

# 危险气体监测系统的设计和研制\*

危险气体监测系统研制组 | 曹凡永 | 执笔

(兰州物理研究所)

本文介绍我们设计和研制的“危险气体监测系统”。介绍了系统的设计和使用方法。本系统以四极质谱计和 $\beta$ 放射线电离规作为传感器,质谱计的质量范围为1到100原子质量单位,它能从混合气体中检测出最小浓度为数ppm的气体组份,通过标定能定量分析微量的氢、氧、氮、氦、四氧化二氮、硝酸、偏二甲肼等。

设计方案是针对气体浓度检测而专门设计的。设计了真空(大气压 $\sim 6.5 \times 10^{-1}$ 帕)条件下的自动取样分系统。要确定真空下 $H_2$ 浓度报警阈值,进行了阈值系统的设计和试验。为了对气体浓度定标,又进行了气体浓度定标系统的设计及试验。由于“危险气体检测系统”本身在危险气氛中工作,设计了防爆型真空抽气分系统。基于安全和方便考虑,本系统可远距离(50米)取样和操作。

我们研制成功两套危险气体检测系统。一套简易的(A系统),一套正规的。A系统参加了液氢蒸发、液氢负载、氢氧发动机等试验;B系统参加氢氧发动机的其它几种试验。如不附属设备,只要把取样管路接到需要监测的任何部位、分系统、环境等处,就可对该处原子质量数1~100的任何气体组分进行分析。无疑,这套系统具有通用性,可用于火箭试验站、煤矿、石化工厂、地质勘探等凡有危险气体产生或出现的地方,它都能监测和报警,从而防止事故和损坏。

## 一、总体设计

图1给出液氢液氧火箭夹芯共底腔的结构简图。液氢与液氧的沸点分别为20K和90K,两者温差达70K。如果两个贮箱存在泄漏就会造成氢氧混合,当火源和冲击等外界能量作用时,在某个浓度下将产生爆炸。为了保证液氢液氧火箭能安全可靠地工作,经与任务提出单位协商,对“危险气体监测系统”提出如下主要技术要求:

(1) 共底腔的抽空系统应具有防爆能力,能在5~10小时内将容积为175升的共底腔抽空到优于133帕的真空度;贮箱加注低温介质后,共底腔真空度应优于 $10^{-1}$ 帕量级。

(2) 真空度传感器(全压测量规管)直接装在共底腔上,测量范围为665至 $10^{-1}$ 帕,要求体积小、重量轻、抗振动。真空度传感器的二次仪表为远距传感器,50米以外。

(3) 共底腔内的气体成份氢和氧的浓度分别大于200ppm和500ppm时,通过长度为50米的气体取样管,在质谱分析系统上能进行自动快速分析。

\* 1985年10月收到,1986年2月收到修改稿

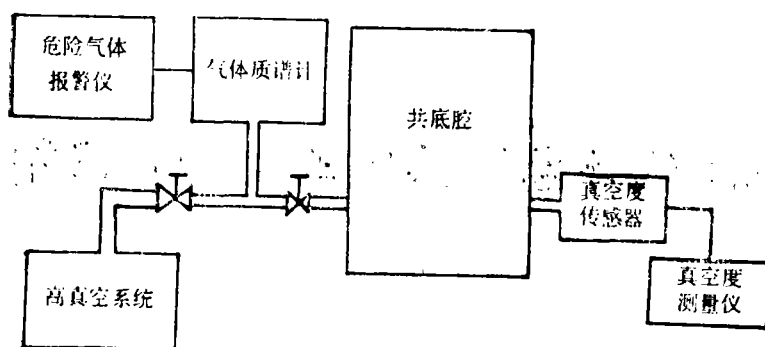


图 1

(4)报警: 当真空度(全压)为266帕和氢浓度下限值大于7%时监测系统能自动报警。

我们研制的“危险气体监测系统”，其流程示意图如图2。这套装置已完全满足上述技术要求。这套装置由共底腔抽空系统、质谱分析真空系统、自动取样分系统、四极质谱计及自

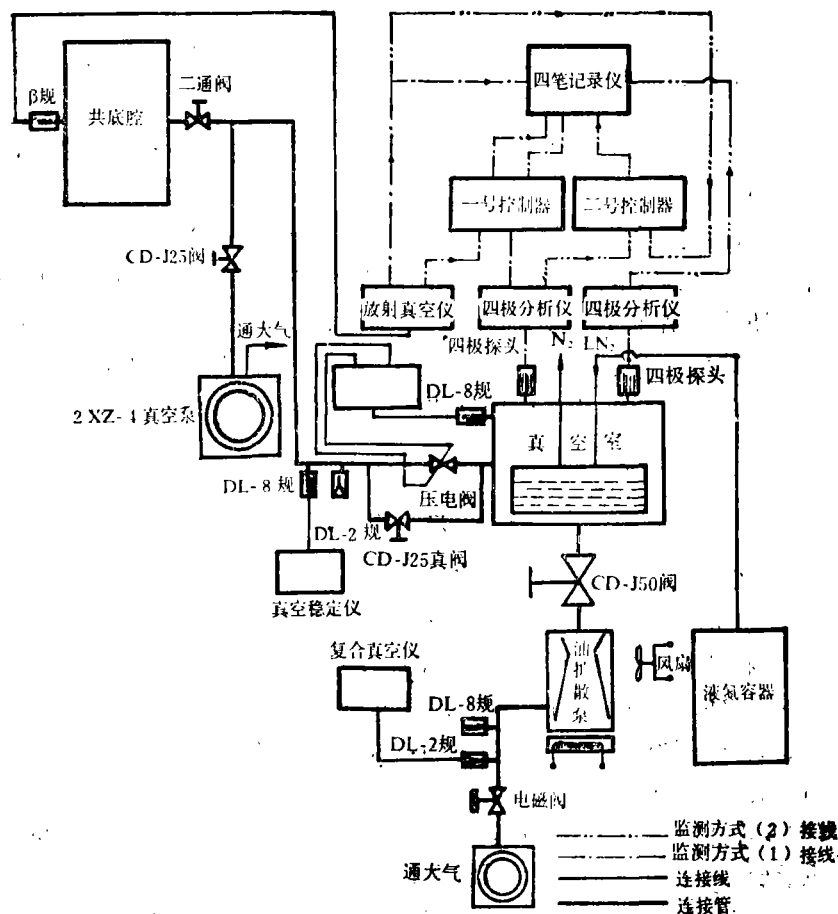


图 2

动报警系统四大部分组成，每部系统的组成和作用分述如下：

### 1. 共底腔抽空系统

这一部份由共底腔二通阀、50米长抽空管路、CD—J25真空阀、放气咀、2xz—4防爆型机械真空泵、 $\beta$ 放射线电离规及二次仪表组成。它的作用也在5~10小时内将处于室温的共底腔抽到优于133帕的真空度。其次,使用它进行静压法检漏,确定共底腔在室温下的总漏率。

考虑到共底腔中材料的出气,要求室温下的漏率 $Q$ 低于2.6帕·升/秒。过去有人曾把 $Q$ 规定到 $10^{-4}$ 帕·升/秒量级。

在共底腔这种具体结构上,一方面不必要,二方面也很难实现。从我们多年的经验分析, $P=65$ 帕, $Q\leq 1.3$ 帕·升/秒的条件能满足,共底就正常工作。

还应指出共底腔内有夹芯蜂窝,它用酚醛玻璃钢制成。共底腔的密封环带由镀铝聚酯薄膜和环氧尼龙胶带材料制成。这几种材料的密封性、对气体的渗透率和出气率都影响了共底腔的实际真空度,甚至其加工工艺稍有变化也影响共底腔的极限真空度。只要共底腔连续或断续抽空72小时, $P$ 和 $Q$ 就趋于稳定值。

### 2. 质谱分析真空系统

这一部分由液氮冷阱、液氮杜瓦容器、高真空室、改型K—23油扩散泵(该泵是风冷型,用密封加热器供电)、CD—J50高真空阀、DGC—JQ10电磁真空阀WZK—1A复合真空计、2xz—0.5防爆型机械真空泵等部件和仪器组成。它的作用是在约一小时的时间内将高真空室的真空度 $P_2$ 抽到优于 $6.5\times 10^{-3}$ 帕的真空度,为四极传感器提供正常使用的工作环境条件。

高真空室用不锈钢制成,容积为60升,内表面为600厘米<sup>2</sup>。不锈钢冷阱的表面积为400厘米<sup>2</sup>,总表面积为 $1\times 10^3$ 厘米<sup>2</sup>。常温下不锈钢的出气率为 $2.8\times 10^{-7}$ 帕·升/厘米<sup>2</sup>·秒, $Q_1=2.8\times 10^{-4}$ 帕·升/秒。还应考虑高真空室装有两个四极传感器和两只DL—8电离真空裸规的出气量 $Q_2$ ;橡皮O圈和其它密封件的出气量为 $Q_3$ 。假设 $Q_1=Q_3=Q_2$ ,则高真空室的总出气量为 $8.4\times 10^{-4}$ 帕·升/秒。通常高真空室的极限真空度 $P_0$ 应高于 $P_2$ 一个量级,即 $P_0=6.5\times 10^{-4}$ 帕,则要求高真空抽气系统的有效抽速为1.26升/秒。设计时,我们选用K—23油扩散泵满足了这个要求。

### 3. 自动取样分系统

这一部份由CW—1型真空稳定仪、DL—8裸式电离真空规、GWD—J1型压电晶体阀组成。为了定量测出共底腔中氢、氧浓度及氢的报警阈值,四极质谱计应要求高真空室的真空度 $P_2$ 保持稳定值,这个分系统是专门为此设计的,其工作原理示于图3。图中, $P_2$ 为被抽真空室内的真空度, $C$ 是压电阀的流导, $S_1$ 是抽空系统的有效抽速, $P_1$ 是共底腔的真空度。当 $P_1$ 和 $S_1$ 发生改变时, $P_2$ 也要发生变化, $P_2$ 的改变量由DL—8传感器测出,经CW—1仪放大后去控制GWD—J1压电阀的流导 $C$ ,也就是用改变进入高真空室的进气量来获得稳定的 $P_2$ 值。由于共底腔的 $P_1$ 值的变化范围(大气压 $\sim 10^{-1}$ 帕)很大,当 $P_1$ 较高时,我们用CD—J50阀调节 $S_1$ ;当 $P_1$ 较低时,我们用压电阀调节 $C$ 且用较小的 $S_1$ 。CW—1型真空稳定仪以压力值作为取样参考,以压电阀作为控制气流量的执行元件的一种闭环控制仪器。这种仪器不仅可以控制质谱分析室的全压,又可用于真空度测量。

### 4. 四极质谱计及自动报警系统

这一部分由 $\beta$ 放射线电离规、两台SJX—4型四极质谱计、一号控制器、二号控制器、四笔记录仪等组成。这个分系统的作用如下:(1)监测共底腔中气体成份及其浓度,特别

是氢、氧的瞬时浓度值；（2）当共底腔中的真空度等于266帕，氢的浓度大于7%时，该系统能自动报警，即控制器上的红灯亮，喇叭发出警报声；（3）判断共底腔的漏气部位。在此分系统中，高真空质谱室是按恒定全压方式工作的（ $P_{zt} = \text{常数}$ ，实际取 $P_{zt} = 6.5 \times 10^{-3}$ 帕），而且当CD—J50真空阀（或压电阀）开启某一确定位置时，真空抽气系统对质谱室的有效抽速 $S_1$ 也是恒定的。因此，由共底腔进入质谱室的气量 $Q = P_{zt}S_1 = \text{常数}$ 。在抽空过程中，共底腔中的全压 $P_{1t}$ 不断变化，因为采用了自动取样分系统总使进气量 $Q$ 值又维持恒定。

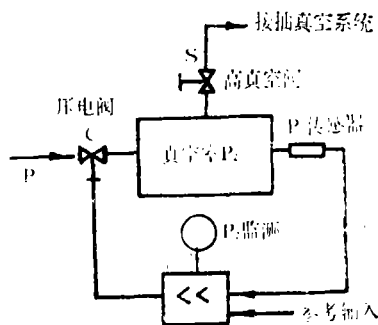


图 3

这就意味着，用标准浓度的气体经过校准后，共底腔中的氢的百分比浓度可直接用 $P_2$ （氢）来表示。我们设计研制了“气体浓度定标系统”，在调试过程中用来提供气体浓度标准以设定本装置所需的报警阈值，它已用在本装置在试验室的总调试中。在现场使用时，我们采用了一种简单的校准方法。使用医用针筒配制7%浓度 $H_2$ 和空气的混合气体通过外接针阀注入真空质谱室，在 $P_{zt} = 6.5 \times 10^{-3}$ 帕的情况下，通过四极仪记录相应于 $P_2$ （氢）的电压读数，并通过控制器将 $P_2$ （氢）信号的报警电压值调整好。全压报警值是通过 $\beta$ 规在266帕时的输出信号值在控制器内调整好。

## 二、几个问题

检测“共底腔”真空度的传感器用热规还是用冷规？在A系统，初期用扩大量程的DL—8热规，它存在如下问题：一是上限测量不准，二是热规本身是点火引爆源，三是在低温下影响测量真空度的精度。A系统后期选用北京真空仪表厂生产的 $\beta$ —1型冷规，它克服了热规具有的后二项缺点，因 $\beta$ 源衰减使下限测量仍感不足。在B系统，使用了我们自己研制的 $\beta$ 型冷规，它配用了对数和线性两种测量线路，从而满足了使用要求。

研制防爆型高真空抽气系统使我们费力费时很大。首先外协三项任务：防爆电机试制、环形密封加热器试制、K—23油扩散泵改成内热式。我们和有关单位完成如下项目：2xz型防爆机械真空泵的组装及其性能试验、环形密封加热器的功率及寿命试验、改型K—23油扩散泵的性能测试等。尽管如此，B系统内的防爆型高真空抽气系统中仍使用DGC—JQ10电磁阀和热规，它们是不防爆的。在A系统，只好用塑料罩将机组密封起来，通入氮气保护，防止事故万一发生。

通过调研，我们已经知道氢、氧混合物的爆燃或爆炸特性。它取决于混合浓度、环境压力、环境温度、点火能及点火方式等条件，并给出了一些结论。我们是利用外国的结果，还是通过自己的试验求得报警阈值？这是需要认真处理的。基于慎重和我国没有自己的数据，我们选择了后者。通过“低压下危险气体爆燃区限的试验研究”获得了报警阈值为：共底腔真空度 $P_{1t} = 266$ 帕，共底腔氢浓度的下限值大于7%报警阈值的测得，为控制器的设计提供了依据。

以真空工程应用观点来看， $\beta$ 型真空计对全压的测量精度和四极仪对分压的检测灵敏度或精度均能满足本任务的要求。这里要谈谈信号的反应时间，即信号传输迟滞问题。因为它

与报警和预防措施有关。 $\beta$ 规装在距抽空咀的最远点,它测定的真空度偏低,这样安全裕度较大;因用屏蔽导线直接传输信号,其时间常数约为毫秒至秒量级。分压检测的是 $P_2$ (氢)不是 $P_1$ (氢),它的迟滞多大呢?在粘滞流范围内,内径8毫米的紫铜管,气流的流速大约为6~7米/秒,四极质谱计通常装在远距共底腔30~50米的地方,因此滞后时间为5~8秒。当共底腔的 $P_{11}$ 等于或低于266帕时,它在危险区内使用应特别注意安全。当 $P_{11}$ 高于266帕时是安全的,分压检测的滞后时间的实际意义不大,这就不讨论了。

从真空获得技术看,共底腔的上底面是一台液氢低温泵,其表面积为6.42米<sup>2</sup>,它的下底面是一台液氧低温泵,对于可冷凝气体,这两个低温泵将有巨大的抽气能力。在室温下,要求共底腔抽到好于 $6.5 \times 10^{-1}$ 帕的真空度和总漏率低于1.3帕·升/秒。当氧贮箱和氢贮箱加注推进剂预冷时,环带受冷收缩,造成漏率增加,但真空度变化较小。这说明漏入空气中的可凝成分,如水蒸汽、二氧化碳气等被冷凝抽除了,即漏率的增量 $\Delta Q$ 近似等于某温度下的低温泵的抽除量。仅当燃料液氢大量注入氢贮箱使共底腔上底面成为20K的低温冷凝泵后,共底腔的真空度在两、三分钟内就迅速提高到优于 $1.3 \times 10^{-1}$ 帕。这就表明:虽然环带、氧箱、氢箱之间的温差更大,漏率的增量 $\Delta Q$ 更大。但是,20K低温泵的抽气能力大得多,把空气中的主要成份氮、氧均冷凝抽除了。试验证明,大多数共底腔是符合上面分析的,因而满足了火箭的要求。仅有一次,共底腔真空度无明显变化,这时已听到环带有嘶嘶的漏气声。在低温下,若氧箱上底面漏入共底腔的漏量小于低温泵的抽气能力,那么共底腔仍然可以使用。反之,则看 $\Delta P_{11}$ 变化快慢。在规定时间内,若 $P_{11}$ 好于266帕仍满足,则可用;否则是不能用或超程使用。在低温下,若氢箱下底面存在漏入共底腔的漏孔,在规定时间内,仍保持 $P_{11}$ 好于266帕,则可用;否则是不能用的,即共底腔是废品!

在B系统中,我们用了两份仪器和传感器,主要目的是一份作另一份的备份。一台四极仪扫全谱,另一台扫低质量数部份质谱,它能缩短信号的滞后时间,监测报警阈值。四极探头和DL-8金属裸规是交叉配置的,可避免电子与离子干扰。应用不同设计的一号、二号控制器使监测和报警更加有效。辅助高真空抽气分系统的操作控制板是专门设计的,使用方便、操作简单。当切断扩散泵电源后,在无人看守的情况下,分系统本身能定时自动停机和自动放气,这就避免了经常发生的返油故障。

### 三、结 论

这套设备具有:1.能防爆;2.现场不设浓度对比定标系统;3.提高了气体浓度监测灵敏度;4.缩短了响应时间、能自动报警等优点。经过改制可以成为通用系统,将会在石油、化工、煤矿、地质、环保等领域中获得应用。

本课题由胡炳森、曾凡永同志负责。

参加本项工作的还有:姜继善、汪萍、刘金彩、孙长文、孙天辉、党震、江豪成、李慧君等同志。

**编后记:**本刊编辑部全体同志以极其沉痛的心情向本刊广大读者通告:本文的执笔人,本刊最热心的作者和读者之一——曾凡永同志,因意外事故于1986年6月上旬逝世于昆明。我们万万没有预料到,曾凡永同志的这篇著作竟成了最后的遗作。现在,只能借本刊一角,向死者表示深切的悼念。曾凡永同志为航天、真空、低温等领域所作出的贡献将牢记在我们的心中。