 中 $D_x=D$ ，图 3(b) 中 $D_x=D+d$)。联立式(8)和式(9)可得轴表面的应变计算公式

$$\varepsilon = \frac{D_x}{L^2} y. \quad (10)$$

而变形后等强度轴测量点的挠度又可以表示为

$$y = r - r \cos \frac{\theta}{2}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得到

$$\varepsilon = \frac{D_x r}{L^2} (1 - \cos \frac{\theta}{2}). \quad (12)$$

由光纤布拉格光栅的传感原理有如下表达式

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T, \quad (13)$$

式中： $K_\varepsilon = 1 - P$ 为应变灵敏度系数(P 为光纤光栅的弹光系数)， K_T 为温度灵敏度系数，由于应变实验均控制室内温度不变，故 $\Delta T=0$ ，将式(12)代入式(13)，得：

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \frac{D_x r}{L^2} (1 - \cos \frac{\theta}{2}) (1 - P). \quad (14)$$

从数学角度分析，对于此种封装结构的传感器，其在测量弯曲应变时灵敏度提升与参数 d 、 D 有关，而 D 为待测物固定参数，故要想提高传感器的灵敏度，适当增加毛细铜管的直径是唯一的途径。而从弹性力学的角度分析，当待测物发生一定的弯曲产生应变后，等强度轴的 r 、 L 、 θ 均稳定后，对于图 3(a)、3(b) 两种封装结构的传感器，式(14)中 D_x 的值是两种结构唯一的区别，因此图 3(b) 所示结构波长漂移会大一些，所以灵敏度也会有所提高。为了进一步验证理论分析结果，使用有限元分析软件 ANSYS Workbench 19.2 进行如下仿真分析。

建立一个直径 20 mm，长度 200 mm 的圆柱作为待测物模型，其上方直径为 1.5 mm，长度 9 mm 的小圆柱作为简化后的毛细铜管，中间为直径 125 μm 的光纤及光栅，最外层为胶粘剂模型。将模型导入仿真软件，网格划分及结果如图 4 所示。

将仿真模型参数 D 、 d 代入式(7)，计算得到 $\omega=0.075$ ，故理论上应变提升了 7.5%。根据图 4 中所取两点，计算出仿真实验的 $\omega=0.072$ ，仿真实验应变提升 7.2%，与理论计算结果相差 0.3%。其中网格质量，模型简化和胶粘剂的涂覆方法等都是误差产生的因素。此误差在可接受范围内，仿真结果和理论分析基本一致，嵌套毛细铜管的传感器在保护光栅同时也在一定程度上提高了传感器灵敏度。

4 实验结果与分析

实验主要设备选择无锡布里渊电子科技有限公司生产的光纤光栅解调仪，产品型号 FIS-WL-L14.1，自

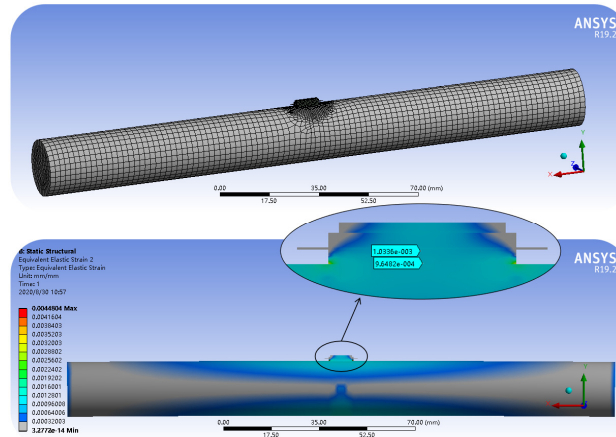


图 4 有限元分析及应力云图

Fig. 4 Stress nephogram by finite element analysis

带激光光源，覆盖波段为 1525 nm~1595 nm，波长分辨率 0.1 pm，扫描频率 1 Hz；采用佰辉公司生产的恒温电热鼓风机控制温度；采用 INSTRON 公司生产的 5980 双立柱落地式电子万能试验拉力机控制拉力；两个布拉格光栅传感器的中心波长均为 1550 nm，3 dB 带宽为 0.15 nm，反射率为 97.58%。

4.1 温度实验

将封装好的传感器放入温控箱中，与光栅解调仪相连，光纤光栅解调仪与普通计算机使用网线连接，实验过程中温控箱升温至预设温度后保温 3 min，保证温控箱内温度均匀且传感器各部分温度一致，记录此时解调仪显示的光栅反射光谱，温度记录范围为 30 °C~80 °C，每间隔 5 °C 记录一次，30 °C~80 °C 称为一次循环，一次循环结束后，待温控箱自然降温至

室温后，再进行第二、三次循环，将所得实验数据导入数据处理软件，用最小二乘法分别拟合三次循环过程，得到拟合曲线如图 5 所示，将各温度测量点的三次反射波长取算术平均值，同样用最小二乘法拟合各点，得到拟合曲线如图 6 所示。

对于温度反馈实验，如图 5(a)所示，完全嵌套封装的传感器具有良好的线性度，三次实验的线性相关系数 R^2 均达到 0.99 以上，但图 5(b)反映出，两端嵌套封装的传感器的线性度更好，三次实验的线性相关系数 R^2 达到了 0.999 以上。对比图 5(a)、5(b)，不管是完全嵌套的传感器还是两端嵌套的传感器都能达到较好的线性度，完全嵌套封装结构的灵敏度比两端嵌套封装结构灵敏度高，是因为相比两端固定方式，中心嵌套固定方式的铜管和填充物的热膨胀效应更明显，所以完全嵌套的封装结构灵敏度高于两端嵌套封装结

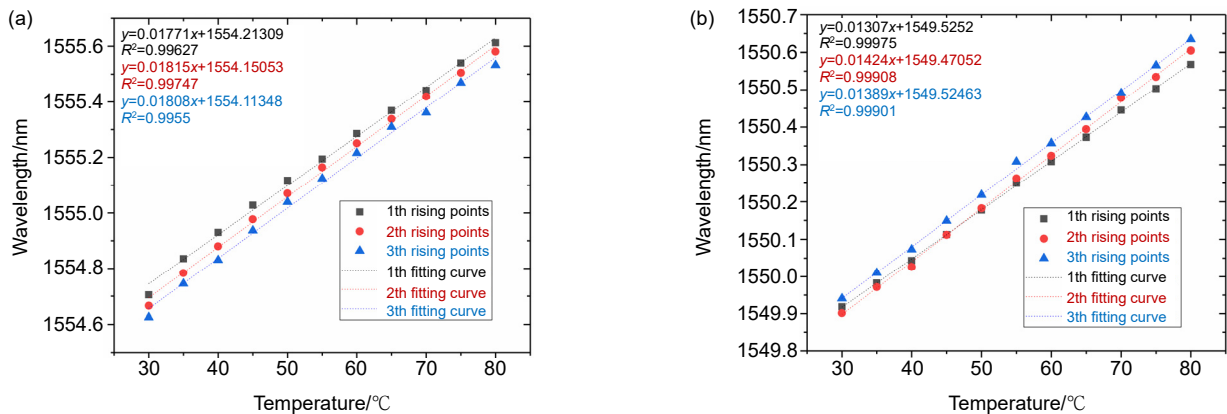


图 5 三次温度循环实验下传感器的数据及拟合处理。(a) 完全嵌套传感器；(b) 两端嵌套传感器

Fig. 5 Sensor's experimental data and fitting processing on three temperature cycle times.

(a) Sensor of whole embed; (b) Sensor of two sides embed

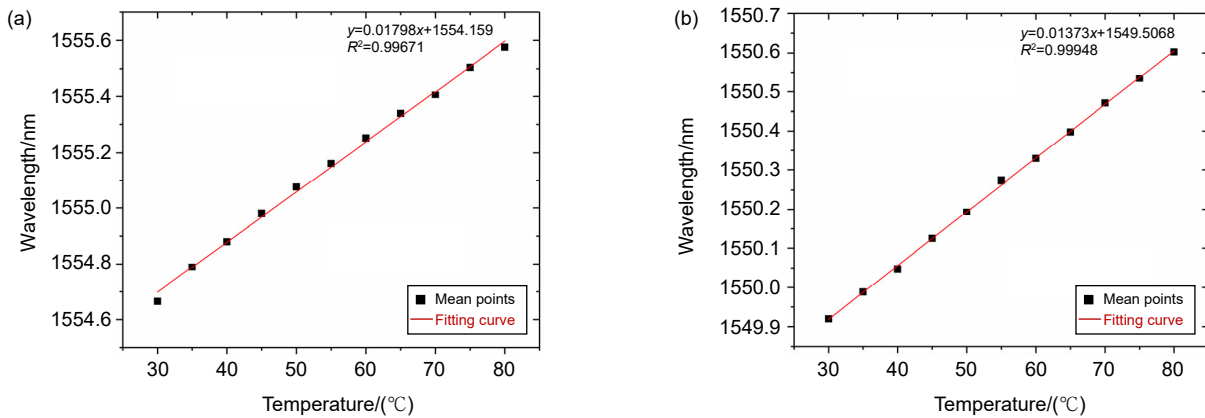


图 6 温度实验数据平均值及拟合处理。(a) 完全嵌套传感器；(b) 两端嵌套传感器

Fig. 6 Experimental data on average and fitting processing of temperature. (a) Sensor of whole embed; (b) Sensor of two sides embed

构。在图 5(a)中，每次升温后，下一次升温的初始波长发生了蓝移，分析原因可能是嵌套铜管的密封口存在缺陷，光纤材料与铜耦合，导致由于传感器中光纤光栅和毛细铜管的膨胀率不同而在密封口产生了轻微滑移。而图 5(b)中三次升温的初始波长漂移现象较图 5(a)轻微。

对比图 6(a)、6(b)两种封装结构的灵敏度 17.98 pm/°C、13.73 pm/°C，经计算，第一种结构的灵敏度比第二种结构的灵敏度高 30.95%。若采用此封装结构制作温度传感器，建议使用完全嵌套的封装结构。

4.2 应力传感实验

实验定制了适应拉力机的金属试件，实验前将待测试件上下表面用砂纸打磨干净并拭去残渣，用酒精棉球擦拭干净待其风干，将制作好的传感器紧贴在试件中部，用胶条先将其初步固定，粘贴时光栅预加预紧力，再用聚力 JL-109 金属胶将光栅传感器固定，放在通风处 12 h 以上，成品如图 7(a)所示；准备 3 个电

阻应变片，用酒精擦拭干净，用 3M 公司生产的 Scotch-Weld MC1500 胶水将其粘贴在试件的另一面，应变片间隔约 20 mm，分布在试件的中心区域，放在通风处 1 h 以上，成品如图 7(b)所示。

将制备好的试件放在电子万能拉力机的夹具上固定好，应变片导线与应变仪相连，布拉格光栅传感器与光纤光栅解调仪相连，用网线将解调仪和普通计算机相连接，搭建的实验系统示意图如图 8 所示。

为避免温度和应力交叉串扰，实验室温度控制在 23 °C 左右，故该实验忽略温度的影响。实验选择应力范围 0~320 MPa 进行测试，间隔 40 MPa 记录一次数据，人工记录各点的反射波长，该实验只反映加载过程的波长变化，每次加载过程称为一次循环，进行三次循环实验，将得到的实验数据导入数据处理软件。采用最小二乘法拟合实验数据，得到拟合曲线如图 9 所示。取三次实验测得波长的算术平均值，用同样方法拟合，得到拟合曲线如图 10 所示。

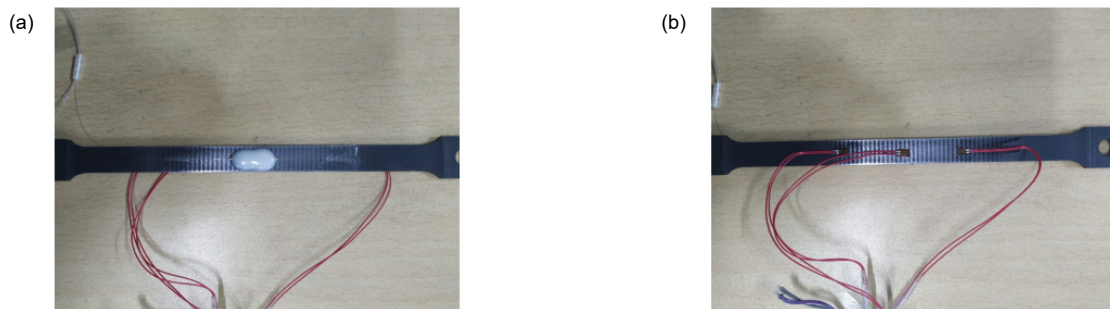


图 7 实验所需试件。(a) 光栅传感器一侧；(b) 应变片一侧

Fig. 7 The specimen for the experiment. (a) The side of grating sensor; (b) The side of strain gauges

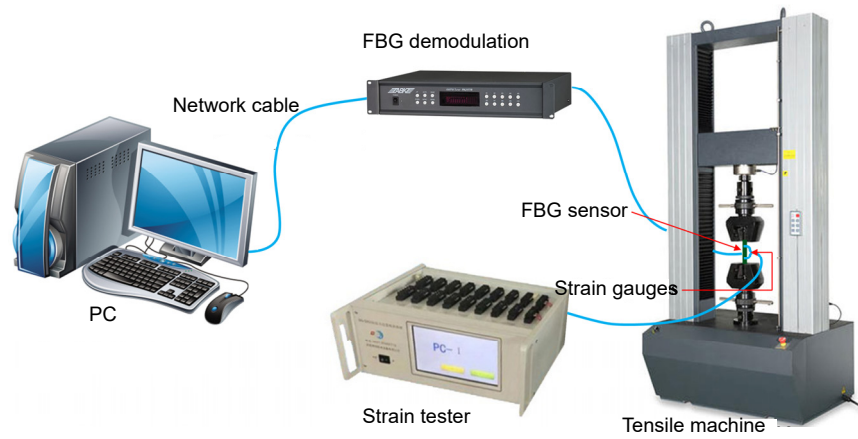


图 8 实验测试系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of experimental test system

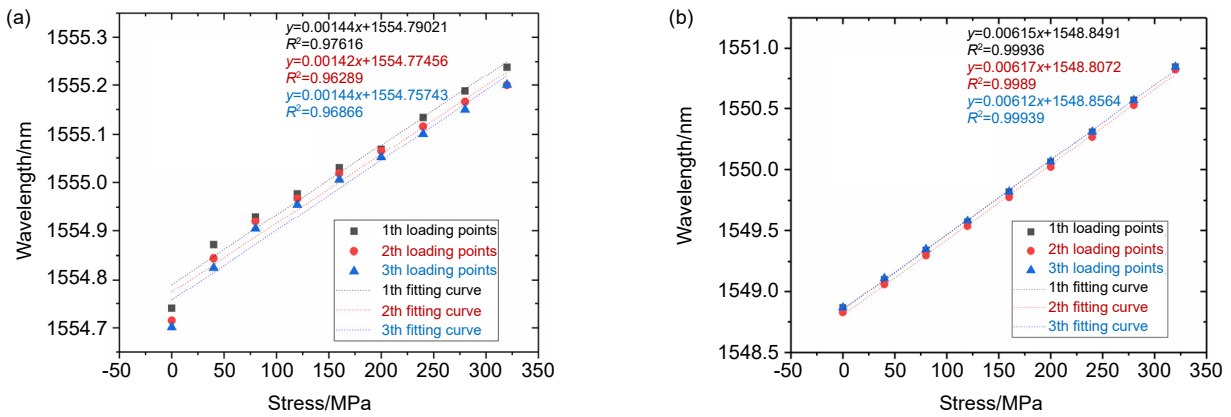


图 9 三次应力循环实验下传感器的数据及拟合处理。(a) 完全嵌套传感器；(b) 两端嵌套传感器

Fig. 9 Sensor's experimental data and fitting processing on three stress cycle times.

(a) Sensor of whole embed; (b) Sensor of two sides embed

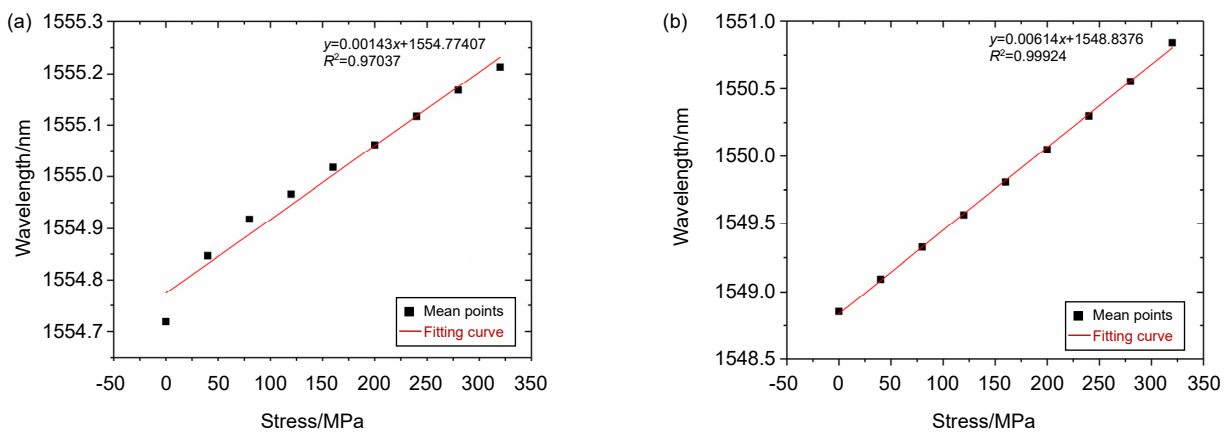


图 10 应力实验数据平均值及拟合处理。(a) 完全嵌套传感器；(b) 两端嵌套传感器

Fig. 10 Experimental data on average and fitting processing of stress. (a) Sensor of whole embed; (b) Sensor of two sides embed

对于应力循环实验如图 9(a)、9(b)所示, 完全嵌套封装结构的传感器存在较严重缺陷, 灵敏度约只有图 9(b)结构的六分之一, 且相关系数 R^2 仅约为 0.97。由图 9(a)也可观察到, 在拟合直线附近的点比较分散, 测量误差较大, 所以完全嵌套的封装结构不适宜作为应力传感器, 原因可能同温度实验相似, 由于封装工艺的缺陷, 当传感头被动拉伸时, 毛细铜管的密封口未能束缚住光纤, 导致光纤出现滑移, 从而出现灵敏度不高、线性拟合度较差等结果。而图 9(b)灵敏度较高, 且相关系数 R^2 均达到了 0.998 以上, 拟合效果较好, 三次测量数据较集中, 重复性优良。

从图 10(a)、10(b)可以得出结论, 两种传感器的灵敏度分别为 1.43 pm/MPa、6.14 pm/MPa, 两端嵌套结构的传感器灵敏度比另一种大 329.4%, 相关系数大 0.02887。对于两端嵌套的封装形式来说, 其精度达到了 0.05 MPa, 达到了大型工程机械结构健康监测的精度要求。对比普通形式的光栅传感器^[25], 其灵敏度为 3.04 pm/MPa, 两端嵌套的封装形式灵敏度是它的 2 倍以上, 故嵌套圆铜管的封装方式能增加传感器的灵敏度, 前述实验也证明了该封装结构在线性度上表现良好, 因此两端嵌套毛细铜管的金属化方式结合有机胶固定的封装结构可以有效解决所提出的监测要求, 并且精度、灵敏度和线性度均较高。

从上述实验可以看出, 传感器的温度和应变灵敏

度均处于较高水平, 为了在动态应力测量过程中有效规避温度、应变交叉敏感问题, 引入如下公式^[26]

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P)\varepsilon + (\xi + \alpha)\Delta T \quad (15)$$

式中: P 为有效弹光系数; ξ 是传感头热光系数; α 是传感头的热膨胀系数; ΔT 是温度变化量。实际测量应力过程中将 $K_T = \xi + \alpha$ 称为温度灵敏度系数, $K_\varepsilon = 1 - P$ 称为应变灵敏度系数, 预先输入解调仪上位机中, 联合参考光栅即可解决温度、应力交叉敏感问题。

从应力实验可以看出, 第二种传感器的线性度和重复性明显优于第一种结构。为了进一步验证第二种传感器的性能, 验证其在实际工作状态下传感器的可靠性, 进行环境模拟测试。将图 10(b)得到的线性关系式 $y = 0.00614x + 1548.8376$ 中的灵敏度系数 k 和初始波长 λ_0 输入到光栅解调仪上位机中, 使用电子万能拉力机拉伸试件, 电子应变片记录试件应变值后, 经关系式 $\sigma = \varepsilon E$ (σ 是试件应力, ε 是试件产生的应变, E 是试件的弹性模量)将应变转化为应力, 结果如表 1 所示。

光栅解调仪显示的应力值, 与表 1 中的求得的应力值和理论应力值汇总, 绘制成表 2 所示。

若忽略系统误差, 由表 1、表 2 可知, 由应变片转化的应力与理论应力最大偏差 6.6 MPa, 而当应力越大时, 偏差有变大的趋势。而由光栅解调仪测得的

表 1 应变转化应力汇总表

Table 1 The summary table of strain convert into stress

Strain/ $\mu\epsilon$		Stress/MPa	Strain/ $\mu\epsilon$		Stress/MPa
Experimental	Average		Experimental	Average	
204		41.47	949		195.33
204	207.33		1002	976.67	
214			979		
386		79.53	1139		234.93
403	397.67		1207	1174.67	
404			1178		
570		117.53	1328		273.4
597	587.67		1403	1367	
596			1370		
759		156.27	1528		314.6
795	781.33		1613	1573	
790			1578		

表 2 理论、应变片、解调仪应力汇总表

Table 2 The stress summary table of theory, strain gauges and demodulation

Theory stress/MPa	Stress/MPa			
	Stress gauge		Demodulation	
	Convert value	Deviate with theory	Value	Deviate with theory
40	41.47	1.47	41.43	1.43
80	79.53	0.47	80.67	0.67
120	117.53	2.47	119.54	0.46
160	156.27	3.73	160.23	0.23
200	195.33	4.67	198.12	1.88
240	234.93	5.07	238.97	1.03
280	273.4	6.6	278.39	1.61
320	314.6	5.4	317.35	2.65

应力最大偏差为 2.65 MPa，且偏差值变化较为稳定，经过计算，光栅解调仪应力值最大偏差比应变片最大偏差小 59.8%。所以由解调仪测得的应力值更接近理论应力，而经应变片测得的应力虽然也比较准确，但是在在大应力时存在些许偏差，所得应力会产生较大误差。

5 结论

光纤布拉格光栅的金属化封装工艺，作为一种封装技术已经被证明具有很大潜力，在此基础上设计了两种不同嵌套方式的传感器。在栅区镀上理化性质稳定的金属提高了机械强度，采用毛细铜管嵌套方式提高了光栅的灵敏度。当传感器被用于测量弯曲应变时，理论分析和仿真实验均表明其能提高约 7.5% 的灵敏度，具有增敏作用。温度实验表明，两种封装结构的传感器在 30 °C~80 °C 具有良好的线性度和重复度，完全嵌套的封装结构灵敏度比两端嵌套的封装结构大 30.95%，但是后者的线性度比前者大 0.00277，且蓝移现象较弱。应力实验表明，两端嵌套的封装结构无论是线性度、灵敏度还是重复性均优于完全嵌套的封装结构，前者比后者的灵敏度大 329.4%，相关系数大 0.02887；经计算，第二种封装结构的精度为 0.05 MPa，在 0~320 MPa 应力范围内，两端嵌套封装结构的传感器应力测量范围大、精度高且可靠性更好。传感器的对比实验也表明光纤布拉格光栅组成的解调系统性能优于传统应变片组成的测量系统。本文提出的光纤布拉格光栅传感器的金属化封装结构灵敏度高、重复性好、工作可靠，为光纤光栅应力传感器的实用化提供

了有力的技术支持。

参考文献

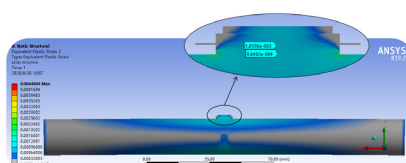
- [1] Lv J L, Hu Z C, Ren G F, et al. Research on new FBG displacement sensor and its application in Beijing Daxing airport project[J]. *Optik*, 2019, **178**: 146–155.
- [2] Van Der Kooij K, Hoult N A. Assessment of a steel model truss using distributed fibre optic strain sensing[J]. *Eng Struct*, 2018, **171**: 557–568.
- [3] Zhou Z, Wang Z Z, Shao L. Fiber-reinforced polymer-packaged optical fiber Bragg grating strain sensors for infrastructures under harsh environment[J]. *J Sens*, 2016, **2016**: 3953750.
- [4] Hong C Y, Zhang Y F, Yang Y Y, et al. A FBG based displacement transducer for small soil deformation measurement[J]. *Sens Actuator A Phys*, 2019, **286**: 35–42.
- [5] Gąsior P, Malesa M, Kaleta J, et al. Application of complementary optical methods for strain investigation in composite high pressure vessel[J]. *Compos Struct*, 2018, **203**: 718–724.
- [6] Zhao Y, Sun W M, Song D W, et al. Effect of ceramic packages on fiber grating measuring temperature probe[J]. *J Appl Opt*, 2012, **33**(6): 1173–1178.
赵颖, 孙伟民, 宋大伟, 等. 陶瓷封装对光纤光栅温度测量探头效果的影响[J]. *应用光学*, 2012, **33**(6): 1173–1178.
- [7] Tian H, Chen T T, Bai Y, et al. Medical miniature fiber grating temperature sensing probe encapsulated with glass[J]. *Opt Precis Eng*, 2017, **25**(12): 3105–3110.
田赫, 陈天庭, 白岩, 等. 玻璃封装医用小型光纤光栅温度传感探头[J]. *光学精密工程*, 2017, **25**(12): 3105–3110.
- [8] Terroba F, Frövel M, Aienza R. Structural health and usage monitoring of an unmanned turbojet target drone[J]. *Struct Health Monit*, 2019, **18**(2): 635–650.
- [9] Wada D, Igawa H, Kasai T. Vibration monitoring of a helicopter blade model using the optical fiber distributed strain sensing technique[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(25): 6953–6959.
- [10] Wei L, Yu L L, Jiang D Z, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm and diamond structure[J]. *Chinese J Lasers*, 2019, **46**(9): 0910003.
魏莉, 余玲玲, 姜达州, 等. 基于膜片与菱形结构的光纤布拉格光栅加速度传感器[J]. *中国激光*, 2019, **46**(9): 0910003.

- [11] Zhao Z G, Zhang Y J, Li C, *et al.* Monitoring of coal mine roadway roof separation based on fiber Bragg grating displacement sensors[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2015, **74**: 128–132.
- [12] Jia Z G, Ren L, Li H N, *et al.* Pipeline leakage identification and localization based on the fiber Bragg grating hoop strain measurements and particle swarm optimization and support vector machine[J]. *Struct Control Health Monit*, 2019, **26**(2): e2290.
- [13] Wang J Y, Jiang L, Sun Z R, *et al.* Research on the surface subsidence monitoring technology based on fiber Bragg grating sensing[J]. *Photonic Sens*, 2017, **7**(1): 20–26.
- [14] Zhang W T, Huang W Z, Li F. High-resolution fiber Bragg grating sensor and its applications of geophysical exploration, seismic observation and marine engineering[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(9): 170615.
张文涛, 黄稳柱, 李芳. 高精度光纤光栅传感技术及其在地球物理勘探、地震观测和海洋领域中的应用[J]. *光电工程*, 2018, **45**(9): 170615.
- [15] Xie K, Tan T, Mu B X, *et al.* Study on fiber Bragg grating displacement sensor with angle steel structure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(9): 180106.
谢凯, 谭滔, 穆博鑫, 等. 角钢结构光纤光栅位移传感器的研究[J]. *光电工程*, 2018, **45**(9): 180106.
- [16] Yue Y, Wang Y, Duan J L, *et al.* Experimental study on fiber Bragg grating monitoring the crack of CFRP concrete composite arch[J]. *Chin J Lasers*, 2015, **42**(8): 0805004.
岳音, 王源, 段建立, 等. 光纤光栅 CFRP 混凝土复合拱裂缝监测实验研究[J]. *中国激光*, 2015, **42**(8): 0805004.
- [17] Kuang Y, Guo Y X, Xiong L, *et al.* Packaging and temperature compensation of fiber Bragg grating for strain sensing: a survey[J]. *Photonic Sens*, 2018, **8**(4): 320–331.
- [18] Zhang X Y, Chen S. FBG temperature sensor with quartz casing package[J]. *Metrol Meas Technol*, 2018, **38**(6): 11–14.
张欣颖, 陈爽. 石英套管封装光纤光栅温度传感器[J]. *计测技术*, 2018, **38**(6): 11–14.
- [19] Grandal T, Zornoza A, López A, *et al.* Analysis of fiber optic sensor embedded in metals by automatic and manual TIG welding[J]. *IEEE Sens J*, 2019, **19**(17): 7425–7433.
- [20] Wang Y B, Li Y L, Lü M Y. Smart cantilever beam of fiber Bragg grating packaged by laser welding[J]. *Laser Infrared*, 2016, **46**(5): 587–592.
王裕波, 李玉龙, 吕明阳. 激光焊接封装的光纤光栅智能悬臂梁[J]. *激光与红外*, 2016, **46**(5): 587–592.
- [21] Guo Y X, Xiong L, Liu H H. Research on the durability of metal-packaged fiber Bragg grating sensors[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2019, **31**(7): 525–528.
- [22] Zhen C M, Li Z Z, Hou D L, *et al.* Preparation of aluminum film by vacuum evaporation[J]. *Phys Exp*, 2017, **37**(5): 27–31.
甄聪棉, 李壮志, 侯登录, 等. 真空蒸发镀膜[J]. *物理实验*, 2017, **37**(5): 27–31.
- [23] Zhao X J. Development and research of magnetron sputtering coating technology[J]. *Synth Mater Aging Appl*, 2020, **49**(2): 120–122.
赵向杰. 磁控溅射镀膜技术的研究及发展趋势[J]. *合成材料老化与应用*, 2020, **49**(2): 120–122.
- [24] Wang H, Zheng G, Chen H B, *et al.* Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(5): 180506.
王欢, 郑刚, 陈海滨, 等. 调频连续波激光干涉光纤温度传感器[J]. *光电工程*, 2019, **46**(5): 180506.
- [25] Xu M G, Reekie L, Chow Y T, *et al.* Optical in-fibre grating high pressure sensor[J]. *Electron Lett*, 1993, **29**(4): 398–399.
- [26] He J F, Liang L. Research on the methods of temperature compensation in the dynamic monitoring of large metal structures[J]. *J Wuhan Univ Technol*, 2010, **32**(12): 113–116.
何进飞, 梁磊. 大型金属结构动态检测中的温度补偿方法研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2010, **32**(12): 113–116.

Embedded gold-plated fiber Bragg grating temperature and stress sensors encapsulated in capillary copper tube

Zhang Yanjun, Gao Haichuan, Zhang Longtu, Liu Qiang, Fu Xinghu*

School of Information Science and Engineering, Yanshan University;
The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China



Stress nephogram by finite element analysis

Overview: As a new type of optical measuring element, fiber Bragg grating (FBG) has many advantages, such as small size, anti-electromagnetic interference, simple structure and easy replacement. The traditional electromagnetic sensor has many disadvantages, such as large volume, complex installation, easy corrosion and so on. A good packaging method can not only effectively protect the grating from external damage, but also increase the sensitivity of the sensor in a certain range. The monitoring environment of large-scale construction machinery is generally very harsh. In order to realize the non-destructive and real-time dynamic stress monitoring of large-scale construction machinery surface, a new packaging method of fiber Bragg grating sensor is proposed by using magnetron sputtering technology combined with organic adhesive fixation. The grating metallization package can increase the mechanical strength and sensitivity by covering the grating area with a thin metal coating. The sensor uses capillary copper tube as embedded material, copper powder is filled in the capillary copper tube to assist in fixing the grating, and laser welding technology is used to package the nozzle. Two encapsulation methods are proposed in this paper, one is full nesting (copper capillary tubes are nested in the whole grid area), the other is to nest capillary copper tubes at both ends of the grid region. This paper compares the sensitization effect of the sensor from the perspective of theoretical analysis and finite element simulation, and the results are consistent. When the bending stress is measured, the structure of the sensor can improve the sensitivity, which is related to the diameter of the capillary copper tube. Simulation, temperature, stress and contrast tests were carried out. The simulation results show that the sensitivity of FBG sensor can be improved by 7.5%. Temperature experiments show that the temperature feedback correlation coefficient of the second packaging structure reaches 0.99948, showing good linearity in the range of 30 °C~80 °C. The correlation coefficient R^2 of the stress experiment is 0.99924, and the sensitivity is 6.14 pm/Mpa. The accuracy of the demodulation system is 0.5×10^{-1} MPa, which can demodulate the stress quickly and accurately. The contrast experiment shows that the grating monitoring system has higher accuracy than the strain gauge monitoring system, and the maximum deviation is reduced by 59.8%. The metallization method of nested copper capillary tube combined with organic glue fixation has the advantages of simple structure, high sensitivity and precision, which can meet the needs of large-scale construction machinery surface non-destructive real-time health monitoring.

Zhang Y J, Gao H C, Zhang L T, *et al.* Embedded gold-plated fiber Bragg grating temperature and stress sensors encapsulated in capillary copper tube[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(3): 200195; DOI: 10.12086/oe.2021.200195

Foundation item: Innovative Demonstration Project of Multifunctional Offshore Wind Power Installation Platform of State Oceanic Administration, National Natural Science Foundation (A030802), and Yanshan University Basic Research Special Topic Cultivation Project (16LGY017)

* E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn