

应用于航天发动机的镀金光纤光栅 高温动应变测量技术

常莹^{1,2}, 杜永清¹, 陈晖¹, 朱柯钦¹, 马晓松¹, 邓锦荣¹

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 在航天发动机的地面热试车或高空模拟试验中, 通过准确测量高温管路的动应变参数, 可以有效掌握结构疲劳和裂纹情况, 从而提高发动机载荷能力分析和剩余寿命预测能力, 这对于掌握发动机的工作状态具有重要的工程意义。西安航天动力研究所针对该动应变测量需求, 提出采用镀金涂层的飞秒激光刻写光纤光栅(FBG)进行高温动应变的测量。通过高温温度特性试验, 开展了温度补偿技术研究, 明确了高温应变温度补偿方案; 在高温等强度梁上对高温应变测量准确度和温度补偿方案的可行性进行了验证。结果表明, 经过高温温度补偿以后应变测量误差在 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 范围内, 可以满足航天液体发动机高温动应变测量准确度的要求。该光纤高温应变技术目前在本研究所设计的多个型号发动机热试车中高温动应变的测量中获得了良好应用。该技术具有测量成本低、测量准确性高等特点, 可以在300~800℃范围内实现管路壁面动应变的准确测量。

关键词: 镀金光纤光栅; 航天发动机; 热试车; 高温动应变; 温度补偿

中图分类号: V416.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)06-0127-08

Application of gold-plated grating in high temperature dynamic strain measurement for aerospace engines

CHANG Ying^{1,2}, DU Yongqing¹, CHEN Hui¹, ZHU Kechin¹, MA Xiaosong¹, DENG Jinrong¹

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In the ground hot test or high-altitude simulation test of aerospace engines, it is necessary to accurately measure the dynamic strain parameters of high-temperature pipelines to determine the structural dynamic strength and mechanical properties of key high-temperature pipelines, which is of great significance for studying the performance and safety characteristics of engines. According to the

收稿日期: 2024-06-02 修回日期: 2024-10-29

基金项目: 国家装备预研基金(6140923020303)

作者简介: 常莹(1983—), 女, 博士, 研究员, 研究领域为先进测试技术, 光纤传感技术。

引用格式: 常莹, 杜永清, 陈晖, 等. 应用于航天发动机的镀金光纤光栅高温动应变测量技术[J]. 火箭推进, 2024, 50(6): 127-134.

CHANG Y, DU Y Q, CHEN H, et al. Application of gold-plated grating in high temperature dynamic strain measurement for aerospace engines[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(6): 127-134.

measurement requirements of high-temperature dynamic strain, Xi'an Aerospace Propulsion Institute proposes to use femtosecond laser engraved fiber Bragg gratings coated with gold for high-temperature dynamic strain measurement. Through high-temperature characteristic tests, temperature compensation technology research was carried out, and a high-temperature strain temperature compensation scheme was clarified. The accuracy of high-temperature strain measurement and the feasibility of temperature compensation scheme were verified on high-temperature equal strength beam. The results show that the strain measurement error is within the range of $\pm 5 \times 10^{-5}$ after high-temperature temperature compensation, which can meet the accuracy requirements of high-temperature dynamic strain measurement for aerospace liquid engines. The high-temperature strain technology with fiber has been well applied in the measurement of high-temperature dynamic strain during hot testing of multiple engine models designed by our research institute. It has the characteristics of low measurement cost and high measurement accuracy, and can accurately measure the high-temperature dynamic strain of pipeline working wall temperature within the range of 300 – 800 °C.

Keywords: gold-plated fiber grating; aerospace engines; hot test; high-temperature dynamic strain; temperature compensation

0 引言

在航天发动机的地面热试车或高空模拟试验中,部分高温管路的工作壁面温度高达 700 ~ 800 °C,与其常温下的结构强度和力学性能具有较大差异。在如此高温环境下,满足大量程范围、多测点数量、远传输距离并克服复杂的试车环境实现动态应变监测,对识别管道的结构疲劳和裂纹情况,提高发动机载荷能力和寿命,掌握发动机的工作状态具有重要的工程意义^[1-2]。传统的高温应变片由于价格昂贵、粘贴工艺复杂、测量准确度低等原因,阻碍了其在航天发动机热试车中的广泛推广和应用。

近年来,随着光纤传感耐高温特性的不断深入研究,光纤传感技术已成为了航天发动机热试车过程中高温动应变测量的一种重要技术手段。例如,采用光纤温度/应变复合传感器在结构热强度模拟试验中实现了 800 °C 的高温应变的测量^[3];采用光纤 FP 应变传感器在高温箱中进行了 900 °C 的高温应变的测量^[4],开展了 700 °C 环境下在高温陶瓷上进行 FBG 传感器的粘贴与测试^[5-6]。国内诸多高校如西北工业大学^[7]、西北大学^[8-9]、大连理工大学^[10]、武汉理工大学^[11-12]、合肥工业大学^[13]、北京理工大学^[14]、北京信息科技大学^[15],已开展了高温 FBG 传感器的刻栅工艺、耐高温特性和封装技术等方面的研究。但是,将该技术应用于工程实践并进

行高温光纤动态应变测量却鲜有报道。

目前,根据已报道的光纤高温应变传感技术按照传感器的结构可以分为两大类,分别是高温 FBG 传感器与高温法珀(FP)传感器。其中,高温 FP 传感器具有高灵敏度、高精度等特点被广泛用于单点式测量场景,但是现有解调技术难以实现 FP 的串行解调,从而无法满足于航天发动机热试车过程中多点动应变测量的需求;高温 FBG 传感器具有易于实现分布式测量,灵敏度高等特点,能够很好地匹配航天发动机热试车过程中大量程范围、多测点数量、远传输距离的需求。

本文针对发动机热试车和高空模拟试验中高温动应变的测量需求,深入开展了基于镀金 FBG 的高温应变测量技术研究。针对发动机热试车被测管路的高温复杂环境,采用飞秒刻栅技术对镀金光纤进行加工,并对栅区溅射金膜涂层,确保了传感器的耐高温特性与可靠性;针对发动机热试车被测管路应变测量中的温度应变交叉耦合问题,采用温度补偿技术以提高测量结果的准确度;通过高温等强度梁应变加载试验以及在航天发动机热试车中的应用结果,验证了采用镀金 FBG 进行高温动应变测量的可行性与可靠性,为航天发动机热试车极端高温下动态应变的测量提供了一种可靠的手段。目前该技术已经应用于管路壁温在 500 ~ 800 °C 范围内高温动应变的准确测量,并取得了良好的效果。

1 光纤光栅高温应变测量技术与验证

1.1 FBG 传感器工作原理

光纤布拉格光栅是通过改变光纤芯区折射率,产生不同的周期调制而形成的。布拉格光栅中心反射波长的基本表达式为

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

式中: λ 为光纤光栅的中心反射波长; n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率; Λ 为光栅的周期。当这种带有布拉格光栅的光纤受到拉伸或压缩以及所处温度发生变化时,其光栅周期 Λ 和纤芯有效折射率 n_{eff} 均会发生变化,从而反射光的中心波长也会改变,即光纤光栅的反射中心波长的变化可以反映外界被测信号的变化情况。

温度和应变共同作用下的光纤光栅布拉格波长的变化量可表示为

$$\Delta\lambda/\lambda = (1 - P_e)\varepsilon + (\alpha_s + \zeta_s)\Delta T \quad (2)$$

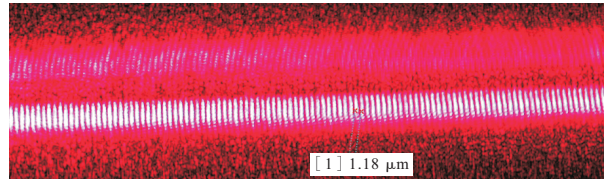
式中: ε 为光纤光栅的轴向应变; P_e 为有效弹光系数; ΔT 为温度变化量; α_s 为光纤的热膨胀系数; ζ_s 为光纤的热光系数。对石英光纤而言, $P_e \approx 0.22$, $\alpha_s \approx 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\zeta_s \approx 0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 故温度和应变引起的光栅中心波长的变化呈线性,通过测量反射光波长的偏移量即可得知 FBG 所受的应变或所处的温度值及其变化量。

1.2 镀金光纤飞秒刻栅技术

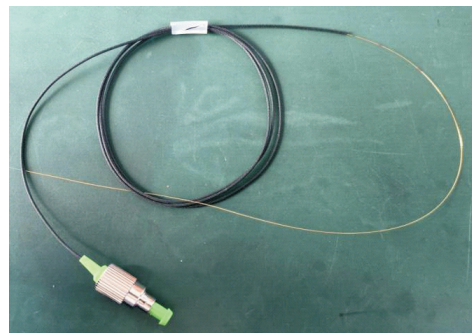
常用的光纤光栅是利用紫外激光和相位掩模板在掺锗光纤上刻写制成,一般称为 I 型光纤光栅,耐受温度为 $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。利用近红外飞秒激光直接在石英光纤内制备高反射率的光纤光栅(II 型光纤光栅),可将光纤光栅的耐温值提升至 $1\,000 \text{ } ^\circ\text{C}$ [16-25]。但传统光纤的聚酰亚胺涂层只适用于 $300 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以下的温度,无法为高温 FBG 提供有效保护。因此,本文选择在镀金光纤上进行飞秒激光刻栅操作,解决了高温条件下动应变测量的敏感栅区保护和传输问题。

飞秒激光无法透过镀金涂层直接刻写栅区,所以先利用硝酸洗掉待写入栅区的镀金涂层,然后进行栅区刻写工作,待刻栅工艺完成以后,再对栅区溅射金膜涂层,以提高镀金飞秒光栅的可靠性。结合测试部位对传感器尺寸的要求,设置栅区长度为 $L = 5 \text{ mm}$,反射率 $\geq 40\%$ 。所刻写的 Bragg

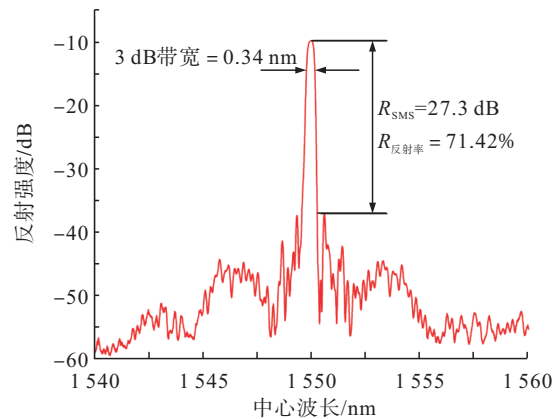
光栅采用基恩士超景深显微镜测量,其测量结果如图 1(a)所示。制备的 FBG 传感器如图 1(b)所示。利用光谱分析仪中测量其反射谱特性如图 1(c)所示,可得其初始中心波长为 $1\,549.92 \text{ nm}$,反射率为 71.42% ,半高全宽为 0.34 nm ,边模抑制比 $R_{\text{SMS}} = 27.3 \text{ dB}$ 。



(a) 飞秒激光刻写的 Bragg 光栅 ($3\,000\times$)



(b) 镀金涂层 FBG 传感器实物图



(c) 镀金 FBG 反射光谱图

图 1 飞秒激光刻写的镀金光栅传感器

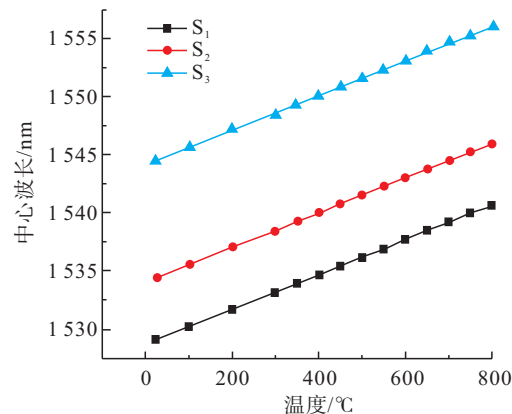
Fig.1 Gold-plated FBG sensor by femtosecond laser

1.3 镀金涂层 FBG 传感器温度补偿技术

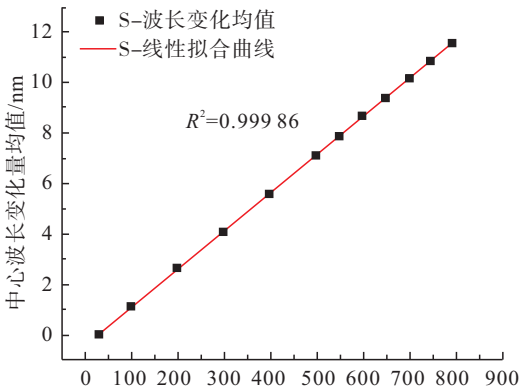
由 FBG 敏感机理可知,极端高温环境下,温度对光纤光栅带来的影响是不可忽略的,尤其是本文采用的是镀金涂层的光纤光栅,不同的涂层对于光纤光栅的温度性能的影响是有差异的,故高温温度补偿系数的确定是非常重要的。

常用的温度补偿的方式有参考光栅法和经验

公式法,本文采用参考光栅法获得了经验公式,确定了不同温度点下的温度修正值。所谓的参考光栅法,即将参考光纤光栅与测试用光纤光栅置于同一温度环境中,参考光纤光栅在整个测试过程中只响应温度带来的波长漂移,那么被测结构实际产生的应变带来的波长漂移变化量为 $\Delta\lambda = \lambda_t - \lambda_r$ 。本文选择多只镀金涂层 FBG 传感器开展高温温度特性试验,将其随温度变化发生的中心波长变化量取平均值,并进行线性拟合,如图 2 所示。图 2(a)为 3 支镀金 FBG 中心波长随温度的变化曲线图,将其中心波长变化量取均值,绘制曲线并进行拟合,结果如图 2(b)所示。由图 2 可知,镀金涂层 FBG 传感器随温度变化线性度很好,可以准确得出不同温度点下中心波长的漂移量。将不同温度点下测得的应变值(由中心波长漂移值计算得到的)减掉对应温度点下的波长漂移值即为被测结构件实际产生的应变值,即完成了高温应变的温度补偿。



(a) 中心波长

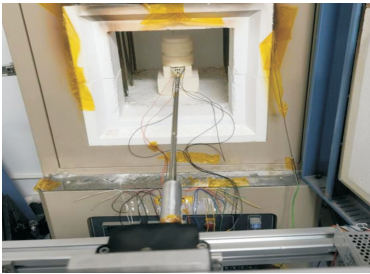


(b) 波长变化量均值

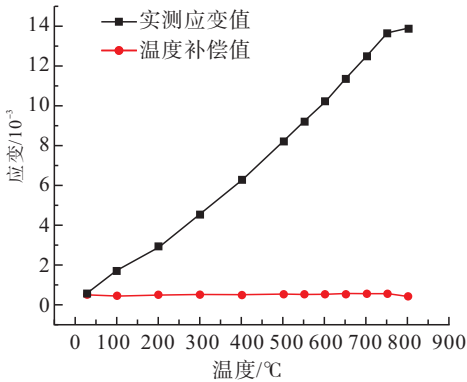
图 2 镀金 FBG 中心波长/波长变化量随温度变化曲线

Fig. 2 Temperature dependent curve of center wavelength/variation of gold-plated FBG

为了验证上述补偿数据的有效性,利用高温等强度梁、高温马弗炉对镀金涂层 FBG 传感器进行了高温固定应变加载试验,每个温度点下加载标准应变 5×10^{-4} ,最高温度 800 °C,如图 3(a)所示。利用图 2 得出的数据对某一镀金涂层 FBG 传感器高温应变的测量结果进行温度补偿,得出的实验曲线如图 3(b)所示。



(a) 高温应变加载试验



(b) 试验用镀金 FBG 温度补偿效果图

图 3 高温应变加载试验/试验用镀金 FBG 温度补偿效果图

Fig. 3 Comparison of temperature compensation for experimental gold-plated FBG

温度补偿后的数据如表 1 所示,由表 1 可知,温度补偿后应变变化范围为 $(-17.1 \sim 25.4) \times 10^{-5}$,温度补偿效果良好,测量准确度可以满足航天发动机高温动应变的 $\pm 10\%$ 测量要求,因此可应用于航天火箭发动机高温动应变测量数据修正中。

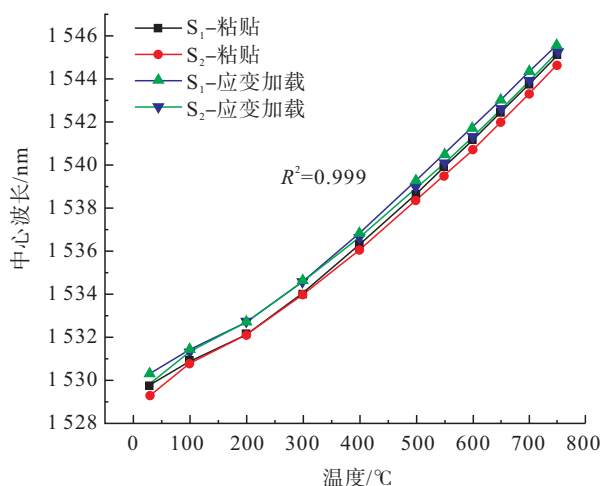
表 1 温度补偿后应变值

Tab. 1 Strain values of temperature compensation

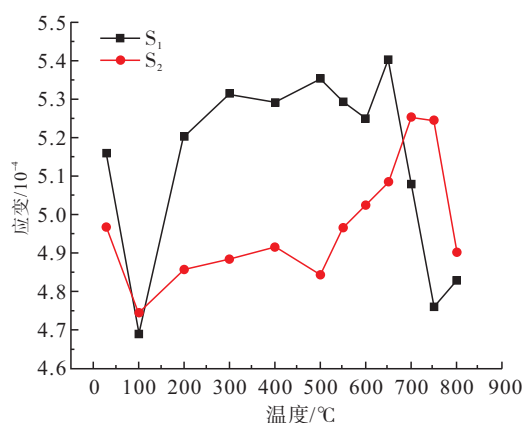
温度/°C	应变值/ 10^{-4}	温度/°C	应变值/ 10^{-4}
28.9	5.159	550	4.966
100.0	4.969	600	5.024
200.0	5.203	650	5.085
300.0	4.884	700	5.254
400.0	4.715	750	5.245
500.0	4.841	800	4.829

1.4 高温等强度梁应变加载试验研究与验证

为了充分验证高温应变测量的有效性与准确性,设计了高温应变加载试验,选了 2 支初始中心波长为 $1\,530 \pm 0.5\text{ nm}$ 的镀金飞秒光栅,将其粘贴在高温等强度梁上。具体试验设置如下:温度变动范围:室温 $\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$,在每个温度点下进行 5×10^{-4} 的应变加载,2 支镀金 FBG 分别标记为 S_1 和 S_2 , S_1 和 S_2 温度变化曲线和应变变化曲线如图 4(a) 所示。



(a) 两支镀金 FBG 温度变化曲线与应变变化曲线对比图



(b) S_1 、 S_2 实测应变值波动图

图 4 两支镀金光栅温度/应变变化曲线图

Fig.4 Temperature and strain curves of two gold-plated FBG

由图 4(a) 可知,从常温到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温度范围内, S_1 和 S_2 两支镀金 FBG 均可以很好地响应应变的变化,且应变测得值一致性很高;镀金 FBG 在 $300 \sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内线性度很好,其拟合系数 R^2 为 0.999,说明在 $300 \sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内镀金 FBG 可以线性响应应变的变化,完全可以通过 1.3 节中

得出的温度系数进行高温应变的修正,对上述 2 支镀金 FBG 进行温度补偿修正后,应变测量结果如图 4(b) 所示,室温 $\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内应变值最大变化可控制在 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 以内。

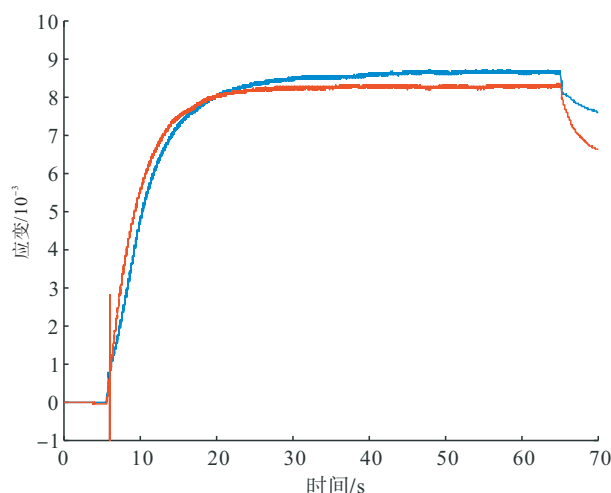
2 光纤高温动应测量技术在航天发动机热试车中的应用及分析

2.1 光纤光栅高温动应变测量系统

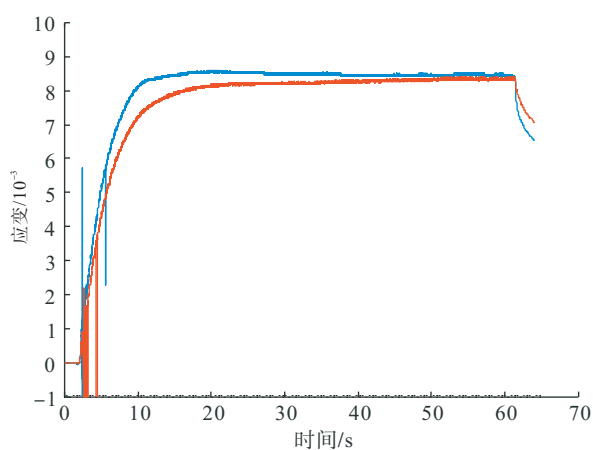
本文搭建的镀金 FBG 高温动应变测量系统,由镀金 FBG 传感器、光纤传输链路、高速光纤传感解调仪、数据处理及分析系统组成,其中高速光纤解调仪采样率为 10 kHz ,16 通道同时工作,可充分满足动应变测量的多点需求和高速采样率的要求。笔者已经将高温光纤动应变测量技术逐步推广应用于航天发动机热试车测试中,下面分别列举某 A、B 两个型号的高温动应变测试情况,并将测量结果的重复性和一致性进行简要分析;同时将高温动应变测量结果与理论仿真结果进行对比分析。

2.2 某 A 型号热试车测量结果及分析

某 A 型号航天发动机连续多次热试车对发动机进行考核,高温管路部位壁面最高温度约 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该型发动机试车高温测点共 16 个,本文列举了其中 2 个测点分别在二次不同的试车中测量的动应变响应曲线,如图 5 所示。图中纵坐标为应变值,横坐标为时间,试车时长为 60 s ,提前 $3 \sim 5\text{ s}$ 开始采集数据;整条曲线可以实时反映整个试车过程被测部位应变实时变化曲线。



(a) 测点 1 二次试车动应变响应曲线



(b) 测点 2 二次试车动应变响应曲线

图 5 测点 1 和测点 2 动应变响应曲线

Fig. 5 Dynamic strain response curve of measuring point 1 and point 2

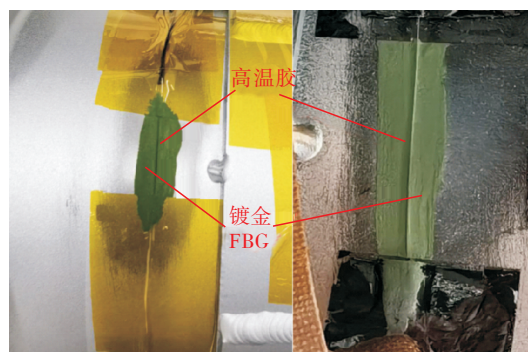
依据 1.3 节进行温度补偿,测点 1 与测点 2 在稳定阶段最大综合应变(综合应变包含材料的热应变和试车振动产生的结构应变,下文同)范围处于 $(2.4 \sim 3.0) \times 10^{-3}$,依据高合材料在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的材料特性参数,最大综合应力为 480 MPa ,远小于材料的许用应力。由图 5 可知,同一测点不同试车测量结果重复性、一致性非常好,可以准确反映整个试车过程的动态应变响应曲线,测得的高温动应变值可用于实际试车工况下的结构评估。

2.3 某 B 型号热试车测量结果及分析

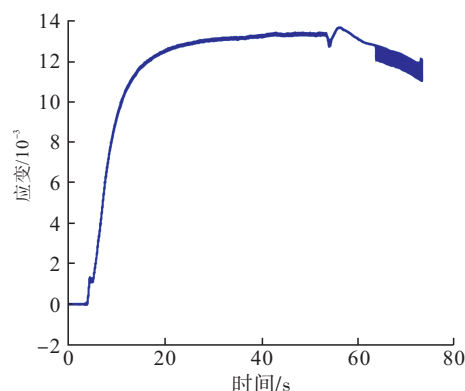
在某 B 型号航天发动机热试车过程中,某高温关键部位曾发生试车过程中烧穿的质量问题,其壁温温度高达 $725\text{ }^{\circ}\text{C}$,经过结构改进后对该部位进行了实际试车过程中高温动应变的测量,试车工况为内腔压力为 7 MPa 。某测点高温粘贴示意图如图 6(a)所示,高温应变实时数据如图 6(b)所示。

依据 1.3 节进行温度补偿,测点 3 在稳定阶段最大综合应变为 $(4.5 \sim 4.75) \times 10^{-3}$,依据高合材料在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的材料特性参数,最大综合应力为 528 MPa ,远小于材料的许用应力;该测点在稳定阶段结构变形产生最大应变为 1.4×10^{-3} ,依据高合材料在 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的材料特性参数,最大应力为 195 MPa 。某高温部件仿真应力分布如图 6(c)所示。通过图 6(b)与图 6(c)可知,实验测试结果与相同内腔压力下的仿真结果基本吻合,航天发动

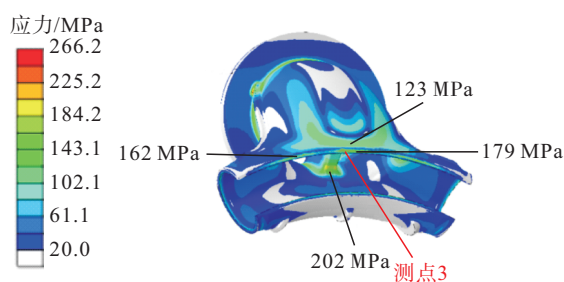
机热试车动应变测量结果基本可以准确反映整个试车过程的动态应变响应曲线,测得的高温动应变值可用于实际试车工况下的结构评估。



(a) 某高温测点粘贴示意图



(b) 测点 3 高温动应变响应曲线



(c) 某高温部件仿真应力分布图

图 6 某高温测点动应变响应曲线及应力仿真图

Fig. 6 Dynamic strain response curve and stress simulated diagram of a high temperature measuring point

3 结论

本文针对发动机热试车和高空模拟试验中高温动应变的测量需求,深入开展了基于镀金 FBG 的高温应变测量技术研究,为航天发动机热试车极端高温下动应变的测量提供了一种可靠的手段,主要结论如下。

1)依据航天发动机热试车测点多、距离远、极端高温的复杂环境,提出采用飞秒刻栅技术对镀金光纤进行加工,并对栅区溅射金膜涂层的方式进行高温动应变的测量,根据多次试车测量结果显示,上述方式保证了传感器的耐高温特性与可靠性。

2)基于 FBG 的敏感机理,开展了镀金涂层 FBG 传感器温度补偿技术研究,确定了高温温度补偿方案和补偿系数,经验证可以很好地解耦温度对应变测量结果的影响,应变测量结果可以准确地反映整个试车过程中高温管路的综合应力变化情况,可据此开展实际试车工况下的管路寿命和结构评估工作。

3)后续需要建立高温胶粘贴模型,通过有限元仿真分析,规范镀金 FBG 的粘贴工艺,量化粘贴参数,进一步提高测量结果的准确度;同时开发实时在线处理系统,可以为重复使用发动机故障诊断系统提供实时准确的应力应变值。

参考文献

- [1] 王凯,王东方,刘友强,等. 变形高温合金在液体火箭发动机中的应用进展及展望[J]. 火箭推进, 2024, 50(1): 57-66.
WANG K, WANG D F, LIU Y Q, et al. Application and prospect of wrought superalloy in liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(1): 57-66.
- [2] 赵万明. 液体火箭发动机地面试验中关键参数测量方案设计[J]. 火箭推进, 2002, 28(1): 27-32.
ZHAO W M. Design of key parameters measurement scheme in liquid rocket engine ground test[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2002, 28(1): 27-32.
- [3] 柴葳,郝庆瑞,宝剑光. 光纤温度/应变复合传感器及其在 800 °C 高温下的应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(2): 66-71.
CHAI W, HAO Q R, BAO J G. Integrated optical fibre temperature/strain sensor subjected to the 800 °C conditions[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(2): 66-71.
- [4] 李爱武,单天奇,国旗,等. 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展[J]. 中国光学(中英文), 2022, 15(4): 609-624.
LI A W, SHAN T Q, GUO Q, et al. Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors [J]. Chinese Optics, 2022, 15 (4): 609-624.
- [5] 王福川,刘畅. 高温光纤传感器在热结构温度测试中的应用[J]. 自动化应用, 2023(9): 172-174.
WANG F C, LIU C. Application of high temperature optical fiber sensor in temperature measurement of thermal structure [J]. Automation Application, 2023 (9): 172-174.
- [6] 孟松鹤,杜翀,解维华,等. 高温光纤传感器在热结构温度和应变测试中的应用[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(5): 701-705.
MENG S H, DU C, XIE W H, et al. Application of high-temperature optical fiber sensor in temperature and strain testing of hot structure[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(5): 701-705.
- [7] 吴家骥. 基于光纤 F-P 传感器高温应变测量技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2021.
WU J J. Research on high temperature strain measurement technology based on fiber optic F-P sensor [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2021.
- [8] 田琴. 光纤高温应变双参量同时精确测量传感器关键技术研究[D]. 西安:西北大学, 2020.
TIAN Q. Research on key technologies of optical fiber dual-parameter simultaneous accurate measurement sensor for high temperature strain[D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [9] 杨杭洲,刘鑫,南朋玉,等. 光纤高温应变传感器研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10): 1006002.
YANG H Z, LIU X, NAN P Y, et al. Progress in research of optical fiber high temperature and strain sensor (invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51 (10): 1006002.
- [10] LI G Y, GUAN B O. The strain response of chemical composition gratings at high temperatures[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(2): 025204.
- [11] 张兴,王俊杰,彭伟华. 内嵌式微腔光纤法布里-珀罗应变传感器的研制[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(1): 80-83.
ZHANG X, WANG J J, PENG W H. Research on embedded micro cavity optical fiber fabry-perot strain sensor[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(1): 80-83.
- [12] 刘繁,李志强,谭跃刚,等. 光纤光栅高温应变测量及工作温区调控方法[J]. 压电与声光, 2023, 45(4):

- 579-583.
- LIU Y, LI Z Q, TAN Y G, et al. High temperature strain measurement and working temperature zone regulation method of fiber Bragg grating[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2023, 45(4): 579-583.
- [13] 杨润涛. 基于光纤传感的高超声速飞行器表面温度、应变及压力监测技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- YANG R T. Research on surface temperature, strain and pressure monitoring technology of hypersonic vehicle based on optical fiber sensing[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [14] 江毅, 贾景善, 付雷, 等. 外腔式光纤 Fabry-Perot 干涉型高温应变传感器[J]. *光学技术*, 2017, 43(5): 423-426.
- JIANG Y, JIA J S, FU L, et al. A high-temperature strain sensor based on extrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. *Optical Technique*, 2017, 43(5): 423-426.
- [15] 丁旭东, 张钰民, 宋言明, 等. 纯石英芯光纤光栅高温应变响应特性[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106003.
- DING X D, ZHANG Y M, SONG Y M, et al. Response characteristics of pure-quartz-core fiber Bragg grating under high temperature strain[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106003.
- [16] LAAROSSI I, ROLDÁN-VARONA P, QUINTELA-IN-CERA M A, et al. Ultrahigh temperature and strain hybrid integrated sensor system based on Raman and femtosecond FBG inscription in a multimode gold-coated fiber[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 37122.
- [17] 丁宝艳, 赵强, 王相飞, 等. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅研究进展[J]. *光通信研究*, 2022(3): 31-38.
- DING B Y, ZHAO Q, WANG X F, et al. Review of fiber Bragg grating fabricated by femtosecond laser processing[J]. *Study on Optical Communications*, 2022(3): 31-38.
- [18] 吕瑞东, 陈涛, 范春松, 等. 飞秒激光制备光纤 Bragg 光栅在光纤激光器中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111426.
- LYU R D, CHEN T, FAN C S, et al. Application of fiber lasers based on femtosecond laser inscribed fiber Bragg gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111426.
- [19] ECKE W, LATKA I, WILLSCH R, et al. Fibre optic sensor network for spacecraft health monitoring[J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 974-980.
- [20] BURGMEIER J, SCHIPPERS W, EMDE N, et al. Femtosecond laser-inscribed fiber Bragg gratings for strain monitoring in power cables of offshore wind turbines[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(13): 1868-1872.
- [21] LIU N L, LIU S H, LU P X. A femtosecond-laser-induced fiber Bragg grating with supermode resonances for sensing applications[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(9): 094204.
- [22] 廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 123-131.
- LIAO C R, HE J, WANG Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 123-131.
- [23] YIN S Z. Dual-wavelength FBG inscribed by femtosecond laser for simultaneous measurement of high temperature and strain[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8): 675-678.
- [24] 陈梓泳, 何俊, 徐锡镇, 等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 15-23.
- CHEN Z Y, HE J, XU X Z, et al. Fabrication of fiber Bragg grating high temperature sensor array by femtosecond laser point-by-point method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 15-23.
- [25] 曹后俊, 司金海, 陈涛, 等. 飞秒激光制备异质光纤光栅的温度应变双参数传感器[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0702009.
- CAO H J, SI J H, CHEN T, et al. Temperature and strain dual-parameter heterogeneous fiber Bragg grating sensor made by femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0702009.