

增材制造碳纤维 FBG 土压力传感器的研发与验证

鲍成志^{1,2,3}, 洪成雨^{1,3*}, 孙德安², 苏栋^{1,3}

¹深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;

²上海大学力学与工程科学学院土木工程系, 上海 200444;

³深圳大学未来地下城市研究院, 广东 深圳 518060

摘要 基于增材制造(即 3D 打印)技术制作土压力传感器,在增材制造过程中将布拉格光纤光栅(FBG)传感器嵌入到碳纤维模型内部,成功制备了光纤光栅碳纤维土压力传感器,用于不同条件下的压力监测。对增材制造制备的压力传感器进行系统的标定实验与稳定性测试,结果表明 FBG 土压力传感器的波长与压力的变化具有良好的线性关系,在 100 次加载卸载循环实验中,传感器具有良好的稳定性。实验发现,增材制造填充密度与压力传感器的关键测量参数有很强的相关性,当增材制造填充密度分别为 20%、40%、60%、80%、100%时,FBG 土压力传感器的灵敏度分别为 0.69,0.45,0.39,0.21,0.19 pm/kPa。现场测试中,7 个不同深度(深度间隔为 2 m)的 FBG 土压力传感器(灵敏度依次为 15.38,0.61,0.15,0.76,0.3,0.15,0.13 pm/kPa)均可测出相应的土压力值,并且测量值与理论值相吻合,这反映了所提出的新型传感器在实际运用中的良好性能。将 FBG 土压力传感器封装到增材制造模型内部,制作而成的土压力传感器摆脱了传统传感器的传感参数调节的不灵活性、易受电磁干扰、较差的环境耐腐蚀性、较复杂的制作流程以及不可避免的装配误差、较长的研发与生产周期等缺点。

关键词 光纤光学; 增材制造; 光纤光栅; 土压力; 碳纤维; 聚乳酸酯

中图分类号 TP212; TH74

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2106002

Development and Verification of Carbon Fiber Based FBG Earth Pressure Sensors Using Additive Manufacturing Technology

Bao Chengzhi^{1,2,3}, Hong Chengyu^{1,3*}, Sun Dean², Su Dong^{1,3}

¹College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Department of Civil Engineering, School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

³Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract We successfully designed and fabricated fiber Bragg grating (FBG) earth pressure sensors based on additive manufacturing (i.e., 3D printing) technology by embedding an FBG in a 3D printing model made of carbon fibers for pressure monitoring under different conditions. The systematic calibration experiment and stability test of the pressure sensor prepared by additive manufacturing are carried out. The results indicate a good linear relationship between the wavelength and the change in the pressure loaded on the sensors and show that the sensors show good stability in the 100 loading-unloading cycle tests. The experimental results also show that there is a strong correlation between the infilling density of additive manufacturing and key measurement parameters of the pressure sensors, and that the infilling densities of 20%, 40%, 60%, 80%, and 100% correspond to the sensitivities of FBG earth pressure sensors of 0.69, 0.45, 0.39, 0.21, and 0.19 pm/kPa, respectively. In the field tests, all the seven FBG earth pressure sensors (with a depth interval of 2 m and the sensitivities of 15.38, 0.61, 0.15, 0.76, 0.3, 0.15, and 0.13 pm/kPa) can measure the earth pressure, which is consistent with the theoretical value, indicating good performance of the proposed pressure sensors in actual applications. In conclusion, the proposed earth pressure sensors with an FBG earth pressure sensor encapsulated inside the additive manufacturing model, overcome the shortcomings such as the inflexibility of parameter adjustment for traditional sensors, being susceptible to electromagnetic interference, poor environmental corrosion resistance, complex

收稿日期: 2020-07-01; **修回日期:** 2020-07-16; **录用日期:** 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(51938008)、国家重点研发计划(2018YFB2100901)

* **E-mail:** cyhong@szu.edu.cn

manufacturing process, inevitable assembly errors, and long R&D and production cycle.

Key words fiber optics; additive manufacturing; fiber Bragg grating; earth pressure; carbon fiber; polylactic acid

OCIS codes 060.3735; 160.4890; 040.1880

1 引 言

土木工程中土压力传感器在基坑、边坡、路基中大量使用,可以起到如下重要作用:1)验算工程结构中挡土构筑物各特征部位的土压力理论分析值及土压力沿深度的分布规律;2)为验证挡土构筑物和建筑物基础稳定性和安全性提供依据。

常规的土压力传感器往往采用电子元器件作为压力感知部件,具有制作简单、成本低、使用方便的优势,同时也有很多缺点:基于传统电阻电容式传感元件及金属封装材料的传感器,往往难以克服工程现场复杂恶劣的环境,如环境腐蚀、高温、低温,这样往往会大大缩短传感器的使用寿命,影响其工作的稳定性^[1];传统的多流程制作工艺往往会导致传感器在制作过程中产生难以避免且较大的累积装配误差,从而对传感器的测量精度造成一定的影响^[2-4];传统制作工艺不够灵活,根据不同工况场景调节传感器的量程与灵敏度,往往需要较为复杂的设计,如通过修改压力面板厚度来改变刚度,从而修改传感器的量程与灵敏度^[1];传统的 FBG 土压力传感器常采用环氧树脂固定 FBG 传感器,胶水老化经常会引起 FBG 传感器松弛脱落,导致传感器的灵敏度、量程、最小分辨率等测量参数发生漂移^[5-6];传统传感器的设计与加工方式不够灵活,具有较长的研发与生产周期,不仅不能迅速地根据不同现场工况或实验要求对传感器的灵敏度、量程、最小分辨率等核心传感参数进行调节,而且设计与生产方式的不灵活大大延长了传感器的研发与生产周期^[7-8];工程现场往往存在大量的电磁干扰源,这会影响传统电子类传感器内部电路以及整个传感系统电路的正常工作^[9-11];对传统电子类传感器进行组网时,较难实现传感器之间的串联,导致整个传感网络极其复杂^[9-11];传统传感器往往使用金属传力结构,其较大的刚度引起土拱效应,使得土压力测量值相较于真实值偏大^[1,7-8]。

本研究基于 3D 打印与 FBG 传感器制备碳纤维土压力传感器,克服了以上传统传感器制备中的缺点。在现场恶劣的环境下 FBG 传感器为光纤材料,其成分为二氧化硅,具有较好的耐腐蚀性,且 3D 打印可采用耐腐蚀性的碳纤维材料进行传感器的封

装,因此光纤传感元件和封装材料都具有较好的耐腐蚀性;结合 3D 打印制作传感器可实现一次成型,工序单一,装配精准^[12-13];3D 打印工艺可调节打印密度、打印尺寸,因此结合 3D 打印制作传感器可以根据不同工程工况或实验要求,灵活快捷地调节传感器的量程、灵敏度等性能参数^[12-13];利用 3D 打印将 FBG 传感器嵌入到 3D 打印封装模型内部,这样可摆脱传统 FBG 传感器的胶水粘接模式,加强传感器的整体性,保证传感器的长期稳定工作^[14];基于 3D 打印封装的压力传感器采用计算机进行三维建模,直接利用 3D 打印制作成型,大大缩短了传感器的研发与生产周期,这无论对于科研还是生产都具有重要的意义^[12-13];FBG 传感器的无源特性可以使其不受到静电、电磁及无线电频率源的干扰,可以在一条光纤上串联 FBG 传感器,构成传感器阵列,实现多参量的准分布式实时测量^[15-17];3D 打印封装中,采用聚乳酸脂、热塑性聚氨酯弹性体橡胶等低模量材料进行封装能大大减弱土拱效应,使得土压力测量值更加接近真实值^[18]。

2 FBG 传感原理

光纤布拉格光栅(FBG)于 1978 年问世,可利用硅光纤的紫外光敏性将这种简单的固有传感元件写入光纤纤芯,图 1 描述了 FBG 传感器的传感原理。

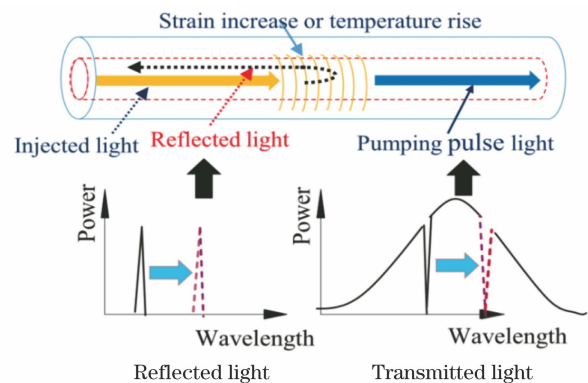


图 1 FBG 传感器传感原理

Fig. 1 Sensing principle of FBG sensor

光纤光栅传感机理是基于波长调制的,当入射光源光波经过光栅区时,大部分的光波会通过光栅区,而特定波长的光波则会被反射,该特定波长即为布拉格光纤光栅的中心波长,用 λ 表示。光栅反射的波长表达式为

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

式中： λ 为光纤光栅的中心反射波长； n_{eff} 为纤芯有效折射率； Λ 为光栅的周期。

由(1)式可知，任何能够改变光纤光栅有效折射率或光纤光栅周期的物理量都能改变光纤光栅的中心波长。

应变和温度是最能直接显著改变光纤光栅波长的物理量，其引起的光纤光栅波长的漂移可表示为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - p_e)\Delta\epsilon + (\zeta + \alpha)\Delta T, \quad (2)$$

式中： $\Delta\epsilon$ 为光纤光栅轴向应变变化量； ΔT 为温度变化量； p_e 为有效弹光系数； ζ 、 α 分别为光纤光栅的热光系数和热膨胀系数。当光纤光栅受到外界应变或者应力的作用时，光纤光栅的周期会发生变化，同时弹光效应会导致光纤光栅的有效折射率发生变化，当光纤光栅受到外界温度影响时，热膨胀会使得光纤光栅的周期发生变化，同时热敏效应会使得光纤光栅的有效折射率发生变化。目前已有的基于光纤光栅的各种传感器基本上都是直接或间接地利用应变或温度改变光纤光栅的中心波长，以达到测量被测物理量的目的。

3 基于 3D 打印的 FBG 土压力传感器制备流程

结合 3D 打印技术与 FBG 传感器制备压力传感器的流程图如图 2(a)所示，主要制作设备与材料包括 3D 打印机(型号: finder, 无热床版)、FBG 动态信号解调仪、碳纤维打印耗材等。图 2(b)进一步展示了制作本传感器时 3D 打印机在 FBG 传感器上方逐层堆叠并封装模型的过程。3D 打印对于打印方式、模型填充密度、模型填充速度、模型支撑方式等都具有灵活的调节方式，本研究中，打印方式统一使用线型打印，即喷嘴出丝运动堆叠轨迹为线型，3D 打印模型内部为矩形网状结构，如图 2(c)所示。本研究所有研究模型均采用 60 mm/s 的填充速度，此速度可以保证本传感器的稳定封装。传感器所需模型均为均匀分布的立方体或者圆柱体，因此无需设置模型支撑。打印机喷嘴直径为 0.4 mm，喷嘴温度设置为 220 °C。

在基于 3D 打印技术对 FBG 传感器进行封装的过程中，模型封装进行到 50%高度时[图 2(b)]暂停打印，并迅速植入 FBG 传感器，此过程中不使用胶水，FBG 传感器由两端保护线锚固卡槽进行初步固定。由于 FBG 传感器具有对张拉敏感、对压缩变

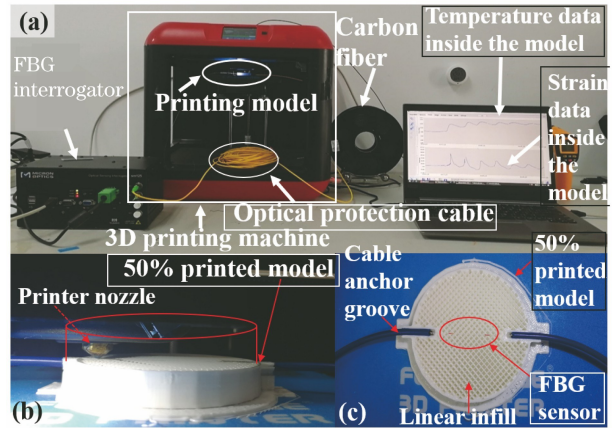


图 2 3D 打印制作 FBG 压力传感器。(a)3D 打印制备 FBG 压力传感器过程；(b)完成 50%高度下 3D 打印模型正视图；(c)完成 50%高度下 3D 打印模型俯视图

Fig. 2 FBG pressure sensor fabricated by 3D printing. (a) Process of fabricating FBG pressure sensor by 3D printing; (b) front view of 3D printed model with height of 50%; (c) top view of 3D printed model with height of 50%

形不敏感的特点，因此封装过程中对 FBG 传感器预拉 50 pm 的变形，预拉并固定好 FBG 传感器后启动暂定的打印机继续打印封装，直至模型封装完毕。在对 FBG 传感器进行封装的过程中保持记录 FBG 传感器的实时数据，利用 FBG 的应变与温度测量特性，对增材制造模型的内部温度与应变特征展开分析，解调仪的数据采集频率为 2 Hz。

4 基于增材制造的 FBG 压力传感器传感原理

利用 3D 打印工艺制作压力传感器，在打印过程中将 FBG 传感器封装到打印材料中。FBG 的直径小于 1 mm，相较于圆柱体的 3D 打印封装模型(直径为 60 mm，厚度为 15 mm)，其尺寸可以忽略不计。图 3(a)为 3D 打印碳纤维模型示意图，打印的碳纤维模型是层叠打印体，模型的结构为以线性纤维为主的层叠结构，这种结构在纵向断面具有一致性，横纵断面具有不同的力学性质(即具有不同的模量与泊松比)，因此该结构具有各向异性的特征；碳纤维材料被熔融喷出后具有较强的粘结力，熔丝之间通过堆积粘结形成良好的整体，因此可以视为连续实体[图 3(b)]。

图 3(a)中标注了模型的三个方向，分别为 1、2、3，根据广义胡克定律可以得到以下应力应变关系，得出具有 9 个独立弹性常数 C_{ij} 的刚度矩阵：

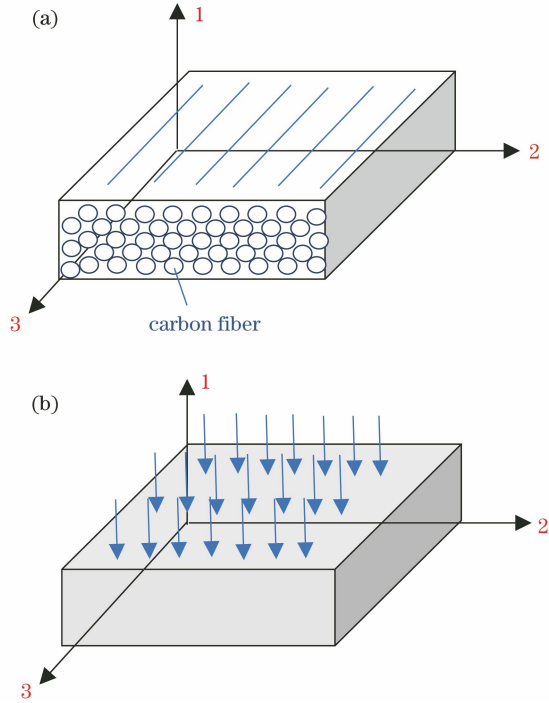


图3 各向异性 3D 打印材料。(a)微观结构;(b)连续模型

Fig. 3 Anisotropic 3D printed material.

(a) Microstructure; (b) continuous model

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中： σ_{ij} 和 ϵ_{ij} 分别是三个方向的应力分量和应变分量。在应变不垂直于 FBG 压力传感器的情况下，可以根据一般形式的胡克定律求出应力/应变，考虑到弹性常数 E 和泊松比 ν ，上述关系式可转变为以下关系式：

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{\nu_{31}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： E_i 表示 3D 打印材料在方向 i ($i=1, 2, 3$) 上的杨氏模量，例如， $\sigma_1 = E_1 \epsilon_1$ 表示单向拉伸或压缩下在方向 1 的应力分量； ν_{ij} 表示泊松比，是横向应变与纵向应变的比值。对于承受垂直荷载的压力传感器， $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ 且 $\epsilon_{22} = \epsilon_{33}$ ，则(5)式可简写为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} \\ \frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

(5)式可以被分解为以下三个关系式：

$$\epsilon_{11} = \frac{1}{E_1} \sigma_{11}, \quad \epsilon_{22} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \sigma_{11}, \quad \epsilon_{33} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} \sigma_{11}. \quad (6)$$

嵌入 3D 打印材料内部的 FBG 传感器受到垂直压力变化的影响，可以通过 FBG 传感器的波长变化来定量反映压力变化。如果 FBG 传感器沿方向 2 嵌入 3D 打印材料中，则通过(2)式和(6)式可直接获得 FBG 压力传感器在垂直压力 σ_{11} 作用下的波长变化：

$$\Delta \epsilon_{22} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \Delta \sigma_{11} = \frac{\Delta \lambda}{(1-p_e)\lambda} - \frac{(\zeta + \alpha)\Delta T}{(1-p_e)}. \quad (7)$$

根据(7)式，得到与 FBG 压力传感器的温度和波长变化相关的垂直压力变化的表达式为

$$\Delta \sigma_{11} = \frac{E_2}{\nu_{21}} \left[\frac{(\zeta + \alpha)\Delta T}{(1-p_e)} - \frac{\Delta \lambda}{(1-p_e)\lambda} \right]. \quad (8)$$

(8)式是基于 FBG 传感器的波长变化计算 3D 打印的压力传感器上方垂直压力的理论公式。(7)式和(8)式表明通过 FBG 传感器的波长变化 $\Delta \lambda$ 可计算得出 3D 打印的压力传感器上方的垂直压力 $\Delta \sigma_{11}$ 。

5 传感器的标定

通过标定实验建立传感器所受外界压力变化与 FBG 传感器波长变化之间的函数关系。标定过程如图 4 所示，标定实验全程在恒温实验室中进行。

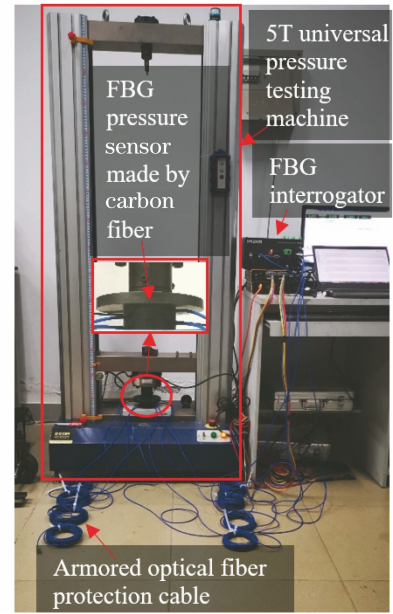


图4 FBG 压力传感器的标定实验

Fig. 4 Calibration test of FBG pressure sensor

标定实验中采用图 4 中 5T 万能压力实验机对 FBG 压力传感器进行标定，逐级采用 400, 800,

1200, 1600 kPa 四级竖向压力, 在每级荷载下进行 10 次循环加载、卸载测试, 并进行 FBG 土压力传感器的循环荷载标定实验。所用 FBG 压力传感器采用的是碳纤维封装, 采用直径为 60 mm、厚度为 15 mm 的圆柱体模型。采用 20% 的填充密度以有效降低传感器整体的弹性模量, 使传感器模量尽可能接近土体模量, 从而减弱土压力传感器在土体中的土拱效应。图 5(a) 与图 5(b) 的标定数据以及线性拟合结果表明, 在传感器的标定过程中, 波长变化较为稳定, 每级荷载下的 10 次循环加载、卸载都具有稳定的波长变化量。随着荷载的增加, 波长也逐级变化, 图 5(a) 所示为 400, 800, 1200, 1600 kPa 荷载下传感器的波长变化。在 400 kPa 荷载下, 传感器波长由初始波长 1532.25 nm 变为 1532.50 nm

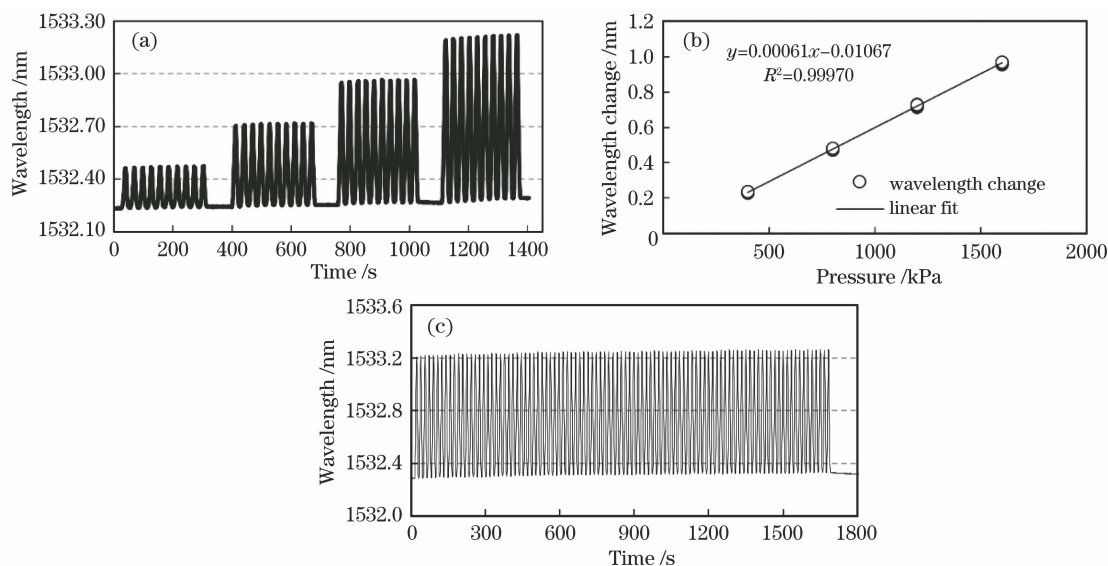


图 5 FBG 压力传感器标定测试与稳定性测试。(a) 标定实验中 FBG 压力传感器的波长变化;
(b) 标定数据的线性拟合;(c) 1600 kPa 荷载下的稳定性测试

Fig. 5 Calibration and stability tests of FBG pressure sensor. (a) Wavelength variation of FBG pressure sensor during calibration test; (b) linear fitting of calibration data; (c) stability test at 1600 kPa

6 增材制造 FBG 土压力传感器的测量灵敏度

结合 3D 打印技术制作传感器, 通过计算机三维建模快速对传感器的填充材料、填充模型尺寸、填充密度进行更改, 实现传感器模量的改变, 从而灵活改变传感器的量程、灵敏度、最小分辨率等传感参数, 根据实际测量要求快速进行定制化的传感器设计与生产。图 6(a) 为采用碳纤维与聚乳酸脂材料制备完成的压力传感器, 图 6(b) 为采用了两种不同填充模型尺寸的 3D 打印的压力传感器, 图 6(c) 为采用 5 种不同封装密度得到的传感器封装模型的内

左右; 在 800 kPa 荷载下, 传感器波长由初始波长 1532.25 nm 变为 1532.70 nm 左右; 在 1200 kPa 荷载下, 传感器波长由初始波长 1532.25 nm 变为 1532.95 nm 左右; 在 1600 kPa 荷载下, 传感器波长由初始波长 1533.25 nm 变为 1533.25 nm 左右。取每级荷载下的 10 次波长变化与垂直压力进行函数拟合, 得出具有较好线性度的拟合曲线[图 5(b)]。

在稳定性测试中, 采用 1600 kPa 的竖向压力进行 100 次循环加载、卸载稳定性测试[图 5(c)], 图 5(c) 表明, 所提压力传感器经 100 次垂直压力循环加载、卸载实验后, 依然保持良好的稳定性, 这验证了本实验所采用的填充材料具有良好的弹性性能, 在快速加载、卸载的测试中较少出现材料的塑性变形。

部结构。

选择 20%、40%、60%、80%、100% 等 5 种填充密度, 研究填充密度对传感器性能的影响。图 6(c) 所示为各填充密度下的封装模型, 随着 3D 打印中填充密度的增加, 模型内部因耗材堆积变得越来越密实。

在打印模型的设计中, 本组分析实验采用边长为 35 mm、厚度为 10 mm 的立方体模型 (35 mm × 35 mm × 10 mm) 进行传感器封装, 采用碳纤维耗材作为传感器的封装材料。

5 种填充密度下的 5 个 FBG 压力传感器制作完毕后, 通过标定实验得出各填充密度下的传感器



图 6 3D 打印的 FBG 土压力传感器。(a)不同封装材料；(b)不同填充模型尺寸；(c)不同封装密度

Fig. 6 FBG earth pressure sensors fabricated by 3D printing. (a) Different encapsulating materials; (b) different infilling model sizes; (c) different infilling densities

灵敏度,在填充密度分别为 20%、40%、60%、80%、100%时,FBG 压力传感器灵敏度依次为 0.69,0.45,0.39,0.21,0.19 pm/kPa,传感器的填充密度与灵敏度之间的变化关系如图 7 所示。随着增材制造中填充密度的增加,传感器的灵敏度呈现逐渐减小的趋势,FBG 土压力传感器封装密度与其灵敏度线性相关。这表明,基于 3D 打印的 FBG 土压力传感器,通过在传感器的封装环节改变 3D 打印的填充密度,可以实现传感器的灵敏度的调节。

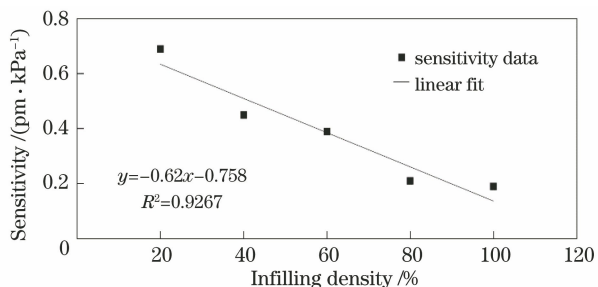


图 7 填充密度与传感器灵敏度的关系

Fig. 7 Relationship between sensitivity of sensor and infilling density

7 增材制造 FBG 土压力传感器的现场监测应用

为了进一步测试本文中基于 3D 打印制作的

FBG 压力传感器的性能,对本文涉及的传感器进行工程现场测试。本现场测试依托于深圳市海上田园地铁站的基坑项目,该基坑围护结构采用 800 mm 厚度地下连续墙,共采用三道支撑(图 8)。

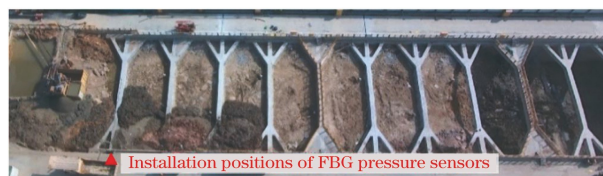


图 8 压力传感器位置

Fig. 8 Positions of FBG pressure sensors

图 9 所示为本压力传感器安装装置,由 2 m 每段的铝杆、压力传感器固定铝盘构成,铝杆与铝盘由螺栓连接,方便调整各个压力传感器的位置以及朝向,以确保所有的压力传感器在下放过程中的压力测量面朝向一致。现场测试中采用基于 3D 打印的 FBG 土压力传感器,所使用的 3D 打印封装模型统一为圆柱形模型,采用直径为 60 mm、厚度为 15 mm 以及直径为 60 mm、厚度为 6 mm 的压力传感器。铝盘尺寸为 80 mm × 80 mm × 15 mm(长 × 宽 × 高),钻孔直径为 110 mm。安装时(图 10)先在地面上组装好传感器,然后将其缓慢下放,并保证所有传感器的朝向始终和地下连续墙平行。

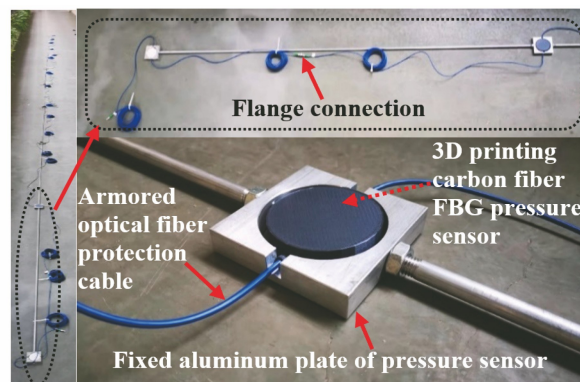


图 9 FBG 压力传感器固定与下放装置

Fig. 9 Installation and downshifting devices of FBG pressure sensor

本现场测试在靠近地下连续墙的位置选取一个孔位(图 8),从上到下每间隔 2 m 放置 1 个传感器(共 7 个),2 m 深度处的 FBG 土压力传感器采用聚乳酸脂封装,为直径为 60 mm、厚度为 15 mm 的圆柱体 FBG 压力传感器;4 m 和 8 m 深度处的 FBG 土压力传感器采用碳纤维封装,为尺寸为 60 mm、厚度为 15 mm 的圆柱体 FBG 压力传感器;6 m、10 m、12 m、14 m 深度处的 FBG 土压力传感器采用碳纤维封装,为尺寸为 60 mm、厚度为 6 mm 的



图 10 FBG 土压力传感器的安装示意图

Fig. 10 Installation diagram of FBG earth pressure sensor
圆柱体 FBG 压力传感器。7 个压力传感器的灵敏度从上到下依次为 15.38, 0.61, 0.15, 0.76, 0.3, 0.15, 0.13 pm/kPa。本压力传感器的现场测试采用了光纤传感器对实际安装的 7 个 FBG 压力传感器进行了温度补偿, 本研究在现场埋设了 FBG 传感器进行温度测量, 将测量的温度值代入(8)式, 对所测得的压力进行温度补偿修正, 因此得到的压力值是消除了温度效应影响的纯压力值。

选取 8 m 与 12 m 处的压力传感器进行分析, 图 11 为 8 m 与 12 m 位置处在 FBG 压力传感器下放以及回填过程中传感器波长的变化, 可以发现整个下放过程的数据可以分为三个阶段, 图 11(a)、(b)中分别都标记了①、②、③三个阶段。阶段①: FBG 压力传感器下放阶段; 阶段②: FBG 压力传感器下放完成后的平稳阶段; 阶段③: 中砂回填阶段。在下放阶段中, 由于孔内淤泥以及水压力的作用, 此过程中 FBG 压力传感器监测到压力逐渐上升, FBG 压力传感器下放完毕后, 在等待回填的过程中, 数据保持平稳, 在回填过程中所监测的压力继续攀升。出现图 11(a)、(b)中下放阶段的曲线的不规则凸起的原因是: FBG 土压力传感器在下放过程中受孔内不同土层残余土体的阻力, 在较难下放的深度处将下放铝杆进行垂直方向的抽动, 使传感器顺利下放, 该过程造成了传感器压力测量值的瞬间突变。

采用静止土压力计算该地下连续墙结构土压力分布的理论值, 取综合内摩擦角 $\varphi_c = 30^\circ$, 静止土压力系数 $k_0 = 0.5$ 。图 12 为 7 个深度处 FBG 土压力传感器的土压力监测结果, 根据垂直分布的 7 个 FBG 土压力传感器的不同时期的测量数据, 可知竖直深度方向的土压力从上到下依次增大, 图 12 中各

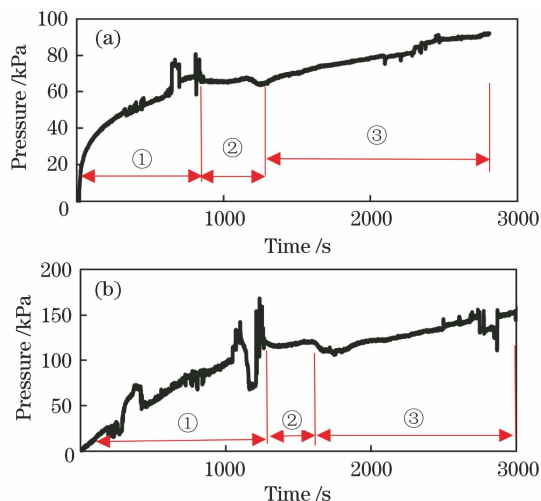


图 11 FBG 压力传感器在下放过程中的压力变化。
(a) 8 m 深度处 FBG 压力传感器; (b) 12 m 深度处 FBG 压力传感器

Fig. 11 Pressure variation of FBG pressure sensor during downshifting. (a) FBG pressure sensor at depth of 8 m; (b) FBG pressure sensor at depth of 12 m

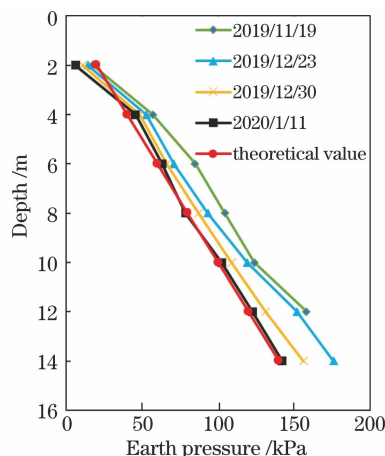


图 12 对 FBG 压力传感器在工程现场进行压力监测
Fig. 12 Pressure monitoring for FBG pressure sensor in engineering site

深度初始测量值与土压力理论计算值近似, 但从 4 m 深度往下的所有的传感器的测量值都较理论值偏大, 其原因是 4, 6, 8, 10, 12, 14 m 处的传感器都采用了碳纤维封装, 虽然封装密度较低, 但整体模量仍然大于土体的模量, 土拱效应导致传感器测量值较真实值偏大。2 m 处 3D 打印 FBG 压力传感器采用聚乳酸脂作为传感器的封装材料, 由于聚乳酸脂的模量较小且采用了较低的封装密度(20%), 因此 2 m 处传感器模量较为接近土体模量, 测量值较为接近理论值, 理论土压力值是根据静止土压力进行计算的, 后期在地下连墙内侧进行开挖, 导致土体进

入主动状态,此时实际用于计算土压力的侧压力系数随着基坑的开挖逐渐变为主动土压力系数,主动土压力系数是三个土压力系数(主动土压力系数、静止土压力系数、被动土压力系数)中最小的一个系数,开挖的进行导致侧向卸载,侧向土压力减小,使得整体土压力值随着时间的推移而减小。

8 FBG 压力传感器组网与刚度匹配问题讨论

理想情况下,只要在不同的光纤光栅上保持不同的布拉格波长即可在一条光纤上连接大量的光纤光栅传感器,实际运用中,一条光纤上可同时串联的光纤光栅数量会受到所测的应变与温度变化导致的不同传感器之间的波长交叉问题的影响。在 FBG 传感器数量较多的情况下,可以使用云端、局域网、在线监测平台进行组网。本研究选取一个孔位(7 个 FBG 土压力传感器),因传感器数量有限,暂时没有考虑到组网问题。通过文献检索发现当传感器的刚度大于土体刚度时,传感器的压缩变形较小,导致传感器两侧压缩变形较大,在传感器上方会形成圆柱体的破坏面,破坏面两侧土体对破坏面内部土体产生向下的剪应力,导致测得的土压力值偏大。传统的压力传感器的刚度远大于土体的刚度,因此测得的土压力值偏大。通过 3D 打印调节传感器尺寸、填充密度、填充材料,间接实现传感器模量的调节,根据不同模量的土层并使用不同刚度的 FBG 土压力传感器,可以减弱甚至消除土压力传感器与土体刚度不匹配导致的土拱效应。目前测量土压力的传感器种类繁多,其尺寸、测量性能、传感器材料、刚度、测量原理各不相同,研究难点主要在于无论是选择哪一种传感器,一般情况下,其刚度都远大于土体刚度,因此选择合适的常规传感器测量真实的土压力是一个难以解决的问题。通过 3D 打印改变传感器制备过程中的封装材料和填充密度,进行传感器与土体刚度的匹配,从而达到准确测量土压力的目的。

9 结 论

本研究结合 3D 打印技术制作 FBG 土压力传感器,利用 3D 打印技术的灵活调节性,实现了传感器传感参数的灵活调节。通过室内标定验证了 FBG 压力传感器的性能,并将新型的 FBG 压力传感应用到现场实测中加以验证,本研究得出以下结论:

1) FBG 传感器可以成功地在 3D 打印过程中

被嵌入到模型内部,从而利用 3D 打印实现 FBG 土压力传感器的制备,利用 3D 打印可以制备不同封装密度、封装尺寸、封装材料的 FBG 土压力传感器,实现传感器灵敏度、量程、最小分辨率的灵活调节。传感器的标定测试结果表明,传感器的波长与压力变化线性相关;在 100 次循环加载、卸载的稳定性测试中,传感器波长变化始终保持良好的稳定性。

2) 实验发现通过改变 3D 打印封装密度可以显著改变 FBG 土压力传感器的灵敏度,随着填充密度的减小,FBG 土压力传感器的灵敏度呈线性减小。当填充密度分别为 20%、40%、60%、80%、100% 时,FBG 土压力传感器的灵敏度分别为 0.69,0.45,0.39,0.21,0.19 pm/kPa。因此基于 3D 打印制备 FBG 土压力传感器时,可通过改变 3D 打印的填充密度实现传感器灵敏度的调节。

3) 在传感器的现场测试中,FBG 土压力传感器下放过程分为三个阶段:下放阶段、稳定阶段、回填阶段。本现场测试的 7 个 FBG 土压力传感器(灵敏度从上到下依次为 15.38,0.61,0.15,0.76,0.3,0.15,0.13 pm/kPa)。两个月左右的现场监测过程较为准确地反映了现场不同深度的土压力值,实验结果反映了基坑开挖过程中的卸载作用导致的侧向土压力变化。

参 考 文 献

- [1] Wang Y H, Zhang M Y, Gao Q, et al. Research and fabrication of micro silicon piezoresistive pressure sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(11): 106-108.
王永洪, 张明义, 高强, 等. 微型硅压阻式压力传感器研制[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(11): 106-108.
- [2] Gu Y F, Zhao Y, Lv R Q, et al. A practical FBG sensor based on a thin-walled cylinder for hydraulic pressure measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(22): 2569-2572.
- [3] Htein L, Liu Z Y, Zhou B, et al. Bragg grating in novel two-core holey fiber for simultaneous measurement of pressure and temperature[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), July 31-August 4, 2017, Singapore, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 1-2.
- [4] Zhao Y, Zheng H K, Lv R Q. A practical FBG pressure sensor based on diaphragm-cantilever[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 279: 101-106.

- [5] Guan B O, Tam H Y, Liu S Y. Temperature-independent fiber Bragg grating tilt sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(1): 224-226.
- [6] Li F, Zhang W T, Li F, et al. Fiber optic inclinometer for landslide monitoring [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 166/167/168/169: 2623-2626.
- [7] Wu G J, He S L, Sang W B. Fiber Bragg grating soil sensor with precision temperature compensation[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(6): 47-49.
吴国军, 何少灵, 桑卫兵. 温度精度补偿的光纤光栅土压力传感器[J]. 机电工程技术, 2018, 47(6): 47-49.
- [8] Guo H Y, Wang Z B. Research on solid pressure sensor for high-pressure measurement based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2017, 45(7): 980-986.
郭红英, 王召巴. 基于光纤光栅的高压固体压力传感器研究[J]. 分析化学, 2017, 45(7): 980-986.
- [9] Yu S J, Zeng H, Ding S J, et al. PVDF soil pressure sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(9): 16-18.
余尚江, 曾辉, 丁世敬, 等. PVDF 土压力传感器[J]. 传感器技术, 2003, 22(9): 16-18.
- [10] Liu K Y, Xu C S, Jia K M, et al. Measurement of earth pressures on curved surface of thin film pressure sensor [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 584-591.
刘开源, 许成顺, 贾科敏, 等. 薄膜压力传感器(FSR)曲面土压力测量研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 584-591.
- [11] Liao B, Zhou T J, Ji Y K. Experimental research and development of thin-film soil pressure distribution sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(1): 19-24.
廖波, 周檀君, 季雨坤. 薄膜式土压力分布传感器研发及试验研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 19-24.
- [12] Hong C Y, Yuan Y, Yang Y Y, et al. A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 269-274.
- [13] Hong C, Zhang Y F, Borana L. Design, fabrication and testing of a 3D printed FBG pressure sensor[J]. IEEE Access, 2019, 7: 38577-38583.
- [14] Zhang X J, Luo W Z, Zhang J, et al. Development of an FBG water content sensor adopting FDM method and its application in field drying-wetting monitoring test[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 297: 111494.
- [15] Li F, Du Y L, Zhang W T, et al. Fiber Bragg grating soil-pressure sensor based on dual L-shaped levers [J]. Optical Engineering, 2013, 52 (1): 014403.
- [16] Jiang S C, Cao Y Q, Sui Q M, et al. Research on the micro and high-precision fiber Bragg grating soil pressure sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0405002.
蒋善超, 曹玉强, 隋青美, 等. 微型高精度光纤布拉格光栅土压力传感器研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405002.
- [17] Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Experimental study on field static pressure penetration of PHC pipe pile based on fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1206004.
马加骁, 王永洪, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的PHC管桩现场静压贯入试验研究[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1206004.
- [18] Yan L J, Li Z Z, Feng J, et al. Research of three-dimensional printing process for PLA[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(2): 71-74, 144.
闫丽静, 李真真, 冯婧, 等. 聚乳酸(PLA)3D打印工艺研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(2): 71-74, 144.