

引用格式: GE Zi-yang, WANG Yan, QIN Nan, *et al.* Analysis of Strain Error of FBG Flexible Sensor with Relative Slip under Vertical Pressure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10):1006001

葛子阳,王彦,秦楠,等. 正向压力下FBG柔性传感器界面滑移的应变误差分析[J]. 光子学报, 2020, 49(10):1006001

# 正向压力下FBG柔性传感器界面滑移的应变误差分析

葛子阳<sup>1</sup>, 王彦<sup>1</sup>, 秦楠<sup>1</sup>, 梁大开<sup>2</sup>, 胡兴柳<sup>3</sup>

(1 安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243000)

(2 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

(3 金陵科技学院 智能科学与控制工程学院, 南京 211169)

**摘要:**为了研究光纤布拉格光栅柔性传感器与封装材料界面间的相对滑移引致的应变误差是否可以忽略,采用ANSYS有限元仿真软件,分析了滑移引起的纤芯各点轴向应变的相对误差与正向压力关系,通过分析影响传感器结构的敏感性参数包括纤芯材料、涂覆层材料、封装材料与尺寸,探讨相对滑移对光纤布拉格光栅轴向应变相对误差的影响.研究表明,正向压力在[0.1 N, 10 N]范围时,纤芯各点轴向应变相对误差随着正向压力的增大而减小,且呈现纤芯小两端大的趋势.实际应用中应结合正向压力大小,选取弹性模量较小的纤芯材料和摩擦系数较大的封装材料,可使轴向应变相对误差小于10%;选择涂覆层弹性模量为 $2.4 \times 10^{10}$  Pa,厚度为0.062 5 mm,可使轴向应变相对误差降低到8.57%;当光纤布拉格光栅半埋入长度大于40 mm时,纤芯的轴向应变相对误差总体低于20%,此时可认为涂覆层与硅胶之间为完全粘结,无相对滑移.

**关键词:**光纤布拉格光栅;应变传递;ANSYS有限元;相对滑移;相对误差

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204910.1006001

## Analysis of Strain Error of FBG Flexible Sensor with Relative Slip under Vertical Pressure

GE Zi-yang<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, QIN Nan<sup>1</sup>, LIANG Da-kai<sup>2</sup>, HU Xing-liu<sup>3</sup>

(1 School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Liaoning 243000, China)

(2 State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(3 College of Intelligent Science and Control Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

**Abstract:** To discuss the strain error caused by the relative slip between the flexible Fiber Bragg Grating sensor and the substrate material, ANSYS finite element simulation software was used to analyze the relationship between the relative error of axial strain at each point of the core and the forward pressure. The parameters affecting strain transfer of the sensor, including core material, coating material, substrate material and size were analyzed, and the effect of relative slip on the relative error of FBG axial strain were explored. The results show that the relative error of axial strain at each point decreases with the increase of

**基金项目:**国家重点研发计划(No.2017YFC0805103),安徽省教育厅自然科学基金重点项目(Nos.KJ2017A041, KJ2018A0042),江苏省自然科学基金(No.BK20171114)

**第一作者:**葛子阳(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email: 1542122377@qq.com

**导师(通讯作者):**王彦(1975-),女,教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术. Email: wangyan@ahut.edu.cn

**收稿日期:**2020-05-27; **录用日期:**2020-08-07

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

forward pressure, when the pressure is in the range of [0.1 N, 10 N], which presents the trend of small in core and big in two ends. In practical application, it should be combine the positive pressure to select the core material with less elastic modulus and the substrate material with higher friction coefficient, the relative error of axial strain could be less than 10%; select coating elastic modulus  $2.4 \times 10^{10}$  Pa, 0.062 5 mm thickness, the relative error of axial strain could be reduced to 8.57%; when half length of the FGB is more than 40 mm, the axial strain relative error of the core could be less than 20%, at this point, it could be considered that the coating and silica gel are completely bonded.

**Key words:** Fiber Bragg grating; Strain transmission; ANSYS finite element simulation; Relative slip; Relative error

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.3735; 280.4788

## 0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)可以用来测量温度、应变、压力等物理量,在地球探测、防灾、土木工程、石油化工等传感领域得到了广泛应用.裸光栅直径小,抗剪切力差,易发生损伤,选择适宜的封装材料和恰当的封装结构,是光纤光栅敏化与保护的有效方式.2010年PARK C等<sup>[1]</sup>提出了一种硅胶涂层FBG温度传感器,通过将裸FBG嵌入到对温度敏感的硅胶弹性聚合物中以提高温度灵敏度.实验结果表明所提出的结构相对于传统光纤光栅传感器,测温灵敏度可有效地提高4.2倍.2011年周红等<sup>[2]</sup>研究了柔性FBG封装材料,采用无机胶粘剂封装FBG,并测试其最大抗拉强度、最大剪切强度,为柔性封装FBG传感器在测量温度和压力性能提供了依据.2014年吴入军等<sup>[3]</sup>通过建立应变传递函数研究测量应变与实际应变之间的关系,利用数值方法和实验对该应变传递函数进行验证,分析传感器长度、胶结层弹性模量、胶结层厚度对测量应变的影响,建立的数学模型为FBG传感器的影响参数提供了理论支持,但文中未对涂覆层影响柔性材料封装FBG的应变传递进行研究.2016年黄肖迪等<sup>[4]</sup>研究了FBG的涂覆层对其应变传递产生的影响,实验结果表明在相同的粘贴长度下有涂覆层FBG的平均应变传递率较低,且平均应变传递率随粘贴长度的增大而增大,最大平均应变传递率为92%,而无涂覆层FBG在粘贴长度达到6 cm时,应变传递率可达99%,能满足绝大多数的应变测量需求.2016年TAN C等<sup>[5]</sup>研究了裸FBG传感器和二甲硅氧烷(PDMS)封装的FBG灵敏度,将两个传感器分别固定在钢筋上,并加速腐蚀钢筋.实验结果表明,硅胶封装的FBG传感器在第10天波长发生明显移动;而裸FBG传感器在第17天时波长才发生明显位移.为了证明PDMS封装的FBG传感器对温度也具有敏感性,2017年BALDWIN C等<sup>[6]</sup>分析了不同PDMS封装结构对光纤光栅温度灵敏度和反射布拉格波长变化的影响,结果表明大尺寸封装样机的温度灵敏度比最小尺寸的温度灵敏度高1.65倍.2017年钱牧云等<sup>[7]</sup>用橡胶来封装FBG为压力传感元件并利用BP神经网络补偿,应变传感器的不确定性误差有减小,压力传感器灵敏度系数为0.194 pm/Pa.2018年许会超等<sup>[8]</sup>使用柔性基体聚二甲硅氧烷(PDMS)材料构成双层封装基体,设计了力灵敏度为0.16 nm/N的 $3 \times 3$  FBG阵列的柔性触觉传感器,提高了FBG压力传感器的灵敏度.2019年何金等<sup>[9]</sup>用的聚二甲硅氧烷(PDMS)薄膜为有机硅油加热后对FBG进行封装研究光纤的应变传递,线性度、重复性良好.2019年王彦等<sup>[10]</sup>提出基于硅胶的柔性传感器温度灵敏度是裸FBG传感器的1.3倍,静态压力灵敏度比裸FBG传感器提高了3倍且重复性好.

上述文献在研究柔性材料封装的FBG传感器时,通常假设基体与中间层之间交界面结合紧密,没有脱落,无相对滑移或不考虑施加拉力时光纤与封装材料发生相对滑移产生的形变不同步问题,即认为在实验过程中可以不考虑相对滑移的问题,对可能产生的影响忽略不计.但事实上,在理论上这种假设缺乏相关的理论推导;在实验过程中,基体与中间层的黏合往往达不到理想状态,考虑到实验材料、尺寸、制作工艺等因素,它们之间可能存在的不同步变形与接触滑移无法忽略的情况.

为解决这一问题,本文使用ANSYS仿真软件构建FBG基体模型,通过对模型施加正向压力,分析了光纤在封装体里各个位置的应变,对比了硅胶与FBG界面完全固结在一起和硅胶与FBG之间有摩擦滑动两种情况下的测量数据,分析讨论了基体与FBG之间的滑移引起的应变相对误差,并讨论了不同纤芯材料参数、涂覆层材料参数、封装材料参数下,对光纤FBG各个位置轴向应变的误差影响.

## 1 应变传递理论分析

光纤光栅传感器封装工艺中最要的因素之一就是选择合理的封装材料.根据封装材料自身的物理性质,可将封装材料分为非金属材料与金属材料两种.常用的非金属材料通常指环氧胶黏剂、PDMS等;金属材料包括基体金属材料如合金钢、铝合金等和光纤表面金属化所需的金属材料如镍、银、铜等.因光栅是在光纤纤芯上采用激光刻写而成,且仿真中不涉及FBG中心波长的变化,故将光栅当成纤芯来仿真.硅胶封装的FBG传感器分析模型如图1所示.其中,图1(a)为模型横剖面,图1(b)为纵剖面,其中 $2L$ 为光纤 Bragg 光栅的粘贴长度, $r_f$ 为硅胶封装厚度, $r_i$ 为封装层与涂覆层的厚度, $r_m$ 为封装边缘到纤芯的厚度.

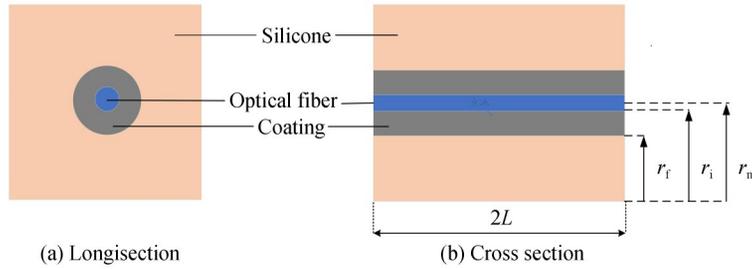


图1 硅胶封装FBG传感器分析模型  
Fig.1 Silicone-encapsulated FBG sensor analysis model

基于光纤光栅传感器的结构与基体到光纤的应变传递过程的整体考虑,理论分析时采用以下基本假定:材料均为线弹性的,基体仅沿光纤轴向承受均匀应变,然后通过粘贴部分使光纤产生应变,光纤不直接受力.由于光纤纤芯和包层的材料属性和机械特性相近,因此,在分析时将光纤纤芯、包层均当作玻璃纤维处理,且光纤与黏结层、黏结层与基体的交界面结合紧密,没有相对滑移.中间层对基体有反作用,降低基体应变.

在分析硅胶封装的光纤应变时,要考虑到光纤和硅胶两者的弹性模量.由弹性模量应变传递理论<sup>[11]</sup>可知,Bragg光栅轴向各点的应变传递率分布为

$$\alpha(x) = 1 - \frac{\cosh kx}{\cosh kL} \quad (1)$$

式中, $\alpha(x)$ 为应变传递率, $L$ 为光纤 Bragg 光栅的半粘贴长度, $k$ 为与光纤和中间层材料特性有关的参数,可表示为

$$k^2 = \frac{1}{\frac{1}{2} r_f^2 E_f \left[ \frac{1}{G_i} \ln \frac{r_i}{r_f} + \frac{2(1 + \mu_m)}{E_m} \left( \frac{r_m^2}{r_m^2 - r_i^2} \ln \frac{r_m}{r_i} - \frac{1}{2} \right) \right]} \quad (2)$$

式中, $G_i$ 为光纤的弹性模量, $E_f$ 为涂覆层弹性模量, $E_m$ 封装材料的弹性模量, $\mu_m$ 为摩擦系数.由式(1)、(2)可得在有滑移和无滑移情况下光纤各个位置轴向应变大小不同.而光纤在封装体中的应变受到多种因素的影响,需要考虑光纤与封装体之间的粘合程度、封装体尺寸和弹性模量以及光纤表面涂覆层的厚度和弹性模量<sup>[9-11]</sup>.在封装基体上施加正向压力时,封装基体会与光纤产生相对滑移,使光纤与基体的相对坐标发生变化.使用ANSYS仿真分析,讨论在正向压力的作用下,光纤与基体之间的相对滑移在何种情况下可以忽略,以及各参数对光纤与柔性封装基体应变传递的影响<sup>[12-17]</sup>.

## 2 ANSYS 仿真分析

为研究正向压力后柔性基体封装的光纤传感器在无滑移与有滑移两种情况下的应变传递误差,对硅胶封装的光纤传感器进行有限元分析.由于该模型是轴对称结构,故本实验只搭建1/2模型进行仿真分析.光纤和涂覆层轴向长度为50 mm,硅胶基体轴向长度即光纤的半埋设长度为40 mm.纤芯与包层外径为0.125 mm,带涂覆层的光纤外径为0.25 mm,固化后的硅胶长、宽、高分别为40 mm、20 mm、3.6 mm.选用中心波长为1 532.89 nm的SMF-28单模FBG光纤光栅,弹性封装材料选用HC-820系列的硅胶溶液, $G_i$ 为 $7.2 \times 10^{10}$  Pa,

$E_f$  为  $2.4 \times 10^{10}$  Pa,  $E_m$  为  $1.2 \times 10^9$  Pa,  $\mu_m$  为 0.48, 仿真中光纤部分和硅橡胶均选择 Sweep 划分网格. 由于光纤径细, 对其网格划分更加细密, 光纤的单元尺寸设置为 0.5 mm, 硅橡胶的单元尺寸设置为 1 mm. 同时, 对接触面和目标面、光纤两端面上的边及光纤与硅橡胶相交的边进行了细化. 网格质量的平均值为 0.833 47, 有 216 264 个节点, 48 068 个单元.

图 2 为硅胶封装的 FBG 传感器均匀施加正向压力受力图, 传感器硅胶部份长、宽、高分别为 40 mm、20 mm、3.6 mm. 红色受力是  $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的一面, 力的大小为 10 N, 方向是竖直向下.

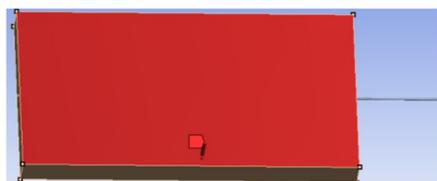


图 2 硅胶封装的 FBG 传感器正向受力

Fig.2 Silicone-encapsulated FBG sensor under positive force

图 3 为在正向压力作用下, 传感器的相对滑移分布图, 由图可知滑移沿光纤轴向分布. 无滑移与有滑移情况下纤芯各点对应的轴向应变如图 4(a)、(b) 所示, 可以得出在 10 N 正向压力下, 光纤各点所受的应力大小不同, 分布不均匀. 无滑移时, 纤芯的轴向应变最大值为  $3.7181 \times 10^{-6}$ , 最小值为  $3.5294 \times 10^{-11}$ , 有滑移时纤芯的轴向应变最大值为  $3.134 \times 10^{-6}$ , 最小值为  $3.533 \times 10^{-11}$ . 图 5 为正向压力 10 N 时, 两种情况分别对应的纤芯各点的轴向应变. 由图可知两种情况下纤芯轴向应变分布基本一致, 无滑移时, 应变传递数值较有滑移时大, 表明光栅 FBG 与封装材料界面如有滑移则应变传递低.

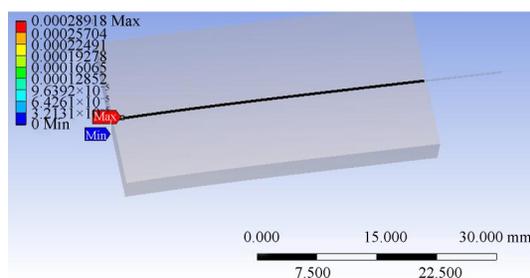


图 3 10 N 正向压力下相对滑移分布

Fig.3 Relative slip distribution under 10 N forward pressure

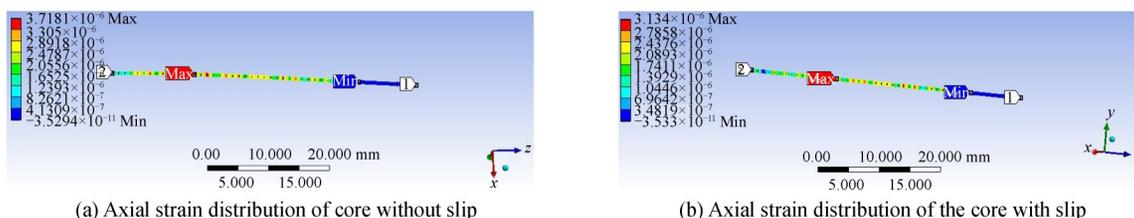


图 4 10 N 正向压力下无/有滑移时纤芯轴向应变分布

Fig.4 Distribution of axial strain of the FBG sensor with 10 N forward force

为了进一步分析正向压力大小对有/无滑移两种情况下应变的影响, 分别研究了不同压力下, 纤芯各点轴向平均应变值与有滑移时产生的应变相对误差, 如图 6 所示.

由图 6 可见, 在受力  $[0.1 \text{ N}, 3 \text{ N}]$  范围内, 施加正向压力越小, 相对滑移引致的轴向应变较无滑移时大, 此时纤芯轴向应变的相对误差较大, 故不能忽略. 在受力 3 N 时, 两者近乎相等, 有无滑移引起的应变相对误差最小, 随后随正向压力增加, 无滑移引致的应变开始大于有滑移引致的应变, 且相对误差在 10 N 时达到 23.15%, 如相对误差 10% 以内可忽略, 则施加压力范围为 2~5 N 时滑移引起的应变误差可不考虑. 此外, 由图 7 可知, 当正向压力越大, 纤芯各点轴向应变相对误差越小, 且呈现封装区域的两端较大中间小的趋势, 表明在 FBG 封装时, 应尽量位于埋入光纤的中间段, 此时滑移引起的应变影响小, 应变传递更佳. 尖峰的位置

是光纤坐标位置的10 mm和40 mm处,这两处分别是硅胶封装的截面.此处是光纤与硅胶和外界的分界,所以在这两处光纤的应变会发生较大变化.

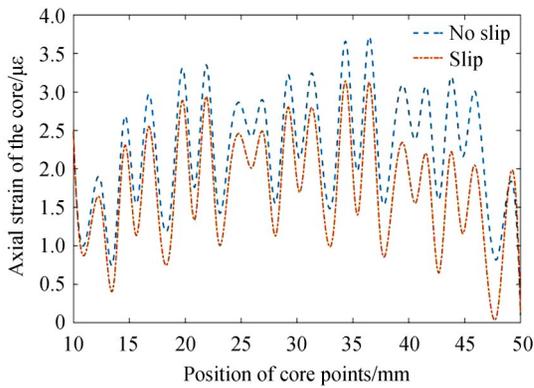


图5 10 N正向压力下两种情况纤芯各点轴向应变

Fig.5 Core axial strain corresponding to each point in two cases under 10 N forward pressure

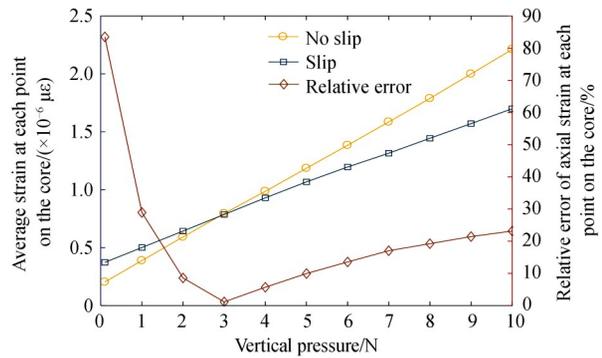


图6 有无滑移下纤芯各点平均应变及轴向应变相对误差与正向压力关系

Fig.6 Relationship between Core axial average strain and relative error with forward pressure

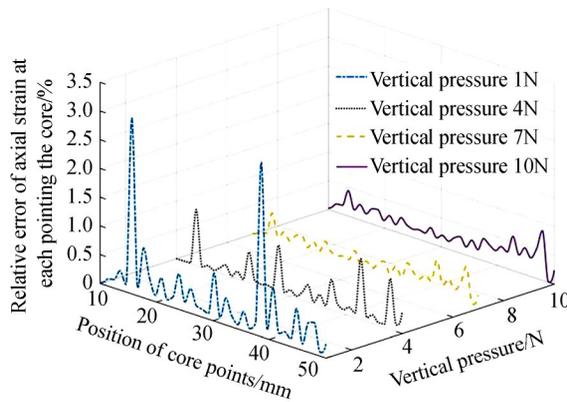


图7 滑移时纤芯各点轴向应变相对误差与受力大小关系

Fig.7 Relationship between core axial strain relative error and forward pressure

### 3 参数敏感性分析

此外,通过分析纤芯材料的弹性模量、涂覆层材料的弹性模量及涂覆层厚度、封装材料的弹性模量及摩擦系数、封装长度等传感器结构参数的敏感性,分别探讨滑移对轴向应变相对误差的影响.

#### 3.1 纤芯材料

目前,光纤有石英光纤、塑料光纤,不同材料的弹性模量不同,因此有必要研究无滑移和有滑移情况下纤芯弹性模量对纤芯轴向应变的影响.

本文模拟比较了纤芯弹性模量从较低的塑料到较高的石英材料,分别选取了弹性模量 $7.2 \times 10^8$  Pa、 $1.8 \times 10^{10}$  Pa、 $3.6 \times 10^{10}$  Pa、 $5.4 \times 10^{10}$  Pa、 $7.2 \times 10^{10}$  Pa五种参数,当正向压力在0.1 N到10 N之间时,纤芯轴向应变在有/无滑移两种情况下的相对误差随力变化的趋势,仿真结果如图8所示.可以看出,不同弹性模量的纤芯材料,应变相对误差随正向压力的变化趋势一致,相对误差先降低后升高.当正向压力小于1 N时,不同弹性模量的纤芯材料引起的应变相对误差几乎相等,但此时有滑移对应变影响较大;当压力大于5 N之后,相同作用力时,纤芯弹性模量越大纤芯轴向应变相对误差越大.因此,在实际应用过程中,当施加的正向压力越大时,选择弹性模量较小的塑料光纤,有利于降低滑移引起的轴向应变使其低于10%,提高应变传递率.

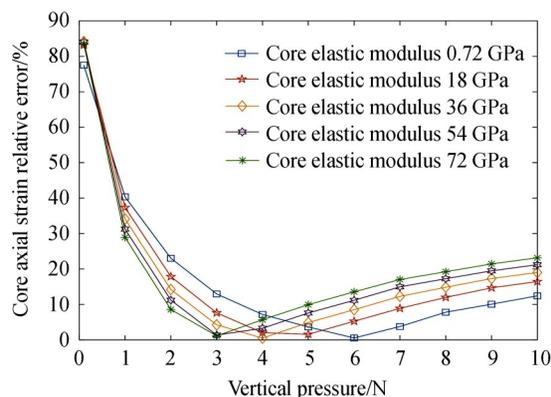


图8 滑移时轴向应变相对误差与纤芯材料的关系  
Fig.8 Relationship between core axial strain relative error and core material

### 3.2 涂覆层材料

考虑到光纤涂覆层材料的弹性模量、涂覆层厚度可对轴向应变在有/无滑移情况下产生影响,图9为选取涂覆层厚度为0.062 5 mm、0.25 mm、0.5 mm时,不同涂覆层弹性模量下,在正向压力0.1~10 N作用下,轴向应变有/无滑移情况下的相对误差.由图可知,0.1~10 N间,不同涂覆层弹性模量下,有/无滑移情况下的相对误差随着正向压力的变化基本一致,相对误差随着正向压力的增加先减小后增大.相同正向压力下,涂覆层弹性模量在 $6 \times 10^9$  Pa到 $2.4 \times 10^{10}$  Pa之间,相对误差先明显上升后又趋缓慢,表明涂覆层弹性模量增加到一定程度后,对轴向应变影响降低.当涂覆层厚0.25 mm时,不同涂覆层弹性模量下,相对误差随正向压力的增加而降低,而当涂覆层厚度为0.5 mm时,随正向压力增加,相对误差波动变化,此时考虑到光纤的传输特性,涂层太厚引致光纤损耗过大.因此,为减小有滑移时引起的应变误差,提高应变传递,在检测压力小于3 N时,应选用弹性模量大、厚度薄的涂覆层.而当检测压力大于3 N时,应选用弹性模量小、厚度薄的涂覆层.例如,2 N正向压力下,宜选择涂覆层弹性模量 $2.4 \times 10^{10}$  Pa,厚度0.062 5 mm,此时应变相对误差为8.57%.

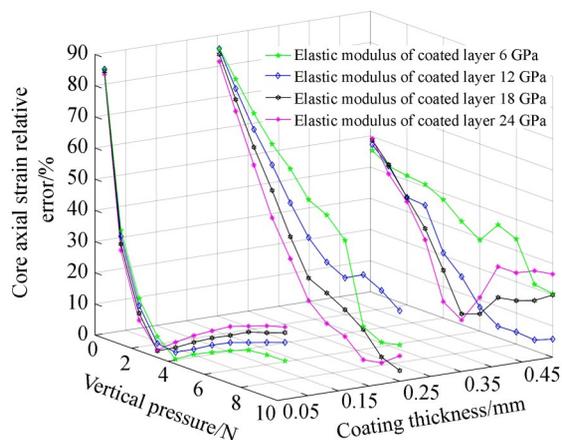


图9 滑移时轴向应变相对误差与涂覆层材料的关系  
Fig.9 Relationship between core axial strain relative error and coating material

### 3.3 封装材料

封装硅胶材料及混合比例可能会导致固化后基体的弹性模量不同,与光纤接触部分摩擦系数不同,进而对轴向应变相对误差产生影响.

图10为在正向压力下,摩擦系数分别为0.25、0.5、0.7、0.75时,硅胶弹性模量分别为 $3 \times 10^8$  Pa、 $6 \times 10^8$  Pa、 $9 \times 10^8$  Pa、 $12 \times 10^8$  Pa、 $15 \times 10^8$  Pa下,光纤轴向应变相对误差随正向压力增加的变化图.可以看出,不同弹性模量的硅胶,相对误差随着正向压力的变化对于不同摩擦系数变化趋势一致,且摩擦系数较大,相对

误差较小.

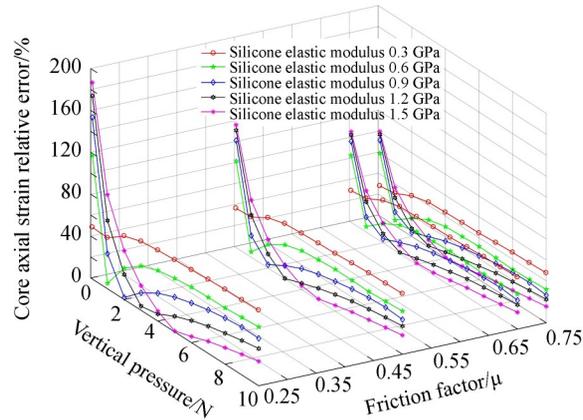


图10 滑移时轴向应变相对误差与封装材料的关系

Fig.10 Relationship between core axial strain relative error and packaging material

同时,轴向应变误差的变化也与施加正向压力大小有关,当施加正向压力大于5 N时,相同摩擦系数下,硅胶材料的弹性模量较大,应变相对误差越小,故实验前应综合考虑受力情况分析选择封装材料硅胶的种类.

### 3.4 封装长度

封装长度即为光纤埋入封装材料中的长度,图11为正向压力下,有滑移产生的轴向应变相对误差与半埋入长度之间的关系.

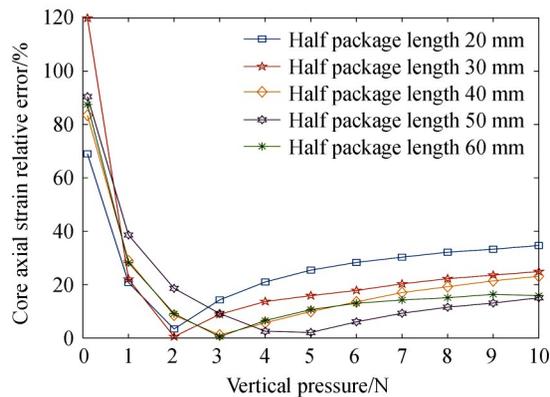


图11 滑移时轴向应变相对误差与封装长度的关系

Fig.11 Relationship between core axial strain relative error and package length

埋入长度不同时,相对误差随着正向压力变化趋势一致,均是先减小后增大.在上升阶段,正向压力对相对误差的影响逐渐显现.相同正向压力下,相对误差随埋入长度的增加先减小后增大,表明轴向拉力下埋设长度对误差影响较大.由图11可知,当半埋入长度小于40 mm时,纤芯的轴向应变相对误差总体高于20%,当半埋入长度大于40 mm时,纤芯的轴向应变相对误差总体低于20%.因此在实际实验中应尽可能选择埋设长度大于40 mm,可认为此时涂覆层与硅胶之间为完全粘结,无相对滑移.

## 4 结论

本文采用ANSYS有限元仿真软件对光纤传感器施加正向压力,使用柔性硅胶材料对光纤FBG进行封装,基于应变传递理论,分析滑移引起的纤芯各点轴向应变与正向压力的关系,并通过改变纤芯材料、涂覆层材料、封装材料及尺寸等各个参数,分析正向压力下,光纤与封装基体间的滑移对光纤轴向应变的相对误差,研究结果为实验中检测正向压力时选择合适的结构参数提供了理论依据.本文研究的不同参数对柔性

封装FBG纤芯各点轴向应变传递还存在不足,如光纤光栅封装时预应力大小无法确定、光纤光栅应变大小易受温度干扰等,后续还应考虑优化设置在不同温度条件下,光纤光栅与封装体之间相对滑移误差大小分析,设计优化更加完善的温度对误差的影响。

#### 参考文献

- [1] PARK C, HAN Y, JOO K, *et al.* Optical detection of volatile organic compounds using selective tensile effects of a polymer-coated fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(24): 56-61.
- [2] ZHOU Hong, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, *et al.* Preparation and properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> inorganic adhesive for FBG sensor paste packaging [J]. *Journal of Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition)*, 2011, **12**(3): 109-111+115.  
周红,乔学光,贾振安,等.用于FBG传感器粘贴封装的Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>无机胶粘剂制备及性能[J].西安石油大学学报(自然科版), 2011,**12**(3):109-111+115.
- [3] WU Ru-jun, ZHENG Bai-lin, HE Peng-fei, *et al.* Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(1): 24-30.  
吴入军,郑百林,贺鹏飞,等.埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J].光学精密工程, 2014, **22**(1):24-30.
- [4] HUANG Xiao-di, WANG Yuan, SUN Yang-yang, *et al.* Mechanism analysis on the impact of coating to fiber bragg grating strain transfer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, **37**(6): 1233-1240.  
黄肖迪,王源,孙阳阳,等.涂覆层对光纤布拉格光栅应变传递的影响机理分析[J].仪器仪表学报, 2016, **37**(6):1233-1240.
- [5] TAN C, SHEE Y Y, YAP B, *et al.* Fiber Bragg grating based sensing system: Early corrosion detection for structural health monitoring[J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2016,(246): 123-128.
- [6] BALDWIN C, PICKRELL G, DU H, *et al.* Influence of different encapsulation types and shapes of polydimethylsiloxane on the temperature sensitivity of the FBG.[J].*Fiber Optic Sensors and Applications XIV*. 2017, **10208**: 102080U.
- [7] QIAN Mu-yun, YU You-long. Tactile sensing of fiber bragg grating based on back propagation neural network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(8): 0806001.  
钱牧云,余有龙.基于逆传播神经网络的光纤布拉格光栅触觉传感[J].中国激光, 2017, **44**(8):0806001.
- [8] XU Hui-chao, MIAO Xin-gang, WANG Su. A flexible tactile sensor for robot based on FBG[J]. *Robot*, 2018, **40**(5): 634-639.  
许会超,苗新刚,汪苏.基于FBG的机器人柔性触觉传感器[J].机器人, 2018, **40**(5): 634-639.
- [9] HE Jing, HOU Man-lin, PENG Zuo-rui, *et al.* FBG-based flexible multi-parameter sensor fabrication and human sensing applications [J]. *Optical Communications Technology*, 2019, **43**(11): 10-13.  
何金,侯颀玲,彭作蕊,等.基于FBG的柔性多参量传感器制备与人体传感应用[J].光通信技术, 2019,**43**(11):10-13.
- [10] WANG Yan, QIN Nan, LIU Ji-hong, *et al.* Test of temperature and pressure flexible sensor based on optical Fiber Bragg Grating[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, **40**(3): 209-214.  
王彦,秦楠,刘吉虹,等.基于光纤光栅的温度与压力柔性传感性能测试[J].仪器仪表学报, 2019, **40**(3): 209-214.
- [11] SUN Yang-yang, WANG Yuan, ZHANG Qing-hua, *et al.* Measurement of strain transfer in optical fibers with internal strain in similar materials [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(2): 759-764.  
孙阳阳,王源,张清华,等.模型相似材料内部应变光纤量测应变传递[J].岩土力学, 2018,**39**(2):759-764.
- [12] LIU Ming-yu, LU Yi-fan, ZHANG Zhi-jian, *et al.* FBG pressure sensor based on polymer packaging [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, **37**(10): 2392-2398.  
刘明尧,卢一帆,张志建,等.基于聚合物封装的光纤布拉格光栅压力传感器[J].仪器仪表学报, 2016, **37**(10):2392-2398.
- [13] CHEN Guang, DING Ke-qing, FENG Qi-bo, *et al.* Strain transfer mechanism of end-bonding fibre bragg grating sensors based on linear viscoelasticity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, **55**(11): 110604.  
陈光,丁克勤,冯其波,等.线黏弹性端接布拉格光纤光栅传感器应变传递机理[J].激光与光电子学进展, 2018, **55**(11):110604.
- [14] BAO Teng-fei, LI Jian-ming, ZHAO Jing-lei. Strain transfer analysis between embedded plastic optical fibers and concretes[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, **52**(12): 2342-2348.  
包腾飞,李润鸣,赵津磊.埋入式塑料光纤与混凝土间的应变传递分析[J].浙江大学学报(工学版), 2018, **52**(12): 2342-2348.
- [15] RONG Dan-dan, ZHANG Jue-min, SONG Yan-ming, *et al.* Study on the sensing characteristics of cylindrical metallic-packaged FBG sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, **40**(1): 117-124.  
戎丹丹,张钰民,宋言明,等.柱体金属化封装FBG传感器的传感特性研究[J].仪器仪表学报, 2019, **40**(1): 117-124.

- [16] WU Hong-yu, ZHANG Hui, SHEN Lan-ping. Research and development status of robot flexible pressure sensing skin [J]. *Synthetic Fiber in China*, 2017, **46**(7): 44-50.  
伍泓宇, 张辉, 沈兰萍. 机器人柔性压力传感皮肤的研究开发现状[J]. 合成纤维, 2017, **46**(7):44-50.
- [17] ZHANG Ya-nan, FAN Di, SHENG Lin-yong, *et al.* Experiment on strain transfer and precision of FBG thin-diameter shape sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, **27**(7): 1481-1491.  
章亚男, 范迪, 沈林勇, 等. FBG细径形状传感器的应变传递和精度实验[J]. 光学精密工程, 2019, **27**(7): 1481-1491.