

# 危险气体监测系统设计及特性

王荣宗 孙天辉

(兰州物理所, 兰州, 730000)

**摘要** 危险气体监测对火箭发射起着重要作用, 在火箭燃料加注过程中, 为保证安全, 需对低温贮箱共底压力和氢浓度进行连续监测。叙述了低温贮箱共底的危险气体监测系统设计及性能测试方法, 给出了应用实例和试验数据。

**关键词** 火箭, 质谱, 监测。

## The Design of Hazardous Gas Monitoring System and Its Characteristics

Wang Rongzong Sun Tianhui

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, 730000)

**Abstract** Monitoring of hazardous gas plays an important role in the process of rocket launching. During propellant filling, pressure in co-bulkhead of cryogenic tanks and concentration of hydrogen, should be monitored continuously for safety. The design of the monitoring system and the method of specification testing are described, and the application example and test data are given.

**Key Words** Rocket, Mass spectrum, Monitoring.

## 1 引言

长征三号运载火箭三子级推进剂箱体是具有共底的低温贮箱, 共底将贮箱分成液氧箱和液氢箱两个独立部分。共底在结构上既要承受液氢、液氧箱同时工作的载荷, 又要承受可能出现的各自独立工作的载荷。此外, 共底还需提供有效的绝热, 使两箱之间的热传导最小。由于氢、氧在一定条件下有爆燃危险, 因此共底又是两个箱体的安全屏障。

共底的绝热功能主要是通过维持共底腔的真空来实现的。在真空条件下, 空气的热传导数值可以忽略。在常温条件下, 共底的真空度可达到 133 Pa。低

温燃料加注时, 在液氢温度下, 共底的真空度可达到  $1 \times 10^{-2}$  Pa。但如果共底出现泄漏, 可能造成危险气体在共底腔内混合而引起爆燃。为了确保火箭的安全, 在低温燃料加注过程中对共底的压力和氢浓度应进行实时监测。

## 2 系统设计及结构

### 2.1 系统结构及原理

危险气体监测系统的主要功能包括: a) 共底抽空、检漏和真空性能测试; b) 燃料加注时对共底压

收稿日期: 1999-11-01

王荣宗: 男, 58岁, 高级工程师, 从事真空和质谱技术研究, 目前进行空间质谱测量和航天器危险气体检测工作

力和氢浓度实时监测和报警。系统结构见图1。

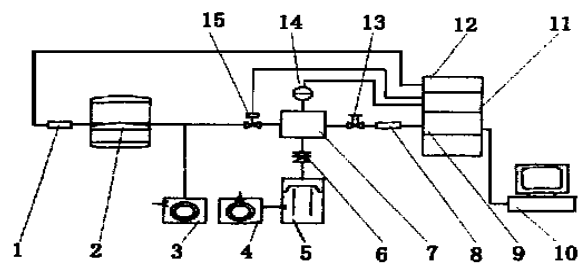


图1 危险气体监测系统结构示意图

1-β规;2-共底;3-抽空泵;4-前级泵;5-扩散泵;6-闸板阀;7-真空室;8-质谱计探头;9-质谱计;10-计算机;11-压力控制仪;12-β计;13-高真空阀;14-电离真空规;15-压电晶体阀

抽空泵通过20 m管道对共底抽空,在常温条件下共底真空度可维持133 Pa。共底压力测量采用β型真空计,用30 m电缆和β规连接,压力测量范围0.1 Pa~5 kPa。采用四极质谱计进行氢浓度测量,压电晶体阀将共底气体引入真空室,质谱计按气体分子不同质荷比进行分离,以质谱形式传给计算机,计算机根据扫描电压确定气体成份,根据谱峰强度计算气体浓度。由于高真空系统为质谱计提供了必要的工作条件,因此真空室极限压力达到 $1 \times 10^{-5}$  Pa,工作压力维持在 $1 \times 10^{-3}$  Pa,压力稳定度10%。

## 2.2 设计和计算

### 2.2.1 主要技术指标

a) 系统抽空泵和共底之间距离约为18 m,抽气管道长度不小于20 m,从大气压条件下开始,抽气时间累计12 h后,共底压力小于266 Pa;

b) 共底压力测量范围 $1 \times 10^{-1}$  Pa~ $1 \times 10^3$  Pa,测量误差小于15%;

c) 高真空系统真空室的极限压力为 $1 \times 10^{-5}$  Pa,工作压力可自动控制,维持在 $1 \times 10^{-3}$  Pa,压力稳定度为10%;

d) 质谱计测量的质量范围为 $1.66 \times 10^{-27}$  kg~ $8.3 \times 10^{-26}$  kg,分辨本领按10%谷计算为单位分辨,对氢检测的浓度灵敏度小于 $1 \times 10^{-4}$ ,测量误差小于10%。

### 2.2.2 系统主要部件设计

共底极限压力 $P$ 可按下式计算

$$P = Q/S$$

式中  $Q$ ——共底漏放气率,  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ;

$S$ ——对共底的抽速,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

通常,共底漏放气率是由低温贮箱的设计和制造工艺决定的,抽空泵对共底的抽速受抽空管道流导的限制。管道长度由火箭的抽空距离所决定,因此在设计中只能利用改变管道直径方法来改变流导。在分子流状态下长管道流导可根据文献[1]的公式计算。长度为20 m、直径1 cm管道的流导约为 $6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。如果设定共底的漏放气率为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ,可以计算出共底的极限压力为166 Pa。

质谱计选用QMS064小型四极质谱计,仪器的质量范围 $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \sim 1.06 \times 10^{-25} \text{ kg}$ 。采用法拉第筒为离子收集极,仪器的检测浓度灵敏度为 $10^{-5}$ 。采用计算机控制和数据处理,仪器可对共底中几种气体的浓度进行同时检测,各种气体浓度的变化趋势可动态地显示出来。从而实现全过程的实时监测。

高真空系统的设计应考虑系统的极限真空的获得、进样和工作压力的稳定和减小系统对质谱计的污染。为了获得对氢气高的有效抽速,采用扩散泵作为主抽泵,泵的抽速大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,极限压力小于 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 。液氮冷阱可以提高系统的真空度和减小油的污染。在真空室和质谱计探头之间安装高真空阀,合理选择操作规程可以有效地防止油对质谱计探头的污染。

气体进样是利用自动压力控制回路进行的。自动压力控制仪、电离真空规和压电晶体阀构成闭合的压力控制回路。电离真空规为压力传感元件,真空室压力变化可使规产生变化的离子流信号,压力控制仪将变化离子流信号和设定值比较并给出信号控制压电晶体阀,改变阀的流导,从而实现气体进样量的控制。

共底的压力测量首先考虑测量的安全性,为在原位置测量,压力规和共底箱直接连接。在氢、氧危险气体混合的条件下,压力规不能有任何热源而引起混合气体爆燃。本设计选用β型放射电离规作为压力规,微量的放射源发射电子将气体电离产生 $1 \times 10^{-10} \text{ A}$ 弱离子流信号,确保了测量的安全。信号通过30 m电缆传输给测量仪器,测量仪器进行信

号放大和数据处理,压力值及变化趋势可同时显示,实现对共底压力的实时监测。

### 3 试验及性能测试

#### 3.1 试验系统

监测系统性能试验和一些指标测试是在模拟共底的辅助系统上进行的,有些特殊指标是在火箭上实测的。辅助系统的结构如图 2 所示。共底模拟室为低真空室,体积为  $V$ ,机械泵抽气可使模拟室真空度达到  $0.1\text{ Pa}$ ,氢气和氧气分别装在样品瓶内,通过 1<sup>#</sup> 阀和 2<sup>#</sup> 阀向模拟室引入气体,压力可用副标准规(HLP-3 规)测量,混合气体浓度可根据测量的分压力之比计算。 $\beta$  规和 HLP-3 规置于模拟室相同位置。模拟室混合气体通过 3<sup>#</sup> 阀和监测系统相连。

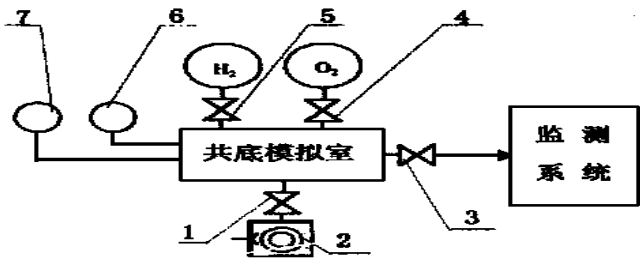


图 2 性能测试辅助系统  
1—4<sup>#</sup> 阀;2—机械泵;3—3<sup>#</sup> 阀;4—2<sup>#</sup> 阀;  
5—1<sup>#</sup> 阀;6— $\beta$  规;7—HLP-03 规

#### 3.2 性能指标测试

为了得到测试系统的性能指标,编制了共底安全监测系统测试大纲和操作细则,根据大纲和操作

细则对系统指标进行逐一测试,测试结果列于表 1。

表 1 监测系统性能实测指标

序号	项目名称	设计指标	实测指标	备 注
1	抽空时间	30 h 达到 $133\text{ Pa}$	22 h 达到 $98\text{ Pa}$	火箭上实测
2	压力测量范围/ $\text{Pa}$	$3 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^5$	$1 \times 10^{-1} \sim 1 \times 10^5$	
3	高真空系统本底压力/ $\text{Pa}$	$3 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	
4	工作压力稳定度	$\pm 5\%$	$\pm 1.5\%$	
5	质量范围/ $\text{kg}$	$1.66 \times 10^{-27} \sim 8.3 \times 10^{-26}$	$1.66 \times 10^{-27} \sim 1.06 \times 10^{-25}$	
6	灵敏度	$\text{H}_2: 2 \times 10^{-4}$	$\text{H}_2: 1 \times 10^{-4}$	
7	报警上限	$p: 266\text{ Pa}, n_H: 7\%$	$p: 266\text{ Pa}, n_H: 7\%$	
8	数据处理功能	8 种	8 种	

### 4 应 用

危险气体监测系统已成功地用于长征三号系列火箭的发射试验,多次试验证明,该系统性能稳定、质量可靠、测量数据迅速准确,保证火箭安全发射。系统的应用包括共底真空性能测试和在燃料加注过程中的共底安全监测两个方面。

#### 4.1 共底真空性能测试

##### 4.1.1 共底极限压力测定

共底极限压力是指共底在操作规程规定的抽气时间内,采用规定的抽气系统,共底达到的压力。该项指标是反应共底漏放气率和抽气性能的综合指标。当共底的漏放气率确定后,共底的极限压力主要取决于抽气系统的抽速。因此,测量该项指标时,必须保证抽气系统正常工作条件:机械泵正常工作、抽气管道不漏。

由于共底采用间断抽气的方法,因此,测量极限压力的最好办法是绘制共底压力和抽气时间关系的

曲线,根据曲线的趋势并在规定的时间点上,查到的对应压力即为所测值。图3为典型的共底抽气曲线。由于采用间断抽气,因此在每次停止抽气时因共底夹芯玻璃钢出气使共底压力增加。从曲线上可查出共底的抽气时间和极限压力。

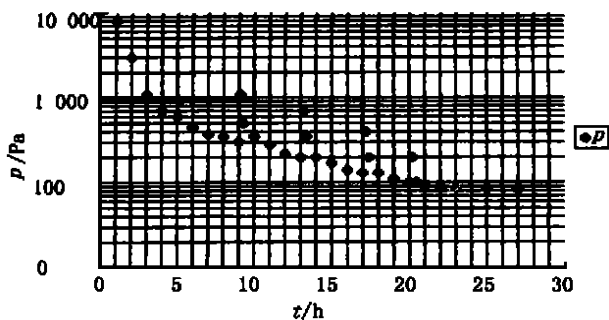


图3 典型共底抽气曲线

◆—压力

#### 4.1.2 漏放气率测定

共底停止抽气后,压力按  $P = Q_0 t/V$  变化,式中  $Q_0$  为共底的总漏放气率。正常条件下,共底的放气率占主要部分。由于受共底蜂窝夹层流导的限制,其放气过程是一个缓慢的过程。实验表明,这个过程需要几个小时。为了正确测量共底漏放气率,必须选择足够长的时间,通常为 24 h。

共底漏放气率测试,只有在共底抽气足够长时间后进行才有意义。在共底抽气初期(累计抽气时间小于 10 h),由于共底的大量放气,测量的数据很难正确反映共底的真实状态。根据大量的共底漏放气率测试的实验数据,在测试规程中规定,共底累计抽气时间 30 h 后,进行常温下 24 h 共底漏放率测定。

测试方法为:关闭共底箱阀,记录共底 24 h 内的压力,绘制压力和时间变化曲线,计算共底漏放气率。必要时,可以分别计算漏气率和放气率。

#### 4.2 燃料加注过程中共底安全监测

在火箭低温燃料液氢、液氧加注过程中,监测系统对共底压力和氢浓度进行实时监测,图4为加注过程中共底无泄漏情况下压力和浓度随时间变化曲线。

从变化曲线可以看出,在液氢加注预冷结束时,共底的压力迅速下降,在不到 2 min 时间内,压力下降

3 个数量级,这是由于共底的低温面在液氢温度下对共底抽气造成的。如果共底没有泄漏,压力一直可维持在  $1 \times 10^{-1}$  Pa。氢浓度在加注整个过程中,始终在 1% 波动,该值可以认为是真空系统的本底。

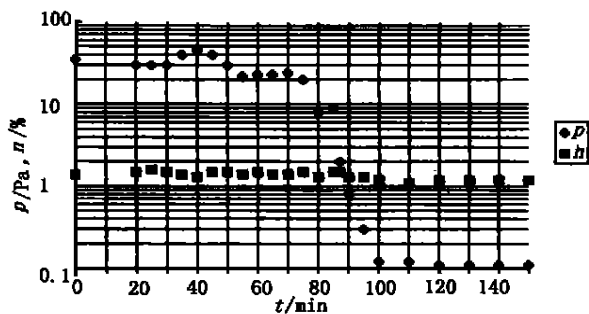


图4 液氢、液氧加注过程共底压力和浓度变化曲线

◆—压力;■—氢浓度

在加注过程中,如果出现泄漏,压力和浓度曲线可发生显著变化,压力迅速增加,气体浓度的变化可按不同气体所对应的曲线发生变化。当空气由密封带漏入共底时,氮气、氧气浓度增加,当共底面泄漏时,氢浓度或氧浓度增加。根据增加浓度的气体种类可判断泄漏的位置,根据浓度值增加可判断泄漏量。

## 5 结论

危险气体监测系统采用质谱技术对火箭危险气体进行监测,经多次发射试验验证,该系统设计基本满足使用要求。由于配有大气取样装置,系统还可用于大气环境下危险气体监测。为了扩大应用范围,系统可在提高检测灵敏度、减小重量和体积、防止或减小污染等方面进一步完善。

## 参考文献

- 1 达道安等. 真空设计手册. 国防工业出版社, 1991.