

光纤光栅传感器在固体发动机药柱内部应变监测中的应用

张 焘^{1,2*}, 李海阳¹, 申志彬¹, 吴国夫^{1,2}, 卞云龙^{1,2}, 王立民^{1,2}

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中国航天科工集团有限公司六院四十一所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:针对固体发动机药柱结构内部应变响应测量难题,提出了一种基于光纤光栅传感器的内埋式应变测量方法。设计了内埋光纤光栅应变传感器的试验器并对其开展了冷增压试验,获得了试验器药柱内部环向应变与轴向应变值。试验结果表明,提出的测试方法可以获取药柱内部的环向和轴向应变。研究成果可为光纤光栅传感器在固体发动机药柱结构测量中的进一步应用奠定基础,为固体发动机监测技术的发展与应用提供参考。

关键词:固体火箭发动机;固体推进剂;光纤光栅传感器;应变测量;结构健康监测

中图分类号:V435; TP212 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2025)01-059-08

Application of fiber bragg grating sensor in monitoring of internal strain of solid rocket motor grain

ZHANG Tao^{1,2*}, LI Haiyang¹, SHEN Zhibin¹, WU Guofu^{1,2}, BIAN Yunlong^{1,2}, WANG Limin^{1,2}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The 41st Institute of Sixth Academy of CASIC, Huhhot 010010, China)

Abstract: An embedded strain measurement method based on fiber bragg grating sensor was proposed to solve difficult problems in measuring the internal strain response of solid rocket motor grain. The solid rocket motor tester of embedded fiber bragg grating strain sensor was designed, and the cold pressurization test was carried out on the tester. The axial and circumferential strains in the grain structure were obtained under cold pressurization test. Research shows that the proposed test method can obtain the circumferential strain and axial strain in internal grain. The research results can lay a foundation for the further application of fiber bragg grating sensor in the measurement of solid motor grain structure, and can provide a reference for the development and application of solid motor monitoring and detection technology.

Keywords: solid rocket motor; solid propellant; fiber bragg grating sensor; strain measurement; structural health monitoring

固体推进剂药柱结构是固体火箭发动机(solid rocket motor, SRM)的薄弱结构,实时监测药柱内部状态对于及时诊断药柱结构健康状态、评估固体发动机的可靠性、确保导弹武器系统作战效能具有重要意义^[1-2]。

应变响应是目前评价固体发动机药柱结构完整性的重要参数,目前有很多种能够用于药柱应变监测的方法,例如弓形传感器可将药柱表面的大应变转化为测试点的微应变,实现大应变监测;织物大应变传感器中的导电金属纳米丝网,在载荷作用下接触电阻发生变化,通过建立电阻与应

变间的关系可以测量反映药柱表面的应变;石墨烯传感器可实现大应变传感器的微型化,其原理是利用石墨烯层间的电阻效应反映药柱表面的应变变化^[3]。但是这些传统的表面粘贴应变传感器直接应用于固体推进剂药柱结构内部应变监测具有诸多不足,其原因有两个:一是固体推进剂是易燃易爆的危险品,而现有的应变传感器大多需要通电,存在安全隐患;二是现有的药柱浇注成型工艺难以实现传感器在药柱内部的布设。

如何获取固体推进剂药柱结构内部的应变响应是目前正在研究的问题。近年来,埋入式传感

收稿日期:2022-05-24

基金项目:国家部委基金资助项目(514010X04-102)

*第一作者:张焘(1988—),男,江苏宝应人,高级工程师,博士研究生,E-mail:zhangtaopl@yeah.net

引用格式:张焘,李海阳,申志彬,等. 光纤光栅传感器在固体发动机药柱内部应变监测中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(1): 59-66.

Citation: ZHANG T, LI H Y, SHEN Z B, et al. Application of fiber bragg grating sensor in monitoring of internal strain of solid rocket motor grain[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(1): 59-66.

技术在发动机检测中的尝试越来越多,光纤微弯传感技术、振动及超声传感技术和微型传感技术被逐渐应用于固体推进剂的应变测量,并在实用化方面做出了很多探索^[1,3]。

采用光纤光栅 (fiber bragg grating, FBG) 传感器进行结构的健康检测是一个快速发展的研究方向^[4-5],尤其是在分布式点应变测量领域获得了大量的关注^[6]。Sampath 等^[7]的研究认为在光纤光栅表面涂覆聚合物涂层可以有效拓宽其工作温度范围, Jinachandran 等^[5]采用金属封装的方式提高了光纤光栅传感器对结构健康检测的兼容性。为解决固体推进剂药柱结构内部应变测量难题,提出了一种基于包覆聚酰亚胺涂层的光纤光栅传感器的内埋式测量方法,并给出了环向应变和轴向应变测试的光纤光栅传感器布设方案。设计并制备了内埋光纤光栅应变传感器的试验器并开展地面冷增压试验,验证了传感器的布设方法,实现了试验器药柱结构内部应变响应的实时监测,获得了固体推进剂药柱内部应变-时间曲线,经过与数值仿真结果的对比,考核了内埋式光纤光栅传感器对药柱结构内部应变响应监测的可行性。

1 光纤光栅传感器在固体发动机试验器中的布设

1.1 内埋式光纤光栅应变传感器

光纤光栅传感器属于光纤传感器的一种,是波长调制型光纤传感器,基于光纤光栅的传感过程是通过外界物理参量对光纤布拉格波长的调制来获取传感信息^[1,4]的。光纤光栅传感器具有体积小、质量小、空间分布简单、抗干扰及环境适应能力强等优点^[1,8-10],在结构健康监测与损伤诊断中应用广泛^[11-14]。

本研究中光纤光栅应变传感器的构型参照文献[1]中的结构,如图 1 所示,其中增敏小球选择 $\Phi 3\text{mm}$ 的方案。光纤光栅应变传感器及解调仪由中国航天科技集团有限公司第九研究院第十三研

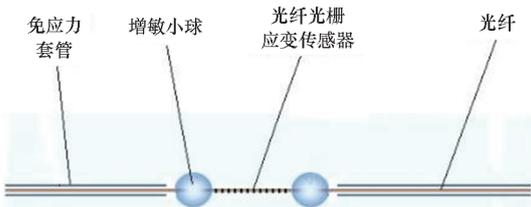


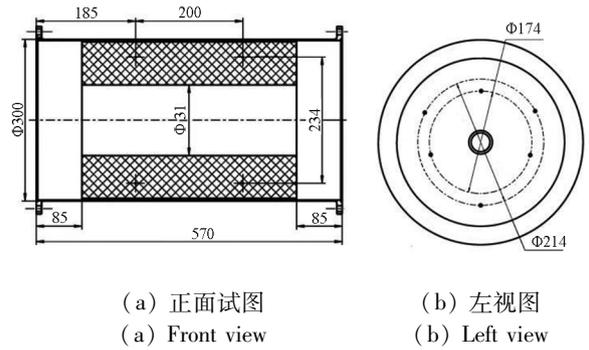
图 1 带有增敏结构的光纤光栅传感器示意图

Fig. 1 Structure diagram of FBG strain sensor with stain amplification structure

究所提供。经实验室条件下标定,传感器工作温度为 $-60 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$,应变测量量程为 $0 \sim 5\ 000 \mu\epsilon$ 、精度 $1 \mu\epsilon$;解调仪为采样率 100 Hz 的 4 通道低频光纤光栅解调仪。

1.2 试验器结构设计

试验器主要由燃烧室壳体、绝热层、药柱、顶盖及直属件组成。试验器药柱采用端羟基聚丁二烯 (hydroxyl-terminated polybutadiene, HTPB) 固体推进剂假药,内孔型贴壁浇注药柱。燃烧室壳体和顶盖均采用 45# 钢,壳体厚度 2 mm ,试验器前后顶盖及壳体设计有光纤引出孔。试验器总体结构简图见图 2 (图中标注的尺寸单位为 mm)。



(a) 正面视图 (b) 左视图
(a) Front view (b) Left view

图 2 试验器结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of SRM tester

1.3 传感器布设方案设计

轴向内埋光纤光栅应变传感器共 6 组,其中 3 组在 $\Phi 174 \text{ mm}$ 位置沿固体发动机轴向均匀分布,另外 3 组在 $\Phi 214 \text{ mm}$ 位置沿固体发动机轴向均匀分布。环向内埋光纤光栅应变传感器共 6 组,沿轴向不同位置分 3 层分布,每层分布 2 组。具体布设方案见表 1,布设示意图见图 2 和图 3。

表 1 传感器布设位置

Tab. 1 Sensor layout locations

应变方向	测点编号	测点位置
轴向	a_1, a_2, a_3	$\Phi 214 \text{ mm}$, 药柱轴向中心
轴向	b_1, b_2, b_3	$\Phi 174 \text{ mm}$, 药柱轴向中心
环向	r_1, r_2	$\Phi 234 \text{ mm}$, 距药柱轴向中心 100 mm
环向	r_3, r_4	$\Phi 234 \text{ mm}$, 药柱轴向中心
环向	r_5, r_6	$\Phi 234 \text{ mm}$, 距药柱轴向中心 100 mm

在布设环向应变传感器时,采用在测点位置按照切向布设传感器的方式解决传感器难以按环向布设的难题,见图 3 和图 4。

传感器沿切向布设时,加载前传感器有效测量区间长度记为 d_1 ,有效测量区间两端距药柱环

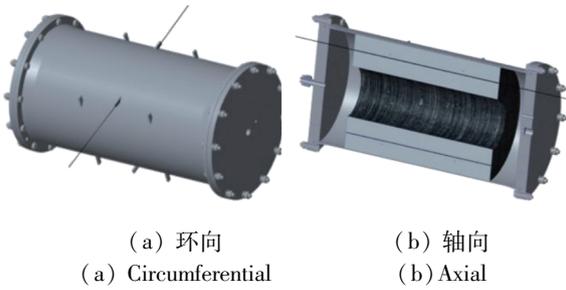


图 3 光纤光栅传感器布设示意图

Fig. 3 Diagram of FBG sensor

向切面圆中心距离记为 R_1 ; 加载后传感器有效区间长度记为 d_2 , 有效测量区间两端距药柱环向切面圆中心距离记为 R_2 。加载后传感器的应变测量结果(记为 ε_1)理论上可按下式计算:

$$\varepsilon_1 = (d_2 - d_1) / d_1 \quad (1)$$

传感器沿环向布设时, 加载前传感器有效测量区间长度记为 L_1 , 有效测量区间两端距药柱环向切面圆中心距离仍为 R_1 ; 加载后传感器有效区间长度记为 L_2 , 有效测量区间两端距药柱环向切面圆中心距离仍为 R_2 。加载后传感器的应变测量结果(记为 ε_2)理论上可按下式计算:

$$\varepsilon_2 = (L_2 - L_1) / L_1 \quad (2)$$

假设载荷、结构对称且推进剂材料为连续介质, 则有:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = R_2 / R_1 - 1 \quad (3)$$

因此在理论条件下, 沿切向布设的光纤光栅传感器可获取药柱结构相应位置处环向应变值。

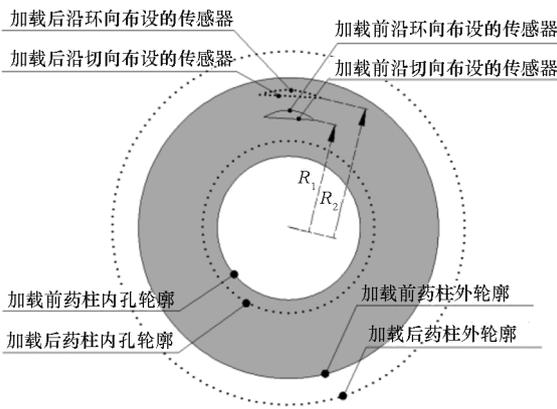


图 4 环向应变传感器布设方案

Fig. 4 Layout scheme of circumferential strain sensor

1.4 试验器制备

浇注推进剂药浆前, 先布设光纤光栅应变传感器。在布设轴向传感器时, 将光纤的一端粘接固定于浇药底座, 另一端粘接固定于光纤固定工装; 在布设环向传感器时, 光纤两端固定于壳体外壁。固定时采用量器确保传感器中心位于规定区

域, 传感器具有一定的预拉伸, 以保证浇注药浆时传感器位置不会发生变化。采用本文方法, 试验器内引出的两条光纤具备信号传输功能, 在一条光纤受损的情况下保证另一端仍有信号输出, 提高了传感器的存活率, 同时两条光纤又可以起到定位和固定传感器的作用。

浇药前试验器先在浇药缸里加热至 $50\text{ }^\circ\text{C}$, 采用花洒将药浆浇入试验器内以尽量避免药浆直接砸到光纤, 药浆达到指定位置后停止浇药(见图 5), 将试验器放置于固化工房, $50\text{ }^\circ\text{C}$ 固化 10 d。固化完成后拆除芯模, 通过延长线将传感器与信号采集设备连接, 经检测传感器存活率达到 100%。

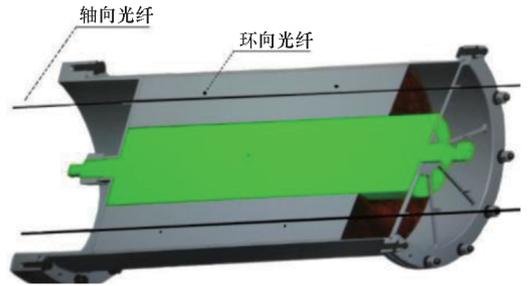


图 5 浇药后预布设传感器的试验器剖面图

Fig. 5 Sectional view of the sensor with pre-installed sensors after pouring the medicine

2 冷增压试验验证

2.1 加载系统

设计了冷增压试验系统实现压力载荷的施加。加载系统如图 6 所示, 该系统通过氮气瓶的洁净氮气来实现增压, 减压阀用于将压力调节至目标压力。具体操作过程如下: 打开手动截止阀 1 及电磁阀对试验器进行充压, 同时通过压力变送器采集试验器内压力, 实时监测试验器内压力;

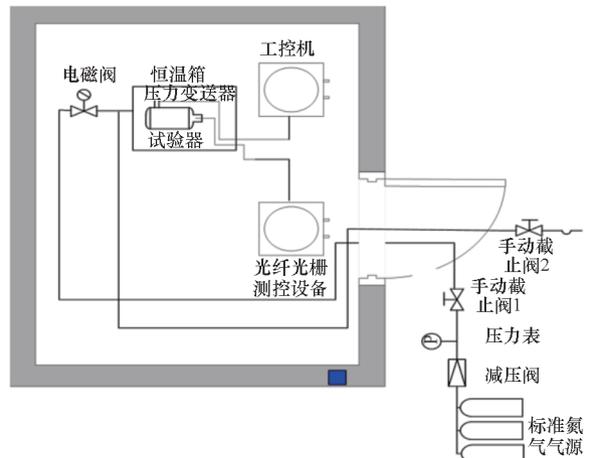


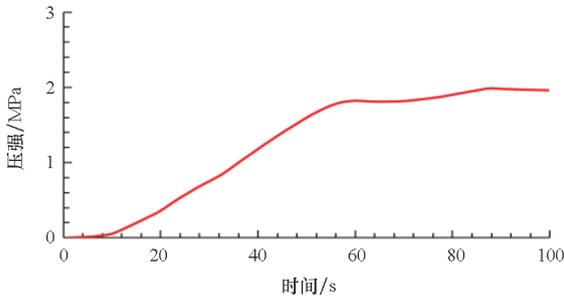
图 6 加载系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of loading system

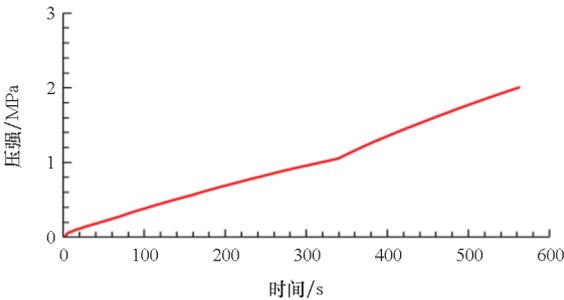
试验结束后关闭手动截止阀 1 及电磁阀,打开手动截止阀 2 将试验器内剩余氮气放空。

2.2 加载方案设计

对内部植入传感器的固体发动机试验器开展冷增压试验,基于图 6 中的加载系统分别按不同加载路径开展了两种工况下的冷增压试验,两种工况下实测的压力-时间曲线见图 7。在加载过程中,通过光纤光栅应变测试系统实时获取了固体发动机试验器药柱内部测点处的应变参数,并绘制了测量点处的应变-时间曲线。



(a) 工况一
(a) The first condition



(a) 工况二
(b) The second condition

图 7 试验器内压强-时间曲线

Fig. 7 Measured pressure-time curve in the tester

2.3 试验结果分析

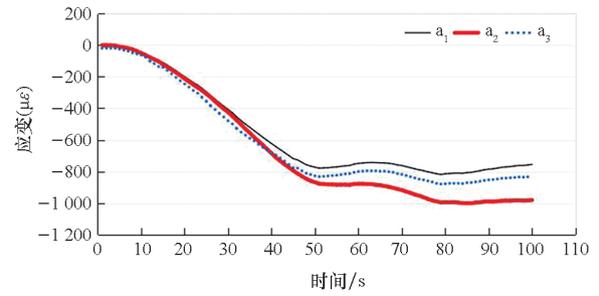
2.3.1 工况一试验结果

通过光纤光栅应变测试系统,获取了工况一下药柱内部测点处环向应变及轴向应变的测量值。

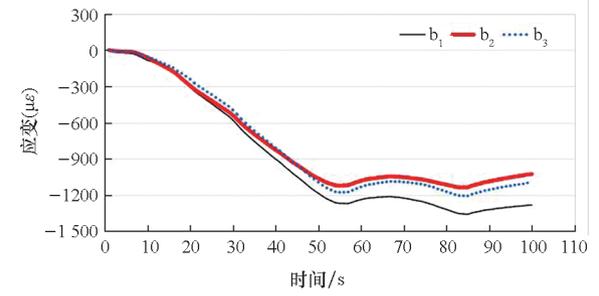
将理论值应相同的轴向平行测点 a_1 、 a_2 、 a_3 测量值绘制应变-时间曲线见图 8(a);将理论值应相同的轴向平行测点 b_1 、 b_2 、 b_3 测量值绘制应变-时间曲线见图 8(b);将理论值应相同的环向平行测点 r_3 、 r_4 测量值绘制应变-时间曲线见图 8(c);将理论值应相同的平行测点 r_1 、 r_2 、 r_5 、 r_6 测量值绘制应变-时间曲线见图 8(d)。

从图 8 中可以看出,平行测点 a_1 、 a_2 、 a_3 和 b_1 、 b_2 、 b_3 布置的传感器一致性不佳,平行测点 r_3 、 r_4

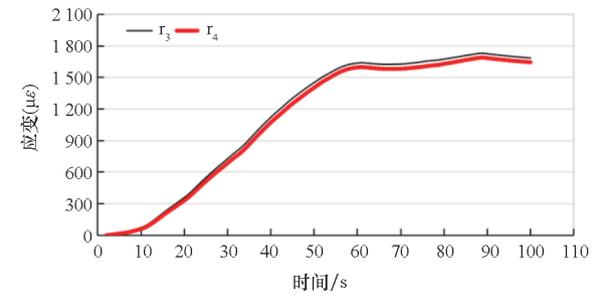
和 r_1 、 r_2 、 r_5 、 r_6 布置的传感器一致性较好。



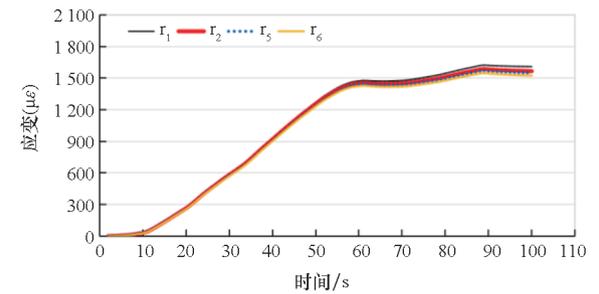
(a) a_1 、 a_2 、 a_3



(b) b_1 、 b_2 、 b_3



(c) r_3 、 r_4



(d) r_1 、 r_2 、 r_5 、 r_6

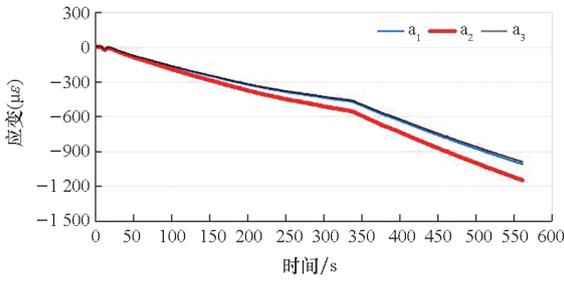
图 8 试验器内不同测点处应变-时间曲线

Fig. 8 Strain-time curves measured at different measuring points in the tester

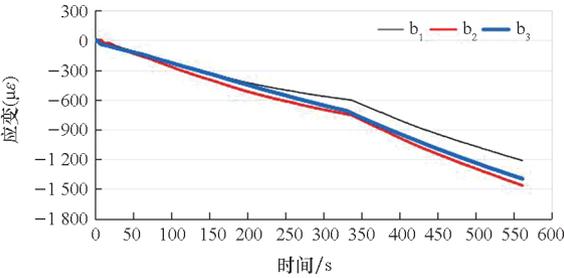
2.3.2 工况二试验结果

通过光纤光栅应变测试系统,获取了工况二下药柱内部测点处环向应变及轴向应变的测量值,将理论值应相同的轴向平行测点 a_1 、 a_2 、 a_3 测量值绘制应变-时间曲线见图 9(a);将理论值应相同的轴向平行测点 b_1 、 b_2 、 b_3 测量值绘制应变-时间曲线见图 9(b);将理论值应相同的环向平行测点 r_3 、 r_4 测量值绘制应变-时间

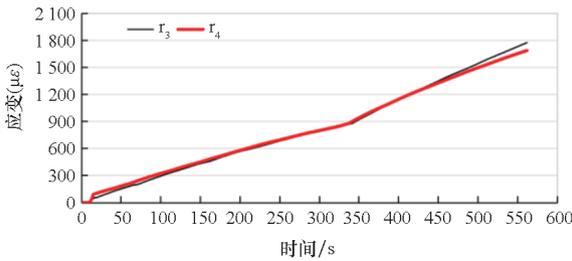
曲线见图 9(c);将理论值应相同的环向平行测点 r_1 、 r_2 、 r_5 、 r_6 测量值绘制应变 - 时间曲线见图 9(d)。



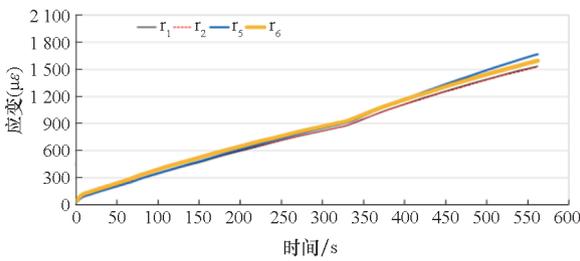
(a) a_1 、 a_2 、 a_3



(b) b_1 、 b_2 、 b_3



(c) r_3 、 r_4



(d) r_1 、 r_2 、 r_5 、 r_6

图 9 试验器内不同测点处应变 - 时间曲线
Fig.9 Strain-time curves measured at different measuring points in the tester

从图 9 中可以看出,平行测点 a_1 、 a_2 、 a_3 和 b_1 、 b_2 、 b_3 传感器一致性不佳,平行测点 r_3 、 r_4 和 r_1 、 r_2 、 r_5 、 r_6 传感器一致性较好。

3 光纤光栅应变传感器测量性能分析

基于 ANSYS Mechanical 软件采用瞬态分析法对工况一和工况二进行模拟计算,压力载荷分别按图 7(a)和图 7(b)中的压力曲线施加,获

取了两种内压载荷状态下测点位置应变随时间的变化规律。将应变计算值与试验测量值进行对比分析,分析光纤光栅应变测量传感器的测量性能。

采用基于应力松弛模量主曲线测试拟合后获得的 Prony 级数模型表征固体推进剂黏弹性,则:

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i} \quad (4)$$

Prony 级数中的各个系数见表 2,初始模量 $E_0 = 5.15 \text{ MPa}$,泊松比取 0.498。

表 2 $E(t)$ 的各个系数

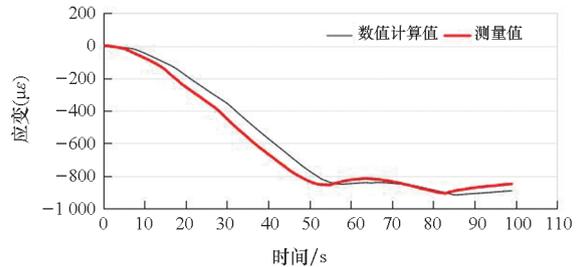
Tab.2 Various coefficients of $E(t)$

i	E_i	τ_i	i	E_i	τ_i
1	0.792	0.000 2	4	1.819	5.142 0
2	4.950	0.006 0	5	0.800	154.247 8
3	3.112	0.171 0	∞	0.680	

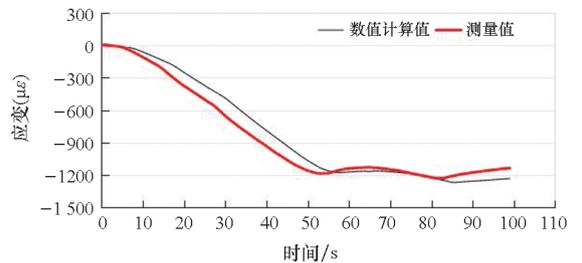
3.1 工况一测试结果分析

将轴向应变测点 a_1 、 a_2 、 a_3 测得的轴向应变取平均值(记为 a),得到如图 10(a)所示曲线;将轴向应变测点 b_1 、 b_2 、 b_3 测得的轴向应变取平均值(记为 b),得到如图 10(b)所示曲线;将环向应变测点 r_3 、 r_4 测得的应变取平均值(记为 \bar{r}_1),得到如图 10(c)所示曲线;将环向应变测点 r_1 、 r_2 、 r_5 、 r_6 测得的应变取平均值(记为 \bar{r}_2),得到如图 10(d)所示曲线。

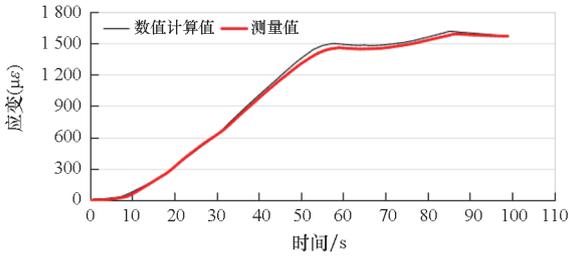
从图 10 中可以看出,不同测点处传感器测得的应变参数与数值计算得到的应变参数变化规律一致。



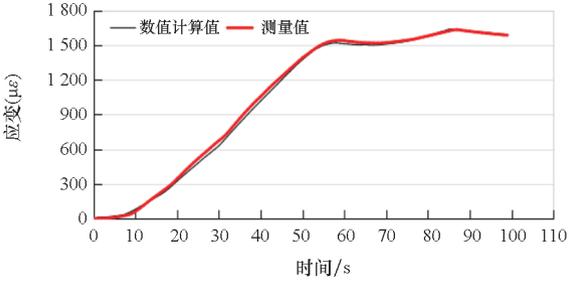
(a) a



(b) b



(c) \bar{r}_1



(d) \bar{r}_2

图 10 实测值与仿真值对比(工况一)

Fig. 10 Comparison between measured and simulated value (case 1)

在相同的计算模型下,药柱不同位置的测量值与计算值存在一定的偏差,平均偏差见表 3。从表中可以看出,轴向应变的测量值与计算值偏差较大,环向应变测量值与计算值的偏差较小。

表 3 测量值与仿真值偏差分析(工况一)

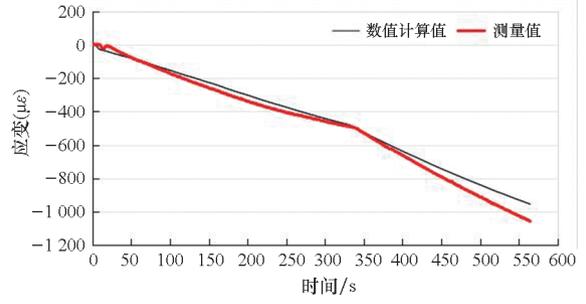
Tab. 3 Deviation analysis between measured and simulated value (case 1)

		%	
应变平均值	平均偏差	应变平均值	平均偏差
a	11.94	\bar{r}_1	2.18
b	15.03	\bar{r}_2	2.46

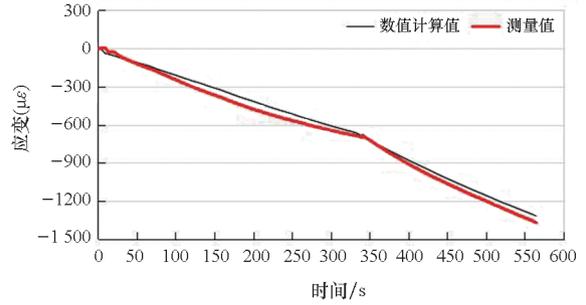
3.2 工况二测试结果分析

将轴向应变测点 a_1 、 a_2 、 a_3 测得的轴向应变取平均值(记为 a),得到如图 11(a)所示曲线;将轴向应变测点 b_1 、 b_2 、 b_3 测得的轴向应变取平均值(记为 b),得到如图 11(b)所示曲线;将环向应变测点 r_3 、 r_4 测得的应变取平均值(记为 \bar{r}_1),得到如图 11(c)所示曲线;将环向应变测点 r_1 、 r_2 、 r_5 、 r_6 测得的应变取平均值(记为 \bar{r}_2),得到如图 11(d)所示曲线。

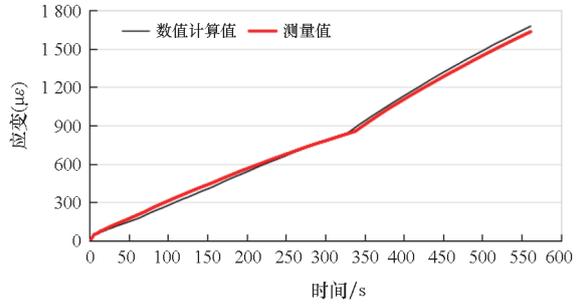
从图 11 中可以看出,不同测点处传感器测得的应变参数与数值计算得到的应变参数变化规律一致。在相同的计算模型下,药柱不同位置的测量值与计算值存在一定的偏差,平均偏差见表 4。从表 4 中可以看出,轴向应变的测量值与计算值偏差较大,环向应变测量值与计算值的偏差较小。



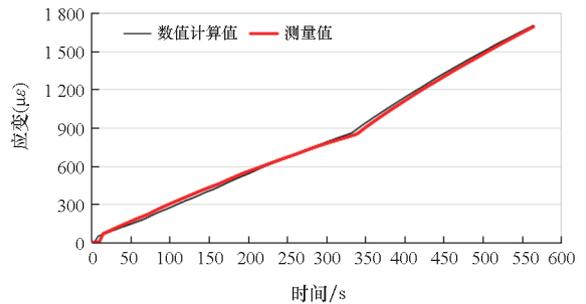
(a) a



(b) b



(c) \bar{r}_1



(d) \bar{r}_2

图 11 实测值与仿真值对比(工况二)

Fig. 11 Comparison between measured and simulated value (case 2)

表 4 测量值与仿真值偏差分析(工况二)

Tab. 4 Deviation analysis between measured and simulated value (case 2)

		%	
应变平均值	平均偏差	应变平均值	平均偏差
a	9.69	\bar{r}_1	5.16
b	8.81	\bar{r}_2	4.20

3.3 两种工况对比分析

通过分析两种试验工况的测量值与数值计算值,可以得到以下结论:

1)在不同加载路径的内压载荷作用下,内埋于药柱结构内部光纤光栅应变传感器均成功获取了药柱内部的应变响应。通过与在相同计算模型下获得的数值计算值对比,验证了传感器工作的可靠性,同时也说明了基于试验数据修正的数值仿真方法是获取固体发动机药柱结构应变分布的有效手段之一。

2)两次冷增压试验下轴向测点处的轴向应变均为压应变,环向测点处的环向应变均为拉应变。通过计算测量值与计算值的平均偏差可以发现,轴向应变的偏差较大,而环向应变的偏差较小,分析后认为内埋式的光纤光栅传感器对拉应变的测量效果较好,对压应变的测量效果不佳。造成压应变测量效果不佳的原因可能是光纤光栅传感器沿轴向受压时产生了弯曲,波长发生异常变化影响了测量精度。

4 结论与展望

本文采用光纤光栅应变传感器实现了固体推进剂药柱内部应变的实时测量,建立了光纤光栅传感器在药柱结构内部的植入技术,通过制备植入传感器的固体发动机试验器并开展冷增压试验,研究了光纤光栅应变传感器对于固体推进剂药柱结构应变测量的可行性,得到以下结论及展望:

1)光纤光栅应变传感器可用于固体推进剂药柱结构内部轴向应变和环向应变的测量,本文给出了光纤光栅应变传感器在药柱结构中的环向及轴向布设方法,经验证采用该方法实现了内埋光纤光栅应变传感器100%的存活率。

2)光纤光栅传感器对药柱结构内部拉应变的测量性能很好,但对于压应变的测量效果不佳。

3)采用基于测试数据修正的数值仿真方法是获取药柱力学响应、支撑药柱结构完整性评估与健康状态诊断的有效手段。

本文针对试验器开展的冷增压试验建压速率较慢,未能模拟点火建压时固体推进剂药柱结构的高应变率状态,今后可对此开展进一步研究,获取光纤光栅应变传感器对高应变率下药柱结构应变响应的测量性能。本文建立的固体推进剂药柱结构内部应变测量技术,无法实现对药柱结构大应变的测量,但基于本文的研究成果,将光纤光栅应变传感器布设于药柱内部应变值与之量程相匹

配的位置,同时结合药柱内孔表面粘贴式柔性大应变测量技术,可以更为全面地获得药柱结构整体应变分布规律。

参考文献(References)

- [1] 张焘,张卫平,张浩,等. 光纤光栅传感器在固体推进剂内部应变测量中的试验研究[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(4): 518-523.
ZHANG T, ZHANG W P, ZHANG H, et al. Experimental study on fiber bragg grating sensor in the internal strain measurement of solid propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 43(4): 518-523. (in Chinese)
- [2] 强洪夫,王哲君. 固体火箭发动机装药结构完整性分析的基础问题及研究展望[J]. 含能材料, 2024, 32(2): 118-123.
QIANG H F, WANG Z J. Fundamental problems and research prospects of structural integrity analysis for solid rocket motor[J]. 2024, 32(2): 118-123. (in Chinese)
- [3] 郭宇,申志彬,孙翔宇,等. 固体火箭发动机故障诊断技术现状及发展思考[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(1): 4-12.
GUO Y, SHEN Z B, SUN X Y, et al. Progress and development considerations on fault diagnosis techniques for solid rocket motor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2022, 45(1): 4-12. (in Chinese)
- [4] 苑立波,童维军,江山,等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0100001.
YUAN L B, TONG W J, JIANG S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001. (in Chinese)
- [5] JINACHANDRAN S, LI H J, XI J T, et al. Fabrication and characterization of a magnetized metal-encapsulated FBG sensor for structural health monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(21): 8739-8746.
- [6] RAJABZADEH A, HEUSDENS R, HENDRIKS R C, et al. Calculation of the mean strain of smooth non-uniform strain fields using conventional FBG sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3716-3725.
- [7] SAMPATH U, KIM D, KIM H, et al. Polymer-coated FBG sensor for simultaneous temperature and strain monitoring in composite materials under cryogenic conditions[J]. Applied Optics, 2018, 57(3): 492-497.
- [8] 李双江,刘向阳,章喆,等. 基于光纤和柔性传感器的固体火箭发动机结构监测技术研究[J]. 固体火箭技术, 2024, 47(4): 511-518.
LI S J, LIU X Y, ZHANG Z, et al. Research on structural monitoring technology of solid rocket motor based on optical fiber and flexible sensor[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2024, 47(4): 511-518. (in Chinese)
- [9] HONG C Y, ZHANG Y F, ZHANG M X, et al. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 244: 184-197.

- [10] 沙莎, 刘学增, 王帅鹏. 基于光纤光栅传感器的水下盾构隧道健康监测与安全评价[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(增刊1): 485-495.
SHA S, LIU X Z, WANG S P. Health monitoring and safety evaluation of underwater shield tunnels using fiber bragg gating sensors[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(Suppl 1): 485-495. (in Chinese)
- [11] 温瑞珩, 郑守铎, 叶玮. 基于光纤传感器的火箭发动机工作状态监控方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(7): 38-40.
WEN R H, ZHENG S D, YE W. Monitoring studies of rocket engine working state based on fiber-optic sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(7): 38-40. (in Chinese)
- [12] 慕聪颖, 胡曙阳, 武丹, 等. 基于植入式光纤传感网络的固体火箭发动机结构健康监测[J]. 半导体光电, 2024, 45(1): 145-151.
MU C Y, HU S Y, WU D, et al. Structural health monitoring of solid rocket motor based on embedding optical fiber sensing networks[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(1): 145-151. (in Chinese)
- [13] 陈涛. 基于埋入式光纤传感器的固体火箭发动机健康监测系统[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
CHEN T. The structure health monitoring system of solid rocket engine based on the embedded optical fiber sensors[D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
- [14] 胡翰伦. 航天固体发动机推进剂内部三维应力与药柱应变检测与分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
HU H L. Detection and analysis of three-dimensional internal stress and grain strain of aerospace solid engine propellant[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)