

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.02.09

热端部件高温动应变光纤传感测量技术研究

陈爽*, 隋广慧, 张欣颖, 张鹏浩, 黄彩霞

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为精确测量热端部件高温动应变, 系统开展基于光纤传感技术的高温动应变测量方法研究。采用飞秒激光刻写耐高温光栅敏感结构, 通过等离子热喷涂技术实现传感器在基底材料表面的安装, 基于模拟热端部件工况的高温静应变校准装置和动应变校准装置进行传感器性能测试与评价。用于传感器高温工作耐受能力和应变测量精度考核验证的轮盘试验器试验结果表明: 该传感器可耐受 650 °C 高温环境, 并且传感器离心应变实测值与设计仿真值误差小于 5%; 用于叶片振动载荷下动应变测量能力考核验证的高低周疲劳试验器试验结果表明: 该传感器测得的共振频率测量值与理论值偏差约为 1.3%, 动应变幅值与设计预估量级相近。基于光纤传感技术的高温动应变测量方法为精确评估航空发动机热端部件应力分布和疲劳寿命、提前识别危险点提供了重要技术支撑。

关键词: 传感器测试; 热端部件; 高温动应变; 光纤传感; 应力分布; 疲劳寿命; 飞秒激光; 等离子热喷涂

中图分类号: TB9; TP212; V23

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 02-0109-11

Research on high-temperature dynamic strain measurement technology for hot-section components using optical fiber sensing

CHEN Shuang*, SUI Guanghui, ZHANG Xinying, ZHANG Penghao, HUANG Caixia

((AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To accurately measure the high-temperature dynamic strain of hot-section components of aero-engines, this paper systematically investigates a high-temperature dynamic strain measurement method based on fiber optic sensing technology. High-temperature-resistant grating structures, inscribed using femtosecond lasers, were installed and fabricated on the substrate surface via plasma spraying technology. The performance of the sensors was tested and evaluated using high-temperature static and dynamic strain calibration rigs that simulate the operating conditions of hot-section components. Finally, validation was conducted through two aero-engine test rig experiments. The results from disk rig tests designed to assess high-temperature endurance and measurement accuracy demonstrated that the sensors could withstand environments up to 650 °C, with a deviation of less than 5% between measured centrifugal strain and design simulations. The results from high- and low-cycle fatigue rig tests designed to verify dynamic strain measurement capabilities under blade vibration loads indicated a discrepancy of approximately 1.3% between measured and theoretical resonance frequencies, while the dy-

收稿日期: 2026-03-03; 修回日期: 2026-04-07; 录用日期: 2026-04-08; 发表日期: 2026-04-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFB3208500)

引用格式: 陈爽, 隋广慧, 张欣颖, 等. 热端部件高温动应变光纤传感测量技术研究[J]. 计测技术, 2026, 46(2): 109-119.

Citation: CHEN S, SUI G H, ZHANG X Y, et al. Research on high-temperature dynamic strain measurement technology for hot-section components using optical fiber sensing [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(2): 109-119.



dynamic strain amplitudes were consistent with the predicted design magnitudes. The high-temperature dynamic strain measurement method based on fiber optic sensing technology provides important technical support for accurately assessing stress distribution and fatigue life of hot-section components in aero-engines and identifying danger points in advance.

Key words: sensor testing; hot-section components; high-temperature dynamic strain; optical fiber sensing; stress distribution; fatigue life; femtosecond laser; plasma thermal spraying

0 引言

航空发动机作为一种工作在高温、高压、高转速环境下的动力机械,其叶片等热端部件(尤其是涡轮叶片根部)承受高温、高转速、复杂气动激振力和大离心载荷的复合作用,容易发生断裂故障。一旦叶片或关键热端部件发生疲劳断裂,往往导致非包容性故障,可能击穿机匣、切断油路或控制系统,造成机毁人亡的灾难性后果。随着航空发动机技术的快速发展,仅靠数值仿真已无法满足精度验证要求,必须通过动应力测量获取工作状态下的真实应力水平,以精确评估其应力分布和疲劳寿命,提前识别危险点,从根本上预防结构失效^[1]。

目前,高温电阻应变片测量是发动机高温应变测试中最常用的方法。该方法将电阻应变片安装在被测零件表面,由信号采集与分析系统获取应变片输出值的变化,并换算成应变值,得到所需要的应变或应力值。电阻应变片的优点是动静应变均可测量、误差较小,缺点是高温下应变片的灵敏度系数改变、热输出与热滞后现象加剧,且安装后会影晌被测零件的结构阻尼、频率、强度和寿命。

光纤传感器具有耐高温、尺寸小、抗电磁干扰等显著优势,可有效用于金属及复合材料热端部件的结构应变测试,其灵活的柔性结构设计和安装方式适配涡轮叶片等多种曲面零件的表面形状,已成为国际上解决高温应变测量问题的重要发展方向^[2-5]。为实现热端部件高温动应变的精确测量,本文开展基于光纤传感技术的高温动应变测量方法研究:采用等离子热喷涂工艺制备热膨胀系数匹配性良好的耐高温陶瓷复合涂层,对柔性光纤传感器进行固定,实现光纤传感器在部件表面的高可靠性安装;利用研发的传感器开展轮

盘试验器试验和高低周疲劳试验器试验,对其应用效果进行分析与评价。

1 光纤应变传感系统工作原理

光纤传感的基本原理:利用外界因素(即被测参量,如应变、温度、压力、位移、转动、电场、磁场等)的变化直接或者间接地改变光波在光纤中传播时表征光波的特征参量(振幅、相位、偏振态、波长等),从而将光纤作为传感元件来探测各种物理量^[6]。

根据调制方式的不同,光纤传感器分为光强调制、偏振态调制、相位调制和波长调制四大类,综合考虑几种不同类型的光纤传感器的技术成熟度和应用拓展能力,本研究团队选用波长调制的光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器进行航空发动机热端部件高温动应变测量。

光纤光栅传感器的测量原理:当一宽谱光源入射进入光纤后,满足式(1)的Bragg波长会由光纤光栅反射回来,当外界被测量(如温度、应变)变化引起光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 变化时,会导致反射的Bragg波长 λ_B 发生变化,通过测量 λ_B 的变化量即可推导得到外界被测量的变化。光纤光栅传感系统的基本构成如图1所示。

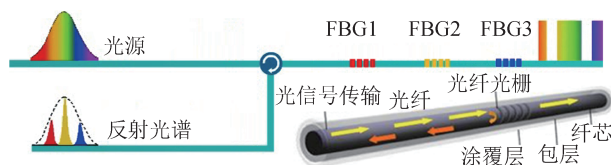


图1 光纤光栅传感系统的基本构成

Fig.1 Basic composition of FBG sensing system

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

光纤光栅自身的温度会随着所处外界环境温度变化而变化,当外界温度改变时,光纤光栅中心波长为

$$\Delta\lambda_B = 2 \left\{ \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \alpha} \right\} \lambda + 2n_{\text{eff}} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \Delta T \quad (2)$$

式中： T 为温度， $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 为热膨胀引起的弹光效应， α 为光纤的热膨胀系数。

光纤光栅的热光系数为 ξ ，可得光纤光栅灵敏度系数的表达式为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot \Delta T} = \xi + \frac{1}{n_{\text{eff}}} K_{\text{wg}} \cdot \alpha + \alpha \quad (3)$$

式中： K_{wg} 为波导效应引起的光纤光栅波长漂移系数。

依据上述理论及公式^[7-8]，多次测试光纤光栅敏感结构的温度特性，确定其灵敏度系数，构建出敏感结构高温环境下的温度感知模型。

采用光谱法实现光纤传感器信号的采集与解调。光谱采集基于衍射光栅分光原理，核心器件为衍射光电探测器，通过该器件将传感器反射光谱在波长域展开，利用线阵探测器获取传感器FBG光谱，采用峰值拟合算法计算光栅中心波长的变化量，实现对应变和温度信息的解调。基于光谱法的解调仪工作波长为1 525 ~ 1 565 nm，采样频率为10 kHz，波长分辨力优于1 pm。

针对高温测量需求，采用基于狭缝整形的逐面法，通过飞秒激光进行传感器FBG敏感结构制备^[9]，基于1.7 mm狭缝宽度参数制备得到的FBG栅长为2 mm，反射率优于90%，FBG光栅结构形态见图2，传感器光栅光谱见图3。

2 传感器设计及制作

2.1 基于热喷涂的传感器安装与制作方法

基于等离子热喷涂工艺和氧化锆陶瓷基底料制备的传感器安装涂层致密，在高温环境下不易氧化，可有效实现高温下动应变的测量，该技术已在相关领域推广应用^[10-12]。

传感器安装结构设计见图4，光纤埋在中间层（过渡层）与面层（涂层）界面处，具体制作过程如下：对基底表面进行预处理后，喷涂底层（隔热涂层）并送入真空热处理炉内进行真空扩散处理，取出后按照设计要求进行中间层制备，然后将光纤应变传感器预固定到中间层上表面，进行面层的喷涂安装，最后完成保护结构去除及清洗吹干。

通过多批次传感器安装制作可知，三个主要

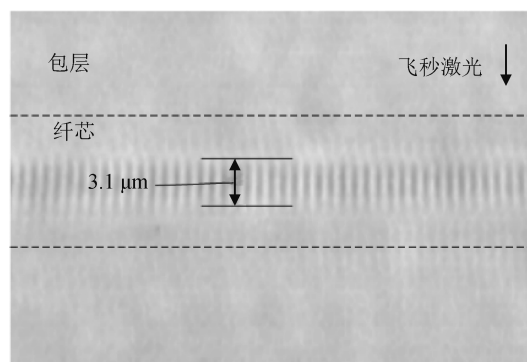


图2 FBG光栅结构形态

Fig.2 Structure morphology of FBG

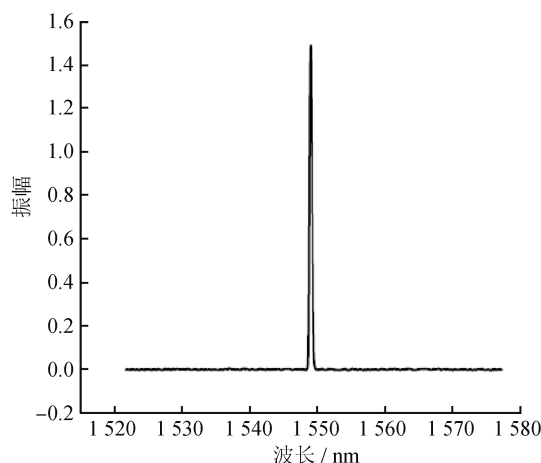


图3 传感器光栅光谱图

Fig.3 Spectrogram of FBG

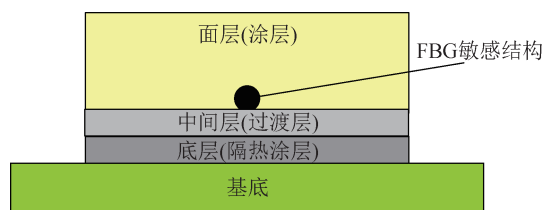


图4 光纤传感器安装结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of sensor installation structure

结构层材料成分配比对传感器的性能影响较大，是最关键的工艺环节。

高温环境下使用的底层需要具备良好的高温（温度大于1 000 °C）热稳定性和抗氧化性能，热膨胀系数介于陶瓷面层与基底之间，通过等离子喷涂获得粗糙的涂层表面，以提高与陶瓷层的结合力，降低面层与基底的不匹配性。根据多次工艺

试制, 最终采用 Amdry386-3 材料作为底层。

中间层的作用是缓冲基底结构材料与面层之间的热膨胀系数差异, 通过多轴机械手夹持的等离子喷枪, 在零件表面的待安装区域喷涂中间层。中间层材料选用热膨胀系数高于底层、并且与石英光纤热膨胀系数接近的热稳定性较高的 $3Al_2O_3-2SiO_2$ 粉末, 喷涂过程中使用压缩空气对零件其他部分进行冷却, 喷涂至设定厚度。

面层材料一般选用氧化锆系列陶瓷材料(最高使用温度 $1\ 200\ ^\circ C$)或硅酸盐陶瓷材料(最高使用温度 $1\ 350\ ^\circ C$)。本次选择 Metco204NS-G、Metco204NS 和 Metco6157 三种不同粒度区间的典型材料(材料成分及颗粒尺寸见表 1)进行喷涂试验对比, 通过评价涂层宏观力学性能及显微组织, 进行适宜的安装用面层材料选择, 对比分析试验结果见表 2。对制备完成的三种涂层进行金相组织形貌检测。1#、2#、3# 试验获得的隔热涂层剖面金相组织形貌分别如图 5、图 6、图 7 所示。

表 1 材料成分及颗粒尺寸

Tab.1 Material composition and particle size

涂层材料	材料成分	颗粒尺寸	
		颗粒范围/ μm	D 90%/ μm
Metco204NS-G	ZrO ₂ 8Y ₂ O ₃	-125 ~ +11	90 ~ 105
Metco204NS	ZrO ₂ 8Y ₂ O ₃	-147 ~ +45	107 ~ 120
Metco6157	Yb ₂ Si ₂ O ₇	-90 ~ +11	78 ~ 83

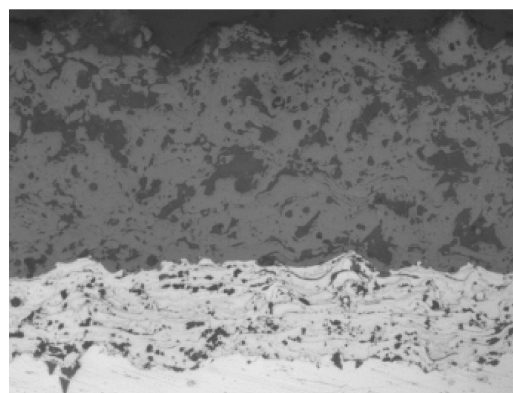
式中: D 90%/ μm 表示在该粉末样品中, 90%的颗粒直径都小于或等于该数值。

表 2 对比喷涂试验结果

Tab.2 Comparative results of spraying test

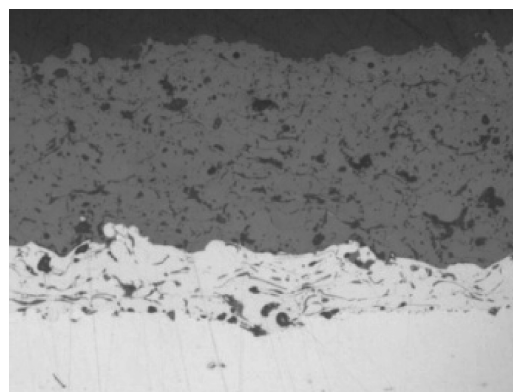
编号	面层材料	结合强度/ MPa	断裂位置	显微组织
1#	Metco204NS-G	12.8	面层	见图 5
2#	Metco204NS	24.9	面层	见图 6
3#	Metco6157	31.1	面层	见图 7

根据图 5 至图 7 可知: 面层组织中含有一定量的孔隙, 分布有细微裂纹, 且不同面层粉末所制备的涂层孔隙率差异较大——Metco204NS-G 颗粒直径较大, 所制备的涂层孔隙率较高、孔隙直径较



注: 底层为 Amdry386-3, 底层孔隙率小于 3%, 无裂纹、分层, 界面污染小于 10%, 面层为 Metco204NS-G, 面层孔隙率为 25%, 有平行于基底表面的横向微裂纹, 无贯穿至底层的纵向裂纹。

图 5 1# 试验获得的隔热涂层剖面金相组织形貌
Fig.5 Microstructure of the thermal barrier coating cross-section obtained in Test 1

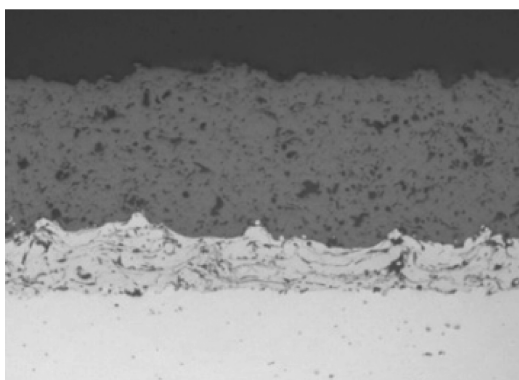


注: 底层为 Amdry386-3, 底层孔隙率小于 3%, 无裂纹、分层, 界面污染 9%, 面层为 Metco204NS, 面层孔隙率为 15%, 有平行于基底表面的横向微裂纹, 无贯穿至底层的纵向裂纹。

图 6 2# 试验获得的隔热涂层剖面金相组织形貌
Fig.6 Microstructure of the thermal barrier coating cross-section obtained in Test 2

大、涂层结合强度较低; Metco204NS 与 Metco6157 两种材料的颗粒直径范围比较接近, 涂层孔隙率比较接近, 对比发现采用 Metco6157 制备的涂层最大孔隙直径小、孔隙分布均匀、涂层结合强度更高, 这与该粉末粒度范围更窄、粉末尺寸更均匀有关。结合初步试验结果, 选择 Metco6157 材料作为安装用面层材料进行后续工艺试验。

制作的试验件分为有/无光纤埋入两类, 用于后期性能测试对比。图 8 为喷涂安装完成的光纤应



注：底层为 Amdry386-3，底层孔隙率小于3%，无裂纹、分层，界面污染小于10%，面层为 Metco6157，面层孔隙率为12%，有平行于基底表面的横向微裂纹，无贯穿至底层的纵向裂纹。

图7 3#试验获得的隔热涂层剖面金相组织形貌
Fig.7 Microstructure of the thermal barrier coating cross-section obtained in Test 3

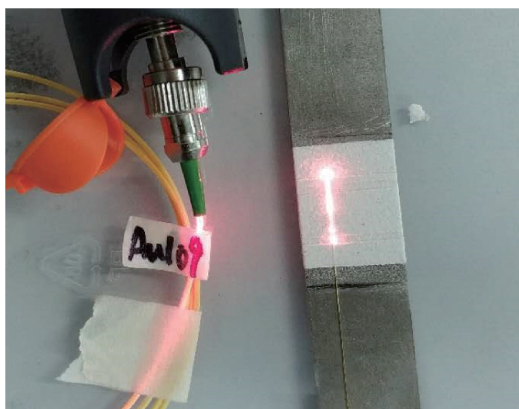


图8 光纤应变传感器安装后照片
Fig.8 Photograph of the installed sensor

变传感器，图9为同批次制作样件的安装结构剖面显微照片。

对无光纤埋入的涂层样件(1#)与埋有FBG光纤的传感器样件(2#)进行检测对比，结果见表3。弹性模量对比结果如图10所示。

分析表3及图10可知：

1) 使用WDW-100A型万能试验机对涂层拉伸结合强度进行检测，结果显示：正常涂层平均结合强度27.5 MPa，光纤埋入后的涂层平均结合强度24.8 MPa，结合强度降低幅度约10%，符合隔热涂层的安全使用要求。

2) 使用KRZ-S05型自动风冷热震试验机对涂层进行热震性能检测，结果显示：涂层无裂纹、

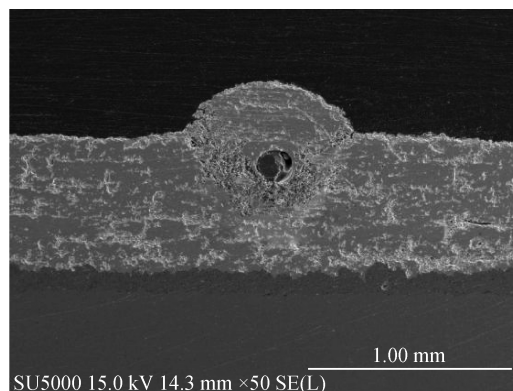


图9 安装结构剖面显微照片

Fig.9 Micrograph of the installation structure cross-section

表3 检测结果

Tab.3 Test results

检测对象	拉伸强度 / MPa	热震性能(风冷)
无光纤埋入试验件	27.5	1 100 °C条件下，500次涂层无明显破坏(脱落面积小于10%)
有FBG光纤埋入试验件	24.8	1 100 °C条件下，500次涂层无明显破坏(脱落面积小于10%)

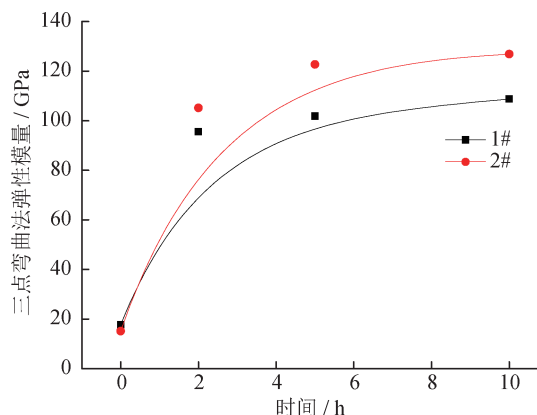


图10 弹性模量对比结果

Fig.10 Comparison results of elastic modulus

无剥落，符合隔热涂层的安全使用要求。

3) 使用三点弯曲法，测量在1 400 °C烧结0、2、5、10 h的有光纤涂层与无光纤涂层的弹性模量，结果显示：光纤埋入对涂层的弹性模量产生了一定影响，涂层弹性模量虽降低约10%，但仍满足使用要求。

2.2 应变传递效率分析

根据热喷涂工艺方法及喷涂层结构，建立应

变传递结构图(见图11),根据对称性,可将其简化为中心对称平面应变模型。安装层最下方是底层,面层高于传感器的部分不会对传感器的示数造成影响。待测试验件变形时,带动底层发生剪切变形;底层将剪力传递给面层,面层的剪力作用在传感器表面;传感器因面层剪力作用产生轴力,进而使传感器产生正应变^[13-14]。

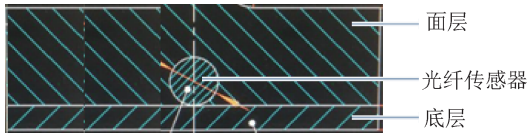


图11 光纤传感器安装结构简化图

Fig.11 Simplified diagram of the installation structure of fiber optic sensor

为简化计算,面层高度取到传感器切线位置,但计算时仍会考虑上方面层对传感器表面的剪力作用。理论模型如图12所示。

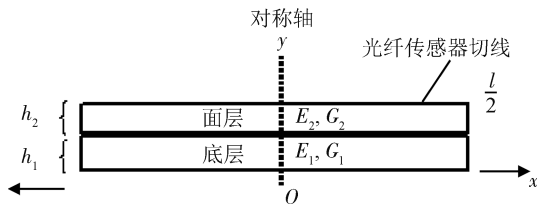


图12 理论模型

Fig.12 Theoretical model

变形后的形状见图13,其中, h_1 为底层高度, h_2 为面层高度(等于传感器半径), E_1 为底层杨氏模量, E_2 为面层杨氏模量。假设面层和底层变形后的边界均为斜面,传感器伸长了 $\Delta l_1/2$,面层下表面比上表面多伸长 $\Delta l_2/2$,底层下表面比上表面多伸长 $\Delta l_3/2$ 。

对图13进行受力分析及应变传递计算,最终得到应变传递效率公式,即

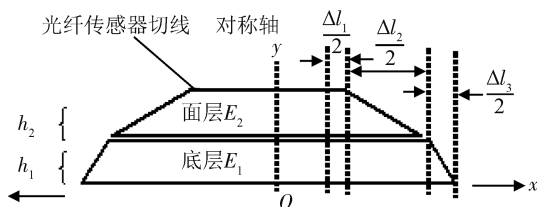


图13 理论模型(变形后)

Fig.13 Theoretical model (after deformation)

$$\eta = \frac{\Delta l_1}{\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3} = \frac{1}{1 + 12h_2EA/(\pi dG_2l^2) + 12h_1EA/(\pi dG_1l^2)} \quad (4)$$

式中: E 为传感器弹性模量, A 为传感器横截面积, d 为传感器直径, G_1 为底层剪切模量, G_2 为面层剪切模量, l 为光纤传感器长度。

本理论公式所用假设:①将“涂层-光纤-待测试验件基底”结构简化为中心对称的平面应变模型;②面层和底层变形后为斜面;③面层和金属底层的剪切应变随 x 方向呈线性变化;④底层和待测试验件之间无滑移。

通过式(4)分析可知:增大 l 、减小 d 、减小 E 、增大 G_1 和 G_2 、降低传感器距离待测试验件距离,能够使应变传递效率更接近1。

3 传感器实验室测量与评价

3.1 应变量类型与分析方法

航空发动机涡轮叶片等热端部件在工作过程中承受离心负荷、热负荷、振动负荷、热冲击负荷等多种负荷的综合作用,可将其归纳为热载和力载两种类型。热载引起结构的热变形,属于静态应变。力载分为两种形式,一种是准静态力载,如离心负荷,可引起结构静态变形(静应变);另一种是动态力载,如振动,可引起结构动态变形(动应变)。

被测结构在综合负荷作用下产生的应变通过安装层传递到光纤传感器,光纤传感器初始波长为 λ 。光纤传感器波长变化分别为热载引起的静应变 $\Delta\lambda_T$ 、力载引起的静应变 $\Delta\lambda_1$ 和力载引起的动应变 $\Delta\lambda_2$,光纤传感器材料热膨胀引起的波长变化为 $\Delta\lambda_1$ 。

光纤传感器在使用中牢固安装于被测结构表面,且待测金属试验件热膨胀系数远大于光纤传感器材料热膨胀系数,因此 $\Delta\lambda_T$ 包含 $\Delta\lambda_1$ 。在温度 T 下,光纤传感器感测到结构应变 ε 为

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\lambda_T + \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2}{\lambda} = \frac{\alpha \cdot \Delta T + \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2}{\lambda} \quad (5)$$

根据式(5)可知:利用 T 及 α 两个参数可分离热载与力载引起的应变。信号分析方法为:基于

时域分析处理静应变, 该信号表现为均值漂移的缓变信号, 包含热载静应变与力载静应变, 通过温度补偿与解耦得到单纯力载引起的静应变值; 基于频域分析处理力载引起的动应变, 该信号表现为高频快速的波动信号, 不包含温度的直接叠加分量, 可通过带通滤波或解析模态分解进行单独分析。基于上述分析, 分别开展高温静应变与动应变的测量与评价工作。

3.2 高温静应变测量与评价

高温静应变测量与评价采用图 14 所示的校准装置实现^[15], 主要考核光纤传感器的高温耐受能力和在高温下应变测量的准确性。装置温度升至 700 °C 后, 光纤传感器波长初始值为 1 565.5 nm (见图 15); 将校准装置加载至 ± 1 000 $\mu\epsilon$, 共进行 3 次往返程; 传感器应变测试数据见图 16。计算结果显示: 传感器在 700 °C 高温环境下的测量结果为非线性 1.59%、迟滞 0.84%、重复性 2.59%、满量程误差 3.19%。测量误差不高于 5%, 可满足航空发动机等工程应用环境的测试需求。

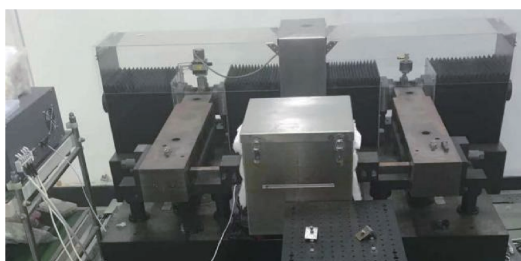


图 14 高温静应变校准装置测试图

Fig.14 Test setup of high-temperature static strain calibration

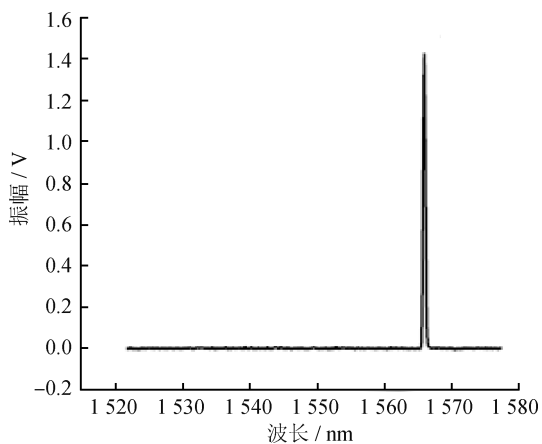


图 15 700 °C 下传感器光谱图

Fig.15 Sensor spectrogram at 700 °C

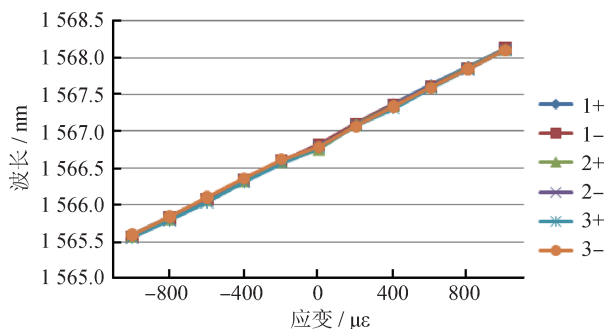


图 16 传感器应变测试数据曲线图

Fig.16 Curve diagram of sensor strain test data

3.3 动应变测量与评价

动应变测量与评价采用正弦式动态应变溯源校准装置实现^[16](见图 17), 主要考核光纤传感器的动应变测量准确性。校准点为 1 kHz、320 Hz 和 80 Hz 三个频率点下的 200、400、600、800、1 000 $\mu\epsilon$ 应变加载点。动应变测量示值误差如表 4 所示。

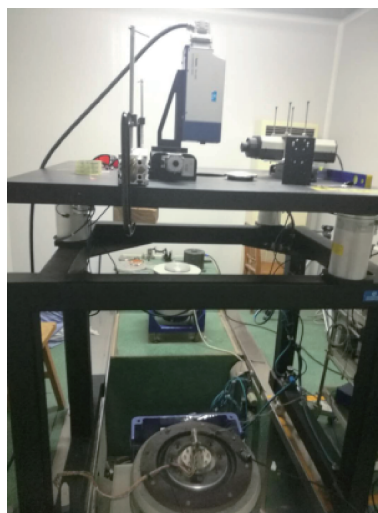


图 17 共振梁校准系统装置

Fig.17 Resonant beam calibration system device

计算结果显示, 在 80 ~ 1 000 Hz 条件下, 传感器测量得到的应变值与共振梁标准应变值之间的误差不超过 ± 5%, 可以满足航空发动机等工程应用环境的测试需求。

4 发动机试验器现场试验验证

设计轮盘试验器试验和高低周复合疲劳试验器试验两种试验, 等效模拟发动机高速旋转时的试验状态, 轮盘试验器试验主要考核传感系统的

表4 动应变测量示值误差

Tab.4 Indication error of dynamic strain measurement

频率点 / Hz	加载应变 / $\mu\epsilon$	传感器应变 / $\mu\epsilon$	示值误差 / %
1 001	203.8	199.9	-1.9
	389.6	385.7	-1.0
	620.3	618.4	-0.3
1 023.4	834.2	826.6	-0.9
	1 023.4	1 034.7	1.1
	188.3	194.1	3.1
319	393.2	404.8	3.0
	607.1	617.7	1.7
	803.4	775.9	-3.4
79	982.1	943.4	-3.9
	218.6	211.2	-3.4
	427.1	436.9	2.3
1 012.1	586.3	605.5	3.3
	817.5	794.6	-2.8
	1 012.1	1 043.5	3.1

高温工作耐受和高温静应变测量能力，高低周复合疲劳试验器试验主要考核传感系统高速离心力下的动应变测量能力。

4.1 轮盘试验器现场试验

选用某型发动机高压涡轮盘，在轮盘试验器上进行高温静应变验证试验，旋转状态下的信号传输采用高速光纤旋转连接器完成^[17]。光纤旋转连接器结构安装如图 18 所示，链路布设如图 19 所示。

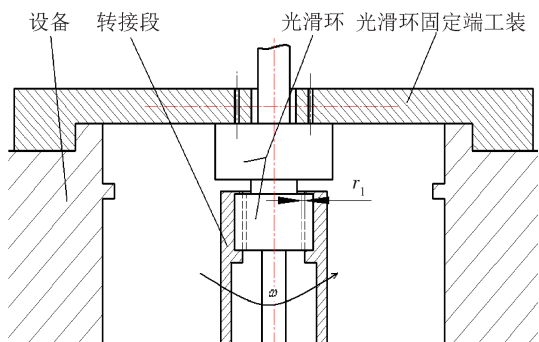


图 18 光纤旋转连接器结构安装示意图

Fig.18 Schematic diagram of fiber optic rotary joint structure installation

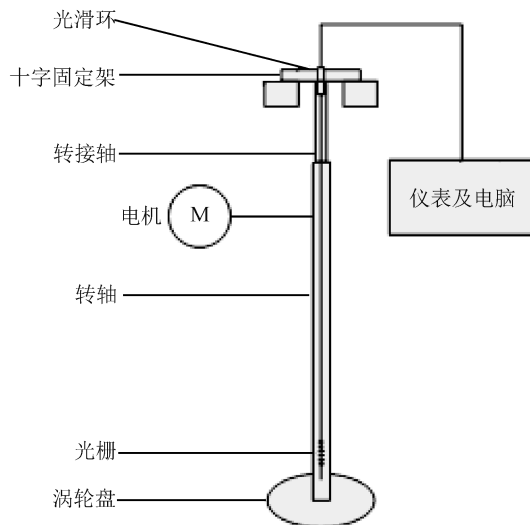


图 19 链路布设示意图

Fig.19 Schematic diagram of link layout

试验工况设定如下：开启加热系统，用环境电偶控温进行加热，将温度上升至 650 °C，再上升转速至 15 000 r/min，保载 30 min；记录试验过程中的应变值，保载结束停车。650 °C 加热过程中，光纤传感器测量的温度数据曲线图如图 20 所示，最高稳定温度 650.5 °C。

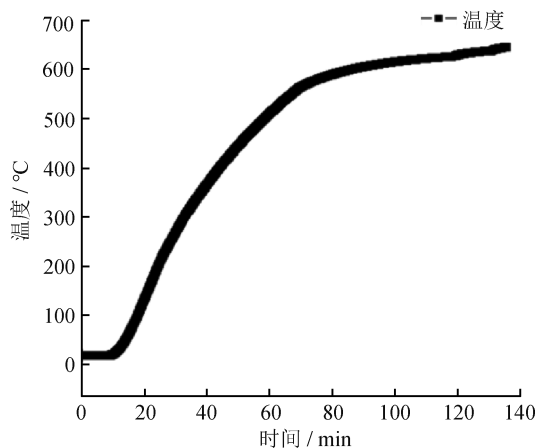


图 20 传感器测得的试验温度曲线图

Fig.20 Experimental temperature curve measured by sensor

650 °C 温度稳定后，已经处于热平衡状态的试验件以 15 000 r/min 转速运行 30 min，光纤传感器测量的离心载荷应变数据曲线图如图 21 所示，传感器测得的平均离心应变为 91.147 $\mu\epsilon$ 。

GH4169 涡轮盘试验件直径 420 mm，在 650 °C 下弹性模量为 190 GPa，叶片中部位置(传感器安

装位置)15 000 r/min转速下平均应力 18.031 MPa, 产生的应变(离心载荷)理论计算值约为 94.9 $\mu\epsilon$ (基于仿真分析, 见图 22)。传感器实测值与仿真值偏差为 4.12%, 小于 5%。

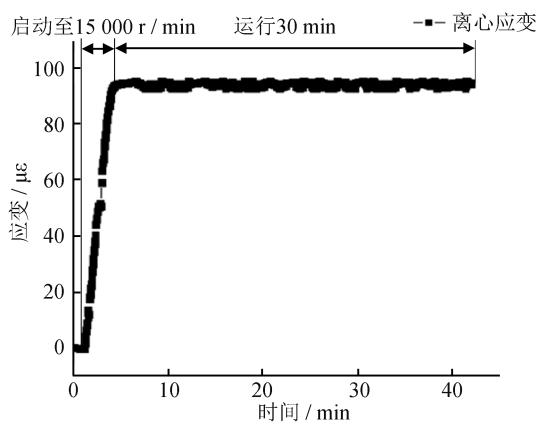


图 21 传感器测得的试验件离心应变曲线图

Fig.21 Centrifugal strain curve of the test specimen measured by sensor

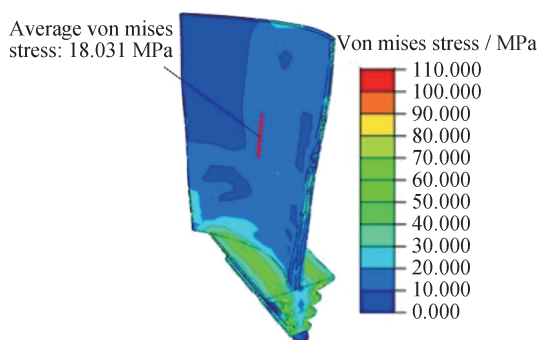


图 22 涡轮叶片离心应变仿真分析

Fig.22 Simulation analysis of centrifugal strain of turbine blade

4.2 高低周复合疲劳试验器现场试验

选用某型发动机高压涡轮盘, 基于高低周复合疲劳试验器进行动应变验证试验, 采用油激励载荷加载方式, 通过改变喷嘴结构调整滑油喷出的液柱形态, 调整叶片振动载荷, 产生动应变变化, 并根据光纤测量系统测得的动应变曲线识别涡轮叶片的共振点。旋转信号传输采用高速光纤旋转连接器完成, 光纤旋转连接器安装链路布设见图 23。

室温环境下, 在 2 000 ~ 15 000 r/min 转速条件下进行叶片动应变扫频试验, 扫频试验过程中叶片动应变曲线如图 24 所示。

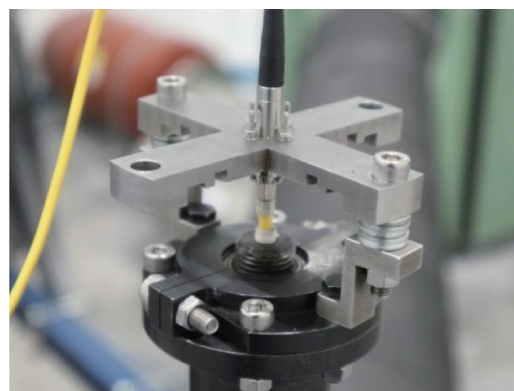


图 23 光纤旋转连接器安装链路布设图

Fig.23 Link layout of the fiber optic rotary joint installation

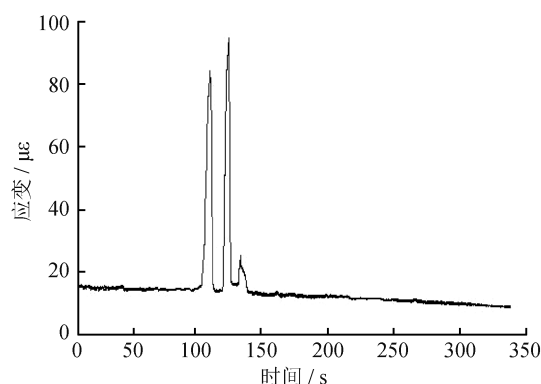


图 24 试验件动应变曲线图

Fig.24 Dynamic strain curve of test specimen

对动应变数据进行频谱分析, 得到图 25。动应变试验测试结果如表 5 所示。

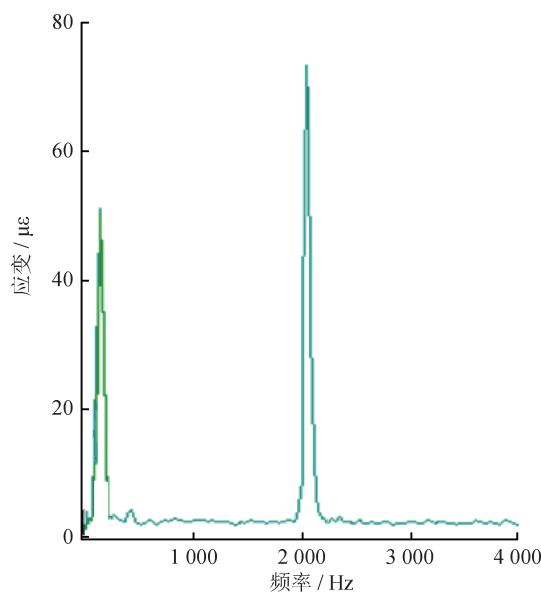


图 25 叶片共振时刻频谱图

Fig.25 Frequency spectrum at blade resonance moment

表5 动应变试验测试结果

Tab.5 Results of dynamic strain test		
参数	共振频率/Hz	应变值
实测值	2 036	73 $\mu\epsilon$
理论值	2 010	百微应变量级

基于高低周复合疲劳试验器提供的室温、15 000 r/min的试验环境, 光纤传感器的共振频率测量值与理论值偏差约为1.3%, 试验结果与理论分析结果相近, 动应变幅值与设计预估量级相近。

5 结论

本文面向航空发动机等动力机械热端部件高温动应变测量的迫切需求, 基于光纤传感技术开展了从基本原理、传感器设计与制作、实验室测试与评价、发动机试验器现场验证的全链条研究。创新性地引入了等离子热喷涂技术, 实现了光纤光栅敏感结构在待测试件基底表面的安装, 通过优化安装结构设计和多种喷涂材料选择比较, 降低了多种异质材料间的热膨胀系数失配影响, 实现了传感器与基底之间的高强度结合与良好的应变传递。结合模拟工程应用环境的实验室高温静应变和动应变测试与评价, 完成了多维度实验室性能验证。最后, 通过轮盘试验器试验完成了传感器高温工作耐受能力和应变测量精度考核验证, 通过高低周疲劳试验器试验完成了叶片振动载荷下动应变测量能力考核验证。两项试验综合验证了该技术在真实发动机环境下应用的可行性, 为精确评估真实服役环境下航空发动机热端部件的应力分布和疲劳寿命、提前识别危险点以预防结构失效提供了可靠的技术支撑。

未来将继续深入开展传感器长期寿命与失效机理、复合信号感知与解耦、动应变信号响应与故障模式分析关联等研究, 并建立光纤传感器在相关行业的安装与应用等工艺规范与标准。

参考文献

[1] 王乐, 周军, 鞠新. 高温动应力测量技术简析[J]. 航空动力, 2021(4): 48-52.
WANG L, ZHOU J, JU X. Analysis to high temperature dynamic stress measurement technology [J]. Aerospace

Power, 2021(4): 48-52. (in Chinese)

- [2] LIU X, ZHANG Z, WANG J, et al. Future development directions of high-temperature strain gauges: a comprehensive review of structure and performance characteristics [J]. Nanoscale Advances, 2025, 7(14): 4232-4251.
- [3] WANG C, ZHANG Y, HUANG Q, et al. Sensing characteristics of integrated fiber Bragg grating sensors for high-temperature strain measurement [J]. Applied Optics, 2025, 64(7): 1731-1737.
- [4] HE Z F, ZHOU X G, LU J Y, et al. All-fiber optic sensing for multiparameter monitoring and domain-wide deformation reconstruction of aerospace structures in thermally coupled environments[J]. Aerospace, 2026, 13(2): 135.
- [5] JAMES S W, KISSINGER T, WEBER S, et al. Fibre-optic measurement of strain and shape on a helicopter rotor blade during a ground run: 1. Measurement of strain [J]. Smart Material and Structure, 2022, 31(7): 075014.
- [6] 廖延彪. 光纤光学: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
LIAO Y B. Fiber optics: principles and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
- [7] 张博, 严高师, 邓义君. 光纤光栅传感器交叉敏感问题研究[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 614-618.
ZHANG B, YAN G S, DENG Y J. Cross-sensitivity of fiber grating sensor measurement [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(5): 614-618. (in Chinese)
- [8] 王目光, 李唐军, 卓锋, 等. 应变和温度同时测量光纤光栅传感器的研究[J]. 传感器技术, 2001, 20(9): 10-12.
WANG M G, LI T J, ZHUO F, et al. Research on fiber grating sensors for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(9): 10-12. (in Chinese)
- [9] 张鹏浩, 陈爽, 武洪波. 飞秒光纤光栅高温测量方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 1-6.
ZHANG P H, CHEN S, WU H B. A high temperature measurement method using femtosecond fiber Bragg gratings [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 1-6. (in Chinese)
- [10] MURUGAN M, WALOCK M, GHOSHAL A, et al. Embedded temperature sensor evaluations for turbomachinery component health monitoring [J]. Energies, 2021, 14(4): 852.
- [11] 周雳, 邢志国, 王海斗, 等. 等离子喷涂技术制备功能

- 梯度热障涂层研究进展[C]// 第十一届全国青年表面工程学术会议论文集, 2019.
- ZHOU L, XING Z G, WANG H D, et al. Research progress on functionally graded thermal barrier coatings prepared by plasma spraying technology [C]// Proceedings of the 11th National Youth Conference on Surface Engineering, 2019. (in Chinese)
- [12] 张博淳. 大气等离子喷涂与电子束物理气相沉积热障涂层的失效机理分析与寿命预测[D]. 渥太华: 渥太华大学, 2017.
- ZHANG B C. Failure mechanism analysis and life prediction based on atmospheric plasma-sprayed and electron beam-physical vapor deposition thermal barrier coatings [D]. Ottawa: University of Ottawa, 2017. (in Chinese)
- [13] CHENG C C, LO Y L, PUN B S, et al. An investigation of bonding-layer characteristics of substrate-bonded fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3907-3915.
- [14] 吴家龙. 弹性力学[M]. 第2版, 北京: 高等教育出版社, 2011.
- WU J L. Elasticity mechanics [M]. 2nd edition, Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [15] 邓足斌. SK-1 刚架梁式应变计参数测定装置[J]. 仪表技术与传感器, 1997(6): 14-17.
- DENG Z B. SK-1 rigid frame beam type strain gauge parameter calibration device [J]. Instrument Technique and Sensor, 1997(6): 14-17. (in Chinese)
- [16] 田峰, 尹肖, 李博, 等. 正弦力校准装置的研制[J]. 计测技术, 2021, 41(3): 45-49.
- TIAN F, YIN X, LI B, et al. Development of sinusoidal force calibration device [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(3): 45-49. (in Chinese)
- [17] 魏莉, 李恒春. 单通道单模光纤高速旋转连接器的研制[J]. 光通信技术, 2021, 45(7): 37-40.
- WEI L, LI H C. Development of a single-channel single-mode fiber optic rotary joint for high-speed applications [J]. Journal of Optical Communication Technology, 2021, 45(7): 37-40. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 刘宇轩)



第一/通信作者: 陈爽(1977—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事光纤传感技术研究, 包括特种光纤传感器研制、高温环境下多参量解耦技术和传感系统测试应用验证等。