

球形压力容器有限元分析与应力检测研究

秦忠宝¹,耿红高¹,郭志青¹,孟飞^{1,2},朱海涛³

(1. 火箭军工程大学 理学院机械教研室,陕西 西安 710025; 2. 陕西省宝鸡市 96411 部队,陕西 宝鸡 721013;

3. 济南军事代表室,山东 济南 250000)

摘要:该文通过理论建模、Workbench 有限元软件仿真和光纤布喇格光栅测量对存储惰性气体的某型号高压球形压力容器承压结构的应力分布进行了理论和实验分析研究,得出承压结构在工作条件下的应力分布规律,为其安全性能评估提供了理论和实验参考。在仿真实验的基础上将性能优越的光纤布喇格光栅引入该型号压力容器承压结构应力检测中,通过实验测量结果与仿真结果对比分析得出光纤布喇格光栅在应力检测方面的良好性能,为该类型球形压力容器的结构应力测量探寻出新的检测手段。

关键词:球形压力容器;Workbench;有限元分析;光纤布喇格光栅;应力检测

中图分类号:TN304.1;TH49 **文献标识码:**A

Study on Finite Element Analysis and Stress Assessment of the Spherical Pressure Vessel

QIN Zhongbao¹, GENG Honggao¹, GUO Zhiqing¹, MENG Fei^{1,2}, ZHU Haitao³

(1. Faculty of Mechanical Dept., Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. 96411 Unit, Baoji 721013, China;

3. Jinan Military Representative Office, Jinan 250000, China)

Abstract: In this paper, the stress distribution of high pressure spherical pressure vessel for storing the inert gas is studied through the theoretical modeling, finite element simulation with Workbench and fiber Bragg grating measurement. The stress distribution law of the pressure structure under the condition of the work has been obtained, which provides the theoretical and experimental reference for the safety performance assessment. Based on the simulation experiment, the optical fiber Bragg grating is introduced into the stress testing of the pressure vessels under pressure structure. It has been shown that the fiber Bragg grating has good performance for the stress testing through comparing the experimental results with the simulation results. This proposed work has explored a new detection means for this type of spherical pressure vessel structure stress measurement.

Key words: spherical pressure vessel; Workbench; finite element analysis; fiber Bragg grating; stress assessment

0 引言

压力容器是石油、化工、机械、核工业、航天、轻工、食品、制药等多种工业中广泛使用的承压设备。现代工业的深入发展对压力容器的设计制造提出了更严格的要求。压力容器通常在承压状态下工作,且所接触的物质多为高温或易燃、易爆物,一旦发生事故,将给人们的生命财产造成不可估量的损失。因此对该类压力容器的安全性提出了更高的要求,而研究其结构强度的可靠性具有重要的现实意义^[1-3]。近几年,针对压力容器安全可靠性的研究逐步成为热门课题^[4-6]。

本文以贮存惰性气体的某型号高压球形压力容器为研究对象,通过 Workbench 有限元软件仿真计

算工作条件下容器壳体的应力、形变分布规律。在得到仿真结果的同时,运用光纤布喇格光栅(FBG)在工作条件下对该压力容器承压结构的应力进行实验测量。通过仿真和实验对该型号球形压力容器的承压结构应力分布规律进行分析研究,评估其安全可靠,同时验证了 FBG 在该类型压力容器应力工程测量应用上的可行性。

1 压力容器结构应力的仿真分析

1.1 结构参数

图 1 为球形压力容器结构示意图。本文研究的高压球形压力容器球体内直径 $\varnothing 1\ 380\ \text{mm}$ 、壁厚 66 mm,上半球中央开 $\varnothing 380\ \text{mm}$ 人孔,孔径处采用圆滑过渡结构以便克服结构不连续性,并用加强圈

收稿日期:2016-06-16

基金项目:装备科研基金资助项目(EP123095)

作者简介:秦忠宝(1969-),男,陕西西安人,副教授,硕士生导师,博士,主要从事压力容器结构健康监测的研究。

补强。整个球体固定在裙座上,用于贮存惰性气体,常态时内部保持 2 MPa 压力载荷用以保护承压结

构,常用工作压力为 10 MPa,最大工作压力为 30 MPa。

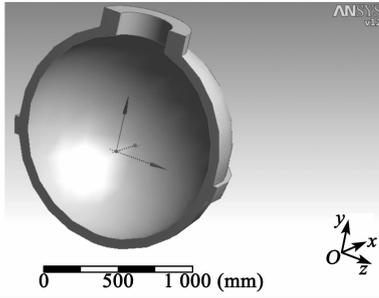


图1 球形压力容器结构示意图

本文主要研究压力容器球体承压结构的应力和形变分布规律,对人孔密封结构及孔径外部固定人孔盖的紧固螺栓结构不予考虑,故而图 1 中未画出紧固件结构。根据球壳的几何形状对称于球心,可得出承压结构的应力与形变完全均匀^[7-12]。球形压力容器所用的制造材料为 15MnMoVN 钢,其材料组成及力学性能参数如表 1、2 所示。表 2 中, E 为弹性模量, σ_b 为强度极限, $\sigma_{p0.2}$ 为屈服强度, δ_5 为断后伸长率, μ 为泊松比。

表 1 材料组成

材料	$w(C)/\%$	$w(Si)/\%$	$w(Mn)/\%$	$w(Mo)/\%$	$w(V)/\%$	$w(N)/\%$	$w(P)/\%$	$w(S)/\%$
15MnMoVN	0.12~0.18	0.20~0.50	1.30~1.70	0.15~0.30	0.06~0.12	0.01~0.025	≤ 0.035	≤ 0.035

表 2 材料力学参数

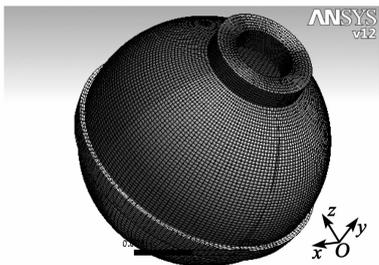
材料	E/GPa	σ_b/MPa	$\sigma_{p0.2}/MPa$	$\delta_5/\%$	μ
15MnMoVN	200	653	490	16.3	0.25~0.3

1.2 仿真分析

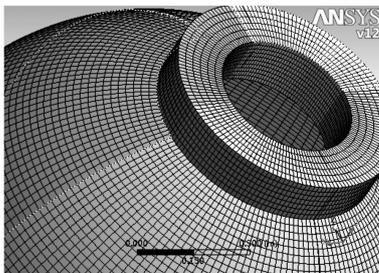
运用 Workbench 有限元软件对球形压力容器进行应力分析,由于压力容器为对称结构,故可采取对称平面切分模型,并省略细小零部件^[6]。根据压力容器受力特点,对半球模型进行切片,并组合成单体零件进行网格划分,划分压力容器有限元模型网格如图 2 所示。由图可知,网格划分规整,应力集中处过渡均匀,具有共同的节点。网格划分采用扫掠

方式,共计 281 063 个节点,58 112 个单元。

压力容器在常态 2 MPa、常用工作压力 10 MPa 及最大工作压力 30 MPa 下的应力分布和形变分布结果如图 3~5 所示。压力容器处于 10 MPa 工作压力时,所受最大应力值为 102 MPa,最大形变为 0.19 mm;处于最大工作压力 30 MPa 时,所受最大应力值为 185.1 MPa,最大形变为 6.8 mm;在 30 MPa 压力下,所受最大应力值为 326.44 MPa,

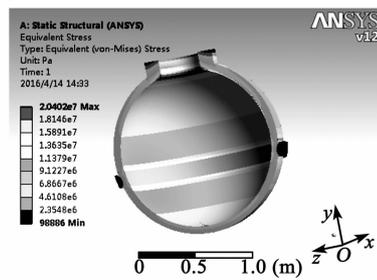


(a) 网格划分模型

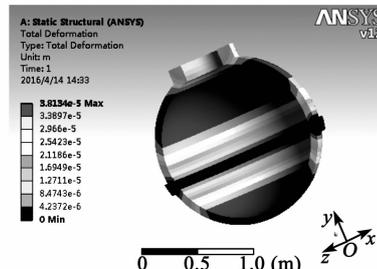


(b) 局部图

图 2 网格划分模型与局部图



(a) 应力



(b) 形变

图 3 2 MPa 压力下应力和形变分布

最大变形为 0.61 mm。从以上 3 种情况的仿真结果可看出,容器最大变形出现在上半球靠近人孔的位置,应注意该部分的安全。在裙座支撑处,因为局部结构发生突变,致使该部分结构应力较集中。综合所述,该球形压力容器在存储惰性气体的工作情况下,材料所受的作用力远低于该材料的屈服极限。

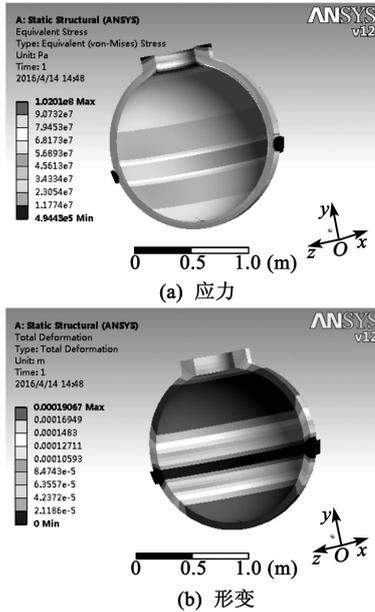


图 4 10 MPa 压力下应力和形变分布

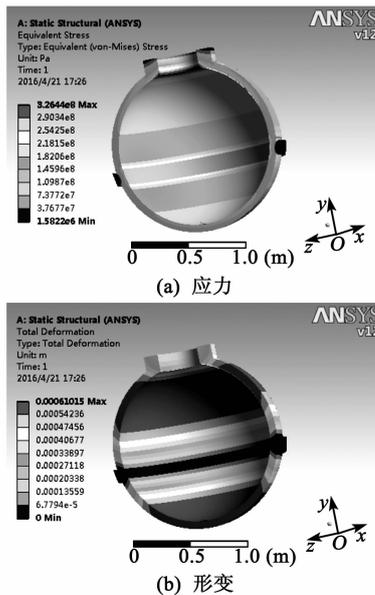


图 5 30 MPa 压力下应力和形变分布

2 压力容器结构应力的光纤光栅测量

2.1 实验方案

由于球形压力容器承压结构为中心对称的薄壁球壳,所以当受到内部压力作用时,器壁呈平面应力

状态,并在弹性变形范围内其主应力与主应变分别呈经向和环向两个应力状态。将 FBG 安装固定在压力容器器壁上,并保证 FBG 的轴向与承压结构的经向或环向平行,则承压结构的应力体现为 FBG 的轴向拉力。根据 FBG 的轴向应力特性^[13],得到 FBG 在承压结构经向应力的传感特性为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_x = (1 - P_e)\epsilon_\varphi = (1 - P_e)\frac{\sigma_\varphi}{E} \quad (1)$$

同理可得环向传感特性为

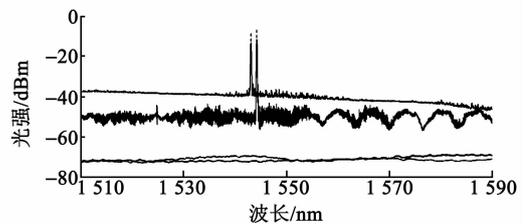
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_x = (1 - P_e)\epsilon_\theta = (1 - P_e)\frac{\sigma_\theta}{E} \quad (2)$$

式中: λ_B 为 FBG 的波长; P_e 为有效弹光系数; σ_φ 、 σ_θ 为压力容器承压结构的经向和环向的应力; ϵ_φ 、 ϵ_θ 为经向和环向的应变^[13]。

实验过程中,用粘结剂将中心波长 $\lambda_1 = 1\,540.2\text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 1\,542.96\text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 1\,545.18\text{ nm}$ 、 $\lambda_4 = 1\,548.59\text{ nm}$ 、 $\lambda_5 = 1\,552.19\text{ nm}$ 、 $\lambda_6 = 1\,555.72\text{ nm}$ 的 6 根 FBG 分成 3 组布设于压力容器球体承压结构上半球靠近赤道、上半球中央和上半球靠近人孔的 3 个区域,每组两个 FBG 分别用来测量经向和环向的应力,测量 6 个点位。通过 SM125 光纤光栅解调仪作为数据采集和信号解调设备。图 6 为第 1 组传感器布设方案和 FBG 反射峰的初始光谱。



(a) 传感器布设方案



(b) 实验初始光谱

图 6 第 1 组传感器布设方案及实验初始光谱

2.2 实验结果讨论

在室温 26 °C,初始压力载荷 2 MPa 条件下开始对压力容器应力进行测量。测量过程中,首先通过加压设备向压力容器内部注入工作介质气体来升

高内部压强,压力载荷从 2 MPa 升高至 30 MPa,每升高 4 MPa 读取记录一次数据;然后通过加压设备逐渐释放压力容器内部的介质气体来降低内部压强,每降低 4 MPa 读取记录一次数据。重复该工作,分别对布置的 3 组 FBG 进行测量。

采用最小二乘法将 6 个 FBG 经过 5 次升压和降压重复测量后所得反射峰中心波长数据的平均值分别与压力载荷进行数据拟合,如图 7~12 所示。由图 7(a)~12(a)可看出,光纤光栅反射峰的中心波长与压力载荷有良好的线性关系。由图 7(b)~12(b)可看出,经过升压和降压过程,FBG 的反射峰中心波长与测量初始状态基本重合,表现出良好的重复性。

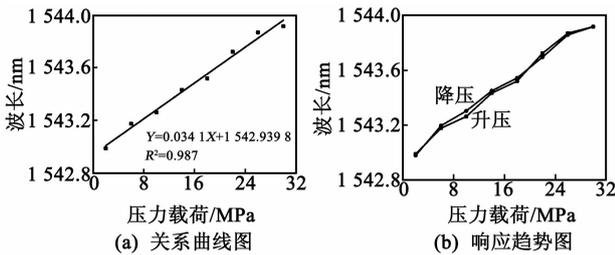


图 7 FBG1 的中心波长和压力载荷之间的关系

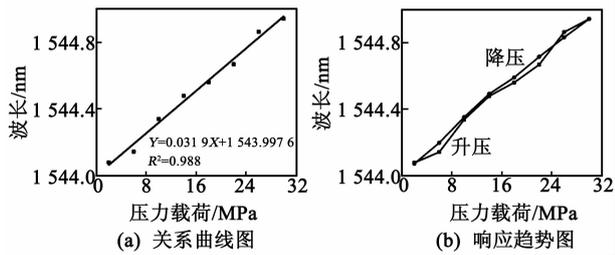


图 8 FBG2 的中心波长和压力载荷之间的关系

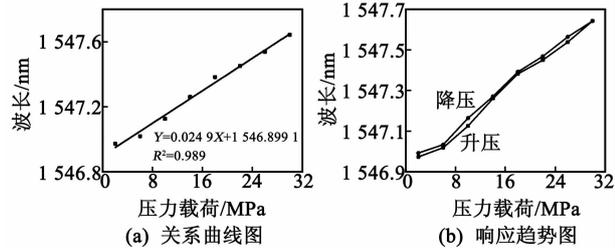


图 9 FBG3 的中心波长和压力载荷之间的关系

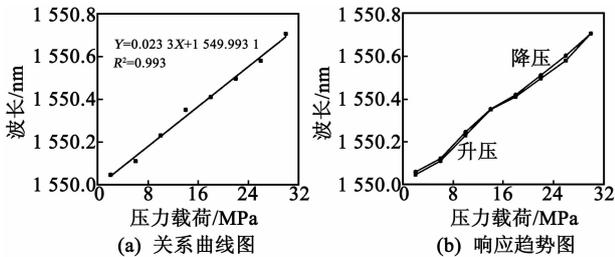


图 10 FBG4 的中心波长和压力载荷之间的关系

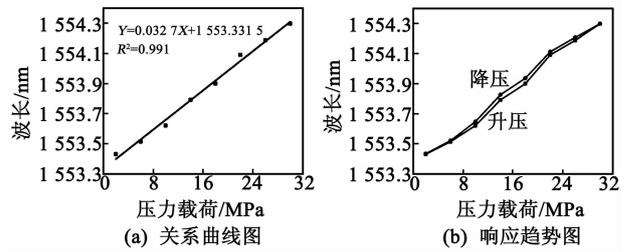


图 11 FBG5 的中心波长和压力载荷之间的关系

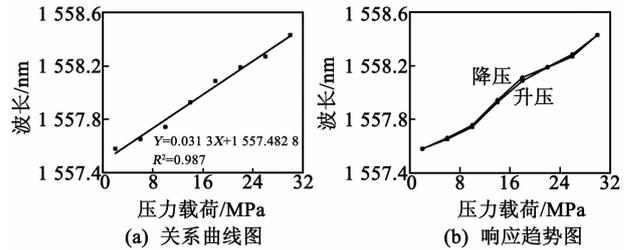


图 12 FBG5 的中心波长和压力载荷之间的关系

利用光纤光栅中心波长漂移与应力的对应关系,将波长值换算为应力值,求得在压力载荷为 10 MPa 和 30 MPa 时压力容器所受的应力值,并将 5 次重复实验所得数据求平均值与仿真实验结果进行对比分析。表 3 为压力载荷在 10 MPa、30 MPa 时承压结构应力变化的测量结果和仿真结果。由表可看出,实验测量结果和仿真结果基本一致。

表 3 应力测量实验结果与仿真结果

第 1 组传感器	FBG 1		FBG 2	
压力载荷/MPa	10	32	10	32
实验测量结果/MPa	52.8	156.6	53.5	158.2
仿真结果/MPa	50.6	153.2	51.3	154.5
第 2 组传感器	FBG 3		FBG 4	
压力载荷/MPa	10	32	10	32
实验测量结果/MPa	65.4	194.8	62.9	191.7
仿真结果/MPa	63.2	192.5	61.3	189.8
第 3 组传感器	FBG 5		FBG 6	
压力载荷/MPa	10	32	10	32
实验测量结果/MPa	77.7	208.9	76.2	206.1
仿真结果/MPa	74.4	204.8	72.8	201.3

3 结束语

本文通过 Workbench 有限元软件对存储惰性气体的某型号高压球形压力容器的承压结构进行了应力分析研究,得出该球形压力容器在存储惰性气体的工作情况下,容器最大变形出现在上半球靠近人孔的位置。在裙座支撑处,因为局部结构发生突变,致使该部分结构应力较集中,但材料所受的作用

力远低于该材料的屈服极限,使用安全。同时,利用传感性能优越的FBG对球形压力容器的经向和环向应力进行了测量,通过测量结果分析得出了FBG在测量过程中良好的线性性和稳定性;将测量数据与仿真数据进行对比,验证了FBG良好的传感测试性能,为FBG在该类型压力容器结构检测研究方面提供了工程应用实践参考。

参考文献:

- [1] PERL M, STEINER M, PERRY J. 3-D stress intensity factors due to autofrettage for an inner radial lunular or crescentic crack in a spherical pressure vessel [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 131: 282-295.
- [2] MALEKI M, FARRAHI G H, JAHROMI B H, et al. Residual stress Analysis of autofrettaged thick-walled spherical pressure vessel [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2010, 87: 396-401.
- [3] AL-GAHTANI H, KHATHLAN A, SUNAR M, et al. Local pressure testing of spherical vessels[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2014, 114:61-68.
- [4] 李曰兵,金伟娅,高增梁,等. 核压力容器缺陷验收确定性准则的失效概率分析[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(6):27-35.
- [5] 葛玖浩,李伟,陈国明,等. 基于EN13445直接法的深海外压力容器稳定性研究和影响因素分析[J]. *压力容器*, 2015, 32(2):21-26.
- [6] 范俊明,李世楷. 40 MPa 高压空气瓶疲劳试验失效分析[J]. *压力容器*, 2015, 32(3):45-49.
- [7] 白海永,方永利. WORKBENCH 极限载荷分析法在压力容器设计中的应用[J]. *压力容器*, 2014, 31(6): 47-50.
- [8] 朱瑞林. 圆筒形压力容器自增强若干问题研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(6):126-133.
- [9] 郑津洋,董其伍,桑芝富. 过程设备设计[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- [10] 戚国胜,段瑞. 压力容器工程师设计指南[M]. 北京:中国石化出版社,2013.
- [11] 刘亚南. 平地机齿圈齿形优化及材料热处理工艺研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2014:40-45.
- [12] 闫晓鹏,武瑛. 材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [13] 吴朝霞,吴飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- (上接第964页)
- XU Bin, WANG Dan. Development of embedded PZT-based dynamic shear stress sensors for concrete structures[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2015, 37(5): 764-767.
- [8] 蔡萍,许斌,周宇. 基于外贴压电材料的钢管混凝土界面缺陷检测[J]. *压电与声光*, 2015, 37(2):337-341.
- CAI Ping, XU Bin. Experimental study on interface debonding detection of concrete-filled steel tubular using surface-mounted PZT[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2015, 37(2): 337-341.
- [9] 许斌,陈梦琦,王海东,等. 基于压电阻抗的钢管砼柱横隔板剥离缺陷检测[J]. *压电与声光*, 2015, 37(1): 172-175.
- XU Bin, CHEN Mengqi, WANG Haidong, et al. Interface debonding detection of diaphragm for large-scale irregular CFST column based on electro-mechanical impedance of PZT [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2015, 37(1): 172-175.
- [10] WANG C S, CHANG F K. Built-in diagnostics for impact damage identification of composite structures [C]//Stanford, USA: Proc 3rd Int Workshop on Structural Health Monitoring, 1999:612-621.
- [11] ROH Y S, CHANG F K. Built in diagnostics for identifying an anomaly in plates using wave scattering[D]. California: Stanford University, 1999:52-56.
- [12] SAAFI M, SAYYAH T. Health monitoring of concrete structures strengthened with advanced composite material using piezoelectric transducers[J]. *Composites Part B Engineering*, 2001, 32:333-342.