

光纤布拉格光栅在火箭低温贮箱共底结构 在线监测应用研究

朱超杰¹, 刘砚涛¹, 刘 洋², 营 笑², 孝春成¹

(1. 北京强度环境研究所 北京 100076; 2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘要: 低温环境下的光纤布拉格光栅(FBG)热输出效应显著,同时表现出较强的非线性特征,给火箭低温贮箱共底结构的应变和温度测试带来困难。从基本传感原理出发,分析了裸光纤光栅和应变传感光栅的热输出来源,针对火箭低温贮箱地面力学试验提出了光纤布拉格光栅热输出数据解耦方法,搭建了极低温环境下的光纤光栅热输出标定实验系统,获取了光纤光栅在液氦-常温温区范围内的热输出特性曲线,建立了粘贴在与贮箱共底相同材料上的应变传感光栅和裸光纤光栅的热输出响应关系。完成了光纤布拉格光栅在火箭低温贮箱共底结构的应变、温度在线监测应用,通过构建基于光纤布拉格光栅的共底结构应变和温度传感网络,获取了共底结构温度和应变实时数据。结果表明,所提研究可以有效实现光纤布拉格光栅在极低温环境下的热输出数据解耦,准确获取火箭低温贮箱共底结构的应变和温度分布,与低温电阻应变片的应变测试数据对比结果良好,数据相关性超过0.997。该方法实现了极端环境下的全光纤在线测试,具有较高的布置灵活性和传感器存活率,为光纤传感技术在结构低温测试场景的规模化应用提供了案例支撑,为实现光纤的工程化箭载测试奠定了基础。

关键词: 低温贮箱共底; 光纤布拉格光栅; 热输出特性; 数据解耦

中图分类号: TH82 V416 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 420. 40

Research on the application of FBG in online monitoring of common bulkhead structure for rocket cryogenic tanks

Zhu Chaojie¹, Liu Yantao¹, Liu Yang², Ying Xiao², Xiao Chuncheng¹

(1. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China; 2. School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The thermal output effect of fiber Bragg gratings (FBG) in low-temperature environments is significant and exhibits strong nonlinear characteristics, which creates difficulties for strain and temperature testing of the common-bottom structure of rocket cryogenic storage tanks. Based on fundamental sensing principles, this study analyzes the thermal output sources of bare FBG and strain-sensing FBG. A decoupling method for the thermal output data of FBG was proposed for ground mechanical tests of rocket low-temperature storage tanks. An experimental system for calibrating the thermal output of FBG in extremely low temperature environments was built, and the thermal output characteristic curve of FBG in the liquid helium room temperature range was obtained. The thermal response relationship between strain-sensing FBG bonded to the same material as the common-bottom structure and bare FBG was established. The application of FBG for online monitoring of strain and temperature in the common-bottom structure of rocket cryogenic storage tanks was carried out. By constructing a strain and temperature sensing network based on FBG, real-time temperature and strain data of the common bottom structure have been obtained. The results indicate that this study can effectively decouple the thermal output data of FBG in extremely low-temperature environments, accurately obtain the strain and temperature distribution of the common-bottom structure of rocket cryogenic storage tanks, and achieve good agreement with strain test data from low-temperature resistance strain gauges, with a correlation correlation exceeding 0.997. This method realizes all-fiber online testing in extreme environments, offering high deployment flexibility and sensor survival rate. It provides a case reference for the large-scale application of fiber optic sensing technology in structural cryogenic testing scenarios, and lays a foundation for the engineering implementation of fiber optic onboard testing.

Keywords: common bottom of cryogenic tank; fiber Bragg grating; thermal output characteristics; data decoupling

0 引言

火箭贮箱作为贮存液氢(LH₂)、液氧(LOX)等低温推进剂的核心部件,是我国新一代运载火箭动力系统的关键子系统之一^[1-2]。低温贮箱在服役工况下,面临-253℃至环境温度的宽温域和复杂力学载荷考验,其结构完整性直接关系到运载火箭的动力输出效能和任务执行成功率^[2]。因此,在火箭低温贮箱地面试验中,如何构建箱内高精度传感网络,以实现结构温度场、应变场等关键状态参数的实时监测和数据采集,成为支撑贮箱结构设计优化与可靠性评估的重要技术基础^[3-4]。

光纤传感技术凭借其本质安全、抗电磁干扰、复用能力强及宽温域适应性等突出优势,在航空航天极端环境测量场景中展现了独特应用价值。其中,光纤布拉格光栅作为一种典型的光纤敏感元件,通过布拉格波长对温度和应变敏感,可实现准分布式测量,在国内外航天监测领域得到持续推广,具备成为低温贮箱结构在线状态监测最优解决方案的巨大潜力^[5]。

近年来,光纤光栅在航空航天监测领域得到了大量研究。Oromiehie等^[6]将光纤布拉格光栅嵌入机身面板,实现对结构潜在缺陷和应变水平的在线监测,Juwet等^[7]研究了低地球轨道条件对嵌入式光纤光栅传感器的复合材料完整性的影响,有望用于太空复合材料结构的健康监测;周震等^[8]探讨了光纤光栅用于航空发动机高速气流总温测量存在的问题及解决途径,张俊等^[9]将光纤光栅应用到飞机机翼动态形变监测中,江舒等^[10]设计并开发了一种可校准的船用光纤光栅应变传感器,田野等^[11]介绍了光纤光栅在残余应力测量的研究进展,孙杉杉等^[12]在火箭贮箱筒段轴压试验中使用光纤光栅进行了壳段应变监测。

针对光纤布拉格光栅应变和温度测试,Li等^[13]开发了一种机械结构,实现光纤光栅应变传感器的增敏和温度补偿,李维善等^[14-15]对光纤光栅在常温和低温环境下的传感特性开展了一系列研究。然而,在火箭低温贮箱结构实际监测场景中,现有光纤光栅应变/温度测试技术仍亟待突破。首先,光纤光栅自身受应变和温度双重影响,在低温贮箱宽温域环境下的非线性热输出十分显著,现有的温度补偿多基于双光栅法^[16-17],补偿模型偏理想化,降低了测量精度;其次,低温贮箱结构材料(如铝合金)在剧烈温度变化过程中由热胀冷缩产生的热应变与机械应变形成耦合效应,同样严重制约应变测量精度。光纤光栅低温环境下的热输出干扰带来的高精度测量问题,是制约火箭低温贮箱地面试验测试的技术瓶颈。如何有效实现光纤光栅热输出数据解耦,获取低温结构真实受力状态,成为推进光纤传感技术工程化应用的关键科学问题。

1 光纤光栅低温热输出特性分析

对光纤纤芯进行折射率调制后得到的光纤布拉格光栅,在激光光源的照射下可以反射特定中心波长的窄带光,其反射光中心波长与应变和温度表现出相关性,因此具备了应变和温度传感特性^[15]。光纤光栅基本传感原理如图1所示。

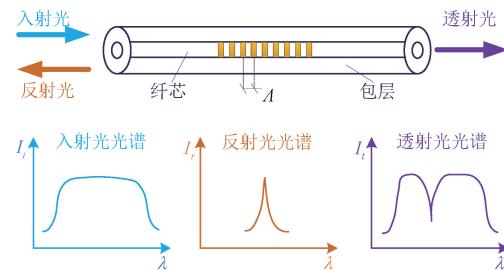


图1 光纤布拉格光栅传感原理

Fig. 1 Principle of fiber Bragg grating sensing

光纤光栅反射中心波长 λ_B 由光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 共同决定,其布拉格条件公式为:

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

当应变 $\Delta\varepsilon$ 或温度变化 ΔT 作用时, Λ 和 n_{eff} 发生改变,导致 λ_B 偏移。对布拉格条件取微分,得到波长相对变化,即:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = \Delta n_{eff}/n_{eff} + \Delta\Lambda/\Lambda \quad (2)$$

光纤在应变和温度同时影响下,弹光效应(应变引起)和热光效应(温度变化引起)综合导致有效折射率变化为:

$$\Delta n_{eff}/n_{eff} = -p_e\Delta\varepsilon + \xi\Delta T \quad (3)$$

式中: p_e 是等效弹光系数; ξ 是光纤材料热光系数。

应变和热膨胀效应综合导致光栅周期变化为:

$$\Delta\Lambda/\Lambda = \Delta\varepsilon + \alpha\Delta T \quad (4)$$

式中: α 是光纤材料热膨胀系数。

当温度变化和应变同时作用于光纤光栅时,将式(3)和(4)代入式(2)中,则由温度和应变引起的总波长变化率为:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - p_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (5)$$

对于特定的光栅,其初始中心波长 λ_B 为常量,则式(3)可简化为:

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K_e\Delta\varepsilon \quad (6)$$

式中: K_T 为裸传感光纤光栅的温度系数; K_e 为裸传感光纤光栅的应变系数。

基于光纤光栅传感机理,本研究提出了针对火箭低温贮箱测试的光纤光栅热输出解耦方法。在火箭低温贮箱测试中,考虑到结构材料在剧烈温度变化下的热胀冷缩,则式(6)中的 $\Delta\varepsilon$ 包含2部分:1)结构受力学载荷产

生的机械应变 $\Delta\varepsilon_s$; 2) 结构自身热膨胀带来的热应变 $\Delta\varepsilon_T$ 。考虑到在低温贮箱应用中的粘接剂应变传递效率, 本研究引入胶层传递因子 θ_g , 则光纤光栅的波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 可以表示为:

$$\Delta\lambda_B = K_T \Delta T + K_e \theta_g (\Delta\varepsilon_s + \Delta\varepsilon_T) \quad (7)$$

令低温贮箱测试中光纤光栅热输出产生的中心波长变化部分为 $\Delta\lambda_{BT}$, 则 $\Delta\lambda_{BT}$ 由温度输出和热应变输出两部分组成, 可表示为:

$$\Delta\lambda_{BT} = K_T \Delta T + K_e \theta_g \Delta\varepsilon_T \quad (8)$$

若将一根应变传感光栅粘贴在被测结构上感受结构的应变和温度, 一根补偿光栅粘贴在与被测结构相同的材料块上, 而不感受结构机械应变, 则该补偿光栅测得的波长响应即为应变传感光栅响应的热输出部分。

将式(7)和(8)合并后即可得到结构的机械应变 $\Delta\varepsilon_s$ 为:

$$\Delta\varepsilon_s = \frac{\Delta\lambda_B - \Delta\lambda_{BT}}{K_e \theta_g} \quad (9)$$

区别于传统的双光栅温度补偿方法, 在火箭低温贮箱试验中, 在不同测点位置均布置补偿块会带来大量多余物, 易给结构带来损伤且操作繁琐, 因而直接测得 $\Delta\lambda_{BT}$ 难度较大。而在测点附近布置悬置的裸光栅(温度光栅, 仅响应温度)较容易实现, 如果获得了温度光栅与粘贴在补偿块上的补偿光栅之间的响应关系, 则直接在每个应变测点附近布置裸光栅即可得到补偿光栅的热输出响应, 进而实现应变传感光栅的热输出数据解耦, 而这一关系可通过预先标定试验得到。

假设温度光栅的波长变化量为 $\Delta\lambda_T$, 则通过标定, 得到 $\Delta\lambda_{BT} = f(\Delta\lambda_T)$, 则式(9)可转换为:

$$\Delta\varepsilon_s = \frac{\Delta\lambda_B - f(\Delta\lambda_T)}{K_e \theta_g} \quad (10)$$

以上即为低温贮箱环境光纤光栅热输出与机械应变之间的数据解耦原理。

2 低温热输出特性标定实验

为了获取光纤光栅在低温环境下的热输出特性与响应关系, 本研究搭建了光纤光栅极低温环境下热输出特性标定实验系统, 得到粘贴在结构材料块上的补偿光栅与温度光栅的响应关系。光纤光栅热输出标定实验系统布置示意如图 2 所示。

实验中光纤光栅布置方式如图 3 所示。使用耐低温双组分环氧树脂胶将补偿光栅固定在结构材料(铝合金 2219, 与贮箱材料一致)试片上, 同时感受温度影响和试片的热应变影响; 将温度光栅穿过毛细不锈钢管后布置在与补偿光栅相同的温度场内, 仅感受温度变化。

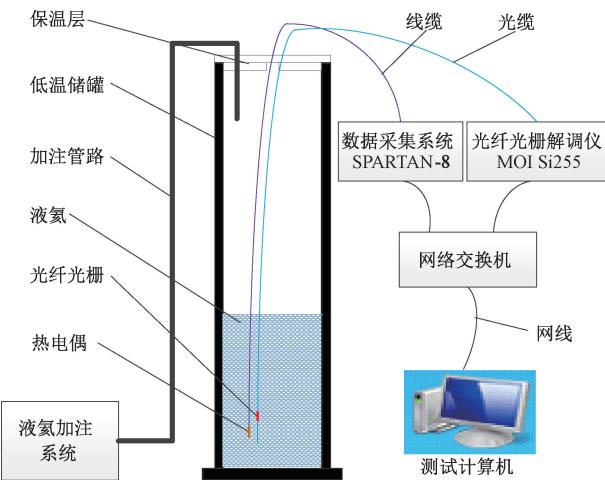


图 2 热输出特性标定实验系统

Fig. 2 Schematic diagram of the calibration experimental system for thermal output characteristics

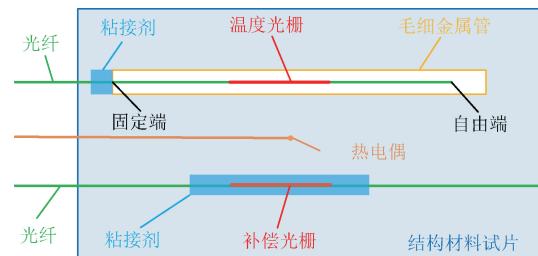


图 3 热电偶、补偿光栅和温度光栅布置方式

Fig. 3 Schematic diagram of the arrangement of thermocouples, compensation gratings, and temperature gratings

实验在液氮环境下开展。补偿光栅、温度光栅和热电偶各 5 组同时置于低温储罐底部, 采集设备在液加注前数据清零。通过液氮加注系统向低温罐内注入液氮且确保液面淹没传感器, 低温罐保温层确保液氮缓慢挥发, 罐内温度从液氮温度缓慢升高至常温, 记录标定试验过程中的光纤光栅响应和热电偶温度数据。标定实验系统实物图如图 4 所示。

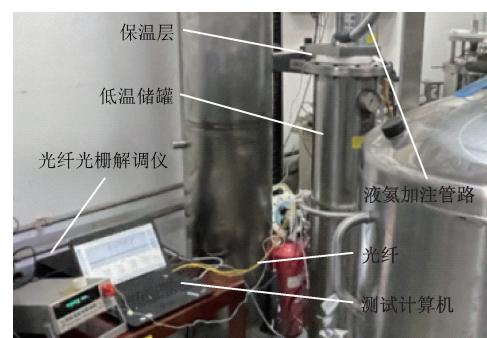


图 4 热输出特性标定实验系统

Fig. 4 Photograph of the calibration experimental system for thermal output characteristics

3 光纤光栅热输出特性标定及解耦

获取响应曲线后, 分别对 5 组热电偶和 5 组温度光栅数据求平均值, 得到热电偶温度数据曲线和温度光栅波长响应数据曲线, 并绘制在同一时域图中。图 5 为温度标定试验中热电偶平均温度数据、温度光栅平均波长响应数据随时间的变化关系曲线图。

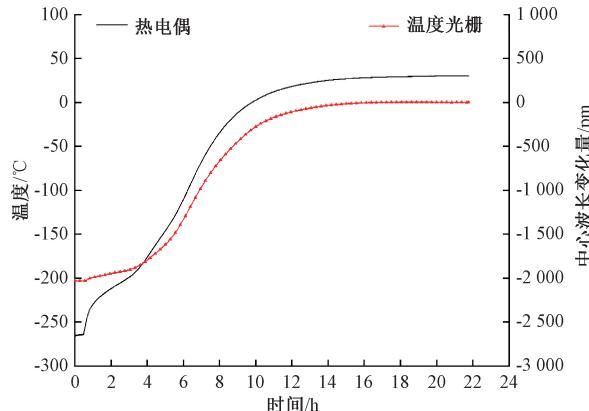


图 5 热电偶及温度光栅响应时域曲线

Fig. 5 Time-domain response curves of thermocouples and temperature gratings

从图 5 可以看到, 从常温(31°C 左右)至液氦温度, 温度光栅反射中心波长累计变化量绝对值约为 2 000 pm。随着温度缓慢回升, 温度光栅中心波长变化量逐渐减少, 回到常温时, 中心波长变化量趋近于 0。

以温度光栅中心波长变化量为自变量, 热电偶温度为因变量, 绘制温度-中心波长变化量响应曲线, 如图 6 所示。可以看到温度和波长变化量的关系曲线光滑, 且存在明显的非线性关系。为了在工程应用中高效计算以

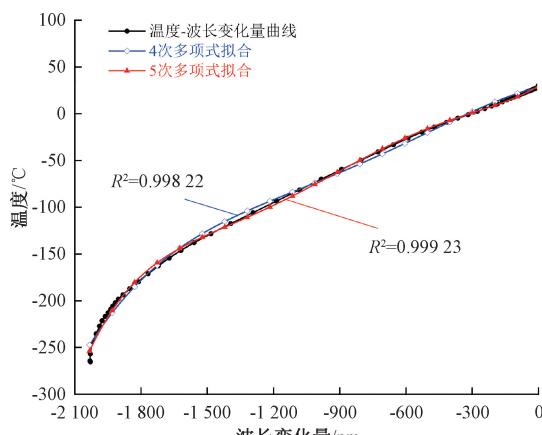


图 6 裸光纤光栅响应及热输出拟合曲线

Fig. 6 Bare fiber Bragg grating response and thermal output fitting curve

便于获取高速实时数据, 本研究采用多项式拟合方式去获取温度与中心波长变化量关系, 通过构建多项式函数逼近数据曲线, 利用最小二乘法残差平方和确定最佳系数。本研究在实验中采用的是 5 次多项式拟合, 拟合曲线可以准确地反映温度和温度光栅中心波长变化量的关系。拟合优度达到 0.999 23。

图 7 为补偿光栅与温度光栅中心波长变化量响应时域曲线, 横坐标为时间, 纵坐标为光纤光栅中心波长变化量。

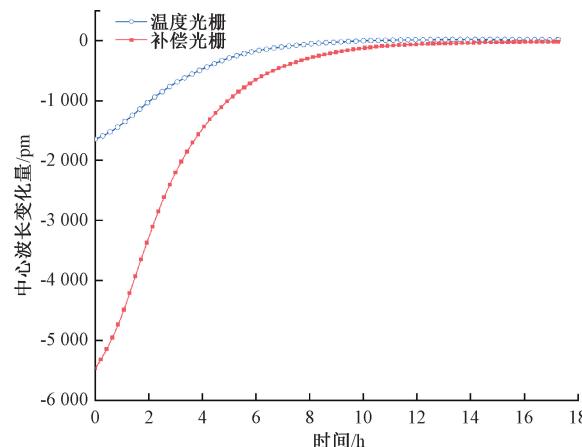


图 7 应变传感光栅和温度光栅响应时域曲线

Fig. 7 Time-domain response curves of strain sensing grating and temperature grating

图 7 中点线为补偿光栅中心波长响应曲线, 补偿光栅粘贴在结构材料试片上, 同时感受温度变化和材料试片本身的热应变; 图 7 中实线为布置在补偿光栅附近的温度光栅中心波长响应曲线, 仅感受补偿光栅附近温度变化。从液氦温度环境至常温环境, 两类光纤光栅中心波长变化量随着温度升高逐渐减少, 回到常温后, 中心波长回到清零值并趋于稳定。

以补偿光栅中心波长变化量响应数据为纵坐标, 温度光栅中心波长变化量响应数据为横坐标, 绘制补偿光栅热输出-温度光栅热输出响应关系曲线, 如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 粘贴在结构材料试片上的补偿光栅中心波长响应与仅感受温度的温度光栅中心波长响应响应具备一定的线性关系。鉴于应用场景是火箭低温贮箱的液氮液氢环境, 为了进一步提升测量精度, 本研究未对标定曲线全区域进行拟合处理, 而是选择了处于曲线段低温线性区域进行拟合, 以保证低温段的测试准确性。经拟合得到应变传感光栅响应与温度补偿光栅响应之间存在固定倍数关系, 系数约为 3.46, 即在常温至液氦温区范围内, 粘贴在铝合金上的光纤光栅热输出为裸光纤光栅热输出的 3.46 倍。因此在低温贮箱试验中, 仅需要测得其附近温度光栅的波长响应, 根据标定得到的

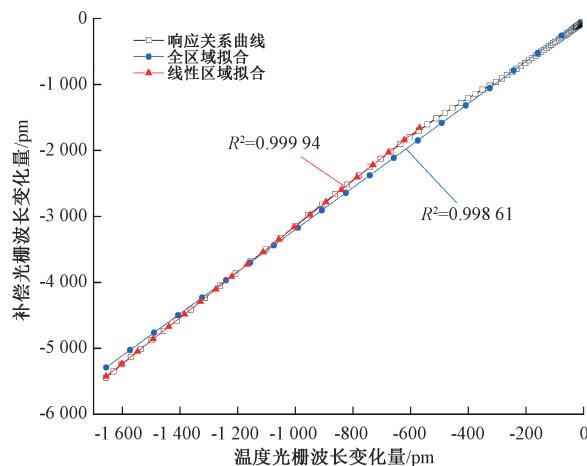


图 8 应变光栅热输出-补偿光栅热输出响应及拟合曲线

Fig. 8 Thermal output response and fitting curve of strain grating and compensation grating

响应关系推导应变传感光栅的热输出响应数据,实现热输出与机械应变数据解耦。

4 低温贮箱共底光纤应变/温度在线监测

为了验证光纤光栅低温热输出解耦方法,本研究在低温贮箱地面试验中开展了应用研究,搭建了光纤光栅低温贮箱在线监测系统,系统组成原理图如图 9 所示,前端设备间主要设备为 UPS 电源、Si255 光纤光栅解调仪等;后端测控间主要设备为测试计算机。布置在低温贮箱内部的光纤传感网络通过光缆连接至前端设备间解调仪,前后端测试设备通过交换机和通讯光纤进行数据传输。

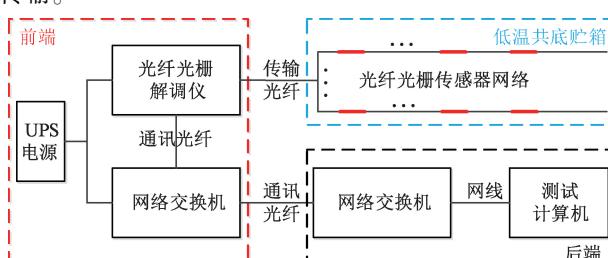


图 9 光纤光栅贮箱在线监测系统组成原理

Fig. 9 Schematic diagram of the composition of the fiber

Bragg grating storage tank online monitoring system

光纤光栅低温贮箱在线监测应用对象为贮箱夹层共底,图 10 为低温贮箱共底结构应变测点布置情况,在低温贮箱共底结构表面(氢箱一侧)沿半径方向均匀布置光纤光栅应变和温度传感器网络,从共底弧顶开始,布置了 8 处光纤 T 型应变测点和温度测点,分别编号为 1~8。每处光纤测点均布置了 T 型电阻应变片作为对比。

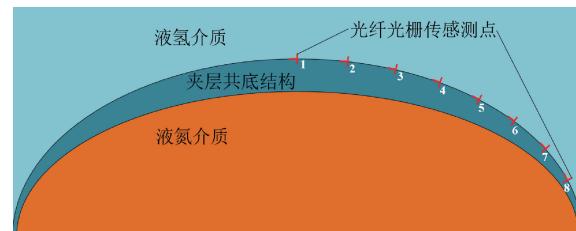


图 10 低温贮箱共底结构应变测点布置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of strain measurement point layout on the common-bottom structure of a cryogenic storage tank

每个测点处均由一对 T 型排列的应变传感光栅与一个温度光栅组成。应变传感光栅通过粘接剂粘接在结构表面,用于测量结构机械应变;温度光栅布置在应变传感光栅附近的毛细钢管内,仅感受该测点温度变化。贮箱共底光纤光栅 T 型应变测点和温度测点布置方式如图 11 所示。

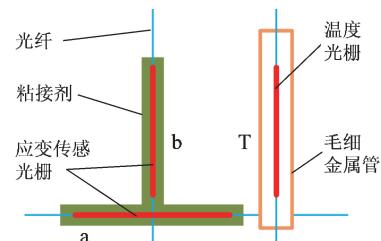


图 11 光纤光栅 T 型应变测点布置方式

Fig. 11 Schematic diagram of the layout of T-shaped strain measurement points with fiber Bragg gratings

为了提高光纤光栅传感器在低温贮箱试验中的存活率,本研究对传感器布置做了特殊处理,除了应变传感光栅栅区外,贮箱内部全线路光纤均采用不锈钢弹簧套管进行防护,既保证光纤免受机械损伤,同时确保光纤在箱内的自由弯曲曲度。同时,光纤套管全线路采用点胶法进行固定,确保无悬置传输线。

贮箱低温试验分为低温介质(液氮)加注和贮箱增压两个工况。低温贮箱液氮介质加注工况过程为:首先加注氧箱,氧箱加注液氮至最高液位后,氢箱加注少量液氮,完成箱体预冷,预冷结束后,正式加注氢箱液氮,直到最高液位^[18]。

加注工况过程中,共底各测点光纤温度在线监测曲线如图 12 所示。

图 12 中温度曲线表明:氧箱加注过程中,氢箱一侧的共底温度仅轻微波动,无显著变化,表明共底夹层保持了良好的隔热性能;氢箱预冷加注开始后,液氮介质直接接触到共底测点,各测点温度迅速达到液氮温区;预冷加注停止后放置过程中,各测点温度缓慢回升,在共底上按半径方向分布的不同位置测点表现出了显著的温度梯

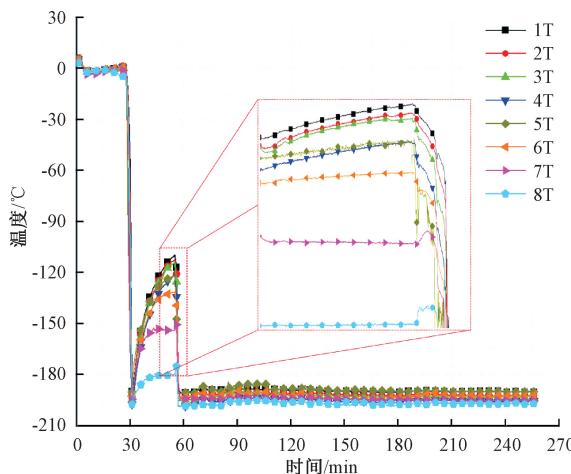


图 12 液氮介质加注工况光纤温度监测曲线

Fig. 12 Fiber optic temperature monitoring curve under liquid nitrogen filling condition

度;氢箱正式液氮加注开始后,各测点温度再次迅速达到液氮温区,直至氢箱液氮加满温度均维持在稳定水平。各测点光纤温度数据的分布、变化规律与测点位置、加注过程相符合,准确反映了加注过程中贮箱共底温度状态。

图 13 为加注工况贮箱共底各电阻应变片和光纤应变测点连续监测曲线。

从图 13 中可以看出,氧箱加注时,贮箱整体结构预冷收缩,共底结构受整体结构载荷作用,应变测点表现为压应变,应变数值随着加注过程逐渐增加;此后氢箱预冷加注,液氮导致共底底部 Y 型环迅速收缩,共底结构氢箱侧表面受拉,表现为正应变;随着放置过程中液氮挥发, Y 型环收缩程度减弱,共底测点应变逐渐恢复为压应变;氢箱正式加注开始后,测点再次快速回到正应变,但由于经过了预冷,共底结构各测点最大应变数值小于开始预冷加注时的峰值应变;随着氢箱正式液氮加注的进行,正应变逐渐降低,加注完成后,所有测点表现为受压。

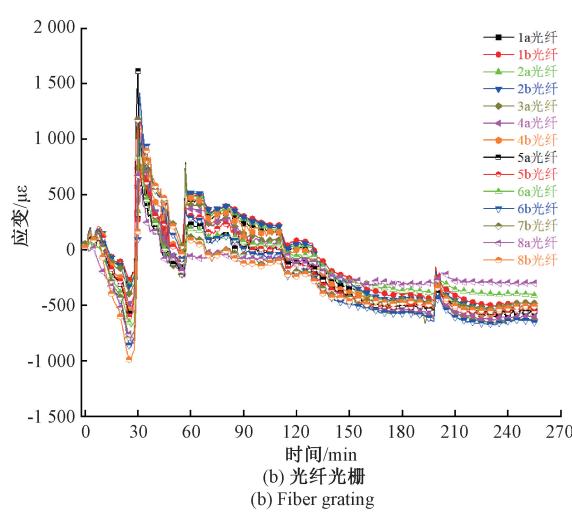
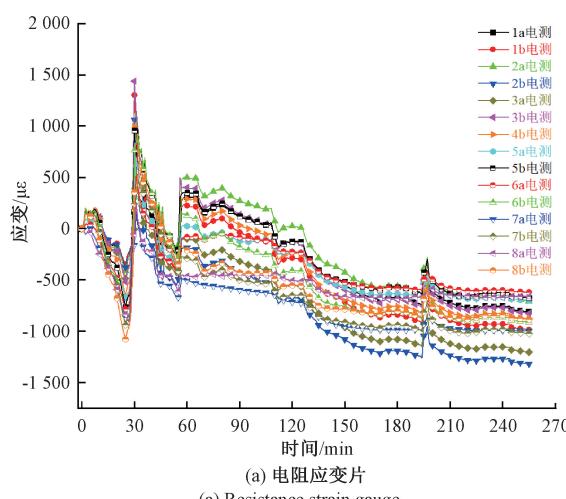


图 13 液氮介质加注工况共底测点应变曲线

Fig. 13 Strain curve of common bottom-measuring points under liquid nitrogen filling condition

各测点应变变化规律与加注过程中的共底结构受力状态相符,光纤应变数据与电阻应变片测得的应变数据规律一致,数值一致性较好,共同反映了加注工况下贮箱工底结构受力状态。

加注完成后,开展低温贮箱内压加载工况,分别对氧箱、氢箱分级施加内压,共底结构受到内压/外压作用。图 14 为内压/外压设计合格试验贮箱共底各测点光纤应变连续监测曲线。曲线呈阶梯变化准确反映了各级内压增加和保持过程。

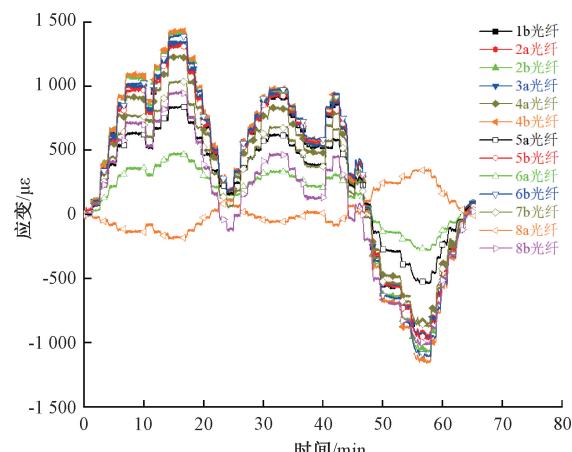


图 14 内压/外压工况光纤应变连续监测曲线

Fig. 14 Continuous monitoring curve of fiber optic strain under internal/external pressure conditions

从图 14 中可以看出:在内压加载过程中,贮箱共底光纤应变测点数据平整光滑,无异常波动情况,准确反映了贮箱受内压载荷作用时共底结构各测点位置应变状态。

从光纤连续应变数据中采样阶梯数据,得到与电阻应变片一致的到级数据,绘制如图 15 所示的曲线。

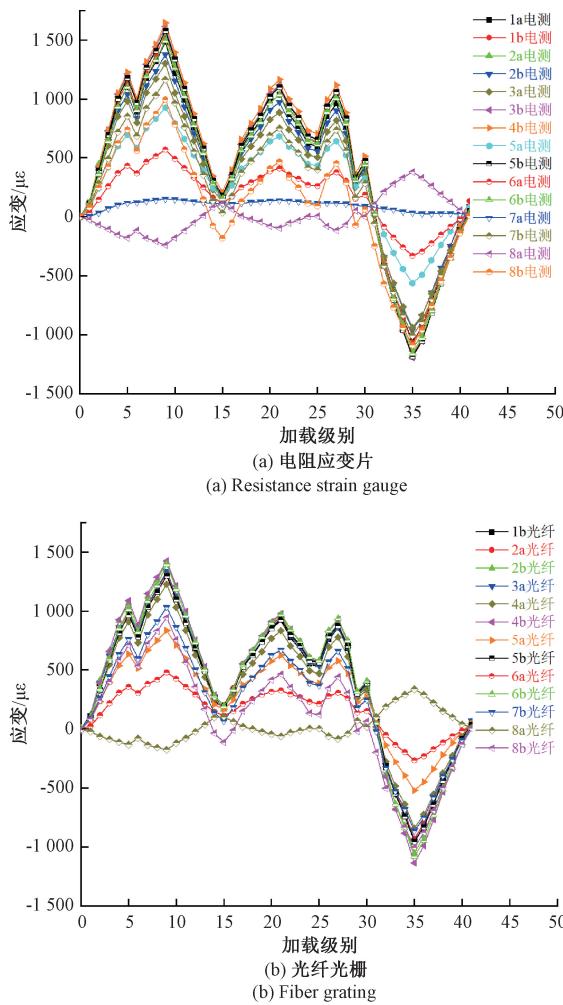


图 15 贮箱内压加载工况共底测点应变曲线

Fig. 15 Strain curve of common-bottom measuring points under internal pressure loading conditions of the storage tank

从图 15 中可以看出,在整个贮箱内压加载过程中,光纤测得应变数据与电测数据变化趋势一致性较高,数据大小分布规律与测点实际布置位置情况相符。

为了对比光纤光栅和电阻应变片两种测试结果的一致性,本研究引入相关系数进行分析:设共底各应变测点位置编号为 i ($i = 1, 2, \dots, 8$),贮箱内压加载级别编号为 j ($j = 1, 2, \dots, 41$)。设电测数据中测点 j 处第 j 级数据为 D_{ij} ,则由测点 i 处电测应变数据随级别变化向量为 $\mathbf{d}_i = [\mathbf{D}_{i1}, \mathbf{D}_{i2}, \mathbf{L}, \mathbf{D}_{ij}]$;同理,由测点 i 处光纤光栅测得的应变不同级别数据组成的向量为 $\mathbf{f}_i = [\mathbf{F}_{i1}, \mathbf{F}_{i2}, \mathbf{L}, \mathbf{F}_{ij}]$ 。

对各测点处光纤光栅应变向量 \mathbf{f}_i 与电阻应变片应变向量 \mathbf{d}_i 计算相关系数,计算公式为:

$$r_i = \frac{\text{cov}(\mathbf{d}_i, \mathbf{f}_i)}{\sqrt{\text{Var}[\mathbf{d}_i] \cdot \text{Var}[\mathbf{f}_i]}} \quad (11)$$

式中: r_i 为向量间相关系数; cov 代表协方差; Var 代表方差。

对各测点处光纤应变随级别变化向量与电测数据向量求相关系数。表 1 为贮箱内压加载工况各测点光纤光栅与电阻应变片应变数据相关性计算结果。

表 1 光纤光栅与电测应变数据相关性

Table 1 Correlation between fiber Bragg grating and electrical strain measurement data

测点位置	相关系数	测点位置	相关系数
1b	0.999 5	5b	0.999 8
2a	0.999 7	6a	0.999 1
2b	0.999 6	6b	0.999 7
3a	0.999 4	7b	0.999 8
4b	0.999 4	8a	0.997 0
5a	0.999 7	8b	0.999 4

从表 1 可以看出,存活的应变传感光栅应变测量结果与同位置电阻应变片测量结果进行对比,2 种测试方法在各测点的数据相关性均超过 0.997。与传统方法对比结果表明,本研究采用的光纤光栅低温应变测试方法有效实现了热输出数据解耦,进而获得了较高的应变测量精度,在火箭低温贮箱地面试验中成功实现了应变在线监测工程化应用。

本次应用在贮箱共底结构共布置 16 个应变传感光栅,3 处测点由于受到箱内氮气置换高速气流直接冲击导致光纤脱粘失效,传感器存活率 81.25%,基本满足型号地面试验测试需要;布置了 8 个温度补偿光栅,传感器存活率 100%。值得注意的是,以光纤未来箭上遥测为目标,本次应用的光纤存活率还有进一步提升的需要,未来需要进一步研究光纤防护和封装工艺,并针对应用场景进行特殊工艺设计。

5 结 论

基于光纤布拉格光栅(FBG)传感原理,本研究系统揭示了低温环境下光纤光栅热输出的多重耦合机制。通过建立光纤应变传感光栅热-力耦合模型,解析了光纤光栅热输出与机械应变的交叉敏感特性 ($\Delta\lambda_B = K_T \Delta T + K_\theta \theta_g (\Delta\epsilon_s + \Delta\epsilon_T)$),进而提出了适用于火箭低温贮箱工程试验的光纤光栅低温应变测试热输出数据解耦方法。自主搭建了覆盖液氦温区(4 K)至常温(31℃)的标定实验系统,获取了光纤光栅的低温温区热输出特性和响应关系。根据标定试验分析结果,将上述方法应用于火箭低温贮箱地面试验,构建了由 16 个应变传感光栅和 8 个温度光栅组成的共底结构应变/温度传感网络。在低温

介质(液氮)加注和箱内增压的工况下,实时获取了共底结构温度和应变数据,与低温电阻应变片测试数据进行了对比分析,结果表明,本研究所述测试方法可有效实现光纤光栅热输出解耦,应变测试精度良好(与电测手段测试结果相关性超过 0.997)。

本研究成果为运载火箭低温贮箱结构健康监测提供了新型解决方案,其全光纤测试架构展现出独特优势。工程应用数据显示,本系统在全流程试验中实现了较高的应变和温度传感器存活率,但在极端环境冲击下仍会导致 18.75% 的应变传感光栅失效,这揭示未来需重点突破耐低温封装、粘贴技术与光栅阵列冗余设计,以提升工程适用性,满足航天领域对传感器可靠性的极高要求。本研究提高了光纤测试技术在低温场景的应用灵活性,为光纤在型号地面试验大规模应用提供了案例支撑,为后续箭载光纤监测系统研制奠定了理论基础与技术储备。

参考文献

- [1] 宋征宇,刘立东,陈晓飞,等.新一代中型系列运载火箭长征八号的发展及其关键技术[J].宇航学报,2023,44(4):476-485.
- SONG ZH Y, LIU L D, CHEN X F, et al. The development of the new generation of medium-sized launch vehicles Long March-8 and its key technologies [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(4):476-485.
- [2] 顾铖璋,韩涵,吕榕新.运载火箭低温贮箱夹层共底的力学性能分析和结构失效形式研究[C].中国力学大会-2013 论文摘要集,2013:215.
- GU CH ZH, HAN H, LYU R X. Mechanical performance analysis and structural failure mode study of the inter-layer with a common bottom in the cryogenic storage tank of a carrier rocket [C]. Chinese National Congress on Theoretical and Applied Mechanics (2013): Proceedings of Abstracts, 2013: 215.
- [3] 贾洲侠,王磊,姚艺豪,等.微重力环境下低温推进剂贮存过程热质传递特性研究[J].强度与环境,2025(1):36-41.
- JIA ZH X, WANG L, YAO Y H, et al. Study on heat and mass transfer characteristics of low temperature propellant storage process in micro-gravity environment [J]. Structure & Environment Engineering, 2025(1):36-41.
- [4] 陈光奇,王丽红,孙冬花,等.火箭低温贮箱的新型共底安全监测系统[J].导弹与航天运载技术,2010(4):46-48.
- CHEN G Q, WANG L H, SUN D H, et al. A new safety monitor system for bulkhead of cryogenic tanks on launch vehicles [J]. Missiles and Space Vehicles, 2010(4):46-48.
- [5] 吴昊,张华标,许令顺,等.低温传感器的应用进展[J].低温与超导,2013,41(12):10-12,58.
- WU H, ZHANG H B, XU L SH, et al. Progress in the application of low temperature sensors [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2013, 41(12):10-12, 58.
- [6] DROMIEHIE E, PRUSTY B G, COMPSTON P, et al. In-situ simultaneous measurement of strain and temperature in automated fiber placement (AFP) using optical fiber Bragg grating (FBG) sensors [J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2017 (32): 52-61.
- [7] JUWET T, LUYCKX G, LAMBERTI A, et al. Monitoring of composite structures for re-usable space applications using FBGs: The influence of low earth orbit conditions [J]. Sensors, 2024, 24(1):34.
- [8] 周震,刘显明,韩国庆,等.基于光纤光栅的高速气流总温测量方法[J].仪器仪表学报,2022,43(1): 83-92.
- ZHOU ZH, LIU X M, HAN G Q, et al. High-speed airflow total temperature measurement method based on fibre optic grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(1): 83-92.
- [9] 张俊,陈光辉,倪国新,等.FBG 传感技术在飞机机翼动态形变监测中的应用[J].仪器仪表学报,2023,44(11):252-260.
- ZHANG J, CHEN G H, NI G X, et al. Application of FBG sensing technology in dynamic deformation monitoring of aircraft wings [J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation, 2023, 44(11), 252-260.
- [10] 江舒,李涛,林杰俊,等.船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究[J].仪器仪表学报,2020,41(6): 35-42.
- JIANG SH, LI T, LIN J J, et al. Development and application of marine fibre optic grating strain sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41 (6): 35-42.
- [11] 田野,段超,谭滔,等.基于光纤布拉格光栅的残余应力测试技术研究进展[J].激光与光电子学进展,2023,60(11):111-121.
- TIAN Y, DUAN CH, TAN T, et al. Research progress on residual stress testing technology based on fibre Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11):111-121.
- [12] 孙彬彬,王海勇,杨洋,等.光纤光栅传感测量技术在火箭贮箱中的应用[J].光器件,2018,42(4):40-43.
- SUN SH SH, WANG H Y, YANG Y, et al. Application of fiber Bragg grating sensor measuring technique in

- rocket tank [J]. Optical Device, 2018, 42(4):40-43.
- [13] LI R Y, TAN Y G, CEHN Y Y, et al. Investigation of sensitivity enhancing and temperature compensation for fiber Bragg grating (FBG)-based strain sensor [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48: 199-206.
- [14] 李维善,陈琛,王海林,等.基于Bragg光栅交叉法在温度补偿中的研究[J].仪表技术与传感器,2011(6):87-88,92.
- LI W SH, CHEN CH, WANG H L, et al. Research on temperature compensation based on Bragg grating cross method [J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(6):87-88,92.
- [15] 张鹏年,关明智.极端低/变温环境下光纤布拉格光栅温度传感性能研究[J].低温与超导,2023,51(3):1-6,26.
- ZHANG P N, GUAN M ZH. Research on the temperature sensing performance of fiber Bragg grating under extreme low/variable temperature environment [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2023, 51(3):1-6,26.
- [16] 王雅莉,徒芸,涂善东,等.基于光纤光栅传感器温度补偿的低温应变测量方法研究[J].仪表技术与传感器,2023(6):26-33.
- WANG Y L, TU Y, TU SH D, et al. Research on low temperature strain measurement method based on fiber Bragg grating sensor temperature compensation [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(6):26-33.
- [17] 丁朋,董小鹏,叶肖伟.考虑温度和应变交叉敏感的光纤布拉格光栅测量研究[J].激光与光电子学进展,2018,55(2):142-146.
- DING P, DONG X P, YE X W. Research on fiber Bragg grating measurement considering temperature and strain cross sensitivity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018,55(2):142-146.
- [18] 王彬,杨瑞生,郑卫东,等.运载火箭共底贮箱加注过程非稳态温度分布数值模拟[J].化工学报,2020,71(S1):68-76.

WANG B, YANG R SH, ZHENG W D, et al. Numerical simulation of unsteady temperature distribution during the refueling process of the common bottom tank of a carrier rocket [J]. CIESC Journal, 2020, 71(S1):68-76.

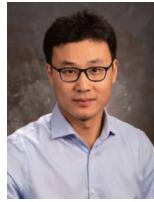
作者简介



朱超杰(通信作者),2016年于南京航空航天大学获得学士学位,2019年于北京航空航天大学获得硕士学位。现为北京强度环境研究所工程师,主要研究方向为结构静强度试验技术和光纤传感技术。

E-mail:buaazcj@126.com。

Zhu Chaojie (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2016 and his M. Sc. degree from Beihang University in 2019. He is currently an engineer at the Beijing Institute of Strength and Environment. His main research interests include structural static strength testing technology and fiber optic sensing technology.



刘洋,2007年于重庆大学获得学士学位,2010年于浙江大学获得硕士学位,2019年于宾夕法尼亚州立大学获得博士学位。现为天津大学精密仪器与光电子工程学院教授,主要研究方向为复杂结构介质声场传播和散射理论、智能反演成像方法、传感器与仪器系统开发研究。

E-mail:idim@tju.edu.cn。

Liu Yang received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2007, his M. Sc. degree from Zhejiang University in 2010, and his Ph. D. degree from Pennsylvania State University in 2019. He is currently a professor at the School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University. His main research interests include the theory of sound field propagation and scattering in complex structures and media, intelligent inversion imaging methods, and the development and research of sensor and instrument systems.