

发动机试验液氧贮箱放气系统动态特性研究

徐鸿鹏, 张志涛, 唐斌运, 刘涛, 董红兵

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要:在液氧/煤油火箭发动机地面试验中,为得到液氧贮箱放气系统放气流量与放气阀门动作的响应特性,从而控制箱压的下降速率,验证液氧煤油发动机在低入口压力条件下的工作适用性,对液氧贮箱放气系统的动态特性进行了研究。建立了液氧贮箱二维计算模型,结合试验数据,对低温贮箱内气枕空间的非稳态换热过程进行研究,确定放出气体温度以及相应状态。应用CFD的动网格技术,建立二维计算模型,对放气系统阀门的开关动态特性与过流流量特性进行综合分析,获得了不同通径放气管路的放气流量与箱压的计算关联式,基于理想气体状态方程,完善了箱压计算理论模型。应用该模型量化分析箱压下降速率,为计算箱压控制的准确时间节点提供了操作参考。

关键词:液氧贮箱;放气系统;动态特性;数值模拟;箱压控制

中图分类号:V434.3-34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2018)05-0071-06

Study on dynamic characteristics of gas-exhaust-system for liquid oxygen tank used for liquid rocket engine ground test

XU Hongpeng, ZHANG Zhitao, TANG Binyun, LIU Tao, DONG Hongbing

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

Abstract: The research on the dynamic characteristics of gas-exhaust-system was carried out for the ground test of the LOX/kerosene LRE to obtain the response characteristics of gas-exhaust flow and gas-exhaust valve of LOX tank, and verify the applicability of the LOX/kerosene LRE under a low inlet pressure condition, so as to control the pressure decreasing rate in the LOX tank. A 2-D calculation model for the LOX tank was established. In combination with test data, the unsteady heat transferring process of the ullage in the low-temperature tank was studied to define the temperature and state of the exhausted gas. The moving-grid approach of CFD was adopted to establish the 2D model, so that the dynamic and flow characteristics of the values were analyzed. Based on the ideal gas state equation, the calculating formulas of the gas flow and tank pressure were obtained while the tank pressure calculation model was refined. This model can be used to calculate the pressure decreasing rate in the tank, which can also provide a reference for calculation of the exact beginning time of the tank pressure control.

Keywords: liquid oxygen tank; gas-exhaust-system; dynamic characteristic; numerical simulation;

收稿日期:2017-06-20;修回日期:2017-12-08

基金项目:装发共用技术科研项目(51317040101)

作者简介:徐鸿鹏(1988—),男,工程师,研究领域为液体火箭发动机试验技术

0 引言

为验证液氧煤油发动机在低入口压力条件下的工作适应性,获取发动机可靠性裕度,需在地面试验中进行充分考核。低入口压力考核试验中发动机在额定入口压力下启动,缓慢降低贮箱箱压压力,完成低入口汽蚀考核任务,由于时间窗口较窄,因此需多试验系统的液氧低温贮箱放气降压动态特性进行研究,以获得压力下降的准确时间节点。

在液氧煤油火箭发动机地面点火试验中低温液氧贮箱由常温氮气进行增压,常温氮气进入低温贮箱后与低温液氧进行传热传质,是一个动态过程。国内多位学者对火箭的液氧低温贮箱内的温度分层^[1-2]以及自增压过程中气枕空间的传热传质特性进行了数值模拟研究^[3-7]。区别于箭上的低温贮箱,地面试验系统中气枕体积大、温度高,贮箱需利用放气阀门矩阵控制放气量来实现箱压下降速率的控制,其控制精度取决于放出气体状态以及放气阀门的动态响应与过流特性,文献[8-10]对液氧贮箱的增压过程以及影响因素进行了研究。文献[11]对液氮贮箱静置放气特性进行了研究,其放气过程流量及箱压的变化是一个非线性过程,运用传统的气体动理论方法计算得到气体放出流量存在较大误差。

本文对地面试验系统的液氧低温贮箱气枕空间的非稳态传热过程进行量化分析,得到放出气体的物性参数。在此基础上,应用 CFD 的动网格技术,对不同开启、关闭压力下放气阀门的动态响应与过流特性进行计算,得到的放出气体质量流量的计算关系式,完善低温贮箱箱压计算模型。本研究将为通过贮箱放气控制箱压下降速率的技术提供理论支撑,提升了现有试验系统低温推进剂变压力供给能力。

1 系统原理及计算方法

1.1 放气系统原理

现有试验系统包括 4 台 50 m³ 低温液氧贮箱,如图 1 示,每个容器引出 DN100 放气管,连接至 DN200 总放气管道,总放气管道上安装有一台

DN200 气动球阀。放气管道末端引出 DN40, DN80 两根旁通放气管道,管道上安装有相应通径的气动球阀,阀后管道汇入 DN200 排空管道。4 个容器引出测压管汇入集气管中,集气管上安装压力传感器,进行箱压的测量。试验过程中,使用 DN40, DN80 两台放气阀进行放气控制。

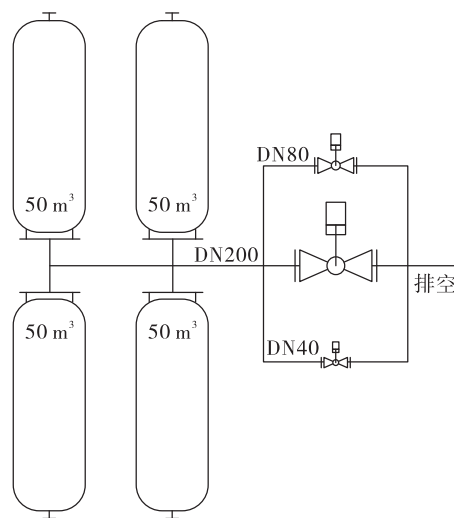


图 1 系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of the gas-exhaust-system

某次试验过程中仅使用 DN40 放气阀,进行了两次放气。第一次放气箱压为 0.53 MPa,单个容器气枕体积为 22 m³;放气为 14.7 s,液氧流量为 247 L/s;放气后箱压为 0.45 MPa。第二次放气箱压为 0.46 MPa,放气为 47 s;放气后箱压为 0.32 MPa。

1.2 低温贮箱换热计算模型

对于低温贮箱内气体换热特性的分析主要是为了研究氮气在低温贮箱内的温度分布以及冷却情况,确定放出气体温度、密度等物性。

文献[4]中建立了低温推进剂贮箱增压过程的传热传质一维数学模型,文献[7]使用 Fluent,建立二维模型,对火箭贮箱排液过程温度场进行了模拟计算。文献[6]中采用一维模型进行计算,液氧贮箱内的自由相界面采用 VOF 模型,对于液氧贮箱中的低温相变问题,依据双膜阻理论建立热质交换模型,解决液氧贮箱中的相变和因相变产生的热质交换问题。

参考以上相关文献的计算方法,结合本文系统实际状态。进行以下假设:1)计算容器增压完成后稳定状态,气、液相质量一定,与外界无传质过程;2)试验系统为真空粉末绝热容器,故壁面为绝热边界条件;3)考虑到部分液氧会发生气化,故选择mixture多项流模型,开启选择氮气理想气体作为气相,液氧作为液相工质。

使用商用软件Fluent,建立二维计算模型,采用非稳态二维轴对称N-S方程,Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,在对方程离散格式上,选用的是二阶迎风格式,近壁面采用非平衡壁面函数处理。开启能量方程,1/2轴对称模型如图2所示,容器高度与直接与实际相符,根据试验的实际液位,确定了液位高度,容器的壁面选择为绝热、无滑移壁面。气相温度为常温,300 K,液氧温度为90 K。

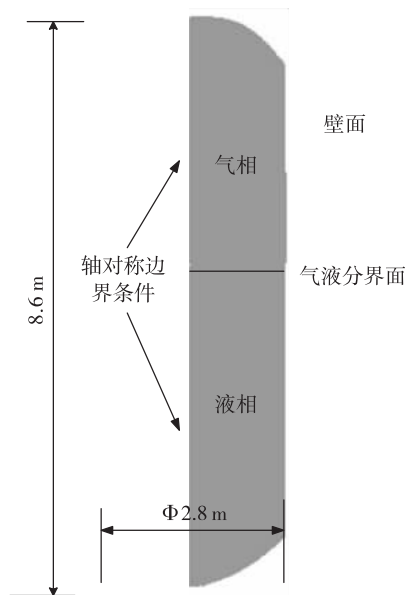


图2 贮箱内换热特性计算模型

Fig. 2 Computational model of heat transfer characteristic in the tank

1.3 阀门动态特性计算模型

为了模拟阀门打开、关闭的动态过程,采用商用软件Fluent中的动网格功能,将模拟阀门的网格边界设为动网格,通过UDF来控制其运动的方向和速度,使其在一定时间内相轴向运动来模拟阀门关闭。由于计算需要区域连续,阀门不能完全关闭,

网格运动到与壁面相距0.1 mm的位置后停止,这样的假设情况虽然与真实不完全相同,但是由于存在的缝隙已经足够小,可以近似认为阀门已关闭。由于实验系统真实结构较为复杂,对管路进行简化,采用如图3所示的二维轴对称简化模型,其中管路部分采用与真实实验相同的DN40与DN80,阀前及阀后各连接1 m的管道,最终通向DN200的主放气管,计算模型基本反映了试验系统的真实情况。图3中位置1和位置2分别为阀后区域和出口区域,本文着重研究了开阀和关阀动态过程中这两个位置的流量变化情况(图4)。

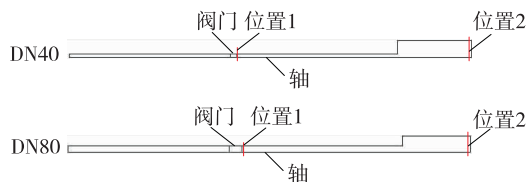


图3 阀门动态特性仿真模型

Fig. 3 Simulation model of valve dynamic characteristic

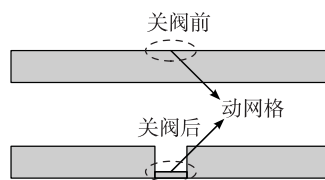


图4 动网格示意图

Fig. 4 Diagram of moving grids

计算中采用非稳态二维轴对称N-S方程,Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,近壁面采用非平衡壁面函数处理。在对方程离散格式上,选用的是二阶迎风格式。工质选择氮气理想气体,入口为压力入口,出口为压力出口,其余为绝热、无滑移壁面。

2 计算及仿真结果分析

2.1 低温贮箱内气体换热特性分析

对低温贮箱内静置的氮气温度分布情况进行分析,采用非稳态计算,考虑到在一般试验过程中,氮气充入容器内静置的时间不超过5 min,图5给出了300 s时容器内部温度 t_R 度的分布情况。

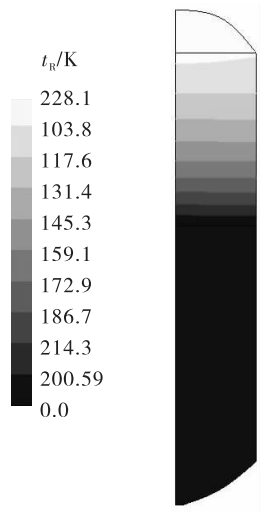


图 5 300 s 时容器内温度分布云图
Fig. 5 Contour of temperature distribution at 300 s

图 5 中可见,当时间达到 300 s,容器内氮气的体积平均温度约为 150 K。考虑到文献[4]、[6]内的计算条件与本文相似,工质均为液氧,气枕体积相近,初始条件相似,气枕在 160 s 时平均温度的对比如表 1 所示。说明本文计算方法可行,考虑到实际气枕空间内的气体是运动的,温度场分布应快速均匀化,由此确定放出气体的温度取 300 s 时刻温度为 150 K,该体积平均温度作为计算容器稳态放气过程以及阀门特性的气体温度。其他参数按照理想气体进行计算。

表 1 气枕平均温度对比			
Tab. 1 Contrast of ullage gas average temperature in tank			
	文献[6]	文献[4]	本文
容器高度/m	11	10	8.6
容器直径/m	3.35	2.8	2.8
气枕在 160 s 时 平均温度/K	180	200	200

2.2 放气阀动态特性分析

2.2.1 阀门开启特性分析

图 6 给出了 DN40 放气阀在 0.53 MPa 开启压力状态下,阀门开启过程中管道内的压力 p_g 随时间

t 的变化云图,在 10 ms 内整根管道内均实现了响应。阀前压力对流场的响应速度影响较小。试验过程中,气动打开 DN40, DN80 两台球阀的时间基本一致,故可认为在阀门开启过程中,管道内流体的响应速度基本一致。

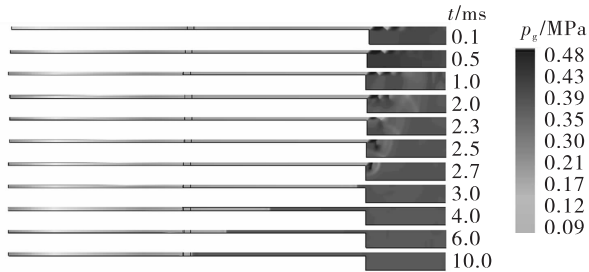


图 6 DN40 -0.53 MPa 开阀过程压力云图
Fig. 6 Pressure cloud chart of DN40 valve open
process at 0.53 MPa

计算得到了,在不同背压条件下 DN40, DN80 两台阀门开启过程,随着背压的增压,开启过程中阀前的流量存在小幅波动,流量基本呈现平滑增大,在 100 ms 基本达到稳定流动状态。

2.2.2 阀门关闭特性分析

考虑实际试验过程中的关阀过程,为减小水击,关闭时间设置为 1 s。对于关阀过程,初始 0.2 s 存在一个低压 0.2 MPa 的水击向前传递,0.4 s 即恢复,由于其压力较小,可忽略。

计算得到了,在不同背压条件下 DN40, DN80 两台阀门关闭过程中流量变化平缓,无明显的水击现象,对阀前的影响较小。

2.2.3 小结

综上所述,由阀门开启和关闭所产生的压力扰动主要影响阀后区域。开启过程中,管路内压力响应迅速,无明显水击。关闭过程,由于气体可压缩性较强,对阀前流场干扰不明显,可以忽略阀门关闭对前方管路的压力扰动,因此,在箱压计算建模时,可简化阀门动作过程对流量的影响。

3 箱压计算理论模型

通过仿真结果以及试验数据,得到了 DN40,

DN80 两个口径放气管道的稳态的放气特性,以及放气阀门的动态特性。由于阀门的响应速度较快(小于 0.1 s)且阀门的打开及关闭过程对阀前的影响较小,故应用该放气系统进行箱压控制具有可行性。

图 7 和图 8 给出了 DN40, DN80 两台放气阀门的质量流量随箱压的变化关系,图 7 和图 8 中实心点为计算数据,实线为采用多项式拟合得到的拟合曲线。

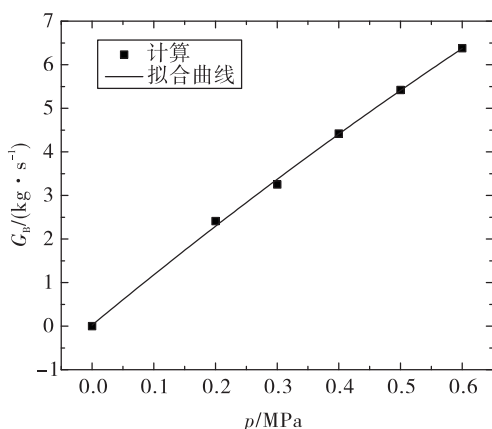


图 7 DN80 管道质量流量随箱压的变化关系

Fig. 7 Variation of mass flow in pipeline of DN80 valve with tank pressure

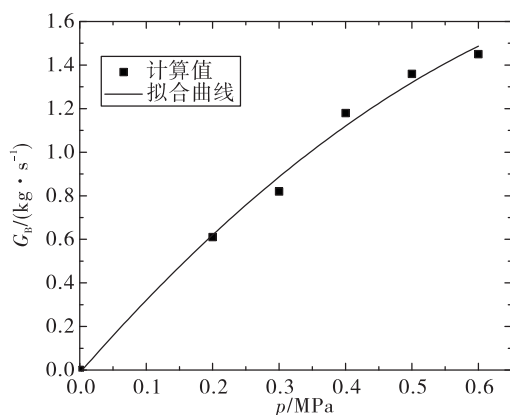


图 8 DN40 管道质量流量随箱压的变化关系

Fig. 8 Variation of mass flow in pipeline of DN40 valve with tank pressure

式(1)给出了 DN80 管道质量流量 G_B 与容器箱压 p 的拟合关系式:

$$G_B = 11.72p - 1.89p^2 + 0.02 \quad (1)$$

该拟合关系式与仿真数据的拟合相关系数为: 0.967。式(2)给出了 DN40 管道质量流量 G_B 与容器箱压 p 的拟合关系式:

$$G_B = 3.5p - 1.67p^2 - 0.013 \quad (2)$$

该拟合关系式与仿真数据的拟合相关系数为: 0.987。应用传统气体动力学理论,建立箱压计算模型,如图 9 所示,将氮气假设为理想气体,可按式(3)计算得到:

$$p_2 = \frac{p_1 \frac{V_1}{\Delta t} - G_B RT}{Q_y + \frac{V_1}{\Delta t}} \quad (3)$$

式中: p_1 为容器内的初始压力, Pa; p_2 为容器内的压力, Pa; V_1, V_2 为体积, m^3 ; G_B 为氮气的放气质量流量, kg/s ; Q_y 为液氧的体积流量, m^3/s ; Δt 为时间, s。

由此可知,在已知目标压力,初始气垫量,使用容器数目的情况下,可以计算得到所需理论放气质量流量。结合计算得到的 DN40, DN80 口径放气阀的理论放气质量流量,通过时序综合控制 DN40, DN80 两台阀门的开闭,可以将系统放气体流量调整至所需值。

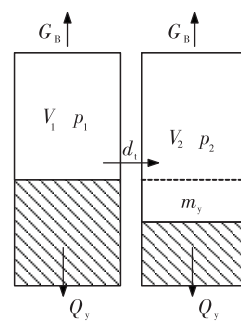


图 9 放气过程箱压计算模型

Fig. 9 Computational models of tank pressure in gas-exhaust process

图 10 给出了某次试验过程中的箱压数据与该方程计算得到是数据的比对结果。图 10 中可见,二者匹配良好,说明该表达式能够较为准确的反映容器的箱压变化情况。

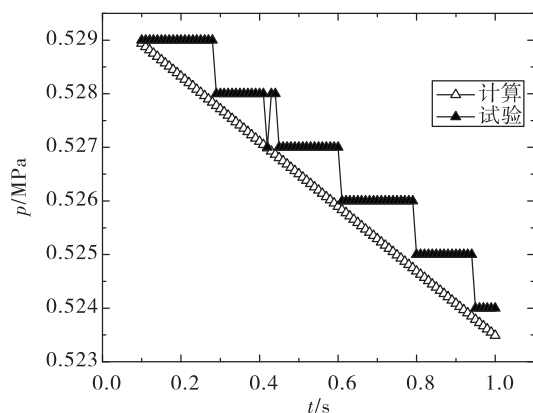


图 10 计算与实际放气过程箱压下降曲线

Fig. 10 Actual and computation curves of tank pressure drop in gas – exhaust process

4 结论

通过对液氧煤油发动机地面试验系统的低温贮箱放气系统动态特性进行研究,得到了以下几点结论:

1) 增压气体进入低温贮箱后,与低温液氧快速换热,当氮气温度降低到 150 K,温度下降速度逐渐平缓,可认为该温度为容器放出气体的平均温度。

2) 通过对放气阀门的动态特性分析可知,放气过程系统响应迅速,流量快速达到稳定状态,阀门开闭过程对阀前压力影响较小,阀门动作开闭将不影响低温贮箱箱压的稳定性,可以用于试验过程的箱压控制。

3) 基于理想气体状态方程以及仿真得到的流量压力关系式,得到的箱压控制模型能够准确描述放气过程中的箱压变化规律,该模型的应用将为获得箱压控制的准确时间节点计算提供操作参考。

参考文献:

- [1] 程向华,厉彦忠,陈二峰,等. 新型运载火箭射前预冷液氧贮箱热分层的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2008,42(9):1133–1136.
- [2] 程向华,厉彦忠,陈二峰. 火箭液氧贮箱热分层现象数值模拟[J]. 低温工程,2008(2):10–13.
- [3] 王磊,厉彦忠,李翠,等. 液体火箭贮箱增压排液过程三种气枕模型的数值对比[J]. 航空动力学报,2011,26(9):1996–2001.
- [4] 王赞社,顾兆林,冯诗愚,等. 低温推进剂贮箱增压过程的传热传质数学模拟[J]. 低温工程,2007(6):29–37.
- [5] 陈阳,高芳,张振鹏. 低温推进剂贮箱增压系统分布参数数值仿真与贮箱的有限体积模型[J]. 航空动力学报, 2008,23(2):323–328.
- [6] 尚存存,尚锐,王文. 液氧贮箱增压过程中气枕空间温度场的数值模拟[J]. 低温工程,2011(6):47–65.
- [7] 王磊,厉彦忠,李翠,等. 液体火箭贮箱增压排液过程温度场数值研究[J]. 航空动力学报,2011,26(8):1893–1899.
- [8] 范瑞祥,田玉蓉,黄兵. 新一代运载火箭增压技术研究[J]. 火箭推进,2012,38(4):10–46.
FAN Ruixiang, TIAN Yurong, HUANG Bing. Study on pressurization of new generation launch vehicle [J]. Journal of rocket propulsion, 2012,38(4): 10–46.
- [9] 穆朋刚,童飞,蒲光荣,等. 温度对贮箱增压系统的影响分析[J]. 火箭推进,2015,41(4):74–78.
MU Penggang, TONG Fei, PU Guangrong, et al. Influence of temperature on tank pressurization system [J]. Journal of rocket propulsion, 2015,41(4): 74–78.
- [10] 王赞社,顾兆林,赵红轩,王广飙. 低温贮箱多路管道增压的一种模糊算法研究[J]. 火箭推进,2008,34(2):7–12.
WANG Zanshe, GU Zhaolin, ZHAO Hongxuan, et al. Research on fuzzy control algorithm of cryogenic propellant – tank pressurization [J]. Journal of rocket propulsion, 2008,34(2): 7–12.
- [11] 周振君,雷刚,王天祥,等. 低温液氮贮箱静置增压及放气特性分析[J]. 低温技术,2015,43(12):9–12.

(编辑:马 杰)