

引用格式: SUN Li, SUN Xinxin, LIANG Tianqi, et al. Study on Strain Transfer Mechanism of Three Dimensions Printing Encapsulated Fiber Bragg Grating Sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0906002

孙丽,孙欣欣,梁天琦,等. 3D打印封装光纤光栅传感器应变传递机理研究[J].光子学报,2021,50(9):0906002

3D打印封装光纤光栅传感器应变传递机理研究

孙丽,孙欣欣,梁天琦,李闯,张春巍

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

摘 要:采用3D打印方法开发光纤光栅应变传感器,建立裸光纤光栅传感器、3D打印封装层、被测基体三者之间的应变耦合传递的分离式模型,推导光纤光栅传感器与被测基体的应变传递关系,分析夹持式3D打印光纤光栅应变传感器应变传递率的影响因素,包括封装层弹性模量、封装层厚度、黏结长度。研究结果表明平均应变传递率与封装层弹性模量和黏结长度呈正相关,与封装层厚度呈负相关。研究成果对夹持式光纤光栅应变测量、误差修正和传感器设计,以及3D打印技术封装光纤布拉格光栅的可行性具有参考意义。

关键词:光纤传感器;3D打印方法;应变传递耦合机理;封装技术;夹持式光纤光栅传感器

中图分类号:TN253;TP212

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0906002

Study on Strain Transfer Mechanism of Three Dimensions Printing Encapsulated Fiber Bragg Grating Sensor

SUN Li, SUN Xinxin, LIANG Tianqi, LI Chuang, ZHANG Chunwei

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The fiber grating strain sensor is developed by using the 3D-printing method. A separate model of strain coupling and transmission between the bare fiber Bragg grating sensor, 3D-printing encapsulation layer and the measured matrix structure is established. The strain transfer relationship between the fiber grating sensor and the measured matrix structure is deduced. The influencing factors of the strain transfer rate of the clamped 3D-printing fiber grating strain sensor are analyzed, including the elastic modulus of the encapsulation layer, the thickness of the encapsulation layer and the bonding length. The research results show that the average strain transfer rate is positively correlated with the elastic modulus and bonding length of the encapsulation layer, negatively correlated with the thickness of the encapsulation layer. The research results can be used as a reference for the clamped fiber Bragg grating strain measurement, error correction and sensor design, as well as the feasibility of 3D-printing technology for packaging fiber Bragg gratings.

Key words: Fiber optics sensors; Three dimensions printing method; Strain transfer coupling mechanism; Packaging technology; Clamped fiber Bragg grating sensor

OCIS Codes: 060.2370; 060.3735; 120.0280; 130.6010

0 引言

光纤光栅传感器以其体积小、灵敏度高、抗电磁干扰能力强等优点,在结构健康监测中发挥着至关重要

基金项目:国家重点研发计划(No.2017YFC1503103-05),国家自然科学基金(No.52078310),辽宁省“兴辽英才计划”(No.XLYC1902038)

第一作者(通讯作者):孙丽(1974—),女,教授,博士,主要研究方向为结构健康监测。Email:sunli2009@163.com

收稿日期:2021-02-03;录用日期:2021-04-09

<http://www.photon.ac.cn>

的作用^[1-2]。光纤光栅作为一种传感元件,裸光纤光栅抗剪能力弱,容易破坏,需要进行封装保护。常见的封装方法根据封装形式和材料的不同可以分为:半金属管封装法、钢片封装法、聚合物封装法和毛细钢管封装法^[3-4]。利用环氧树脂胶将裸光纤光栅封入直径较小的毛细钢管^[5-6]或高分子材料^[7-9]中,封装过程中,环氧树脂易产生气泡瑕疵,不可避免地影响传感器精度。3D打印技术改变了以往对裸光纤光栅的封装方式,这种3D打印技术可以直接使用计算机进行操控,用机器代替人工,提高制备效率和精度,能进行批量加工,实现传感器参数的一致性,避免重新标定的繁琐。其引入了自定义几何、功能控制属性,避免了前期传感器制造过程中的复杂步骤^[10-12],具有材料成分、化学配比、截面形状皆可调节的优点,使传感器设计更加灵活、易于定制,避免胶结段气泡缺陷的产生。

采用3D打印技术对裸光纤光栅进行封装时,3D打印机使用的封装材料聚乳酸(Polylactic Acid, PLA)在打印过程中融化成为裸光纤光栅与被测基体之间的中间层,PLA材料弹性模量为 3×10^3 MPa,光纤弹性模量为 7.2×10^4 MPa,由于二者弹性模量相差较大,导致测量光纤的应变与基体的实际应变不一致,由此引起的传递误差不可忽视。因此,为了获得更精确的测量结果,对3D打印封装光纤光栅应变传感器的应变传递关系进行分析和修正具有一定意义。一些学者进行了相关的研究,SUN Li等^[13]开发用于超大应变监测的大量程光纤光栅传感器,研究了黏结层弹性模量对应变传递速率的影响;WANG Chuhong等^[14]用超级电镀技术将光纤光栅应变传感元件自动黏结在金属基体上,力学模型分析表明该方法可以有效提升应变传递效率;XU Yiwu等^[15]研究了胶体的弹性模量、泊松比、长度等因素对基体到光纤平均应变传递率的影响。SUN Li, GU Cuipeng^[16]基于杠杆原理开发了一种光纤光栅倾角传感器,传感器的部分构件采用3D打印技术制作而成,减小了重复性误差;WANG Yi等^[17]将光纤光栅粘合在3D打印件内部,通过对PLA材料的内部应变变化进行监测来确认打印件内部的残余应力;FANG L等^[18]利用3D打印技术将光纤布拉格光栅嵌入进由丙烯腈(Acrylonitrile, A)、丁二烯(Butadiene, B)、苯乙烯(Styrene, S)三种单体组成的三元共聚物(ABS)材质的等强度梁中,测试结果表明光纤光栅传感器可以有效地监测3D打印的等强度梁的应变变化。

针对3D打印技术的光纤光栅传感器,本文提出一种分离式应变传递耦合分析模型,推导光纤应变传递关系,并分析夹持式3D打印光纤光栅应变传感器应变传递率的影响因素,进行传感器标定实验并对其进行静态特性分析。

1 3D打印封装光纤光栅应变传感器研制

本文开发的3D打印封装光纤光栅应变传感器如图1,主要由裸光纤光栅、封装外壳、毛细钢管组成。裸光纤光栅采用石英光纤,材质为二氧化硅,这种材料抗剪能力弱,容易破坏,所以需要对其进行封装保护。因此采用松套管保护光纤不被折断,并且在传感器端部预留孔道使松套管可以埋进裸光纤光栅,从而更好地保护光纤。采用3D打印嵌入式封装方法将裸光纤光栅封装入封装外壳中,将传感器放置于夹持件上的U型基槽内,旋紧螺丝以夹持住传感器,夹持件可粘贴于待测结构构件表面。由弹性力学基本假设可知,在外力作用下,传感器内的应力、应变为沿 x 方向的连续函数,假如在栅区仍然有封装材料与光纤黏结,由于封装材料为光栅提供了沿 x 方向的非均匀应变场,光栅将产生非均匀的轴向应变,故预设栅区预留孔,消除封装材料与光栅胶结对光纤光栅应变传递的影响。3D打印光纤布拉格光栅应变传感器细节参数如表1。

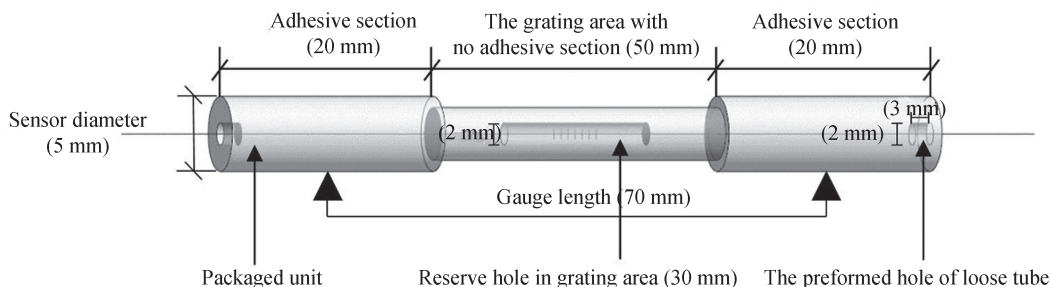


图1 夹持式3D打印光纤光栅应变传感器设计图

Fig. 1 Design drawing of 3D-printing fiber grating strain sensor with clamped

表1 3D打印光纤布拉格光栅应变传感器尺寸
Table 1 3D-printing fiber Bragg grating strain sensor dimensions

Parameter type	Dimension parameters/mm
Gauge length	70
Length of the grating	25
Length of reserved hole in grating area	30
Diameter of reserved hole in grating area	2
Length of adhesive section	20
Sensor diameter	5
Diameter of hole reserved for loose casing	2
Depth of hole reserved for loose casing	3
Inside diameter of capillary tube	0.4
Outer diameter of capillary tube	0.5

将PLA材质作为3D打印材料,通过建立Autodesk Revit family参数族模型来指导3D打印设备进行传感器封装,对模型进行分层处理并调整合适的打印方向以确保传感器构件各向受力均衡。打印机喷头温度开始升高,开始打印至传感器截面中心位置时暂停,在预留孔洞中心位置埋入裸光纤光栅,栅区利用毛细钢管保护,避免了封装材料与光栅胶结产生的啁啾效应。将光纤一端固定在打印平台上,施加一定预拉力于另一端光纤并固定,3D打印机继续打印,完成应变传感器的封装。

夹持式3D打印光纤光栅应变传感器实物如图2。



图2 夹持式3D打印光纤光栅应变传感器实物

Fig. 2 The physical of 3D-printing fiber grating strain sensor with clamped

2 应变传递分析

为了简化计算模型,便于分析,在充分考虑实际受力情况的前提下,以下的理论计算中采用如下假定:

1)基体材料承受沿光纤轴向方向的均匀拉伸应变,通过3D打印保护层的剪切变形传递,使光纤产生轴向变形,光纤并不直接承受外力。

2)光纤与3D打印保护层接触良好,接触面无相对滑移。

3)不考虑打印精度对应变传递的影响。

4)光纤、封装保护层均为线弹性材料,由于对光纤采用相位掩模法或紫外照射法进行刻写进而形成栅区,故栅区存在一定的缺陷,物理性能有所影响,此处假定栅区与光纤为物理性能相同的线弹性材料。

本文提及的3D打印光纤光栅应变传感器简化的结构模型如图3,光纤与3D打印保护层主要依靠两边胶结段连接,3D打印保护层与基体连接,通过3D打印保护层的剪切变形传递,使光纤产生轴向变形。为防止光纤光栅产生啁啾效应,设置栅区无黏结段,无黏结段的部分3D打印保护层与光纤无连接,此区段的3D打印保护层存在轴向变形,需考虑到应变传递的计算当中。

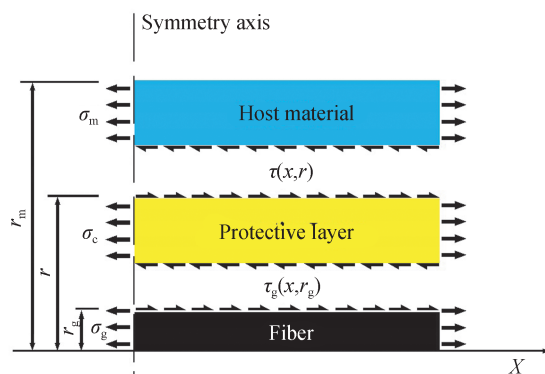


图3 与 x 轴对称的各部分微元体受力分析
Fig. 3 Analysis of the forces on the micro elements symmetric with the x -axis

构建微元体沿 x 方向的力的平衡方程

$$(4r^2 - \pi r_g^2)\sigma_c + 2\pi r_g \int_0^L \tau_g(x, r_g) dx - 4r \int_0^L \tau(x, r) dx = 0 \quad (1)$$

式中, r 为保护层外侧到轴心距离 (即传感器半径); r_g 为光纤半径; r_m 为传感器的轴心到基体材料外边缘的距离; σ_g 为光纤在 x 轴方向上的应力; σ_c 为保护层在 x 轴方向上的应力; σ_m 为基体材料在 x 轴方向上的应力; $\tau_g(x, r_g)$ 为光纤表面的剪切应力; $\tau(x, r)$ 为传感器与基体材料之间的剪切应力。

得出 x 轴方向上保护层的剪切应力与光纤剪切应力的关系, 可表示为

$$\tau(u, r) = \frac{\pi r_g}{2r} \tau_g(u, r_g) \quad (2)$$

式中, u 为轴向位移。

如图4, x 轴方向上的变形协调条件为

$$\delta_m(u) = \delta_g(u) + \delta_p(u) \quad (3)$$

式中, $\delta_m(u)$ 为基体材料在 x 轴方向的轴向变形; $\delta_g(u)$ 为光纤在 x 轴方向的轴向变形; $\delta_p(u)$ 为保护层在 x 轴方向的剪切变形。

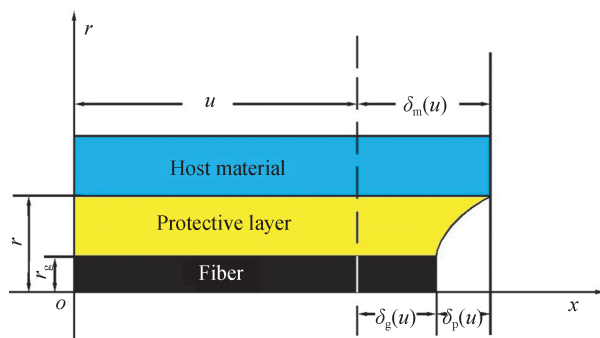


图4 与 x 轴对称的各部分微元体变形协调条件
Fig. 4 The deformation coordination condition of each part of the microelement which is symmetric with the x -axis

根据式(1)~(3), 可以认为基体在 x 轴方向的轴向变形、保护层在 x 轴方向的剪切变形、光纤在 x 轴方向的轴向变形三者存在耦合关系, 且上述关系符合胡克定律。为了求出 $\delta_p(u)$, 需要确定 $\tau(u, r)$, 即

$$\tau(u, r) = G_p \gamma_p(u, r) \quad (4)$$

式中, $\gamma_p(u, r)$ 为保护层的剪切应变; $G_p = \frac{E_p}{2(1 + \mu_p)}$ 为保护层的剪切模量; E_p 为保护层的杨氏模量; μ_p 为保护层的泊松比。

在变形极其微小的情况下, 可以近似认为

$$\gamma_p(u, r) = \frac{du}{dr} = \frac{\tau(u, r)}{G_p} = \frac{\pi r_g}{2G_p r} \tau_g(u, r_g) \quad (5)$$

综合上述分析, $\delta_p(u)$ 可以被表示为

$$\delta_p(u) = \int_u^{u+\delta_p} dx = \int_{r_g}^{r_m} \gamma_p(u, r) dr = \int_{r_g}^{r_m} \frac{\pi r_g}{2G_p r} \tau_g(u, r_g) dr = \frac{\pi r_g}{2G_p} \tau_g(u, r_g) \ln\left(\frac{r_m}{r_g}\right) \quad (6)$$

$\delta_m(u)$ 、 $\delta_g(u)$ 、 $\delta_p(u)$ 已得出, 因此, 可以通过式(7)~(9)来计算基体及光纤 x 轴方向应变:

$$\delta_m(u) = \int_0^u \epsilon_m(x) dx = \int_0^u \frac{\sigma_m u}{E_m} dx \quad (7)$$

$$\delta_g(u) = \int_0^u \epsilon_g(x) dx = \frac{1}{\pi r_g^2 E_g} \int_0^u T_g(x) dx \quad (8)$$

$$T_g(u) = \pi r_g^2 \sigma_g - 2\pi r_g \int_0^u \tau_g(x, r_g) dx \quad (9)$$

式中, $\sigma_m(u)$ 为基体在 x 轴轴向的应力; $\sigma_g(u)$ 为光纤在 x 轴轴向的应力; E_m 为基体弹性模量; E_g 为光纤弹性模量; $\epsilon_m(u)$ 为基体在 x 轴方向的应变; $\epsilon_g(u)$ 为光纤在 x 轴方向的应变; $T_g(x)$ 为光纤的轴向拉力。

将式(6)~(9)带入变形协调方程(3)得

$$\int_0^u \frac{\sigma_m u}{E_m} dx = \frac{1}{\pi r_g^2 E_g} \int_0^u \left[\pi r_g^2 \sigma_g - 2\pi r_g \int_0^u \tau_g(x, r_g) dx \right] dx + \frac{\pi r_g}{2G_p} \tau_g(u, r_g) \ln\left(\frac{r_m}{r_g}\right) \quad (10)$$

将式(10)两端求导得

$$\frac{\sigma_m u}{E_m} = \frac{\sigma_g}{E_g} - \frac{2}{E_g r_g} \int_0^u \tau_g(x, r_g) dx + \frac{\pi r_g}{2G_p} \tau_g'(u, r_g) \ln\left(\frac{r_m}{r_g}\right) \quad (11)$$

由于传感器以及荷载呈正对称, 且对称轴处光纤与保护层无直接接触, 所以对称轴处 $\frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_g}{E_g}$ 。所以, 式(11)可以变换为

$$\frac{2}{E_g r_g} \int_0^u \tau_g(x, r_g) dx = \frac{\pi r_g}{2G_p} \tau_g'(u, r_g) \ln\left(\frac{r_m}{r_g}\right) \quad (12)$$

令 $k = \frac{4G_p}{\pi E_g r_g^2}$, $\beta = \frac{1}{\ln(r_m/r_g)}$, 式(12)可以化简为

$$\tau_g''(u, r_g) - k^2 \beta^2 \tau_g(u, r_g) = 0 \quad (13)$$

保护层内外表面剪切应力的关系可表示为

$$\tau_g(u, r_g) = -\frac{k\beta r_g \sigma_m}{2\sinh(kL)} \cosh(ku) = -\frac{2G_p r_g \sigma_m \beta}{\pi E_g r_g^2 \sinh(kL)} \cosh(ku) \quad (14)$$

光纤的轴向拉力可由式(14)带入式(9)得到, 即

$$T_g(u) = \frac{\pi E_g \sigma_m r_g^2}{E_m} \left[1 - \frac{\sinh(k\beta u)}{\sinh(k\beta L)} \right] \quad (15)$$

即光纤在 x 轴方向的轴向应变分布为

$$\epsilon_g(u) = \frac{\sigma_m}{E_m} \left[1 - \frac{\sinh(k\beta u)}{\sinh(k\beta L)} \right] \quad (16)$$

沿光纤轴向各点的应变传递率为

$$\mu(z) = \frac{\epsilon_g(z)}{\epsilon_m} \quad (17)$$

将式(16)代入式(17)得

$$\mu(z) = 1 - \frac{\sinh(k\beta u)}{\sinh(k\beta L)} \quad (18)$$

即沿光纤轴向各点的应变传递率计算公式。

3 理论分析结果

3.1 3D打印光纤光栅应变传感器物理力学参数

本文所提及的传感器应变传递率主要与其设计参数夹持距离、标距、封装保护层厚度有关,对以上参数对应变传递率的影响展开分析。光纤和3D打印的各项物理力学参数由表2给定,包括光纤弹性模量、3D打印层弹性模量、3D打印层泊松比、光纤半径、胶层厚度、3D打印层厚度、光纤粘贴长度。

表2 光纤和3D打印保护层的物理力学参数

Parameter	Unit	Symbol	Value
Elastic modulus of optical fiber	MPa	E_g	7.2×10^4
Elastic modulus of 3D-printing layer	MPa	E_p	4 000
Poisson's ratio of 3D-printing layer		μ	0.394
Radius of optical fiber	μm	R_g	62.5
3D-printing layer thickness	mm	r_m	2.5
Bond length of optical fiber	mm	L	30

3.2 封装层弹性模量对应变传递率影响

由于3D打印材料可以通过改性、改变打印方向、改变填充率或使用不同打印路径等方式使其弹性模量发生变化,本文选取4种弹性模量作为3D打印封装层。图5为在3D打印层厚度、光纤黏结长度一致的情况下不同弹性模量的封装层对应下的应变传递率,选定3D打印层厚度为2.5 mm即传感器总厚度为5 mm,光纤单边黏结段长度为30 mm。由于3D打印光纤光栅应变传感器采用对称设计,其应变传递率图像沿纤芯方向在栅区中心对称,根据式(18)绘制出的应变传递率曲线如图5。

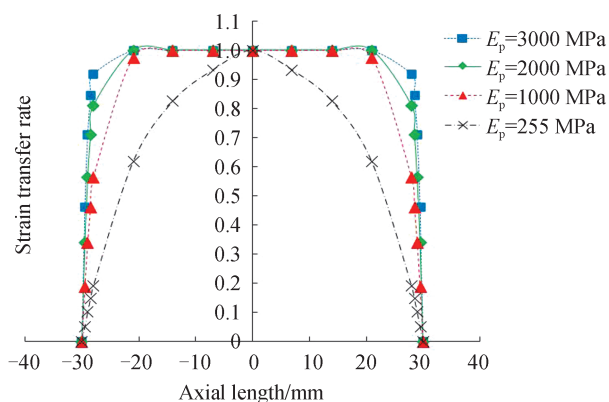


图5 3D打印弹性模量对应变传递率的影响

Fig. 5 Effect of elastic modulus of 3D-printing on strain transmissibility

由图5可以看出,边界的应变传递率最小为0,在栅区中心处得到最大应变传递率接近为1。由式(12)可知,封装层弹性模量会对3D打印光纤光栅应变传感器应变传递率产生影响,通过曲线图可直观地展现了出来,由图5可知,考虑不同封装材质弹性模量对应变传递率的影响,弹性模量越大,整体应变传递率越大,主要体现在上升段的斜率方面和中心应变传递率上。当封装材料的弹性模量相差一个量级时,对应变传递率产生了较大的影响,为了显著提高3D打印光纤光栅应变传递率,应尽量提高封装材料的弹性模量。

3.3 封装层厚度对应变传递率影响

由于不同应变传感器设计参数不同,所对应的封装层厚度可能发生变化,选取4个常见传感器封装厚度

进行应变传递率分析。图6为在3D打印层弹性模量、光纤黏结长度一定的情况下不同封装层厚度对应下的应变传递率,该图中选定3D打印层弹性模量为1 000 MPa,光纤单边黏结段长度为30 mm。根据式(18)绘制出的应变传递率曲线如图6。

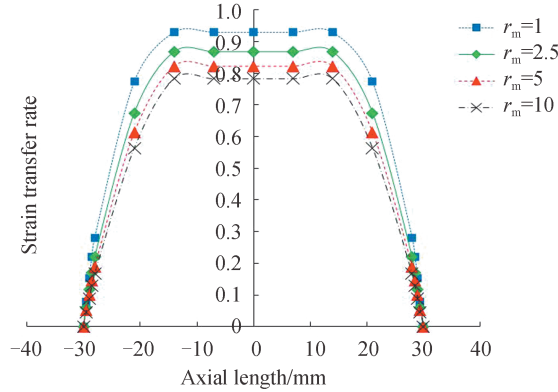


图6 3D打印层厚度对应变传递率的影响
Fig. 6 Effect of 3D-printing layer thickness on strain transmissibility

由图6可以看出,在曲线上升段开始出现明显的斜率变化时,光纤光栅的应变传递率的最高值也产生了明显差异。由式(12)可知,3D打印封装层厚度会对系数 β 产生影响,最终影响应变传递率。由图可知,考虑不同3D打印封装层厚度对应变传递率的影响时,3D打印保护层厚度越大,应变传递率越低,然而封装层厚度在传感器设计时尺寸较小,因此3D打印封装层厚度相比于3D打印层弹性模量对应变传递率的影响更小。建议在满足保护裸光纤光栅,提供一定侧向刚度的同时,尽量减小3D打印封装层厚度。

3.4 光纤黏结长度对应变传递率影响

根据不同的监测需要,应变传感器的设计参数不同。本文列举4个常见的传感器光纤黏结长度进行应变传递率影响分析。图7为在3D打印层弹性模量、3D打印保护层弹性模量一定的情况下不同光纤黏结长度对应下的应变传递率,该图中选定3D打印层弹性模量为1 000 MPa,3D打印保护层厚度为2 mm(即传感器总厚度4 mm)。根据式(18)绘制出的应变传递率曲线如图7。

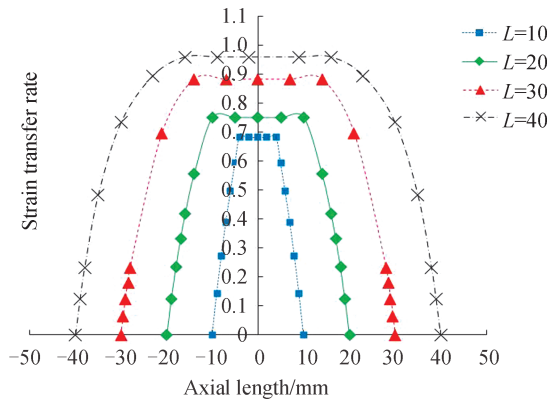


图7 光纤黏结长度对应变传递率的影响
Fig. 7 Effect of fiber bond length on strain transmissibility

由图7可以看出,随着黏结长度的增加,沿光纤轴向应变传递率的最大值变大,曲线上升段的斜率基本无变化,原因是封装材料性质和光纤径向的封装尺寸没有发生变化。由图可知,考虑不同光纤黏结段长度对应变传递率的影响时,光纤黏结段长度越大时,应变传递率峰值越高,应变传递滞后效果不受影响。建议在满足传感器设计参数的同时,尽量增加光纤黏结段的长度。

3.5 各参数对应变传递率影响程度分析

为了比较各参数对应变传递率的影响程度,引用平均应变传递率的概念,通过比较各参数变化导致平

均应变传递率的变化判定其影响程度。平均应变传递率可表示为光纤胶结段应变传递率的平均值,光纤胶结段的平均应变传递率为

$$\overline{\mu(z)} = \frac{\int_0^L \frac{\epsilon_g(z)}{\epsilon_m} dz}{L} = 1 - \frac{\cosh(k\beta L)}{kL \sinh(k\beta L)} \quad (19)$$

1) 3D 打印封装层弹性模量对应变传递率影响程度

3D 打印封装层的弹性模量会影响其剪切模量,是影响 3D 打印封装层剪切变形的重要因素。在式(19)的基础上,考虑 3D 打印封装层的弹性模量对平均应变传递率的影响,不同 3D 打印封装层弹性模量的平均应变传递率如表 3。

表 3 不同 3D 打印封装层弹性模量的平均应变传递率

Parameter	Value								
Elastic modulus/MPa	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100
Mean strain transmissibility/%	92.73	94.55	95.64	96.37	96.89	97.28	97.58	97.82	98.02

图 8 为根据表 3 绘制的 3D 打印封装层的弹性模量对平均应变传递率影响曲线,曲线除 3D 打印封装层弹性模量外其他参数均为定值,即裸光纤光栅的黏结段长度为 30 mm,光纤弹性模量为 72 000 MPa,光纤半径为 0.062 5 mm,3D 打印封装层厚度为 2.5 mm。

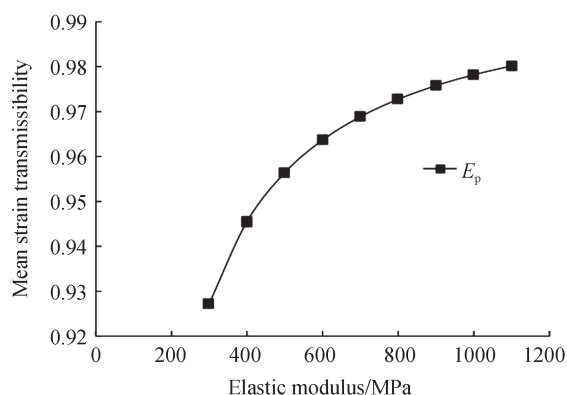


图 8 3D 打印封装层弹性模量对平均应变传递率的影响

Fig.8 Effect of the elastic modulus of 3D-printing packaging layer on the average strain transmissibility

从图 8 可以看出,3D 打印封装层弹性模量越大,平均应变传递率越大。在 3D 打印封装层弹性模量达到一定数值之后曲线开始增长缓慢,即 3D 打印封装层弹性模量对平均应变传递率的影响逐渐变小。为了增加光纤光栅应变传感器的应变传递效率,应至少保证 3D 打印封装层的弹性模量保持在 1 000 MPa 以上,3D 打印技术所采用的 PLA 耗材弹性模量在 3 000 MPa 左右^[19],由此可证明 3D 打印技术应用于光纤光栅应变传感器的封装是完全可行的。

2) 3D 打印层厚度对应变传递率影响

封装层厚度会影响传感器在应变传递过程中的剪应变传递距离,对 3D 打印封装光纤光栅应变传感器的应变传递率产生直接影响。在式(19)的基础上,考虑 3D 打印封装层的厚度对平均应变传递率的影响,不同 3D 打印封装层厚度的平均应变传递如表 4。

表 4 不同 3D 打印封装层厚度的平均应变传递率

Parameter	Value								
Package thickness/mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mean strain transmissibility/%	92.734	92.730	92.723	92.716	92.708	92.700	92.692	92.685	92.678

图9为根据表4绘制的3D打印封装层的厚度对平均应变传递率影响曲线,曲线除3D打印封装层厚度外,其他参数均为定值,其中裸光纤光栅的黏结段长度为30 mm,光纤弹性模量为72 000 MPa,光纤半径为0.062 5 mm,3D打印封装层弹性模量 E_p 为3 000 MPa。

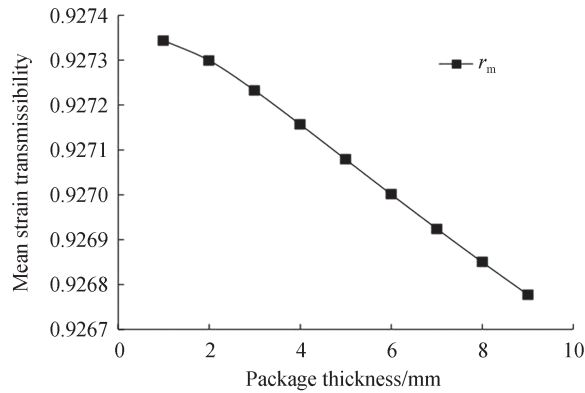


图9 封装层厚度对平均应变传递率的影响
Fig. 9 Effect of encapsulation layer thickness on average strain transmissibility

从图9可以看出,3D打印封装层厚度越大,平均应变传递率越小,在3D打印封装层厚度较小时应变传递率变化较为平缓,在封装层厚度大于2 mm后其大致呈现线性关系。为了增加光纤光栅应变传感器的应变传递效率,应尽量降低3D打印封装层的厚度,同时选取弹性模量较高的封装材料进行封装。

3) 光纤黏结长度对应变传递率影响

光纤黏结长度会影响传感器在应变传递过程中的剪应变传递横向距离,主要影响光纤与3D打印封装层的胶结力,其对应变传递率产生较为直接的影响。在式(19)的基础上,考虑光纤与3D打印层的黏结长度对平均应变传递率的影响,给出光纤黏结长度对平均应变传递率的影响曲线。从图10可以看出,光纤与3D打印封装层黏结长度越大,平均应变传递率越大,黏结长度小于10 mm时平均应变传递率较低且随黏结长度增长迅速,在黏结长度大于20 mm之后,其随黏结长度变化趋于平缓。不同光纤黏结长度的平均应变传递率如表5。

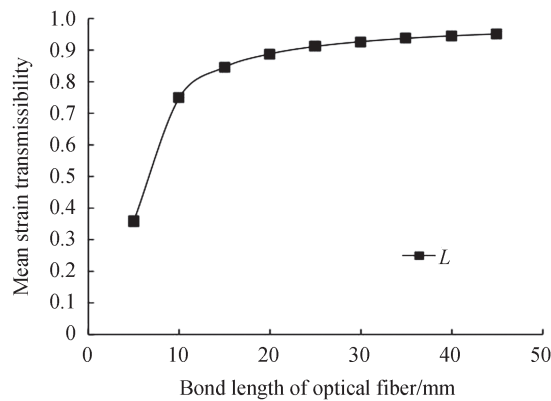


图10 光纤黏结长度对平均应变传递率的影响
Fig. 10 Effect of fiber bond length on average strain transmissibility

表5 不同光纤黏结长度的平均应变传递率
Table 5 Average strain transmissibility of different fiber bond lengths

Parameter	Value								
Bond length of optical fiber/mm	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Mean strain transmissibility/%	35.81	74.88	84.62	88.84	91.19	92.70	93.76	94.55	95.15

图 10 为光纤黏结长度的黏结长度对平均应变传递率影响曲线,曲线除光纤黏结长度外其他参数均为定值,即 3D 打印封装层厚度为 2.5 mm,光纤弹性模量为 72 000 MPa,光纤半径为 0.0625 mm,3D 打印封装层弹性模量 E_p 为 3 000 MPa。

从图 10 可以看出,为了增加光纤光栅应变传感器的应变传递效率,应至少保证光纤与 3D 打印封装层黏结长度在 20 mm 以上,其在 3D 打印封装层弹性模量较低的情况下仍能保证平均应变传递率在 90% 以上。

4 传感器标定实验

4.1 试验准备及方案

选择一块尺寸为 420 mm×35 mm×10 mm 的拉伸标定钢板,将钢板表面打磨光滑,用分析纯浓度丙酮溶液擦洗钢板表面。在丙酮挥发后,利用环氧树脂胶将光纤布拉格光栅应变传感器的夹持件支座粘贴在钢板上,两夹持件支座间距为 40 mm,粘贴时必须保证两夹持件支座的基槽在同一基准线上,该基准线与钢板长度方向平行。待粘贴夹持件支座的环氧树脂达到标准强度后再将光纤光栅应变传感器的两端安置在两支座的基槽内,旋紧螺丝将传感器固定到支座上。粘贴时用尽量少的胶黏剂,保证粘贴层尽可能薄,减少应变传递损失。在钢板侧面的中间部位粘贴一个高精度电阻应变片,电阻应变片采集即时应变数据,胶黏剂固化过程中要始终将电阻应变片按在钢板上,防止粘贴层内出现气泡,影响测量数据的精度。最后用胶带将光纤光栅应变传感器的光纤跳线和电阻应变片的导线固定以防止光纤跳线弯折损失光强或应变片导线折断。

标定装置选用 iFBG-eDAQ-S15 多类型传感器同步采集仪,加载设备采用新三思加载试验机。iFBG-eDAQ-S15 多类型传感器同步采集仪基于嵌入式硬件平台和实时操作系统的多通道光纤光栅同步解调仪,采用波长扫描型光纤激光器作为光源,主要技术指标为:波长范围 1 510~1 590 nm;精度 1 pm;稳定性 ± 2 pm 光纤光栅反射光功率 -5 dBm(Max);动态范围 50 dB;弱信号增益 20 dB;扫描频率 1~5 Hz;光路数量 15,单通道可同时连接多个 FBG 传感器(取决于传感器波长范围)。标定试验及夹持式 3D 打印光纤光栅应变传感器如图 11,标定实验步骤如下:

1) 把拉伸钢板安装在新三思试验机支座上,下端转轮逆时针旋转,上端转轮顺时针旋转,保证支座尽量夹紧钢板。

2) 新三思试验机采用力控制的方式,先预加 10 kN 荷载,使钢板和光纤光栅传感器处于拉伸的状态,逐级加载 5 kN,速率 20 kN/min,其间每 5 kN 力保载 30 s,试验机加载力分别为 10 kN、15 kN、20 kN、25 kN、30 kN、35 kN、40 kN 等直至 60 kN,在 60 kN 保载 30 s 后卸载至 10 kN,其间每 5 kN 力保载 30 s,完成一个循环。

3) 从预加 10 kN 荷载开始,在试验机间歇的 30 s 时间里,电阻应变仪开始即时读数,记录采集的应变数据。

4) 从预加 10 kN 荷载开始,在试验机间歇的 10 s 时间里,多类型传感器同步采集仪即时保存,采集波长数据。

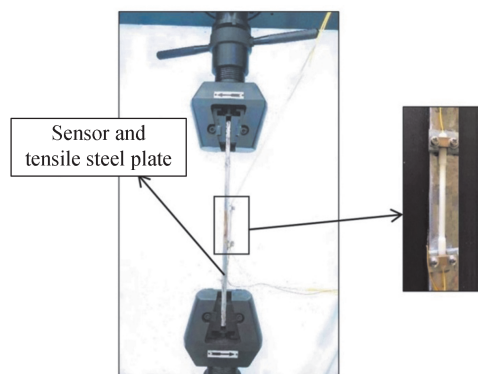


图 11 标定试验及夹持式 3D 打印光纤光栅应变传感器
Fig. 11 Calibration test and 3D-printing fiber grating strain sensor with clamped

4.2 试验结果及分析

利用PLA材质封装了直径为5 mm的夹持式3D打印光纤布拉格光栅应变传感器,并对其进行了标定实验。使用的光纤光栅的基本特性参数为光栅中心波长1 555~1 575 nm,3 dB带宽≤0.2 nm,反射率≥70%,精度≤2 με,分辨率≤0.1 με,应变量程±1 000 με,线性度≤0.1%,光纤类型为单模。

在光纤光栅应变传感器标定实验中获得的中心波长变化与应变关系如图12,三次加载试验和三次卸载试验的中心波长与应变变化曲线如图13和图14,可以看出,参数为PLA-5mm的夹持式3D打印光纤光栅应变传感器的标定曲线方程为 $y=0.0004x+1563.6$,其中灵敏度系数为0.4 pm/με,相关性系数 R^2 为0.996 9。由于相关系数达到0.99以上,说明回归直线对观测值的拟合程度良好,中心波长变化量与应变表现出良好的线性度。

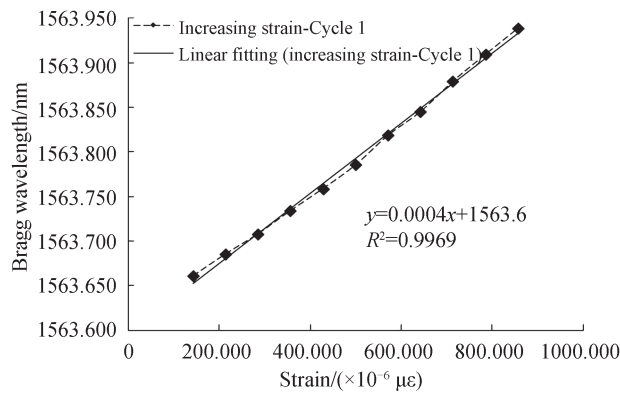


图12 3D打印光纤光栅应变传感器标定曲线

Fig. 12 Calibration of 3D-printing fiber grating strain sensor

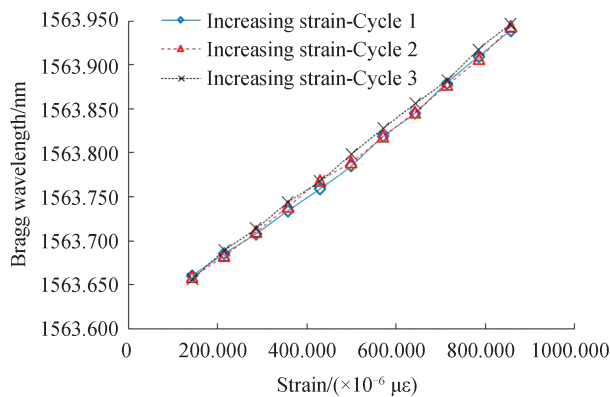


图13 3D打印光纤光栅应变传感器三次加载试验

Fig. 13 Three times load test of 3D-printing fiber grating strain sensor

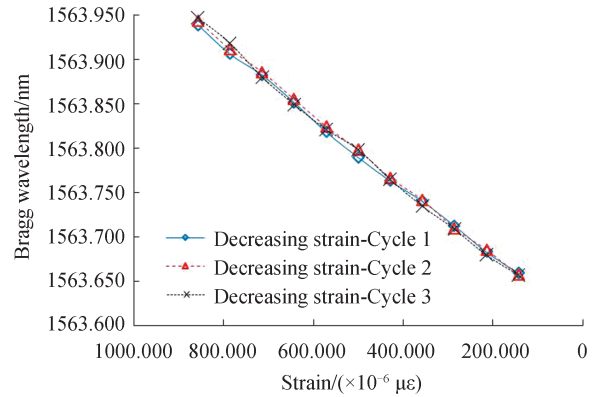


图14 3D打印光纤光栅应变传感器三次卸载试验

Fig. 14 Three times unload test of 3D-printing fiber grating strain sensor

根据PLA-5mm的夹持式3D打印光纤光栅应变传感器的标定试验可得出,该传感器的传感特性如表6。

由此可知,参数为PLA-5mm的3D打印光纤布拉格光栅应变传感器的波长与标定基片应变之间的关系可用函数表述为

表6 3D打印光纤光栅应变传感器传感特性

Table 6 Sensing characteristics of 3D-printing fiber Bragg grating strain sensor

Sensor parameter	The original wavelength/mm	Calibration experiment wavelength formula $\lambda = kx + b$	Sensor sensitivity coefficient $1/k/(\mu\epsilon \cdot \text{pm}^{-1})$
PLA-5 mm	1 555.525	$\lambda = 0.0002x + 1555.5$	5.00

$$\varepsilon = (\lambda - 1555.5) / 0.0002 \quad (20)$$

4.3 3D打印光纤光栅应变传感器静态特性分析

传感器的静态特性是指输入量不随时间变化或者变化非常缓慢时,传感器的输出量与输入量之间的函数关系。静态特性分析包括对传感器的线性度、迟滞性和重复性进行分析,进而得到应变传感器的静态误差。用于评价3D打印光纤光栅应变传感器监测的精度。

1) 线性度(e_L)

理想的测量系统的输出—输入关系应当具有直线特性,在整个测量范围内具有相同的灵敏度^[20]。传感器的实验标定曲线与数据拟合直线两者间的最大差值与满量程输出的比值即为传感器的线性度,所以线性度又被称作“非线性误差”,该值越小,线性程度越好。

$$e_L = \pm \frac{\Delta\lambda_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (21)$$

式中, $\Delta\lambda_{\max}$ 为三次循环试验中FBG中心波长的算术平均值与各拟合直线上的参考点值的最大差值, y_{FS} 表示在满量程状态下FBG的中心波长改变量。

由表7可知,PLA-5mm参数的传感器的拟合波长值与传感器光栅波长的偏差绝对值的最大值为0.015 nm,应变传感器的满量程波长漂移量为0.278 nm,由式(21)可得传感器的线性度为5.36%,说明该光纤光栅应变传感器在线性度方面表现良好。

表7 3D打印光纤光栅应变传感器线性度
Table 7 Linearity of 3D-printing fiber grating strain sensor

Sensor parameter	Strain of steel plate	Wavelength/nm	Fitting wavelength/nm	Absolute value of deviation/nm
PLA-5 mm	142.857	1 563.661	1 563.657	0.003
	214.286	1 563.685	1 563.686	0.001
	285.714	1 563.708	1 563.714	0.006
	357.143	1 563.734	1 563.743	0.009
	428.571	1 563.759	1 563.771	0.013
	500.000	1 563.785	1 563.800	0.015
	571.429	1 563.818	1 563.829	0.010
	642.857	1 563.845	1 563.857	0.012
	714.286	1 563.879	1 563.886	0.007
	785.714	1 563.909	1 563.914	0.005
857.143	1 563.939	1 563.943	0.004	

2) 迟滞性(e_H)

迟滞性表示传感器在正、逆行程中输入—输出信号特征曲线的偏差值,是评价传感器静态指标中的重要一项。计算公式为

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (22)$$

式中, ΔH_{\max} 代表三次试验中正行程与逆行程FBG中心波长偏差值,是满量程FBG中心波长改变量。

由表8可得出,PLA-5mm参数的传感器在试验过程中加载与卸载的中心波长偏差绝对值的最大值分别为0.006 nm,应变传感器的满量程波长漂移量为0.278 nm,由式(22)可以算出传感器的迟滞性为2.30%,说明该光纤光栅应变传感器在迟滞性方面表现良好。

表8 3D打印光纤光栅应变传感器迟滞性
Table 8 Hysteresis of 3D-printing fiber Bragg grating strain sensor

Sensor parameter	Strain of steel plate	Loaded wavelength/nm	Unloading wavelength/m	Absolute value of deviation/nm
PLA-5 mm	142.857	1 563.661	1 563.659	0.002
	214.286	1 563.685	1 563.683	0.002
	285.714	1 563.708	1 563.712	0.005
	357.143	1 563.734	1 563.740	0.006
	428.571	1 563.759	1 563.763	0.004
	500.000	1 563.785	1 563.789	0.004
	571.429	1 563.818	1 563.818	0.000
	642.857	1 563.845	1 563.851	0.006
	714.286	1 563.879	1 563.882	0.003
	785.714	1 563.909	1 563.906	0.004
	857.143	1 563.939	1 563.939	0.000

3)重复性(e_z)

重复性反映了当传感器在相同方向上输入相同应变量的实验中得出的波长漂移曲线不相同的水平,其评价指标为数据的标准偏差。

由贝塞尔公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (23)$$

$$e_z = \pm \frac{\alpha \sigma_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (24)$$

式中, σ 为数据标准差, y_{FS} 表示传感器在满量程状态下光纤光栅的中心波长漂移量, α 为置信系数。

由表9可得出,PLA-5mm参数的传感器的数据标准差为0.005 4,置信概率取99.7%,则置信系数为 $\alpha=3$,根据式(23)~(24)可得PLA-5mm参数的传感器重复性误差为1.87%,说明该光纤光栅应变传感器在重复性方面表现良好。

表9 3D打印光纤光栅应变传感器重复性
Table 9 Repeatability of 3D-printing fiber Bragg grating strain sensor

Sensor parameter	Loading situation	Wavelength/nm	The average wavelength/nm	Absolute value of deviation/nm	Data standard deviation/nm
PLA-5 mm	Cycle 1 upload	1 563.708	1 563.710	0.002 4	0.005 4
	Cycle 1 download	1 563.712		0.001 6	
	Cycle 2 upload	1 563.710		0.000 4	
	Cycle 2 download	1 563.710		0.000 4	
	Cycle 3 upload	1 563.714		0.003 6	
	Cycle 3 download	1 563.709		0.001 4	

4)静态误差(e_s)

静态误差是指当测量器件的基体应变(或输入值)不随时间变化时,波长漂移量(或输出值)会有缓慢的漂移,其值与线性度、迟滞性和重复性有关。静态误差公式

$$e_s = \sqrt{e_L^2 + e_H^2 + e_z^2} \quad (25)$$

通过计算,该3D打印光纤布拉格应变传感器的线性度为5.36%、迟滞性为2.30%、重复性误差为1.87%,由式(25)可得传感器静态误差为6.13%,由此可知这种夹持式3D打印光纤光栅应变传感器的传感特性曲线具有良好的线性度、迟滞性和重复性。满足土木工程的实际监测要求,验证了所提出的传感器封

装方法合理。

5 结论

本文提出了使用3D打印技术封装的光纤光栅传感器,给出了基于3D打印技术封装光纤光栅的应变传递机理,分析了3D打印封装的光纤光栅应变传感器的应变传递率分布。通过试验研究,该传感器灵敏度系数为 $0.4 \text{ pm}/\mu\epsilon$,相关系数均在0.99以上,线性度、迟滞性和重复性良好,静态误差为6.13%,由此可知这种夹持式3D打印光纤光栅应变传感器的传感特性曲线具有良好的线性度、迟滞性和重复性。满足土木工程的实际监测要求,验证了所提出的传感器封装方法合理。

3D打印方法开发的光纤光栅传感器的设计更加灵活,可以根据特种要求进行标准化定制。这种技术的优越性在于精度更高、效率更高、成本更低、操作更简便,避免由于人工操作过程中出现性能不稳定、精度差异大、胶结段气泡缺陷的产生等问题。研究成果对夹持式光纤光栅应变测量、误差修正和传感器设计,以及3D打印技术封装光纤布拉格光栅的可行性具有参考意义,在结构健康监测中具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] SUN L, LI C, ZHANG C W, et al. Early monitoring of rebar corrosion evolution based on FBG sensor[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(8): 1840001.
- [2] LI C, SUN L, XU Z Q, et al. Experimental investigation and error analysis of high precision FBG displacement sensor for structural health monitoring[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(6): 2040011.
- [3] LI Aiqun, ZHOU Guangdong. Progress and prospect of fiber Bragg grating sensors measurement technology[J]. Journal of Southeast University, 2009, 39(6): 1298-1307.
李爱群, 周广东. 光纤Bragg光栅传感器测试技术研究进展与展望[J]. 东南大学学报, 2009, 39(6): 1298-1307.
- [4] GUO Liang, ZHANG Hua, FENG Yan. Research status of fiber Bragg grating encapsulation and sensitization [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(4): 463-466.
郭亮, 张华, 冯艳. 光纤Bragg光栅封装增敏技术研究现状[J]. 半导体光电, 2012, 33(4): 463-466.
- [5] SUN Li. Research of fiber Bragg grating sensing technology and engineering application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006: 48-56.
孙丽. 光纤光栅传感技术与工程应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 48-56.
- [6] LI Chuang. Mechanism and experimental study of FBG strain transfer[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016: 41-43.
李闯. 光纤光栅应变传递机理与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016: 41-43.
- [7] MOYO P, BROWNJOHN J M W, SURESH R, et al. Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure[J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1828-1834.
- [8] SUN L, HAI H, LIANG D Z, et al. Finite element analysis of thermal stress on FBG-GFRP[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1269: 1253-1256.
- [9] LI Dongsheng, ZHOU Zhi, OU Jingping. Research and application of FRP-FBG bridge intelligent cable development and sensing characteristics [J]. Prestressing Technology, 2013, (2): 3-7.
李冬生, 周智, 欧进萍. FRP-FBG桥梁智能拉索开发和传感特性研究应用[J]. 预应力技术, 2013, (2): 3-7.
- [10] SHEN Shi, WEI Heming, WANG Jun, et al. 3D printing optical fiber Fabry-Perot cavity acoustic emission sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906004.
沈诗, 魏鹤鸣, 王俊, 等. 3D打印光纤法布里-珀罗腔声发射传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906004.
- [11] ZOLFAGHARIAN A, KOUZANI A Z, SUI Y K, et al. 3D printed hydrogel soft actuators[C]. IEEE, 2017.
- [12] GOSWAM D, LIU S, PAL A, et al. 3D-architected soft machines with topologically encoded motion[J]. Advanced Functional, 2019, 29(24): 1808713.
- [13] SUN L, LI C, ZHANG C W, et al. The strain transfer mechanism of fiber Bragg grating sensor for extra large strain monitoring[J]. Sensors (Basel), 2019, 19(8): 1851.
- [14] WANG Chuhong, CHEN Weimin, FU Zhifang, et al. Characteristics of automatic bonded fiber Bragg grating with metal materials[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(8): 0806003.
王楚虹, 陈伟民, 傅志芳, 等. 光纤光栅自动化金属粘接性能[J]. 光子学报, 2016, 45(8): 0806003
- [15] XU Yiwu, ZHANG Suxia. Effect of elastic modulus ratio of surface-bonded colloid and optical fiber on strain transfer rate [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210606.
徐义武, 张素侠. 表贴式胶体与光纤弹性模量比对应应变传递率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210606.
- [16] GU CuiPeng. Design and experiment study of a novel inclination sensor based on FBG[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu

- University, 2019: 33-49.
- 谷翠鹏. 新型光纤光栅倾角传感器设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019: 33-49.
- [17] WANG Yi, XU Gang. Study of internal stress on PLA materials produced by 3D-printing [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020, (6): 224-226+230.
- 王一, 徐刚. 3D打印PLA材料内部应力检测研究[J]. 机械设计与制造, 2020, (6): 224-226+230.
- [18] FANG L, CHEN T, LI R, et al. Application of embedded fiber Bragg grating (FBG) sensors in monitoring health to 3D Printing structures[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(17): 6604-6610.
- [19] ZHAO Jian, LIU Xiaoming, WANG Zewu. Mechanical properties of PLA based on 3D printing [J]. Plastics Industry, 2020, 48(7): 139-143.
- 赵健, 刘效朋, 王泽武. 基于3D打印的PLA材料力学性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(7): 139-143.
- [20] SUI Wentao, ZHANG Dan. Evaluation of static characteristics of sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(3): 80-81.
- 隋文涛, 张丹. 传感器静态特性的评定[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(3): 80-81.