

光纤温度/应变复合传感器及其在800℃高温下的应用



柴葳^{1,*},郝庆瑞¹,宝剑光^{1,2}

1.中国飞机强度研究所,陕西 西安 710065

2.英国诺丁汉大学,英国 诺丁汉 NG72RD

摘要:高温应变是材料和结构在高温环境中物理性能的主要参数之一,对高温应变的准确测量是结构热强度试验的重要组成部分。目前在高温应变测量方面存在安装工艺复杂、耗费时间长、测量分散性大、高温胶造成应变传递误差、热输出标定带来二次误差等不足。本文将光纤温度/应变复合传感器应用到热强度试验中,该传感器结合布拉格光栅光纤传感器和非本征法珀传感器,可以同时测量同一点的温度和应变。该传感器具有不依赖高温胶传递应变,不需要标定热输出等优点。当前已实现了800℃环境下温度和应变的测量。试验结果证明,传感器性能稳定,一致性良好。

关键词:光纤布拉格光栅; 光纤法珀腔; 温度/应变同步测量; 800℃高温应变

中图分类号: V214.19

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.02.009

近年来,随着高超声速飞行器的快速发展,对地面结构热强度模拟试验技术提出了更高的要求。出于安全原因,必须进行大量且严格的地面试验,以评估这些高超声速材料和结构的隔热性能和位移/应变响应。作为结构热强度试验中不可或缺的一环,高温下的物理量(如位移、温度、应变、热流等)测试技术也随之成为研究的重点。特别是在高温环境下的应变测量更一直以来是困扰相关研究人员的难题^[1,2]。传统上,使用黏结或焊接在测试样品上的传统电阻应变仪测量暴露于外部环境的材料的高温应变。然而,这种方法受到应变片丝栅的耐温极限和粘贴剂的耐温能力所限制,在工程试验中仅实现了平面金属基底最高温度800℃的高温应变,且误差较大,标准梁上安装的应变计测量精度仅为20%~30%^[3,4]。

光纤光栅传感技术就是以利用反射波长对温度、应变和压力等物理量的敏感特性的光纤传感器为基础的一种新型传感技术。20世纪70年代末,K.O. Hill等利用驻波写入法制作了第一根光纤光栅。但是直到20世纪80年代末,随着W. W. Morey和G. Mettltz为首的研究学者们不断改进光纤光栅的写入装置与工艺,迅速提升了光纤光栅的制作效

率、降低了生产成本^[5]。同时他们首次提出光纤光栅对外界环境施加的温度、应变表现出规律性敏感的相关研究,挖掘了光纤光栅作为传感器的潜在应用价值,由此开辟了光纤光栅应用于传感方面的新领域。光纤光栅从而迅速成为国内外学者的研究热点。光纤传感器作为新一代的智能传感技术,具备质量轻、体积小、抗电磁干扰、便于组网、耐高低温、易于嵌入且与复合材料纤维亲和性兼容性好等诸多优点,近年来被广泛应用于针对复合材料结构的温度、应力等多种参数的在线监测领域^[6-10]。

本文针对地面热强度试验需求,引入了一种可实现温度和应变同步测量的集成光纤传感器,首次在实际工程环境中使用该新型结构开展了800℃高温下的温度应变实时同步测量可行性探索研究,并将试验与相同条件下的数字图像相关法测得的应变值进行了对比。

1 光纤光栅传感器

光纤沿径向从里到外分为纤芯、包层和涂覆层三部分,光纤光栅是用特殊的紫外光照射工艺,光纤纤芯折射率受

收稿日期: 2019-09-27; 退修日期: 2019-11-11; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 航空科学基金(2016ZD23015)

*通信作者. Tel.: 15929962081 E-mail: 930161040@qq.com

引用格式: Chai Wei, Hao Qingrui, Bao Jianguang. Integrated optical fibre temperature/strain sensor subjected to the 800℃ conditions[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(02): 66-71. 柴葳, 郝庆瑞, 宝剑光. 光纤温度/应变复合传感器及其在800℃高温下的应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(02): 66-71.

到永久的周期性微扰而形成的一种光纤无源器件, 光纤光栅能将满足一定波长条件的入射光反射。温度和应变的变化会引起光纤光栅的周期和折射率的变化, 从而使光纤光栅的反射谱和透射谱发生变化, 通过检测光纤布拉格光栅的反射谱和透射谱的变化, 就可以获得相应的温度和应变的信息, 这就是光纤光栅测量温度和应变的基本原理。

1.1 光纤光栅传感器原理

光纤光栅是利用掺杂光纤的光敏特性, 使外界入射光子和纤芯内的掺杂粒子相互作用, 从而导致纤芯折射率沿纤轴方向周期性或非周期性变化, 在纤芯内形成空间相位光栅。当光进入光纤时, 光纤光栅会对与光栅相匹配的特定波长的光进行反射, 而对其他波长的光进行透射。光纤光栅传感技术就是利用反射波长对温度、应变和压力等物理量的敏感特性并以此为基础的一种新型传感技术, 其原理如图1所示。这种传感器的缺点在于单一传感器情况下无法解耦应变与温度。

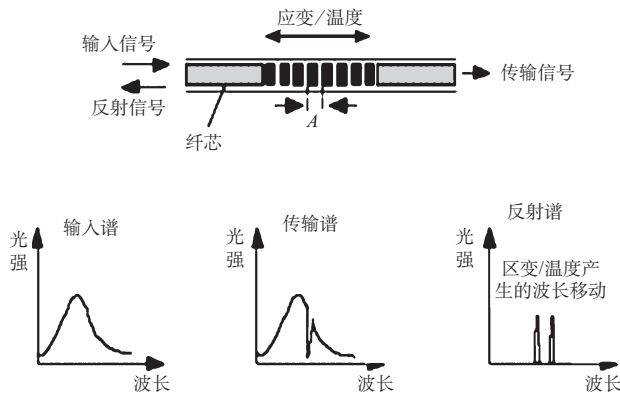


图1 布拉格光纤光栅传感器工作原理

Fig.1 Working principle of Bragg fiber grating sensor

当FBG传感器处于自由状态, 不受外力的影响, 只感应外界温度的变化时, 假定光纤光栅的中心波长为 λ_B , 当外界温度变化为 ΔT 时, 根据光纤光栅温度传感原理可知:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (\xi + \alpha) \times \Delta T \dots (1)$$

式中: $\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \times \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$ 为光纤光栅的热光系数, 表示光纤折射率与温度之间的关系, $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$ 为光纤的热膨胀系数, 表示光栅周期与温度之间的关系。

1.2 FP光纤光栅传感器原理

光纤FP腔是在光纤内制造两个反射层, 形成一个具有一定长度的微腔, 光束在两个反射端面发生反射后原路返回, 相遇并发生干涉。当外界压力或位移等参量发生变化时, 造成

微腔长度的变化, 从而引起干涉信号的变化, 光纤FP腔就是以此实现对于外界参数的传感, 其结构如图2所示。

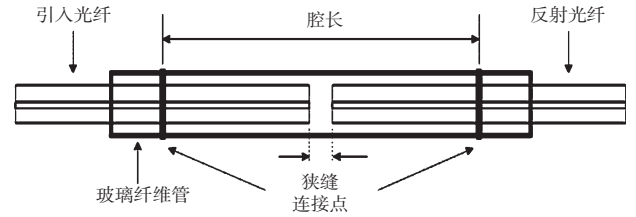


图2 非本征光纤光栅传感器

Fig.2 Non-intrinsic grating fiber optic sensor

将含FP腔的光纤固定在待测基体的表面, 当待测基体出现形变时, 连接部会带动传感器的腔长发生相应的变化, 同时传感器的干涉光谱上也会出现干涉峰峰值的波长移动。假定传感器的测量标距为 L , 初始的FP腔长为 l , 由外界形变引发的腔长变化为 Δl 。根据FP传感器的双峰解调原理, 设 λ_1, λ_2 分别为FP干涉峰的相邻两个波峰的峰值波长。根据上述描述可以得到方程组(2):

$$\begin{cases} l = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \\ l' = \frac{\lambda'_1 \lambda'_2}{2(\lambda'_1 - \lambda'_2)} \dots \\ \varepsilon = \frac{\Delta l}{L} = \frac{l - l'}{L} \end{cases} (2)$$

由于解调设备具备针对FP干涉峰相邻波峰的实时追踪以及实时保存的功能, 则通过上述方程式可以计算求得外界的形变变化量, 再通过与之前未变形的标定腔长进行比较即可得出相对形变。

2 温度-应变复合传感器

2.1 复合传感器工作原理

根据以上分析, 布拉格光纤光栅传感器和FP光纤传感器都存在着温度和形变耦合问题, 在此结合两者生成一种复合传感器, 如图3所示。该传感器将FBG传感器置于FP腔中自由伸缩端, 使其可自由伸缩膨胀, 仅受温度影响产生反射波长偏移。其次将FBG的一端设置为高反射层, 与腔体另一端光纤形成FP光栅光纤传感器, 该FP传感器依靠高温胶将两端固定在试验件上, 可随试验件形变产生应变, 同时通过FBG测量所得的温度再对光纤自身膨胀量进行修正, 达到准确测量应变的目的。通过复合传感器实现了温度和应变的解耦测量, 可针对同一测点实现温度与应变的同时测量。

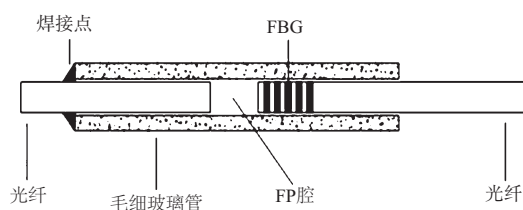


图3 带有FP腔的光纤FBG传感器

Fig.3 Fiber optic FBG sensor with FP cavity

2.2 复合传感器制作安装工艺

本课题中制作布拉格光纤光栅传感器的方法为相位掩模法即利用光的衍射原理,将同一束光分为两个部分且两部分的能量、功率完全相同。两束光经过干涉,产生相同强度的明暗条纹,矫正折射率的变化。在石英衬底上同时结合全息曝光、电子束刻蚀,做出相应的相位光栅,原理图如图4所示。

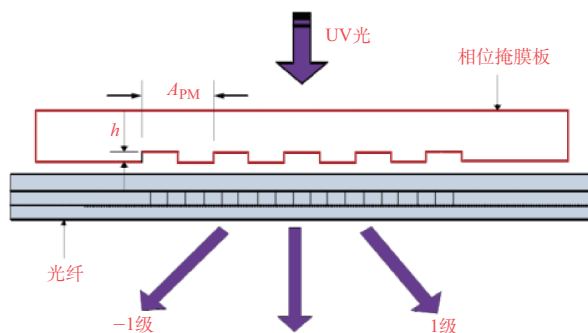


图4 相位掩模法

Fig.4 Phase mask method

非本征FP传感器的制作方法为:由两段切割平整的单模光纤,同轴的封装在一段特种管道内而成,一般是封装在石英毛细管中。在两段裸光纤端面间的距离精确调整后,采用胶黏或者CO₂激光焊接的方式,将裸光纤和石英毛细管进行固定。图5为传感器各个部分的显微电镜图。

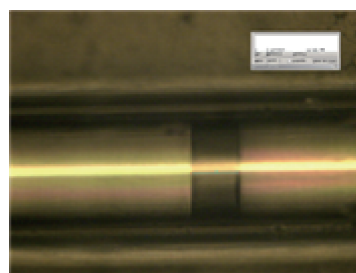
最后将金属试件的表面打磨后用酒精擦拭干净,将准备好的高温FP-FBG传感器粘贴于金属试件中心位置。粘贴方式如图6所示。

由于试验时采用的高温胶固化后,用于预先固定光纤的高温胶带不便于取下,试验时将其保留在试件表面。

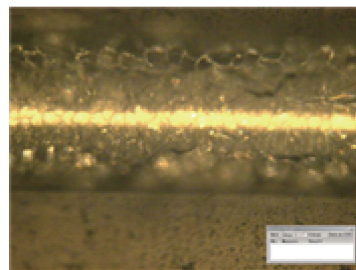
3 工程验证试验及可行性分析

3.1 试验过程及数据

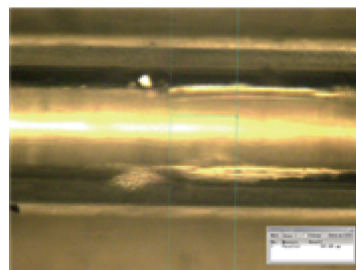
在辐射加热环境下,对传感器的考核分为对单一试验件上同一传感器进行重复性试验测量,即在传感器反复使用未损坏的前提下,针对同一试验件进行重复试验;和试验



(a) 传感器中FP腔图



(b) 毛细玻璃管焊接点图



(c) 光纤与玻璃管焊接点图

图5 传感器各个部分的显微电镜图

Fig.5 Microelectron microscopy of the various parts of the sensor

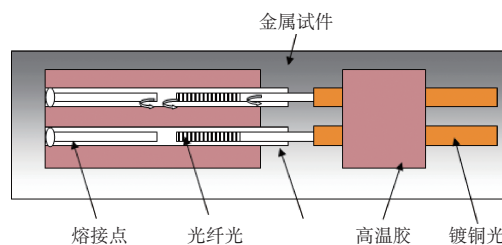


图6 FP-FBG传感器粘贴方式示意图

Fig.6 FP-FBG sensor paste pattern diagram

件材料相同的不同试验件不同传感器进行测试比较。

试验中温度测量的对比如下,首先对不同试验件上的热电偶和FP-FBG所测得的温度进行对比,如图7和图8所示。其中图7为第一件FBG与热电偶温度对比数据,图8为第二件FBG与热电偶温度对比数据。

试验中,应变随温度变化的规律如图9所示,其中SU1

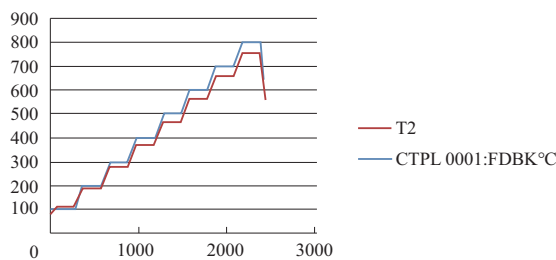


图7 第一件FBG与热电偶温度对比数据

Fig.7 The first FBG and thermocouple temperature comparison data

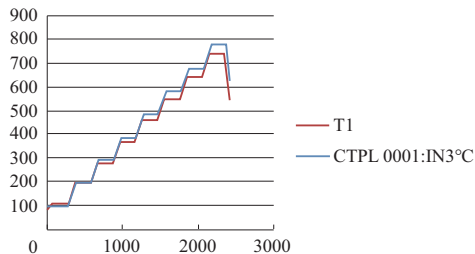


图8 第二件FBG与热电偶温度对比数据

Fig.8 The second FBG and thermocouple temperature comparison data

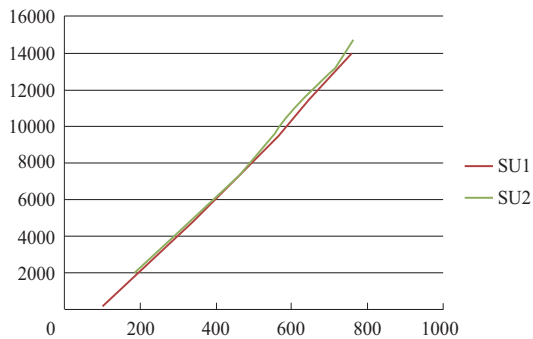


图9 两件温度-应变比数据

Fig.9 Two temperature-strain ratio data

为第一件FP传感器应变测量结果与第一件FBG传感器温度测量结果的对应关系;SU2为第二件FP传感器应变测量结果与第一件FBG传感器温度测量结果的对应关系。

再在试验件P3上进行两次重复试验,以对比FP-FBG传感器的重复性能,其测量结果如图10所示。两次重复试验中温度-应变的变化如图11所示。

3.2 数据结果分析

3.2.1 温度测量对比

以靠近FP-FBG传感器的热电偶作为测温的标准,检验传感器的测量准确性。在此,分别对同一次试验中的三个试验件进行分析,即在稳态环境中,比对热电偶与光纤光

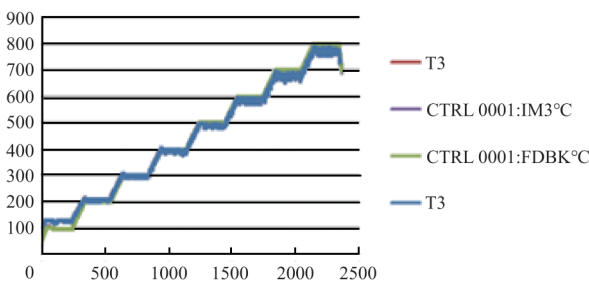


图10 两次温度测量重复性曲线

Fig.10 Double temperature measurement repeatability curve

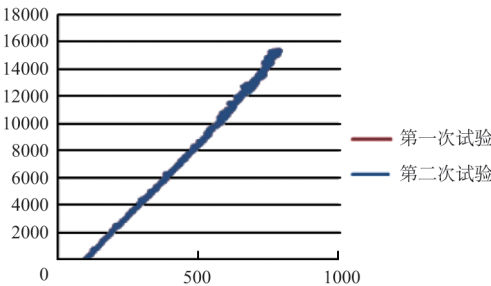


图11 两次重复性试验的温度-应变比数据

Fig.11 Temperature-strain ratio data for two repetitive tests

栅传感器的测量结果;另外在同一试验件上进行重复性试验,即分析两次相同条件试验结果。

表1为不同试验件的测量分析,这里由于仅有右上方的小板热电偶点受到温度控制,其他小板上的温度只是客观测量结果,同时考虑到加热区域存在不均匀性,因此光纤光栅传感器仅于自身小板上的热电偶进行对比,而不进行不同小板之间的交叉对比。P1、P2的试验件规律为在200℃的测量精度最高,400℃以上的测量精度基本处于5%左右。以上测量误差可能与光纤光栅传感器的灵敏度标定有关。

表1 不同试验件测温比较

Table 1 Comparison of temperature measurement of different test pieces

热电偶温度 /°C		FBG测温 /°C		相对误差 /%	
P1	P2	P1	P2	P1	P2
199.9	198.2	200	197.9	0.05	-0.15
400	389.8	372.8	372.1	-6.8	-4.54
600	585.7	567.8	556.7	-5.37	-4.95
800	781.8	761	745.3	-4.88	-4.67

第一次试验后,P1试验件与P2试验件的传感器折断,由此失效,所以重复性试验仅针对P3试验件进行分析。表2为两次重复性试验结果。在此选择P3试验件上焊接的热电偶为控制热电偶,撤出P1、P2试验件,在此P3试验件的加热均匀性

基本得以保证,FBG传感器测量为客观测量温度。由表2可知传感器在未损坏的前提下温度测量的重复性非常好,除去100℃时测温误差较大,其他测温误差基本在5%的范围内,以上测量误差可能由传感器的温度标定而引起。

表2 相同试验件重复性测温比较

Table 2 Comparison of repeated temperature measurements of the same test piece

热电偶温度 / °C		FBG测温 / °C		相对误差 / %	
第一次	第二次	第一次	第二次	第一次	第二次
199.8	200	210.4	208.5	5.31	4.25
399.9	400	393.9	393.8	-1.50	-1.55
599.9	600.1	586.5	586.3	-2.23	-2.30
800.1	800.3	775.2	774.7	-3.11	-3.20

3.2.2 应变比对

本次试验的应变测量数据见表3。根据表3提供数据绘制温度-应变曲线,如图12所示。由图12可见传感器测量的应变随温度的变化一致性良好。

表3 温度-应变对应数据

Table 3 Temperature-strain correspondence data

状态	温度	应变
P1	196.7	2281
	371.8	5597
	557.0	9430
	747.5	13890
P2	192.6	2259
	375.1	5660
	565.7	9995
	757.4	14704
P3 第一次	210.4	2503
	393.9	6313
	586.5	10438
	775.2	15347
P3 第二次	208.5	2503
	393.8	6308
	586.3	10484
	774.7	15344

4 结论

通过以上试验实现了热强度试验中同一点温度应变的同时测量,建立被测点温度、应变的对应关系,较传统应变计测试应变、热电偶测试温度的方法,降低热电偶和应变计不处于相同测试点,所带来的误差。

其次在光栅光纤传感器的安装方面,粘贴剂既需要起到将传感器固定在基地表面的作用,无须考虑粘贴剂本身特质,如传递应变的准确性、温度造成蠕变、绝缘性能随温度的改变等。粘贴面积较小,无须大面积的底胶铺设,安装

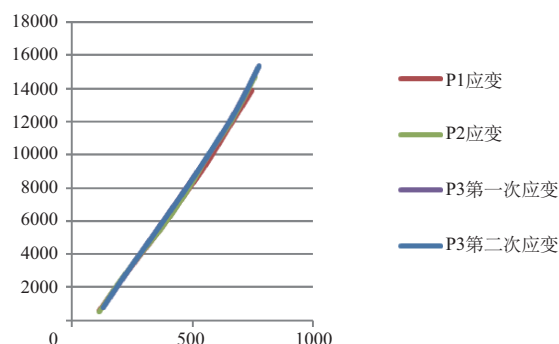


图12 多次重复性试验的温度-应变比数据

Fig.12 Temperature-strain ratio data for multiple repetitive tests

方法简单,安装周期短。

使用石英作为制作光纤材质,采取镀金工艺制作光纤反射层,并通过合适的高温退火工艺,可使传感器的使用温度提升到800~1000℃。这使高温应变的测量有了除电阻应变计外的新的接触式测量方法,且该测量方法较电阻应变计测量应变有安装简单,安装范围小,无须粘贴剂传递应变等优点。

原理样机验证结果表明传感器测试重复性良好,温度测量准确性较高,800℃环境下传感器测量一致性良好。但传感器在制作过程中由于多次淬火,镀金光纤部分较为薄弱,光纤在高温下工作时容易出现断裂现象,后续工作将着重研究并提高该测试技术的工程应用稳定性和重复性。

AST

参考文献

- [1] Krishnaraj V, Prabukarthi A, Ramanathan A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(4): 1791-1799.
- [2] Todoroki A. Monitoring of electric conductance and delamination of CFRP using multiple electric potential measurements[J]. Advanced Composite Materials, 2014, 23(2): 179-193.
- [3] 张博明,郭艳丽. 基于光纤传感网络的航空航天复合材料结构健康监测技术研究现状[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2014, 20(1):33-42.
Zhang Boming, Guo Yanli. Survey of aerospace structural health monitoring research based on optic fiber sensor networks[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science) 2014, 20(1):33-42. (in Chinese)
- [4] Gartner A, Douglas E P, Dolan C W, et al. Small beam bond test method for CFRP composites applied to concrete[J].

- Journal of Composites for Construction, 2010, 15(1): 52-61.
- [5] Takeda S, Tsukada T, Sugimoto S, et al. Monitoring of water absorption in CFRP laminates using embedded fiber Bragg grating sensors[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 61(1): 163-171.
- [6] Lu S, Jiang M, Sui Q, et al. Damage identification system of CFRP using fiber Bragg grating sensors[J]. Composite Structures, 2015, 125(1): 400-406.
- [7] Goidescu C, Welemane H, Garnier C, et al. Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 48(1): 95-105.
- [8] 付荣. 光纤 Bragg 光栅低温传感特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- Fu Rong. Study on low temperature sensing characteristics of fiber bragg grating[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [9] 张倩. 基于嵌入式光纤光栅的脉冲强磁体应变测量研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- Zhang Qian. Research on strain measurement of pulsed high intensity magnet based on embedded fiber bragg grating[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [10] 李杰燕, 张东生, 张倩. 基于嵌入式FBG的脉冲强磁体应变测量研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(12): 2378-2381.
- Li Jieyan, Zhang Dongsheng, Zhang Qian. Study on strain measurement of strong pulsed magnet based on embedded fiber bragg gratings[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(12): 2378-2381. (in Chinese) (责任编辑 陈东晓)

作者简介

柴葳(1989—)女, 学士, 工程师。主要研究方向: 热强度试验测控工作。

Tel: 15929962081 E-mail: 930161040@qq.com

郝庆瑞(1963—)男, 学士, 研究员。主要研究方向: 热强度试验测控工作。

Tel: 18092852815 E-mail: hqr123@tom.com

宝剑光(1989—)男, 硕士研究生, 工程师。主要研究方向: 热强度试验测控工作。

Tel: 13347413945 E-mail: bao623asri-avic@hotmail.com

Integrated Optical Fibre Temperature/Strain Sensor Subjected to the 800℃ Conditions

Chai Wei^{1,*}, Hao Qingrui¹, Bao Jianguang^{1,2}

1. China Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China

2. The University of Nottingham, Nottingham, UK

Abstract: High temperature strain is one of the key physical parameters in material and components under elevated temperature environments. With the development in the aerospace fields, the measurement of high temperature strain during the thermal structure test requires higher accuracy than ever before. However, conventional resistance strain gauge is hard to meet the requirements due to its various defects of complicated and low efficiency configuration process, high scattering brut data, glue induced transmission error and thermal output validation test error. This work is devoted to developing a novel integrated temperature/strain sensor based on combination of optical fibre Bragg Grating and extrinsic FP cavity, which is unnecessary to compensate the thermal output and without glue related strain transmission error. At present, temperature and strain measurement at 800℃ has been achieved. Results show that the sensor is stable and consistent.

Key Words: fiber Bragg Grating; FP cavity; temperature strain synchronous measurement; high temperature strain at 800℃

Received: 2019-09-27; Revised: 2019-11-11; Accepted: 2019-12-12

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2016ZD23015)

*Corresponding author. Tel.: 15929962081 E-mail: 930161040@qq.com