

基于光纤 Bragg 光栅的空间结构横向热应变的实时监测

陈颖¹, 朱奇光², 李志全¹

(1. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:当复合材料处于低环地轨道的空间环境中时,将经受环境温度剧烈变化的影响。因此,要顺利完成既定任务,就要在温度变化的过程中保持结构尺寸的稳定性。热膨胀系数(CTE)可以很好地反映结构尺寸的稳定性,在执行任务的过程中须实时监测其变化情况。实验中,由两个光纤 Bragg 光栅(FBG)构成的差动式结构被用作传感头来同时测量温度和热应变,从而获得 CTE 的变化。在热真空腔中模拟包括高真空度、紫外和温度周期性变化的低环地轨道环境,在温度周期性变化的过程中,材料发生老化,实时监测横向 CTE 的变化,可以发现,在 1000 个温度变化周期中,CTE 没有突变,整个测试过程中,CTE 略有变小。从实验结果中,可以得出,FBG 传感器可成功埋入合成物结构中实现温度和应变的同时测量,从而实现在飞行器长期执行任务的过程中的健康状况监测。

关键词:光纤传感器;健康监测;光纤 Bragg 光栅;横向热应变

中图分类号: TN253

文献标识码: A

Real-time monitoring of transverse thermal strain of space structures based on fiber Bragg gratings

CHEN Ying¹, ZHU Qi-guang², LI Zhi-quan¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: When composite structures are exposed to the space environments such as low earth orbit, they are known to undergo considerable temperature change. Therefore, for the successful completion of their missions, it is important for the structures to maintain the consistent dimensional stability in such a thermal cycling condition. The coefficient of thermal expansion (CTE) of the structures is suitable to express the dimensional stability and it is needed to be monitored throughout the mission. In the experiment, two fiber Bragg grating (FBG) sensors have been adopted for the simultaneous measurement of thermal strain and temperature to get the CTE change. LEO conditions with high vacuum, ultraviolet and thermal cycling environments were simulated in a thermal vacuum chamber. The change of the transverse CTE in a composite laminate exposed to the space environment was measured for intervals of aging cycles in real time. As a whole, there was no abrupt change of the CTE after 1000 aging cycles. After aging, however, the CTE decreased a little all over the test temperature range. From the experimental results, it was shown that FBG sensors can be successfully embedded into the composite structures to monitor strain and temperature simultaneously, which can check the health status of spacecrafts under low earth orbit over long-term mission time.

Key words: fiber optic sensor; health monitoring; fiber Bragg grating; transverse thermal strain

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60877047);教育部博士点基金(No. 20070216004);河北省自然科学基金项目(No. F2008000873, F2007000396)资助。

作者简介:陈颖(1980-),女,博士,讲师,主要研究方向为非线性光电检测技术,信号监测与控制。E-mail:chenying@ysu.edu.cn

收稿日期:2009-06-25; **修订日期:**2009-09-21

1 引言

由于空间环境的特殊性,宇航结构须满足高硬度和低热膨胀系数(CTE)等要求,在测试和发射的过程中将长期处于危险和诸如极端温度变化和真空等极端复杂的环境中完成特定的任务。其中,在宇航结构的设计中,要求其所用材料在执行任务的过程中必须保持CTE的稳定。因此,当其长期处于低环地轨道环境中时,研究其老化过程中CTE的变化对于空间结构的设计可行性具有至关重要的意义^[1]。与此同时,当该结构在空间运行时,通过实时监测其应变和温度来确定其健康状况,对其顺利完成也是及其重要的^[2-3]。

近年来,光纤传感器已被广泛地研究和应用到众多领域中,值得注意的是,在实时健康结构监测中,和诸如应变计和热电偶等的其他传统传感器相比,其具有抗电磁干扰能力强、结构小巧、质量轻和易于埋入结构中等突出的优点。特别是光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器^[4-6],目前不少研究学者已经开始了将其应用于很多极端条件下,例如用在可重复发射车辆的低温燃料箱中,高达 800 °C 的高温场合和复合材料的固化监测,等等。

在空间环境下,研究光纤传感器的可靠性是十分必要的。由此,本文首先对 FBG 进行可靠性测试,进而在空间环境下,将其埋入空间结构中测试其横向热应变。通过研究发现,FBG 可用于空间环境中进行长期的健康结构监测。

2 FBG 的解调机理

实验中,用 FBG 测量热应变,用 248 nm 的紫外光源对掺锗光纤进行曝光,使其纤芯折射率发生均匀周期性变化,形成 FBG。当宽带光源发出的光信号通过该结构时,满足 Bragg 条件的光信号将被反射回来,其中心波长 λ_B 为^[7]:

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

其中, n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅周期; λ_B 则为 n_{eff} 和 Λ 的函数,而 n_{eff} 和 Λ 又分别受温度和应变变化的影响,因此,当温度和应变发生波动时,FBG的中心波长将发生漂移。将 Bragg 条件方程进行微分,并将温度变化 ΔT 和应变 ε 写入方程,可得:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f)\Delta T + (1 - P_e)\varepsilon] \quad (2)$$

其中, α_f 为光纤的CTE; ξ_f 为热光系数,其反映了温

度变化引起的光纤折射率的变化情况; P_e 为光弹系数,可表示为:

$$P_e = \left(\frac{n_e^2}{2}\right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \quad (3)$$

其中, ν 为泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为应变光学系数。由式(2)可得,当应变或温度发生变化时,中心波长 λ_B 都将发生变化。若 FBG 无应变,则式(2)可写为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi_f)\Delta T \quad (4)$$

若 FBG 受热产生应变,则波长漂移将为光纤折射率变化引起的波长漂移和温度变化产生的热应变导致的波长漂移两者之和,即:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \xi_f\Delta T + (1 - P_e)\alpha_{\text{str}}\Delta T \quad (5)$$

其中, α_{str} 为结构热应变。将式(5)整理可得:

$$\varepsilon_{\text{str}} = \frac{1}{1 - P_e} \left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - \xi_f\Delta T \right] \quad (6)$$

在对应变进行测量的过程中,假设传感光栅在黏贴于空间结构时的参考温度为 T_0 ,若结构不受任何机械载荷的作用,但温度 ΔT 发生了的变化,由于光纤和被贴附材料之间的热膨胀系数失配将产生附加应变,该应变可表达为:

$$\Delta\varepsilon_T = (\alpha_H - \alpha_f)\Delta T \quad (7)$$

其中, α_H 为空间结构的热应变。由式(7)可以得出,若空间结构在长期工作的过程中,环境温度骤升骤降,若附加应变的值超出安全阈值,则其健康状况将受到威胁。因此,对其应变和温度的实时监测是必不可少的。

3 FBG 高低温传感可行性测试

3.1 FBG 传感头设计

实验中所用的传感头由两个中心波长相同的 FBG 组成,如图 1 所示。其中,FBG1 测量结构的热应变,而 FBG2 只感知温度变化,从而形成差动式的结构,同时实现对温度变化和热应变的监测。其中,FBG1 在刻制完成后进行了再次涂覆,可以减少由于光栅偏振轴的变化而导致的双折射,FBG2 插入到毛细玻璃管中,其直径比光纤的外径稍大,玻璃管两端用黏合剂固定。除去护套的光纤外径为 125 μm ,毛细玻璃管的内径为 140 μm ,这种结构设计可使 FBG2 免受机械应变的影响。

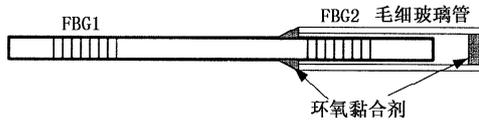


图1 同时测量温度和应变的FBG传感器示意图

Fig.1 schematic diagram of FBG sensors for simultaneous measurement of temperature and strain

3.2 FBG 温度传感测试

在从室温到 100 °C 的高温情况下,热电偶和 FBG 温度传感器被置于加热炉中,从 20 ~ 100 °C 以每分钟 1 °C 的速度升温,通过热电偶的温差电动势输出可对 FBG 的温度进行标定,同时,通过光谱分析仪可观察到 Bragg 反射波长的漂移。

在从室温到 -80 °C 的低温情况下,热电偶和 FBG 被贴在铝样本的表面,样本的表面与装有液氮的容器的液面平行,之后进行封装。其数据获取方法与高温情况下类似。通过 FBG 的温度标定测试,可得热电偶的温度变化过程中 FBG 波长变化值,如表 1 所示。

表 1 热电偶标定出的温度与 FBG 中心波长的关系

Tab.1 relationship between temperature of thermocouple and Bragg wavelength

温度/°C	中心波长 /nm	温度/°C	中心波长 /nm	温度/°C	中心波长 /nm
-80	1548.51	-15	1549.34	50	1550.07
-75	1548.56	-10	1549.40	55	1550.12
-70	1548.63	-5	1549.47	60	1550.18
-65	1548.69	0	1549.50	65	1550.23
-60	1548.76	5	1549.55	70	1550.29
-55	1548.82	10	1549.61	75	1550.34
-50	1548.89	15	1549.67	80	1550.40
-45	1548.95	20	1549.73	85	1550.46
-40	1549.02	25	1549.78	90	1550.51
-35	1549.09	30	1549.83	95	1550.56
-30	1549.15	35	1549.89	100	1550.61
-25	1549.22	40	1549.95		
-20	1549.28	45	1550.01		

3.3 FBG 应变传感测试

为了测试 FBG 在高低温范围内应变传感的可行性,与传统电子应变计的进行了对比性实验。如图 2 所示,设计中,用半桥电路消除温度变化对应变计的影响,并将一个伪应变计贴附于热膨胀系数很低的材料上,构成差动式结构。将 FBG 应变传感头、FBG 温度传感头和电子应变计贴附在铝样本表面,伪应变计与电子应变计附近具有相同的温度。

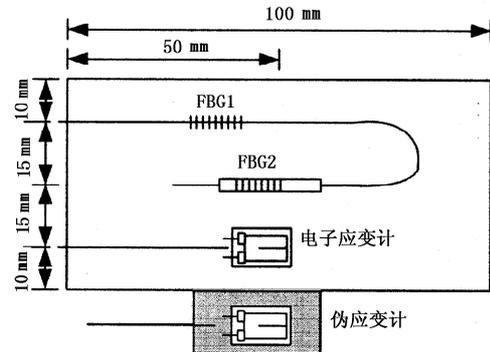


图2 FBG 应变传感结构的设计

Fig.2 design of FBG strain sensor structures

高温环境下的测试在加热炉中进行,将铝样本置于塑料薄膜上,使其在温度变化时可无摩擦地自由变形,为了保持样本处于热平衡状态,以每分钟 0.5 °C 的速度加热,从而热应变和温度变化可由 FBG 中获得。在从室温到 -80 °C 的低温环境下,测试仍在封装好的装有液氮的容器中进行。当达到热平衡时,FBG 和应变计上的应变值可用与高温测试同样的方法获得。调节液氮的液位,则热平衡时的温度和热应变的值将发生变化。如图 3 所示,由实验获得的温度和热应变的拟合曲线发现,由温度变化导致的热应变与温度变化成近似线性关系。与此同时,统计数据显示,FBG 上获取的应变值与电子应变计具有较高的一致性,最大误差不超过 4%。

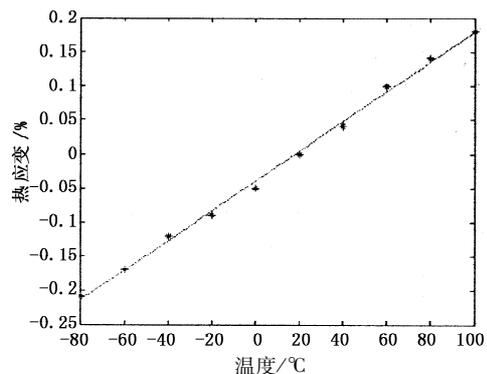


图3 FBG 传感器应变测试结果

Fig.3 strain test result of FBG sensor

4 空间环境下复合材料的 CTE 监测

实验中,将图 1 中设计的 FBG 传感头埋入合成物材料薄片,实验中,分别从光纤的轴向和光纤的径向监测其随环境温度变化而产生的热应变值的大小,从统计数据发现,光纤径向 CTE (即横向 CTE) 比轴向 CTE 要大得多,对空间结构的稳定性也将造成更大的影响,因此需沿光纤的横向埋入,并主要监测其横向 CTE。实验在热真空腔中进行,模拟低环地轨道环境,包括高真空度 (1.33×10^{-4} Pa),紫外环境 ($\lambda < 200 \mu\text{m}$) 和温度周期性变化 (从 -70 °C ~

100 ℃)。将复合材料置于如图4所示的热真空腔中,模拟低环地轨道环境。

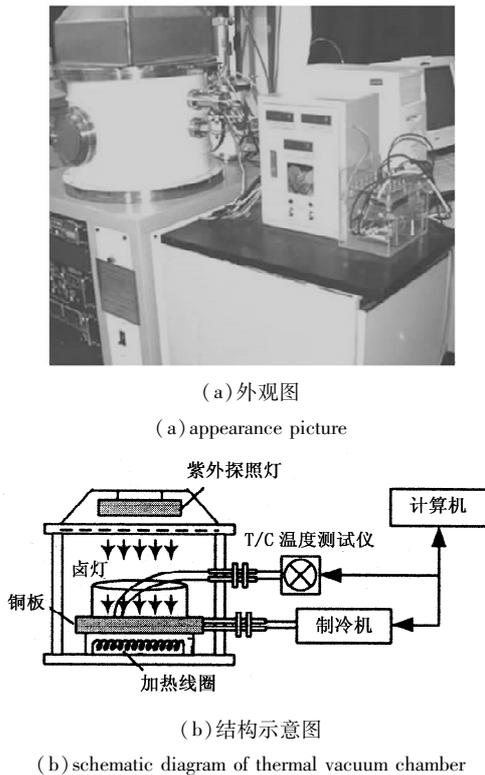


图4 实验装置

Fig.4 experimental equipment

模拟开始前,首先测得基线数据,经过0,200,400,600,800和1000个温度变化周期,温度变化和应变被同时解调,从而得到复合材料的实时横向CTE。一个温度变化周期需要2h,则整个模拟过程需耗时3个月。

复合材料在长期工作而发生老化的过程中,其CTE的变化情况如表2所示。

表2 复合材料老化过程中的横向CTE
Tab.2 transverse CTE of composite material with aging

温度 /℃	基线数据	200	400	600	800	1000	变化率 /%
-60	19.4	19.3	20.3	20.2	20.2	19.8	2.1
-40	27.7	28.4	28.1	28.2	28.3	28.0	1.3
-20	29.5	30.7	30.5	30.5	30.4	30.2	2.5
-10	30.1	31.1	31.1	31.0	30.8	30.7	1.9
0	31.0	31.4	31.5	31.4	31.2	32.1	0.4
20	32.9	32.0	32.2	32.0	32.0	31.9	-3.0
40	33.9	32.6	32.5	32.4	32.5	32.5	-4.1
60	33.8	33.8	33.3	33.4	33.3	33.3	-1.4
70	34.4	35.2	34.8	34.8	34.7	34.7	0.7
90	43.0	43.2	43.9	43.3	43.5	43.2	0.4

从实验数据中发现,整个测试过程中,材料的CTE较基线数据略微变小,其变化范围在-4.1%~2.5%,并且在温度变化的过程中没有发生CTE的突变,从而可以得出,所设计的传感器结构具有较好的可靠性和鲁棒性,可以适应空间环境中温度的骤升骤降。由此可得,FBG传感器可用于空间环境中实现长期的温度应变同时测量,从而实现空间结构的健康监测。

5 结论

由于FBG传感器比传统的热电偶和电子温度计具有诸多的优点,实验中,将其埋入空间复合材料中,将其置于包括真空、紫外和温度周期性变化的人造低环地轨道环境中,施加1000个周期的温度变化,而随着温度变化周期数的增加,材料在空间环境下将发生老化,通过同时测量温度和应变可得其CTE的变化情况。在1000个温度变化周期中,材料的CTE未发生突变,比基线数据略有减小。实验证实,FBG传感器可成功埋入合成物材料中来在空间环境下实现温度应变的同时测量,从而可在飞行器长期工作的过程中完成健康状况的监测。

参考文献:

- [1] Grossman E, Gouzman I. Space environment effects on polymers in low earth orbit[J]. Nucl Instrum Methods B, 2003,208:48-57.
- [2] James S W, Tatam R P, Twin A, et al. Strain response of fibre Bragg grating sensors at cryogenic temperatures[J]. Measurement Technol, 2002,13:1535-1539.
- [3] 王为,林玉池,黄银国. 表面式光纤光栅传感器应变传递研究[J]. 激光与红外, 2008,38(12):1218-1220.
- [4] Mousumi Majumder, Tarun Kumar Gangopadhyay, Ashim Kumar Chakraborty, et al. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications[J]. Sensors and Actuators A, 2008,147:150-164.
- [5] Da-Peng Zhou, Li Wei, Wing-Ki Liu, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature based on a fiber Bragg grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror [J]. Optics Communications, 2008, 281: 4640-4643.
- [6] Samer K Abi Kaed Bey, Tong Sun, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain with long period-grating pairs using low-resolution detection[J]. Sensors and Actuators A, 2008,144:83-89.
- [7] 张燕君,王海宝,陈泽贵,等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1):53-55.