

低温发动机试验推进剂入口温度控制

曹文庆, 谭海林, 李 伟

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 阐述了低温发动机起动前推进剂入口温度对试车的重要性, 分析了以往试车入口温度过高的原因。通过对试验系统的改造, 采用强迫排放推进剂的方法, 降低发动机入口推进剂温度, 保证发动机在起动前推进剂入口温度满足试验要求。经试车验证, 所采取措施成功解决了试验系统存在的推进剂入口温度过高的问题。

关键词: 低温推进剂; 发动机试验; 入口温度; 强迫排放

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2009) 03-0052-04

Propellant inlet temperature control for cryogenic rocket engine tests

Cao Wenqing, Tan Hailin, Li Wei

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

Abstract: Factors affecting the propellant inlet temperatures during liquid rocket engine tests were analyzed. Methods were adopted for reducing the propellant inlet temperature by modification of the test system and forced dump cooling of the propellant. Tests proved that the improved approaches are effective and the propellant inlet temperature meets the requirement very well.

Key words: cryogenic propellant; engine test; inlet temperature; forced dump cooling

0 引言

低温发动机研制试验中, 要求发动机起动前入口温度很低。以往的试验, 由于试车台推进剂

供应系统存在绝热效果差等问题, 发动机起动前入口温度很难满足要求。为了使发动机起动前推进剂入口温度满足试验条件, 必须对试验系统和试验工艺过程进行改进, 寻求可以保证发动机起动前入口温度达到要求的技术方法。

收稿日期: 2008-03-25; 修回日期: 2008-06-16。

作者简介: 曹文庆 (1980—), 男, 工程师, 研究领域为发动机试验工艺。

1 推进剂供应系统

推进剂供应系统主要由推进剂容器、供应管道、阀门、流量计、补偿器等组成。由于低温发动机试验时需要根据实测温度判断系统是否预冷完成、发动机起动前推进剂温度是否满足要求, 因此要在合适位置设置一定数量的温度测点, 以满足温度测量要求。图 1 为推进剂供应系统简图。

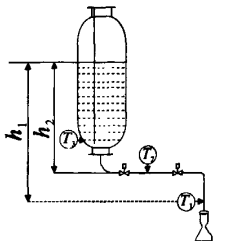


图 1 推进剂供应系统简图
Fig.1 Schematic of the propellant feed system

2 起动前推进剂入口温度影响因素

根据以往试车实测数据, 分析认为预冷时发动机入口温度过高主要有以下两个方面的原因:

(1) 由于试车台主管路及泵前管路管径较大, 且需要安装流量计、补偿器、阀门等, 造成主管路接口较多, 且主管路和泵前管路采用堆积式绝热, 绝热效果较差, 管路中推进剂温度较高, 引起发动机起动前推进剂入口温度过高。

(2) 对发动机进行预冷时, 由于推进剂容器液面与发动机入口高差较大, 使入口处推进剂饱和温度上升, 导致推进剂入口温度过高。

表 1 为某三次试车发动机起动前入口温度 T_1 、流量计间温度 T_2 、主容器内温度 T_3 的对比情况。各次试车由于时间不同, 推进剂加注量也不相同, 因此主容器液面静液柱对发动机入口产生的压力也不同。

表 1 中同一次试车 $T_1 > T_2 > T_3$, 而 T_1 和 T_2 与主容器液面有高度差 h_1 和 h_2 , 且 $h_1 > h_2$, 见图 1, 即 T_1 处饱和温度高于 T_2 处。推进剂流出容器后, 管道绝热效果差, 造成推进剂达到饱和温度, 可

见引起 $T_1 > T_2 > T_3$ 的主要原因为主管路绝热效果较差。从表 1 还可看出三次试车 T_3 基本相同, 而 T_1 相差较大, 因此主容器液面高低对起动前推进剂入口温度的高低有直接影响。试车 C 推进剂加注量最大, 因此主容器液面越高对发动机入口产生的压力越大, T_1 处推进剂饱和温度也就最高。

表 1 某三次试车推进剂温度对比
Tab.1 Comparision of temperatures in three tests

推进剂温度	试车 A	试车 B	试车 C
$T_1/^\circ\text{C}$	-177.2	-178.8	-176.4
$T_2/^\circ\text{C}$	-179.9	-181.4	-179.3
$T_3/^\circ\text{C}$	-182.7	-182.9	-182.6

因此认为, 主管路绝热效果不佳导致管路中推进剂与外界换热量较大, 在试验系统存在较大高度差的情况下造成推进剂饱和温度较高。

3 方案选择与系统组成

3.1 方案选择

方案 I: 起动前使用起动容器预冷
在开车前预增压阶段, 首先对推进剂主容器增压, 然后关闭主管路断流阀, 改用推进剂起动容器预冷。由于起动容器液面与发动机入口高差较小, 入口温度会迅速下降至 -180°C 。但是当起动容器退出预冷后, 温度会在较短的时间内上升, 而在起动容器退出预冷后需要完成连通煤油主容器和起动容器、启动试车程序、推进剂起动容器预增压、推进剂主容器补增压等多项工作, 时间较长。因此该方案经过几次试车验证后, 效果并不理想, 且工艺过程复杂。

方案 II: 起动前进行推进剂强迫排放
发动机起动前将主管路及泵前管路中温度较高的推进剂排出, 快速补入主容器中温度相对较低的推进剂, 可以较快地降低推进剂入口温度。补入的推进剂由于温度较低, 与外界进行热交换, 达到饱和温度需要一定时间, 且此时所有开车前准备工作已经完成, 发动机可以立即起动, 因此可以满足起动前推进剂入口温度要求。该方案工艺过程简单, 经评估后选择为实施方案。

3.2 系统组成和工作原理

系统由一台 DN80 低温气动截止阀、低温补偿器、管路及管路附件等组成。工作原理如下：推进剂系统预增压完成后，开车前打开 DN80 低温气动截止阀进行推进剂强迫排放，将主管路及泵前管路中温度较高的推进剂快速排出外界。观察推进剂入口温度 T_1 和推进剂预冷回流温度降低情况，当 T_1 满足试验要求值后，关闭排放阀门，推进剂入口温度满足发动机起动条件。

3.3 总体布局

将原 DN40 泵前管路排液阀及其管路更换为 DN80。由于泵前管道位置的局限性，使用 DN80 低温截止阀，并将其与泵前管路的接口位置下移 1.4m，以尽可能多的使推进剂从阀门处排出。排放阀接口以下的推进剂及发动机内腔推进剂从发动机推进剂预冷回流管路排出。在阀门进出口安装补偿器，防止管路因预冷收缩而变形导致连接不可靠，并不影响发动机推力测量。

4 系统设计和理论计算

4.1 DN80 低温阀选择

原泵前排液阀为 DN40 低温气动球阀，系统改造后使用 DN80 低温阀。低温气动球阀体积过大，因此选择安装结构更加紧凑的 DN80 低温气动截止阀。该阀在设计过程中汲取了低温气动球阀设计的成功经验，并进行了常温和低温条件下的动作试验、密封性试验、寿命试验，试验结果表明阀工作性能良好，可满足使用要求。

4.2 DN80 管路设计

原系统在发动机预冷时，泵前推进剂排放经过 DN40 管路排放至试车台推进剂收集容器再排空。系统改造后采用 DN80 管路，推进剂直接排空，管路走向需要重新设计。经对现场分析，采用堵盖封堵原 DN40 法兰接口，并在反方向开孔对接 DN80 管路，水平引出后，经过直角弯沿发动机转接架轴向向上，再水平向外延伸至导流槽方向。考虑到管路预冷变形和不影响发动机推力测量，在阀门进口管路垂直段安装补偿器，在出口管路水平安装补偿器。同时，DN40 法兰封堵

后成为盲腔，从堵盖端面开孔引出排气管至 DN80 管路，防止泵前管路残存余气影响起动。

4.3 开车前工艺方法改进

随着排放的停止，发动机入口温度会在一定时间内回升，因此研究分析后认为，应在推进剂供应系统预增压完成，试车程序启动后进行强迫排放，直至入口温度满足要求。此时开车，推进剂温度会保持在 -180°C 以下，满足起动条件。

4.4 排放时间估算

排放时间估算如下：

(1) DN80 管路中推进剂流量计算

DN80 管道中流量按 (1) 式计算

$$q_m = \frac{1}{4} \pi d^2 \rho v \quad (1)$$

式中， q_m 为管道中流量， kg/s ； d 为管道直径， m ； ρ 为推进剂密度， kg/m^3 ； v 为管道中流速， m/s 。

DN80 管道中流速按 (2) 式计算

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \xi}} \quad (2)$$

式中， Δp 为阻力损失，预增压后泵前入口为 0.6MPa (绝)，DN80 管道出口压力为大气压，所以 $\Delta p = 0.6 - 0.1 = 0.5\text{MPa}$ ； ξ 为流阻系数。

流阻系数按下式计算

$$\xi = \left(1 + 0.707 \sqrt{1 - \frac{F_0}{F}} - \frac{F_0}{F} \right)^2 \times \left(\frac{F}{F_0} \right)^2 \quad (3)$$

式中， F_0 为 DN80 管道面积， m^2 ； F 为 DN300 管道面积， m^2 。

$$\frac{F_0}{F} = \beta^2 = \left(\frac{d}{D} \right)^2 = \left(\frac{0.08}{0.3} \right)^2 = 0.0711$$

$$\frac{F}{F_0} = \left(\frac{D}{d} \right)^2 = \left(\frac{0.3}{0.08} \right)^2 = 14.0625$$

代入数据得： $v = 9.21\text{m/s}$ ， $q_m = 52.8\text{kg/s}$

(2) 排放时间估算

将 DN300 管路中温度较高的推进剂全部排出所需要的时间为排放时间，按下式计算

$$t = \frac{\rho V}{q_m} \quad (4)$$

式中， t 为排放时间， s ； V 为 DN300 管道容积， $V = 2.88\text{m}^3$ 。

(下转第 60 页)

内耦合到电缆屏蔽层上的干扰电流增大为单点接地时的 4.58 倍，而耦合进电缆芯线的干扰电流强度下降了 77.3%，实验结论验证了这种接地方法的有效性。而后通过加入信号滤波器以及隔离模块等抗干扰措施，使得测试系统的热电偶数据采集通道的干扰强度有明显的下降，起到了提高整个系统抗干扰性的作用。最后提出了测试系统热电偶通路中其他抗干扰措施和一些注意事项。

参考文献：

[1] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究. 火箭推进[J]. 2006, 32(5): 24-31.

[2] Sun Jiping, Ma Fengying, Li Chen. Improved Complex Filter Applied in Enhancing EFT/B Immunity at a Coal Mine Monitoring Substation, Journal of China university of Mining & Technology[J]. 2008, 18(1): 22-26.
[3] 史银建, 袁春, 刘云鸽. 通信电缆屏蔽层 EMC 接地设计分析. 电力系统通信[J]. 2005, 26(157): 72-74.
[4] 白云同. 电磁骚扰滤波器设计与安装, EMC 认证与电磁兼容卷[J]. 2006, 13(3): 68-71.
[5] J Basilio Simoes, M C Rui, Silva. The optical coupling of analog signals, IEEE transactions on nuclear science [J]. 1996, 43(3): 1672-1674.

(编辑：马 杰)

(上接第 54 页)

将数据代入 (4) 式得： $t \approx 62s$ 。实际情况下，由于 DN80 管路没有冷透，管道中流量达不到 52.8kg/s，因此实际排放时间大于 62s。根据试车数据，排放时间为 90~120s。

5 试验验证

从某次试车开始采用上述工艺方法进行发动机预冷，保证发动机起动前推进剂入口温度满足要求。表 2 为改进后 5 次试车的实测数据。

表 2 改造后试车发动机起动前推进剂入口温度

Tab.2 Propellant inlet temperatures prior start with modified process

试车代号	I	II	III	IV	V
起动前入口温度/℃	-180.0	-181.5	-181.4	-180.6	-180.9

6 结束语

通过对试验系统的改造，采用推进剂强迫排放方式解决了发动机试车台试验系统长期存在的推进剂入口温度过高的问题，保证了发动机起动前入口温度满足试验要求，为发动机正常起动及提高发动机起动品质创造了良好条件。

参考文献：

[1] 华绍曾, 杨学林, 编译. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
[2] 耿文忠. 新型液体火箭发动机试车台起动试验系统方案设计[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 53-57.
[3] 王永忠, 王宁. 低温阀在液体火箭发动机试验中的应用[J]. 火箭推进, 2004, 30(1): 35-40.
[4] 王占林. 小流量推进剂系统低温试验技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2000(5): 37-39.

(编辑：陈红霞)