

# 液氧/煤油发动机换热器试车台配气系统设计

程 磊

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 在液氧/煤油发动机研制试验过程中, 需要对发动机的换热器进行试验验证, 以此来满足发动机对换热器的要求。主要阐述了利用音速孔板控制以及计算气体流量的具体方法、理论计算, 以及使用过程中所存在的问题和解决的方法。所设计的配气系统满足了液氧/煤油发动机换热器系统的试验要求。

**关键词:** 液氧/煤油发动机; 换热器系统; 配气装置

中图分类号: V434.3 文献标识码: A 文章编号: (2006) 05-0060-05

## Design of air rationing system of heat exchanger test bench for LOX/kerosene rocket engine

Cheng Lei

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** During the research and development testing of LOX/kerosene rocket engine, it is important that the heat exchanger was tested to prove its function. The paper expatiates the method of air flux calculation using sonic orifice theory. An air rationing system was designed and test proved that it can meet the requirement of the engine test.

**Key words:** LOX/kerosene engine; heat exchanger; air rationing system

### 1 引言

在液氧/煤油发动机研制过程中, 为了模拟发动机实际工作时的状态, 需要增加换热器 (含氮

气加热器、液氧蒸发器, 以下简称两器) 系统来满足给液氧、煤油系统增压的需求。为了验证两器系统工作的可靠性, 必须建立一套与两器系统配套的配气、节流, 流量测量装置。为此需要设计研制一套两器配气系统来与发动机两器系统相

收稿日期: 2006-01-23; 修回日期: 2006-03-02。

作者简介: 程磊 (1981—), 男, 助理工程师, 研究领域为液体火箭发动机地面试验。

万方数据

配套。由于系统对气体的流量、压力都有一定的要求，如果满足不了，就会造成两器系统试验的失败，另外，气流属于超音速流动，计算设计方面比较复杂，因此，给两器配气系统的设计研制增加了难度。

## 2 设计技术要求

根据液氧/煤油发动机两器系统试验任务书的要求，研制的两器配气系统的主要性能应满足以下要求：

- (1) 氮气加热器进口内径  $\Phi 16\text{mm}$ ，出口  $\Phi 22\text{mm}$ ，出口温度  $516\text{K}$ ；
- (2) 液氧蒸发器出口内径  $\Phi 55\text{mm}$ ，带肩圈法兰；
- (3) 液氧蒸发器出口温度  $341.2\text{K}$ ，流量  $1.5\text{kg/s}$ 。
- (4) 氮气流量  $0.2 \pm 0.02\text{kg/s}$ ；
- (5) 氮气加热器进口压力  $1.25 \pm 0.1\text{MPa}$ ，出口压力  $0.8 \pm 0.1\text{MPa}$ ；
- (6) 液氧蒸发器出口压力  $0.8 \pm 0.1\text{MPa}$ ；
- (7) 系统不影响发动机推力测量；
- (8) 系统可靠性高，振动小。

## 3 关键技术和解决问题的过程及所采取的措施

### 3.1 总体结构设计

总体采用试车台抽真空路气源给加热器系统供气，经过第一道节流孔板节流，调整流量在  $0.2\text{kg/s}$ ，孔板前加装温度、压力测点以及流量计。在第一道孔板后，通过电磁阀控制气路的通断。然后气流经过加热器，经加热器加热后采用孔板节流，将出口的压力控制在  $0.8\text{MPa}$  左右，保证出口压力。蒸发器路采用孔板直接节流，保证出口压力，并在孔板前加装温度、压力测点，利用孔板前后压差计算出氧气流量。其原理图见图 1。

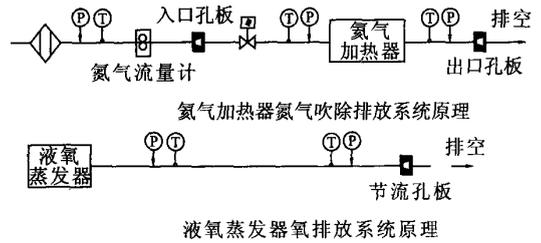


图 1 两器系统原理示意图

Fig.1 Diagram of heat exchanger

### 3.2 氮气加热器氮气流量计算

加热器换热工质采用氮气。假设氮气在节流孔板中的流动是一维定常流，当孔板后的压力与孔板前压力之比小于  $0.528$  时，产生一个临界截面，截面上气流流速为声速。此时有流量计算公式：

$$m = CK \frac{p^*}{\sqrt{T^*}} A q (\lambda) \quad (1)$$

式中， $m$  为氮气流量， $\text{kg/s}$ ； $C$  为孔板流量系数，经验值，取  $0.6$ ； $K = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ ，氮气  $k=1.4$ ， $R=302.7\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $p^*$  为氮气总压， $\text{Pa}$ ； $T^*$  为氮气总温， $\text{K}$ ； $A$  为孔板截面积， $A = \frac{\pi}{4} D^2$ ， $\text{m}^2$ ； $D$  为孔板直径， $\text{m}$ ； $q(\lambda)$  为无量纲密流，当  $M=1$  时， $\lambda=1$ ， $q(\lambda)=1$ 。

总压计算公式：

$$p^* = \left(1 + \frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p \quad (2)$$

式中， $p$  为静压， $\text{Pa}$ ； $k$  为气体等熵指数。

总温计算公式：

$$T^* = \left(1 + \frac{2}{k-1}\right) T \quad (3)$$

式中， $T$  为静温， $\text{K}$ 。将各参数代入计算得到氮气加热器进口孔板直径  $D_1=4.5\text{mm}$ 。

### 3.3 氮气加热器出口孔板计算

氮气加热器出口要保证  $0.8 \pm 0.1\text{MPa}$  的压力，孔板出口是大气压，因此也应该是音速孔板。按公式 (1) ~ (3) 计算得到氮气加热器出口孔板直径  $D_2=13.5\text{mm}$ 。

由于加热器出口温度高达 243℃, 孔板出口须引离发动机排放, 离加热器出口有一定的距离, 因此无法真正做到保证加热器出口压力。

### 3.4 液氧蒸发器出口孔板计算

液氧蒸发器出口压力要求为  $0.8 \pm 0.1 \text{ MPa}$ , 出口温度为 341.2K, 出口内径为  $\Phi 55 \text{ mm}$ 。考虑用 DN50mm 的不锈钢管引出大门。因此孔板后反压为大气压, 满足音速孔板的条件。由于要保证压力, 计算孔板的内径采用同加热器一样的方法, 并且采用孔板节流, 利用压力计算流量。

氧气的  $k=1.40$ ,  $R=260.0 \text{ J/(kg/K)}$  时, 流量为  $1.5 \text{ kg/s}$ , 代入公式 (1) ~ (3), 计算得到液氧蒸发器出口孔板直径  $D=31.6 \text{ mm}$ 。

## 4 换热器配气系统调试

### 4.1 氮气加热器配气系统调试

氮气加热器系统调试原理见图 2。

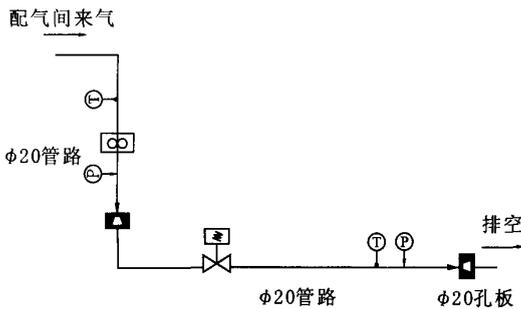


图 2 氮气加热器系统调试原理

Fig.2 Diagram of heat exchanger test system

调试方法: 使用  $\Phi 25$  涡轮流量计测量流量, 其测量范围为  $2.2 \sim 11.1 \text{ L/s}$ 。氮气由配气间提供的工艺气, 压力调整范围在  $1 \sim 8 \text{ MPa}$  之间。经讨论后决定压力调整到  $5.3 \text{ MPa}$ , 此时计算氮气的密度。

氮气密度计算公式:

$$\rho_{N_2} = 12.3348 \frac{p_{N_2}}{0.984 + 0.00413 t_{N_2}} \quad (4)$$

式中,  $\rho_{N_2}$  为氮气密度,  $\text{g/L}$ ;  $p_{N_2}$  为流量计处氮气的压强,  $\text{MPa}$ ;  $t_{N_2}$  为流量计处氮气的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$12.3348, 0.894, 0.00413$  为有量纲的拟合公式系数。

公式适用范围: 氮气温度为  $-10^{\circ}\text{C} \sim 26^{\circ}\text{C}$ ; 氮气压力  $4.0 \sim 6.0 \text{ MPa}$ 。

氮气流量按下式计算:

$$q_{m_{N_2}} = \frac{f_{N_2}}{256.96} \times \rho_{N_2} \quad (5)$$

式中,  $f_{N_2}$  为流量计频率,  $1/\text{s}$ ;  $q_{m_{N_2}}$  为氮气质量流量,  $\text{g/s}$ ;  $\rho_{N_2}$  为氮气密度,  $\text{g/L}$ ;  $256.96$  为平均仪表系数,  $1/\text{L}$ 。

调试第一道孔板时, 采用流量计测量流量, 调整减压器的出口压力, 当压力到  $5.3 \text{ MPa}$  时, 分别用直径  $\Phi 4 \text{ mm}$ 、 $\Phi 5 \text{ mm}$ 、 $\Phi 6 \text{ mm}$  的孔板进行节流, 根据流量计测得的流量选取合适的孔板。经调试,  $\Phi 5$  孔板所得数据满足流量为  $0.2 \text{ kg/s}$  的要求。因此采用  $\Phi 5 \text{ mm}$  的孔板作为第一道节流孔板, 减压器出口压力调整到  $5.3 \text{ MPa}$ 。

调试第二道孔板在第一道已经确定的情况下, 采用  $\Phi 13$ 、 $\Phi 14$ 、 $\Phi 15$  孔板进行调试。

由公式 (1)、(2)、(3) 可以导出调试状态下和试车状态下氮气的温度和压力之间的关系式:

$$p_1 = p_2 \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (6)$$

式中,  $p_1$  为试车状态下压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_2$  为调试状态下压力,  $\text{MPa}$ ;  $T_1$  为试车状态下温度,  $\text{K}$ ;  $T_2$  为调试状态下温度,  $\text{K}$ 。

计算得到当温度为  $293 \text{ K}$  时, 氮气的压力应该为  $p_1 = 0.603 \text{ MPa}$  左右, 经过调试, 得到结果与  $\Phi 14$  孔板较为接近, 调试结果见表 1。

表 1  $\Phi 14$  孔板调试数据表

Tab.1  $\Phi 14$  data of the orifice test

	孔板前压力/MPa	孔板前温度/K	流量/(kg/s)
	0.568	-6.8	0.201
	0.575	-6.9	0.202
	0.581	-6.9	0.208
	0.587	-6.9	0.210
	0.589	-6.8	2.209
平均值	0.580	-6.84	0.206

经过调试决定加热器进口采用直径为  $\Phi 5\text{mm}$  的孔板, 加热器出口采用直径为  $\Phi 14$  的孔板。

4.2 液氧蒸发器出口孔板调试

由于条件所限, 无法用氧气来调试, 采用常温氮气来代替氧气进行试验, 又由于流量只能用  $\Phi 25$  流量计进行测量, 受流量计量程所限, 最大只能测得  $0.5\text{kg/s}$  左右的氮气流量, 所以需要进行模拟计算才能进行调试。液氧蒸发器原理如图 3 所示。

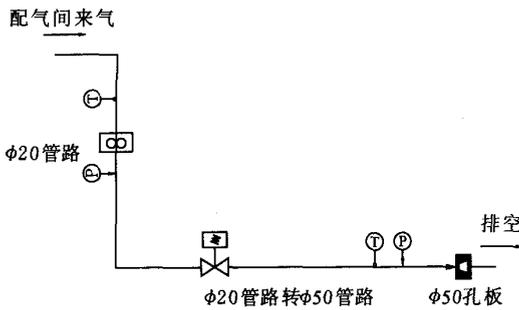


图 3 液氧蒸发器调试系统原理图  
Fig.3 Diagram of LOX evaporation test system

仍由公式 (1), (2), (3) 及  $K$  值表达式可以推出公式:

$$p_1 = p_2 \sqrt{\frac{T_1 R_1}{T_2 R_2} \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}} \quad (7)$$

式中,  $p_1$  为试车时氧气压力, MPa;  $p_2$  为试验时氮气压力, MPa;  $T_1$  为试车时氧气温度, K;  $T_2$  为试验时氮气温度, K;  $R_1$  为试车时氧气气体常数,  $R_1 = 260.0 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $R_2$  为试验时氮气气体常数,  $R_2 = 302.7 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $\dot{m}_1$  为试车时氧气流量,  $\text{kg/s}$ ;  $\dot{m}_2$  为试验时氮气流量,  $\text{kg/s}$ 。计算得  $p_3 = 0.267 \text{ MPa}$ 。

经过调试得到的数据中,  $\Phi 34$  孔板比较接近要求, 其调试数据见表 2。

经过公式 (7) 反推得到实际工作状态下孔板进口压力应该为  $0.823 \text{ MPa}$ 。满足  $0.8 \pm 0.1 \text{ MPa}$  的要求。

由于蒸发器前后均无流量计对氧流量进行测量, 因此孔板测量流量需要一个流量测量公式, 通过孔板前的压力温度算得流量。

表 2  $\Phi 34$  孔板调试数据表  
Tab.2  $\Phi 34$  data of the orifice test

	孔板前压力/MPa	孔板前温度/K	流量/(kg/s)
	0.247	-7.5	0.516
	0.248	-7.6	0.503
	0.248	-7.5	0.509
	0.248	-7.5	0.504
	0.247	-7.5	0.506
	0.248	-7.5	0.510
	0.247	-7.8	0.511
	0.248	-7.5	0.520
	0.248	-7.5	0.522
平均值	0.2476	-7.52	0.511

由流量公式 (1) 推算

$$k = \sqrt{\frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (8)$$

氧气  $k=1.4$ ,  $R=206.0$  时, 得到  $K=0.042$ 。

由公式(2)、(3)可得  $p^*=1.89p$ ,  $T^*=1.2T$ , 氧气的流量

$$\dot{m} = 33.94 \times \frac{p}{\sqrt{T}}$$

5 热试车验证

液氧/煤油发动机两器配气系统投产后, 经历了 100-023, 100-023A, 100-023B 3 次系统热试车, 将测得的数据列于表 3。3 次试验, 两器配气系统均工作良好, 基本满足了设计要求, 得到了设计的认可。后又用于试验台, 效果也很好。100-023, 100-023A, 100-023B 次试车数据见表 3。

表 3 热试车两器系统试验数据

Tab.3 Data of firing test

参数名称	100-023	100-023A	100-0238
氮气加热器氮气流量/(kg/s)	0.204	0.199	0.205
氮气加热器氮入口压力/MPa	1.483	1.493	1.490
氮气加热器氮气出口压力/MPa	0.753	0.772	0.782
液氧蒸发器氧出口压力/MPa	0.621	0.594	0.603
氮气加热器氮入口温度/°C	5.5	3.9	-1.9
氮气加热器氮气出口温度/°C	266.4	265.5	263.5
液氧蒸发器氧出口温度/°C	142.5	137.2	157.0

### 6 结论

设计的两器配气系统通过试验验证可以得出以下结论:

(编辑:马杰)

(上接第 55 页)

用一只压力传感器同时测量稳态压力和低频脉动压力时两系统应完全独立,互不影响。传感器的输出信号并联隔离记录。低频脉动压力的隔离放大器应满足频率响应特性,设置合适的上、下限截止频率和放大倍数。测量中校准方法是关键环节。具体方法是:在稳态压力校准数据中,找合适的一档电压毫伏数,求平均值并除以,作为校准正弦信号的有效值,频率选 80Hz。实际校准时取整数反算压力值,求斜率 (MPa/mV)。频谱分析时,处理系统先采集校准信号,计算系统灵敏度,再采集试车信号与其相乘,计算出试车实际脉动压力值。实践证明,该等效校准方法误差小、精度高,是行之有效的一种方法。

一只传感器既测量稳态压力,又测量低频脉动压力,是液氧/煤油发动机试车中参数测量的一项新技术,该技术减少了安装在发动机上传感器

(1) 两器配气系统保证了氮气的流量,维持了氮气加热器的正常工作。

(2) 两器配气系统保证了加热器进出口的压力范围。

(3) 两器配气系统保证了液氧蒸发器出口的压力范围。

(4) 两器配气系统得到了液氧蒸发器的流量。

(5) 两器配气系统工作振动小,可靠性高。

### 参考文献:

[1] 潘锦珊. 气体动力学基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.

[2] 张坤元. 流体力学基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[3] 王朋军. 过氧化氢/煤油发动机试验中压差式孔板流量计的设计 [J]. 火箭推进, 2005, 31 (4).

数量, 增大了试车参数获得信息量。

### 7 结束语

随着液氧/煤油发动机研制的进展,初步解决了转速数据波动大、自带各种传感器的校准方法、低温压力零位漂移的修正、温度的准确测量、负推力修正、低频脉动压力测量等许多技术问题。特别是低温测量技术,使现有测量系统的测量水平、测量能力明显提高。但仍存在被测参数无法进行低温介质现场校准,低温零位漂移只是粗略修正,低温应变测量误差较大,低温负推力难以准确修正等问题。今后积极开展传感器、校准方法、低温测量技术研究,为液氧/煤油发动机研制提供准确、可靠的测量数据。

(编辑:侯早)