

文章编号 1004-924X(2016)增-0346-07

# 基于光纤光栅传感地层应力的监测方法与实验

赵 斌, 仲志成\*, 林 君, 李 哲, 刘玉娟

(吉林大学 仪器仪表与电气工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了实现对地下岩层平面应力状态及其变化规律的有效监测, 基于光纤光栅传感技术提出了一种平面直角应变花与光纤光栅相结合的监测方法。将光纤光栅胶结在碳纤维层积复合材料的凹槽内形成光纤应变传感单元, 三个光纤应变传感单元以直角应变花的形式附着于圆柱形结构上, 形成了对平面应力状态监测的钻孔三分量传感器。以二向应变特征方程与 FBG 应变传感理论为基础, 推导出最大主应变与波长变化之间的关系, 根据胡可定律及传感器所处地层的弹性模量得出了主应力与波长变化之间的关系。对光纤应变传感单元进行了温度与应变的标定, 在室内对传感装置进行了模拟实验。实验结果表明: 光纤应变传感单元可监测的应变为  $-1500 \sim 1500 \mu\epsilon$ ; 应力测量量程为  $0 \sim 4 \text{ MPa}$ ; 主应力的监测平均误差为  $1.50\%$ ; 应力分辨率为  $0.02816 \text{ MPa}$ 。传感器的监测结果与实际加载应力的变化规律相一致, 可满足对地下岩层竖直平面应力状态连续监测的要求。

**关键词:** 光纤光栅; 碳纤维层积复合材料; 直角应变花; 光纤应变传感单元

**中图分类号:** 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20162413.0346

## Monitoring method and experiment for stratum stress based on fiber Bragg grating sensing

ZHAO Bin, ZHONG Zhi-cheng\*, LIN Jun, LI Zhe, LIU Yu-juan

(College of Instrumentation & Electrical Engineering of  
Jilin University, Changchun, Jilin, 130022)

\* Corresponding author, E-mail: zhongzc@jlu.edu.cn

**Abstract:** To achieve effective monitoring of underground rock formation stress and its changing rules, a monitoring method combining rectangular strain rosette with FBG (Fiber Bragg Grating) based on FBG sensing technology is put forward. Method: adhere fiber grating to the groove of fiber carbon laminated composite materials to form the fiber strain sensor unit, and three fiber strain sensor units were attached to the cylindrical structure in the form of rectangular strain rosette to form the drilling three-component sensor for monitoring of plane stress state; deduce the relationship between the maximum principal strain and wavelength change based on bi-direction strain characteristic equation and FBG strain sensing theory, and then work out the relationship between principal strain and wavelength change in accordance with Hooke's Law and elasticity modulus of the formation where the sensor is located; carry out the temperature calibration and strain calibration in the fiber strain sensor unit, and then conduct a simulation experiment in the sensing devices indoors. The results indicate that

收稿日期: 2016-05-10; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 吉林省科技厅发展计划资助项目 (No. 20130206009GX); 国家自然科学基金资助项目 (No. 41504135)

strain monitoring range of the fiber strain sensor unit is  $-1500 \sim 1500 \mu\epsilon$ ; the stress measuring span is  $0 \sim 4$  MPa; average monitoring error of the principal stress is  $1.50\%$ ; the stress resolution is  $0.02816$  MPa. Monitoring results of the sensor is consistent with changing rules of the actually-loaded stress, which can meet the requirements for continuous monitoring of the underground vertical and plane stress.

**Key words:** FBG; carbon fiber laminated composite material; rectangular strain rosette; fiber strain sensor unit

## 1 引 言

地应力是指客观存在于地壳体内且未受工程扰动的一种自然力(原岩应力),它是导致地壳岩体产生变形、断裂、褶皱乃至地震等的根本作用力。李四光教授认为,岩石中产生的变形或破裂,是应力活动的结果<sup>[1]</sup>。因此,及时准确识别从微观到宏观的力学信号在岩石中的表征,并在岩层达到破坏之前发出预警,已经成为关键力学问题之一。地下岩层内部应力状态会对裂纹的起裂、扩展及延伸起到了至关重要的作用。因此,通过监测设备及时掌握地下岩层应力状态信息,获取裂纹扩展的致裂机理,是减少灾害发生的有效手段。

目前,可用于地应力测量方法根据其测量数据的不同可分为地应力直接测量法和地应力间接测量法。直接测量方法包括扁千斤顶法、刚性包体应力记法、水压致裂法、声发射法等。扁千斤顶法是一维应力测量方法,一个扁槽的测量只能确定测点处垂直于扁千斤顶方向的应力分量;刚性包体应力计法使用的传感器为传统的应变片,存在抗干扰性、耐久性和长期稳定性较差等缺点,容易受到外界影响而失效;水压致裂法通过对岩石内部打孔注入高压水使岩石破裂来测试岩石内部应力,是一种二维应力测量方法,但在实际操作中比较复杂;在声发射测试中,声发射速率与加载速率有关,在加载初期,人工操作很难保证加载速率恒定,在声发射事件速率曲线上可能出现多个峰值,难于判定真正的 Kaiser 点。间接测量法包括孔径变形法、孔壁应变法、空心包体法。孔径变形法要确定一点的全应力,必须向测点打三个不同方向的钻孔,进行同样测定,很难实现;孔壁应变计是将应变花粘贴在孔壁上,由于应变花和孔壁之间的接触面积较小,如果孔壁存在裂纹缺陷,就

很难保证胶结质量,影响测量结果的可靠性;空心包体应变计受外界因素(材料弹性模量、泊松比、自身形状、钻孔直径)影响较大,必须加入修正系数才能确定测试的准确性。

本文提出一种平面直角应变花与光纤光栅相结合的监测方法。光纤光栅是利用材料的光敏性,在纤芯内形成空间相位光栅,其作用的实质是在纤芯内形成一个窄带的滤波器或反射镜。与其他传感技术相比,光纤光栅具有抗电磁干扰能力强、耐腐蚀性好、体积小、重量轻、功耗小、测量范围大等优点,是一种有着广泛应用前景的、性能优良的无源敏感元件<sup>[2-6]</sup>。本文研制的三分量传感器采用各向异性碳纤维层积复合材料与布拉格光栅(FBG)相结合制造的一种光纤应变传感单元,针对钻孔监测要求,传感器整体结构采用圆柱形结构设计,三个光纤应变传感单元以圆柱轴线方向为基准并顺时针旋转  $45^\circ$  附着于机械结构上。可根据应变与应力相应的换算公式间接得到地下岩层的应力值。

## 2 基本原理

### 2.1 理论分析

光纤光栅的结构和光谱响应如图 1 所示,根据光纤光栅的耦合模理论<sup>[7-9]</sup>,当光源发出的宽带光在光栅布拉格光栅中传输时,只有满足 Bragg 条件的光才会被 FBG 反射回来,其余的全部投射出光栅。反射光的中心波长  $\lambda_B$  为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

其中: $\lambda_B$  是入射光通过光纤布拉格光栅时反射回来的中心波长, $n_{\text{eff}}$  是光纤纤芯针对自由空间中心波长的折射率, $\Lambda$  是光栅的周期。

光纤光栅波长变化与应变之间的表达式:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon \times \lambda_B, \quad (2)$$

其中: $P_e$  为弹光系数,由光纤光栅的材料确定,令

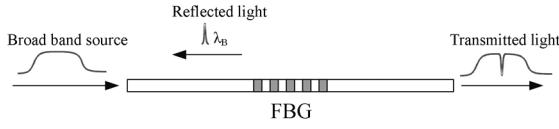


图 1 FBG 反射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG reflection

$k_\epsilon = (1 - P_\epsilon)\lambda_B$ , 由公式(2)得到:

$$\Delta\lambda_B = k_\epsilon \epsilon. \quad (3)$$

通过对波长的解调得出波长变化量进而计算出传感芯片的应变,由平面应力状态理论可知,假设已知空间点的应变分量为  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  和  $\gamma_{xy}$ ,则利用广义胡克定律可求出该点的应力分量  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  和  $\tau_{xy}$ .在测量时,需要用实验方法确定某一点的主应力大小和方向,一般只要测得该点一对正交方向的应变分量  $\epsilon_{\alpha_1}$ ,  $\epsilon_{\alpha_2}$ ,  $\epsilon_{\alpha_3}$  上的线应变。

由二向应变特征方程,求得两个线应变和一个剪应变:

$$\begin{cases} \epsilon_{\alpha_1} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\alpha_1 - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\alpha_1 \\ \epsilon_{\alpha_2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\alpha_2 - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\alpha_2 \\ \epsilon_{\alpha_3} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\alpha_3 - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\alpha_3 \end{cases} \quad (4)$$

3 个应变传感单元布置方向分别为:  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 45^\circ$ ,  $\alpha_3 = 90^\circ$ , 可得:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \epsilon_{0^\circ} \\ \epsilon_y = \epsilon_{90^\circ} \\ \gamma_{xy} = \epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ} - 2\epsilon_{45^\circ} \end{cases} \quad (5)$$

主应变大小与方向为:

$$\begin{cases} \tan 2\alpha_0 = -\frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \\ \left. \begin{matrix} \epsilon_{\max} \\ \epsilon_{\min} \end{matrix} \right\} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

将式(3),(5)带入式(6)中得到:

$$\tan 2\alpha_0 = -\frac{\Delta\lambda_{B0^\circ} + \Delta\lambda_{B90^\circ} - 2\Delta\lambda_{B45^\circ}}{\Delta\lambda_{B0^\circ} - \Delta\lambda_{B90^\circ}}, \quad (7)$$

$$\left. \begin{matrix} \epsilon_{\max} \\ \epsilon_{\min} \end{matrix} \right\} = \frac{\Delta\lambda_{B0^\circ} + \Delta\lambda_{B90^\circ}}{2k_\epsilon} \pm$$

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda_{B0^\circ} - \Delta\lambda_{B90^\circ}}{2k_\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_{B0^\circ} + \Delta\lambda_{B90^\circ} - 2\Delta\lambda_{B45^\circ}}{2k_\epsilon}\right)^2}, \quad (8)$$

式中:  $\Delta\lambda_{B0^\circ}$ 、 $\Delta\lambda_{B45^\circ}$ 、 $\Delta\lambda_{B90^\circ}$  分别是  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  传感芯片对应波长变化量。

根据胡克定律,即可求得平面主应力的最值:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = E\epsilon_{\max} \\ \sigma_{\min} = E\epsilon_{\min} \end{cases}, \quad (9)$$

其中:  $\sigma_{\max}$  为平面内的最大主应力,  $\sigma_{\min}$  为平面内的最小主应力,  $E$  为传感器所处地层岩体的弹性模量。

### 2.2 碳纤维层积复合材料结构光纤应变传感单元

碳纤维层积复合材料是将碳纤维薄片用环氧树脂胶经一定工艺均匀胶结而成,其立体结构如图 2 所示。

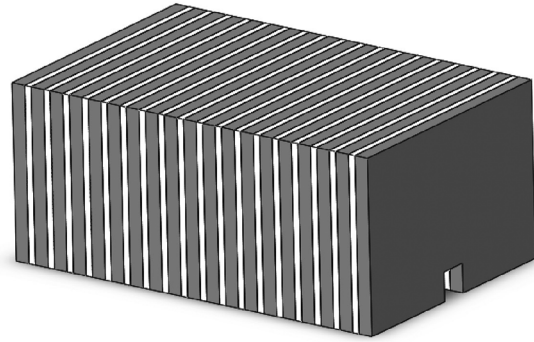


图 2 碳纤维层积复合材料

Fig. 2 Carbon fiber laminated composite material

用环氧树脂胶把 FBG 光纤光栅粘贴在碳纤维层积复合材料的 Z 方向的表面上,其理论模型如图 3 所示。

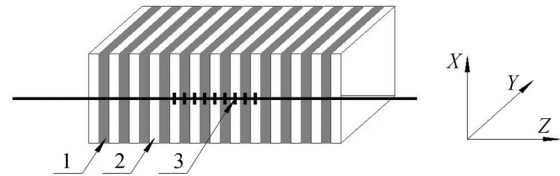


图 3 光纤应变传感单元

Fig. 3 Optical fiber sensing unit

碳纤维与环氧树脂胶的典型弹性模量值分别为  $E_f = 380 \text{ GPa}$ ,  $E_m = 3.5 \text{ GPa}$ 。材料的泊松比  $\nu_{\text{CFLC-zx}} = 0.3$ ,  $\nu_{\text{CFLC-yz}} = 0.3$ ,

$$E_{\text{CFLC-z}} = \frac{E_{\text{CFL-z}} \cdot E_m}{V_{\text{CFLC-CFL}} \cdot E_m + V_{\text{CFLC-m}} \cdot E_{\text{CFL-z}}}, \quad (10)$$

$$E_{\text{CFLC-x}} = V_{\text{CFLC-CFL}} E_{\text{CFL-x}} + V_{\text{CFLC-m}} E_m, \quad (11)$$

$$E_{\text{CFLC-y}} = V_{\text{CFLC-CFL}} E_{\text{CFL-y}} + V_{\text{CFLC-m}} E_m. \quad (12)$$

根据公式(10),(11),(12)可以计算出碳纤维层积复合材料 3 个方向的弹性模量分别为:  $E_{CFLC-x} = 31.5 \text{ Gpa}$ ,  $E_{CFLC-y} = 182.3 \text{ Gpa}$ ,  $E_{CFLC-z} = 6.6 \text{ Gpa}$ 。可以看出,在受到相同的应力下,在 Z 轴方向的应变要远大于 X,Y 轴方向的应变,因此把光纤光栅胶结在碳纤维层积复合材料的 Z 轴方向来实现应变测量。

### 2.3 光纤应变传感单元应力性能测试

对光纤应变传感单元进行压力测试,其测试装置如图 4 所示,将光纤应变传感单元放入压力罐中,通过压力泵给压力罐输入不同的压力。

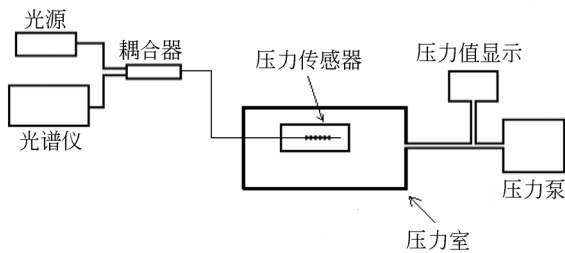


图 4 压力测试装置

Fig. 4 Pressure testing device

当压力泵输入压力不断变化时,光纤应变传感单元波长随压力的变化如图 5 所示,可以看出光纤传感单元波长随应力变化具有良好的线性度与重复性。因此,对于光纤光栅应力传感器,碳纤维层积复合材料是一种良好的应变传感材料。

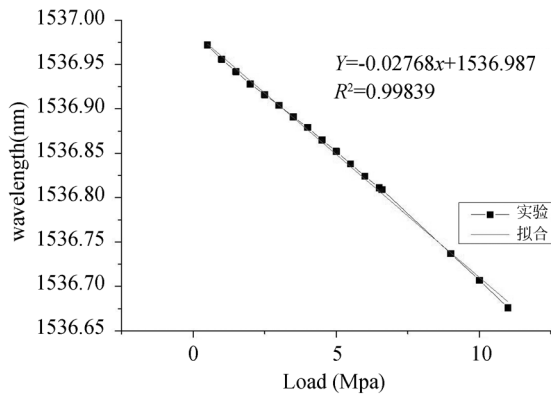


图 5 FBG 波长随应力变化

Fig. 5 FBG wavelength changes with stress

### 2.4 三分量传感器外观与内部结构

三分量传感器以铝合金管基座为骨架,内部

铝合金管基座采用空心结构,可以放置光纤。其强度、刚度、稳定性良好,能保证光纤在其内部不受到损伤。光纤应变传感单元安装板固定在其凹槽上,防止光纤应变传感单元上下移动与旋转。基座内部放置光纤温度传感单元,用于实现对光纤应变传感单元的温度补偿。光纤应变传感单元以直角应变花的形式附着在铝合金基座上。3 个光纤应变传感单元与铝合金管基座分别成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$ ,这样就构成了直角应变花,内部结构如图 6 所示。该三分量传感器的设计非常适用于直径较小深度较大的柱状圆孔监测。

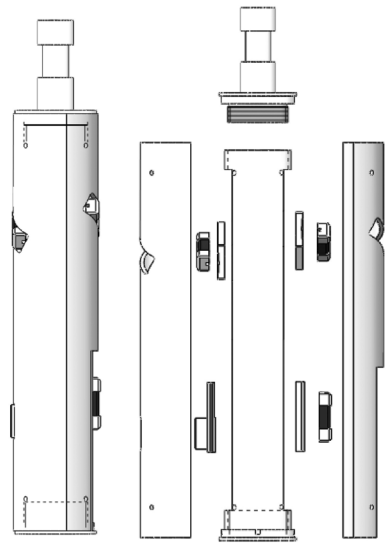


图 6 传感器的外观与内部结构图

Fig. 6 Appearance and internal structure of sensor

## 3 室内模拟实验与结果

### 3.1 光纤应变传感单元的标定

对已封装好的光纤应变传感单元进行温度标定,在恒温水浴箱中对光纤应变传感单元标定,温度标定系数 ( $22.3 \text{ }^\circ\text{C} \sim 47.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ),温度标定结果如表 1 所示,从标定结果可以计算出中心波长分别为  $1553.459 \text{ nm}$ ,  $1534.946 \text{ nm}$  和  $1529.880 \text{ nm}$  的 3 个光纤应变传感单元灵敏度系数分别为  $18.7 \text{ (pm/}^\circ\text{C)}$ ,  $22.8 \text{ (pm/}^\circ\text{C)}$  和  $18.6 \text{ (pm/}^\circ\text{C)}$ 。在分辨率为  $1 \text{ }\mu\text{m}$  的标定架上测量光纤应变传感单元的变形量,通过对光纤应变传感单元光纤光栅波长变化的测量,实现对光纤光栅应变的标定,

既能能得出应变灵敏度。光纤应变传感单元的应变监测范围为  $-1\ 500 \sim 1\ 500\ \mu\epsilon$ , 应变标定结果如表 2 所示。通过对应变标定, 可以计算出中心波长分别为  $1\ 553.459\ \text{nm}$ ,  $1\ 534.946\ \text{nm}$  和  $1\ 529.880\ \text{nm}$  的光纤应变传感单元应变灵敏度分别为  $0.71\ \text{pm}/\mu\epsilon$ ,  $0.70\ \text{pm}/\mu\epsilon$ ,  $0.69\ \text{pm}/\mu\epsilon$ 。通过对传感单元温度与应变的标定, 可以对光纤应变传感单元进行温度补偿。

表 1 光纤应变传感单元的温度标定结果

Tab. 1 Temperature calibration results of optical fiber strain sensor

温度/ $^{\circ}\text{C}$	波长/ $\text{nm}$	波长/ $\text{nm}$	波长/ $\text{nm}$
	1 553.459	1 534.946	1 529.880
22.3	1 553.658	1 534.896	1 529.966
29.0	1 553.735	1 534.980	1 530.030
33.0	1 553.798	1 535.062	1 530.096
40.0	1 553.937	1 535.230	1 530.235
44.0	1 554.035	1 535.369	1 530.333
47.9	1 554.128	1 535.455	1 530.435

表 2 光纤应变传感单元的应变标定结果

Tab. 2 Strain calibration results of optical fiber strain sensor

应变/ $\mu\epsilon$	波长/ $\text{nm}$	波长/ $\text{nm}$	波长/ $\text{nm}$
	1 553.459	1 541.440	1 547.512
0	1 553.725	1 542.440	1 547.194
600	1 554.151	1 542.859	1 547.614
1 400	1 554.710	1 543.417	1 548.176
1 800	1 554.992	1 543.726	1 548.460
2 400	1 555.415	1 544.126	1 548.880
3 000	1 555.837	1 544.450	1 549.400

在单分量传感单元的应力标定实验中, 将单分量传感单元埋入水泥块中且保持单分量传感单元的轴向垂直于地面, 测出单分量传感单元波长变化与应力载荷之间的对应关系。对反射光谱波长与应力载荷进行数据分析, 单分量传感单元波长变化随着应力载荷变化如图 7 所示, 单分量传感单元波长变化随着载荷变化线性度较好, 从图中可以得出  $1\ \text{MPa}$  对应着单分量传感单元波长变化量为  $35.5\ \text{pm}$ , 光纤光栅解调仪分辨率为  $1\ \text{pm}$ , 经过计算, 测试传感器应力分辨率为  $0.028\ 16\ \text{MPa}$ 。

### 3.2 室内实验测试与分析

将钻孔三分量传感器浇筑在水泥块中且保持

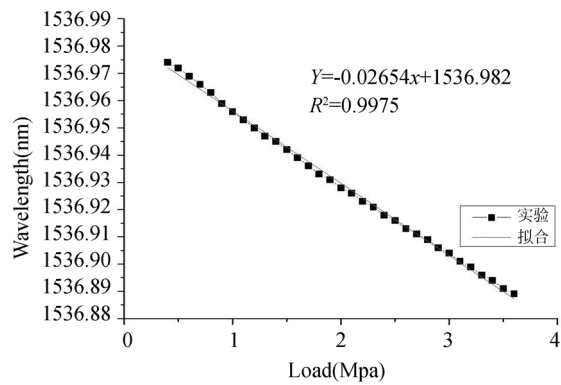


图 7 单分量传感单元波长与载荷变化关系

Fig. 7 Relationship between the wavelength of single component sensing unit and the load variation

三分量传感器的轴向垂直于地面。假设水泥块是均质、连续、各向同性的弹性体, 并采用 WDW 电子万能试验机对水泥块垂直方向施加应力, 通过光纤光栅解调仪读出 3 个光纤应变传感单元分别对应的波长<sup>[10-11]</sup>。将计算出的传感器的监测应力与实际施加应力相对比, 检验钻孔三分量传感器的监测性能。实验装置如图 8 所示。

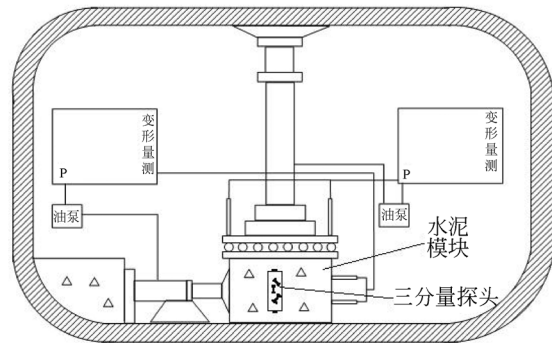


图 8 室内模拟试验装置

Fig. 8 Indoor simulation test device

通过对水泥块施加不同的应力, 得到  $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  的光纤应变传感单元的反射波长随载荷变化。

在传感器的 3 个光纤应变传感单元中,  $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  波长随载荷的变化曲线如图 9, 10, 11 所示。 $0^{\circ}$  传感单元波长随着载荷增大而减小, 处于受压状态;  $45^{\circ}$  传感单元由于施加应力与其垂直, 在其轴线方向不受施加应力的作用, 因此波长没有明显变化;  $90^{\circ}$  传感单元波长随载荷增大而增

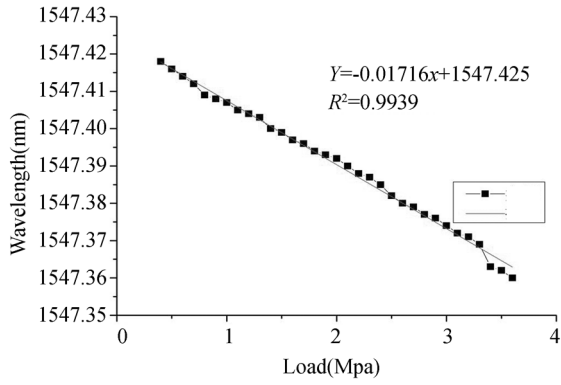


图 9 0°传感单元波长与载荷变化

Fig. 9 Wavelength and load variation of 0 degree sensing unit

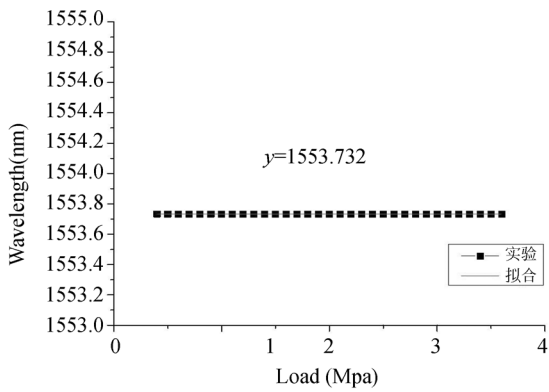


图 10 45°传感单元波长与载荷变化

Fig. 10 Wavelength and load variation of 45degree sensing unit

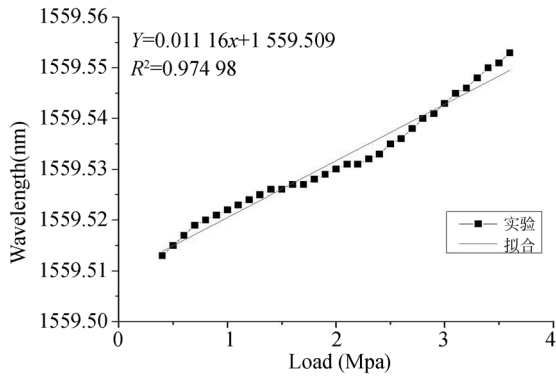


图 11 90°传感单元波长与载荷变化

Fig. 11 Wavelength and load variation of 90 degree sensing unit

大,处于受拉状态;从 3 个光纤应变传感单元波长与载荷对应关系,波长随载荷变化拟合线性度好,可以计算出平面中最大主应力和方向。

### 3.3 实验结果

对 3 个光纤应变传感单元波长与载荷数据分析,并将载荷的真实值与测量值进行对比,测试结果对比如表 3 所示,通过真实值与测量值对比可以得出,载荷真实值与测量值大小相符,主应力大小测量平均误差为 1.50%。

表 3 测试结果对比

Tab. 3 Comparison of test results

应力真实值(MPa)	应力测量值(MPa)	主应力角度真实值(°)	主应力角度测量值(°)	应力大小误差/%
1,100 0	1,061 1	-90.00°	-67.52	3.50
1,200 0	1,179 9	-90.00	-67.51	1.67
1,300 0	1,287 5	-90.00	-65.14	0.95
1,400 0	1,406 3	-90.00	-65.48	0.45
1,500 0	1,506 7	-90.00	-64.76	0.44
1,600 0	1,603 1	-90.00	-65.14	0.19
1,700 0	1,714 7	-90.00	-63.79	0.86
1,800 0	1,822 4	-90.00	-64.14	1.24
1,900 0	1,952 3	-90.00	-64.49	2.75
2,000 0	2,048 8	-90.00	-64.11	2.40
2,100 0	2,145 2	-90.00	-64.42	2.15

### 4 结 论

本文提出了一种平面直角应变花与光纤光栅相结合的监测方法,采用新型碳纤维层积复合材料作为光纤光栅的载体,针对钻孔式地应力监测,测试传感器采用圆柱体机械结构。在室内进行地应力测试的模拟实验,实验结果表明:测试传感器可以监测地下应力的方向和大小,主应力大小监测平均误差为 1.50%,分辨率为 0.028 16 MPa。在模拟实验中,由于传感器体积相较于被测材料水泥块而言不属于无限小,尺寸效应在测试中有一定的影响,因此在监测计算中有一定的误差。混凝土与传感器界面接触存在一定的应力集中与传感器机械结构在外力作用下发生了微小形变,都会给监测带来一定的误差。因此,该传感器的模拟实验装置还需要进一步改进与优化。

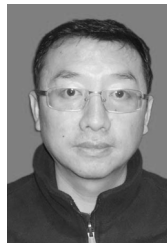
## 参考文献:

- [1] 李四光. 地质力学方法[M]. 北京: 科学出版社, 1976.  
LI S G. *Geological Mechanics Method*[M]. Beijing: Science Press, 1976.
- [2] 潘明忠, 刘玉娟, 陈少杰, 等. 中阶梯光栅光谱仪 CCD 相机的设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8): 1726-1731.  
PAN M ZH, LIU Y J, CHEN SH J, *et al.*. Design of echelle spectrograph CCD camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1726-1731.
- [3] 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.  
HU ZH X, MA Y B, TAN D J, *et al.*. Research on pipeline landslide monitoring method based on Fiber Bragg grating sensor [J]. *Photon Journal*, 2010, 39(1): 33-36.
- [4] 周广东, 李宏男, 任亮, 等. 光纤光栅传感器应变传递影响参数研究[J]. 工程力学, 2007(6): 169-173.  
ZHOU G D, LI H N, REN L, *et al.*. Study on the influence parameters of strain transfer of fiber grating sensor[J]. *Engineering Mechanics*, 2007(6): 169-173.
- [5] 胡曙光, 赵启大, 何士雅, 等. 金属管封装光纤光栅用于建筑钢筋应变的测量[J]. 光电子·激光, 2008(11): 1437-1441.  
HU SH Y, ZHAO Q D, HE SH Y, *et al.*. Measurement of the strain of the building of a metal tube packaged fiber grating [J]. *Photoelectron laser*, 2008(11): 1437-1441.
- [6] 马浩浩, 刘保健, 翁效林, 等. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道模型试验中应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(增 2): 185.  
MA H H, LIU B J, WENG X L, *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensing technology in tunnel model test[J]. *Journal of Rock and Soil*, 2012, 33(Z2): 185.
- [7] 张自嘉. 光纤光栅理论与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 199-211.  
ZHANG Z J. *Fiber Bragg Grating Theory and Sensing Technology*[M]. Beijing: Thomson Learning Press, 2011: 199-211.
- [8] 李焕强, 孙红月, 刘永莉, 等. 光纤传感技术在边坡模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1703.  
LI H Q, SUN H Y, LIU Y L, *et al.*. Application of optical fiber sensing technology in slope model test [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8): 1703.
- [9] 廖廷彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 196-202.  
LIAO Y B. *Fiber Optics*[M]. Beijing: Tsing Hua University Press, 2000: 196-202.
- [10] 程世虎, 徐国权. 光纤光栅传感技术在露天矿边坡监测的应用[J]. 铜业工程, 2015(4): 45-48.  
CHENG SH H, XU G Q. Application of fiber Bragg grating sensing technology in slope monitoring of open pit mine [J]. *Copper Engineering*, 2015(4): 45-48.
- [11] 方运买, 王太元, 王侃. 基于 FBG 技术的副井马头门变形在线监测[J]. 煤矿安全, 2015(4): 210-212.  
FANG Y M, WANG T Y, WANG K. Online monitoring of deformation of FBG technology based on auxiliary shaft ingate [J]. *Coalmine Safety*, 2015(4): 210-212.

## 作者简介:



赵斌(1989—),男,山东临沂人,硕士研究生,2014年于烟台大学获得学士学位,主要从事光纤传感传感器研究。  
E-mail: binzhaott@163.com



仲志成(1974—),男,吉林长春人,副教授,2000年于吉林大学获得硕士学位,2008年于吉林大学获得博士学位,主要从事光纤传感应用技术的研究。  
Email: zhongzc@jlu.edu.cn