

变温环境下典型胶黏剂对光纤光栅传感器应变传递特性的影响

李保吉¹, 刘文法², 曹德焱²

(1.航空工业成都凯天电子股份有限公司, 成都 6100091;

2.陆军装备部驻成都地区航空军事代表室, 成都 610043)

摘要: **目的** 验证粘贴式FBG传感器对宽温度环境的适应性。**方法** 通过高低温循环试验研究温度对传感性能的影响。对FBG传感器安装参数进行分析和优化设计, 用353ND、UHU PLUS、ergo 5800和502等4种胶黏剂在铝合金表面粘贴安装FBG传感器, 制成FBG测试样件。对测试样件进行高低温循环测试, 测试试验前后FBG的传感性能, 分析高低温循环对FBG传感性能的影响情况。**结果** 高低温循环后, FBG传感器中心波长产生了0.015~0.642 nm偏移, 传感器灵敏度下降范围为0.563%~2.07%。**结论** 在实际选择FBG传感器胶黏剂时, 需特别关注胶黏剂的温度适用范围参数, 以减少胶黏剂温度适应性对测试结果的影响, 提高测量精度。

关键词: 光纤布拉格光栅; 表面粘贴; 高低温循环测试; 载荷加载测试; 中心波长; 应变灵敏度

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)05-0090-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.05.013

Effect of Typical Adhesives on Strain Transfer of Fiber Bragg Grating Sensor under Variable Temperature

LI Bao-ji¹, LIU Wen-fa², CAO De-yao²

(1. AVIC Chengdu Caic Electronics Co., Ltd., Chengdu 6100091, China; 2. Army Aviation Military Representative Office in Chengdu, Chengdu 610043, China)

ABSTRACT: The work aims to verify the adaptability of the adhesive FBG sensor to the environment. The effect of high and low temperature cyclic test on the performance of the sensor was studied. In order to analyze and optimize the installation parameters of FBG sensor, four kinds of adhesives such as 353ND, UHU PLUS, ergo 5800, and 502 were used to fix the FBG sensor on the surface of aluminum alloy to obtain the FBG specimen. Then, the specimen was subject to high and low temperature cyclic test and the sensing performance of FBG specimen was analyzed before and after the test. The effect of high and low temperature cycle on the performance of FBG sensor was explored. After high and low temperature cycle, the central wave-

收稿日期: 2023-02-17; 修订日期: 2023-02-28

Received: 2023-02-17; Revised: 2023-02-28

作者简介: 李保吉(1987—), 男, 硕士。

Biography: LI Bao-ji (1987-), Male, Master.

通讯作者: 刘文法(1983—), 男, 博士。

Corresponding author: LIU Wen-fa (1983-), Male, Doctor.

引文格式: 李保吉, 刘文法, 曹德焱. 变温环境下典型胶黏剂对光纤光栅传感器应变传递特性的影响[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 090-096.

LI Bao-ji, LIU Wen-fa, CAO De-yao. Effect of Typical Adhesives on Strain Transfer of Fiber Bragg Grating Sensor under Variable Temperature[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 090-096.

length of the FBG sensor changed from 0.015 nm to 0.642 nm and the sensitivity drop range of the sensor was 0.563%~2.07%. In practical engineering applications, special attention should be paid to the applicable range of adhesive temperature, so as to reduce the effect of temperature adaptability of adhesive on the test results and improve the measurement accuracy.

KEY WORDS: fiber bragg grating; surface fixation; high and low temperature cyclic test; tensile load test; central wavelength; strain sensitivity

近年来, 航空航天产业的迅速发展, 为各种传感器提供了极具挑战性的应用平台, FBG 传感器具有外形尺寸小、测量精度高、不受电磁干扰影响、环境适应性好等技术特点, 且传感器集信号传输与传感于一体, 有利于进行分布式、网络化测量, 形成高密度、多参数的传感系统。与传统传感器相比, FBG 传感器更适用于航空航天等环境复杂的应用领域^[1-4]。目前 FBG 信号解调仪和传感器的研制技术已经趋于成熟, 但 FBG 传感器的安装技术还不能完全满足航空航天装备的实际需要, 安装工艺与环境条件对测量结果影响较大, 这成为 FBG 传感器工程化应用的一个重要制约因素。

FBG 传感器进行应变监测时, 主要采用埋入式和粘贴式 2 种安装方式。国内外学者对这 2 种安装方式进行了广泛的理论与试验分析。周智等^[5]、李宏男^[6]、李东升^[7]、万里冰等^[8]对埋入式安装的 FBG 进行了深入研究, 为埋入式 FBG 安装技术提供了设计基础。孙阳阳等^[9]、苏晨辉等^[10]、刘明尧等^[11]、权志桥等^[12]在粘贴式 FBG 传感器应变传递模型建立、模型优化、应变传递效率、应变测量结果修正方法等方面进行了研究, 为表面粘贴式 FBG 传感器应变测量理论奠定了基础。

目前, 国内外对粘贴式安装 FBG 传感器性能退化机制的研究较少。吴禹希等^[13]通过对高疲劳玻璃纤维增强聚合物封装的 FBG 应变传感器在长期载荷作用下的疲劳性能进行了分析, 绘制了传感器疲劳寿命曲线。刘慧^[14]对胶黏剂封装的 FBG 应变传感器重复性、一致性及疲劳性进行了研究, 论证了粘贴式 FBG 传感器性能的稳定性。以上研究人员在固定温度下对 FBG 传感器的性能退化进行了深入研究, 但并未考虑变温因素的影响。基于 FBG 传感器在航空航天装备中应用时对温度环境的实际需求, 仍需验证变温环境对 FBG 传感器胶黏剂粘贴性能的影响。为弥补上述研究的不足, 本文对宽温环境下 4 种典型 FBG 传感器胶黏剂粘贴性能进行了研究。

为研究变温环境对粘贴式 FBG 传感器性能的影响, 本文采用 353ND、UHU PLUS、ergo 5800 和 502 等 4 种胶黏剂, 将 FBG 传感器粘贴在铝合金表面形成测试样件, 在高低温循环条件下进行测试试验。通过对比试验前后 FBG 传感器的中心波长和应变感灵敏度, 分析传感器性能退化情况, 针对实际应用情况, 对胶黏剂的选型及其安装工艺进行优化, 以提

高传感器的耐久性和环境适应性。

1 FBG 传感器应变测量原理

FBG 传感器是一种对特定波长光谱进行反射的无源器件, 其反射光谱的中心波长可表示为^[15]:

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

式中: λ_B 为 FBG 中心波长; Λ 为光栅周期; n_{eff} 为纤芯有效折射率^[16]。

当 FBG 用于应变测量时, 作用于光纤上的应力引起光栅的拉伸或压缩, 从而光栅周期 Λ 产生变化。根据式 (1), 中心波长将发生相应的移动^[17]。

在温度恒定的情况下, 应变引起的中心波长偏移量和应变之间的对应关系可表示为^[16]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为中心波长偏移量; P_e 为光纤有效弹光常数, 一般取为 0.22。在 1 550 nm 波段, 波长偏移量和应变转换系数近似为 1.2 pm/ $\mu\varepsilon$ ^[14]。由此可知, 通过检测光栅中心波长偏移量即可实现应变测量。

2 FBG 传感器在铝合金表面粘贴安装

2.1 FBG 粘贴参数

应变传递效率作为 FBG 传感器安装性能的一个重要指标, 其长期稳定性和环境适应性要求较高, 需达到 90% 以上^[18-19]。对于一种确定的胶黏剂, 应变传递效率主要与粘贴长度、粘贴宽度、粘贴层上部厚度、粘贴层下部厚度等因素有关。在一定的尺度范围内, 应变传递效率与粘贴长度正相关, 而与粘贴层厚度负相关^[20-24]。根据试验选用的铝合金材料、光栅外形尺寸情况, 控制胶黏剂粘贴区域长度, 宽度及下部厚度分别为 30、2、0.25 mm。

2.2 试验器材

试验选用丙烯酸酯涂敷的 FBG 如图 1 所示, 包层外径为 0.25 mm, 栅区长度为 10 mm, 栅区去涂敷, 中心波长在 1 550 nm 附近。试验选用的 4 种胶黏剂分别为 353ND、502、ergo 5800、UHU-PLUS, 如图 2 所示。4 种胶黏剂的性能见表 1。

为验证胶黏剂在金属结构件上的粘贴性能, 试验选用的铝合金为 7075-T6 材料, 外形尺寸为 300 mm×



图1 丙烯酸酯 FBG
Fig.1 Acrylic coated FBG

28 mm×3 mm, 如图 3 所示。

2.3 FBG 在铝合金试件上粘贴安装

为保证胶黏剂在铝合金材料上粘贴的均匀性,需用胶带对胶黏剂长度、宽度和厚度进行控制。FBG 在铝合金表面的粘贴安装和粘贴层下部厚度控制分别如图 4 和图 5 所示^[24-25]。

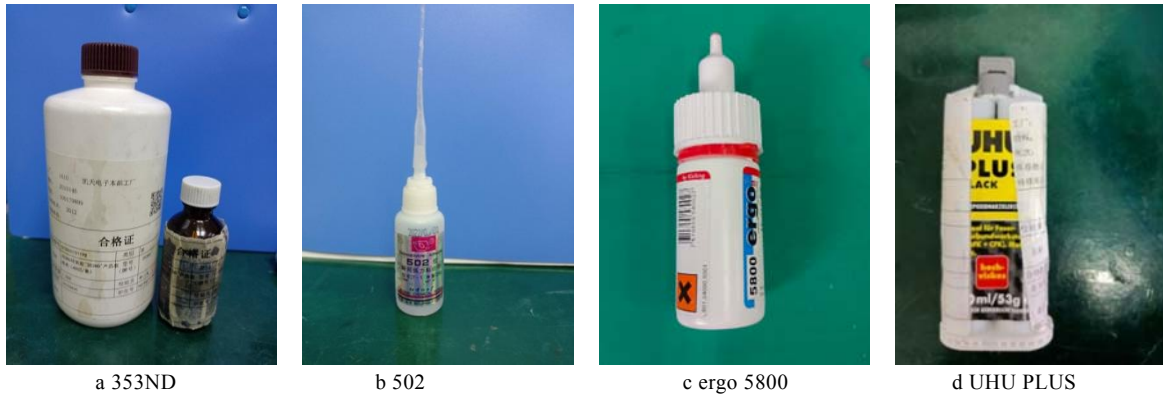


图2 试验所用胶黏剂
Fig.2 Adhesives used in test

表 1 4 种胶黏剂主要性能
Tab.1 Properties of four adhesives

序号	胶黏剂型号	剪切强度/MPa	温度适用范围/℃	固化时间
1	353ND	2000	-55~200	60 ℃ 固化 1.5 h
2	502	12~16	-55~70	初固 3 s~2 min, 全固 24 h
3	ergo 5800	>14	-55~105	10~35 s
4	UHU-PLUS	300	-40~100	常温 12 h

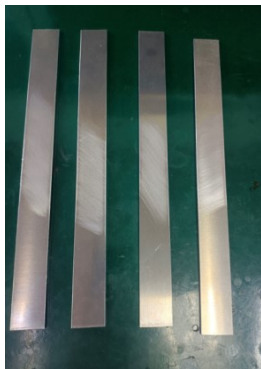


图3 试验所用铝合金试件
Fig.3 Aluminum alloy specimen used in test

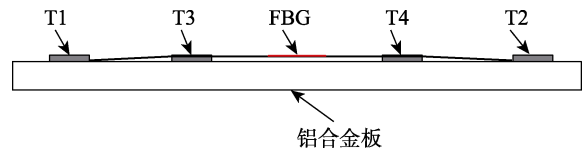


图5 胶黏剂厚度方向^[24-25]
Fig.5 Adhesive thickness direction^[24-25]

在图 4 和图 5 中, T3、T4 为粘贴长度及粘贴层下部厚度控制胶带, T5、T6 为粘贴宽度控制胶带。FBG 沿铝合金表面中轴线位置进行安装, FBG 安装在铝合金表面中心位置附近。FBG 进行粘贴安装时^[22], 首先将 T3、T4 胶带粘贴在铝合金表面, 胶带与铝合金中轴线保持垂直, 2 个胶带之间的边距 L 控制为 30 mm。然后将 FBG 两端拉紧, 安装在铝合金中轴线上, 用 T1、T2 固定在铝合金表面。最后将 T5、T6 粘贴在铝合金表面, 胶带与铝合金中轴线保持平行, 2 个胶带到铝合金中轴线距离相等, 控制 2 个胶带之间的边距 D 为 2 mm。

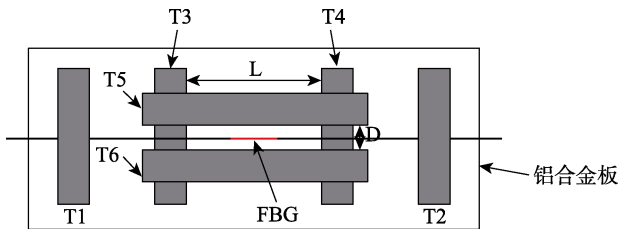


图4 胶黏剂封装 FBG 传感器^[24-25]
Fig.4 FBG sensor packaged with adhesives^[24-25]

FBG 传感器在铝合金表面完成涂胶后经固化、光纤接头加装等工序, 形成如图 6 所示的传感器试件。其中, 520 和 ergo 5800 这 2 种胶黏剂在常温下完成

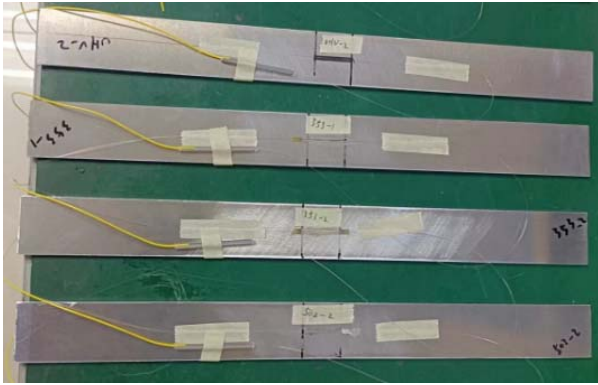


图 6 试验制作完成的 FBG 传感器试件
Fig.6 FBG sensor specimen fabricated in test

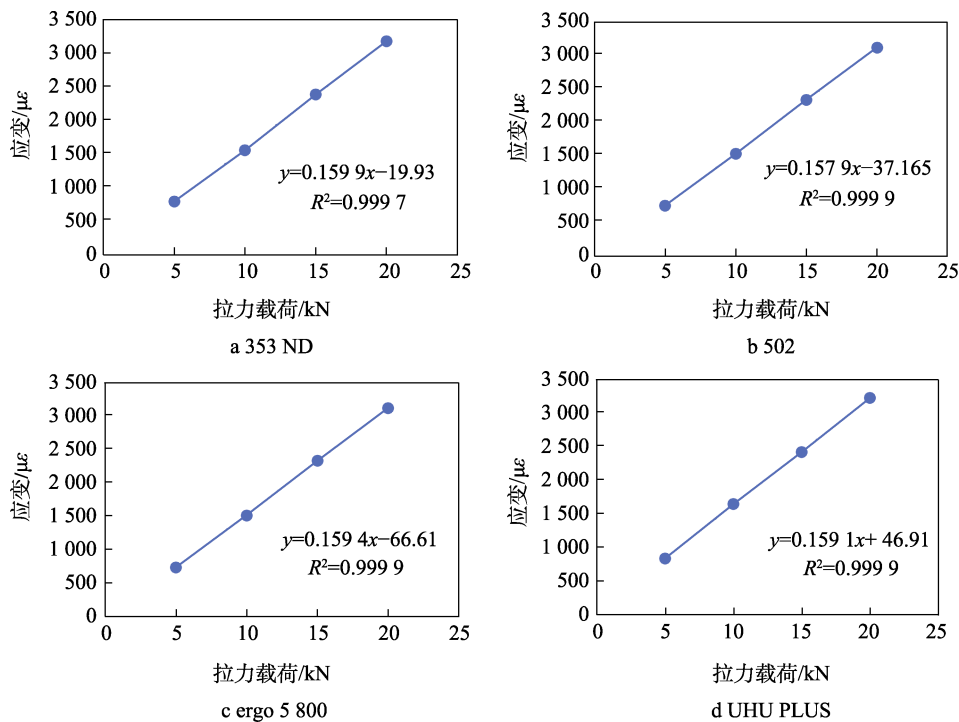


图 7 高低温循环试验前 FBG 试件的应变-载荷曲线
Fig.7 Strain versus load curve of FBG specimen before high and low temperature cyclic test

在图 7 所示的测试结果中, 测试曲线的斜率为试件的应变灵敏度, 4 种胶黏剂粘贴安装的 FBG 试件的初始性能参数见表 2。

表 2 FBG 试件初始性能参数
Tab.2 Initial performance parameters of FBG specimen

胶黏剂	FBG 中心波长/nm	应变灵敏度 / $(\mu\epsilon \cdot N^{-1})$	相关系数 R^2
353ND	1 548.474	0.159 9	0.999 7
502	1 548.880	0.157 9	0.999 9
ergo 5800	1 554.042	0.159 4	0.999 9
UHU PLUS	1 553.507	0.159 1	0.999 9

由表 2 数据可知, 初始条件下, 4 个 FBG 的中心波长接近 1 550 nm, 试件的应变灵敏度最小为

0.157 9 $\mu\epsilon/N$, 最大为 0.159 9 $\mu\epsilon/N$, 波动范围为 1.27%, 线性拟合相关系数 R^2 在 0.999 7 以上。由此可见, 4 种胶黏剂粘贴安装的 FBG 传感器对应变的传递结果具有很好的一致性和线性度, 传感器状态良好。

3 高低温循环试验及结果分析

3.1 FBG 传感器样件初始状态性能测试

高低温循环试验前, 在室温环境下测量 FBG 初始中心波长, 并对试件进行拉力载荷加载测试, 测试过程中。分别加载 5 000、10 000、15 000、20 000 N 拉力, 记录拉力加载前后每个 FBG 的中心波长, 得出拉力引起的波长偏移量。最后计算得出拉力载荷引起的应变值, 并进行线性拟合, 结果如图 7 所示。

固化, 353ND 和 UHU PLUS 这 2 种胶黏剂在 60 °C 加热环境下完成固化。

3.2 FBG 高低温循环试验

FBG 传感器在航空器上应用时, 环境温度是传感器性能的重要影响因素, 为验证温度变化对 FBG 传感器性能的影响, 设计了高低温循环试验, 试验条件见表 3。

高低温循环过程中, 温箱温度运行轨迹为: 按 0 °C—-60 °C—80 °C—0 °C 趋势变化, 温箱温度阶梯式改变, 温度步进为 10 °C, 温度变化率为 1 °C/min。

表 3 试验条件
Tab.3 Test conditions

序号	试验名称	试验条件
1	拉力载荷	拉力为 0~20 kN, 加载速率为 50 N/s, 精度为 0.5%
2	高低温循环	温度范围为-60~80 °C, 温度精度为±2 °C

每次调温完成后, 保温 1 h 再进行下一次调温, 总共

进行 3 次温度循环。

高低温循环试验采用 Votschtechnik 公司 C7-340PRO 试验箱, 拉力载荷试验在 SHIMADZU 公司 AGS-X100KN 试验机上进行, 光栅信号解调仪为自研设备, 试验测试现场如图 8 所示。

经高低温循环试验后, 所有试件的 FBG 传感器粘贴位置均无明显变化, 没有出现脱胶、开裂现象, 没有出现外观损伤。



a 拉力载荷加载测试



b 高低温循环测试

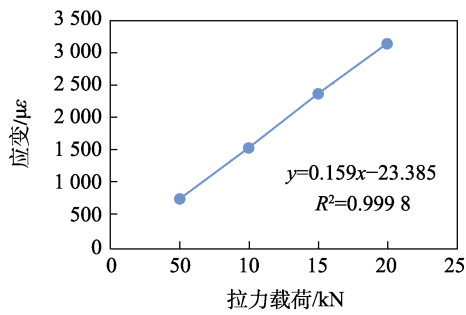
图 8 测试试验

Fig.8 Test process: a) tensile load test; b) high and low temperature cyclic test

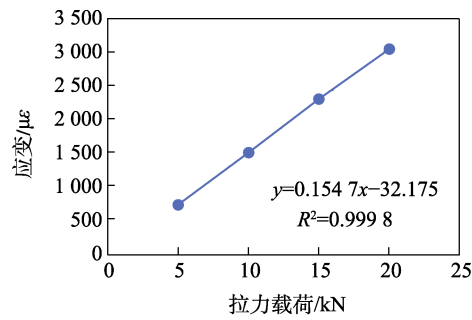
3.3 FBG 高低温循环试验后性能测试

高低温循环试验完成后, 再次对 FBG 传感器性能进行测试。在室温环境下测量每个 FBG 的中心波长, 并进行拉力载荷加载测试。对每个试件分别加载

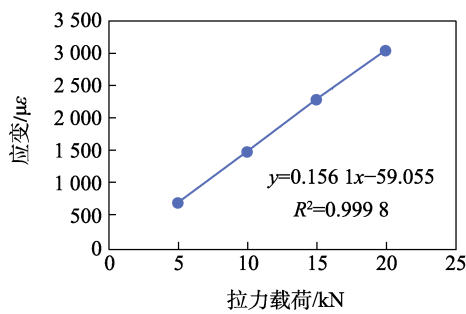
5 000、10 000、15 000、20 000 N 拉力, 载荷加载速率为 50 N/s, 载荷达到设定数值后进行中心波长测量, 上一次拉力载荷释放后, 静置 5 min, 再进行下一次拉力载荷加载试验。高低温循环试验后, 4 个试件的拉力载荷加载应变测试结果如图 9 所示。



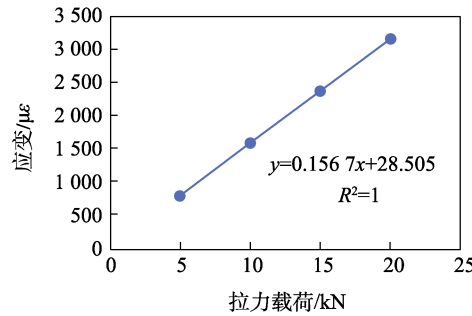
a 353 ND



b 502



c ergo 5 800



d UHU PLUS

图 9 高低温循环试验后 FBG 试件的应变-载荷曲线

Fig.9 Strain versus load curve of FBG specimen after high and low temperature cyclic test

在图 9 的测试结果中, 4 种胶黏剂粘贴的 FBG 传感器试件经高低温循环试验后, FBG 中心波长和试件的应变灵敏度见表 4。

表 4 BG 试件经高低温循环测试后的性能参数
Tab.4 Performance parameters of FBG specimen after high and low temperature cyclic test

胶黏剂	FBG 中心波长/nm	应变灵敏度 /($\mu\epsilon \cdot N^{-1}$)	相关系数 R^2
353ND	1 548.489	0.159 0	0.999 8
502	1 548.562	0.154 7	0.999 8
ergo 5800	1 553.473	0.156 1	0.999 8
UHU PLUS	1 552.869	0.156 7	1

通过对比表 2 和表 4 的 FBG 试件性能测试结果, 得出 FBG 试件高低温循环前后的性能变化情况, 见表 5。

表 5 FBG 试件高低温循环前后性能变化情况
Tab.5 Comparison of performance change of FBG specimen after high and low temperature cyclic test

胶黏剂	FBG 中心波长变化量/nm	应变灵敏度变化百分比/%
353ND	0.015	-0.563
502	-0.318	-2.027
ergo 5800	-0.571	-2.07
UHU PLUS	-0.642	-1.508

3.4 结果分析

由表 4 和表 5 的数据可以看出, 高低温循环测试后, FBG 传感器中心波长变化范围为 $-0.642 \sim 0.015$ nm, 应变灵敏度变化范围在 $-2.027\% \sim -0.563\%$ 。虽然有一定程度的退化, 但不影响正常使用 (工程应用中一般定义传感器灵敏下降 10% 为失效^[26])。试验后, 传感器线性拟合相关系数均大于 0.9998, 仍然具有很好的线性度, 可以保证应变解算精度。

4 结论

本文对 353ND、502、ergo 5800、UHU PLUS 等 4 种胶黏剂在铝合金表面粘贴安装的 FBG 传感器在高低温循环下的性能变化情况进行了测试分析。通过对比 FBG 传感器在高低温循环前后的性能变化情况, 得出以下结论:

1) 经高低温循环后, 502、ergo5800、UHU PLUS 这 3 种胶黏剂粘贴安装的 FBG 传感器中心波长向短波长方向发生了比较明显的偏移, 传感器初始工作波长的设置需充分考虑环境温度变化带来的影响。

2) 高低温循环后, 粘贴式 FBG 传感器的线性度仍达 0.9998 以上, 未见明显退化。

3) 高低温循环引起 FBG 传感器应变灵敏度降

低, 其中 ergo 5800 粘贴的 FBG 传感器灵敏度降低最多, 为 2.07%, 353ND 粘贴的 FBG 传感器灵敏度降低最少, 为 0.563%。温度变化引起 FBG 传感器灵敏度的降低程度虽然在工程应用允许的范围之内, 但是传感器灵敏度的降低会对应变测量结果带来额外误差, 为了提高应变测量精度, 需考虑对此误差进行适当修正。

参考文献:

- [1] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681-1692.
LIU Tie-gen, WANG Shuang, JIANG Jun-feng, et al. Advances in Optical Fiber Sensing Technology for Aviation and Aerospace Application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [2] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
XU Guo-quan, XIONG Dai-yu. Applications of Fiber Bragg Grating Sensing Technology in Engineering[J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 306-317.
- [3] 程一琛. 光纤布拉格光栅传感器的应用研究[J]. 通讯世界, 2020, 27(1): 85-86.
CHENG Yi-chen. Research on the Application of Fiber Bragg Grating Sensor[J]. Telecom World, 2020, 27(1): 85-86.
- [4] 李婧怡, 朱振华. 光纤光栅传感技术在航空航天领域中的应用与发展[J]. 中国新通信, 2018, 20(4): 67-69.
LI Jing-yi, ZHU Zhen-hua. Application and Development of Fiber Grating Sensing Technology in Aerospace Field[J]. China New Telecommunications, 2018, 20(4): 67-69.
- [5] ZHOU Zhi, LI Ji-long, OU Jin-ping. Interface Transferring Mechanism and Error Modification of Embedded FBG Strain Sensors[J]. Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China, 2007, 2(1): 92-98.
- [6] LI Hong-nan, ZHOU Guang-dong, REN Liang, et al. Strain Transfer Coefficient Analyses for Embedded Fiber Bragg Grating Sensors in Different Host Materials[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(12): 1343-1353.
- [7] LI Dong-sheng. Strain Transferring Analysis of Fiber Bragg Grating Sensors[J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 024402.
- [8] 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.
WAN Li-bing, LI Kai-xuan. Research on Fatigue Property of FBG Strain Sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(12): 13-15.
- [9] 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.
SUN Yang-yang, WANG Yuan, ZHANG Zheng-lin, et al.

- Analysis and Experimental Research on the Principle of Surface Bonded FBG Strain Transfer[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(7): 7046-7050.
- [10] 权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 163-172.
QUAN Zhi-qiao, FANG Xin-qiu, XUE Guang-zhe, et al. Strain Transfer Coupling Mechanism of Surface-Bonded Fiber Bragg Grating Sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 163-172.
- [11] 苏晨辉, 张雷, 隋青美, 等. 表面粘贴式光纤光栅传感器的应变传递机理分析与实验研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(4): 513-517.
SU Chen-hui, ZHANG Lei, SUI Qing-mei, et al. Strain Transfer Mechanism Analysis and Experimental Study of Surface Bonded Fiber Bragg Grating Sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(4): 513-517.
- [12] 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.
LIU Ming-yao, JI Dong-liang, XIAO Shuang, et al. Effect of Adhesive Viscoelasticity on Strain Transfer Mechanism of Bonded FBG[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(6): 1307-1318.
- [13] 吴禹希, 周智, 马文龙, 等. GFRP封装光纤光栅应变传感器疲劳性能研究[J]. 中国测试, 2019, 45(1): 94-98.
WU Yu-xi, ZHOU Zhi, MA Wen-long, et al. Research on Fatigue Properties of Fiber Grating Strain Sensor Packaged by GFRP[J]. China Measurement & Test, 2019, 45(1): 94-98.
- [14] 刘慧. 胶黏剂封装FBG应变传感器重复性、一致性及疲劳性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
LIU Hui. Study on Repeatability, Consistency and Fatigue Properties of Adhesive Packaged FBG Strain Sensors[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [15] 姚娟, 姜德生, 何伟. 光纤光栅位移传感技术研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2006, 28(7): 98-100.
YAO Juan, JIANG De-sheng, HE Wei. Study of Optical Fiber Grating Sensor for Displacement[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2006, 28(7): 98-100.
- [16] 周勇, 高淼, 潘建军. 光纤光栅负荷传感器在港口门机上的应用[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(5): 16-19.
ZHOU Yong, GAO Miao, PAN Jian-jun. FBG Load Sensor Applied in Portal Bridge Crane[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010, 8(5): 16-19.
- [17] 代巧利, 周学军, 吴俊. 光纤Bragg光栅应变灵敏度的分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(8): 181-183.
DAI Qiao-li, ZHOU Xue-jun, WU Jun. Analysis of Fiber Bragg Grating Strain Sensitive[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(8): 181-183.
- [18] 吴俊, 陈伟民, 余葵, 等. 非栅区封装光纤布喇格光栅应变传感特性研究[J]. 光子学报, 2016, 45(2): 85-89.
WU Jun, CHEN Wei-min, YU Kui, et al. Strain Sensing Properties of Grating Ends Packaged FBG Sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(2): 85-89.
- [19] 侯俊凯, 刘冰, 崔建军, 等. FBG应变挠度法标定及过程仿真[J]. 计量学报, 2021, 42(11): 1472-1481.
HOU Jun-kai, LIU Bing, CUI Jian-jun, et al. Calibration and Process Simulation of FBG Strain Deflection Method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(11): 1472-1481.
- [20] 焦方俞. 基于超磁致伸缩材料和光纤光栅的磁场传感器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
JIAO Fang-yu. Research of Fiber Bragg Grating Magnetic Sensor Based on Magnetostrictive Materials[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [21] 刘炳锋, 董明利, 孙广开, 等. 浮空器柔性复合蒙皮形变光纤布拉格光栅传感器应变传递特性[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 201-209.
LIU Bing-feng, DONG Ming-li, SUN Guang-kai, et al. Strain Transfer Characteristics of Fiber Bragg Grating Sensor in Aerostat Flexible Composite Skin Deformation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 201-209.
- [22] 易仁慧. 表面粘贴式光纤光栅传感器动应变传递规律理论与实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
YI Ren-hui. The Research of the Theory and Experiment of Surface Bonded Fiber Bragg Grating Sensors Dynamic Strain Transfer Law[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [23] 严才根. 表面粘贴基片式FBG传感器的应变传递机制与温度补偿研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
YAN Cai-gen. Study on Strain Transfer Mechanism and Temperature Compensation of Surface Pasting Substrate FBG Sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [24] 洪成雨, 杨强, 赵勇, 等. 基于光纤传感技术的土工格栅应变监测机制研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1755-1764.
HONG Cheng-yu, YANG Qiang, ZHAO Yong, et al. Strain Monitoring Mechanism of Geogrids Based on Optical Fiber Sensing Technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1755-1764.
- [25] 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.
ZENG Peng, WANG Yuan, CHEN Fei-qiong, et al. Analysis of the Effect of Adhesives on Strain Transfer for Surface Bonded Polyimide Fiber Bragg Grating[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(1): 43-49.
- [26] 张楠. 基于多性能退化分析的风电叶片用CFRP封装FBG可靠性研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
ZHANG Nan. Research on Reliability of CFRP Encapsulated FBG for Wind Turbine Blades Based on Multi-Performance Degradation Analysis[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.