

# 浮空器柔性复合蒙皮变形光纤光栅传感方法\*

刘炳锋<sup>1,2</sup>, 孙广开<sup>1,2</sup>, 何彦霖<sup>1,2</sup>, 董明利<sup>1,2</sup>

(1.北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京,100192)

(2.北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京,100016)

**摘要** 针对浮空器气囊蒙皮变形的实时监测需求,提出了基于光纤光栅(fiber Bragg grating, 简称FBG)的柔性复合蒙皮变形传感方法。根据蒙皮材料的多层结构特点及光纤光栅传感原理,设计了“光纤光栅-粘贴层-基底”的柔性蒙皮传感结构。通过对传感结构进行理论分析,得知平均应变传递效率随粘贴层剪切模量增加而增大。实验采用GD414和DP420两种不同剪切模量的粘接剂将光纤传感器粘接在柔性蒙皮表面,建立了传感解调实验系统。分析了浮空器柔性复合蒙皮变形光纤光栅传感器灵敏度及重复性,研究了两种不同胶接剂封装下光纤光栅中心波长随曲率变化的关系,结果显示剪切模量较大的DP420胶接剂封装的FBG具有良好的线性度和重复性,其灵敏度可达 $145.4 \text{ pm/m}^{-1}$ 。对浮空器柔性复合蒙皮变形进行重构分析,验证了传感方法的可行性。研究结果表明,光纤光栅传感器可用于柔性复合蒙皮变形监测,在浮空器气囊蒙皮形态监测中具有广阔的应用前景。

**关键词** 浮空器;柔性复合蒙皮;光纤光栅;表贴式传感器;胶粘剂;灵敏度  
**中图分类号** TH74;TN253;V24

## 引言

浮空器是飞行器的一种,其主要动力源于气囊内部填充密度轻于空气的气体所产生的浮力<sup>[1]</sup>。根据是否有推进动力装置,浮空器一般可分为气球和飞艇两大类。相比于飞机等其他飞行器,浮空器具有更强的隐身性能、良好的承载能力及滞空时间长等优点,因而广泛应用于军事勘察、地质灾害监测、导航通信及预警定位等领域,具有重要的应用价值。近年来,浮空器蒙皮柔性复合材料和系统控制技术的快速发展,使得浮空器的开发应用成为研究的热点<sup>[2-3]</sup>。

高空浮空器一般要在 20 km 以上的空间进行长期作业,需要抵抗高空环境中较高的内外超压值。由浮升气体填充的气囊结构是浮空器主要的载荷装置,浮空器在恶劣环境中的工作性能高低主要取决于囊体蒙皮<sup>[4]</sup>。因此,对于高空环境中作业的浮空器柔性蒙皮进行结构变形的实时监测,对系统的可靠性和安全性有着重要的作用<sup>[5-6]</sup>。当前,浮空器气囊变形监测主要是在地面环境下采用激光和视觉测量等方法测量囊体形态<sup>[7-9]</sup>,如激光扫描检测法、莫尔条纹法、干涉测量法、摄影测量法和结构光测量法

等,这类方法适用于相对固定的地面环境下的结构形态检测与重构,但是测量精度相对较低,也不适用于浮空器升空及空中运行过程气囊形态的实时监测。浮空器气囊变形光纤光栅传感具有灵敏度高、响应速度快、质量轻和抗电磁干扰等优点,并且易于蒙皮结构贴附<sup>[10-12]</sup>。

国内外学者在浮空器气囊蒙皮变形光纤传感监测方面开展了一些研究工作。Blandino等<sup>[13]</sup>运用FBG传感器组实现了对气囊结构展开和收缩状态应变进行测量。Wang等<sup>[14]</sup>利用FBG传感器在“致远一号”飞艇蒙皮上建立应变监测模型,推导了蒙皮应变传递情况。Zhao等<sup>[15]</sup>将FBG传感器用于飞艇气囊结构健康监测,改进FBG粘贴方式,提高蒙皮应变测量传递率。黄迪<sup>[16]</sup>采用FBG传感器对实验室气囊结构加减压过程进行了应变的在线监测。裴晓增等<sup>[17]</sup>利用FBG传感器初步实现了蒙皮的线性重构,但未考虑传感器灵敏度。

现有研究仅限于气囊蒙皮结构应变的传感,而关于浮空器气囊蒙皮变形监测的研究尚少。针对这一问题,笔者提出一种浮空器气囊柔性复合蒙皮变形光纤光栅传感方法。以柔性复合蒙皮为基底,提出“光纤光栅-粘贴层-基底”表贴式传感结构,并以

\* 国家自然科学基金青年基金资助项目(61903041);北京市自然科学基金-市教委联合基金资助项目(KZ201911232044);北京市自然科学基金资助项目(7202017,4204101);北京市科技新星计划资助项目(Z191100001119052)

收稿日期:2020-08-05;修回日期:2020-09-13

GD414和DP420两种不同剪切模量的粘接剂进行传感器封装,实验研究其传感特性,并通过变形重构实验验证光纤传感在柔性复合蒙皮变形传感方面的可行性,为浮空器气囊变形实时监测提供方法。

## 1 传感器设计

### 1.1 柔性复合蒙皮结构

高空浮空器工作环境复杂,内部氦气受到的热辐射会随着昼夜而发生变化,因而其气囊内部温度也会出现昼升夜降的情况,从而导致浮空器蒙皮受压情况不同。为保证浮空器耐压能力,提高使用寿命,其蒙皮常采用层合式复合材料,一般由防护层、气密层、承力层及粘贴层组成<sup>[18]</sup>。浮空器蒙皮材料性能受各层特性之间相互耦合影响,只有该复合蒙皮力学特性能够满足需求,才能保证浮空器各项性能正常运行。因此,若要实现浮空器柔性复合蒙皮的形变测量,传感器应具有响应速度快、可检测微小形变、质量轻、易与柔性复合结构相适应及抗外界电磁干扰等特点。光纤光栅传感器易贴附,灵敏度高,并且不会影响复合蒙皮局部形变,满足浮空器柔性复合蒙皮形变对传感器的要求,可应用于柔性复合蒙皮的变形测量。图1为浮空器蒙皮结构示意图。

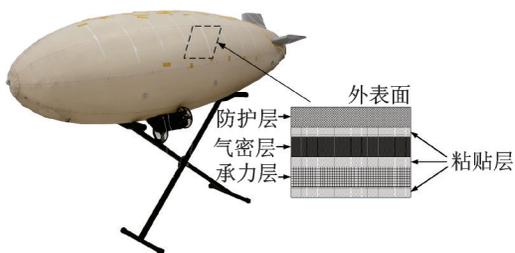


图1 浮空器蒙皮结构示意图  
Fig.1 The structure of aerostat skin

### 1.2 应变传递模型及理论分析

为得到浮空器蒙皮表贴式光纤光栅传感器应变传递规律,笔者将传感器模型简化为“光纤光栅-胶体-蒙皮”结构,建立的传感器横向截面见图2。

假设理论模型中所有材料均为线弹性及各向同性材料,浮空器蒙皮受均匀外力的作用并且各层材料间粘贴紧密,不发生相对滑移。建立如图3所示的各层受力传递示意图,并对浮空器蒙皮光纤传感微元结构进行受力情况分析。其中: $f, a, m$ 分别为光栅、胶体和蒙皮结构; $\sigma_f, \sigma_a, \sigma_m$ 分别为光栅、胶体和蒙皮所受到的轴向应力; $\tau_{fa}, \tau_{am}$ 分别为各相邻层之

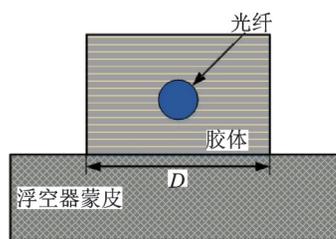


图2 传感器横向截面图  
Fig.2 Transverse section of the sensor

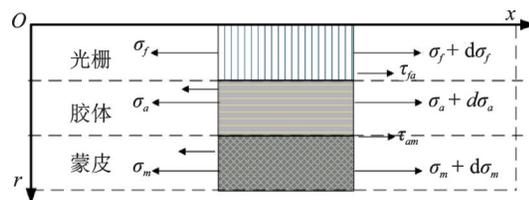


图3 各层受力传递示意图  
Fig.3 Schematic diagram of force transmission at each layer

间的剪切应力<sup>[19-21]</sup>。分析过程中,取蒙皮光纤光栅传感器粘贴长度为 $2L$ ,粘贴宽度为 $D$ 。

对裸贴式光纤光栅传感模型进行分析,FBG传感器对轴向应力敏感,因而仅考虑轴向应变。根据力学平衡方程,可得到裸贴光纤光栅与浮空器复合蒙皮轴向应变传递关系为

$$\bar{K} = 1 - \frac{\sinh(\xi L)}{\xi L \cosh(\xi L)} \quad (1)$$

其中: $\xi$ 为应变滞后系数。

$\xi$ 的值与光纤光栅、粘贴层和胶体的几何外形以及物理参数有关,可表示为

$$\xi = \sqrt{\frac{DG_a}{\pi r_f^2 E_f (r_m - r_f)}} \quad (2)$$

其中: $G_a$ 为胶体剪切模量; $r_f, r_m$ 分别为光栅半径和微元段分析起点至胶体与蒙皮连接处距离; $E_f$ 为光栅弹性模量。

由理论模型分析可得,在工程应用中所选用的光纤光栅物理参数几乎一致,当传感器粘贴长度和宽度一定时,胶体材料剪切模量的大小影响着应变传递滞后系数,对传递效率有很大影响。

定义光纤光栅传感器相关封装参数,对胶体剪切模量与应变传递之间的关系进行分析,理论模型分析相关参数如表1所示。

根据理论模型,光纤光栅传感器平均应变传递效率随胶体剪切模量 $G_a$ 的变化关系如图4所示。可以看出,随着 $G_a$ 的增加,平均应变传递效率随之增大,并逐渐达到饱和,增大趋势缓慢。当胶体剪切模量为25 MPa时,平均应变传递效率可达97.5%,

表 1 理论模型分析相关参数

Tab.1 Related parameters of theoretical model analysis

光栅半径 $r_f/\mu\text{m}$	光纤弹性模 量 $E_f/\text{GPa}$	粘贴长度 $2L/\text{cm}$	粘贴宽度 $D/\text{mm}$	胶体厚度 $(r_m - r_f)/\text{mm}$
62.5	72	15	5	0.5

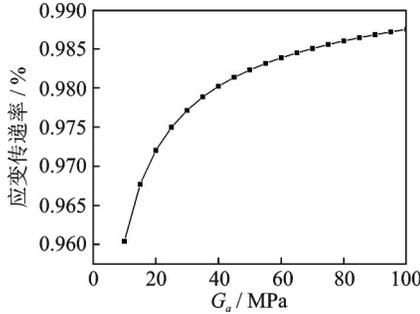


图 4 胶体剪切模量与应变传递关系图

Fig.4 Relationship between colloidal shear modulus and strain transfer

可为后期浮空器蒙皮光纤光栅传感特性分析实验胶粘剂的选择提供一定的理论参考。

## 2 曲率测量与数据重构

### 2.1 曲率测量原理

宽带光在 FBG 中传输时会产生模式耦合现象, 满足布拉格条件的光会被发射回来, 其反射波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (3)$$

其中:  $n_{\text{eff}}$  为导模的有效折射率;  $\Lambda$  为光栅周期。

$n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  决定 FBG 的中心波长,  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  又受到温度和应变的影响, 因而式(1)可写为关于温度和应变的函数, 即

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda = 2n_{\text{eff}}(\epsilon, T)\Lambda(\epsilon, T) \quad (4)$$

在实验室恒温条件下, 中心波长的变化仅受应变变量的影响。FBG 受纵向拉伸或压缩作用, 光栅周期由于应变  $\epsilon$  的影响发生改变, 中心波长的漂移量  $\Delta\lambda_B$  可以表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_\epsilon)\epsilon \quad (5)$$

其中:  $P_\epsilon$  为光纤的弹光系数。

柔性蒙皮曲率传感器可建模为圆形截面的变形梁, 其长度为  $L$ , 厚度为  $H$ 。当发生柔性形变弯曲时, 结构模型一侧由于受拉伸而伸长, 另一侧受压缩而缩短, 中间层由于长度未发生改变不受应变影响而被称为中性层。FBG 传感器弯曲传感模型如图 5 所示, 其中: 虚线表示中性层, 设其长度保持  $L$  不变;  $\rho$  为曲率半径;  $\Delta L$  为模型在力矩  $M$  的作用下长度的

变化量;  $\theta$  为形变对应的圆心角。

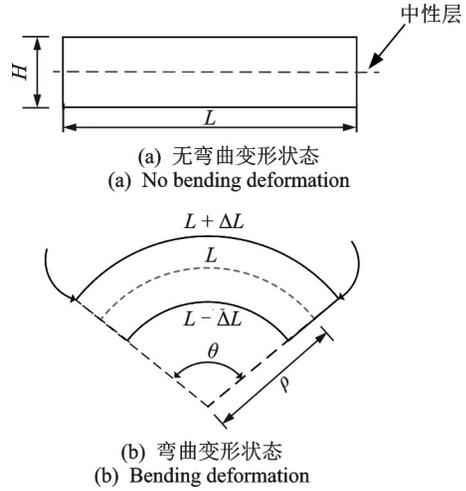


图 5 FBG 传感器弯曲传感模型

Fig.5 FBG sensor bending sensing model

根据图 5 的几何关系可得

$$L = \rho\theta \quad (6)$$

$$L + \Delta L = (\rho + h/2)\theta \quad (7)$$

由式(6)和式(7)推导可得

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{2\Delta L}{hL} = \frac{2}{h}\epsilon \quad (8)$$

其中:  $k$  为曲率。

由式(5)和式(8)推导可得

$$k = \frac{2\Delta\lambda_B}{\lambda_B(1 - P_\epsilon)h} \quad (9)$$

其中:  $\lambda_B$ ,  $P_\epsilon$  和  $h$  均为常数项。

因此, 对于 FBG 传感器, 形变量曲率仅与  $\Delta\lambda_B$  有关, 并且呈线性关系。利用该特性可以实现柔性复合蒙皮的变形重构。

### 2.2 测量数据重构

重构算法根据微分思想及运动坐标系, 将封装在柔性复合蒙皮上的传感器简化为一条曲线。建立数学模型, 利用曲率测量原理得到的不同曲率值计算得到不同传感点处的位置坐标, 并利用插值算法对相邻点间进行插值, 从而实现由点到线的重构。

图 6 为重构原理图。将简化的曲线等分为若干圆弧微元段, 其中每个微元段长为  $L$ , 即  $OO_1 = O_1O_2 = L$ , 联立其曲率值可得到不同微元段对应圆心角  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。当曲线弯曲变形时, 分别以  $O_1, O_2$  为坐标原点, 沿其切线方向建立运动坐标系。根据重构算法可求得在坐标系  $xOz$  下  $O_1$  的坐标为  $((1 - \cos\theta_1)/k_1, \sin\theta_1/k_1)$ , 平移旋转矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & (1 - \cos \theta) t_x + t_z \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta & (1 - \cos \theta) t_z + t_x \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

利用式(10)将坐标系平移旋转至  $x_1O_1z_1$ , 可得  $O_2$  的坐标为  $(\sin \theta_2/k_2, (1 - \cos \theta_2)/k_2)$ 。通过该方法, 旋转矩阵可创建各个传感点之间的位置关系, 并利用插值算法实现测量数据的曲线重构。

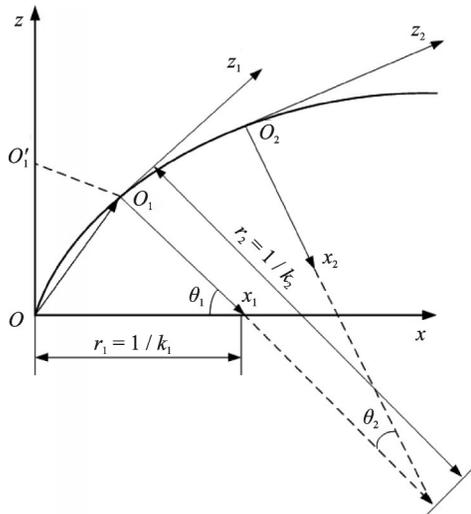


图 6 重构原理图

Fig.6 Reconstruction schematic

### 3 实验系统

#### 3.1 传感器布设封装

该浮空器蒙皮样品材料主要由防护层、气密层、承力层和粘贴层组成, 是一种层压复合材料结构。其中, 载荷承力层为浮空器蒙皮最主要的核心功能层, 其材料为聚芳酯纤维(Vectran), 具有拉伸强度高的优势, 与金属纤维的强度相当<sup>[22]</sup>。

为了得到浮空器柔性复合蒙皮变形光纤光栅传感特性, 根据浮空器蒙皮光纤光栅传感理论模型, 结合柔性复合蒙皮材料特点, 实验采用表面粘贴 FBG 的封装方式, 建立了“FBG-粘贴层-蒙皮试样”测量模型, 形成了光纤光栅柔性蒙皮形变传感器, 如图 7 所示。该传感结构将裸光纤光栅直接粘贴于浮空器柔性蒙皮表面, 减少了中间结构等应变传递界面, 具有更高的响应测量灵敏度, 能够更加真实地反映浮空器柔性复合蒙皮形变情况<sup>[23]</sup>。

在传感器封装过程中, 粘贴层必须满足以下要求<sup>[24-25]</sup>: ①FBG 能够与柔性蒙皮良好粘结, 蠕变低; ②固化后不会对柔性蒙皮材料产生影响; ③长期稳定性好, 耐老化, 能适应恶劣环境。根据图 4 分析,

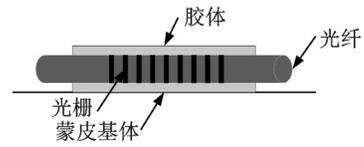


图 7 光纤光栅柔性蒙皮变形传感器

Fig.7 FBG flexible skin deformation sensor

胶泥状、常温下能够快速固化并且胶剂剪切模量较大的胶粘剂更适合光纤光栅传感器的封装。因此, 实验过程中传感器制备采用硅橡胶(GD414)和环氧树脂胶(DP420)两种不同胶剂对 FBG 传感器进行封装, 其相关参数如表 2 所示, 并通过实验分析两种不同胶粘剂封装方式下对浮空器柔性复合蒙皮形变传感器传感灵敏度的影响。

表 2 两种胶粘剂相关参数

Tab.2 Related parameters of three adhesive

名称	属性	常温剪切模量/ MPa
GD414	硅橡胶	1.5
DP420(灰白)	环氧树脂胶	31.0

#### 3.2 实验系统

实验系统如图 8 所示。该系统主要包括浮空器柔性蒙皮传感器、宽带光源、耦合器以及光谱仪。利用胶剂将 FBG 封装在柔性蒙皮表面, 其中 FBG 采用紫外曝光法刻写完成, 反射率为 90%, 边模抑制比为 20 dB。宽带光源型号采用 Lightpromotech M1043-13, 光谱宽度范围为 1 529~1 605 nm, 光源平坦度小于 2 dB, 强度为 13 dBm。光谱仪为 YOK-OGAWA AQ6370C, 其波长范围为 600~1 700 nm, 分辨率为 0.02 nm。

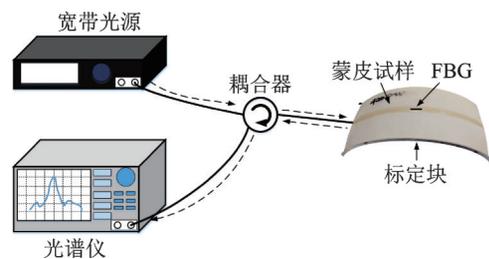


图 8 实验系统

Fig.8 Experimental system

由宽带光源发出的光经耦合器进入浮空器蒙皮 FBG 传感器, 满足 FBG 传感器调制要求的光被反射, 该反射光经耦合器被光谱仪接收, 并将其反射光谱数据进行保存。在保证蒙皮不受应力的情

况下,将蒙皮与不同曲率标定铝板自由贴合,并在末端进行粘结固定,使得FBG与标准曲率块的轴线重合,以保证蒙皮试样和标准曲率块曲率相同。FBG反射光谱的中心波长将会随曲率的增大发生漂移,利用光谱仪记录漂移后FBG的中心波长,与蒙皮曲率传感器初始状态下的中心波长进行对比,即可得到波长漂移量。对比分析不同标准曲率下FBG传感器波长数据,可得波长与曲率之间的对应关系及两组不同胶剂封装方式下传感器的灵敏度。

### 4 实验测试及结果分析

#### 4.1 变形传感标定实验

本研究采用曲率分别为 0, 0.125, 0.25, 1, 1.25, 1.67, 2.5, 5, 6.25, 8.33 和 12.5 m<sup>-1</sup>的铝合金半圆标准曲率块对传感器进行标定,测量传感器在不同曲率下中心波长的漂移量。将基于浮空器蒙皮的柔性传感器放置于不同的标定块,并使FBG置于曲率块中心线中点位置与其完全贴合,则认为传感器弯曲曲率即为标定块曲率。由于标定块曲率不同,所以实验系统采集到的FBG传感器中心波长漂移量也不同,其中1号FBG(GD414)和2号FBG(DP420)的波长漂移量分别如表3,4所示。

由表中数据可以得到,基于浮空器柔性蒙皮的FBG传感器在不同封装方式下中心波长漂移量不同。其中:由GD414胶剂封装下的传感器在曲率从0~12.5 m<sup>-1</sup>变化时,中心波长从1 529.55 nm漂移到

表 3 1号FBG的波长漂移量

**Tab.3 The wavelength shift of FBG No.1**

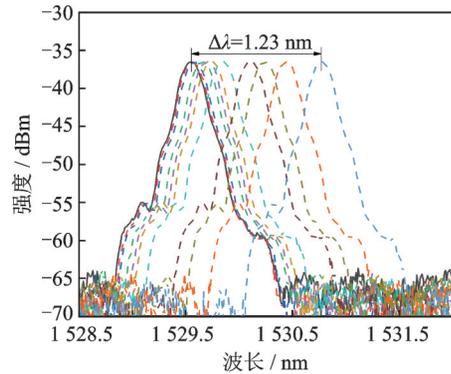
曲率/m <sup>-1</sup>	中心波长/nm	波长漂移量/nm
0	1 529.550 0	0
0.125	1 529.570 0	0.02
0.250	1 529.590 0	0.04
1.000	1 529.660 0	0.11
1.250	1 529.700 0	0.15
1.670	1 529.750 0	0.20
2.500	1 529.850 0	0.30
5.000	1 530.110 0	0.56
6.250	1 530.240 0	0.69
8.330	1 530.440 0	0.89
12.500	1 530.780 0	1.23

表 4 2号FBG的波长漂移量

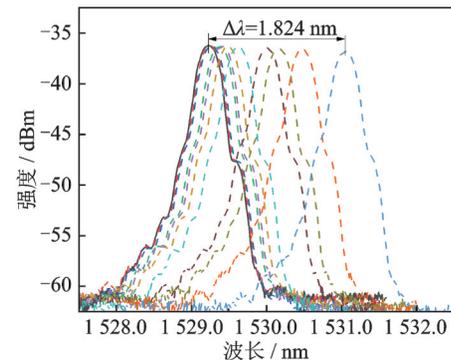
**Tab.4 The wavelength shift of FBG No.2**

曲率/m <sup>-1</sup>	中心波长/nm	波长漂移量/nm
0	1 529.235 6	0
0.125	1 529.254 0	0.018 4
0.250	1 529.272 4	0.036 8
1.000	1 529.382 8	0.147 2
1.250	1 529.419 6	0.184 0
1.670	1 529.493 2	0.257 6
2.500	1 529.622 0	0.386 4
5.000	1 530.008 4	0.772 8
6.250	1 530.168 0	0.932 4
8.330	1 530.480 0	1.244 4
12.500	1 531.060 0	1.824 4

1 530.78 nm,其最大漂移量为 1.23 nm;由DP420胶剂封装下的传感器在曲率从0~12.5 m<sup>-1</sup>变化时,中心波长从1 529.235 6 nm漂移到1 531.060 0 nm,其最大漂移量为1.824 nm。两组传感器在不同封装方式下的反射光谱如图9所示。



(a) 1号FBG在不同弯曲曲率下的反射光谱  
(a) Reflection spectrum of FBG No.1 at different curvatures



(b) 2号FBG在不同弯曲曲率下的反射光谱  
(b) Reflection spectrum of FBG No. 2 at different curvatures

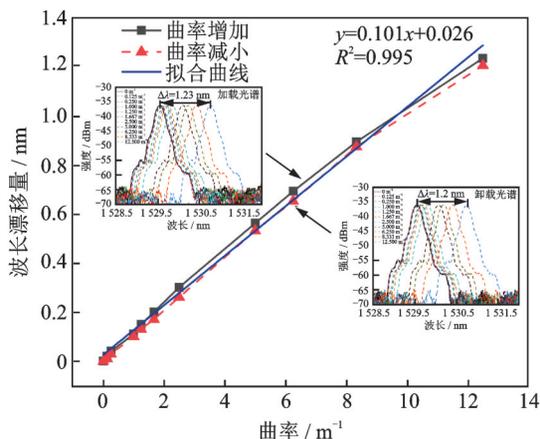
— 0 m<sup>-1</sup>    - - 1.000 m<sup>-1</sup>    - - 2.500 m<sup>-1</sup>    - - 8.333 m<sup>-1</sup>  
 - - 0.125 m<sup>-1</sup>    - - 1.250 m<sup>-1</sup>    - - 5.000 m<sup>-1</sup>    - - 12.500 m<sup>-1</sup>  
 - - 0.250 m<sup>-1</sup>    - - 1.667 m<sup>-1</sup>    - - 6.250 m<sup>-1</sup>

图 9 两组FBG在不同封装方式下的反射光谱

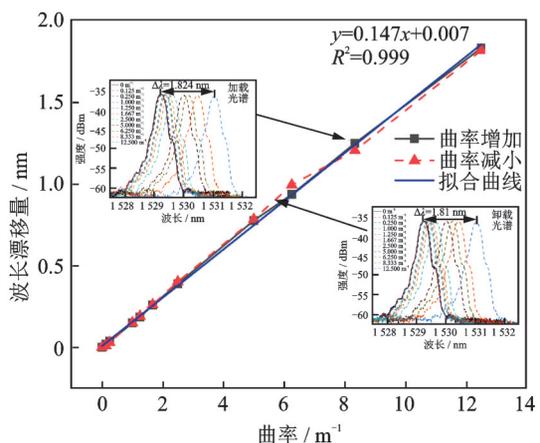
Fig.9 Reflection spectra of 2 FBGs in different packaging methods

### 4.2 变形传感特性分析

为了分析基于浮空器蒙皮的柔性传感器在不同胶剂封装方式下的重复性及灵敏度,在相同的实验条件下对两组传感器进行了测试。实验分别从曲率增大和曲率减小对传感器的重复性进行测试。图10为不同FBG的中心波长漂移量与曲率之间的关系。



(a) 1号FBG在不同弯曲曲率下的波长漂移量  
(a) Wavelength shift of No. 1 FBG under different bending curvatures



(b) 2号FBG在不同弯曲曲率下的波长漂移量  
(b) Wavelength shift of No. 2 FBG under different bending curvatures  
图10 不同FBG的中心波长漂移量与曲率之间的关系

Fig.10 The relationship between the center wavelength shift and the curvature for different FBGs

由图10可知,在GD414胶剂封装下的传感器在曲率增加和减小实验中波长漂移量最大偏差绝对值相对于最大漂移量为3.29%。在DP420胶剂封装下传感器中心波长漂移量最大偏差绝对值相对于最大漂移量为3.41%。实验结果表明,两组柔性曲率传感器在曲率增加和曲率减小的测试过程中均有较好的重复性,并且波长漂移量随着曲率的增加而增加,满足曲率测量原理式(9)中 $k$ 与 $\Delta\lambda_B$ 之间的线性关系。图11为不同FBG中心波长漂移量与曲率之

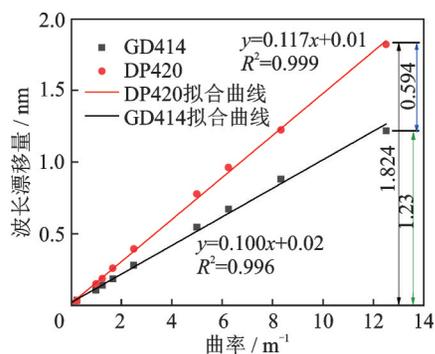


图11 不同FBG中心波长漂移量与曲率之间的关系对比  
Fig.11 Comparison of the relationship between the center wavelength shift and curvature of different FBGs

间的关系对比。

由图11可知,两组基于浮空器蒙皮的柔性曲率传感器均具有良好的线性关系。不同剪切模量胶剂的封装会对传感器的灵敏度造成影响,其中在DP420封装方式下传感器波长漂移量较大,为1.824 nm,具有较高的灵敏度。两组传感器的灵敏度如表5所示。

表5 两组传感器的灵敏度

Tab.5 The sensitivity of two sensors

传感器	灵敏度/(pm·m)
1	97.2
2	145.4

### 4.3 变形重构分析

为了得到基于表贴式光纤光栅传感器的浮空器蒙皮变形重构结果,对其进行重构实验分析。该浮空器柔性蒙皮式样含有4个FBG,其中心波长分别为1531,1534,1538和1542 nm,如表6所示。4个FBG均匀布设在蒙皮的中心线上,并采用DP420胶剂进行封装,从而保证曲率传感器具有较高的灵敏度。利用标定实验系统对所制备的传感器进行标定,并选取曲率为 $5\text{ m}^{-1}$ 的标准曲率块作为重构对

表6 曲率为 $5\text{ m}^{-1}$ 的中心波长数据表

Tab.6 Data sheet of center wavelength with curvature of  $5\text{ m}^{-1}$

传感器	初始中心波长	弯曲后中心波长	漂移量
1	1531.123	1532.055	0.932
2	1534.733	1536.241	1.507
3	1538.725	1540.975	2.250
4	1542.883	1543.821	0.938

象。基于测量数据重构算法,完成曲线的重构,重构结果如图12所示。曲线重构误差如表7所示。

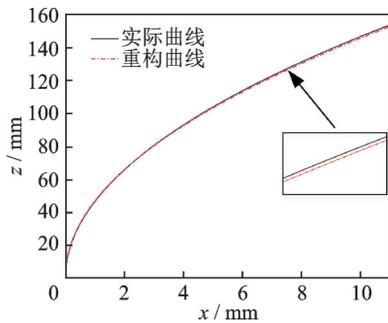


图12 曲线重构图

Fig.12 Curve reconstruction

表7 曲率为 $5\text{ m}^{-1}$ 的重构误差

Tab.7 Reconstruction error with curvature of  $5\text{ m}^{-1}$

传感器	漂移量/nm	实际位置	理论位置	重构误差/%
1	0.932	(0.000 7,0.039 8)	(0.000 7,0.037 8)	5.29
2	1.507	(0.001 6,0.058 1)	(0.001 5,0.056 7)	2.47
3	2.250	(0.004 2,0.094 8)	(0.004 1,0.094 4)	0.44
4	0.938	(0.008 5,0.134 3)	(0.008 5,0.135 1)	0.59

由此可见,4个FBG传感点重构误差均小于6%,通过插值重构算法,可以实现蒙皮的曲线重构。结果表明,光纤光栅传感方法可用于浮空器气囊柔性蒙皮的变形监测。

## 5 结束语

针对浮空器气囊蒙皮变形监测问题,提出了柔性复合蒙皮变形光纤传感重构方法。利用表面粘贴的布设方法,基于“FBG-粘贴层-基体”传感模型,实验验证了光纤光栅中心波长与柔性蒙皮曲率变化之间的线性关系,并对其在不同胶剂封装方法下光纤光栅传感器的重复性以及灵敏度进行了实验分析,得到了浮空器柔性复合蒙皮变形光纤光栅的传感特性。实验结果表明,浮空器蒙皮光纤光栅传感器在剪切模量较大的DP420环氧树脂胶的封装方法下具有良好的线性度和重复性,其灵敏度可达 $145.4\text{ pm/m}^{-1}$ 。通过浮空器蒙皮弯曲变形重构实验,表明该光纤光栅传感方法可实现浮空器气囊柔性复合蒙皮变形监测。该方法在浮空器蒙皮变形实时监测中具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

[1] 彭桂林,万志强.中国浮空器遥感遥测应用现状与展

望[J].地球信息科学学报,2019,21(4):504-511.

PENG Guilin, WAN Zhiqiang. The present situation and prospect of aerostat applied to remote sensing and remote survey in China[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(4):504-511.(in Chinese)

[2] 邓小龙,麻震宇,杨希祥,等.基于多层节点模型的平流层浮空器热力学分析[J].上海交通大学学报,2020,54(7):765-770.

DENG Xiaolong, MA Zhenyu, YANG Xixiang, et al. Thermal characteristics analysis of a stratospheric aerostat based on multi-layer node model[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(7): 765-770. (in Chinese)

[3] LI Y W, NAHON M, SHARF I. Airship dynamics modeling: a literature review[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2011, 47(3): 217-239.

[4] 宋林,姜鲁华,张远平,等.飞艇囊体薄膜材料的双向拉伸试验及结构仿真[J].复合材料学报,2016,33(11):2543-2550.

SONG Lin, JIANG Luhua, ZHANG Yuanping, et al. Biaxial tensile test and structure simulation for airship envelope material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11):2543-2550. (in Chinese)

[5] ZHANG Y, LIU D X. Influences of initial launch conditions on flight performance of high altitude balloon ascending process[J]. Advances in Space Research, 2015,56(4):605-618.

[6] LIU L B, CAO S, ZHU M. Mechanical characteristics of stratospheric airship envelope of vectran fibre-reinforced-laminated composite[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(S5):606-612.

[7] 孙久康,王全保,赵海涛,等.基于无线传感网络的平流层飞艇蒙皮应变监测[J].计算机仿真,2016,33(9):77-80,96.

SUN Jiukang, WANG Quanbao, ZHAO Haitao, et al. The strain monitoring of stratospheric airship envelope based on wireless sensor network[J]. Computer Simulation, 2016, 33(9):77-80, 96. (in Chinese)

[8] 谭金,杜超,李彤.无人飞艇气囊体积监测系统设计与[J].计测技术,2015(Z1):7-9.

TAN Jin, DU Chao, LI Tong. Design of unmanned airship airbag volume monitoring system [J]. Metrology & Measurement Technology, 2015(Z1): 7-9. (in Chinese)

[9] 王勤俭,黄鑫,朱琰雯,等.一种浮空器气囊体积测量装置设计[J].计测技术,2017,37(Z1):31-34.

WANG Qinjian, HUANG Xin, ZHU Yanwen, et al. Design of an airbag volume measuring device for aerostat[J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(Z1):31-34. (in Chinese)

[10] 易金聪,朱晓锦,张合生,等.模拟高性能飞行器翼面结构形态的非视觉检测[J].振动、测试与诊断,2014,

- 34(1):20-26.
- YI Jincong, ZHU Xiaojin, ZHANG Hesheng, et al. Non-vision shape detection of wing structure of simulated high-performance aircraft [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014, 34(1): 20-26. (in Chinese)
- [11] ZHANG P H, ZHANG L, WANG Z Y, et al. A strain-transfer model of surface-bonded sapphire-derived fiber bragg grating sensors[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(12):4399.
- [12] 曹亮, 王景霖, 何召华, 等. 光纤光栅传感网络的冲击定位方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(3):456-461. CAO Liang, WANG Jinglin, HE Zhaohua, et al. Research on impact location by using fiber Bragg grating sensor network [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(3):456-461. (in Chinese)
- [13] BLANDINO J R, DUNCAN R G, NUCKELS M C, et al. Three-dimensional shape sensing for inflatable booms [C] // *Proceedings of the 46th AIAA ASME ASCE AHS ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Austin, Texas: AIAA, 2005.
- [14] WANG Q B, ZHAO H T, QIU Y. An investigation of optical-mechanical transfer of surface-bonded fiber bragg grating sensors for aerostat envelope strain monitoring [J]. *Sensor Letters*, 2013, 11(5): 812-819.
- [15] ZHAO H T, WANG Q B, QIU Y, et al. Strain transfer of surface-bonded fiber Bragg grating sensors for airship envelope structural health monitoring[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2012, 13(7): 538-545.
- [16] 黄迪. 基于光纤光栅传感的飞艇蒙皮平面应变监测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [17] 裴晓增, 娄小平, 孙广开, 等. 浮空器柔性复合蒙皮变形光纤光栅传感实验研究[J]. *光学技术*, 2020, 46(1): 76-82. PEI Xiaozeng, LOU Xiaoping, SUN Guangkai, et al. Experimental study on fiber Bragg grating sensing of flexible composite skin-shaped aerostat[J]. *Optical Technique*, 2020, 46(1):76-82. (in Chinese)
- [18] 杨永强, 马云鹏, 武哲. 高空浮空器蒙皮材料特性分析与组合优化[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(3):333-337. YANG Yongqiang, MA Yunpeng, WU Zhe. Analysis and optimization of envelope material of high-altitude airships[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(3):333-337. (in Chinese)
- [19] 郭伟, 李新良, 宋昊. 表面粘贴光纤光栅传感器的应变传递分析[J]. *计测技术*, 2011(4):4-7. GUO Wei, LI Xinliang, SONG Hao. Strain transfer analysis of surface-attached fiber Bragg grating sensor [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2011(4): 4-7. (in Chinese)
- [20] FALCETELLI F, ROSSI L, SANTE R D, et al. Strain transfer in surface-bonded optical fiber sensors [J]. *Sensors*, 2020, 20(11):3100.
- [21] CHEN G, DING K Q, FENG Q B, et al. Strain transfer mechanism of grating ends fiber bragg grating for structural health monitoring[J]. *Structural Durability & Health Monitoring*, 2019, 13(3):289-301.
- [22] 田越, 肖尚明. 平流层飞艇囊体材料的发展现状及关键技术[J]. *合成纤维*, 2013, 42(4):11-15. TIAN Yue, XIAO Shangming. The development and key technology of stratospheric airship envelop material [J]. *Synthetic Fiber in China*, 2013, 42(4):11-15. (in Chinese)
- [23] 曾鹏, 王源, 陈飞琼, 等. 胶粘剂对表贴式聚酰亚胺光纤布拉格光栅应变传递的影响分析[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(1):47-53. ZENG Peng, WANG Yuan, CHEN Feiqiong, et al. Analysis of the effect of adhesives on strain transfer for surface bonded polyimide fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(1): 47-53. (in Chinese)
- [24] 张开宇, 闫光, 鹿利单, 等. 预拉伸光纤光栅应变传感器传感性能研究[J]. *压电与声光*, 2017, 39(5): 654-658. ZHANG Kaiyu, YAN Guang, LU Lidan, et al. Study on the sensing performance of pre-stretching fiber grating strain sensor[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptic*, 2017, 39(5):654-658. (in Chinese)
- [25] MOTWANI P, PEROGAMVROS N, TAYLOR S, et al. Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 303:111833.



**第一作者简介:**刘炳锋,男,1996年1月生,硕士生。主要研究方向为光纤传感器、光纤光栅柔性传感。  
E-mail:1094869384@qq.com

**通信作者简介:**董明利,男,1965年2月生,博士、教授。主要研究方向为视觉与光电检测、光纤传感与光电器件、生物医学检测技术及仪器。  
E-mail:dongml@bistu.edu.cn