

文章编号:1001-4888(2021)03-0359-08

## 多电极 CFRP-OFBG 传感筋的力学性能 和传感特性试验研究<sup>\*</sup>

刘 聃<sup>1,2</sup>, 刘荣桂<sup>1,3</sup>, 张邵峰<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏镇江 212013; 2. 金陵科技学院 建筑工程学院, 江苏南京 211169;

3. 南通理工学院 建筑工程学院, 江苏南通 226002)

**摘要:**为探索 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic,碳纤维增强复合材料)筋的线性度、重复性、灵敏度等传感特性,采用 CFRP 筋表面开槽后嵌入 OFBG(Optical Fiber Bragg Grating,光纤布拉格光栅传感器)的封装方法,通过静力拉伸试验和等幅循环拉伸试验分析对比了由 OFBG 所测应变与 CFRP 筋的电阻变化率间的对应关系,并实现了对 CFRP 筋传感特性的校准与标定。本文试验采用的 OFBG 封装方法对 CFRP 筋力学性能的不利影响很小,且未改变 OFBG 的应变传感特性;CFRP-OFBG 传感筋在  $0\sim 5000\mu\epsilon$  应变区间内,所测 CFRP 筋的电阻变化率与 OFBG 应变满足线性关系,CFRP 筋的应变传感灵敏度系数为 26.71,线性可决系数大于 0.97;在等幅循环拉伸试验中,CFRP 筋的电阻变化率与 OFBG 所测应变的变化趋势一一对应。OFBG 的标定试验表明,CFRP 筋可独立实现高可靠性、高灵敏度、可重复的应变自感知功能。

**关键词:** CFRP 筋; 光纤光栅传感器; 力学性能; 传感特性; 应变自感知

**中图分类号:** TB381 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-080

### 0 引言

复合材料通常作为大型工程中重要的结构承载部件,其服役的健康状态是保障结构在生命周期中安全性、可靠性、稳定性的重要因素<sup>[1]</sup>。针对当前复合材料健康监测方法中设备操作复杂<sup>[2]</sup>、测试周期长<sup>[3]</sup>、难以实现全场域、全时域连续监测<sup>[4]</sup>、埋设传感器会破坏原有结构整体性<sup>[5]</sup>等缺点,如何建立围绕碳纤维复合材料自感知特性精确、可靠、便捷、实时的监测体系成为近期研究的热点问题<sup>[6,7]</sup>。

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic,碳纤维增强复合材料)具有自重轻、强度高、耐疲劳等力学特性<sup>[8]</sup>,常被用作拉索等形式核心承力构件。在实际结构设计和工程应用中,CFRP 索由于质轻特性易受风振效应影响,在服役过程中容易出现结构损伤、性能劣化等问题,因此当前迫切需要一种稳定、高精度的在线传感测试技术为此类轻质高强复合材料在工程中的安全应用保驾护航。利用 CFRP 自身的导电特性,还可以实现较高灵敏度、高精度的应变自感知功能<sup>[9]</sup>。Yang 等<sup>[10]</sup>研究了 CFRP 层的力阻效应行为,试验结果表明:在  $200\sim 5000\mu\epsilon$  范围内,CFRP 的电阻变化率与应变之间呈现稳定的线性关系,且应变灵敏度范围为  $1.89\sim 3.37$ 。目前的研究中,大都以 CFRP 材料整体作为传感元件<sup>[11]</sup>,尚不能获得材料某一特定局部区域的状态特征,且对其传感特性的准确性和稳定性仍缺乏系统性评估。

在已有研究的基础上,充分利用 OFBG(Optical Fiber Bragg Grating,光纤布拉格光栅传感器)抗干

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478209, 51508235);南通市科技计划资助项目(JC2019064)

通信作者: 刘荣桂(1957—),男,博士,教授,博导,主要从事功能复合材料、预应力结构耐久性研究。Email:liurg@ujs.edu.cn

刘聃(1988—),男,博士,讲师,主要从事功能复合材料与预应力结构研究。Email:LiuD4539@163.com

扰、实时性好、可分布测量的优点<sup>[12]</sup>,本文开展试验探索 OFBG 在 CFRP 筋中的封装技术和应变传感特性,以实现 CFRP 筋分布式应变自感知特性关键参数测量和标定。首先,集成结构稳固、协同变形的 CFRP-OFBG 元件;其次,依据传感筋结构功能上的需求,合理设置铜箔电极,形成多电极 CFRP-OFBG 组合传感筋;最后,对其力学性能和传感特性展开试验和评估。

## 1 试验概况

### 1.1 CFRP 筋原材料

CFRP 筋的主要原材料为 HF10-3K 型碳纤维原丝与环氧树脂。本文采用的 CFRP 筋文献[13]中锔挤工艺制备而成,前期研究成果<sup>[13]</sup>表明 CFRP 筋具有较高的力学性能和稳定的传感性能。CFRP 筋的关键特征参数参见表 1。

表 1 CFRP 筋的关键特征参数  
Tab. 1 The key characteristic parameters of CFRP bars

| 种类      | 筋材直径/mm | 极限抗拉强度/MPa | 纤维质量分数/% | 电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ) |
|---------|---------|------------|----------|--------------------------------------|
| HF10-3K | 8       | 1915       | 63.4     | 5.43                                 |

为了对 CFRP 筋传感特性进行标定,OFBG 选取的技术参数如表 2 所示。

表 2 OFBG 的技术参数指标  
Tab. 2 Technical specifications of OFBG

| 名称   | 反射谱中心波长/nm | 传输谱中心波长/nm | 脉冲半高宽/nm | 反射率/%  |
|------|------------|------------|----------|--------|
| OFBG | 1450~1600  | 1450~1600  | 0.22     | 83.745 |

### 1.2 多电极 CFRP-OFBG 传感筋试件制备

本文采用全面粘贴方式将 OFBG 应变传感器封装于 CFRP 筋内部形成结构稳固、协同变形的 CFRP-OFBG 功能传感筋。一方面,CFRP 筋的封装很好地保护了在复杂应力状态下极易损坏的光纤元件;另一方面,可以利用 OFBG 的实时应变监测数据对 CFRP 筋的应变自感知特性进行校准标定。CFRP 筋与 OFBG 须满足协同变形的封装技术要求,才能实现精确校准功能。

CFRP-OFBG 传感筋制备流程如下:

(1) 端部电极制作:截取 50cm 长的 CFRP 筋,将筋材端部平面用砂纸打磨,用酒精擦除碎屑,用导电银浆将焊有导线的电极粘贴于筋材端部,常温养护 2d。在两端均匀涂抹 3~5mm 厚的环氧树脂层以保护端部电极。

(2) 布设光纤:从光纤端部穿入橡胶套保护管,长度不能超过光栅测点。再穿入保护光纤和 CFRP 筋端部电极的气动软管。将锚具间裸露的 CFRP 筋按 6cm 长划分为五个区间(参见图 1(i)),在 CFRP 筋上 A、B、C 三个区间的中点用记号笔标记,分别对应 OFBG 的三个测点,记为:A#、B#、C#测点。对齐第一个测点后用 502 胶水将光纤一端固定,绷紧光纤,对齐测点,使光纤处于 CFRP 筋的预留槽内,再用 502 胶水固定光纤另一端。将 CFRP 筋表面预留槽均匀涂刷环氧树脂,在其表面覆盖与预留槽同长、经环氧树脂浸润后的 CFRP 片层保护光纤。在光纤引出端口覆盖、固定橡胶套管,再覆盖气动管。待树脂初步凝固后,置于恒温箱中进行养护,具体流程参见图 1(a)~(h)。

(3) 中部电极制作:树脂固化完成后,在 CFRP 筋中部类似于步骤(1)布置 A、B、C 区间铜箔电极,如图 1(i)所示。

(4) 粘贴应变片:在光纤光栅测点处 CFRP 筋的表面粘贴应变片,获得该测点处 CFRP 筋的应变变化。

(5) 加设锚具:为了防止万能材料试验机(MTS)夹头的夹持力破坏 CFRP-OFBG 筋,在筋材的两端分别制作了如图 2 所示的内锥式黏结型锚具。将 Lica-300 植筋环氧树脂与粒径为 0.5~1mm 的石英砂按 2:1 的质量比均匀混合,得到混合胶凝材料。采用文献[14]中的灌胶方法,将胶凝材料均匀填满锚具和传感筋之间的空隙。灌胶完成后的试件需在室温条件下常规养护 14d。

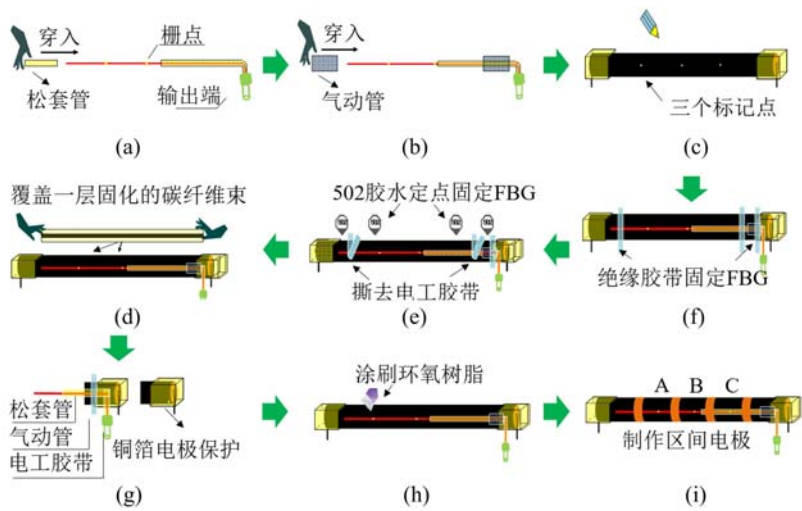


图 1 CFRP-OFBG 传感筋制作过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CFRP-OFBG manufacturing process

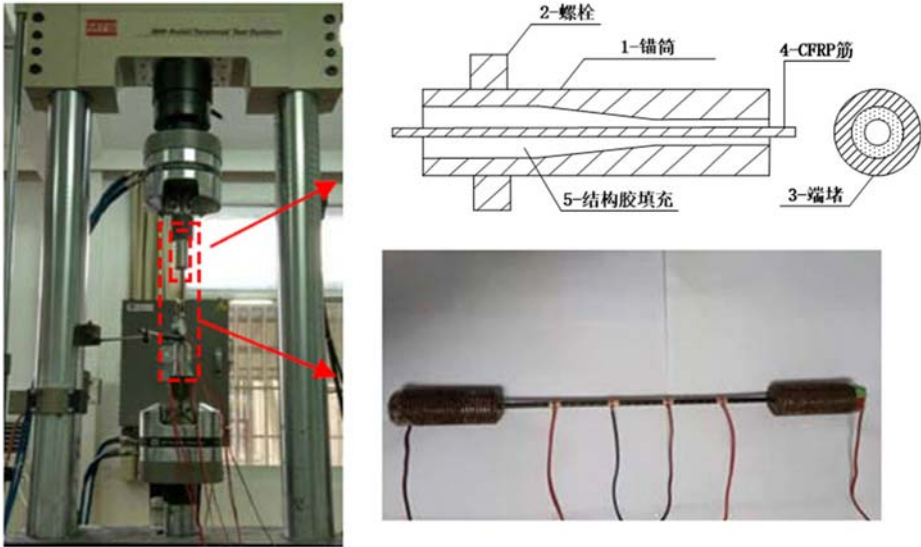


图 2 CFRP-OFBG 传感筋与万能材料试验机

Fig. 2 CFRP-OFBG sensing bar and universal material testing machine

1.3 试验设备与试验方法

静力拉伸试验,使用 MTS 试验机,取 CFRP 筋抗拉强度试验值的 20%、40%、60%、80%分段匀速加载,荷载增速保持 100MPa/min。前三阶段加载完成后持荷 15min;当荷载接近抗拉强度标准值的 80%时,试验机持荷 30min,再加载至筋材完全损坏。CFRP 筋在试验中实时的伸长量由千分表引伸计测得。

采用位移控制模式,分别对各组试件进行等幅循环拉伸加载试验,筋材的最大伸长量控制值为 1%。在等幅拉伸试验开始前,对 CFRP 筋进行预张拉,预张拉应变控制值应小于 CFRP 筋极限应变值的 5%,本试验中取为 0.08%。加载和卸载过程均采用位移控制模式,MTS 夹头速率始终保持为 1mm/min。

测试电路选用四电极法,采用恒流源通过试件端部的电极给 CFRP-OFBG 筋供电,额定的电流为 400mA。使用本课题组研制和改进的 CFRP TEST SYSTEM 电压自动采集系统,测得筋材 A、B、C 区间相邻电极间的实时电压差值变化。电压自动采集系统的电压测量范围为 0~10V,测试精度为  $\pm 0.1\%$  FSR,分辨率为 12 位。

试验中使用光纤光栅解调仪周期性实时采集 OFBG 波长变化。试验主要仪器及试件设置见图 3。

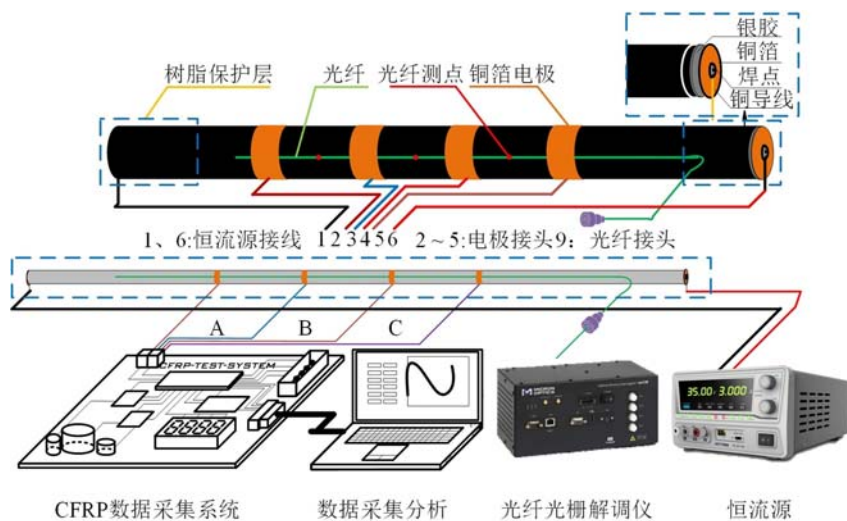


图 3 CFRP-OFBG 传感筋电极设置与测试系统

Fig. 3 The electrode setting and testing system of CFRP-OFBG sensing bar

## 2 结果与讨论

### 2.1 CFRP-OFBG 传感筋的力学性能

根据静力拉伸试验的结果,绘制三组 CFRP-OFBG 传感筋的应力-应变曲线,如图 4 所示。图中:1#筋为开槽但未粘贴 OFBG,2#筋为开槽且按 1.2 节中步骤(2)制作的试件,3#筋为表面未开槽试件。

由图 4 可知,CFRP-OFBG 筋的抗拉强度最高可达 1915MPa,三组试件的应力-应变关系趋近于线性关系,1#筋、2#筋、3#筋的线性拟合可决系数分别为 0.9916、0.9887、0.9772,且三者斜率的均值绝对偏差都在 3%~6% 范围内。上述结果表明本试验中 OFBG 的粘贴方法对 CFRP 筋力学性能的不利影响很小。

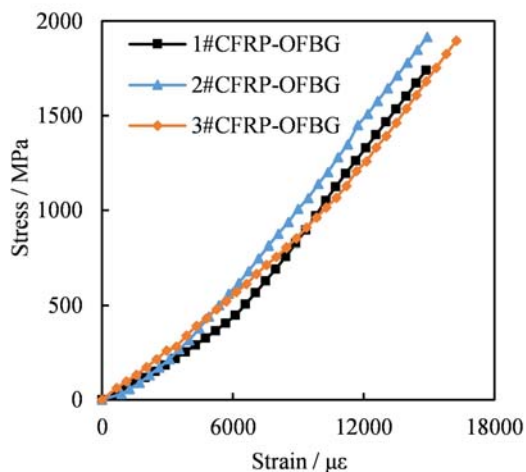


图 4 CFRP-OFBG 传感筋的应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain relationship curve of CFRP-OFBG sensing bars

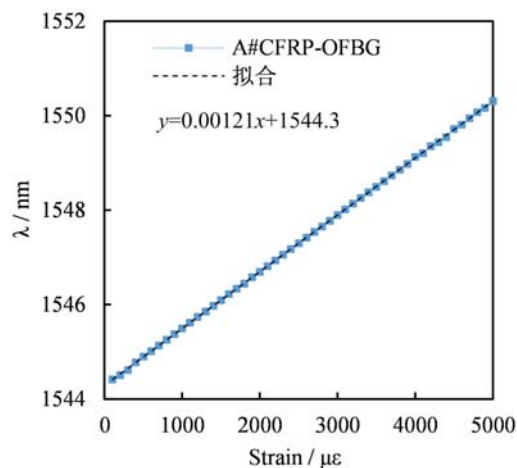


图 5 A#测点应变与光纤波长对应关系

Fig. 5 Correspondence between strain and wavelength at measuring point A#

## 2.2 CFRP-OFBG 传感筋中光纤的应变感知特性

将在试件测点处应变片实测应变值与光纤光栅解调仪所测波长变化进行比对分析,结果参见图 5~图 7。由图 5~图 7 可知,在  $0\sim 5000\mu\epsilon$  范围内,OFBG 中 A#、B#、C# 测点的应变与波长呈良好的线性关系;线性拟合可决系数均在 0.998 以上;图中线性拟合表达式中自变量前的系数值为应变灵敏度,故 A#、B#、C# 测点的应变灵敏度分别为  $1.21\text{pm}/\mu\epsilon$ 、 $1.19\text{pm}/\mu\epsilon$ 、 $1.21\text{pm}/\mu\epsilon$ ,与 OFBG 的理论灵敏度  $1.2\text{pm}/\mu\epsilon$ <sup>[15]</sup> 非常接近,表明采用本文试验中的光纤封装方法未改变 OFBG 的应变传感特性。这一微小误差产生的原因可能是由应变片测量误差导致,也可能是光纤解调仪和应变仪数据测量时间的微小不同步而引起的。由本试验实测数据可知,光纤测量应变量程范围为  $7000\sim 11000\mu\epsilon$ 。

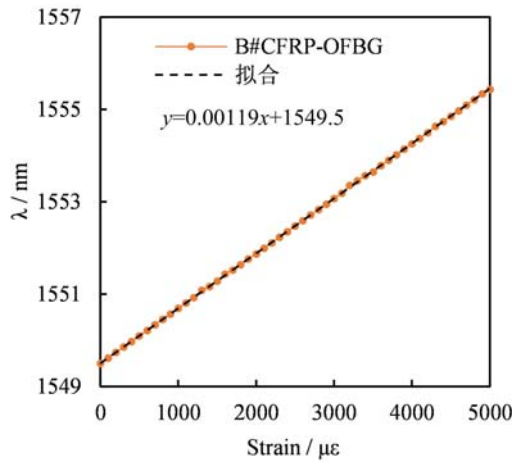


图 6 B# 测点应变与光纤波长对应关系

Fig. 6 Correspondence between strain and wavelength at measuring point B#

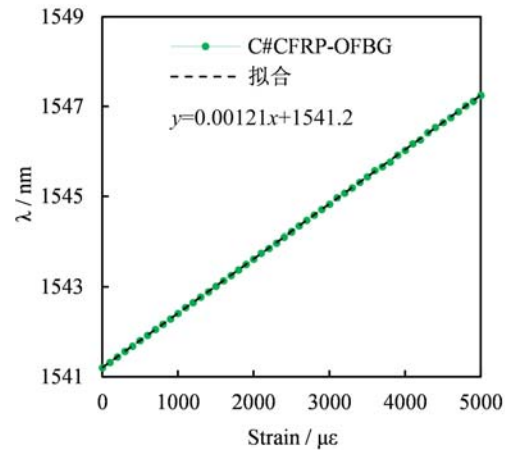


图 7 C# 测点应变与光纤波长对应关系

Fig. 7 Correspondence between strain and wavelength at measuring point C#

## 2.3 CFRP-OFBG 传感筋中 CFRP 筋的自感知特性

根据试验测试结果,绘制 CFRP-OFBG 筋 A、B、C 区间的电阻变化率-应变关系曲线,如图 8 所示。图中电阻变化率( $\Delta R/R_0$ )由四电极法测得,应变( $\epsilon$ )则由 OFBG 的 A#、B#、C# 测点测得。

由图 8 可知,A、B、C 三组关系曲线规律具有较好的一致性,根据每条曲线上斜率发生明显变化的两个拐点可将曲线划分为:“Ⅰ”、“Ⅱ”、“Ⅲ”三个阶段。

(1) “Ⅰ”阶段内 CFRP 筋的应变小于  $5000\mu\epsilon$ ,组合筋的  $\Delta R/R_0$  小于 14%。此阶段电阻变化率与应变关系表现为近似线性,CFRP 筋内部纤维未出现断裂情形。

(2) 外荷载继续增长,曲线进入“Ⅱ”阶段,对应的应变范围为  $5000\sim 12000\mu\epsilon$ ,此阶段的电阻变化率增幅明显降低。CFRP 筋经过“Ⅰ”阶段的拉伸作用,内部卷曲纤维均已被拉直,内部导电网络连接趋于稳定,由纤维间接触点变化引起的 CFRP 筋电阻值变化幅度骤减。“Ⅱ”阶段电阻值的改变主要是由纤维受拉变形产生“力阻效应”引起的,而此部分阻值的大小相比于“Ⅰ”阶段的接触电阻值要小很多,故“Ⅱ”阶段内电阻变化率曲线的增长幅度大大降低。

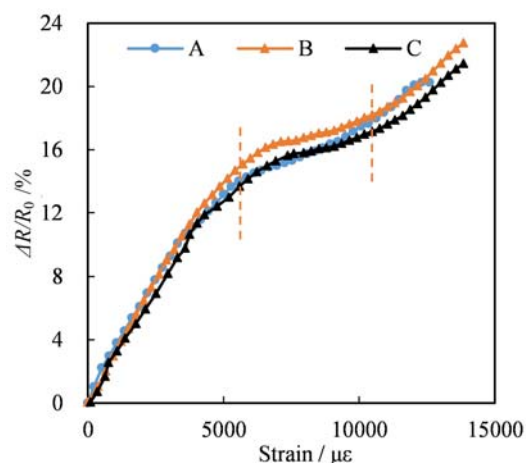


图 8 试件 A、B、C 区间电阻变化率-应变关系曲线

Fig. 8 Resistance change rate-strain relationship curves for section A, B and C

(3) “Ⅲ”阶段属于碳纤维极限应变阶段,筋材的应变值均超过  $12000\mu\epsilon$ 。在外荷载作用下,CFRP 筋内的部分纤维因拉伸应力峰值超过其抗拉强度值时,局部纤维发生断裂,这直接破坏了 CFRP 筋内部的导电网络,所测阻值会发生越阶变化。在电阻变化率曲线上具体表现为电阻率突增以及出现异常跳跃的奇点。

取“Ⅰ”阶段的电阻变化率与应变进行线性拟合,结果如图 9 所示。A、B、C 区间对应的灵敏度系数分别为 26.71、29.32、27.48,线性拟合可决系数均大于 0.97,表明在“Ⅰ”阶段内电阻变化率与应变间表现为良好的线性关系。依据这一线性关系,通过电阻变化率数值可换算出 CFRP 筋的实时应变值。由此可以看出,CFRP 筋的电阻变化率可通过光纤所测得的筋材应变进行标定校准。

图 10 为“Ⅱ”阶段范围内 CFRP 筋的电阻变化率与应变线性拟合关系,A、B、C 区间对应的灵敏度系数分别为 7.33、6.47、7.16,可决系数分别为 0.9906、0.9425、0.9280。上述结果表明 CFRP-OFBG 筋在“Ⅱ”阶段的电阻变化率与应变仍为线性关系,但与第“Ⅰ”阶段相比,灵敏度均值降低了 25%,且部分试验结果表现出更大的离散性。主要原因是在“Ⅱ”阶段组合筋因受力增大而发生较大变形,这一方面改变了 CFRP 之间导电接触点的数量和分布,另一方面降低了 CFRP 与 OFBG 间的有效应变传递效率。此外,OFBG 在“Ⅱ”阶段末处已接近其应变监测极限值,对复合筋材应变监测的稳定性和精确性均产生了不利影响。

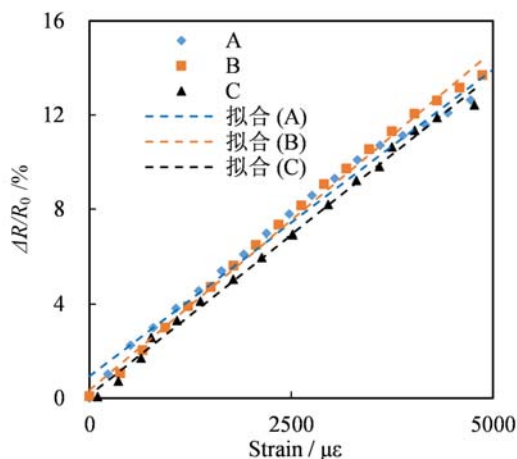


图 9 试件 A、B、C 区间在第Ⅰ阶段内的电阻变化率-应变拟合

Fig. 9 Fitting results for resistance change rate-strain relationship during the I stage

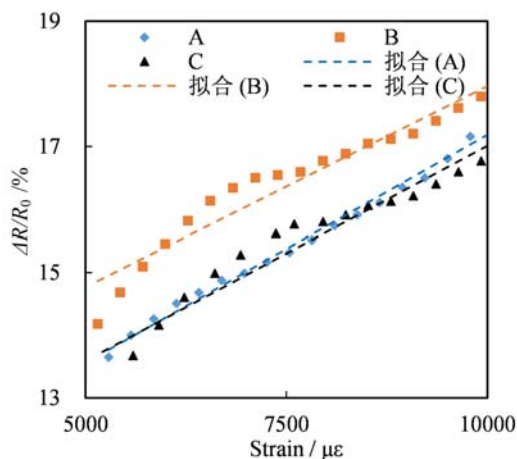


图 10 试件 A、B、C 区间在第Ⅱ阶段内的电阻变化率-应变拟合

Fig. 10 Fitting results for resistance change rate-strain relationship during the II stage

#### 2.4 CFRP-OFBG 传感筋在循环荷载作用下的应变感知特性

图 11 是在等幅循环拉伸荷载下 CFRP-OFBG 传感筋第 11 次~第 15 次(从预张拉完成后开始,一次加载-卸载过程记为 1 次循环加载)循环加载的电阻变化率与应变关系曲线。图中曲线在每个循环周期内保持一致,表明 CFRP-OFBG 传感筋的导电性能稳定,且随着荷载增减同步变化。在每个循环结束时,应变恢复为零,电阻响应与筋应变规律同步性较好。每组试件分别经历了 50 个循环周期,试验结果表明在有限次数的循环加载过程中,CFRP-OFBG 传感筋仍能稳定保持图 11 所示的电阻响应规律。

拉伸荷载使 CFRP 筋产生变形,CFRP 纤维间原本相互搭接的纤维被分隔开,内部形成的导电连接减少,传感筋的电阻值因此而增大。在卸载过程中,CFRP 筋的弹性变形逐渐复原,内部纤维接触点重新搭接形成导电通路,电阻值减小。当 MTS 试验机的荷载每次归零时,CFRP-OFBG 传感筋的应变均恢复为零,电阻变化率均恢复为 5.06%,表明 CFRP 筋内部纤维并没有发生不可逆损伤,树脂基体变形均在弹性范围之内,二者接触界面未产生裂纹。

由图 11 中电阻变化率随时间响应曲线可知,CFRP-OFBG 传感筋的电阻变化输出量几乎无漂移、

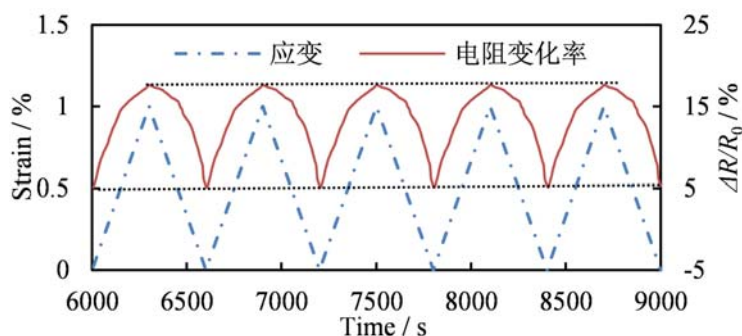


图 11 等幅循环加载试验中的电阻变化响应

Fig. 11 Resistance change response in cyclic loading test with constant strain amplitude

几乎无噪声,且相互偏离程度小,表明 CFRP 筋的自感知性能具有可重复性和稳定可靠性。

### 3 结论

(1) CFRP-OFBG 传感筋的应力-应变关系趋近于线性关系,本试验采取的 OFBG 粘贴方法对 CFRP 筋力学性能无明显影响。

(2) 将 OFBG 封装于 CFRP 筋的方法未改变 OFBG 的应变传感特性,因此可用 OFBG 对 CFRP 传感性能进行校准与标定。

(3) CFRP 筋的电阻变化率与 OFBG 所测应变之间表现出良好的线性关系,CFRP 作为传感筋的灵敏度系数为 26.71,线性拟合可决系数大于 0.97。

(4) 在等幅循环拉伸试验中,CFRP 筋电阻变化与 OFBG 所测应变变化趋势一致,表明 CFRP 筋的自感知性能具有可重复性、高可靠性。

#### 参考文献:

- [1] Grassia L, Iannone M, Califano A, et al. Strain based method for monitoring the health state of composite structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 176:107253.
- [2] Zhao L, Kang L, Yao S. Research and application of acoustic emission signal processing technology[J]. IEEE Access, 2018, 7:984—993.
- [3] Bao Y, Chen Z, Wei S, et al. The state of the art of data science and engineering in structural health monitoring [J]. Engineering, 2019, 5(2):234—242.
- [4] Aygun L E, Kumar V, Weaver C, et al. Large-area resistive strain sensing sheet for structural health monitoring [J]. Sensors, 2020, 20(5):1386.
- [5] Rausch J, Salun L, Griesheimer S, et al. Printed resistive strain sensors for monitoring of light-weight structures [C]//International Society for Optics and Photonics, 2011, 7982:79820H.
- [6] Sony S, Laventure S, Sadhu A. A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(3):e2321.
- [7] Alsaadi A, Meredith J, Swait T, et al. Structural health monitoring for woven fabric CFRP laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 174:107048.
- [8] Xie G H, Yan P, Sun Y, et al. Fatigue performance of anchorage for CFRP tendons affected by water infiltration [J]. Construction and Building Materials, 2021, 269:121359.
- [9] Kalashnyk N, Faulques E, Schjødt-Thomsen J, et al. Monitoring self-sensing damage of multiple carbon fiber composites using piezoresistivity[J]. Synthetic Metals, 2017, 224:56—62.
- [10] Yang C Q, Wang X L, Jiao Y J, et al. Linear strain sensing performance of continuous high strength carbon fibre reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 102:86—93.
- [11] Hannemann B, Backe S, Schmeer S, et al. Hybridisation of CFRP by the use of continuous metal fibres (MCFRP) for damage tolerant and electrically conductive lightweight structures[J]. Composite structures, 2017,

- 172;374—382.
- [12] 王亿桦, 周震寰, 李建乐, 等. 分布式光纤传感器测量数据可靠性分析方法[J]. 实验力学, 2021, 36(1):62—68 (WANG Yihua, ZHOU Zhenhuan, LI Jianle, et al. Reliability analysis method of measurement data for distributed optical fiber sensors[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(1):62—68 (in Chinese))
- [13] Yin J, Liu R G, Huang J J, et al. CoMParative study on piezoresistive properties of CFRP tendons prepared by two different methods[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 129:124—132.
- [14] 谢桂华, 冯倩红, 唐永生, 等. CFRP 筋粘结型锚具的疲劳损伤模型[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(5):603—607 (XIE Guihua, FENG Qianhong, TANG Yongsheng, et al. A fatigue damage model of CFRP tendon bonded anchors [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2019, 40(5):603—607 (in Chinese))
- [15] 锁刘佳, 雷振坤, 渠晓溪, 等. 一种基于动态参考瑞利散射谱的分布式光纤大应变解调方法[J]. 实验力学, 2019, 34(5):729—738 (SUO Liujia, LEI Zhenkun, QU Xiaoxi, et al. A large strain demodulation method based on dynamic reference Rayleigh backscattering spectrum in distributed optical fiber strain measurement [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5):729—738 (in Chinese))

## Study on mechanical properties and sensing properties of multi-electrode CFRP-OFBG sensing bars

LIU Dan<sup>1,2</sup>, LIU Ronggui<sup>1,3</sup>, ZHANG Shaofeng<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; 2. Architectural Engineering Institute, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, Jiangsu, China; 3. College of Architectural Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 212013, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to explore the linearity, repeatability and sensitivity of Carbon Fiber Reinforced Plastic bars (CFRP bars), embedding Optical Fiber Bragg Grating (OFBG) on the surface of CFRP bars, through static tensile test and constant amplitude cyclic tensile test, the relationship between the strain measured by OFBG and the resistance change rate of CFRP bars was analyzed and compared. And the sensing characteristics of CFRP bars are calibrated. The results show that the fiber packaging method has little effect on the mechanical properties of CFRP bars and does not change the strain sensing characteristics of OFBG. In the  $0 \sim 5000 \mu\epsilon$  strain range of CFRP-OFBG bars, the resistance change rate of CFRP bars is linear with the OFBG strain. The strain sensing sensitivity coefficient of CFRP bars is 26.71, and the linear determinable coefficient is greater than 0.97. And the changing trend between resistance change rate of CFRP bars and strain measured by OFBG is consistent in the constant amplitude cyclic tensile test. In a word, CFRP bars can achieve high reliability, repeatability and high sensitivity of strain self-sensing performance.

**Keywords:** CFRP bars; OFBG; mechanical properties; sensing performance; strain self-sensing