文章编号:1005-4642(2024)10-0022-05

## 利用 FBG 传感器测试高温合金和陶瓷基复合材料的应变

姜亚军<sup>1a</sup>,程丽琴<sup>2</sup>,刘小冲<sup>1b</sup>,赵 菲<sup>1a</sup>,贺正泽<sup>1a</sup>,尹剑波<sup>1a</sup> (1. 西北工业大学 a. 物理科学与技术学院; b. 材料学院,陕西 西安 710000; 2. 西安高新科技职业学院,陕西 西安 710109)

摘 要:利用光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器测量了高温合金和陶瓷基复合材料的应变特性,并与电阻应变片的测量结果进行了对比分析.将 FBG 应变传感器与电阻应变片分别粘贴在高温合金和陶瓷基复合材料试件的正、反面上,利用力学试验机对 2 种试件施加载荷,分别利用 FBG 解调仪和应变测试仪对 FBG 应变传感器和电阻应变片的信号进行实时解调.研究得出:FBG 应变传感器与电阻应变片在一定的应变范围内,测量结果符合较好.因此,FBG 应变传感器可代替电阻应变片,实现对材料的应变测量.

关键词:应变;FBG;电阻应变片;高温合金;陶瓷基复合材料

中图分类号:O343.4

文献标识码:A

DOI:10. 19655/j. cnki. 1005-4642. 2024. 10. 003

应变测试是了解材料在力学载荷等因素作用下的变形、损伤和失效行为的基础,对研究材料结构的设计值、寿命预测和评估等具有重要意义.目前,应变测试大多采用电阻应变片,它具有测量精度高、稳定性好、适用性强、价格低等优点,但易受温度、过载或者冲击的影响,存在非线性区,同时不耐腐蚀、易受电磁干扰、无法用于分布式测量,且只能测量试件的表面应变,难以实现试件内部应变的测量.而光纤布拉格光栅(FBG)传感器凭借其测量精度高、结构小巧、耐腐蚀、易于复用、可植入待测件等优点,在航空、航天、建筑、桥梁等领域得到了广泛应用.

1978年, Hill 等人在掺锗光纤中首次制成FBG [1], 但该方法对激光光源的相干性要求非常高,制备效率低. 1989年, Meltz 等人采用紫外激光侧面照射光纤, 并在光纤轴向形成干涉条纹制备FBG [2], 该方法可调节FBG的周期, 具有更高的刻写效率和灵活性, 但对激光器的相干性要求依然较高. 1993年, 贝尔实验室发现载氢可增加光纤的光敏性 [3], Hill 等人进而提出利用相位掩模法制备FBG [4], 该方法降低了对光源相干性的要求, 使得FBG的制备工艺得到了极大简化, 制备稳定性和重复性也显著提高.

高温合金和陶瓷基复合材料在航空航天领域应用广泛,利用光纤传感器测量服役过程中的材料应变意义重大.例如,将光纤传感器嵌入到金属材料构件中实现结构健康监测<sup>[5]</sup>;在飞机发动机风扇叶片异物损坏展板中嵌入光纤传感器,使其具有感知能力<sup>[6]</sup>;在发动机的风扇叶尖处安装光纤传感器,实现整体风扇的应变、裂纹等实时监测<sup>[7]</sup>;利用 FBG 测量高温合金、碳基复合材料和碳/碳材料的高温应变<sup>[8-11]</sup>;等等.但文献[8-11]的研究没有将 FBG 和电阻应变片的测试结果进行对比以证明测量结果的准确性.基于此,本文将 FBG 应变传感器和电阻应变片分别粘贴于高温合金和陶瓷基复合材料的表面,利用力学试验机对其施加载荷,对测量结果进行了对比分析.

### 1 FBG 测量的基本原理

FBG 是利用光照的方式使光纤的纤芯产生 周期性的折射率变化,其结构和工作原理如图 1 所示. 当宽带激光入射至 FBG 时,满足布拉格衍 射条件的光波会沿纤芯原路返回,形成具有布拉 格反射峰的反射光谱,而其他波长的光波则几乎 没有损耗地透过,从而在透射光谱中形成与反射 峰互补的损耗峰. 温度和应变等物理量变化时会

收稿日期:2024-02-22;修改日期:2024-06-12

基金项目:教育部产学合作协同育人项目(No. 230702116275252);西北工业大学教育教学改革研究项目(No. 2024JGY42);大学生创新创业训练计划项目(No. 202210699075)

作者简介:姜亚军(1980一),男,山西夏县人,西北工业大学物理科学与技术学院副研究员,博士,研究方向为光纤传感技术及其应用. E-mail:yjjiang@nwpu.edu.cn

引起 FBG 反射光谱的中心波长发生变化,利用 FBG 解调仪实时监测中心波长的变化量,再根据 FBG 的温度和应变灵敏度系数,即可算出温度和 应变的变化量,从而实现对温度和应变的测量.

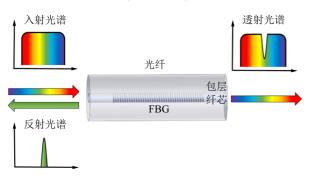


图 1 FBG 的结构和工作原理示意图

FBG 的前向传输和后向传输的 2 个纤芯模式之间发生耦合,满足的布拉格衍射条件为[12]

$$m\lambda_{\rm B} = 2n_{\rm eff}\Lambda$$
, (1)

式中,m 为 FBG 的阶数, $\lambda_B$  为 FBG 的中心波长, $n_{\rm eff}$  为纤芯的有效折射率, $\Lambda$  为 FBG 的周期.由式 (1)可知,FBG 的  $\lambda_B$  取决于  $\Lambda$  和  $n_{\rm eff}$ . 当外界的作用量发生改变时, $\Lambda$  和  $n_{\rm eff}$  也会随之发生改变,从而导致 FBG 的  $\lambda_B$  发生漂移,故可以通过监测  $\lambda_B$  实现对外界作用量的测量.

当环境温度 T 变化  $\Delta T$ ,光纤的热光效应和热膨胀效应会使  $\Lambda$  和  $n_{\text{eff}}$  发生变化,式(1)变换为

$$m\Delta\lambda_{\rm B} = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\rm eff}}{\partial T} + n_{\rm eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right) \Delta T,$$
 (2)

式(2)可简写为

$$\frac{\Delta \lambda_{\rm B}}{\lambda_{\rm B}} = (\xi + \alpha) \Delta T, \tag{3}$$

式中, $\xi$  和  $\alpha$  分别表示光纤的热光系数和热膨胀系数,其表达式为

$$\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T},\tag{4}$$

$$\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T},\tag{5}$$

故 FBG 的温度灵敏度系数可以表示为

$$K_T = (\xi + \alpha)\lambda_{\rm B}.$$
 (6)

常温下,普通单模光纤的  $\xi = 7 \times 10^{-6} \, \mathbb{C}^{-1}$ ,  $\alpha = 5 \times 10^{-7} \, \mathbb{C}^{-1}$ ,  $\xi$  比  $\alpha$  大 1 个数量级, 故温度导致 FBG 的  $\lambda_B$  漂移主要是由热光效应引起的. 当  $\lambda_B = 1$  550 nm, 可算得 FBG 的  $K_T \approx 11$ . 6 pm/ $\mathbb{C}$ . 由式(4)和式(5)可知,光纤的  $\xi$  和  $\alpha$  会随温度发生变化,当温度不高(通常为 $-50 \sim 150 \, \mathbb{C}$ )的情

况下,ξ 和α 可近似认为不随温度变化,因此 FBG 的中心波长变化量 Δλ<sub>B</sub> 随温度变化近似呈线性 关系,可以用线性函数进行拟合.但是对于利用 飞秒激光制备的 FBG,其可耐受高达 1 000 ℃ 的 高温,此时 ξ 和α 受温度变化的影响较大,Δλ<sub>B</sub> 随 温度的变化关系需要用多次函数进行拟合<sup>[13]</sup>.

当 FBG 受到应变  $\varepsilon$  作用时,光栅区域会产生 微小的弹性形变. 在弹性形变作用下,FBG 的  $\Lambda$  和  $n_{\rm eff}$  也会随之发生变化,式(1)变化为

$$m\Delta\lambda_{\rm B} = 2n_{\rm eff}\Lambda\varepsilon \left\{1 - \frac{n_{\rm eff}^2}{2} \left[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})\right]\right\},\tag{7}$$

式中, $\nu$  为单模光纤的泊松比, $P_{11}$  和  $P_{12}$  为弹光张量. 令光纤的有效弹光系数  $P_{\text{eff}} = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$ ,并将其代人式(7),联立式(1)可得

$$\frac{\Delta \lambda_{\rm B}}{\lambda_{\rm B}} = (1 - P_{\rm eff}) \varepsilon, \qquad (8)$$

故  $\Delta\lambda_B$  与  $\varepsilon$  呈线性关系,应变灵敏度系数为

$$K_{\varepsilon} = \frac{\Delta \lambda_{\rm B}}{\varepsilon} = (1 - P_{\rm eff}) \lambda_{\rm B}. \tag{9}$$

对于普通单模光纤, $\nu$ = 0. 17, $P_{11}$ = 0. 121, $P_{12}$ = 0. 270. 故当  $\lambda_B$ = 1 550 nm,可以算得 FBG的应变灵敏度系数  $K_s \approx 1.2$  pm/ $\mu$ e.

#### 2 实验方法

在工程应用中,为了使用方便,将 FBG 的两端分别粘接固定在特殊设计的不锈钢基片上,形成金属贴片式 FBG 应变传感器,如图 2 所示. FBG 应变传感器的主体结构是长为 37 mm、宽为8 mm、厚为 0.8 mm 的不锈钢基片. 不锈钢基片上镂空有 2 个对称的弹簧结构,应变主要作用在这 2 个弹簧结构上.

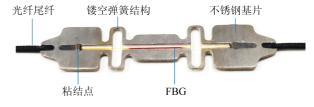


图 2 FBG 应变传感器实物图

FBG 应变传感器的典型反射光谱如图 3 所示. 该 FBG 应变传感器可采用焊接、螺丝和胶粘 3 种方式固定. 实验采用焊接方式,将初始波长为 1 545.09 nm 的 FBG 应变传感器焊接在 DD6

镍基高温合金试件上,如图 4(a) 所示;采用胶粘方式将  $\lambda_B=1$  547. 26 nm 的 FBG 应变传感器粘接在陶瓷基复合材料试件上,如图 4(c) 所示.陶瓷基复合材料试件上,如图 4(c) 所示.陶瓷基复合材料试件是将碳纤维编制成框架后,再用碳化硅陶瓷基体沉积烧结而成.同时,利用瞬干胶将 2 个 A 级电阻应变片 [型号:BE120-10AA,电阻值(119.9 ± 0.1)  $\Omega$ ,灵敏系数:  $2.21\%\pm1\%$ ]分别粘贴在高温合金和陶瓷基复合材料试件的另一面,如图 4(b) 和 4(d) 所示.

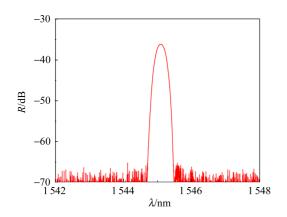


图 3 FBG 应变传感器的反射光谱



(a)粘贴 FBG 应变传感器的高温合金试件



(b)粘贴电阻应变片的高温合金试件



(c)粘贴 FBG 应变传感器的陶瓷基复合材料试件



(d)粘贴电阻应变片的陶瓷基复合材料试件 图 4 待测的高温合金和陶瓷基复合材料试件

为了对比测试,分别将高温合金和陶瓷基复合材料试件固定在力学试验机(Instron 3382)上,对试件进行拉伸,如图 5 所示. 拉伸过程中,分别采用 FBG 解调仪(MOI SM130)和应变测试仪(Sigma ASMD5 系列)对 FBG 应变传感器和电阻应变片的信号进行实时解调,数据采样频率均设置为 10 Hz. 该 FBG 解调仪采用扫描激光光源和可调谐光纤滤波器的原理来获得 FBG 的  $\lambda_B$  [14],其波长解调的分辨率小于 1 pm,重复性为 2 pm.根据 FBG 解调仪获得的  $\lambda_B$  和 FBG 应变传感器的应变系数,进而计算得到应变值.



图 5 应变加载系统

#### 3 实验结果

首先,将高温合金试件夹持在力学试验机上,进行 3 次拉伸实验. 由于金属拉伸试件表面比较光滑,前 2 次拉伸都出现滑移现象,因此以第 3 次拉伸时电阻应变片和 FBG 应变传感器的测试结果为准. 当力学试验机载荷 L=6 944 N 后,停止实验. 图 6 所示为加载过程中电阻应变片和 FBG 应变传感器的应变  $\varepsilon$  随载荷 L 的变化曲线,载荷步长为 18 N. 从图 6 可看出:在 L=6 944 N 的载荷作用下,高温合金试件线性地产生了 4 224  $\mu\varepsilon$  的应变,说明高温合金还在弹性形变范围之内,且电阻应变片和 FBG 应变传感器的测试结果符合得较好.

如果将电阻应变片的测试结果作为真实值,则 FBG 应变传感器的测试结果与真实值的偏差如图 7 所示. 从图 7 中可看出:在  $L=0\sim6~944~N$  的范围内, FBG 应变传感器的最大测量偏差为  $\pm20~\mu\epsilon$ ,相对测量偏差为 0.47%.

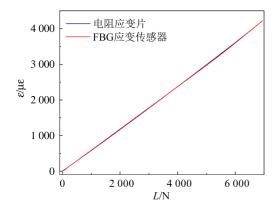


图 6 高温合金试件上电阻应变片和 FBG 应变传感器的测试结果

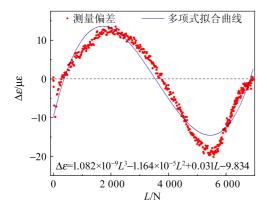


图 7 高温合金试件上 FBG 应变传感器的测量偏差

将陶瓷基复合材料试件夹持在力学试验机上,以前述相同的方式进行 3 次拉伸实验. 图 8 所示为在应变加载过程中,电阻应变片和 FBG 应变传感器的测试结果,载荷步长为 18 N. 从图 8 可以看出:在L=6024 N 的载荷作用下,陶瓷基复合材料试件近似线性地产生了 3 372  $\mu$  的应变,且电阻应变片和 FBG 应变传感器的测试结果基本一致.

FBG 应变传感器与电阻应变片测试结果的偏差如图 9 所示. 从图 9 中可以看出:在  $L=0\sim6~024~N$  的载荷范围内,FBG 应变传感器的最大测量偏差为 $\pm50~\mu$ e,相对测量偏差约为1.4%,其相对测量误差比高温合金试件高约 3 倍,这可能是由于陶瓷基复合材料试件是各向异性材料,其在拉伸过程中表面呈非均匀形变导致. 电阻应变片和 FBG 应变传感器的大小尺寸不同,且测量均为粘贴点之间的平均应变,因此导致两者测量值之间有较大误差.

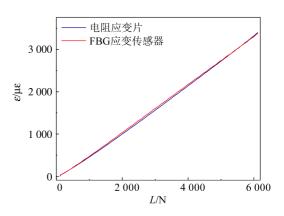


图 8 陶瓷基复合材料试件上电阻应变片和 FBG 应变传感器的测试结果

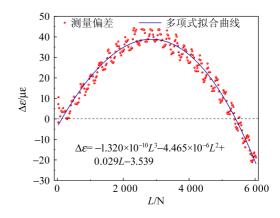


图 9 陶瓷基复合材料试件上 FBG 应变传感器的测量偏差

#### 4 结 论

利用 FBG 应变传感器测量了高温合金和陶瓷基复合材料的应变,并与电阻应变片的测试结果进行了对比. 由于高温合金质地均匀,是各向同性材料,因此 FBG 应变传感器与电阻应变片的测量结果符合较好,最大测量偏差为 $\pm 20~\mu \varepsilon$ ,相对测量偏差为0.47%. 而陶瓷基复合材料是各向异性材料,且在制备过程中,结构均匀性较差,因此 FBG 应变传感器与电阻应变片的测量结果偏差较大.

#### 参考文献:

- [1] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication [J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10):647-649.
- [2] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a trans-

- verse holographic method [J]. Optics Letters, 1989,14(15):823-825.
- [3] LEMAIRE P J, ATKLINS R M, MIZRAHI V, et al. High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for a-chieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres [J]. Electronics Letters, 1993,29(13):1191-1193.
- [4] HILL KO, MALOB, BILODEAUF, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [5] 王文娟,薛景锋,张梦杰.光纤传感在飞机结构健康监测中的应用进展和展望[J].航空科学技术,2020,31(7);95-101.
- [6] KRENZ A, KOCH J, REIMER V, et al. Methods for FBG sensor integration for RTM processmonitoring and SHM of the final CFRP component [J/OL], Eccomas Proceedia Smart, 2023:1839-1850. http://doi.org/10.7712/150123.9954.444764.
- [7] Rolls-Royce announces successful run of ultrafan technology demonstrator to maximum power [EB/OL]. (2023-11-23) [2024-02-12]. https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2023/13-11-2023-rolls-royce-announces-successful-run-of-ultra-

- fan-technology-demonstrator-to-maximum-power.
  aspx.
- [8] 王则力,王淑玉,丁镇军,等. 光纤传感器对合金结构瞬态高温应变测量的适用性研究[J]. 航天器环境工程,2023,40(1):43-48.
- [9] 乔通,王则力,宫文然,等. 改性 C/C 材料梁结构四点弯高温应变光纤传感测量[J]. 强度与环境, 2019,46(5):1-6.
- [10] 王则力,乔通,宫文然,等. 碳基复合材料结构 800℃光纤高温应变测量[J]. 强度与环境,2019, 46(3):1-6.
- [11] 吴东,杨鸿,赵文峰,等. 高超声速飞行器碳基结构 高温应变测量[J]. 航空学报,2022,43(S2): 727733.
- [12] JIANG Y J, LIU C, ZHANG W D, et al. Multiparameter sensing using a fiber Bragg grating inscribed in dual-mode fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017,29(19):1607-1610.
- [14] 韩超,胡宾鑫,朱峰,等. 光纤光栅高精度解调算法研究进展综述[J]. 激光与光电子学进展,2022,59 (13);1300005.

# Strain measurement of superalloy and ceramic matrix composites by using FBG sensor

JIANG Yajun<sup>1a</sup>, CHENG Liqin<sup>2</sup>, LIU Xiaochong<sup>1b</sup>, ZHAO Fei<sup>1a</sup>, HE Zhengze<sup>1a</sup>, YIN Jiangbo<sup>1a</sup>

- (1a. School of Physical Science and Technology; 1b. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, China;
  - 2. Xi'an High-Tech University, Xi'an 710109, China)

Abstract: The strain characteristics of superalloy and ceramic matrix composites were measured by fiber Bragg grating (FBG) strain sensor, and the measurement results were compared with those measured by resistance strain gauge. FBG strain sensor and the resistance strain gauge were respectively pasted on the positive and negative sides of the superalloy and ceramic matrix composite specimens. The mechanical testing machine was used to apply given load to the two specimens, and the signals of FBG strain sensor and the resistance strain gauge were demodulated in real time by FBG interrogator and the strain recorder respectively. The results showed that FBG strain sensor and the resistance strain gauge were almost consistent within a certain range of strain. Therefore, FBG strain sensor could be used to measure the strain of materials by replacing the resistance strain gauge.

Key words: strain; fiber Bragg grating; resistance strain gauge; superalloy; ceramic matrix composites

[编辑:龙玉梅]