

## Experimental Study on the Effect of Temperature on Strain Transmissibility of Fiber Grating Sensors\*

CHEN Yang<sup>1</sup>, GUO jie<sup>1</sup>, SUN Yangyang<sup>1</sup>, ZHANG Zhenglin<sup>2</sup>, ZHAN Xincong<sup>2</sup>

(1. Army Engineering University, Nanjing Jiangsu 210007, China;

2. National Defense Engineering Research Institute, Academy of Military Sciences, Luoyang He'nan 471023, China)

**Abstract:** Most researchers using fiber Bragg grating (Fiber Bragg Grating, FBG) sensor Strain transmissibility, typically ignore the impact of temperature on the adhesive, the adhesive shear modulus is different at different temperatures, it will inevitably affect the results obtained by the strain measurement. In this paper, the calibration test of a beam of equal strength in a constant temperature box shows that the same FBG sensor has different strain transfer rates when calibrated at different ambient temperatures. It is found that the temperature is mainly caused by the influence of the temperature on the shear modulus of the adhesive. Through the analysis of the strain transfer rate curve, under the same other conditions, the strain transfer rate of the same equal-strength beam first increases and then decreases with the temperature.

**Key words:** temperature; adhesive; fbg sensor; strain transmissibility; experimental study

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.11.004

## 温度对光纤布拉格光栅传感器应变传递率影响的试验研究\*

陈阳<sup>1</sup>, 郭杰<sup>1\*</sup>, 孙阳阳<sup>1</sup>, 章征林<sup>2</sup>, 占欣聪<sup>1</sup>

(1. 陆军工程大学, 江苏南京 210007; 2. 军事科学院国防工程研究院 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 多数学者利用光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感器研究应变传递率时, 通常忽略温度对胶黏剂的影响, 而胶黏剂在不同温度条件下的剪切模量不同, 必然对应变测量所得出的结果造成影响。本文经过在恒温箱内等强度梁标定试验发现, 同一 FBG 传感器在不同环境温度下标定得到的应变传递率不同, 发现主要是温度对胶黏剂剪切模量影响造成的。通过应变传递率曲线分析得到, 在其他条件相同下, 同一等强度梁应变传递率随温度先升高后下降。

**关键词:** 温度; 胶黏剂; FBG 传感器; 应变传递率; 试验研究

中图分类号: TP211

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2021)11-1440-05

光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器是一种以光为载体、以光纤为媒介的传感器, 其具有抗电磁干扰、灵敏度高、精度高等显著优点, 被广泛应用于岩土工程、航空航天、和机械设备状态监测等领域<sup>[1-3]</sup>。

FBG 传感器主要是依据波长进行调制, 利用其可以测量温度、应变等物理量<sup>[4]</sup>进行监测。关于光纤光栅应变的传递规律, 即应变测量值与应变理论值之间的关系, 国内外学者做了大量的研究工作。在这些试验中, 通常在室温或某一稳定温度状态下进行, 多数专家学者忽略温度对应变传递率的影响或缺少不同温度下的对比试验, 直接影响测量的精

度以及应变传递率的准确性。

章征林<sup>[5]</sup>、刘明尧<sup>[6]</sup>、曾鹏<sup>[7]</sup>、赵鹏冲<sup>[8]</sup>等利用光纤光栅 (FBG) 传感器对等强度梁应变进行测量, 验证胶黏剂对表贴式 FBG 传感器应变传递系数的影响, 采用的应变传递模型, 由于试验过程持续时间较短, 均忽略温度变化对应变传递率的影响。贾振安<sup>[9]</sup>、王鹏<sup>[10]</sup>等在光纤光栅温度灵敏度系数的影响因素试验研究中, 单纯考虑温度变化对波长的影响, 而忽略胶黏剂的剪切模量随温度改变而变化, 从而导致应变传递率计算的准确性存在误差。申昊文<sup>[11]</sup>、孙丽<sup>[12]</sup>、王花平<sup>[13]</sup>等在研究不同封装方式

项目来源: 国家自然科学基金项目 (51608528)

收稿日期: 2021-06-08 修改日期: 2021-07-27

对应变传递影响的试验中, 缺乏在不同环境温度下的对比分析, 得出的应变传递规律仍需进一步完善。

上述关于 FBG 传感器应变传递率的研究或将温度假设为可忽略条件, 或忽略温度对胶黏剂剪切模量的影响。而事实上, 胶黏剂为高分子聚合物, 其力学特性和剪切模量都随温度变化, 进而导致 FBG 应变传递率随温度变化。本文通过设计试验, 对 FBG 传感器的应变传递规律与温度之间的关系进行研究。针对粘贴式 FBG, 通过悬臂梁试验监测不同温度内的应变变化, 比较理论应变与实际应变的差异, 分析不同温度下的应变传递率, 发现不同温度条件下的应变传递率不同, 其传递规律与不同温度下胶黏剂的剪切模量变化趋势大致吻合。

## 1 等强度梁应变传递试验原理

### 1.1 光纤布拉格光栅的温度传感原理

FBG 的传感原理为当光纤布拉格光栅中有宽带光源射入时, 入射光在光栅的布拉格波长中心处被反射回来, 其余的透射光不受影响, 通过光栅栅距的变化引起波长变化, 解调装置通过检测波长的变化推导出外界温度、压力或应力的变化。

在光纤布拉格光栅中, 反射波长基本表达式为:

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

式中:  $n_{\text{eff}}$  为光纤光栅芯区有效折射率;  $\Lambda$  为光纤光栅纤芯中的调制周期。

式(1)对温度求导, 得:

$$d\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} \frac{d\Lambda}{dT}\right) dT \quad (2)$$

式(2)两边分别除以式(1)两端, 得:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}\right) dT \quad (3)$$

令  $\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} = \xi$ , 表示光纤光栅热光系数;  $\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} = \alpha$ ,

表示光纤线性热膨胀系数。则:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}}\xi + \alpha\right) dT \quad (4)$$

令  $\alpha_T$  为光纤光栅温度传感灵敏度系数。则:

$$\Delta\lambda = \alpha_T \Delta T \quad (5)$$

根据式(5)可得光纤光栅波长变化与温度变化的关系。

### 1.2 应变传递模型

本文在前人研究的基础上, 应变传递模型采用孙阳阳<sup>[14]</sup>等提出的表面粘贴式应变传递模型如图 1 所示, 实验选用聚酰亚胺光纤, 在已知同一温度下平均应变传递率受胶黏剂厚度、黏贴长度、剪切模量

等影响的前提下, 通过控制粘结层条件相同在不同温度条件下进行对比试验。

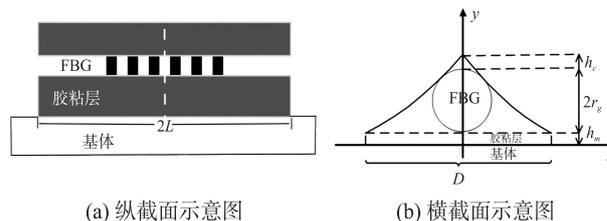


图 1 表面粘贴式应变传递模型

已知表面粘贴式应变传递模型的理论平均应变传递率为:

$$\alpha = 1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)} \quad (6)$$

$$k = \frac{DG_C}{\pi r_g^2 E_g h_m} \quad (7)$$

式中:  $L$  为 1/2 粘贴长度,  $D$  为胶体的粘贴宽度,  $G_C$  为胶体剪切模量,  $r_g$  为聚酰亚胺光纤光栅的半径,  $E_g$  为光纤光栅弹性模量,  $h_m$  为下部胶结层的厚度。

表面粘贴式应变传递模型变形修正系数为:

$$\alpha_L = 1 + 2 \frac{r_g + h_m}{h} \quad (8)$$

式中:  $r_g$  为 0.065 mm,  $h$  为等强度梁的厚度, 经游标卡尺多次测量取平均值求得 3.8 mm。

最后可得聚酰亚胺光纤光栅平均应变传递率的计算公式为:

$$\alpha_p = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_s \varepsilon_L} = \frac{\alpha}{\alpha_L} \quad (9)$$

### 1.3 应变传递影响因素分析

#### 1.3.1 温度对胶黏剂剪切性能的影响

秦建彬<sup>[15]</sup>等对 3 种胶黏剂在不同温度条件下的剪切强度和剪切模量进行测试, 结果表明胶黏剂 A、B、C 在 3 种温度条件下的剪切强度和剪切模量存在很大差异, 低温下能够保持较高的剪切强度与剪切模量, 升高温度后剪切强度和剪切模量下降, 特别是温度升高至 100 °C 时, 剪切强度和剪切模量大幅度下降。本文通过试验发现, 在其他条件不变只有温度变化下, 同一等强度梁的应变传递率随温度的变化而变化。本文试验选用 LOCTITE401 胶黏剂, 其剪切强度随温度变化如图 2。

#### 1.3.2 胶黏剂剪切模量对应变传递率的影响

总结前人对应变传递率的研究, 发现起决定因素的主要有粘结层剪切模量、粘结层厚度、以及光纤的粘贴长度和宽度。针对本文采用的应变传递模型可知, 当光纤的粘贴长度、宽度、厚度为定值时, 裸光纤布拉格光栅的平均应变传递率随粘结层的剪切模

量增大而增大,如图 3 所示。

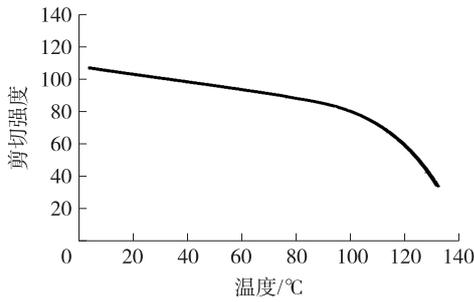


图 2 LOCTITE401 剪切强度变化

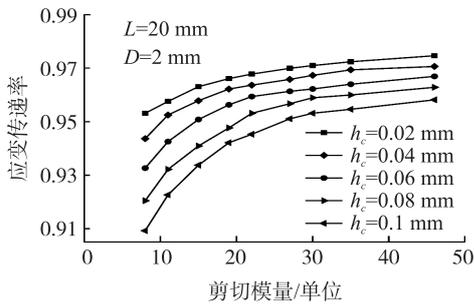


图 3 平均应变传递率随胶层剪切模量变化关系

## 2 试验研究

### 2.1 试验装置

整个试验系统由光纤光栅传感器、解调仪、恒温箱、等强度梁、砝码及计算机共同组成,试验装置如图 4 所示。试验采用聚酰亚胺单模光纤,其耐温性能优越,适合长期使用温度范围为 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。SM125 光纤光栅解调仪,其基于光纤珐珀滤波器的

解调技术,扫描频率为 1 Hz,可识别波长范围为 $1\ 510\ \text{nm}\sim 1\ 590\ \text{nm}$ ,能够实现 4 通道同步采样。触摸式恒温箱温度调控范围为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,精确度至 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,保温时长可达数小时。

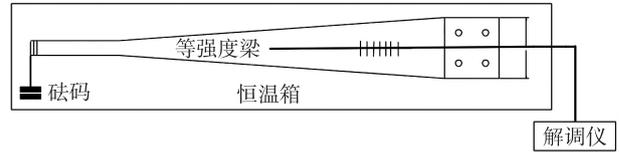


图 4 试验示意图

### 2.2 试验步骤

试验开始前,等强度梁上布设好聚酰亚胺光纤光栅,将其放入恒温箱中,温度设置从 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 依次加热到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每升温 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保持 $0.5\ \text{h}$ 不变,确保温度稳定并均匀(处处温度相同),同时开启解调仪,监测光纤光栅传感器中心波长值,而后通过对布设光纤光栅传感器的等强度梁依次加载砝码,同时记录光纤光栅中心波长变化的偏移量。

### 2.3 结果分析

为了精确测量 FBG 平均应变传递率,消除 $\alpha_L$ 带来的影响。本文试验采用测厚规对粘结层进行 5 次测量,通过计算平均值确定胶层厚度为 $36.13\ \mu\text{m}$ 。最后计算 $\alpha_L$ 可得:

$$\alpha_L = 1 + 2 \frac{0.065 + 0.036}{3.8} = 1.053 \quad (10)$$

每个温度下 3 组试验应变数据取平均值,与理论应变进行对比,绘制理论应变-测量应变曲线,平均应变传递率如图 5 所示,应变数据见表 1。

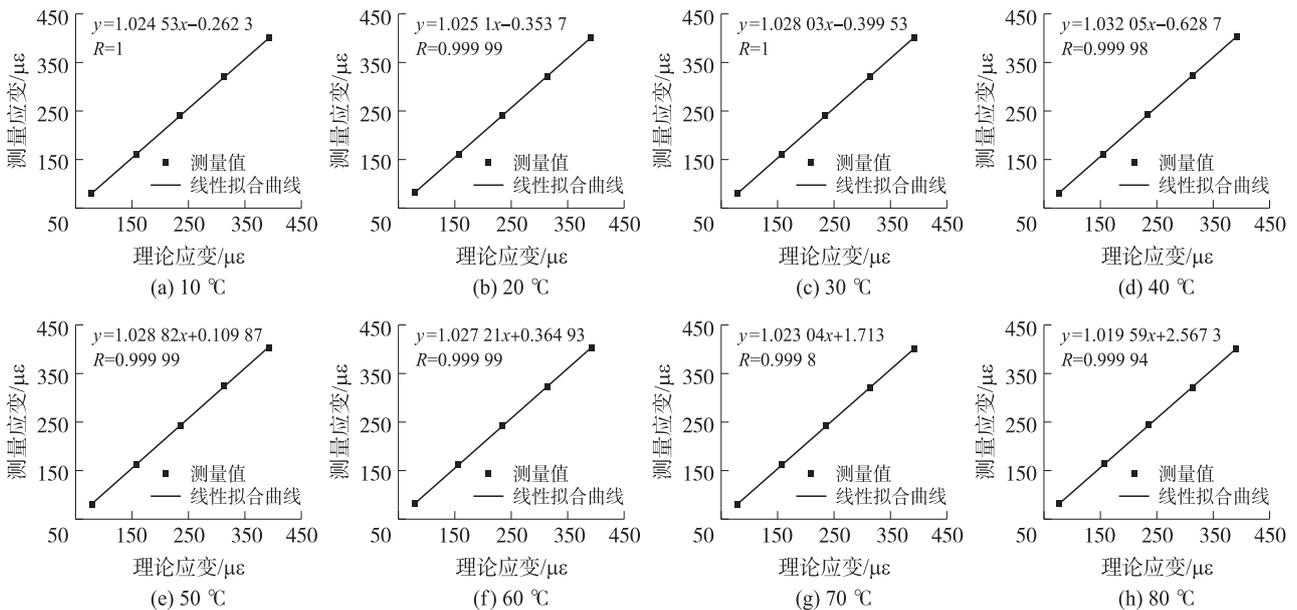


图 5 各温度下未修正应变传递率

表 1 不同温度平均应变数据记录

加载/kg	平均应变/ $\mu\epsilon$							
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C
0.5	80.29	80.26	80.40	80.80	80.67	80.99	81.17	81.24
1.0	160.24	160.26	160.47	159.89	161.04	160.81	162.32	162.82
1.5	240.61	240.69	241.32	242.51	242.50	242.11	242.96	244.58
2.0	320.58	320.45	322.02	323.82	323.27	323.24	323.45	321.42
2.5	401.70	401.97	402.57	403.35	402.80	402.43	401.58	401.59

本文通过开展不同温度下等强度梁加载试验, 由表 1 记录了 10 °C 至 80 °C 下不同加载重量的应变平均数值, 图 5 绘制了各个温度下计算得出的应变传递率曲线, 通过对比分析可得同一等强度梁在不同下应变传递率各不相同, 最大可达到 1.032 1, 最小只有 1.019 6 左右, 按照式 (8) 修正后, 可得最大平均应变传递率为 0.980 2, 最小为 0.968 3, 结果差异的主要因素是试验温度导致胶黏剂剪切模量造成的。等强度梁应变传递率试验结果对比如表 2 所示。

表 2 应变传递试验结果

序号	温度 /°C	理论应变传递率	测量的应变传递率	修正后的应变传递率	误差率 /%
1	10	0.954 2	1.024 6	0.973 0	1.973 0
2	20	0.954 2	1.025 1	0.973 5	2.023 0
3	30	0.954 2	1.028 0	0.976 3	2.312 0
4	40	0.954 2	1.032 1	0.980 2	2.720 0
5	50	0.954 2	1.028 8	0.977 0	2.391 0
6	60	0.954 2	1.027 2	0.975 5	2.232 0
7	70	0.954 2	1.023 0	0.971 5	1.814 0
8	80	0.954 2	1.019 6	0.968 3	1.476 0

由表 2 应变传递试验结果可知, 实测平均应变传递率达到 96% 以上, 且与理论平均应变传递率的相对误差最大仅为 2.72%, 图 6 绘制了应变传递率随温度的变化曲线, 从 10 °C 开始逐渐上升至 40 °C 达到峰值, 之后随温度的升高逐渐下降。经过分析得出, 在加热开始阶段, 温度升高对胶黏剂的剪切模量影响较小, 而等强度梁的热膨胀作用明显, 进而导致应变传递率的增大, 随着温度的逐步升高, 等强度梁的热膨胀作用小于温度对胶黏剂的剪切模量影响, 因而导致应变传递率在 40 °C 以后开始下降。

本文试验在剔除温度对波长影响的前提下, 分析得出应变传递率的差异主要是由于温度对胶黏剂剪切模量影响造成的, 进而影响应变传递率的大小。因此, 通过试验可以确定不同温度下胶黏剂的剪切模量不同, 导致不同温度下标定试验计算出的应变传递率出现差异。

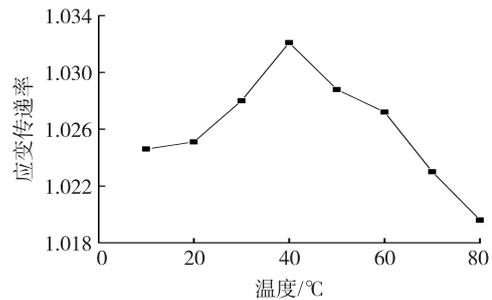


图 6 应变传递率随温度变化曲线

### 3 结论

本文从 FBG 传感器温度传感原理出发, 分析温度光纤光栅性应变传递的影响机理, 通过不同温度下的等强度梁标定试验, 发现了胶黏剂剪切模量随温度变化的现象, 进而解决了不同温度下应变传递率不同的问题。

由于胶粘剂在不同温度下的剪切模量不同, 而胶粘剂的剪切模量对 FBG 传感器应变传递率影响较大, 导致不同温度下的 FBG 传感器进行标定结果不一致, 所以, 在不同温度下进行标定确定的应变传递率需要进行与室温等某一温度标准参考计算, 以确保试验结果的准确性。同时, 根据试验数据分析, 应变传递率的变化趋势随温度为先上升后下降, 温度超过 40 °C 后, 在其他条件不变前提下, 应变传递率随温度的升高而降低, 与胶黏剂的剪切模量随温度的升高而降低的趋势大致吻合。因此, 对于高精度量测应变时使用等强度梁进行标定, 需要考虑温度对应变传递率的影响, 建议根据试验的温度, 进行相应的标定, 确保实验结果准确。

#### 参考文献:

- [1] 施令飞, 洪成雨, 魏显虎, 等. 新型岩土工程 FBG 测斜传感器的开发与验证[J]. 传感技术学报, 2019, 32(4): 485-490, 507.
- [2] Leung C K Y, Wan K T, Inaudi D, et al. Review: Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications [J]. Materials and Structures, 2015, 48(4): 871-906.
- [3] Lopez-Higuera J M, Cobo L R, Incera A Q, et al. Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(4): 587-608.

- [4] 郭婷,惠小强. FBG 传感对应变温度及湿度的同时测量[J]. 压电与声光,2013,35(1):43-46.
- [5] 章征林,王源,孙阳阳,等. 胶粘剂对表贴式 FBG 传感器应变传递系数的影响[J]. 复合材料学报,2016,33(11):2537-2542.
- [6] 刘明尧,季冬亮,肖爽,等. 胶黏剂黏弹性对粘贴式 FBG 应变传递的影响[J]. 光学精密工程,2016,24(6):1307-1318.
- [7] 曾鹏,王源,陈飞琼,等. 胶粘剂对表贴式聚酰亚胺光纤布拉格光栅应变传递的影响分析[J]. 传感技术学报,2019,32(1):43-49.
- [8] 赵鹏冲,段建立,孙阳阳,等. 光栅粘贴长度对应变传递影响的实验研究[J]. 压电与声光,2016,38(2):250-252,256.
- [9] 贾振安,乔学光,傅海威. 光纤光栅温度灵敏度系数研究[J]. 光电子·激光,2003(5):453-456.
- [10] 王鹏,赵洪,刘杰,等. 光纤光栅无应力毛细铜管封装及温度特性实验[J]. 光电子·激光,2012,23(3):434-438.
- [11] 申昊文,朱萍玉,许沛胜,等. 基底刻槽封装式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析[J]. 仪表技术与传感器,2015(2):96-99.
- [12] 孙丽,岳川云,宋岩升. 基片式光纤布拉格光栅传感器应变传递分析[J]. 光电子·激光,2013,24(5):849-854.
- [13] 王花平,周智,刘婉秋,等. 柔性基体材料封装 FBG 传感器的应变传递误差分析[J]. 传感技术学报,2015,28(4):492-497.
- [14] 孙阳阳,王源,章征林,等. 表面粘贴式光纤布拉格光栅应变传递规律分析与实验研究[J]. 功能材料,2016,47(7):7046-7050,7055.
- [15] 秦建彬,张广成,李建通,等. 胶粘剂剪切模量的测试方法研究[J]. 粘接,2017,38(1):38-41.



陈阳(1990—),男,2014年于原解放军理工大学获得学士学位,现为陆军工程大学硕士研究生,主要研究方向为光纤传感监测与结构损伤识别方面的研究;



郭杰(1982—),男,通讯作者,安徽灵璧人,博士,陆军工程大学副教授,主要从事战场信息感知领域的教学与科研工作。