

光纤光栅传感测量技术在火箭贮箱中的应用

孙杉杉,王海勇,杨洋,敖飞平,陈洁

(上海航天设备制造总厂有限公司 科瑞工业研究所,上海 200245)

摘要:以运载火箭贮箱的轴压试验为应用实例,介绍了光纤光栅传感原理,阐述了火箭燃料贮箱筒段轴压试验的目的和方法,提出了使用光纤光栅传感测量方案进行贮箱内、外表面应变监测。对该方案和传统电测方案进行对比分析,光纤传感测量技术具有无缆化、电磁兼容性好、减重和集成度高等优势,更符合航天器对测试设备的要求。该方案为光纤传感测量技术在航天器的结构监测、多参量测量等方向的应用提供了理论支持。

关键词:光纤光栅;测量系统;火箭贮箱;轴压试验

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)04-0040-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.04.011

Application of fiber Bragg grating sensor measuring technique in rocket tank

SUN Shanshan, WANG Haiyong, YANG Yang, AO Feiping, CHEN Jie

(Kerui Industry Research Institute, Shanghai Aerospace

Equipments Manufacturer Co., Ltd, Shagnhai, 200245, China)

Abstract: Taking the axial compression test in rocket tank as a practical case, This paper introduces the principle of fiber Bragg grating, and describes the purpose and method of the axial compression test in rocket tank cylinder. The paper proposes the fiber Bragg grating sensor measurement scheme to measure the strain on the inner and outer surfaces of rocket tank cylinder. Compare fiber Bragg grating sensor measurement scheme and strain gauge measurement scheme, the fiber Bragg grating sensor measurement scheme has the advantages of non cable, good electromagnetic compatibility, light weight and high integration, and more in line with the requirements of spacecraft testing equipment. The fiber Bragg grating sensor measuring scheme provides technical support for the application of spacecraft structure monitoring, multi-parameter measurement and so on.

Key words: FBG; measurement system; rocket tank; axial compression test

0 引言

装载火箭推进剂的箱体在运输、起吊等工况下存在裂缝、爆裂等隐患,一旦发生,事故将会带来巨大的损失。目前对火箭贮箱的应变监测多采用电阻应变片,但是它们存在布设工艺复杂、稳定差和抗电磁干扰差等缺点。在测量大型结构件时,应变片的使用会

导致大量导线存在,不利于故障排查,而且大量电缆的重量可能会改变结构体的力学性能。光纤光栅传感器不仅具有尺寸小、重量轻、灵敏度高、抗电磁干扰能力强和本征自相干能力强等优点,而且还可以在在一根光纤上利用复用技术实现多点传感、多参量分布式区分测量^[1]以及在线监测^[2]、预警^[3]等功能。波音公司和空客公司已将光纤传感技术应用于飞机的结构健康监测中^[4]。光纤光栅技术应用在航天领域,符合减重、无电缆化等要求,可实现航天器的实时监测^[5]。本文使用

收稿日期:2018-01-30

基金项目:上海航天科技创新基金(SAST2017-059)资助。

作者简介:孙杉杉(1990-),女,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为光纤传感测量及应用。

光纤光栅传感测量方案在运载火箭贮箱的轴压试验中对贮箱内、外表面进行应变监测。

1 光纤光栅传感原理

基于光纤光栅的传感过程是通过外界物理参量对光纤布喇格波长的调制来获取传感信息,当光通过光纤布喇格光栅时,满足布喇格相位条件的光会有很强的反射^[7],反射光的中心波长为:

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

其中, λ_B 为光栅中心波长, Λ 为光栅周期, n_{eff} 为纤芯的有效折射率^[8]。

光纤光栅传感器在光纤传感领域应用广泛,若测量时引起光纤光栅温度和应变发生变化,反射光的中心波长也会随之发生变化,即光纤光栅反射光中心波长的变化反映了被测信号的变化情况。

2 火箭贮箱的轴压试验

火箭贮箱是由多块壁板焊接而成,在燃料加注和火箭飞行过程中,贮箱壁板会承载较大载荷,如果受力处设计不合理,贮箱薄弱环节可能会出现变形甚至无法回弹,严重的可能会导致事故发生。因此,同批次产品中会选择一个试验件,使用轴压试验验证贮箱的结构强度和稳定性^[8]。

2.1 轴压试验

以某运载火箭燃料贮箱的轴压试验为例,火箭贮箱轴压试验加载方案如图 1 所示,在试验件上端面用加力帽、加载梁和拉杆等加载系统加轴压载荷。正式

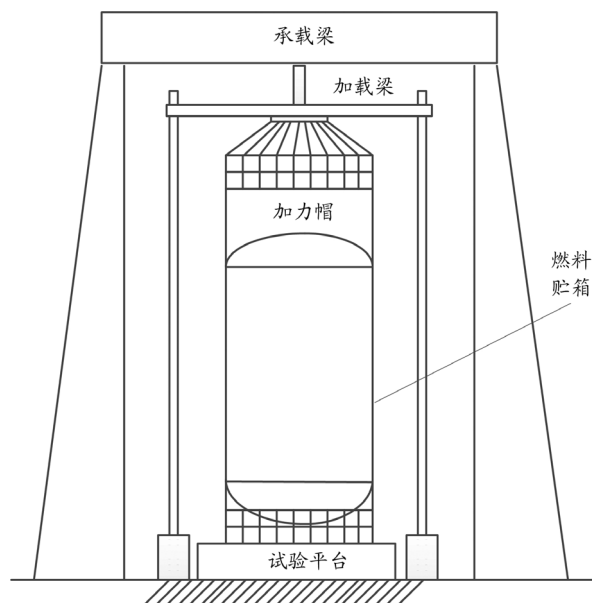


图 1 轴压试验加载方案示意图

试验开始后,以 10% 设计载荷为一级加载测量,至设计载荷的 100%,然后退载退压到零,试验结束。试验过程中使用传感器检测试验件的内、外表面的应变量,并转换成测点的位移量,检验火箭贮箱在轴压载荷作用下的结构强度及稳定性,其中等效轴压设计载荷通过模拟仿真计算得到。

2.2 火箭燃料贮箱筒段的应变测量

新一代运载火箭中使用液氧、煤油或液氧、液氢为燃料,其中液氧、液氢的温度较低,液氧温度为 -183°C ,液氢的温度为 -252°C ,贮箱要求不仅耐压,而且耐低温,在燃料加注和飞行过程中,贮箱的受力应在结构体变形可回弹范围内。

以某火箭的燃料贮箱为例,其两端是圆弧形拱状,中间是圆柱形筒段。贮箱的筒段是由 3 块中心角为 120° 的铝合金壁板拼焊而成,为验证筒段的结构强度,需测量轴压试验中筒段内、外表面的应变大小。应变测点(测点 1、2、3、4)主要布置在焊点处和壁板的中线,具体示意图如图 2 所示。

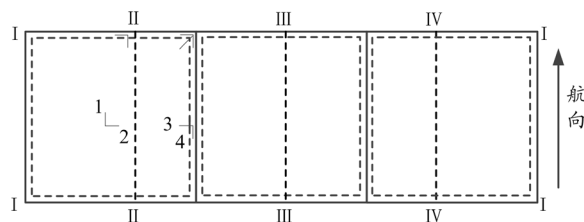


图 2 贮箱筒段轴压工况测点布置示意图(部分)

火箭贮箱筒段的轴压试验是通过传感测量、数据解调和数据处理等技术,对贮箱筒段各个测点的应变进行测量,并将应变量转换成位移量,与理论分析值比较,验证火箭贮箱筒段轴压稳定性是否满足强度设计要求。

3 光纤光栅传感测量系统

3.1 光纤光栅传感测量系统组成

本文使用光纤光栅传感测量系统完成火箭贮箱筒段的内、外表面应变监测。在整个轴压试验过程中,需要在待测点安装光纤光栅传感器,这些光纤传感器以一定的连接方式连接到光纤解调通道,并将测量信号传输至光纤解调仪进行解调,解调仪将解调后的数字信号传送至上位机软件进行处理和分析。

轴压试验中光纤光栅传感测量系统结构图如图 3 所示,该系统由 3 部分组成:光纤光栅传感阵列、光纤光栅解调系统和信息处理及分析系统(监控中心)。其

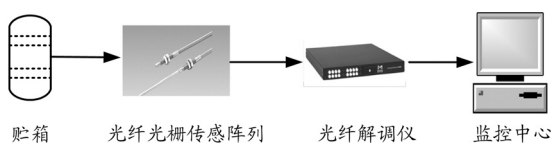


图3 轴压试验中光纤光栅传感测量系统示意图

中,光纤光栅传感阵列应用准分布式光纤光栅传感技术,通过光纤光栅传感网络,将贮箱筒段各测点的应变量转变成不同波长的反射波,经由光纤传输至解调系统。光纤光栅解调系统的功能是通过光纤解调仪将光栅反射回来的光信号转换成数字信号,并转换成应变、温度等物理量在计算机终端显示、记录或直接进入监测数据库。信息处理及分析系统由计算机主处理器及软件系统构成,软件系统包括信息的分析、处理、传送和存储,工作站内的信息可用作结构的分析、评估等。

3.2 光纤光栅传感测量方案与传统电测方案对比

轴压试验中的传统方案多使用应变片作为传感元件,1个应变片最多可同时测量3个方向的应变。每个方向应变的测量要单独接1条电路,每次测量数十个点需要接大量的测试线,测试线围绕在火箭贮箱周围,彼此之间会有电磁干扰,一旦应变片和导线间的焊点脱落,出现故障,排查起来十分困难。与传统电测

表1 光纤光栅传感测量方案与传统电测方案对比

性能	传统电测方案	光纤光栅传感测量方案
集成度	低,单通道测量单点数据	高,传感器串联,单通道测量多点数据
电缆	需多个测量通道,电缆多	光纤传输,无电缆
重量	重,电缆多	轻
电磁兼容性	易受电磁干扰	不受电磁干扰
可靠性	低	高
监测参数	少	多
集成度	低	高

表2 筒段测点的轴向位移(mm)

轴向位移(mm)	设计载荷(%)											
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	0%
测点1位移(mm)	0	-0.07	-0.15	-0.3	-0.34	-0.42	-0.5	-0.62	-0.67	-0.73	-0.82	-0.11
测点2位移(mm)	0	-0.04	-0.12	-0.25	-0.28	-0.37	-0.45	-0.53	-0.58	-0.67	-0.76	-0.1

方案相比,本方案中多个光纤光栅传感器可以通过串联来共用一条测量通道,测试线可减少90%以上,配合上位机软件,能快速定位故障位置,且测试过程中不受电磁干扰。两种测量方案对比如表1所示,其中光纤光栅传感测量方案具有的无缆化、电磁兼容性好、减重和集成度高等优势,比较符合航天器对测试设备的要求。

3.3 测量结果

我们在进行轴压试验的过程中观察到测点的温度几乎没有变化,因此,为了方便计算,可以忽略温度与应变的交叉影响。我们将光纤光栅传感器测量得到的应变值转换为测点的位移量,转换公式如下:

$$\varepsilon = \Delta l / l \quad (2)$$

其中, ε 是应变值, l 是贮箱的长度, Δl 是测点相对位移(单位为mm),即测点的轴向位移或径向位移。本次试验中测点1和测点4测量贮箱筒段的轴向位移,测点2和测点3测量其径向位移。在轴压载荷作用下,贮箱筒段径向位移较小,因此本文不做讨论;测点1和测点4测量得到的轴向位移如表2所示,轴向位移与载荷的关系如图4所示。其中等效轴压设计载荷 $N=265.8\text{kN}$ 。

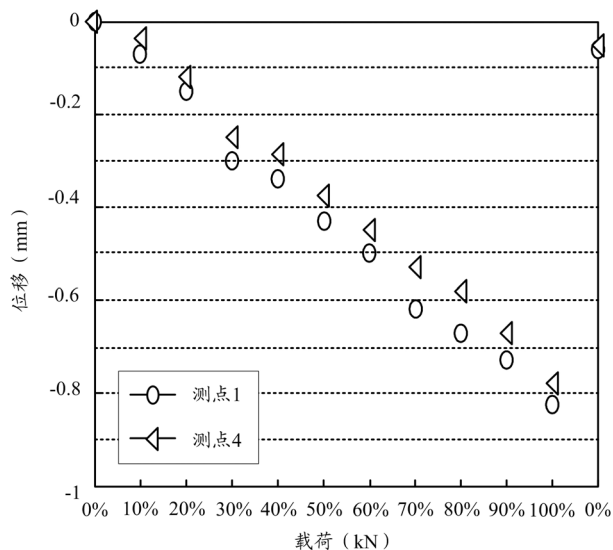


图4 贮箱筒段轴向位移-载荷曲线图

从图4可以看出,在轴压载荷作用下,筒段轴向有明显的变形,在轴压设计载荷作用下,轴向位移最大为0.82mm。

4 结束语

本文采用光纤光栅传感测量系统代替传统电测方案对火箭贮箱筒段进行轴压试验的应变测量,该系统具有集成度高、稳定性好和可靠性高等优点,不仅可用于火箭贮箱的应变测量,而且可以用在航天器的健康结构监测中^[9]。光纤传感器集传感和传输于一身,电磁兼容性好,本征安全,采集数据多元化,非常适合航空航天高电磁干扰、高强度振动、高强度腐蚀、高程度应变和性能评估等极端环境下温度、应变、压力、液位、加速度、声振动以及角速度等多种参量的测量。另外,光纤传感测量系统还能为可回收火箭的设计和使用提供技术支持^[10],光纤传感将会在航天领域有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 陶珺,穆磊,杜平. 多点光纤光栅测温系统在渗流监测中的应用研究[J]. 量子电子学报,2010,27(1):105-109.
- [2] 尹春杰. 基于光纤光栅的高压开关柜温度在线监测系统[J]. 通信技术,2011,35(10):35-37.
- [3] 杨洋,封皓,王宗和,等. 分布式光纤测温预警系统在储油罐上的应用[J]. 光电技术应用,2016,31(6):1-9.
- [4] 刘铁根,王双,江俊峰,等. 尹金德. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报,2014,35(8):1681-1692.
- [5] 于秀娟,余有龙,张敏,等. 光纤光栅传感器在航空航天复合材料/结构健康监测中的应用[J]. 激光杂志,2006,27(1):1-3.
- [6] 李川. 光纤传感器技术[M]. 北京:科技出版社,2015.
- [7] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber gratings sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(18):1441-1463.
- [8] 牛振祺,陈海鹏,褚洪杰,等. 液体火箭液氧贮箱增压与结构耦合分析[J]. 导弹与航天运载技术,2016(6):14-18.
- [9] 冯翔宇,曾捷,李钰,等. 低温环境光纤光栅反射光谱感应特性研究[J]. 上海航天,2017,34,(1):27-31.
- [10] MIZUTANI T. On-board Strain Measurement of a Cryogenic Composite Tank Mounted on a Reusable Rocket using FBG Sensors [J]. Structural Health Monitoring. 2006, 5(3): 205-214.

2018 年征订启事

光通信技术 月刊

主管单位 中国电子科技集团公司

主办单位 中国电子科技集团公司 第三十四研究所

《光通信技术》杂志 1977 年创刊,属中国无线电电子学、电信技术类中文核心期刊,现已成为中国光通信界领域有代表性的刊物,读者遍布国家机关、科研院所、相关厂商、电信运营商和中国的通信用户。其主要栏目有:

- | | |
|--------------|----------------|
| (1) 专题聚集 | (2) 光通信技术与市场 |
| (3) 光通信网络 | (4) 光通信器件 |
| (5) 光纤光缆 | (6) 光通信系统设计与施工 |
| (7) 光通信新产品应用 | |

《光通信技术》为大 16 开本,每期约 13 万字。

刊 号: ISSN 1002-5561
CN45-1160/TN

广告经营许可证: 4503004000141

国内定价: 每期 11 元(含邮费)

海外定价: 每期 11 美元(含邮费)

邮发代号: 48-126

汇款方式:

(1) 银行汇款

开户银行: 建设银行桂林高新支行

账 号: 45001635207050505972

收款单位: 中国电子科技集团公司
第三十四研究所

(2) 邮局汇款

收款人地址: 桂林市六合路 98 号

收款人: 《光通信技术》编辑部

收款人邮编: 541004