

三级膜片贮箱氦气检漏微压自动充气控制技术

黄 云 潘 洋 贾跃杰 陈 辉 石正波

(上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

文 摘 针对三级膜片贮箱常压氦气检漏易出现的漏检问题,设计了微压自动充气系统,通过系统实现气腔、液腔微压状态下的自动充气、超压控制,解决了常压氦气检漏易出现的漏检问题。对比分析微压自动充气系统与传统手动充压操作。结果表明,微压自动充气系统的流量设计,完全能够将高压氦气减压到 10、120 kPa 微压压力,系统背压阀的设定能有效避免膜片超压翻转,检漏效果明显优于常压氦质谱检漏。该研究有效保证贮箱内膜片氦检过程中的安全性,提高三级膜片贮箱质量的可靠性,可用于后续其他产品微压充气试验。

关键词 膜片贮箱,氦气,检漏,微压控制,安全性,可靠性

中图分类号:V46

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.015

Micro Pressure Automatic Inflation Control Technology of the Helium Leakage Detecting for the Three-stage Diaphragm Tank

HUANG Yun PANG Yang JIA Yuejie CHEN Hui SHI Zhengbo

(Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600)

Abstract A micro pressure automatic inflation system was designed to address the issue of missed detection under atmospheric pressure for three-stage diaphragm tanks. The system achieved automatic inflation and overpressure control in the gas and liquid chambers under micro pressure conditions, and solved the problem of missed detection helium gas leak detection under atmospheric pressure. Comparing and analyzing the micro pressure automatic inflation system with traditional manual inflation operation, the results show that the flow design of the micro-pressure automatic inflation system can reduce the high-pressure helium gas to micro-pressure levels of 10 kPa, 120 kPa, the overpressure reversal of the diaphragm can be effectively avoided through the setting of the system's back pressure valve, the missed detection effect is significantly better than that of normal pressure helium mass spectrometer missed detection. This research ensures the safety of the helium leak testing process for diaphragms within the tanks, enhances the reliability of the quality of three-level diaphragm tanks, and can be applied to subsequent micro-pressure inflation tests for other products.

Key words Diaphragm tank, Helium, Leakage detecting, Micro pressure control, Security, Reliability

0 引言

三级膜片贮箱是推进系统的重要组成部分^[1],主要由金属外壳体、金属隔离膜片、气体和液体管路组成,起到贮存并控制推进剂的排放作用^[2],并为发动机提供动力。因其金属膜片与氧化剂和燃料剂的相容性好、使用寿命长,且推进剂介质晃动小等特点,在现役火箭中广泛应用,如图 1 所示。国外 19 世纪 60 年代开始相关研究,在美国和苏联的导弹、飞船上均使用过膜片贮箱,国内在 1990 年开始研究,2000 年以后才正式应用到运载型号,目前在货运飞船、空

间实验室、三级贮箱上都进行了广泛应用^[3]。

三级膜片贮箱为气/液腔组合体,中间主要依靠 2 mm 金属膜片隔离气/液腔,工作时,气腔内压力增高,膜片以挤压方式推动液腔内的氧化剂或燃料剂进入发动机进行燃烧^[4]。由于三级采用两个氧化剂箱、两个燃料剂箱的并排设计,四个贮箱气腔的气体相互串通,如果金属隔离膜片发生微渗漏,氧化剂和燃料剂就可以通过气腔气体相互混合,发生爆炸,造成严重的火箭发射事故。因此在产品生产过程中,金属膜片半球状态焊缝中不允许产生垂直于焊缝表

收稿日期:2023-11-16

第一作者简介:黄云,1982 年出生,工程师,主要从事强度试验自动控制技术的研究工作。E-mail: moring2001@163.com

面的片层状氧化物夹杂缺陷以及裂纹,并且在焊接完成以后需进行气密试验。国内气密检测主要采用外壳体气密试验,内部金属膜片较薄,在带压状态下容易翻转^[5],因此未对内部金属膜片进行气密试验,外壳体气密试验一般采用常压检漏试验方法,该过程中半球和整球状态下检漏均不带压力,保证膜片整体安全,但是部分缺陷通道未打开,存在缺陷漏检可能。为提高产品可靠性,需在贮箱半球状态和整球状态进行充压氦质谱检漏(气腔充10 kPa,液腔充120 kPa),通过微压使得产品缺陷通道能有效打开,氦气得到渗漏,同时避免超压翻转现象。贮箱气腔仅为4 L,氦气由氦气瓶减压以后通过管路输送到气腔和液腔,气腔置换 ≥ 8 次,液腔置换 ≥ 3 次,置换压力分别为10、60 kPa,手动充压操作难度高,风险大,需研制一套微压自动充气试验系统^[6],保证试验的安全性。

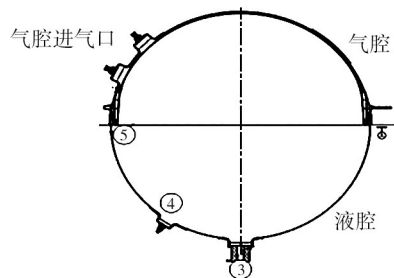


图1 三级膜片贮箱

Fig. 1 The three-stage diaphragm tanks

1 微压自动充气设计

1.1 微压自动充气原理

三级膜片贮箱微压自动充气设计原理是通过已知的充气容积、充气速率,换算成流量,选定合适的流量计,由流量计控制气体输出量,控制微压状态下的升压速率,达到预定压力后,压力传感器和电磁阀共同作用^[7],自动稳压,达到产品微压压力控制要求;通过增设单独的精密压力表对充气压力进行传感器和数显表的压力比对,确保压力值达到要求,安装微压力背压阀对系统超压进行保护^[8],确保产品安全。

1.2 微压系统集成设计

微压系统集成设计主要包括气腔充气系统设计、液腔充气系统设计、测控系统设计、管道设计。

1.2.1 气腔充气系统设计

气腔充气系统主要由减压阀、电气比例阀、压力表、两个背压阀、节流阀、电磁阀、流量计、测试工装等组成。充气系统的进气口通入氦气,然后调节管路的减压阀、比例阀、截止阀等,使氦气进入贮箱气腔,气腔连接的测试工装通过外接的压力表来监测气腔内的压力,当压力大于要求值12 kPa时,两个背

压阀自动泄压,对气腔内膜片进行保护。为了防止多余物进入贮箱气腔,充气系统设置了5 μm 精度的过滤器,分别置于进气口端,充气系统末端,贮箱气腔前端,改进前后的气腔充气系统见图2。

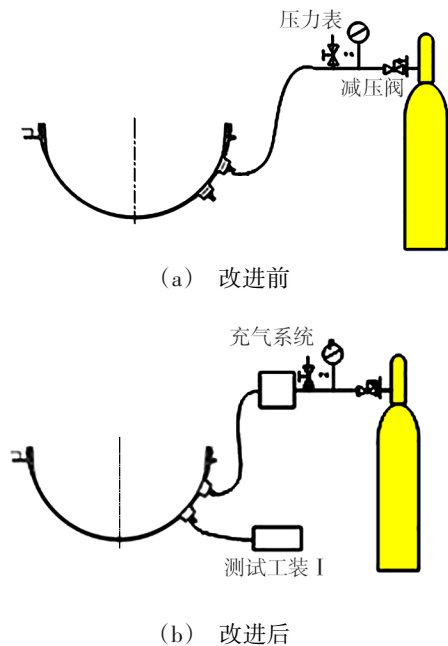


图2 气腔充气系统改进对比图

Fig. 2 The comparison diagram of the improvement of the air chamber inflation system

气腔流量主要通过流量计进行控制,气腔充气速率不大于1 kPa/min,已知气腔的容积为4 L,控制流量最大可设置为40 mL/min,则根据流量计型号选取50 mL/min的流量计,背压阀压力的设定原则是不能超过设计允许的最大压力,当气腔前端充气压力或者气腔内压力达到规定值时,两个背压阀就会进行泄压。

1.2.2 液腔充气系统设计

液腔充气系统主要由减压阀、电气比例阀、压力表、背压阀、节流阀、电磁阀、流量计、测试工装等组成。充气系统的进气口通入氦气,然后调节相对应管路的减压阀、比例阀、截止阀等,使氦气进入液腔,液腔连接测试工装,测试工装外接的压力表监测液腔压力,通过背压阀控制压力超压,当压力 ≥ 150 kPa,系统自动泄压。为防止多余物进入贮箱液腔,充气系统设置了5 μm 精度的过滤器,分别在进气口端,充气系统末端,贮箱液腔前端,改进前和改进后的液腔充气系统如图3所示。

液腔系统充压流量由流量计控制,液腔充气速率不大于10 kPa/min,已知液腔的容积为180 L,控制流量最大可设置为18 L/min,根据流量选取20 L/min的流量计,其超压控制由测试工装上的背压阀控制。

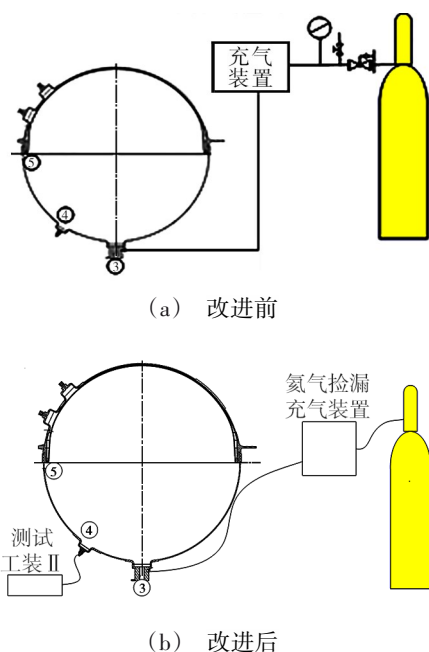


图3 液腔充气系统改进对比图
Fig. 3 The comparison diagram of the improvement of the liquid chamber inflation system

1.2.3 测控系统设计

微压系统上测控系统由上位机和下位机组成,下位机选用西门子公司的S7-200SMART的可编程逻辑控制器(PLC),上位机选用研祥公司的触摸式工控机,采用程序开发环境软件,两者通过网线进行通信。PLC负责高速采集压力传感器的压力数据、液腔和气腔的流量数据,从而控制两路流量信号,工控机每0.1s记录1次压力数据、气体流量数据。

微压测控系统主要分为信号采集、阀门控制、人机交互3部分。试验中的压力信号、流量信号通过传感器转换为电流信号,温度信号通过电路搭接转换成电压信号,对测量点的压力数据进行采集、处理、分析,同时按照系统控制要求,输出开关量信号控制电磁阀,进而控制电磁阀,达到人机交互控制效果,从而实现对膜片贮箱的微压控制。

1.2.4 微压系统管道设计

1.2.4.1 选材

管路用于安装压力表、阀门等,在充气装置内需进行折弯、转接,因此管路选用不锈钢无缝管。

1.2.4.2 管道内径的确定

根据GB 50316—2000《工业金属管道设计规范》,确定管径时主要考虑流体阻力损失和操作工况。管径主要取决于流体性质和流速,不同流体介质、不同操作工况应选取不同的流速。为防止管道产生冲蚀、磨损、振动和噪声,黏度大的介质流速低,反之流速高,管径计算见公式(1)。

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (1)$$

式中, Q 为管道内气体流量, D 为管道内直径, v 为平均流速。平均流速 v 由流体阻力损失及操作工况综合确定,参考设计规范中气体在管道内流速为8~15 m/s,管道内氦气流速取10 m/s。已知气腔充气速率 ≤ 1 kPa/min,气腔容积为4 L, D 为0.29 mm,则气腔充气管路的内径选取为DN4,已知液腔充气速率 ≤ 10 kPa/min,液腔的容积为180 L, D 为4.37 mm,则液腔充气管路的内径选取为DN6。

1.2.4.3 管道壁厚的确定

根据GB 50316—2000《工业金属管道设计规范》中关于管路壁厚的计算见公式(2):

$$\delta = \frac{p_c \times D_i}{2[\sigma]^t \Phi - p_c} \quad (2)$$

式中, $[\sigma]^t$ 为设计温度下,管路材料的许用应力, δ 为管道的计算厚度, Φ 为焊接接头系数,局部无损检测 $\Phi=0.85$, D_i 为管道内径, p_c 为计算压力。查GB 50316—2000《工业金属管道设计规范》20℃时不锈钢 $[\sigma]^t=137$ MPa。根据公式(2),取 $\Phi=0.85$,按照气瓶输出压力 $p_c=15$ MPa计算,气体管路所需壁厚为 $\delta=0.41$ mm,因此0.5~15 MPa充气系统管子选用厚2 mm不锈钢无缝管,按照通用标准DN6进气管路应该采用 $\Phi 10$ mm $\times$ 2 mm管子。

2 试验

2.1 气腔充气试验

在贮箱半球状态时进行气腔检漏。首先对半球状态贮箱进行质量检查,接口、膜片无缺口、凹坑等现象,符合试验要求,然后依次将氦气瓶、充气装置、过滤器、半球状态贮箱、测试工装连接。氦气检漏前气腔需置换8次氦气,置换压力10 kPa,超压压力设定为15 kPa,氦气体流量 ≤ 50 mL/min。气体置换结束后,充气压力设置为10 kPa,氦气流量设置为40 mL/min,对气腔进行充气。

2.2 液腔充气试验

在贮箱整球状态时进行液腔检漏。试验前检查产品接口表面质量,确认其表面状态符合技术要求后,液腔置换3次氦气,置换压力60 MPa,氦气体流量 ≤ 20 L/min。气体置换结束后,整球贮箱充氦气,充气压力设定为120 kPa,超压压力为150 kPa,氦气体流量15 L/min。

3 结果分析

3.1 气腔充气试验结果分析

对三级膜片贮箱气腔进行10 MPa充气试验,充气压力曲线如图4所示,为进一步验证气腔微压充气压力准确性,在测试工装 I 安装了0.4级精密压力

表,压力表值如图5所示,其值为10 kPa。经过对比结果一致。试验结束以后采用内窥镜对贮箱内部进行检测,结果显示膜片未发生翻转。

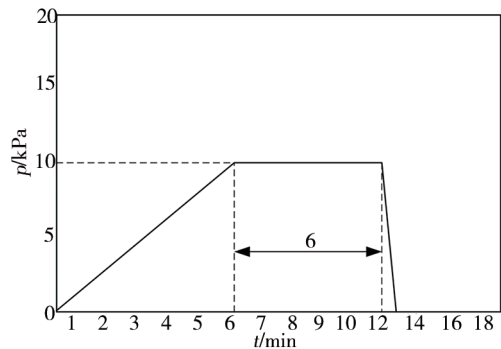


图4 气腔充气系统末端测试压力值
Fig. 4 The test pressure value of the end of the gas chamber inflation system



图5 测试工装 I 气腔压力表显示值
Fig. 5 The display value of the pressure gauge for the test fixture I in the air chamber

3.2 液腔充气试验结果分析

对三级膜片贮箱液腔进行 120 kPa 充气试验,充气压力曲线如图6所示,为进一步验证液腔微压充气压力准确性,测试工装 II 安装了 0.4 级精密压力表,压力表值如图7所示,其值为 120 kPa,经过对比其结果一致。试验结束以后,采用内窥镜对贮箱内部进行检测,结果显示膜片未发生异常情况。

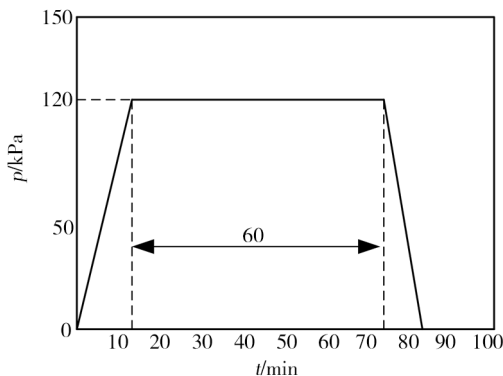


图6 液腔充气系统末端测试压力值
Fig. 6 The test pressure value of the end of the liquid chamber inflation system



图7 测试工装 II 液腔压力表显示值
Fig. 7 The display value of the pressure gauge for the test fixture II in the liquid chamber

4 结论

(1)相比于传统的三级膜片贮箱氦气检漏充气控制,微压自动充气系统的流量设计,完全能够将高压氦气减压到微压力,在试验安全性上能有效避免金属膜片翻转情况的发生,微压自动充气系统在可靠性上明显优于手动操作。

(2)微压自动充气系统能有效确保氦质谱检漏带压渗漏状态,其检漏效果明显优于常压氦质谱检漏,检测效果大大提升。

(3)微压自动充气试验后,内窥镜检测结果显示膜片在微压系统控制下未发生翻转,试验压力显示准确,微压充气系统可用于后续其他产品微压充气试验。

(4)背压阀的设定能有效避免膜片超压翻转,但背压阀连续起跳,容易造成环境污染,影响氦检结果。

参考文献

[1] 宋晶晶,郭敬,王海峰,等. 动力系统试验台充气系统优化设计[J]. 火箭推进,2016,42(2):73-78.
SONG J J, GUO J, WANG H F, et al. stand [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(2): 73-78.
[2] 李敬业,宴飞. 航天用金属隔膜贮箱[C]. 第六届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第四十二届技术交流会暨 2021 航空发动机技术发展高层论坛论文集, 第三册, 2021:181-186.
LI J Y, YAN F. Spacecraft metal diaphragm storage tanks [C]. Proceedings of the th Joint Conference on Aerospace Power and the 42nd Technical Exchange Conference of the Third Professional Information Network of China Aerospace in 2021, Volume III, 2021:181-186.
[3] 顾远之,李昊,唐杰,等. 高性能金属膜片评价方法研究[J]. 上海航天. 2016(S1),33:133-144.
GU Y Z, LI H, TANG J, et al. Research on evaluation of high performance metal diaphragm[J]. Aerospace Shanghai, 2016 (S1), 33:133-144.
[4] 吴安达,王亲猛. 推进剂贮箱金属膜片的变形模拟及参数分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2012, 319(3):59-62.

WU A D, WANG Q M. Deformation simulation and failure analysis of metal diaphragm for propellant tank [J]. Missiles and Space Vehicles, 2012, 319(3): 59-62.

[5] 宋冠华, 周仕明, 李道奎. 金属膜片充压翻转的动态仿真方法研究[J]. 上海航天, 2019, 236(1): 122-127.

SONG G H, ZHOU S M, LI D K. Dynamic simulation method for inflatable overturning of metal diaphragm [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 236(1): 122-127.

[6] 陈琦. 机电控制系统自动控制技术与一体化设计[J]. 现代制造技术与装备, 2020(2): 157-159.

CHEN Q. Automatic control technology and integrated design of electromechanical control system [J]. Modern

Manufacturing Technology and Equipment, 2020(2): 157-159.

[7] 陈敬秒, 王一翔. 减压阀连续运行试验研究[J]. 管道技术与设备, 2017(6): 32-33.

CHEN M, WANG X. Study on continuous operation test of pressure reducing valve [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2017(6): 32-33.

[8] 张远深, 周慧珍, 蔚亚, 等. 背压式与平衡式气动减压阀性能比较研究[J]. 甘肃科学学报, 2014, 26(3): 87-90.

ZHANG Y S, ZHOU H Z, WEI Y, et al. Comparative study on the performance of back pressure and balanced pneumatic pressure reducing valves [J]. Journal of Gansu Sciences, 2014, 26(3): 87-90.