

激光与光电子学进展

光纤布拉格光栅耦合方式对单向 CFRP 板
传感特性的影响苗冰杰¹, 罗仕刚^{1*}, 王春红², 宋少波¹, 何劲¹¹卡本科技集团股份有限公司产品开发部, 天津 300383;²天津工业大学纺织科学与工程学院, 天津 300387

摘要 光纤布拉格光栅(FBG)在单向复合材料高应力变化和长期服役过程中的精准监测对于预应力碳纤维复合材料(CFRP)板的应用具有重要意义。将FBG传感器分别采用外贴裸栅、外贴基片和内嵌裸栅的形式与CFRP板进行耦合,测试了三种耦合方式对于温度的感知精度,并基于预应力CFRP板加固系统监测其分级加载至1000 MPa过程中应力的变化。实验结果表明,三种耦合方式均有较好的温度传感特性,但应力传感特性与温度传感特性存在明显差异。其中,内嵌裸栅式传感器的监测精度最高,其应力传感的线性度、迟滞性和重复性分别为0.9999、0.25%和3.20%,可应用于预应力CFRP板的加固工程。

关键词 传感器; 复合材料; 光纤布拉格光栅; 结构健康监测; 工程加固

中图分类号 TP212.9 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220689

Influence of Fiber Bragg Grating Coupling Mode on Sensing
Characteristics of Unidirectional CFRP PlateMiao Bingjie¹, Luo Shigang^{1*}, Wang Chunhong², Song Shaobo¹, He Jin¹¹Product Development Department, Carbon Technology Group Co., Ltd., Tianjin 300383, China;²College of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China

Abstract The accurate monitoring of fiber Bragg gratings (FBG) during high stress changes and long-term service of unidirectional composites is important for the application of prestressed carbon fiber composite (CFRP) plate. The coupling of external-mounted bare-gate, externally-mounted substrate, and embedded bare-gate FBG sensors with CFRP plate is tested for the temperature sensing accuracy of the three coupling methods, and the process of stress loading up to 1000 MPa is monitored based on the prestressed CFRP plate reinforcement system. The experimental results show that all three coupling methods have good temperature sensing characteristics, but the stress sensing characteristics are significantly different from the temperature sensing characteristics. Among them, the embedded bare-gate sensor has the highest monitoring accuracy, and the linearity, hysteresis, and repeatability of its stress sensing are 0.9999, 0.25%, and 3.20% respectively, which can be applied to the reinforcement engineering of prestressed CFRP plate.

Key words sensors; composite material; fiber Bragg grating; structural health monitoring; engineering reinforcement

1 引言

预应力碳纤维板加固系统充分发挥了碳纤维复合材料(CFRP)优异的抗拉性能,具有减少既有裂缝宽度、提高桥梁承载力等优点,被广泛应用于桥梁、工民建等领域的结构加固中^[1-2]。随着预应力碳纤维板加固系统在建筑加固行业的应用逐渐增加,施工过程不

规范、CFRP成型过程不稳定以及锚固效率低等原因造成的CFRP板劈裂、分层甚至爆炸式破坏现象也与日俱增^[3-4]。为避免CFRP在工程应用中的潜在安全威胁,开展对复合材料构件服役过程中的实时监测具有重要意义。

先进的传感元件是实现复合材料构件健康状况精准监测的基础。与传统基于电学原理的传感体系相

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-02-25; 录用日期: 2022-03-03; 网络首发日期: 2022-03-13

基金项目: 先进纺织复合材料教育部重点实验室开放基金(MATC-2021-006)

通信作者: *luoshigang@whut.edu.cn

比, 光纤布拉格光栅(FBG)传感技术具有不受电磁干扰、抗化学腐蚀能力强和灵敏度高优点^[5-7], 成为现代建筑结构在线监测以及安全性评估的重要技术手段之一^[8-10]。此外, FBG 传感器与树脂基体的耦合性较好, 用其对温度和应变传感的特性监测复合材料的固化过程^[11-12]和应用状态^[13-14]已成为当下的研究热点。如: 郭永兴等^[15]基于 6 N 的循环载荷对比了传感器在全粘贴封装和两点粘贴封装工艺下的传感特性, 发现两者具有较好的抗蠕变能力和一致性, 且两点粘贴封装工艺下传感器具有最优的自差分补偿效果; 曾泽颖等^[16]将 FBG 传感器埋入刻有长槽的预应力 CFRP 板中进行封装, 应变标定实验结果表明, 该耦合工艺下传感器具有较好的线性度; 任鹏飞^[17]将 FBG 传感器直接粘贴在预应力碳纤维板上用于监测 190 kN 的高载荷张拉过程, 但粘贴方法以及整体锚固系统带来的误差导致监测数据比实际张拉力减少了 6.3%。

对于预应力 CFRP 板而言, FBG 传感器与其耦合的应变传递理论以及传感特性的研究较少, 导致 FBG 传感技术在预应力 CFRP 板加固既有建筑领域的应用进程缓慢。因此, 本文以预应力 CFRP 板为应用背景, 采用三种方式将 FBG 传感器与拉挤成型单向 CFRP 板相耦合, 通过分析耦合后传感器的温度监测精度以及 1000 MPa 循环加载下的应力监测精度寻求一种最优的耦合方式, 并为 FBG 传感器在预应力 CFRP 板中的应用提供理论基础。

2 实验原理

2.1 FBG 传感器监测 CFRP 板的原理

FBG 传感器是用紫外光对单模掺锗光纤进行照射后, 利用成栅技术在光纤上形成一种纤芯折射率呈周期性变化的相位光栅。当带宽光源入射 FBG 传感器时, 特定波长的光在栅点处发生反射, 其反射波长^[18]满足

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

式中: λ_B 为反射光的波长; n_{eff} 为纤芯有效折射率; Λ 为光栅周期。可以发现, 当 FBG 传感器发生温度或应变的变化时, 纤芯有效折射率 n_{eff} 、光栅周期 Λ 以及 FBG 传感器的反射和透射光谱会发生变化, 进而导致 FBG 反射光谱的中心波长产生偏移 $\Delta\lambda_B$, 可表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\epsilon + \lambda_B(\xi + \alpha_f)\Delta T = K_e\epsilon + K_T\Delta T, \quad (2)$$

式中: P_e 为有效弹光系数; ϵ 为应变变化量; ξ 、 α_f 分别为光纤的热膨胀系数、热光系数; ΔT 为温度变化量; K_e 和 K_T 分别为 FBG 传感器的应变灵敏系数和温度灵敏系数。FBG 传感器与 CFRP 板通过合理的封装方式相耦合后, CFRP 板受外界变化引起的应变会实时传递至栅点处, 引起 FBG 中心波长的偏移, 应变传递效率直接决定了传感的灵敏度以及整体监测的

精度^[19]。

2.2 试样制备

三种耦合工艺的原理如图 1 所示。外贴裸栅式 FBG 传感器对光纤施加张力使光纤与 CFRP 板中碳纤维方向平行后, 采用丙烯酸树脂胶黏剂将光纤布拉格光栅的两端进行封锚, 如图 1(a) 所示。外贴基片式如不锈钢金属基片 FBG 传感器采用挤压和胶黏剂协同作用将光纤固定在金属基片上, 将树脂胶黏剂涂覆至金属基片两端后, 按压在碳板上并待胶黏剂固化后卸压, 如图 1(b) 所示。内嵌裸栅式 FBG 传感器在 CFRP 板的生产过程中将光纤与碳纤维原丝同步引入模具中, 使光纤被包覆在 CFRP 板中, 并将其任意一端光纤剥离出来用于数据传输, 如图 1(c) 所示。进行温度标定(实验 1)、循环加载(实验 2)以及静载监测(实验 3)的三组样品编号方式如表 1 所示。其中: T-1、T-2 和 T-3 试样所用 FBG 的中心波长分别为 1540.126 nm、1533.801 nm 和 1554.325 nm; L-1、L-2 和 L-3 试样所用 FBG 的中心波长分别为 1540.011 nm、1531.558 nm 和 1537.156 nm; K-1、K-2 和 K-3 试样所用 FBG 的中心波长分别为 1539.821 nm、1531.892 nm 和 1529.964 nm。这些数据均在温度为 25 °C、零应变

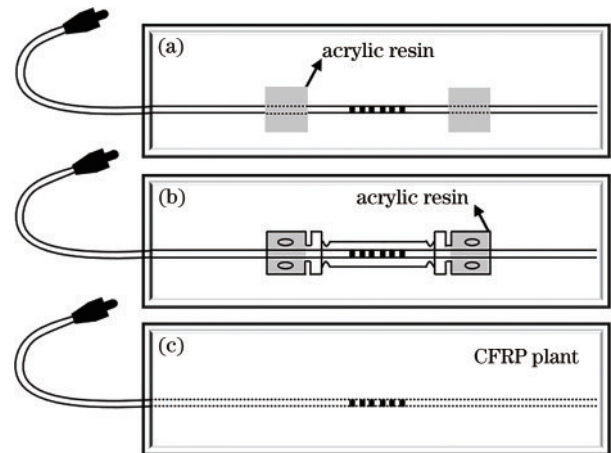


图 1 试样的制备原理。(a)外贴裸栅式;(b)外贴基片式;(c)内嵌裸栅式

Fig. 1 Principle of sample preparation. (a) Type of external bare grating; (b) type of external substrate; (c) type of embedded bare grating

表 1 三组实验的样品编号

Table 1 Sample numbers of the three groups of tests

No.	Experiment	Experiment	Experiment
	1	2	3
Type of external bare grating	T-1	L-1	K-1
Type of external substrate	T-2	L-2	K-2
Type of embedded bare grating	T-3	L-3	K-3

条件下进行测量。

3 结果与讨论

3.1 温度标定实验

将试样 T-1、T-2 和 T-3 同时放入恒温箱中,采用逐级升温再逐级降温的方式重复 3 次进行标定。以 25 °C 作为初始温度值,每升温 10 °C 为一个校准点,当温度到达校准点且试样的光栅中心波长数据稳定后记录数据,直至温度升至 65 °C。再按照相同方式从 65 °C 逐步降至 25 °C 进行实验。

基于 T-1、T-2 和 T-3 的温度标定数据绘制中心波长变化量与温度的关系曲线,并对中心波长变化量和温度进行线性拟合,计算出平均温度灵敏系数和平均线性相关系数 R^2 (即实验数据与拟合函数之间的吻合程度),结果如图 2 所示。其中: R^2 值越接近 1,表明吻合程度越高;越接近 0,表明吻合程度越低。可以发现:三种耦合方式的传感器对温度变化的感知结果线性度差异较小,均存在大于 0.9990 的线性度。其中, T-2 传感器的线性度最好,达到 0.9999。三种传感器之间的温度灵敏系数差异较大,相比传感器 T-1,传感器 T-2 的平均温度灵敏系数提高了 5.81%,传感器 T-3 的平均温度灵敏系数降低了 5.81%。此外,三个传感器的平均温度灵敏系数均比裸 FBG 传感器低(普通裸 FBG 传感器的温度灵敏系数为 0.01 nm/°C)。这是

因为 FBG 传感器温度升高后,其栅点处的间距因受热膨胀使得入射带宽光源后所反射光的中心波长向右偏移。当 FBG 传感器被封装在 CFRP 板上后,其温度灵敏度系数^[6]可表示为

$$K_T = \lambda_B [(\xi + \alpha_f) + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha_f)], \quad (3)$$

式中, α_s 为封装材料的热膨胀系数。当封装材料受热后,沿 FBG 传感器受热方向的膨胀系数的大小决定了传感器的灵敏度。对于正泊松比的碳纤维而言,其沿 XY 方向(纤维截面方向)随温度升高呈线性膨胀趋势,沿 Z 轴方向呈逐渐收缩趋势^[17]。在树脂基体受热呈均质正向膨胀的作用下,CFRP 板整体沿光纤粘贴方向的受热膨胀系数小于光纤的热膨胀系数,导致三种耦合方式的传感器热膨胀系数均小于 FBG 传感器。由于传感器 T-3 的光纤栅区完全内嵌在 CFRP 板中,其热膨胀行为受周围封装介质的影响,因此温度灵敏度相比 T-1 更小。原因是相比 T-1 和 T-3, T-2 还涉及不锈钢金属基片受热膨胀的约束作用,且不锈钢金属的热膨胀系数远大于光纤^[20]。

传感器的迟滞性和重复性是评估传感器单项静态性能的两项重要指标。迟滞性是指传感器在做满量程变化时,对于同一感知条件(如某特定温度和应变)在正、反行程时的输出量之差,可量化传感器感知外界变化的精准性。迟滞性^[21]可表示为

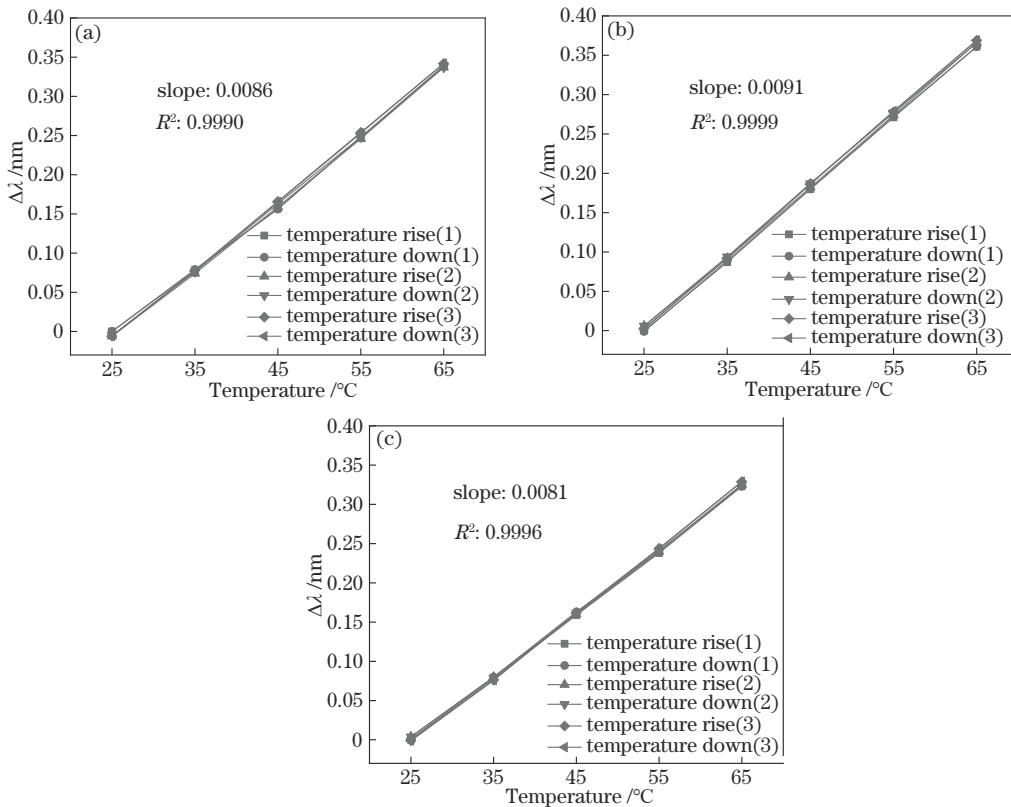


图 2 中心波长变化量随温度的变化曲线。(a) T-1; (b) T-2; (c) T-3

Fig. 2 Variation curves of central wavelength variation with temperature. (a) T-1; (b) T-2; (c) T-3

$$\xi_H = \frac{|\bar{y}_d - \bar{y}_u|}{Y_{FS}} = \frac{\Delta Y_{H, \max}}{Y_{FS}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中： \bar{y}_d 为正行程实际平均特性； \bar{y}_u 为反行程实际平均特性； Y_{FS} 为传感器的最大与最小输出值的差值。重复性指在相同的工作环境之下，输入量从一个方向做满量程变化时，多次趋近并达到同一校准点时输入量的分散程度，可量化传感器在服役期间多次感知同一环境的稳定性。重复性^[21]可表示为

$$\xi_R = \frac{cS_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中： c 为包含因子， $c = t_{0.95}$ ，当实验循环测试为 3 次时， $c = 4.303$ ； S_{\max} 为 n 次正反行程共 $2n$ 组数据中的最大样本标准偏差，采用贝塞尔公式法计算。不同传感器试样的迟滞性和重复性的计算结果如表 2 所示。可以发现，T-1 的迟滞性仅有 0.2%，T-2 和 T-3 的迟滞性相比 T-1 分别增大了 1.35 倍和 1 倍，但均小于 5%。

表 2 T-1、T-2 和 T-3 的迟滞性和重复性

Properties of FBG sensors	T-1	T-2	T-3
Maximum hysteresis ($\Delta Y_{H, \max}$)	0.0007	0.0017	0.0013
Full range output value (Y_{FS})	0.343	0.362	0.325
Maximum standard deviation (S_{\max})	0.0047	0.0040	0.0031
Retardance / %	0.20	0.47	0.40
Repeatability / %	5.89	4.75	4.10

为探究存在迟滞性的原因，对三种耦合方式的传感器的升降温过程进行了实时监测，结果如图 3 所示。可以发现：传感器 T-1 暴露在外界环境中，其对温度变化的感知相对较快，当温度达到校准点后，中心波长可以迅速达到稳定状态；T-2 和 T-3 的传感器分别被封装在金属基片上以及 CFRP 板内，其对温度变化的感知相对滞后，需要再经过一段时间的热量传递后，才能保持

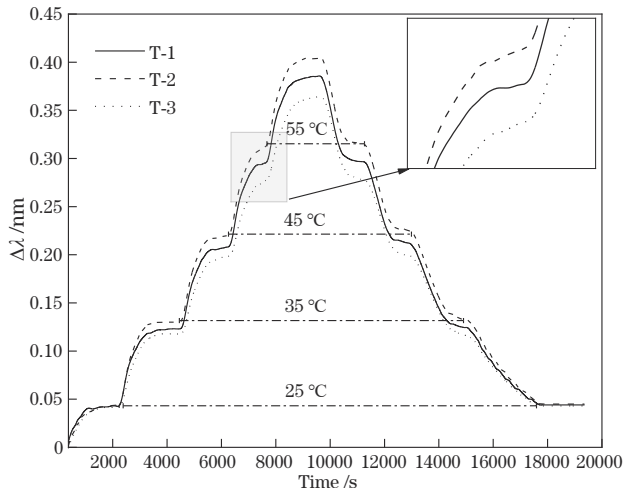


图 3 升温过程中传感器的实时监测曲线

Fig. 3 Real-time monitoring curves of the sensor during the heating process

温度的恒定。此外，T-1、T-2 和 T-3 的重复性分别为 5.89%、4.75% 和 4.10%，这表明传感器输出量的稳定性呈逐渐提升的趋势。原因是三种传感器的耦合方式不同导致 CFRP 板与 FBG 传感器的有效黏接面积与应力传递方式不同。T-3 的 FBG 传感器完全内嵌在 CFRP 板中，受外界影响的干扰性较小，且较大的黏结面积保证了光纤在 CFRP 板内部不容易产生滑移，整体材料因受热膨胀所引起的应力传递具有较好的一致性。相比 T-1、T-2 的金属基片对光纤具有物理加压加持以及胶黏剂锚固的协同锚固，同时金属基片与 CFRP 板的黏接面积相对较大，因此也具有较好的稳定性。

3.2 循环加载实验

将试样 L-1、L-2 和 L-3 分别组装成预应力 CFRP 板，将其安装在循环加载实验装置上，如图 4 所示。采用千斤顶进行加卸载，用 100 kN 应力传感器实时记录载荷，以每 100 MPa 为校准点逐级加载至 1000 MPa 后再卸载为一组实验，重复 3 次。当预应力 CFRP 板加载至校准点且光栅中心波长数据稳定后，读取应力传感器和光栅中心波长的数据，由于卸载时载荷过大无法均匀控制，因此随机取校准点读取数据。



图 4 循环加载实验装置

Fig. 4 Experimental device of the cyclic loading

基于应力标定数据绘制 L-1、L-2 和 L-3 的中心波长与应力的关系曲线，并对中心波长和应力进行线性拟合，计算出平均应力灵敏度系数和平均线性相关系数，结果如图 5 所示。可以发现，三种耦合方式的传感器在感知应变时，其传感特性具有较大的差异，L-1、L-2、L-3 的线性度呈逐渐增加的趋势，平均应力灵敏度分别为 0.0037、0.0078、0.0075 nm/MPa，这与温度灵敏度的变化具有明显的差异。原因是：当温度变化时，包括胶黏剂在内的所有材料均会发生热胀冷缩变化，此时 FBG 传感器与封装体系之间存在较小的相对应力或滑移；当温度恒定且仅 CFRP 板承受较大载荷时，传感器的应力感知灵敏度主要取决于其在 CFRP 板上的锚固效率，即 FBG 传感器与 CFRP 板的相对滑移程度。为进一步探究耦合方式对锚固效率的影响，基于上述一元线性回归方程计算 L-1、L-2 和 L-3 在监测 1000 MPa 高应力循环加载时的迟滞性和重复性，结果如表 4 所示。

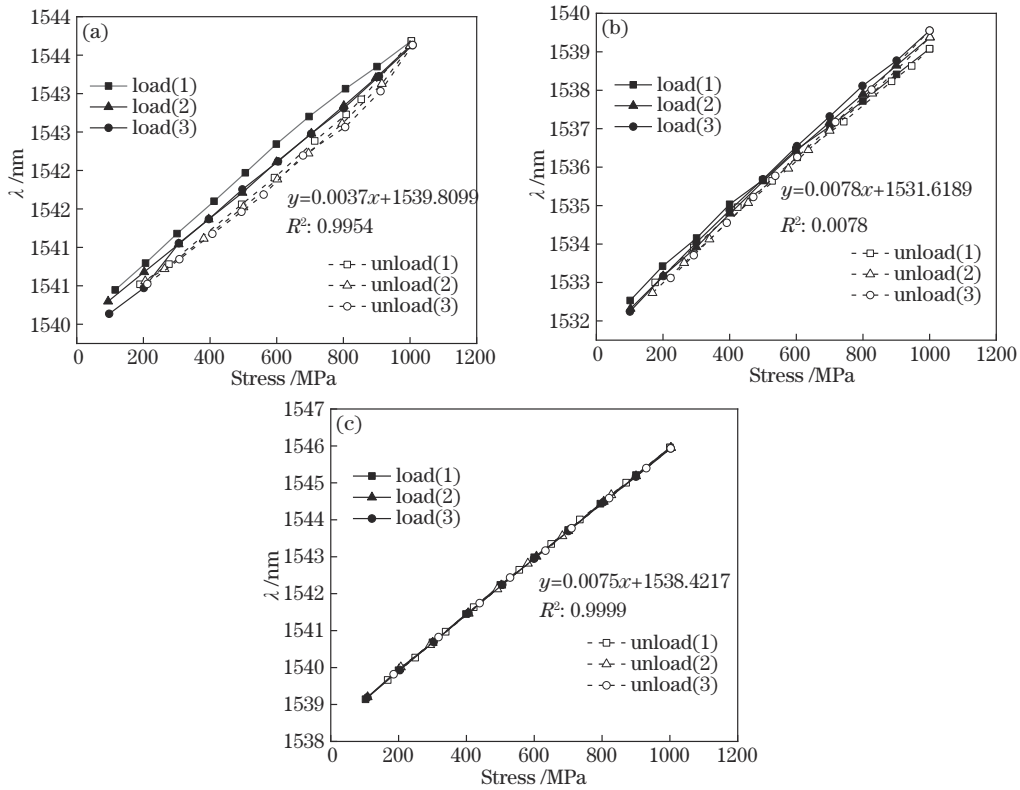


图 5 传感器中心波长随应力的变化曲线。(a) L-1; (b) L-2; (c) L-3

Fig. 5 Variation curve of sensor center wavelength with stress. (a) L-1; (b) L-2; (c) L-3

表 4 L-1、L-2 和 L-3 的迟滞性和重复性指标

Table 4 Retardance and repeatability of L-1, L-2, and L-3

Properties of FBG sensors	L-1	L-2	L-3
Maximum hysteresis ($\Delta Y_{H,max}$)	0.237	0.199	0.019
Full range output value (Y_{FS})	3.835	7.716	7.525
Maximum standard deviation (S_{max})	0.123	0.239	0.056
Retardance / %	6.18	2.58	0.25
Repeatability / %	13.80	13.33	3.20

从表 4 可以发现, L-3 的迟滞性仅有 0.25%, 表明内嵌裸栅式的耦合方式可以精准地感知 CFRP 板在加载过程中的应力变化, L-1 和 L-2 的迟滞性分别为 L-3 的 23.72 倍和 9.32 倍。原因是 T-1 和 T-2 中的树脂胶黏剂和 CFRP 板存在弹性模量的差异, CFRP 板沿加载方向发生弹性形变的过程中存在着剪切滞后效应, 即 CFRP 板的形变通过剪切应力传递至胶黏剂上。T-1 的光纤因栅点两端被包裹在树脂胶黏剂中, 存在一定的应力传递损失。此外, 胶黏剂与 SiO₂ 材质的光纤之间还存在弹性模量的差异以及彼此的黏结面积较小, 导致光纤与 CFRP 板在加载过程中产生了较大的相对滑移, 且卸载时未能迅速恢复, 导致监测结果比实际值偏小, 迟滞效应明显。相比 L-1, L-2 中的 CFRP 板与金属基片的黏接面积较大, 且由于金属基片紧紧按压在 CFRP 板上, 其受剪切滞后效应的影响较小, 与 CFRP 板的相对滑移效应较小。L-3 中的光纤被 CFRP 板中的树脂基体完全包裹, 其应变传递的损失仅来自于

CFRP 板、光纤包覆层和光纤芯层之间的弹性模量差异, 迟滞性最小。此外, L-1、L-2 和 L-3 的重复性分别为 13.80%、13.33% 和 3.20%, 表明传感器输出量的稳定性呈逐渐提升的趋势, 这与温度标定的结果一致。

3.3 静载监测实验

耦合 FBG 传感器的预应力 CFRP 板除具有张拉过程的实时监测功能之外, 还可应用于施工后的应力损失分析。当预应力碳板施工完毕后, 需要锁紧锚固螺母, 随后取下千斤顶。通过对三种耦合方式的预应力碳板进行实际施工模拟, 并在该过程中实时监测其 24 h 内的中心波长变化以评估其长久监测的可靠性。将试样 K-1、K-2 和 K-3 分别组装成预应力 CFRP 板, 并安装在图 2 所示加载装置上, 加载至 1000 MPa 后, 将锚固螺母锁紧保持载荷并取下千斤顶, 保持静载 24 h, 在此期间实时记录光栅中心波长。其中, 预应力 CFRP 板从加载 1000 MPa 至取下千斤顶的过程, 记为阶段 a, 保持静载 24 h 的过程为阶段 b。中心波长变化量与时间的关系曲线如图 6 所示。可以发现, 当预应力 CFRP 板加载至 1000 MPa 后, 锁紧锚固螺母并取下千斤顶后, K-1、K-2 和 K-3 均监测到由于螺母与螺杆之间存在间隙所造成的 CFRP 板瞬间回缩, 随后均在一段时间内产生了波长损失。基于实时监测的原始数据和前期所得平均应力灵敏系数对阶段 a 和阶段 b 的波长变化和应力损失进行计算, 结果如表 5 所示。其中: $\Delta\lambda$ 为对应阶段监测到的布拉格光栅波长的变

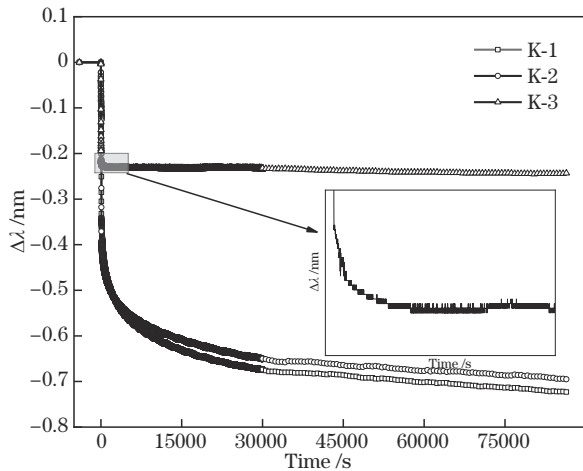


图6 K-1、K-2和K-3的中心波长变化量-时间关系曲线
Fig. 6 Center wavelength change-time curves of K-1, K-2, and K-3

化; ΔT 为阶段 b 的波长从取下千斤顶至完全稳定期间所消耗的时间。可以发现, K-3 所监测到的螺母锁紧带来的应力损失更为精准, 仅为 28.53 MPa。原因是光纤与 CFRP 板在加载过程中存在的相对滑移不能及时恢复, 导致 K-1 和 K-2 所测的应力损失偏大。此外, 由于外贴裸栅式和外贴基片式的 FBG 传感器锚固效率较低, 导致在长久监测过程中光纤一直处于逐渐回缩状态, 进而导致所测波长不断衰减, 而内嵌裸栅式预应力 CFRP 板所测的波长处于长期稳定状态。

表5 长久监测过程中的详细参数

Table 5 Detailed parameters in the long-term detection process

Sensor	Stage a		Stage b		
	$\Delta\lambda / \text{nm}$	Stress loss / MPa	$\Delta T / \text{s}$	$\Delta\lambda / \text{nm}$	Stress loss / MPa
K-1	0.342	92.43	33418	0.338	91.35
K-2	0.389	49.87	34305	0.269	34.48
K-3	0.214	28.53	1303	0.018	2.40

4 结 论

以预应力 CFRP 板为应用背景, 采用三种方式将 FBG 传感器与拉挤成型单向 CFRP 板相耦合。结果表明: 外贴裸栅式、外贴基片式、内嵌裸栅式的 FBG 传感器所测的平均温度灵敏系数分别为 0.0086、0.0091、0.0081 nm/°C, 均能有效地感知外界温度变化, 内嵌裸栅式和外贴基片式传感器对于温度感知具有一定的迟滞性, 但其监测结果的稳定性有所提升; 传感器监测应力变化的作用机制与温度不同, 由于耦合方式的不同导致锚固效率存在差异, 三种耦合方式的应变灵敏度、迟滞性和重复性有较大区别。此外, 内嵌裸栅式的耦合方式具有最优的监测精度, 其线性拟合度为 0.9999, 其迟滞性和重复性最小, 分别为 0.25%

和 3.20%。对实际施工过程进行模拟发现, 内嵌裸栅式的预应力 CFRP 板能较好地指导加载过程以及实现对 CFRP 板长久服役过程的精准监测。

参 考 文 献

- [1] 李瀚. 预应力碳纤维板技术在公路桥梁加固中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(13): 59-60.
Li H. Application of prestressed carbon fiber plate technology in highway bridge reinforcement[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(13): 59-60.
- [2] Aslam M, Shafiq P, Jumaat M Z, et al. Strengthening of RC beams using prestressed fiber reinforced polymers-a review[J]. Construction and Building Materials, 2015, 82: 235-256.
- [3] Gallego J M, Czaderski C, Michels J. Prestress force-release tests at elevated temperatures-gradient anchorage stability for prestressed EB CFRP strips[J]. Composite Structures, 2016, 137: 159-169.
- [4] 刘丰荣. 预应力碳纤维板非粘结高效锚固结构的研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
Liu F R. The study of unbonded and efficient anchorage structure of prestressed CFRP plate[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
- [5] 冯德全, 罗小东, 樊伟, 等. 材料封装型光纤布拉格光栅宽温域应变传感性能研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2106004.
Feng D Q, Luo X D, Fan W, et al. Strain sensing performance of material packaged fiber Bragg grating in wide temperature range[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2106004.
- [6] 高琳琳, 王庆林, 郭云力, 等. 复合材料基片式光纤光栅传感器的制造与性能[J]. 材料工程, 2018, 46(9): 65-72.
Gao L L, Wang Q L, Guo Y L, et al. Fabrication and performance of optical fiber grating sensors packaged in composite substrate[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(9): 65-72.
- [7] 郭海若, 刘琨, 江俊峰, 等. 基于可调谐激光器的光纤高低温力热复合多参量传感系统[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1906003.
Guo H R, Liu K, Jiang J F, et al. Optical fiber high and low temperature mechanical and thermal multi-parameter sensing system based on tunable laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1906003.
- [8] 周玉敬, 刘刚, 胡晓兰, 等. 内埋 FBG 传感器复合材料加筋板的固化过程及准静态压缩监测[J]. 材料工程, 2021, 49(10): 132-137.
Zhou Y J, Liu G, Hu X L, et al. Curing process and quasi-static compression monitoring of stiffened composite panels with embedded FBG sensors[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(10): 132-137.
- [9] 覃荷瑛, 林勇, 姜涌, 等. 光纤光栅传感器在斜拉桥索力监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 51-55.
Qin H Y, Lin Y, Jiang Y, et al. Application of fiber Bragg grating sensor in cable force monitoring of cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 51-55.

- [10] 刘军. 光纤光栅无源传感器在结构监测系统中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2020(6): 31-32.
Liu J. Application of FBG passive sensor in structure monitoring system[J]. Intelligent Building & Smart City, 2020(6): 31-32.
- [11] 耿湘宜, 王静, 姜明顺, 等. 基于内埋光纤 Bragg 光栅传感器的复合材料固化过程监测[J]. 复合材料学报, 2016, 33(8): 1615-1620.
Geng X Y, Wang J, Jiang M S, et al. Monitoring of composite curing process based on embedded fiber Bragg grating sensors[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(8): 1615-1620.
- [12] 丁安心, 俞星辰, 杨鹏, 等. 一种灌封结构用环氧树脂的固化行为表征和模拟[J]. 复合材料学报, 2022, 39(4): 1824-1833.
Ding A X, Yu X C, Yang P, et al. Characterization and simulation on the cure behavior of epoxy resin for encapsulation structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4): 1824-1833.
- [13] 吴雨佼, 朱万旭, 黄宗宁, 等. 内嵌光纤光栅碳纤维板对 RC 受损梁监测[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 192-197.
Wu Y J, Zhu W X, Huang Z N, et al. Monitoring of RC damaged beams with carbon fiber board embedded fiber Bragg grating[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2022, 43(2): 192-197.
- [14] 杨君琦. 应变传感器的应变传递理论及传感特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
Yang J Q. Strain transfer theory and sensing property research of strain sensor[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [15] 郭永兴, 匡毅, 熊丽, 等. 不同封装方式的光纤光栅传感与温补特性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110601.
Guo Y X, Kuang Y, Xiong L, et al. Sensing and temperature-compensation characteristics of fiber Bragg gratings under different packaging ways[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110601.
- [16] 曾泽颖, 朱万旭, 刘丰荣, 等. 耦合大量程光纤光栅的碳纤维增强复材板的传感特性研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(9): 174-180.
Zeng Z Y, Zhu W X, Liu F R, et al. Research on sensing characteristics of CFRP plates coupled with large-range fiber gratings[J]. Industrial Construction, 2020, 50(9): 174-180.
- [17] 任鹏飞. 预应力碳纤维板在桥梁加固中的研究与应用[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
Ren P F. Research and application of pre-stressed carbon fiber sheet in bridge strengthening[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [18] 刘福祿, 张钰民, 庄炜, 等. 基于游标效应和基底增敏的复合光纤结构温度传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1506002.
Liu F L, Zhang Y M, Zhuang W, et al. Fiber temperature sensor with composite structure based on vernier effect and substrate sensitization[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1506002.
- [19] Li R Y, Tan Y G, Chen Y Y, et al. Investigation of sensitivity enhancing and temperature compensation for fiber Bragg grating (FBG)-based strain sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48: 199-206.
- [20] 杨尚. 单向碳纤维/环氧树脂层压复合材料升温过程应变场的原位测量和有限元分析[D]. 上海: 东华大学, 2021.
Yang S. Finite element analysis and *in-situ* measurement on thermal strain distribution in unidirectional carbon fiber/epoxy resin laminated composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局. 传感器主要静态性能指标计算方法: GB/T 18459—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Methods for calculating the main static performance specifications of transducers: GB/T 18459—2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.