

# 液体火箭发动机接力试验技术

赵建军, 刘宏卫

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 在一项特殊要求、非例常的试验中, 需发动机进行接力试车: 在同一次试车中前后两个阶段分别使用两个不同厂家的氧化剂, 在进行氧化剂切换时, 发动机连续工作, 即进行接力试车。为此, 在原试车台试验系统的基础上, 进行了必要的技术改造, 建立了试车台发动机接力试车氧化剂试验系统。经热试车验证, 改造后的系统工作安全可靠, 满足发动机接力试验要求。

**关键词:** 液体火箭发动机; 氧化剂; 接力试验

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 03-0038-04

## Technology of relayed test with different oxidizers for liquid rocket engine

Zhao Jianjun, Liu Hongwei

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

**Abstract:** A liquid rocket engine relayed test had to be conducted on a conventional test stand, in which oxidizers from different plants were required to be used without shut-down of the engine for the purpose of checking the performances of the oxidizers. Thus, the original test stand had to be modified and a new oxidizer test system was established for relayed test. The key technology resolved during the relayed test is described in the paper. Hot test proved that the modified system operated reliably and safely. All the engine test requirements were met very well.

**Key words:** liquid rocket engine; oxidizer; relayed test

### 0 引言

试车台试验的常规发动机是采用四氧化二氮

和偏二甲肼为推进剂的液体火箭发动机, 发动机和相关的试验系统均已定型。在一项特殊要求的非例常的试验中, 要求进行发动机接力试车, 接

收稿日期: 2008-07-20; 修回日期: 2008-08-10。

作者简介: 赵建军 (1975—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术。

力前后使用不同厂家的氧化剂。为此, 在试车台常规发动机试验系统的基础上, 建立了试车台发动机接力试车氧化剂试验系统, 对试验状态进行了调整计算, 对试验系统进行了技术改造, 解决了其中的关键工艺技术, 确保了各参试系统的功能及技术性能指标满足试验要求。

1 发动机接力试车技术要求

1.1 接力试车

接力试车就是在试验过程中试车台通过切换不同的推进剂供应来完成试车, 即接力前使用一种推进剂, 接力后切换为另一种推进剂。

1.2 试车时间

试车全程工作时间 450s (320s+130s)。0~320s 试车为批生产补充抽检热试车, 使用 A 氧化剂; 320~450s 试车目的是验证不同生产厂家的推进剂 (四氧化二氮) 掺混使用对发动机工作的影响, 使用 B 和 A 混合比为 10:7 的混合氧化剂。

1.3 过载曲线

本次试车过载曲线见图 1。图中 QH 表示氧化剂贮箱切换。氧化剂贮箱切换过程中, 允许氧化剂入口压力 ( $p_{ovq}$ ) 有波动, 但应保持在  $0.922\pm0.25\text{MPa}$  范围内。

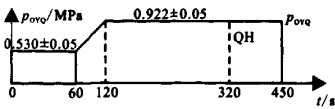


图 1 发动机试车过载曲线

Fig.1 Over loading curve of the test

2 推进剂供应系统改造

2.1 系统现状

试车台氧化剂供应系统的示意图见图 2。试车台现有 3 台 65m³ 氧化剂贮存容器 (编号分别为: 1#、3#、4#)。容器出口管路均不设隔离阀门, 其中 1# 容器单独使用, 3#、4# 容器并联使用。在 1# 容器和并联的 3#、4# 容器之间装有 DN400 闸阀用于隔离。3 台容器可以有两种工作方式, 即单独使用 1# 容器和同时使用 1#、3#、4# 容器。

压力继电器和箱压传感器均安装在集气管上, 通过电磁阀 AC1、AC2 分别与 3#、4# 容器和 1# 容器相通, 试车中依靠压力继电器来控制增压阀门的打开、关闭。

2.2 系统改造

为实现接力试车前后使用不同厂家的氧化剂, 需在容器出口增加隔离阀门。根据现场空间位置, 系统改造介绍如下。

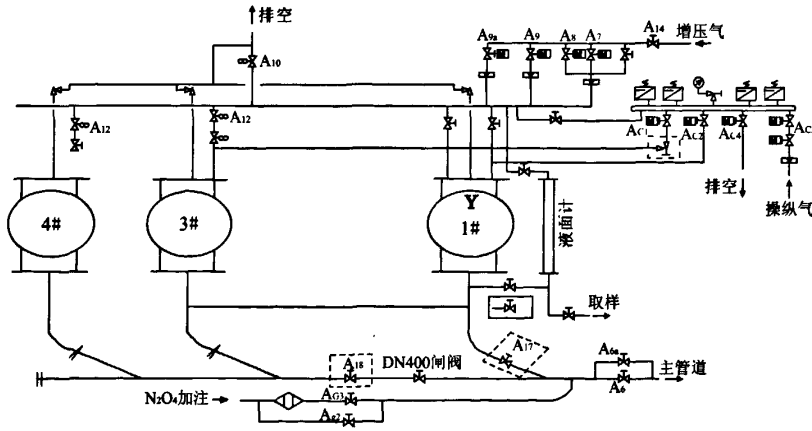


图 2 氧化剂供应系统示意图

Fig.2 Schematic of oxidizer feed system

在 DN400 闸阀和 3#、4# 容器之间的直管道上加装 1 台 DN400 气动球阀 A18 (AS791-51 DN400 PN1.6)。在氧化剂容器间 1# 容器弯头下的直管道上加装 1 台 DN300 气动球阀 A17 (AS791-7 DN300 PN1.6)。对加装的 2 台球阀, 分别设置高点放气和低点排液管路。

通过上述改造, 试车时通过程序控制气动球阀 A17 和 A18 打开、关闭来实现试车过程中不同厂家的氧化剂切换供应。为实现不同厂家的氧化剂加注量观测需要, 在原 1# 容器液位计基础上, 增加一套 3#、4# 容器液位显示管路和阀门, 以满足容器加注液位观察需要。为了防止 3#、4# 容器压力通过电磁阀 AC1 内漏到集气管里使压力继电器误动作, 在 3#、4# 容器通集气管的管路上加装 1 台手动开关。图 2 中虚线框部分是新增的阀门。

### 3 解决的关键工艺技术

#### 3.1 推进剂切换工艺的制定

##### 3.1.1 方法一

前 320s 试车用 3#、4# 容器, 使用 A 推进剂, 开车前打开 A18 和 DN400 电动闸阀。在 320s 时打开 A17、关闭 A18 阀进行接力, 切换到 1# 容器使用混合推进剂。在状态调整时要使 320s 接力时 3#、4# 容器剩余液位等于 1# 容器开始使用液位。这样在接力过程中 3 个容器箱压相同, 实际液位相差不大, 避免倒灌或正灌现象, 保证接力时的平稳。当采用两容器接力工作时, 容器何时开始接力, 两个容器共同工作多少时间, 以及如何保证交接过程中的压力平稳是一个要解决的问题。

针对上述情况, 通过控制两个容器接力时的压力, 使其在接力时保持至汇合处的压力相等, 同时还必须控制容器的隔离阀关闭速度, 以避免推进剂相互流入和压力凹坑的产生。方法一的优点为: 液面相近, 接力平稳; 缺点为: 3#、4# 容器预加注氧化剂量大。

##### 3.1.2 方法二

前 320s 试车用 1# 容器, 使用 A 推进剂, 开

车前打开 A17 和 DN400 电动闸阀。在 320s 时打开 A18、关闭 A17 进行接力, 切换到 3#、4# 容器使用混合推进剂。

方法二接力方式原理相同, 只是打开、关闭的阀门前后顺序相反, 具体阀门动作时间根据系统调试结果来定。1# 容器要满足 320s 试车, 加注液位接近容器加注极限, 试车 320s 后 1# 容器内氧化剂液位较低, 而 3#、4# 容器加注液位要满足后续 100s 试车, 因此接力时液位要比 1# 容器内液位高。这样在接力过程中, 1# 容器与 3#、4# 容器液位不一致, 有可能导致接力时不平稳。方法二的优点为: 预加注量少, 可满足长时间试车; 缺点为: 1# 容器和 3#、4# 容器有液位差, 接力时波动较大。

##### 3.1.3 工艺方法确定

结合试验任务书要求对以上 2 个方法进行比较, 认为方法二能够最好的满足试车要求, 因此确定方法二为试车采用的推进剂切换工艺方法, 即试车前 320s 用 1# 容器, 使用 A 推进剂, 开车前打开 1# 容器隔离阀 A17 和 DN400 闸阀; 控制程序在 324s 时打开 3#、4# 容器隔离阀 A18, 保证前 320 秒所用的氧化剂为 A; 当 A18 完全打开后, 328s A17 开始关闭进行接力, 在 331s 左右 A17 完全关闭, 1# 容器退出试车, 切换到 3#、4# 容器使用混合推进剂。

#### 3.2 增压工艺

##### 3.2.1 增压方式

经计算接力时 1# 容器箱压 1.04MPa, 试车前先给 3#、4# 容器增压至和 1# 容器箱压相同的压力 1.04MPa, 而 3#、4# 容器增压隔离阀 A12 保持关闭状态。试车前 320s 只给 1# 容器增压。320s 手动打开 A12 后, 按试车控制程序进行接力, 后 130s 试车同时给 1#、3#、4# 容器增压。

氧化剂增压孔板、减压器等增压能力是按 1# 容器单独试车时增压来计算的。在接力完成后, 切换为 3#、4# 容器试车, 此时液位下降速度比由 1# 容器供应推进剂试车慢一半, 但是增压能力可以满足 3 个容器, 并且箱压变化不大。经过计算, 450s 容器箱压约为 1.030MPa, 管路流阻为 0.274MPa, 液柱为 0.167MPa, 这样发动机氧

化剂入口压力为 0.923MPa 左右 (氧化剂入口压力为 0.922MPa 时容器箱压大约为 1.029MPa)。

### 3.2.2 压力波动

3#、4# 容器增压隔离球阀 A12 提前打开,使 3#、4# 容器和 1# 容器箱压平衡,这样接力时 3#、4# 容器和 1# 容器箱压相同。

1# 容器要满足 320s 试车,加注液位接近容器上限,试车 320s 后 1# 容器内氧化剂液位为 1.81m,较低,而 3#、4# 容器要满足后续 130s 试车加注液位为 2.90m,因此接力时液位要比 1# 容器内液位高 1.09m。这样在接力过程中,液位差约为 0.016MPa。接力时产生惯性流阻的管道长度短,只有 A17 和 A18 到容器之间的管道,DN400 管道 6 米左右, DN300 管道 9 米左右,经过计算,惯性流阻约为 0.009MPa。

综上所述,接力时的发动机氧化剂入口压力波动最大为 0.025MPa,满足试验对发动机入口压力的要求。

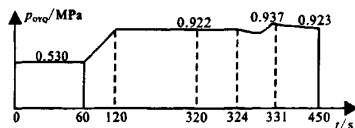


图3 发动机试车氧化剂入口压力曲线

Fig.3 Inlet temperature curve of the oxidizer

接力后由于 3#、4# 容器液位比 1# 容器高,因此在接力后发动机氧化剂入口压力将有少许上升,即 331s 左右容器箱压为 1.023MPa (对应的发动机氧化剂入口压力大约为 0.937MPa)。氧化剂入口压力曲线见图 3。

### 3.2.3 故障预防措施

为了确保接力时只出现 3#、4# 容器向 1# 容器正灌现象,而不出现 1# 容器向 3#、4# 容器倒灌现象,在 A18 打开前 4s,手动打开 3#、4# 容器增压隔离球阀 A12,先使 3#、4# 容器和 1# 容器箱压平衡,由于接力时 3#、4# 容器液位比 1# 容器高 1.09m,不会出现 1# 容器向 3#、4# 容器倒灌现象,保证了推进剂切换后 3#、4# 容器的推进剂按要求正常供应。

在试车过程中,人为地控制 1# 容器箱压,

使接力时 1# 容器箱压维持在 1.023MPa (对应的氧化剂入口压力为 0.922MPa)。

### 3.3 加注工艺

试车前一天下午加注氧化剂 1# 容器,加注到 9.90m 后将加注管线内的残余 A 氧化剂排泄回库房,并用氮气吹除加注管道,确保加注管线内干净。加注管线排泄干净后依据 10:7 混合氧化剂加注方法给 3#、4# 容器加注 B 氧化剂,加注 18.35m<sup>3</sup> (液位约 1.86m) 后停止。加注管线内的残余 B 氧化剂不排泄,加注管道内的 B 氧化剂量包括在 18.35m<sup>3</sup> 之内。

试车当天加注 12.85m<sup>3</sup> 的 A 氧化剂到 3#、4# 容器,加注液位 2.90m,同时加注管道内 B 氧化剂也被加注到 3#、4# 容器,保证 3#、4# 容器内 B 和 A 氧化剂比例为 10:7。加注到位后将加注管线内的残余氧化剂排泄干净。试车当天用 1# 容器 A 氧化剂按试车当天工作程序冲洗、加注管道。

## 4 结论

通过深入探索氧化剂容器工作方式、增压方式以及氧化剂加注方式,解决了试车台常规发动机接力试车试验工艺技术,优化了试验系统。经过发动机热试车验证,改造后的试验系统满足发动机接力试验要求。

### 参考文献:

- [1] 曾源华,张政.液体火箭发动机试验[M].北京:宇航出版社,1990.
- [2] 钱令希,龙驭球,张德良.计算力学[M].中国大百科全书(力学卷).北京:中国大百科全书出版社,1985.
- [3] 刘顺隆,郑群.计算流体力学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1998.
- [4] 李伟民.液氧/煤油发动机试验起动过程推进剂供应技术[J].火箭推进,1990,32(3): 56-62.
- [5] 何付军,张伟,马宝民,等.推进剂加注设备的现状与“三化”研究[J].航天标准化,2006(3): 19-22.

(编辑:陈红霞)