

引用本文: 陈光, 丁克勤, 张继旺, 等. 表面焊接式光纤布喇格光栅应变传感器的疲劳性能研究[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 6-11.

表面焊接式光纤布喇格光栅应变传感器的疲劳性能研究

陈光^{1,2}, 丁克勤^{1,2}, 张继旺^{1,2}

(1. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029; 2. 国家市场监督管理总局结构健康监测技术创新中心, 北京 100029)

摘要: 针对用于起重机械结构健康监测的光纤布喇格光栅(FBG)应变传感器疲劳性能未知问题, 采用动态载荷与静态拉伸相结合的试验方法, 对起重机械钢结构疲劳损伤监测中的3种封装形式FBG应变传感器开展了疲劳性能研究, 分析了反映传感器性能的灵敏度系数、带宽、边模抑制比、峰谷比、零点波长、动态应变分别随疲劳次数增加时的变化情况。试验结果表明: 3种封装方式的FBG应变传感器疲劳前后, 在加载、卸载相同载荷时, 灵敏度系数相差最大不超过 $0.1 \text{ pm}/\mu\text{ε}$, 带宽均值为 $0.19\sim 0.23 \text{ nm}$, 峰谷比和边模抑制比随疲劳次数的增加变化趋势相同, 零点波长变化最大值为 0.31 nm , 动态应变符合二次指数函数分布特征。

关键词: 光纤布喇格光栅应变传感器; 金属结构; 疲劳; 可靠性; 监测

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)02-0006-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.02.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on fatigue performance of surface-welded fiber Bragg grating strain sensor

CHEN Guang^{1,2}, DING Keqin^{1,2}, ZHANG Jiawang^{1,2}

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;

(2. Technology Innovation Center of Structural Health Monitoring for State Market Regulation, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the unknown fatigue performance of fiber Bragg grating (FBG) strain sensors used in crane structure health monitoring, the fatigue performance of three packaged FBG strain sensors used in crane structure fatigue damage monitoring is studied by combining dynamic load with static tensile test method. The sensitivity coefficient, bandwidth, edge rejection ratio, peak-valley ratio, zero-point wavelength and dynamic strain of the sensor are analyzed with the increase of fatigue frequency. The test results show that before and after fatigue, when loading and unloading the same load, the difference of sensitivity coefficients is no more than $0.1 \text{ pm}/\mu\text{ε}$, the mean bandwidth is 0.19 nm to 0.23 nm , the peak to trough ratio and edge rejection ratio change with the increase of fatigue frequency, and the maximum change of zero wavelength is 0.31 nm . The dynamic strain conforms to the distribution characteristics of quadratic exponential function.

Key words: fiber Bragg grating strain sensor, metal structure, fatigue, reliability, monitoring

0 引言

起重机械朝着大型化、多参数化、智能化方向发展,其运行工况复杂、多变、风险性高,在长时间的腐蚀、露天、交变荷载^[1]等多种外界条件的耦合作用下,

机械结构易存在累积损伤而出现裂纹,一旦发生事故,会给企业造成巨大的经济损失和人员伤亡。因此,对起重机械结构实施在线健康监测,确保设备长期可靠运行具有重要意义。随着光纤传感技术的快速发展,光纤布喇格光栅(FBG)应变传感器以其质量轻、体积小、抗电磁干扰能力强、易于复用等优点在国内外结构损伤监测领域中得到了广泛应用^[2],越来越多的学者采用FBG传感技术开展起重机械结构应力监测^[3-11]。然而,安装后的FBG应变传感器在反复载荷、露天、腐蚀、变温的长期共同作用的交变载荷下,FBG应变传感器不可避免地出现性能衰退,甚至失去传感能力,进而影响大型结构疲劳损伤监测的可靠性。因此,对

收稿日期: 2021-11-15。

基金项目: 中国特检院青年项目(2019 青年 08 和二级学科)资助。

作者简介: 陈光(1980—),女,博士,正高级工程师,主要从事基于光纤传感技术的特种设备结构健康监测技术及光学测量方法的研究工作,参加了国家“863 计划”课题 1 项, NQI 课题 2 项, 国家科技支撑计划课题 4 项。



作为评价指标,对采用化学方法、机械方法去除光纤涂层后的 FBG 器件进行了研究。舒岳阶等人^[13]研究了 FBG 应变传感器结构的疲劳可靠性,通过将 FBG 应变传感器粘贴在悬臂梁上进行疲劳试验,得出了光谱特性作为评价指标体系。WEI Z 等人^[14]研究发现,FBG 应变传感器在应力疲劳过程中应变灵敏度下降时反射光谱也会发生畸变。舒岳阶等人^[15]提出了基于等强度梁的 FBG 应变传感器应力疲劳极限传感寿命评估方法。文献[16-18]研究了如何利用 FBG 应变传感器的应变传递特性来提高传感器监测的准确性。黄国君等人^[19]研究了低应变金属封装 FBG 应变传感器疲劳可靠性的波长变化情况。万里冰等人^[20]研究了埋入复合材料 FBG 应变传感器疲劳性能的最大、平均、最小等应变情况。吴禹希等人^[21]研究了采用土木工程高疲劳玻璃纤维增强聚合物封装的 FBG 应变传感器疲劳性能。XU H 等人^[22]对金属封装再生 FBG 应变传感器的高温疲劳性能进行了初步研究。上述研究主要针对 FBG 应变传感器本身或者嵌于复合材料、锚固于土木工程等结构的封装 FBG 应变传感器,很少有文献报道用于起重机械大型装备钢结构应力长期监测用的表面焊接式 FBG 应变传感器的疲劳性能研究情况。

为此,本文从起重机械钢结构光纤光栅应力监测传感器实际应用角度出发,研究表面焊接安装的封装 FBG 应变传感器疲劳性能,分析 FBG 应变传感器的传感特性、光谱特性及动态加载的应力应变情况。

1 FBG 应变传感特性理论

FBG 应变传感器特性一般通过灵敏度系数及与波长有关的参数变化展现出来。根据光纤耦合模理论、弹性力学原理、FBG 的各向同性和轴对称性,得到由弹光效应引起的波长漂移为

$$\Delta\lambda_B = \varepsilon_x \lambda_B - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [(p_{11} + p_{12}) \varepsilon_x + p_{12} \varepsilon_z] \lambda_B \quad (1)$$

其中, λ_B 为 FBG 反射光的中心波长, n_{eff} 为光纤基模在布喇格波长上的有效折射率, p_{11} 和 p_{12} 为 FBG 弹光系数, ε_x 为平行应力作用方向的应变, ε_z 为轴向应变。

由此,引入 FBG 波长应变灵敏度系数 K_s 表达式^[23]为

$$K_s = 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - (p_{11} + p_{12}) \nu] \quad (2)$$

$$K_s \cdot \varepsilon_z = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

其中, ν 为光纤泊松比。

由式(3)可知, K_s 与波长、应变密切相关。

2 FBG 应变传感器疲劳性能试验

为了获得起重机械大型装备钢结构健康监测实际应用中表面焊接安装式 FBG 应变传感器的可靠性,本文选择桥式和片式 2 类 FBG 应变传感器,如图 1 所示。桥式 FBG 应变传感器的封装方式(B 型)将 FBG 以焊接形式固定于桥式封装结构(桥式焊接传感器),此传感器的封装过程采用无胶形式。片式 FBG 应变传感器的封装方式有 M 型、F 型 2 种:M 型将 FBG 栅区两端以非胶形式固定于片式封装结构(片式非胶传感器);F 型将 FBG 栅区两端以有机胶形式固定于片式封装结构(片式胶粘传感器)。

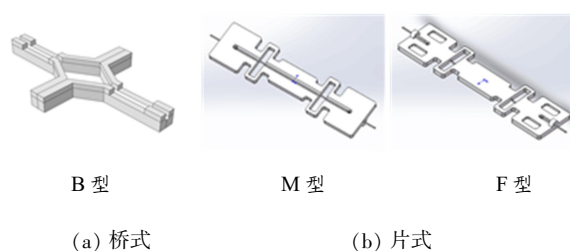
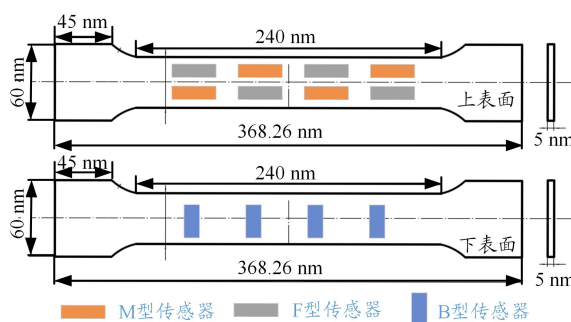


图 1 FBG 应变传感器形式

将上述 3 种封装方式的 FBG 应变传感器通过专用拉伸试件分别夹持在拉伸试验机和疲劳试验机上。专用拉伸试件的材质为 Q235,与多数港口起重机械金属结构材质相同。3 种封装方式的 FBG 应变传感器与专用拉伸试件采用焊接方式连接,焊接在专用拉伸试件上下表面的传感器布置示意图和实物图如图 2 所示。每种封装方式有 4 个传感器,共计 12 个传感器。

疲劳试验时,采用高频疲劳试验机以控制应变的方式对试件进行疲劳循环加载,设置应变为 $900 \mu\varepsilon$,加载拉压等幅正弦波,加载频率为 81 Hz。疲劳次数分别为 1×10^6 、 5×10^6 、 6×10^6 、 10×10^6 次。当 FBG 应变传感器波长发生明显异常漂移、拉伸试件撕裂等情况时,停止试验,并记录此时循环次数;上述情况均未发生时,加载疲劳次数为 10×10^6 次。

FBG 应变传感器的采集数据分为 2 类:一类为反



(a) 专用拉伸试件上下表面传感器布置图

陈光,丁克勤,张继旺,等:表面焊接式光纤布喇格光栅应变传感器的疲劳性能研究



(b) 试件夹持在试验机的实物图

图2 专用拉伸试件

应 FBG 应变传感器的光谱特性及传感特性的静态拉伸数据,利用 MOI125 FBG 解调仪进行数据采集,采集频率分别为 1 Hz,同时静态加载、卸载力为 0 kN→9 kN→18 kN→27 kN→36 kN→27 kN→18 kN→9 kN→0 kN,为减少误差,每个循环测量 2 次。另一类为反应 FBG 应变传感器动态特性的实时应变数据,利用 MOI130 FBG 解调仪进行数据采集,FBG 解调仪的频率设置为大于疲劳试验机工作频率的 2 倍以上,故设置 FBG 解调仪采集频率为 200 Hz。试验时采用 FBG 温度传感器进行温度补偿,以消除环境影响对传感器的影响。

3 试验结果分析

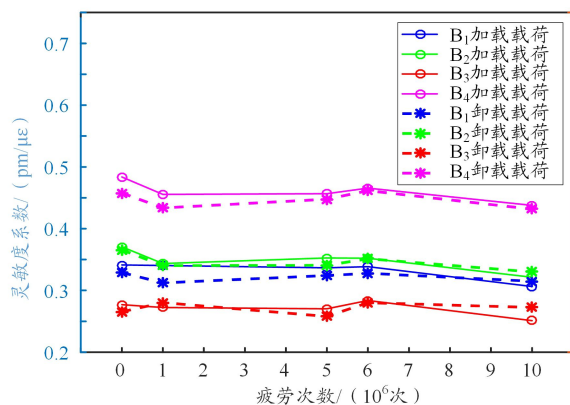
3.1 传感特性

图 3 展示了 3 种封装方式的 12 个传感器分别在疲劳前、 1×10^6 次疲劳、 5×10^6 次疲劳、 6×10^6 次疲劳、 10×10^6 次疲劳后静态加载和卸载相同载荷时灵敏度系数的变化情况。可以看出,B 型传感器($B_1 \sim B_4$)、M 型传感器($M_1 \sim M_4$)、F 型传感器($F_1 \sim F_4$)在疲劳前及疲劳不同次数后,在加载和卸载相同载荷时除 M_3 的灵敏度系数相差 $0.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 外,其余传感器灵敏度系数相差不超过 $0.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

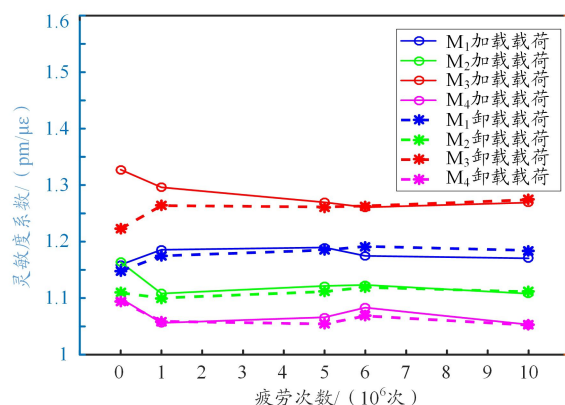
3.2 光谱特征

3 种封装方式传感器的 3 dB 带宽、峰谷比分别随疲劳次数增加时的变化情况如图 4、图 5 所示。

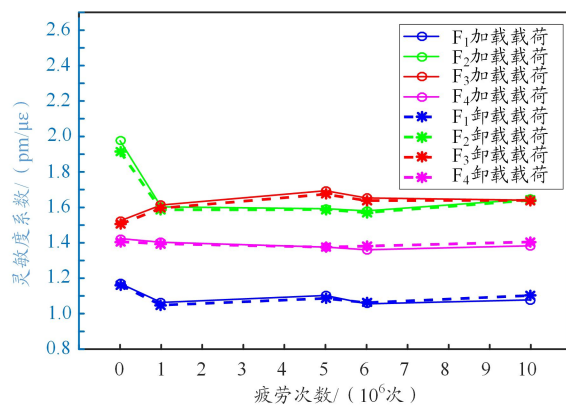
从图 4 可以看出,FBG 应变传感器疲劳前及疲劳



(a) B 型传感器



(b) M 型传感器

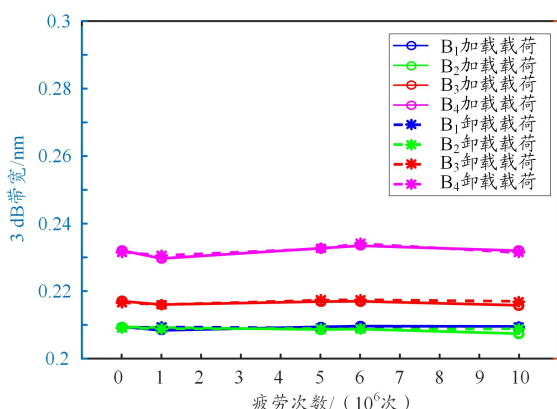


(c) F 型传感器

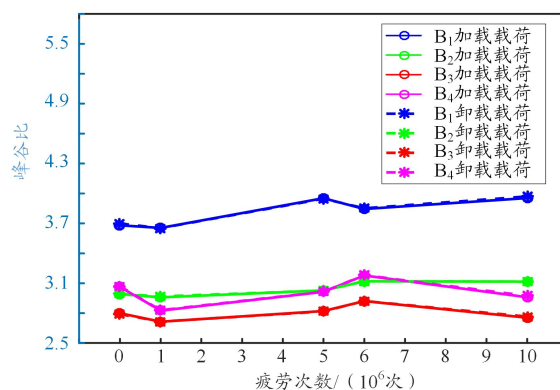
图3 3种封装方式的传感器灵敏度系数

不同次数后,在加载、卸载相同载荷时,B 型传感器和 F 型传感器的 3 dB 带宽基本不变,所有值均在 $0.21 \sim 0.23 \text{ nm}$ 之间。M 型传感器除 M_3 外,其余带宽基本不变,均在 $0.19 \sim 0.20 \text{ nm}$ 之间。 M_3 疲劳前的 3 dB 带宽值较大是由于传感器光纤弯折较大,导致采集的波峰寻址有误。将传感器光纤弯折控制在较小值时, M_3 后期试验未再出现 3 dB 带宽值较大的问题。

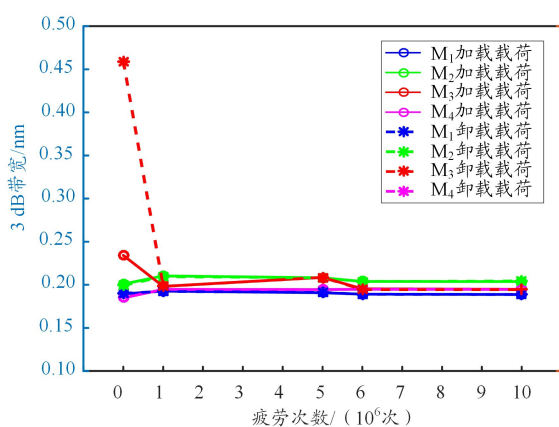
从图 5 可以看出,3 种封装方式的 FBG 应变传感



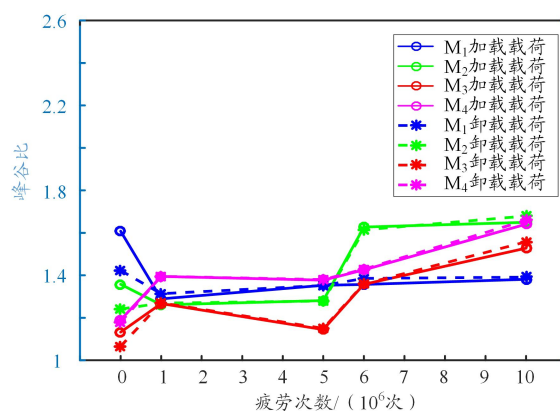
(a) B 型传感器



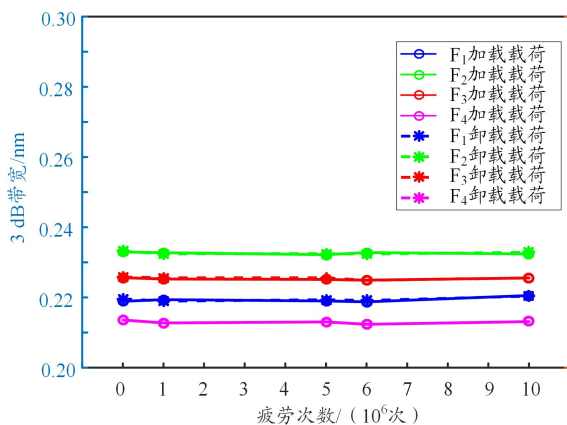
(a) B 型传感器



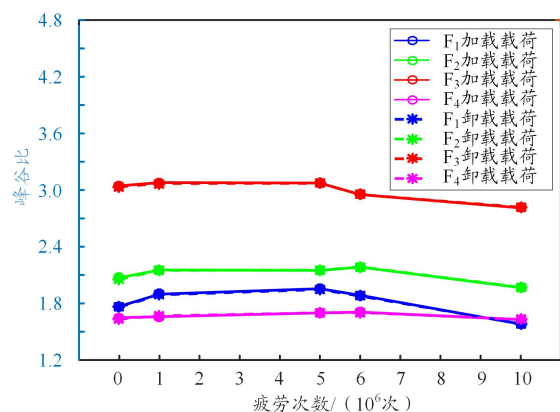
(b) M 型传感器



(b) M 型传感器



(c) F 型传感器



(c) F 型传感器

图 4 3 种封装方式传感器的 3 dB 带宽变化

图 5 3 种封装方式传感器的峰谷比变化

器疲劳前及疲劳不同次数后,在加载、卸载相同载荷时峰谷比基本相同。其中,B 型传感器峰谷比随疲劳次数增加变化升降不一,M 型传感器峰谷比随疲劳次数增加而呈增加趋势,F 型传感器峰谷比随疲劳次数增加而呈减少趋势。

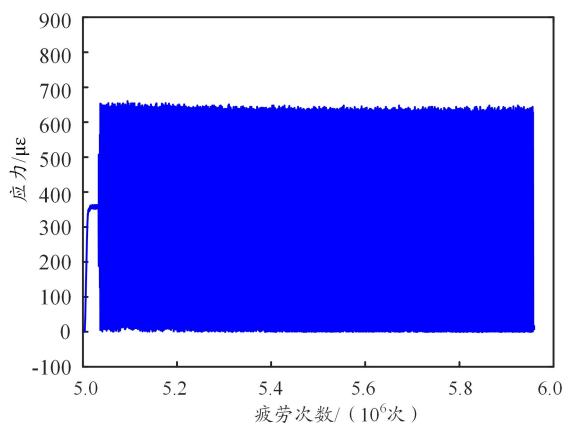
除此之外,本文还进行了边模抑制比、零点波长变化试验(静态疲劳试验未加载载荷)。试验结果表

明:3 种封装方式传感器的边模抑制比随疲劳次数增加时的变化情况与峰谷比变化情况类似;波长变化较大的传感器为 B₄、M₂、F₂、F₃、F₄, 其中 F₄ 的波长变化最大(0.31 nm),这可能是由于 F 型传感器采用胶封装,每一次疲劳试验后传感器因为胶的作用未及时回到零位所致。

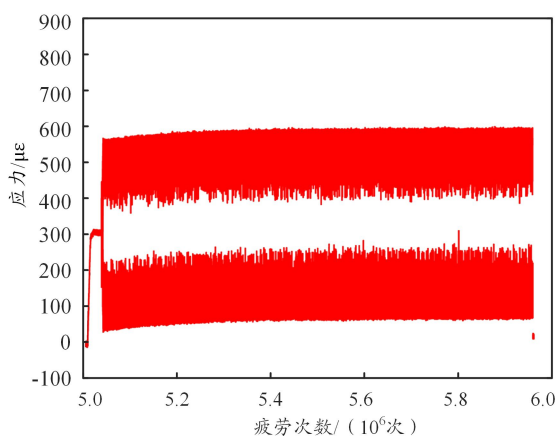
陈光,丁克勤,张继旺,等:表面焊接式光纤布喇格光栅应变传感器的疲劳性能研究

3.3 动态应变特性

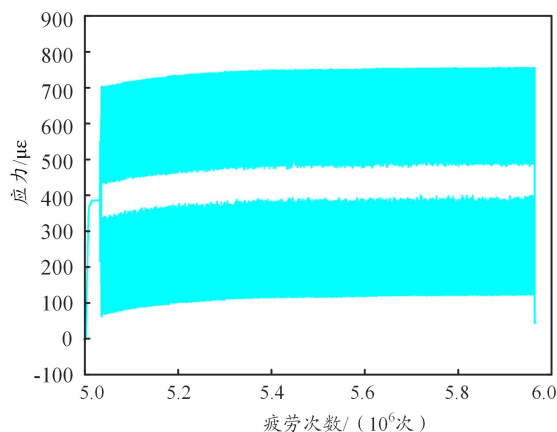
以3种封装方式的传感器在 $5 \times 10^6 \sim 6 \times 10^6$ 次疲劳为例,采集的动态应变数据如图6所示。可以看出,3种传感器均能采集试验过程的最大、最小应变,其中B型传感器应变整体略呈下降趋势,M型、F型传感器



(a) B型传感器



(b) M型传感器



(c) F型传感器

图6 3种封装方式传感器的动态应变

应变呈上升趋势,且应变具有不连续性。

对3种封装方式的传感器除去疲劳软化部分后的数据进行分析,利用Matlab的cftool工具箱进行数据拟合,得到3种封装方式传感器采集的动态应变数据符合

$$y = ae^{\frac{by}{c}} + ce^{\frac{dy}{c}} \quad (4)$$

其中, a 、 b 、 c 、 d 为相关系数,一般取值以大于0.8为准,则, y 为动态应变时间历程。

从式(4)可知,3种封装方式的传感器的动态应变符合二次指数函数分布特征,可据此对在役FBG应变传感器进行校正。

4 结束语

本文对起重机械钢结构疲劳损伤监测中的3种封装方式的FBG应变传感器开展了 1×10^6 、 5×10^6 、 6×10^6 、 10×10^6 次疲劳的疲劳性能研究,分析了反映传感器性能的灵敏度系数、带宽、边模抑制比、峰谷比、零点波长、动态应变分别随疲劳次数增加时的变化情况。试验结果表明:3种封装方式的FBG应变传感器疲劳前后,在加载、卸载相同载荷时,除 M_3 的灵敏度系数相差 $0.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 外,其余传感器灵敏度系数相差不超过 $0.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$;3种传感器的带宽在疲劳前后基本维持不变($0.19 \sim 0.23 \text{ nm}$);峰谷比和边模抑制比随疲劳次数的增加变化趋势相同;零点波长变化较大的为胶封装的F型传感器,最大波动值为 0.31 nm ;M型和F型代表的片式FBG应变传感器采集动态应变具有不连续性;动态应变符合二次指数函数分布特征,可据此对在役FBG应变传感器进行校正。本文的研究为大型钢结构服役过程中的在线损伤监测、预警预报及预防性维修提供了可靠的数据支撑。

参考文献:

- [1] 王爱红,徐格宁,高有山. 桥式起重机随机应力谱获取及疲劳剩余寿命估算[J]. 机械工程学报,2012,48(18):192-198.
- [2] 周祖德,谭跃刚,刘明尧,等. 机械系统光纤光栅分布动态监测与诊断的现状与发展[J]. 机械工程学报,2013,49(19):55-69.
- [3] 杜彦良,段永彬,孙宝臣. 基于曲率模态的门桥起重机损伤分析[J]. 中国工程机械学报,2005(4):386-390.
- [4] 陈力,刘关四,丁克勤. 起重机械疲劳寿命分析预测软件开发及工程应用[J]. 中国安全生产科学技术,2016,12(9):138-145.
- [5] 裴玮,丁克勤,郭代军. 起重机械安全健康监测与损伤预警方法研究[J]. 机械工程与自动化,2010(6):120-122.
- [6] 张冲,姚海子,赵俊,等. 基于光纤光栅应变传感系统的在役港口起重机械结构健康监测[J]. 机电工程,2013,30(4):426-429.
- [7] 黄国健,王东辉,刘奕敏,等. 基于光纤光栅传感技术的门座式起重

- 机 SHM 实施[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(4): 217-221.
- [8] 周建华. 用于起重机结构健康监测的光纤光栅应变传感系统 [J]. 起重运输机械, 2015(9): 71-74.
- [9] 李向东, 李士林, 钟少龙, 等. 港口起重机结构健康监测光纤光栅和电阻应变片对比测试及分析[J]. 起重运输机械, 2013(6): 101-107.
- [10] 黄代民, 齐凯, 王新华. 桥式起重机模型挠度的光纤 Bragg 光栅试验研究[J]. 起重运输机械, 2011(5): 44-47.
- [11] 孟庆国, 曹三平, 夏建国. 超大型门座起重机的安全装置[J]. 起重运输机械, 2013(1): 73-75.
- [12] ANG J, LI H, HERSZBERG I, et al. Tensile fatigue properties of fibre Bragg grating optical fibre sensors[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(4): 762-768.
- [13] 舒岳阶, 陈伟民, 章鹏, 等. 光纤布喇格光栅器件应力疲劳评价理论研究[J]. 光子学报, 2013, 42(7): 805-811.
- [14] WEI Z, CHEN W, SHU Y, et al. Degradation of sensing properties of fiber Bragg grating strain sensors in fatigue process of bonding layers[J]. Optical Engineering, 2014, 53(4): 046102-046102.
- [15] 舒岳阶, 吴俊, 周世良, 等. FBG 应变传感器应力疲劳极限传感寿命评估方法[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 106-111.
- [16] ANSARI F, YUAN L B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 128(4): 385-394.
- [17] CHEN G, DING K, FENG Q, et al. Strain transfer mechanism of grating ends fiber Bragg grating for structural health monitoring[J]. SDHM Structural Durability and Health Monitoring, 2019, 3: 289-301.
- [18] SUN L, LI C, LI J, et al. Strain transfer analysis of a clamped fiber Bragg grating sensor[J]. Applied Sciences, 2017, 7: 1-12.
- [19] 黄国君, 殷昀毓, 戴锋, 等. 光纤布拉格光栅应变传感器的灵敏性及疲劳可靠性研究[J]. 激光杂志, 2003(6): 45-47.
- [20] 万里冰, 李凯旋. FBG 应变传感器的疲劳性能研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(12): 13-15.
- [21] 吴禹希, 周智, 马文龙, 等. GFRP 封装 FBG 应变传感器疲劳性能研究[J]. 中国测试, 2019, 45(1): 94-98.
- [22] XU H, TU Y, WANG Y L, et al. Fatigue behavior of metal-packaged regenerated fiber Bragg grating strain sensors at high temperatures: a preliminary study[J]. Key Engineering Materials, 2019, 795: 352-357.
- [23] SHIH M C, KO C L, YANG C Y. Dynamic strain monitoring by wavelength locking between two fiber Bragg gratings fiber sensing system [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(7): 546-549.