

文章编号 1004-924X(2018)02-0325-11

基于光纤传感技术的三维地应力传感器

仲志成, 赵 斌, 林 君, 刘玉娟*

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 为了实现对地下岩层空间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与平面应力状态测量原理, 提出了一种平面应变花与光纤光栅传感技术相结合的监测方法。通过利用碳纤维层积复合材料对光纤光栅封装做成应变传感单元, 九个应变传感单元分别组成两组直角应变花与一组等角应变花, 三组应变花分别放置于三个圆柱形探头 S_1, S_2, S_3 上, 三个探头以一定的机械结构连接构成地层空间应力的监测的三维地应力传感装置。对光纤应变传感单元进行温度与应力的标定实验, 在室内对整体传感装置进行了应力加载模拟实验。实验结果表明: 光纤应变传感单元的应力分辨率为 0.017 2 MPa; 应力监测为 0~60 MPa; 探头 S_1 最大主应力的监测平均误差为 16.31%, 探头 S_2 最大主应力的监测平均误差为 24.36%, S_3 探头的绝对误差为 0.006 8 MPa; 实际加载应力与传感器测量的应力空间角度误差平均值为 1.24°。传感器的监测结果与实际加载应力的变化规律相一致, 可满足对地下岩层空间应力状态连续监测的要求。

关键词: 光纤传感; 光纤光栅; 地下岩层空间应力; 碳纤维层积复合材料; 应变花; 应变传感单元

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0325

Three dimensional in-situ stress sensor based on optical fiber sensing technology

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

(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

* Corresponding author, E-mail: xuliuyujuan@163.com

Abstract: In order to realize the effective monitoring of the spatial stress state of the underground rock formation and its variation. A monitoring method combining plane strain and fiber grating sensing technology was proposed, based on the principle of fiber grating sensing and plane stress state measurement. The strain sensor unit was composed of two sets of strain sensor, which were composed of two sets of right angle strain flower and a group of equiaxed strain flower. The three sets of strain flowers were placed in three cylindrical shapes respectively by using carbon fiber laminated composite material. On the probe S_1, S_2, S_3 , the three probes were connected with a certain mechanical structure to form the three-dimensional geo-stress sensor of the formation space stress monitoring. The experiment of temperature and stress of the fiber strain sensor was carried out, and the stress sensing experiment of the whole sensing device was carried out indoors. Experimental results showed that the stress resolution of the fiber strain sensor was 0.017 2 MPa; stress monitoring range of 0—60 MPa; the av-

收稿日期: 2017-06-19; 修订日期: 2017-08-10.

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

erage error of the maximum principal stress of the probe S_1 was 16.31%, the average error of the maximum principal stress of the probe S_2 is 24.36%, and the absolute error of the S_3 probe was 0.006 8 MPa. The mean value of the stress space angle error measured by the actual loading stress and the sensor was 1.24°. The monitoring results of the sensor are consistent with the variation of the actual loading stress, which can meet the requirement of continuous monitoring of the spatial stress state of the underground rock.

Key words: optical fiber sensing; Fiber Bragg Grating(FBG); spatial stress of subsurface rock; carbon fiber material; strain flowers; strain sensor unit

1 引 言

地壳岩体应力状态是地壳最重要的性质之一,地壳表面及其内部发生的各种构造现象及其伴生的各种地质灾害都与岩体应力的作用密切相关^[1]。我国是世界上地质构造活动性最为剧烈的国家之一,地质灾害频发,地球内部热动力与板块间作用力直接导致火山喷发、地震、岩爆和群发性滑坡泥石流等重大灾害。进一步了解地球内部的精细结构和地块活动规律,地壳岩体应力集中和释放的机理是地质灾害预警预报的基础。通过地壳岩体应力的测量与监测,获得关键构造部位的真实应力状态,即应力的大小与方向,可以为活动断裂的动力学研究及地壳应力场的反演提供可靠的应力边界约束条件,从而促进地球动力学研究的进步^[2]。

地应力状态数据是油气资源勘查、地质灾害研究与防治、城市建设、地震预测预报、边坡岩体稳定性研究等领域不可缺少的基础资料,其准确程度直接影响工程的质量甚至成败。因此,地应力观测成为人类工程活动中不可或缺的工作。

近年来,国际地球物理学界十分重视地壳岩体应力状态观测技术,21 世纪初,钻孔式地壳岩体应力状态变化监测技术进入新的发展阶段,以日、美等国迅速转向研制深井综合观测系统为标志^[1-2]。我国的地应力监测技术与研究开始于 20 世纪 60 年代,在其后的几十年间,我国的地应力测试技术及应用研究得到了迅速的发展,相继开发和研制了压磁应力解除法、空心包体应力解除法、水压致裂法、钻孔崩裂法、岩石声发射法等应力测试仪器和设备^[3]。目前,用于地壳岩体应力

相对测量的仪器主要有压磁式应力计、振弦式应力计、体积式应变计、USBM 孔径变形计、空心包体应变计等。压磁式应力计利用镍合金磁致收缩来测量应力,只能测量二维应力状态;振弦式应变计通过钢弦张力变换推算岩体应力,是一种单向应力计,只能测量一维应变;孔径变形计通过测量钻孔的直径变化计算垂直孔轴线平面的二维应力状态;空心包体应变计利用三组电阻应变片组成应变花来实现对地壳岩体空间应力大小与方向的监测。以上都是传统的电学监测仪器,它们存在抗电磁干扰能力差,不能实现长距离传输与采集,难于实现分布式监测。

近十年来,国内外对采用光纤传感技术的应力计进行了大量研究。欧进萍等人^[4]将封装光纤光栅埋入到钢筋混凝土梁中,测量其内部混凝土及钢筋的应变。Fuhr 等人^[5]在美国 Winooski 河上的 Waterbury 大桥的面板上埋入了 8 个 FBG 传感器,探测到 50 $\mu\epsilon$ 的应变值。赵雪峰等人^[6]在等强度梁上布设光纤光栅应变花测量平面应力的方向和大小。朱鸿鹄等人采用光纤光栅传感技术开发了混凝土应力计、测斜仪、沉降仪等岩土监测仪器,对位于香港九龙塘的中国神学院施工期间的安全进行了监测^[7]。以上工作大部分都是利用光纤光栅测量结构的单向应力应变或者平面应力应变,尚不能应用在钻孔应力监测中获得测点空间主应力的方向和大小,不能进行复杂应力场的监测,因此基于光纤光栅阵列测量多维应力场是国内外学者关注的热点问题。

针对目前地应力测量仪器的局限性,本文提出一种光纤光栅传感技术与平面应变状态监测理论相结合的监测方法。光纤光栅利用光纤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^[3]。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20世纪90年代以来新兴的一种性能优良,有着广泛应用前景的无源敏感元件^[8-13]。本文所研制的三维地应力传感器包括三个成一定空间角度的监测探头,每个探头承载三个光纤光栅应变传感单元,三个应变传感单元组成应变花来实现对一个平面的二维应变状态监测。三个探头组成三组应变花可以同时观测空间中三个相互正交平面的应力变化情况。将三个正交平面内最大主应力进行空间力学矢量合成可以得到空间中最大主应力的方向与大小。

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^[10-13],当光源发出的宽

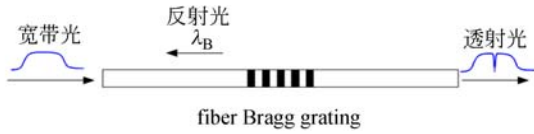


图1 光纤光栅反射示意图

Fig.1 Schematic diagram of fiber Bragg grating reflection

带光在光纤光栅中传输时,只有满足 Bragg 条件的光才会被反射回来,其余不能被反射的光则全部投射出光栅。反射光的中心波长 λ_B 可由式(1)确定:

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

其中: λ_B 是入射光通过光纤光栅时反射回来的中心波长, n_{eff} 是光纤纤芯针对自由空间中心波长的折射率, Λ 是光栅周期。

光纤光栅波长变化与应变之间的表达式为:

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

其中 P_e 为弹光系数,由光纤光栅的材料确定。

令 $k_e = (1 - P_e) \lambda_B$,由式(2)得到:

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

通过解调波长得出波长变化量进而计算出光

纤应变传感单元的应变,由平面应力状态理论可知,已知平面内应变分量为 ϵ_x, ϵ_y 和 γ_{xy} ,利用广义胡克定律可求出该点的应力分量 σ_x, σ_y 和 τ_{xy} 。测量时,采用实验方法确定某一点主应力的方向和大小,一般需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:

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

将式(4)求出的 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 代入式(5),即可求出平面内最大主应变 $\epsilon_{\max}, \epsilon_{\min}$ 及其角度 α_0 。

$$\begin{cases} \tan 2\alpha_0 = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \\ \left. \begin{matrix} \epsilon_{\max} \\ \epsilon_{\min} \end{matrix} \right\} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2} \right)^2} \end{cases} \quad (5)$$

对于直角应变花,三个应变传感单元的布置方向分别为: $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 45^\circ, \alpha_3 = 90^\circ$,由式(4)可得:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \epsilon_{0^\circ} \\ \epsilon_y = \epsilon_{90^\circ} \\ \gamma_{xy} = \epsilon_{0^\circ} + \epsilon_{90^\circ} - 2\epsilon_{45^\circ} \end{cases} \quad (6)$$

应变传感单元测量被测物体应变,根据式(3)得出不同角度光纤应变传感单元与波长的关系:

$$\begin{cases} \epsilon_{0^\circ} = \frac{\Delta \lambda_{B0^\circ}}{k_e} \\ \epsilon_{45^\circ} = \frac{\Delta \lambda_{B45^\circ}}{k_e} \\ \epsilon_{90^\circ} = \frac{\Delta \lambda_{B90^\circ}}{k_e} \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)、式(7)代入式(5)中,得到最大主应变与波长变化之间的关系:

$$\tan 2\alpha_0 = \frac{\Delta \lambda_{B0^\circ} + \Delta \lambda_{B90^\circ} - 2\Delta \lambda_{B45^\circ}}{\Delta \lambda_{B0^\circ} - \Delta \lambda_{B90^\circ}}, \quad (8)$$

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

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda_{B0^\circ} - \Delta \lambda_{B90^\circ}}{2k_e} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda_{B0^\circ} + \Delta \lambda_{B90^\circ} - 2\Delta \lambda_{B45^\circ}}{2k_e} \right)^2}, \quad (9)$$

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

对于等角应变花, 三个光纤应变传感单元的布置方向分别为: $\alpha_2 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$, $\alpha_3 = 120^\circ$, 由式(4)可得:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \epsilon_0 \\ \epsilon_y = \frac{2\epsilon_{60^\circ} + 2\epsilon_{120^\circ} - \epsilon_0}{3} \\ \gamma_{xy} = \frac{2\sqrt{3}(\epsilon_{120^\circ} - \epsilon_{60^\circ})}{3} \end{cases} \quad (10)$$

应变传感单元测量被测物体应变, 根据式(3)得出不同角度应变传感单元与波长的关系:

$$\begin{cases} \epsilon_{0^\circ} = \frac{\Delta\lambda_{B0^\circ}}{k_\epsilon} \\ \epsilon_{60^\circ} = \frac{\Delta\lambda_{B60^\circ}}{k_\epsilon} \\ \epsilon_{120^\circ} = \frac{\Delta\lambda_{B120^\circ}}{k_\epsilon} \end{cases} \quad (11)$$

将式(10)、式(11)代入式(5)中, 得到最大主应变与波长变化之间的关系:

$$\tan 2\alpha_0' = \frac{\sqrt{3}(\Delta\lambda_{B120^\circ} - \Delta\lambda_{B60^\circ})}{2\Delta\lambda_{B0^\circ} - \Delta\lambda_{B60^\circ} - \Delta\lambda_{B120^\circ}}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} \epsilon'_{\max} \\ \epsilon'_{\min} \end{cases} = \frac{(\Delta\lambda_{B0^\circ} + \Delta\lambda_{B60^\circ} + \Delta\lambda_{B120^\circ})}{2k_\epsilon} \pm \sqrt{\left[\frac{2\Delta\lambda_{B0^\circ} - \Delta\lambda_{B60^\circ} - \Delta\lambda_{B120^\circ}}{3k_\epsilon}\right]^2 + \left[\frac{\Delta\lambda_{B120^\circ} - \Delta\lambda_{B60^\circ}}{\sqrt{3}k_\epsilon}\right]^2}, \quad (13)$$

式中: $\Delta\lambda_{B0^\circ}$, $\Delta\lambda_{B60^\circ}$, $\Delta\lambda_{B120^\circ}$ 分别是 0° 、 60° 、 120° 传感芯片对应的波长变化量。

根据胡克定律即可求得平面主应力的最值:

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = E\epsilon_{\max} \\ \sigma_{\min} = E\epsilon_{\min} \end{cases}, \quad (14)$$

其中 σ_{\max} 为平面内的最大主应力, σ_{\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。

假设空间中三个正交平面 xoz 、 xoy 、 yoz 内所测量的最大主应力分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 , 角度分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 其理论模型如图 2 所示。将最大主应力 F_1 、 F_2 、 F_3 分别向三个坐标轴投影, 得到空间应力 F_x 、 F_y 、 F_z :

$$\begin{cases} F_x = F_1 \cos \theta_1 + F_2 \sin \theta_2 \\ F_y = F_2 \cos \theta_2 + F_3 \sin \theta_3 \\ F_z = F_3 \cos \theta_3 + F_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (15)$$

将坐标轴上的三个空间应力 F_x 、 F_y 、 F_z 矢量合成得到空间中最大主应力:

$$F_{\max} = F_x + F_y + F_z. \quad (16)$$

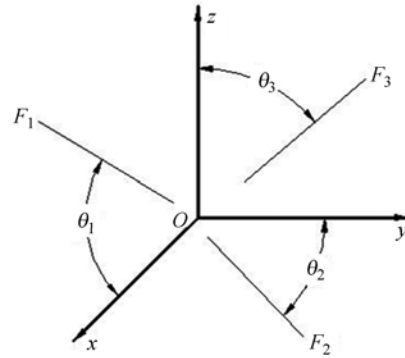


图 2 空间力学矢量

Fig. 2 Space mechanical vectors

2.2 应变传感单元制作

未经封装的光纤光栅在测量应变时存在灵敏度低、量程小等缺点, 本文将光纤光栅和各向异性的碳纤维层积复合材料组合进行增敏封装, 如图 3 所示。碳纤维层积复合材料是碳纤维布经过一定的高温模压工艺制作而成, 在 X 轴和 Y 轴方向具有高强度、高模量等优点, 但在 Z 轴方向弹性模量比较小。经过深圳市凯强利实验仪器有限公司测试, 材料在 Z 轴方向上 90 MPa 内为线弹性体。用环氧树脂胶(353ND)将光纤光栅封装在碳纤维层积复合材料体的凹槽内制作成应变传感单元。

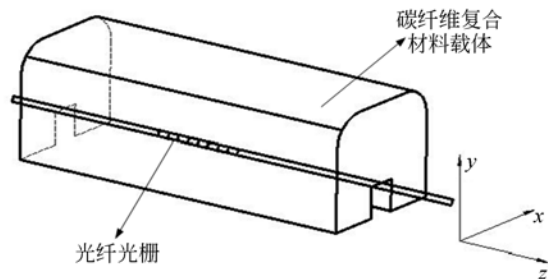


图 3 碳纤维复合材料体

Fig. 3 Carbon fiber composite blocks

2.3 应变传感单元温度标定实验

应变传感单元放置于恒温水域箱中进行温度

标定实验,其温度设定为 24.1~55 °C,温度标定结果如表 1 所示。

表 1 光纤应变传感单元温度标定结果

Tab.1 Temperature calibration results of optical fiber strain sensor unit

温度/°C	应变传感单元波长/nm
24.1	1 559.301
28.0	1 559.702
32.0	1 559.898
36.0	1 560.108
40.0	1 560.333
44.0	1 560.563
48.0	1 560.815
52.0	1 561.080
55.0	1 561.228

利用 origin 软件对波长随温度变化的实验数据进行拟合、处理和分析,拟合结果如图 4 所示。从拟合曲线斜率可知,波长与温度呈良好的线性关系,温度每增加 1 °C,波长增大 57.3 pm,线性拟合系数为 0.997 6。

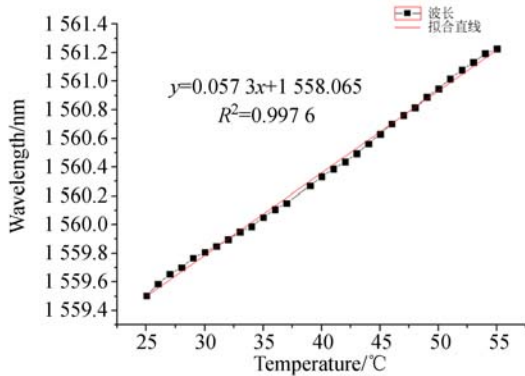


图 4 应变传感单元波长-温度拟合曲线

Fig. 4 Wavelength-temperature fitting curve of strain-sensing unit

通过应变传感单元温度标定实验,可以得到应变传感单元的温度灵敏度系数^[14],进而在压力加载中对应变传感单元温度进行补偿。

传感器装置内部放置一个不受应变影响的感温光栅,其作用为监测环境温度变化 ΔT :

$$\Delta T = \frac{\lambda_{t_1} - \lambda_{t_0}}{R_1}, \quad (17)$$

式中: λ_{t_0} 为感温光栅的初始波长; λ_{t_1} 为 t_1 时刻的波长; R_1 为感温光栅的温度灵敏度。

环境温度 ΔT 引起传感器装置中光纤应变传感单元波长改变,变化量 $\Delta \lambda_s$ 为:

$$\Delta \lambda_s = R_s \times T, \quad (18)$$

式中 R_s 为应变传感单元的温度灵敏度。

将解调仪解调出的波长 λ 减去温度引起的波长变化,最终得到光纤应变传感单元在加载压力下的波长为:

$$\lambda_s = \lambda - \Delta \lambda_s, \quad (19)$$

式中 λ 为 t_1 时刻波长解调仪解调出的波长。

2.4 应变传感单元应力加载实验

对上述应变传感单元进行应力加载实验,其实验装置的理论模型如图 5 所示,将应变传感单元放置于压力罐中,通过压力源给压力罐输入不同的压力值。

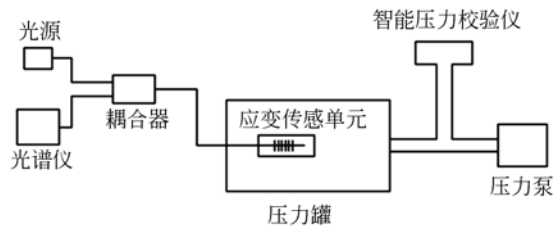


图 5 应变传感单元实验装置的理论模型

Fig. 5 Theoretical model of experimental devices for strain sensing unit

通过应变传感单元应力加载实验,得到波长随加载压力的变化数据,如表 2 所示。

表 2 第二次加载波长随压力变化的试验数据

Tab.2 Test data of second loading wavelength varies with pressure

压力/MPa	应变传感单元波长/nm	感温光栅波长/nm
0	1 559.480	1 541.926
4.309	1 559.211	1 541.927
9.265	1 558.909	1 541.928
15.379	1 558.532	1 541.928
21.924	1 558.137	1 541.928
30.828	1 557.615	1 541.929
38.978	1 557.150	1 541.929
46.276	1 556.733	1 541.930
54.281	1 556.259	1 541.930
60.065	1 555.910	1 541.931

利用 origin 软件对应变传感单元得到的数据进行拟合,拟合结果如图 6 所示。

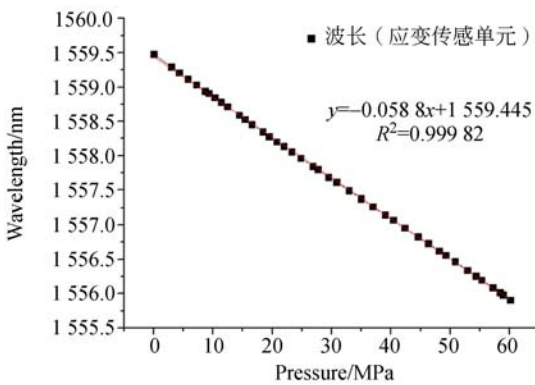


图 6 第二应变传感单元压力-波长数据拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve of pressure-wavelength data of second strain sensor unit

在加载过程中,应变传感单元波长随加载压力线性变化。从拟合曲线的斜率可以看出,应变传感单元压力每增大 1 MPa,波长降低 58.8 pm;在压力 0~60.065 MPa,波长与加载压力呈良好的线性关系,线性拟合系数为 0.999 82。

2.5 三维地应力传感装置整体结构的设计与制作

光纤光栅三维地应力传感装置由三个探头(S_1, S_2, S_3)通过机械结构串联组合而成,将其按照一定的空间角度,通过机械结构组装成一个整体,整体结构如图 7 所示。三个探头可以组合成完整的空间坐标系,分别监测空间三个正交平面内的应力状态,每个正交平面需要一组应变花实现对该平面应力大小和方向的测量,因此光纤光栅三维地应力传感装置必须配备三组应变花才能完成对地下空间应力的监测。三组应变花分别测量三个正交平面的空间理论模型,如图 8 所示。 S_1 探头监测空间正交平面 xOz 平面内的二维应力状态,由一组直角应变花进行监测; S_2 监测平面

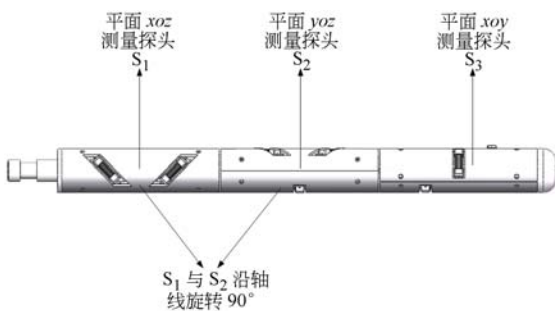


图 7 光纤光栅三维地应力传感器的整体结构
Fig. 7 Overall structure of fiber grating three-dimensional geo-stress sensor

yoz 的二维应力状态,也是由一组直角应变花进行监测(传感器整体机械结构中一定要保证 S_1 探头与 S_2 探头互相成 90°), S_3 测量平面 xOy 的二维应力状态,采用一组等角应变花进行监测,将每个正交平面内的最大主应力进行空间矢量合成可以得到空间最大主应力的大小和方向。井下布置传感器时,根据传感器探头所在方位测得其组成坐标系的方位,从而确定测得应力的方位。

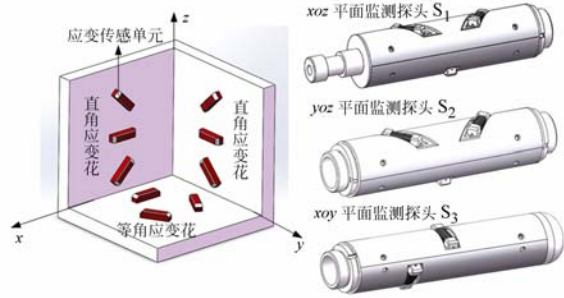


图 8 三个正交平面的空间理论模型
Fig. 8 Theory model of three dimensional plane space

3 传感器室内模拟实验与结果

3.1 应变传感单元与传感机体组装

将应变传感单元组装到三维地应力传感器机械结构上,三维地应力传感器整体包含三组应变花与一个感温光栅,每组应变花由三个光纤应变传感单元组成。组装完成后,对传感器整体 10 个栅区的反射波长进行成活检测,通过解调仪得到的反射波长如图 9 所示。

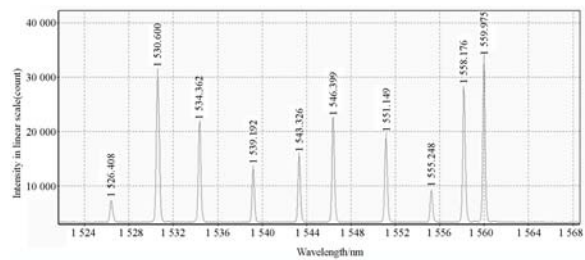


图 9 应变传感器全部中心波长图
Fig. 9 All center wavelength of stress sensor

3.2 室内试验测试与数据分析

将封装完成的三维地应力传感器埋置于双快水泥体中,利用电子万能实验压力机对水泥体进行应力加载实验,其实验装置的理论模型如图 10 所示。

假设双快水泥体为均质、无孔、各向同性的弹

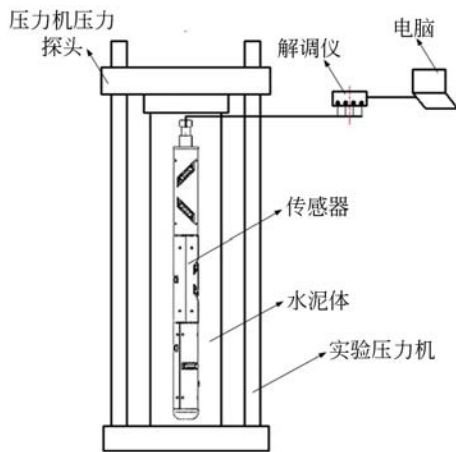


图 10 传感器应力加载实验理论模型

Fig. 10 Experimental model of stress loading

性体, 使用电压力实验机对其竖直方向进行加载。通过解调仪读出九个光纤应变传感单元及一个感温光栅的中心波长变化, 并将得到的波长变化与加载压力进行线性拟合。假定以竖直方向为 z 轴, 逆时针方向为正, x 轴和 y 轴分别代表 xOz 平面、 yOz 平面的 0° 方向, 探头 S_1, S_2 上的 $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ 波长变化与加载压力之间的拟合曲线如图 11 ~ 图 16 所示。

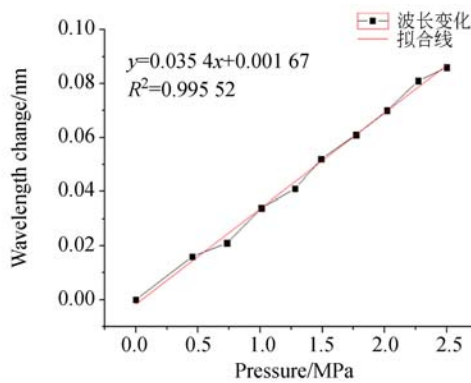


图 11 探头 $S_1(-45^\circ)$ 波长变化与加载压力的关系

Fig. 11 Relationship between wavelength variation of probe $S_1(-45^\circ)$ and loading pressure

根据应变传感单元应力分辨率和波长的变化, 可以计算出每个应变传感单元在应力加载实验中承受应力的大小。以探头 S_1 为例, 由于实验应力加载方向竖直向下, 理论上最大主应力方向为 -90.00° , 则探头 S_1 所在 xOz 平面的最大主应力可按照式 (20) 进行计算:

$$F = \sqrt{F_{-45^\circ}^2 + F_{45^\circ}^2}, \quad (20)$$

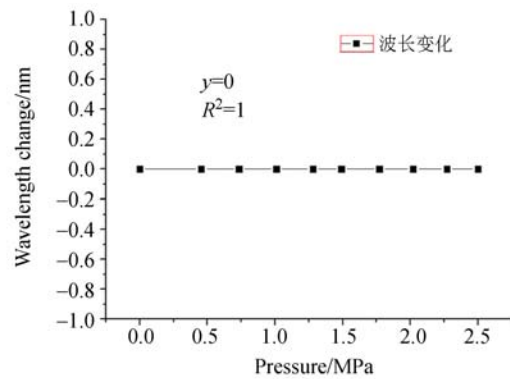


图 12 探头 $S_1(0^\circ)$ 波长变化与加载压力的关系

Fig. 12 Relationship between wavelength variation of probe $S_1(0^\circ)$ and loading pressure

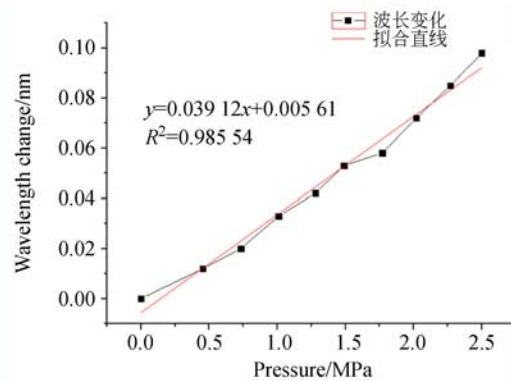


图 13 探头 $S_1(+45^\circ)$ 波长变化与加载压力的关系

Fig. 13 Relationship between wavelength change of probe $S_1(+45^\circ)$ and loading pressure

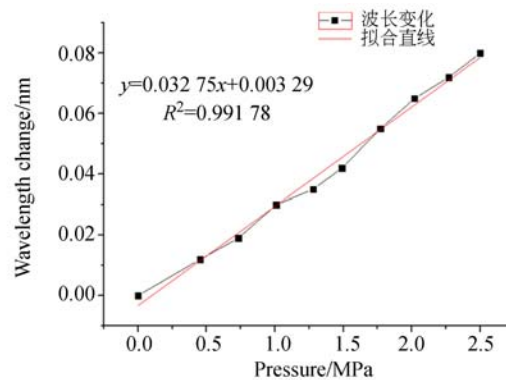


图 14 探头 $S_2(-45^\circ)$ 波长变化与加载压力的关系

Fig. 14 Relationship between wavelength change of probe $S_2(-45^\circ)$ and loading pressure

式中: F 为 xOz 平面内的最大主应力; F_{-45° 为 -45° 应变传感单元的测量应力; F_{45° 为 45° 应变传感单元的测量应力。

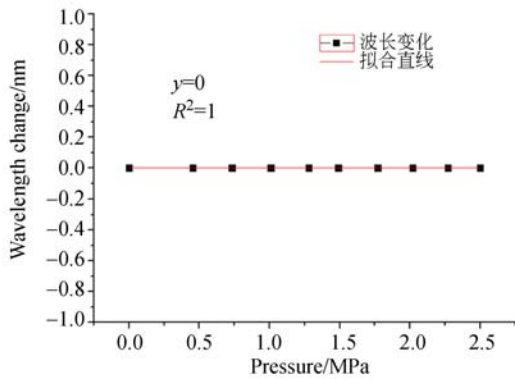


图 15 探头 $S_2(0^\circ)$ 波长变化与加载压力的关系
Fig. 15 Relationship between wavelength change of probe $S_2(0^\circ)$ and loading pressure

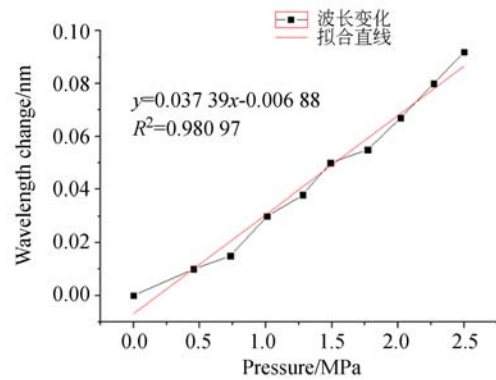


图 16 探头 $S_2(+45^\circ)$ 波长变化与加载压力的关系
Fig. 16 Relationship between wavelength change of probe $S_2(+45^\circ)$ and loading pressure

xoz 平面最大主应力方向为最大主应力与 x 轴之间的夹角,可按照式(21)进行计算:

$$\theta = -(\arctan(F_{45^\circ}/F_{-45^\circ}) + 45). \quad (21)$$

同理,探头 S_2 所在 $yo z$ 平面的最大主应力的大小和方向也可以按照式(20)和式(21)进行计算。由于探头 S_3 所在 xoy 平面与加载应力垂直,

因此探头 S_3 上的三个应变传感单元的波长变化很小,其平面最大主应力基本为 0。通过计算得到三维地应力传感器探头 S_1, S_2, S_3 所测量平面内的最大主应力,并将其与电子万能试验机所加载的压力对比,其测试结果对照表如表 3、表 4、表 5 所示。

表 3 探头 S_1 测试结果
Tab. 3 Test results of probe S_1

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/(°)	主应力大小 误差/%	主应力方向 误差/(°)
0.000	0.000	-90.00	-90.00	0.00	0.00
0.454	0.345	-90.00	-81.87	24.01	-8.13
0.732	0.500	-90.00	-88.60	31.69	-1.40
1.010	0.817	-90.00	-89.15	19.11	-0.85
1.280	1.011	-90.00	-90.69	21.02	0.69
1.490	1.281	-90.00	-90.55	14.03	0.55
1.770	1.451	-90.00	-88.55	18.02	1.45
2.020	1.731	-90.00	-90.81	14.31	0.81
2.270	2.024	-90.00	-91.38	10.84	1.38
2.500	2.248	-90.00	-93.73	10.08	3.73
大小/方向误差的平均值				16.31	1.89

表 4 探头 S₂ 测试结果对比
Tab. 4 Test results of probe S₂

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/(°)	主应力大小 误差/%	主应力方向 误差/(°)
0.000	0.000	-90.00	-90.00	0.00	0.00
0.454	0.270	-90.00	-84.81	40.52	-5.19
0.732	0.418	-90.00	-83.29	42.21	-6.71
1.010	0.732	-90.00	-90.00	27.52	0.00
1.280	0.891	-90.00	-92.35	30.39	2.35
1.490	1.126	-90.00	-94.97	24.42	4.97
1.770	1.342	-90.00	-90.00	24.18	0.00
2.020	1.610	-90.00	-90.87	20.29	0.87
2.270	1.856	-90.00	-91.38	18.23	1.38
2.500	2.103	-90.00	-93.73	15.88	3.73
大小/方向误差的平均值				24.36	2.52

表 5 探头 S₃ 测试结果
Tab. 5 Test results of probe S₃

应力真实值 /MPa	0°波长变化 /nm	60°波长变化 /nm	120°波长变化 /nm	0°对应压力 /MPa	60°对应压力 /MPa	120°对应压力 /MPa
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.454	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.017
0.732	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.280	0.002	0.000	0.000	0.034	0.000	0.000
1.490	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.770	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.020	0.000	0.001	0.000	0.000	0.017	0.000
2.270	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

通过空间力学矢量合成,三维地应力传感器测量的空间最大主应力与施加应力的空间角度偏差如表 6 所示。

表 6 空间角度误差
Tab. 6 Space angle errors

施加实际压力/MPa	空间角度误差/(°)
0.000	0.00
0.454	1.83
0.732	1.44
1.010	1.34
1.280	0.50
1.490	1.13
1.770	1.55
2.020	1.45
2.270	1.50
2.500	1.67
空间角度平均误差	1.24

3.3 实验结果

通过对三维地应力传感器三个探头的测量值与实际加载值对比分析得到:探头 S₁, S₂, S₃ 测量值与加载值相符, S₁, S₂ 探头的测量应力平均相对误差分别为 16.31%, 24.36%, 方向误差的平均值分别为 1.89°, 2.52°; S₃ 探头的绝对误差为 0.006 8 MPa。实际加载应力与传感器测量的应力空间角度误差平均值为 1.24°, 经过多次应力加载、卸载实验,测试结果基本一致,说明该三维地应力传感器对地应力测量具有良好的重复性。

4 结 论

本文将光纤光栅经一定工艺封装到碳纤维复合材料机体内做成光纤应变传感单元,九个光纤应变传感单元以三组应变花的形式附着于三个圆

柱形探头上,每个探头分别监测空间中一个正交平面内的应力状态。将整个传感装置在室内进行应力加载模拟实验,实验结果表明: S_1, S_2 探头的测量应力平均相对误差分别为 16.31%, 24.36%, 方向误差的平均值分别为 $1.89^\circ, 2.52^\circ$; S_3 探头的绝对误差为 0.006 8 MPa。实际加载应力与传感器测量的应力空间角度误差平均值为

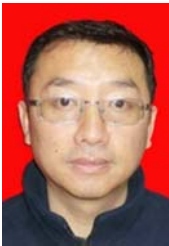
1.24° 。在模拟实验中,由于传感器体积相较于被测材料水泥体而言不属于无限小,尺寸效应在测试中存在一定的影响,因此在监测计算中存在一定的误差。水泥体与传感器界面接触存在应力集中,使得传感器机械结构在外力作用下发生了微小形变,会给监测带来一定的误差。因此,该传感器的模拟实验装置还需要进一步的改进与优化。

参考文献:

- [1] 陈群策,李宏,廖椿庭,等. 地应力测量与监测技术实验研究——SinoProbe-06 项目介绍[J]. 地球学报, 2011, 32(S1): 113-124.
CHEN Q C, LI H, LIAO CH T, *et al.*. An experimental study of the technique for in-situ stress measurement and monitoring: An introduction to the project SinoProbe-06[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(S1): 113-124. (in Chinese)
- [2] 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. (in Chinese)
- [3] 赵斌,仲志成,林君,等. 基于光纤光栅传感地层应力的监测方法与实验[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 346-352.
ZHAO B, ZHONG ZH CH, LIN J, *et al.*. Monitoring method and experiment for stratum stress based on fiber Bragg grating sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s): 346-352. (in Chinese)
- [4] 欧进萍. 重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的研究与应用[J]. 中国科学基金, 2005, 19(1): 8-12.
OU J P. Research and practice of smart sensor networks and health monitoring systems for civil infrastructures in mainland China[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2005, 19(1): 8-12. (in Chinese)
- [5] FUHR P L, SPAMMER S J, *et al.*. Fiber optic sensors in the Waterbury bridge[J]. *SPIE*, 1998, 3489: 124-129.
- [6] 赵雪峰,田石柱,周智,等. 钢片封装光纤光栅监测混凝土应变试验研究[J]. 光电子·激光, 2003, 14(2): 171-174.
ZHAO X F, TIAN SH ZH, ZHOU ZH, *et al.*. Experimental study on strain monitoring of concrete using a steel slice packaged fiber grating[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(2): 171-174. (in Chinese)
- [7] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
- [8] 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, 24(6): 97, 169-173.
ZHOU G D, LI H N, REN L, *et al.*. Study on influencing parameters of strain transfer of optic fiber Bragg grating sensors[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(6): 97, 169-173. (in Chinese)
- [9] 翟玉锋,张龙,朱灵,等. 光纤光栅称重传感器研究[J]. 发光学报, 2007, 28(3): 412-416.
ZHAI Y F, ZHANG L, ZHU L, *et al.*. Novel weigh sensors based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2007, 28(3): 412-416. (in Chinese)
- [10] 胡曙阳,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, 2004, 15(6): 688-690.
HU SH Y, ZHAO Q D, HE SH Y, *et al.*. Strain measurement in construction steel bar using a FBG sensor coated by a thin metal tube[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(6): 688-690. (in Chinese)
- [11] 马豪豪,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(S2): 185-190.
MA H H, LIU B J, WENG X L, *et al.*. Application of optical fiber Bragg grating sensing technology to tunnel model test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(S2): 185-190. (in Chinese)
- [12] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 199-211.
ZHANG Z J. *Fiber Bragg Grating Theory and*

- Sensing Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 199-211. (in Chinese)
- [13] 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): 1703-1708.
LI H Q, SUN H Y, LIU Y L, *et al.*. Application of optical fiber sensing technology to slope model test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27 (8): 1703-1708. (in Chinese)
- [14] 蒋友华, 傅海威, 张静乐, 等. 基于多芯光纤级联布喇格光纤光栅的横向压力与温度同时测量[J]. *光子学报*, 2017, 46(1): 0106002.
JIANG Y H, FU H W, ZHANG J L, *et al.*. Simultaneous measurement of transverse pressure and temperature based on multi-core fiber cascaded with fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 0106002. (in Chinese)

作者简介:



仲志成(1974—),男,吉林长春人,副教授,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。
E-mail: zhongzc@jlu.edu.cn

通讯作者:



刘玉娟(1984—),女,山东泰安人,讲师,博士研究生,2012年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事装调及光谱数据处理技术的研究。E-mail: xuliuyujuan@163.com

(本栏目编辑:曹 金)