

高压液氧供应系统管路设计

闫 峰

(航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 高压液氧供应系统是我国压力最高的挤压式液体火箭发动机试验台的关键分系统。在系统设计过程中, 通过合理布置管路, 设计专用固定支架, 采用自然补偿和堆积绝热技术, 解决了高压低温推进剂系统管路设计中的难题。该系统顺利通过气密性检查和调试, 经多次热试车考核, 系统稳定可靠, 满足设计要求。

关键词: 液体火箭发动机; 高压液氧供应系统; 管路设计

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 06-0070-04

Design of pipelines in high pressure LOX supply system

YAN Feng

(Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: The high pressure LOX supply system is the important sub-system in the extruding liquid rocket engine test stand and is the highest pressure gas-pressurized feed system in China. Some problems existing in the design of high-pressure low-temperature propulsive agent pipelines were solved through the rational pipeline arrangement, design of special supports, self compensation and pile-up heat insulation technology. This system was proved to be reliable after several times of hot fire tests and can meet the design requirements.

Keywords: liquid rocket engine; high pressure LOX supply system; pipeline design

0 引言

某火箭发动机组件试车台是目前国内压力最高的挤压式试验台, 用于进行新型液氧/煤油、液氧/甲烷发动机高压组合件试验。其中, 低温推进剂液氧系统设计压力 30 MPa, 为贮箱增压的

氮气增压系统设计压力 45 MPa。

高压液氧供应系统是低温推进剂系统, 由于其设计压力高, 给系统管路设计带来了很多技术难点。通过合理的管路布置、支架设计、低温补偿和绝热设计等工作, 解决了高压液氧供应系统管路设计中的关键技术, 为该系统的投产运行打下了坚实的基础。

收稿日期: 2011-12-13; 修回日期: 2012-02-06

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目 (2008JY04)

作者简介: 闫峰 (1978—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

1 系统原理及组成

高压液氧供应系统采用挤压方式供应, 挤压气体为氮气, 通过贮箱压力来保证发动机对液氧流量的要求。根据功能划分, 高压液氧供应系统由主管路、容器增压-放气、加注-泄出、氮气吹除及回收等分系统组成。

其中, 液氧主管路分系统由液氧容器、断流阀、过滤器及管道等组成, 是为发动机供应液氧的通道。容器增压-放气分系统由气体过滤器、增压隔离阀、高压电磁阀、孔板、放气阀及安全阀等组成。增压方式采用多路孔板组成的孔板矩阵方式, 通过不同孔板的组合实现增压能力调节,

保证容器压力要求。加注-泄出分系统由加注阀、泄出阀、过滤器及管道等组成。试验前, 液氧槽车通过加注管道给容器加注液氧; 试验后, 容器内剩余液氧经泄出阀及管道回收槽车。吹除分系统由吹除容器及吹除阀门、增压阀、放气阀、安全阀及过滤器等组成。系统采用落压工作方式, 先通过增压阀为容器充入一定压力的氮气, 关闭增压阀; 吹除时, 打开吹除阀, 氮气经过滤器后对液氧管路进行吹除, 容器压力缓慢降低, 通过容器上安装的压力传感器可对箱压进行检测。回收分系统由回收容器、放气阀、放液阀及管道等组成。作为低温介质, 液氧不能直接排在试验间内, 因此将试验过程中放出的液氧回收至回收容器。高压液氧供应系统如图1所示。

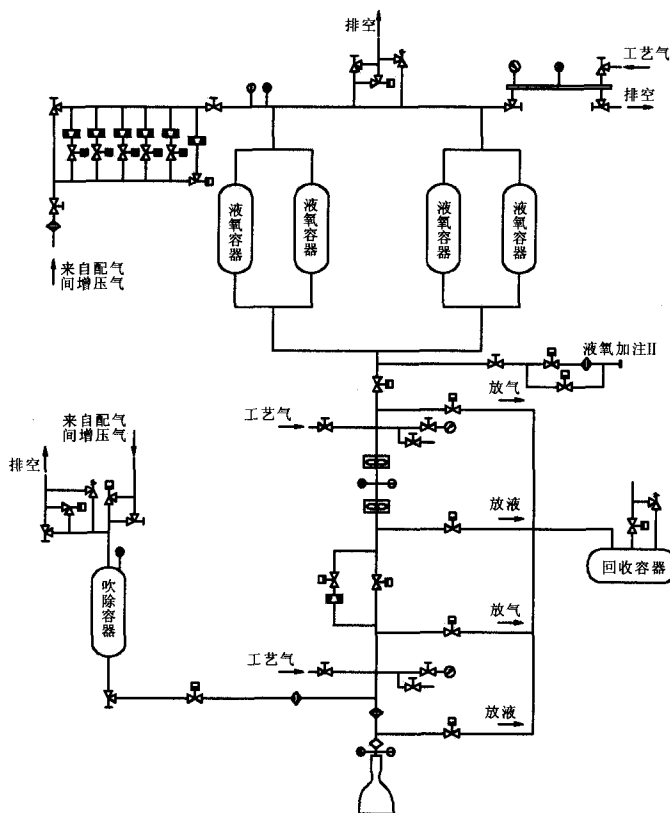


图1 系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of system

2 管路设计

2.1 管路布置

液氧系统管路主要布置于试车台的液氧容器

间和试验间。其中, 容器间分为上下两层, 上层布置容器增压和放气设备及管路; 下层布置液氧容器、吹除容器及管道阀门。位于 ± 0.00 m平面的试验间是安装发动机并进行试车的地方。预冷排放和试后管路中剩余的液氧介质最终排入回收

容器。液氧供应主容器由 4 台 30 MPa, 0.5 m³ 的低温容器组成, 低温容器与主管道成“H”型对称分布, 位于主管道一侧的 2 个容器首先串联, 然后两侧管路再汇入主管路。容器上的压差液位计用于指示液位, 温度和压力传感器用于检测容器箱压和气垫温度。

液氧主管路与水平面倾斜 3° 布置, 断流阀为低温气动阀门, 主管路高点设置排气阀, 排气管路水平布置。1#, 2# 低温涡轮流量计布置在断流阀后, 用于测量液氧流量, 流量计间设有压力和温度测点。加注管道设置在断流阀之前, 可通过加注接口与液氧槽车对接。吹除容器为一台 30 MPa, 0.2 m³ 的容器, 容器下设置手动隔离阀门, 吹除管路水平布置。主管路、排气路及吹除路穿过容器间和试验间之间的防爆墙通向试验间。

主管路、排气路及吹除路管道垂直向下进入试验间后, 排气路汇入回收管路; 主管路和吹除路管道通过弯管后与试车架平台平行布置。主阀为低温气动阀门, 初级阀门后布置节流孔板。主阀前低点设置放液阀; 主阀后管路高点设置放气阀, 低点设置放液阀。放气放液管道汇流后, 经回收管道一直铺设至回收容器。主管路通过低温补偿器与发动机进行对接。

来自配气间的增压气经气体过滤器和手动增压隔离进入增压集气管。集气管后分 7 路增压: 一路由手动增压阀控制, 一路由气动增压阀和孔板控制, 另 5 路由高压电磁阀和孔板进行调节增压。增压隔离阀后与容器集气管相接, 集气管布置为“H”型。容器上装有低温安全阀, 并可通过气动阀和手动阀进行容器自动和手动放气。安全阀出口和放气阀出口连接到放气管路, 最终引出容器间排空。

吹除容器由手动和气动增压阀门并联增压, 通过压力传感器对箱压进行检测。气动、手动放气阀进行容器自动和手动放气, 容器上装有安全阀, 安全阀出口和放气阀出口连接到放气管路, 最终引出容器间排空。吹除主阀为气动阀门, 阀后布置气体过滤器, 最后在主阀后接入液氧主管路。

2.2 支架设计

由于系统设计压力较高, 为防止试验过程中

管道系统震动过大, 进行管道安装设计时, 针对每一台高压设备的外形特点和尺寸不同, 设计专用的固定支架, 既保证由于温度变化而产生的系统变形需要, 又满足设备安装防震固定的要求。

除了设备支架外, 考虑管子、管件、阀门、管内介质及保温材料等全部载荷对管道产生的应力和应变, 设计制作了管道支架。管架间距的计算用公式 (1):

$$L = \sqrt{\frac{W[\sigma]}{105q}} \times 10 \quad (1)$$

式中: q 为 1 m 管道的重量, kg/m; $q = q_1 + q_2 + q_3$, q_1 为 1 m 管子重量, q_2 为 1 m 介质重量, q_3 为 1 m 保温材料重量; $[\sigma]$ 为管材的许用弯曲应力, MPa, 对钢管取 30 MPa; W 为管道截面模量, cm³。而 $W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$, D 为管道外径, cm; d 为管道内径, cm。

2.3 低温补偿

常温下铺设的管道投入运行后, 由于液氧的充填和泄出, 会使管路出现伸长和缩短, 产生较大的热应力, 如不采取合适的措施可能导致管道破坏。在管道设计中必须考虑热膨胀, 采用自然补偿或设置各种型式的补偿器以吸收管道的热膨胀和端点位移。

因为组合件液氧系统为高压系统, 因此管道热补偿采用自然补偿方法, 即利用管道的各种弯曲形状所具有的柔性以补偿其自身的热膨胀和端点位移。管路的伸缩量按公式 (2) 计算:

$$\Delta L = \alpha (t_2 - t_1) L \quad (2)$$

式中: ΔL 为管路伸缩量, m; α 为管材的线膨胀系数, 1/°C; t_2 为管路工作时的温度, °C; t_1 为管路安装时的温度, °C; L 为管路长度, m。

管路设计时采用了 3 个自然补偿器 (L 形补偿器) 和一个波纹管补偿器。3 个 L 形补偿器分别布置在容器间 5 m 钢平台 (1#)、容器间——试验间垂直段 (2#) 及试验间主阀前 (3#); 波纹管补偿器布置在主管路与产品对接前。下面对补偿量进行核算:

L 形补偿器的计算模型如图 2 所示, 其短臂

长度可按公式 (3) 计算：

$$l=1.1\sqrt{\frac{\Delta LD}{300}} \tag{3}$$

式中： ΔL 为长臂为 L 的管路伸缩量，m； l 为短臂长度，m； D 为管道外径，mm。

根据管路设计，通过长臂 L 计算热膨胀量 ΔL ，短臂 l 计算补偿量 $\Delta L'$ ，如表 1 所示。

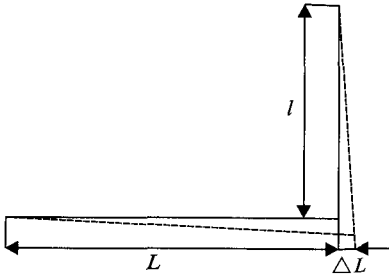


图 2 L 形补偿器计算模型

Fig. 2 Computational model of L-type compensator

表 1 L 形补偿器热膨胀量及补偿量对比表

Tab. 1 Thermal expansion vs compensation of L-type compensator

mm				
补偿器	长臂	短臂	热膨胀量	补偿量
1#	5	3	0.017	0.026
2#	3	2	0.01	0.012
3#	3.5	2	0.012	0.012

从表 1 可知，L 形补偿器可以满足液氧管路设计要求。波纹管补偿器便于管路及产品对接不仅提供轴向补偿，还有一定的周向补偿能力。

2.4 绝热设计

由于液氧为低温介质，其供应管道必须进行绝热处理，以减少管道冷损失。低温绝热分堆积绝热和真空绝热 2 大类型，液氧管路采用了简单、方便、可靠的堆积绝热形式，绝热材料选用聚胺脂泡沫塑料。

聚胺脂泡沫塑料是常用硬质泡沫绝热材料。它热导率小、密度小、吸水率低具有自熄性。此

塑料能粘合在金属和木材等基材上，不需要任何支撑。施工时，直接喷涂在管路表面或灌注在夹层内，操作简单，施工效率高，适于规模较大工程。目前，已用于火箭的液氧、液氢容器的隔热，并且在试车台液氧管路中成功应用。

绝热层厚度由下式计算：

$$b=0.5(d_b-d_w) \tag{4}$$

$$d_b \ln \frac{d_b}{d_w} = \frac{2\lambda_p}{\alpha} \frac{t_b-t_w}{t_z-t_p} \tag{5}$$

式中： b 为绝热层厚度，m，一般取 5 的倍数； d_b 为绝热层外径，m，一般为绝热层内径的 5~10 倍； d_w 为管外径，m； t_b 为绝热层外表面温度，应高于当地露点温度 1~2℃； t_w 为管外壁温度，约 -183℃； t_z 为周围环境温度，按夏天最高温度； t_p 为绝热层的平均温度， $t_p=0.5(t_b+t_w)$ ； α 为空气对绝热层的放热系数； λ_p 为绝热材料平均温度下的热导率， $\lambda_p=\lambda_0+1.4\times10^{-4}t_p$ ，W/m·K； λ_0 为绝热材料在零度时的热导率。

3 结束语

2009 年 11 月，高压液氧供应系统管路顺利通过气密性检查和调试。至今，该系统已成功参加了液氧/甲烷发动机组合件热试车 4 次、滚控装置热试车 4 次，系统稳定可靠，满足设计要求。

在高压液氧供应系统管路设计中，通过合理的管路布置，并完成支架设计、低温补偿和绝热设计等内容，为国内压力最高的挤压式试验台建成投产奠定了基础，并可为今后同类型高压低温介质管路设计提供参考。

参考文献：

[1] 郭霄峰. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
[2] 徐烈, 朱卫东, 汤晓英. 低温绝热与贮运技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

(编辑：马 杰)