

不同封装方式的光纤光栅传感与温补特性

郭永兴^{1*}, 匡毅^{2**}, 熊丽¹, 刘文龙², 吴恒²

¹武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081;

²武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081

摘要 光纤光栅的粘贴封装工艺对传感器的性能有重要影响。目前光纤光栅传感器设计中最常用的两种封装方式分别是将光栅全部粘贴后进行封装以及将光栅预拉伸后对光栅两端进行粘贴封装。在这两种封装方式下,对光纤光栅的测量灵敏度、线性、重复性、蠕变、温度补偿等决定传感器核心性能的参数开展了实验研究。每种封装方式下,均将3支参数相同的光纤光栅布置在同一等强度梁上,并布置1支自由状态的裸光栅作为温度参考,开展应变感测特性和温度补偿特性方面的对比实验。实验结果表明,两种封装方式下的6支光纤光栅在灵敏度、线性、重复性方面均具备良好的一致性及抗蠕变能力;温度补偿测试中,同种封装方式的光栅自差分补偿的效果明显优于参考裸栅的差分补偿结果;光栅两点粘贴封装方式的自差分补偿效果最好,达到9 pm以内,优于光栅全部粘贴封装的结果(小于20 pm);光栅两端粘贴封装与参考裸栅差分补偿的效果最差,最大达53 pm。

关键词 光纤光学; 传感器; 光纤布拉格光栅; 封装方式; 温度补偿

中图分类号 TP242; TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.110601

Sensing and Temperature-Compensation Characteristics of Fiber Bragg Gratings Under Different Packaging Ways

Guo Yongxing^{1*}, Kuang Yi^{2**}, Xiong Li¹, Liu Wenlong², Wu Heng²

¹Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

²Hubei Provincial Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract The packaging technology of fiber Bragg gratings (FBG) has a significant impact on sensor performance. So far, two packaging methods most commonly used in the design of FBG sensors are the packaging after all grating pasting and the two-end pasting-packaging after grating pretension. As for these two packaging ways, the key parameters determining the performance of a sensor, such as sensitivity, linearity, repeatability, creep and temperature-compensation, are investigated experimentally. For each packaging way, three FBGs with the same parameters are arranged on the same equal-strength cantilever. A free and bare grating is used as a temperature reference for a contrast experiment of strain sensitivity and temperature-compensation characteristics. The experimental results show that the six FBGs under the two packaging ways have good consistency in sensitivity, linearity and repeatability, and also good creep resistance. In the test of temperature-compensation, the grating self-differential compensation effect under the same packaging way is superior to the differential compensation from the reference bare FBG. The self-differential compensation effect under the two-end pasting packaging way is the best with the wavelength shift difference less than 9 pm, better than that under the packaging way after all grating pasting (within 20 pm). In contrast, the differential compensation effect under the two-end pasting-packaging way from the reference bare grating is the worst with the maximum value up to 53 pm.

Key words fiber optics; sensor; fiber Bragg grating; packaging way; temperature compensation

OCIS codes 060.3735; 050.2770; 060.2370

收稿日期: 2018-04-09; 修回日期: 2018-05-15; 录用日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(51605348, 51605344)、湖北省自然科学基金(2016CFB116)

* E-mail: yongxing_guo@wust.edu.cn; ** E-mail: kuangyi1993@163.com

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感因具有体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰、灵敏度高、安全可靠等优点被广泛应用于机电、土木、船舶航运和航天航空等领域^[1-4]。由于光纤光栅本身只对温度和轴向应变敏感,故若对位移、振动、压力等物理量进行测量时,就需要将光纤光栅粘贴固定在具有特定设计的弹性转换结构体上。无论是将光纤光栅直接粘贴在被测对象上测量应变,还是粘贴在弹性体上测量其他物理量,都必须对光纤光栅进行粘贴固定,这种固定应变测量光纤光栅的过程即为光纤光栅的封装。

光纤光栅的粘贴封装工艺对应变传递、温度特性、光谱谱形等有重要的影响,而这些参数直接关系到测量的精度,因此光纤光栅的粘贴封装工艺对传感器的性能有重要影响。目前在光纤光栅传感器设计中最常用的两种封装方式是光栅全部粘贴封装(下文简称“全粘贴封装”)和预拉伸后对光栅两端的光纤进行粘贴封装(下文简称“两点粘贴封装”)。例如,在位移传感器的设计中,郭永兴等^[5-6]均将一个光栅全部粘贴封装于弹性结构转换体上,另一个裸栅处于自由状态作为参考光栅用以进行温度补偿;Wang等^[7-8]均将两个FBG用胶黏剂对称全部粘贴封装在悬臂梁的上下表面,一个感测正应变,一个感测负应变,通过两个光栅的自差分补偿剔除温度的影响,从而达到温度补偿的目的;Mi等^[9]和Li等^[10]均将FBG预拉伸后直接作为弹性元件,两点粘贴封装于基体上测量位移,另设自由状态的参考裸栅进行温度补偿。在振动传感器的设计中,Li等^[11]将一个FBG作为弹性元件预拉伸后两点粘贴封装用于测量振动,另一个FBG处于自由状态作为参考光栅进行温度补偿;Wang等^[12]将两个FBG对称嵌入弹性材料圆柱体中检测振动,通过自差分法进行温度补偿;Li等^[13-14]将两个FBG对称两点粘贴封装于质量块两侧,一个感测正应变,一个感测负应变,通过自差分补偿剔除温度影响。在加速度传感器的设计中,郭永兴等^[15]将4个FBG两两对称全部粘贴封装于不锈钢管圆周上,分别测量X轴向和Y轴向的加速度,当弹性结构体沿X(或Y)轴向振动时,在钢管圆周表面上相应的两个光纤光栅分别同时受到正负应变的作用,用二者波长变化量的差值来衡量这一方向的振动加速度;曾宇杰等^[16]将一个FBG作为弹性元件预拉伸后两点粘贴封装于底座两端,另设自由状态的参考裸栅进行温度补偿。在压力传

传感器的设计中,Huang等^[17]将两个FBG全部粘贴封装于膜片上,一个感测膜片上的正应力,一个感测膜片上的负应力,通过自差分达到温度补偿效果;Pachava等^[18]将一个光栅作为弹性元件预拉伸后两点粘贴封装于基体两端测量压力,另一个参考光栅处于自由状态进行温度补偿;Liang等^[19]将两个FBG用胶黏剂对称全部粘贴封装在悬臂梁的上下表面,一个感测正应变,一个感测负应变,通过自差分补偿剔除温度的影响,从而达到温度补偿的目的。在静电电压传感器的设计中,张开玉等^[20]将两个参数一致的FBG全部粘贴封装于应变梁的上下表面,并使光纤光栅轴线保持在同一中心轴线上,一个感测正应变,一个感测负应变,通过自差分补偿剔除温度的影响,从而达到温度补偿的目的。

在目前的光纤传感设计中,两种封装方式均被广泛采用,但对于其应变测量优劣的对比研究较少。另外,两种封装方式下应变感知光纤光栅的温度补偿方式也不尽相同,目前缺乏对不同补偿方式的实际补偿效果方面的研究。本文对两种封装方式下的光纤光栅的测量灵敏度、线性、重复性、蠕变、温度补偿等决定传感器核心性能的参数进行实验对比研究,讨论了两种封装方式下光纤光栅的应变传感和温度补偿的特点及优劣,为基于光纤光栅原理的测试、传感器设计、监测数据处理等提供科学参考。

2 实验研究装置

选择等强度悬臂梁作为本研究的弹性元件。由于等强度悬臂梁在弯曲变形时,梁表面的应变分布均匀一致,从而可以保证粘贴在其表面的光纤光栅所受的拉伸或压缩的应变一致,FBG不会因为局部受力不均匀而出现啾啾现象。图1为设计的等强度悬臂梁。

当载荷 F 作用于梁的自由端,根据材料力学知识,梁表面某一位置处的应变与自由端作用力之间

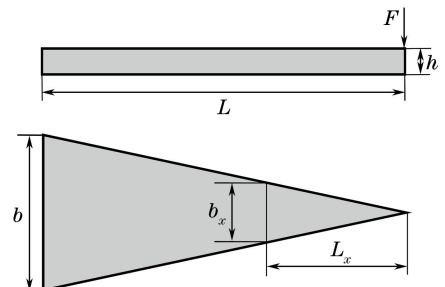


图1 等强度梁模型

Fig. 1 Model of equal-strength cantilever

的关系为

$$\epsilon_x = \frac{6(L-x)}{EAh}F, \quad (1)$$

式中: ϵ_x 为距固定端 x 处的应变值; L 为梁的长度; x 为某一位置到固定端的距离; E 为梁的材料弹性模量; A 为梁的截面积; h 为梁的厚度。

等强度梁的特点是距固定端不同距离处的截面积不同,距固定端 x 处的截面积满足

$$A_x = hb_x = hb \frac{L_x}{L} = hb \frac{L-x}{L}, \quad (2)$$

式中: b 为梁的宽度; b_x 为某一位置梁的宽度。

将(2)式代入(1)式可得应变值为

$$\epsilon = \frac{6L}{Ebh^2}F. \quad (3)$$

由(3)式可知,等强度悬臂梁在自由端施加载荷时,梁表面上各处的应变大小相同,故封装在梁表面上各处的 FBG 受到的应变一致。在实验中,实际加工出的等强度悬臂梁材料为 316L 不锈钢,尺寸参数为: $L=130$ mm, $b=70$ mm, $h=1.5$ mm。

为了研究全部粘贴封装和两点粘贴封装的传感特性和温补特性,在等强度梁上粘贴封装了 6 支中心波长、反射率、带宽等参数一致的 FBG,其中 3 支

采用全部粘贴封装,另外 3 支采用两点粘贴封装。在封装过程中,选用了美国 Epoxy Technology 公司生产的热固性胶黏剂 353ND。

封装过程如下:对于全粘贴封装,3 支波长为 1535 nm 的 FBG,剥去栅区区域的涂覆层,将其固定在等强度梁上,使用环氧树脂胶 353ND 均匀涂抹在剥去涂覆层的光栅区域。涂抹胶黏剂时 3 支光栅的粘贴长度保持一致,均为 20 mm,且保证胶黏剂涂抹厚度均匀。加热、冷却封装完成后 3 支光栅波长分别为 1533.8984,1533.8385,1533.9245 nm。对于两点粘贴封装,3 支波长为 1535 nm FBG,剥去栅区两端的涂覆层,将光纤光栅固定在等强度梁上,同时对光纤光栅施加预紧力,使光纤光栅波长增大 2 nm,待中心波长稳定后,在剥去涂覆层的区域均匀涂抹胶黏剂,当波长稳定后卸载掉预紧力。涂抹胶黏剂时保证 3 支光栅两端的粘贴长度基本一致(10 mm),两个粘贴点之间的光纤光栅长度与全粘贴封装一致,为 20 mm,且保证胶黏剂涂抹厚度均匀。由于冷缩原因,封装完成后测得光纤光栅波长分别为 1535.4614,1535.8639,1535.9932 nm。两种封装方式的光纤光栅布置图如图 2 所示。

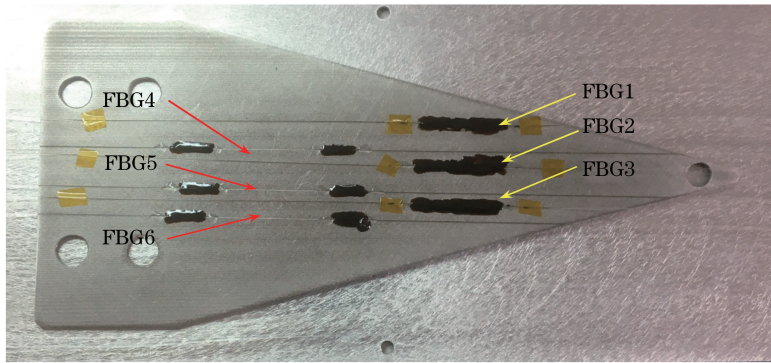


图 2 两种封装方式的光纤光栅布置图

Fig. 2 Layout of FBGs under two packaging ways

3 传感特性与温补特性研究

3.1 传感特性研究

为了对比分析两种封装方式的传感特性,在室温条件下对 FBG 进行了拉伸测试实验。在等强度梁顶端施加拉力,以空载为初始状态,1 N 为步长,依次加砝码施加载荷至 6 N,每个载荷点处约停留 10 s,待 FBG 波长稳定,再依次减小载荷至 0 N,该过程连续测量 3 个循环,采用课题组研制的光纤光栅解调仪(带宽:1525~1605 nm;频率:0~1000 Hz 可调;波长分辨率:0.1 pm;波长精度:5 pm),以

20 Hz 的频率采集 3 次循环的数据。图 3 为拉伸测试实验图。整个实验过程中,FBG 输出波长漂移量的时程图如图 4 所示。图 5 为根据图 4 中的实时曲线提取的 3 次拉伸循环测试数据图,给出了 3 次循环实验中每个载荷点下 FBG 对应的加载、卸载时的波长漂移量。由图可见,6 个光纤光栅的波长漂移情况基本一致,说明这两种封装方式的光纤光栅均具备良好的重复测量性。

对图 5 中 FBG1~FBG6 各自的 6 条测试曲线进行算术平均之后再线性拟合,3 次拉伸循环测试均值拟合图如图 6 所示。表 1 为 FBG 1~

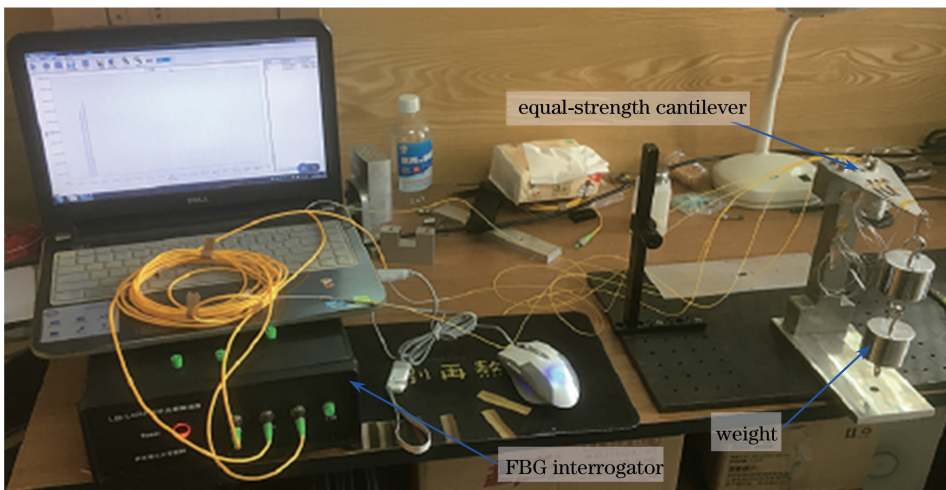


图 3 拉伸测试实验图

Fig. 3 Experimental photo of tensile test

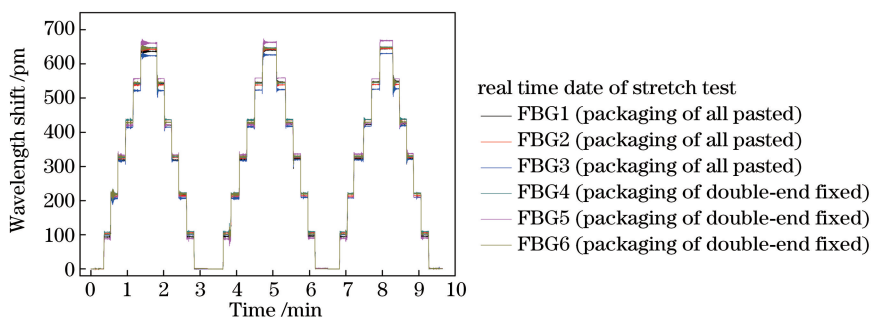


图 4 FBG 输出波长漂移量的时程图

Fig. 4 Time-history diagram of output wavelength shift of FBG

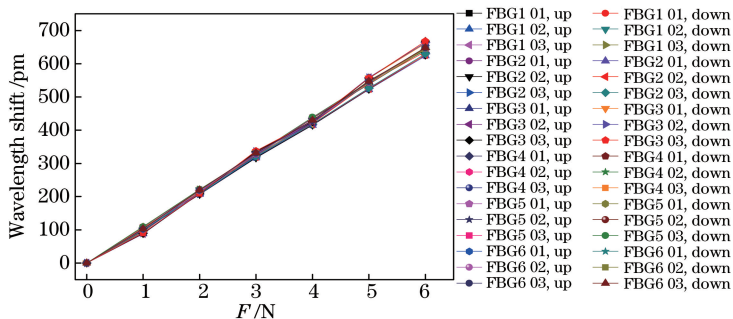


图 5 3次拉伸循环测试数据图

Fig. 5 Experimental data of three loop tensile tests

表 1 FBG1~FBG6 的均值拟合曲线表达式

Table 1 Linear curve-fitting of average data for FBG1-FBG6

FBG	Curve-fitting	Linearity R	Sensitivity $/(\text{pm} \cdot \text{N}^{-1})$
FBG1	$y = -3.141 + 21.59x$	0.9996	21.59
FBG2	$y = -1.123 + 20.97x$	0.99992	20.97
FBG3	$y = -10.788 + 22.43x$	0.99912	22.43
FBG4	$y = -0.204 + 21.56x$	0.99992	21.56
FBG5	$y = 1.919 + 21.65x$	0.99995	21.65
FBG6	$y = -0.739 + 21.69x$	0.99983	21.69

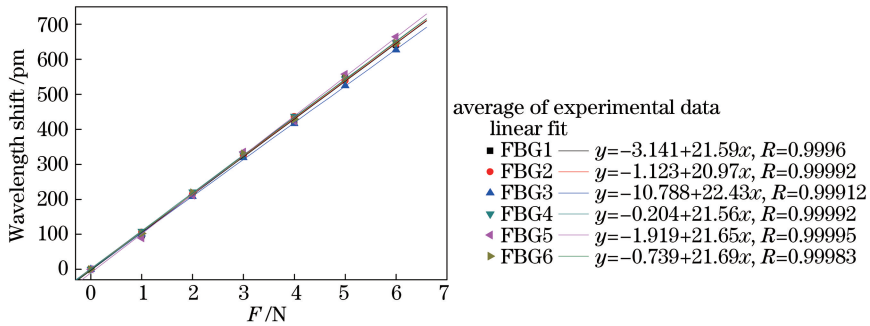


图6 3次拉伸循环测试均值拟合图

Fig. 6 Linear fitting of average data of three loop tensile tests

FBG6的均值拟合曲线表达式,由表1可见,相较于两点粘贴封装,全部粘贴封装对载荷的灵敏度有微小差异,这主要是由于全部粘贴封装的光纤光栅,栅区均被胶黏剂覆盖,而胶黏剂在涂覆时,难以保证每个光纤光栅上的胶层厚度完全均匀一致,这种不均匀性会导致应变传递率产生差异,从而对载荷的应变灵敏度产生差异;而对于两点封装的光纤光栅,其栅区部分无胶黏剂,因此栅区部分受到的应变作用较为一致,灵敏度数值也更加一致。但这两种封装方式对载荷的灵敏度基本一致,且均具有良好的线性度。

蠕变性能对长期实时监测的精确性具有重要影响,因此对两种封装的6个光纤光栅进行了蠕变特性测试。在等强度梁自由端悬挂质量一定的砝码,保持超过30 min后再恢复至空载状态,同时光纤光栅解调仪以20 Hz的频率采集数据。蠕变性能测试结果图如图7所示,由图可见,两种封装的所有光纤光栅的波长漂移量均表现出良好的稳定性,选取其中20 min处的数据放大后发现,波长的波动量在5 pm以内,基本在光纤光栅解调器的波长精度波动范围内,这一结果说明两种封装方式的光栅均具备良好的抗蠕变性。

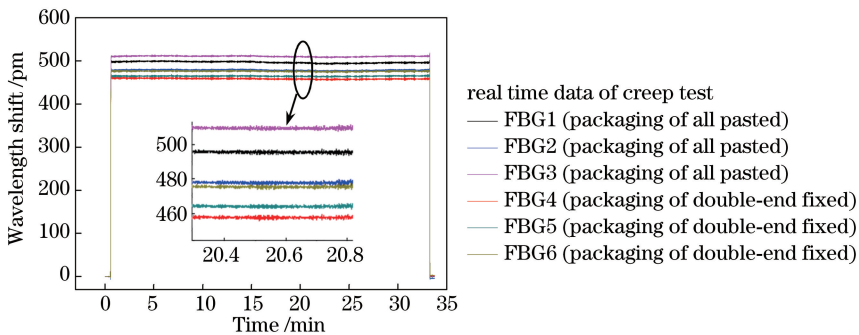


图7 蠕变性能测试结果图

Fig. 7 Test results of creep performance

3.2 温度补偿特性研究

温度补偿问题是光纤光栅传感器设计中不可避免的问题,温度补偿的优劣性直接影响到传感器的测量精度。这里对同种封装方式的光栅自差分补偿和采用参考裸栅差分补偿的方法进行对比研究。自差分补偿的输出是同种封装下的不同光栅的波长漂移量的差值,而参考裸栅差分补偿输出需要得到封装光栅与参考裸栅的温度灵敏度系数的比值 $k_T = K_{\text{pack}}/K_{\text{ref}}$ 后,再进行差值。采用一个处于自由松弛状态的、波长为1546 nm的裸栅FBG7作为参考光栅,采用合肥科晶材料技术有限公司生产的OTF-1200X型温度实验箱(分辨率为0.1℃,精度为

1℃)开展温度补偿特性测试,光纤光栅解调仪以20 Hz的频率实时采集各光纤光栅的波长值。

为得出FBG1~FBG6与FBG7的温度灵敏度系数的比值 $k_T [k_{T_i} = K_i/K_7, (i=1,2,\dots,6)]$,从室温25℃开始升温,在30、40、50、60℃时分别保载30 min,在70℃时保载40 min,一直加热升温到75℃。图8为温度补偿实验装置图,图9为温度补偿实验中波长漂移量的时程图,根据每个温度点处稳定后的波长值进行拟合,得到FBG1~FBG7的温度特性拟合曲线如图10所示。由拟合方程易得 $k_{T1} = 2.169, k_{T2} = 2.197, k_{T3} = 2.162, k_{T4} = 2.193, k_{T5} = 2.215, k_{T6} = 2.193$ 。

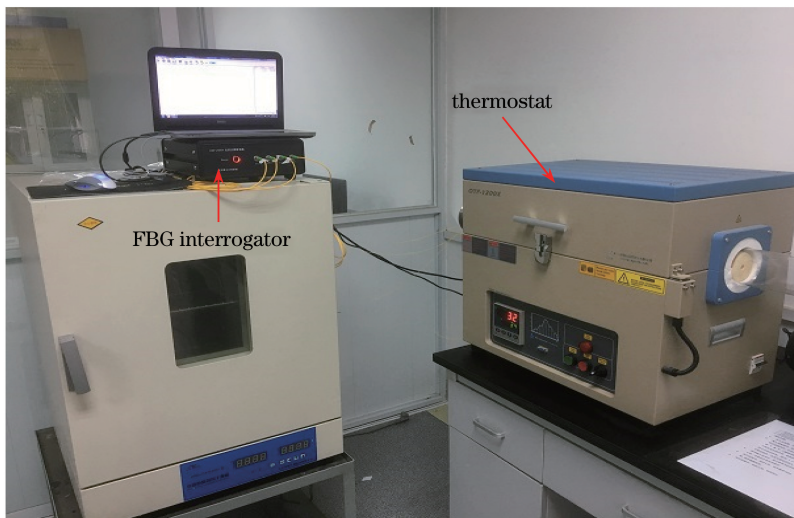


图 8 温度补偿实验装置图

Fig. 8 Setups of temperature-compensation test

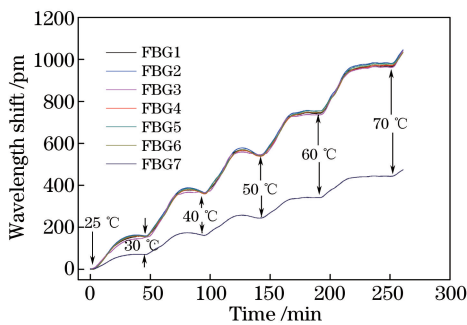


图 9 温度补偿实验中波长漂移量的时程图

Fig. 9 Time-history curves of wavelength shift in temperature-compensation tests

在得出温度的灵敏度系数之比后,设置温度实验箱内的温度从 28~70 °C 实时变化,光纤光栅解调仪以 20 Hz 的频率实时采集各光纤光栅的波长值。图 11 为升温测试时程图。为呈现差分补偿后的情况,相同封装的 3 个光纤光栅的波长漂移量之间相互作差,并将得到的 3 个差值曲线绝对值

的算术平均值用于表征该封装条件下自差分补偿效果;同样,同种封装的 3 个光栅的波长漂移量与参考裸栅的波长漂移量也分别作差,3 个差值曲线绝对值的算术平均值用于表征参考裸栅差分补偿效果。图 12 为不同种温度补偿方式下光纤光栅波长漂移量的差值,给出了采用自差分补偿和参考裸栅差分补偿两种常用的温度补偿方式下光纤光栅波长漂移量的差值情况。可见,在温度实时变化的情况下,全粘贴封装和两点粘贴封装的自差分补偿的效果从整体上均明显优于它们与参考裸栅的差分补偿效果,其中又以两点粘贴封装自差分补偿效果最优,补偿后的差值在 9 pm 以内,优于光栅全部粘贴封装的 20 pm。两种封装的参考裸栅差分补偿中,两点粘贴封装补偿效果最差,最大差值达 53 pm。两种封装的参考裸栅差分补偿中,补偿差值随着温度的升高而整体呈增大趋势,补偿效果变差。

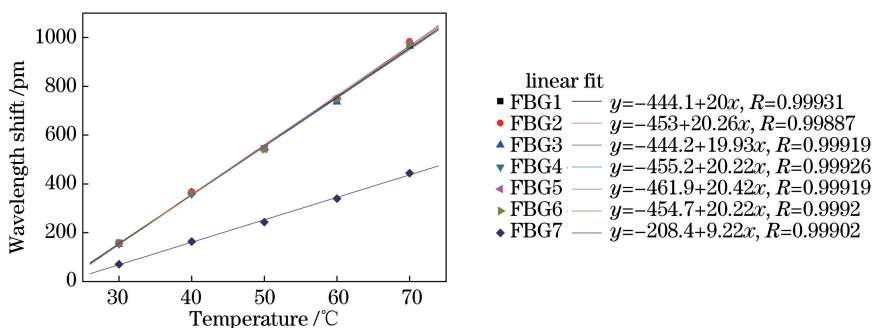


图 10 温度特性拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of temperature response

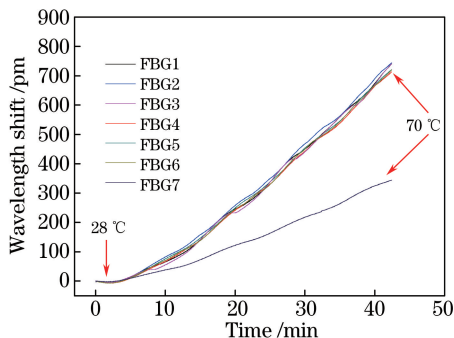


图 11 升温测试时程图

Fig. 11 Time-history curves in temperature-increasing tests

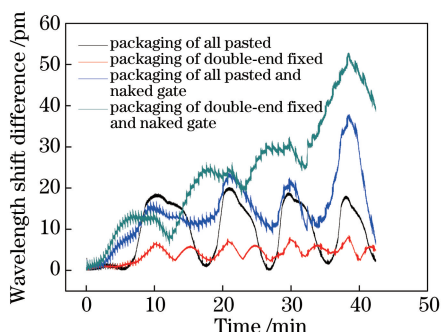


图 12 不同种温度补偿方式下光纤光栅波长漂移量的差值

Fig. 12 Wavelength shift differences of FBG under different temperature-compensation methods

上述补偿差异的主要原因是:对于自差分补偿,光栅全粘贴封装时,基体的冷热应变是通过胶黏剂传递到光栅上的,由于胶黏剂粘贴工艺中不可避免地会存在差异,因此会出现热应变传递不均等无规律的误差,而两点粘贴封装的光栅,光栅部分悬空,无胶黏剂,这部分不受胶黏剂涂覆不均、胶黏剂膨胀不均等因素的无规律误差的影响,温度响应特性更加一致,因此两点粘贴封装自差分补偿更优。然而,参考裸栅差分补偿效果均较差,是由于封装在金属基体上的6个光栅对于温度的响应速率比自由松弛状态的参考裸栅更快,补偿过程中仅将参考裸栅乘以温度灵敏度系数比值 k_T 后与封装光栅作差,由于温度响应速率不同,乘以 k_T 后参考裸栅的波长漂移实时曲线与封装光栅的波长漂移实时曲线之间出现明显不一致,补偿差值较大,且这种不一致随着温度的升高而变得更明显,即参考裸栅差分在补偿的实时性方面存在较大问题。因此,在实际的传感器设计中,尤其在温度变化比较剧烈的应用场合,应避免采用自由状态的裸光栅作为温度补偿参考。

4 结 论

实验研究了光纤光栅在全部粘贴封装和两点粘贴封装方式下的传感特性和温补特性。6支参数相同的光纤光栅按照两种封装方式布置在应变情况相同的等强度悬臂梁表面,测试了所有光栅在不同自由端力载荷作用和不同温度环境下的响应特性。研究表明:这两种封装方式下的光纤光栅在灵敏度、线性、重复性、抗蠕变能力方面均具有良好的一致性;而在温度补偿特性方面,全粘贴封装和两点粘贴封装的自差分补偿的效果优于参考裸栅差分补偿,而且两点粘贴封装自差分补偿效果最优,但其参考裸栅差分补偿效果最差,同时,参考裸栅差分补偿中,补偿差值随着温度的升高而整体呈增大趋势,补偿效果变差。研究结果可为光纤光栅传感器研制过程中光栅的封装布置方式、温度补偿方法等决定传感器核心性能的设计提供技术参考。

参 考 文 献

- [1] Guo Y X, Zhang D S, Fu J J, *et al.* Development and operation of a fiber Bragg grating based online monitoring strategy for slope deformation[J]. *Sensor Review*, 2015, 35(4): 348-356.
- [2] Wang Q N, Yang Y H, He J, *et al.* Study of fiber Bragg grating regeneration process and regeneration model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (3): 0306001.
王巧妮, 杨远洪, 何俊, 等. 光纤布拉格光栅再生过程及模型研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36 (3): 0306001.
- [3] Sun S Q, Chu F H, Lu J Y. Progress in cross sensitivity of fiber Bragg grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 040006.
孙诗晴, 初凤红, 卢家焱. 光纤布拉格光栅传感器交叉敏感问题的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 040006.
- [4] Ding X D, Zhang Y M, Song Y M, *et al.* Response characteristics of pure-quartz-core fiber Bragg grating under high temperature strain[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106003.
丁旭东, 张钰民, 宋言明, 等. 纯石英芯光纤光栅高温应变响应特性 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106003.
- [5] Gou Y X, Xiong L, Kong J Y, *et al.* Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 50-58.

- 郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 50-58.
- [6] Li J C, Neumann H, Ramalingam R. Design, fabrication, and testing of fiber Bragg grating sensors for cryogenic long-range displacement measurement [J]. *Cryogenics*, 2015, 68: 36-43.
- [7] 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 Sensors*, 2017, 7(1): 20-26.
- [8] 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]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, 74: 128-132.
- [9] Mi H K, Nan Q M. Study on magnetic coupling FBG displacement sensor[C]//International Conference on Mechatronics and Automation, August 7-10, Beijing, China. New York: IEEE, 2011: 2443-2447.
- [10] Li T L, Tan Y G, Shi C Y, *et al.* A high-sensitivity fiberBragg grating displacement sensor based on transverse property of a tensioned optical fiber configuration and its dynamic performance improvement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(18): 5840-5848.
- [11] Li T L, Tan Y G, Zhou Z D, *et al.* A non-contact FBG vibration sensor with double differential temperature compensation [J]. *Optical Review*, 2016, 23(1): 26-32.
- [12] Wang J F, Yu Y, Chen Y, *et al.* Research of a double fiber Bragg gratings vibration sensor with temperature and cross axis insensitive[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(7/8):749-753.
- [13] Li T L, Tan Y G, Zhou Z D. String-type based two-dimensional fiber Bragg grating vibration sensing principle and structure optimization[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2017, 259: 85-95.
- [14] Li T L, Shi C Y, Tan Y G, *et al.* A diaphragm type fiber Bragg grating vibration sensor based on transverse property of optical fiber with temperature compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(4): 1021-1029.
- [15] Guo Y X, Zhang D S, Li J Y, *et al.* Two dimensional fiber Bragg grating accelerometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1214001. 郭永兴, 张东生, 李杰燕, 等. 光纤光栅二维加速度传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214001.
- [16] Zeng Y J, Wang J, Yang H Y, *et al.* Fiber Bragg grating accelerometer based on L-shaped rigid beam and elastic diaphragm for low-frequency vibration measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1206005. 曾宇杰, 王俊, 杨华勇, 等. 基于 L 形刚性梁与弹性膜片结构的低频光纤光栅加速度传感器[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1206005.
- [17] Huang J, Zhou Z D, Wen X Y, *et al.* A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation[J]. *Measurement*, 2013, 46(3): 1041-1046.
- [18] Pachava V R, Kamineni S, Madhuvarasu S S, *et al.* FBG based high sensitive pressure sensor and its low-cost interrogation system with enhanced resolution [J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(4): 321-329.
- [19] Liang M F, Fang X Q, Wu G, *et al.* A fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation based on diaphragm-cantilever structure [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 145: 503-512.
- [20] Zhang K Y, Zhao H, Zhang W C, *et al.* Fiber Bragg grating electrostatic voltage sensor based on uniform strain beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0306003. 张开玉, 赵洪, 张伟超, 等. 基于等应变梁的光纤光栅静电电压传感器[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0306003.