

液氧/煤油发动机起动箱仿真与试验研究

黄其殷, 王辛果, 刘 上, 李妙婷
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 起动箱是保证液氧/煤油发动机可靠起动的重要组件。针对起动箱结构特点, 采用胶囊材料 Mooney-Revlin 本构关系, 建立起动箱三维模型, 分析起动箱动作特性。仿真结果再现了起动箱工作过程, 获得胶囊翻转压力为 58 kPa。抽真空试验和计算表明, 胶囊压力为 50~60kPa 时起动箱胶囊可自动复位, 仿真结果与试验结果基本吻合。

关键词: 液氧/煤油发动机; 起动箱; 工作特性

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 03-0021-06

Simulation and test study on starting box of LOX/kerosene rocket engine

HUANG Qi-yin, WANG Xing-guo, LIU Shang, LI Miao-ting
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The starting box is an important component for the stable and reliable starting of LOX/kerosene rocket engine. The operational characteristics of the starting box are analyzed by Mooney-Revlin model of bladder material and 3D model of the starting box. The operational process of the starting box was reoccurred by means of simulation result. The reversing pressure (58 kPa) of the rubber bladder was obtained. The vacuum test and calculation show that the bladder will return to its original position automatically under the pressure of 50~60 kPa. The predicted values are agree with the measured ones.

Keywords: LOX/kerosene rocket engine; starting box; operational characteristic

0 引言

起动箱是推进剂供应系统的挤压-隔离装置。发动机在起动前, 起动箱液腔内填充煤油; 点火时刻, 高压气体通过气腔作用在胶囊上, 使胶囊翻转, 将不含气体的煤油供入发动

机起动系统^[1-2]。

地面试车时, 在煤油加注前, 需在起动箱气腔入口连接软管, 对其充气挤压胶囊, 使其反转, 将液腔体积降至最小 (操作过程简称起动箱复位, 此时胶囊位置状态简称复位状态), 然后随发动机燃料系统一起进行抽真空, 真空度满足

收稿日期: 2014-12-03; 修回日期: 2015-01-22

基金项目: 国家 863 项目(2012AA702302)

作者简介: 黄其殷 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机总体设计

要求后填充煤油。由于火箭内空间有限，操作不便，因此，为取消起动箱复位、简化发射流程，研究胶囊复位机理就显得非常必要。

1 起动箱结构组成及工作状态

起动箱结构如图 1 所示，主要由球壳、接管嘴、管路及胶囊等组成；胶囊将内腔分隔为液腔和气腔，隔离两种介质。图 1 所示胶囊位置处于复位状态。起动箱在发动机上装配时，气腔气体入口连通大气，通过煤油入口燃料充填单向阀小孔抽真空，液腔真空度达到要求值 2.7 kPa 时，胶囊两侧压差一般不小于 90 kPa。如取消起动箱复位操作，需确认起动箱胶囊能否自动翻转至复位状态。

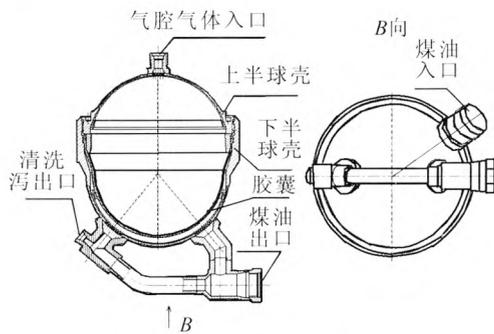


图 1 起动箱结构图

Fig. 1 Configuration of starting box

2 材料试验与建模

2.1 橡胶控制方程

橡胶为超弹性材料，最大伸长量可达 400% 甚至 1000%，应变-应力关系具有很强的非线性特征，因此除非在小应变范围，一般不采用公称材料定义杨式模量。在分析超弹性材料时一般采用应变能函数来描述其本构关系。本文采用 Mooney-Rivlin 本构方程定义橡胶本构方程。

Rivlin 理论假设材料不可压缩且在变形前是各向同性，应变能函数时应变不变量的函数，即

$$W=W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

式中：

$$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2$$

$$I_2=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_2^2\lambda_3^2+\lambda_3^2\lambda_1^2 \quad (2)$$

$$I_3=\lambda_1\lambda_2\lambda_3$$

其中， $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为主伸长率。由于材料不可压缩，因此第三不变量为零。橡胶 Mooney-Rivlin 本构方程为

$$W=C_1(I_1-3)+C_2(I_2-3) \quad (3)$$

式中 C_1 和 C_2 均为正定常数。对于大多数橡胶而言，在应变 150% 以内可得合理的近似^[3-4]。从起动箱结构可看到，壳体对胶囊起限位作用，起动箱应变不会大于 100%，因此，在仿真时选用 Mooney-Rivlin 本构模型应可获得较好结果^[5]，Nastran 中可通过单向拉伸曲线定义自动计算参数 C_1 和 C_2 。

2.2 胶囊试件拉伸试验

胶囊由 5401 胶料制成，强度高、耐高低温，与煤油具有良好相容性，长期浸泡煤油可保持良好性能。按标准 GB/T528-2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定》生产 1 型哑铃状胶囊试件进行拉伸试验。试验结果见图 2。

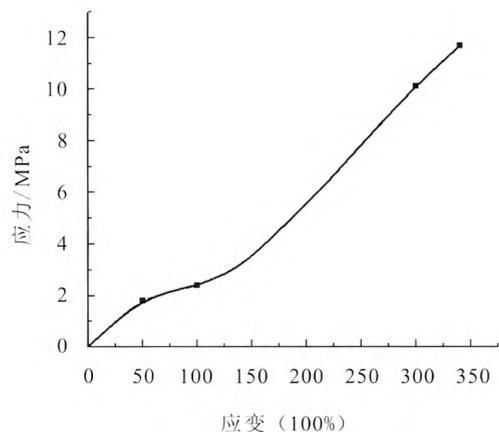


图 2 材料拉伸试验数据

Fig. 2 Data from material tensile test

2.3 建模

起动箱球壳材料为高强不锈钢，弹性模量 210 GPa，胶囊材料是橡胶，一般弹性模量仅为 0.007 8 GPa 左右，两者差别很大，且在充气、抽真空时压力最大仅为 100 kPa。因此，在分析胶囊的工作特性时，将起动箱球壳简化为钢体，

忽略管路、接头等钢制零件, 只考虑胶囊的变形水平。

采用六面体单元建立起动箱胶囊, 壳体定义为刚体, 在胶囊与球壳之间定义接触, 胶囊定义自接触, 忽略接触体之间摩擦力。模型见图 3。

仿真计算两个载荷步, 载荷步 1: 在胶囊表面 (与液腔接触侧) 施加最大压强 100 kPa, 模拟起动箱液腔充气, 并将胶囊作用至非复位状态, 为下个载荷步计算做准备; 载荷步 2: 在胶囊表面 (与气腔接触侧) 施加最大压强 100 kPa, 模拟抽真空过程气腔与液腔之间压差变化, 考核胶囊在压差下能否复位并获得复位压差。

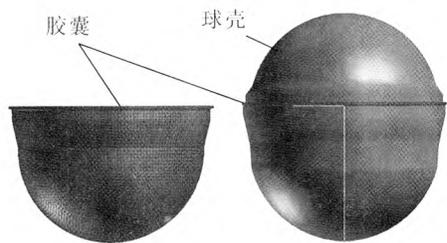


图 3 起动箱模型

Fig. 3 Model of starting box

3 仿真结果与分析

3.1 载荷步 1

起动箱胶囊顶部 55699 号节点变形随压力的变化见图 4。压力在约 13 kPa 时开始发生变形, 压力达到约 20 kPa 时, 变形达 202 mm 并维持不变, 此时, 胶囊与球壳发生接触并被球壳限位。压力 13 kPa 时, 变形云图见图 5, 胶囊 5 个部位往内凹陷。压力为 20 kPa 时胶囊变形云图见图 6, 胶囊变形至半球状, 说明起动箱液腔压力为 20 kPa 时, 可保证起动箱胶囊发生翻转。

3.2 载荷步 2

起动箱胶囊顶部 55699 号节点变形随压力的变化见图 7。压力约 50 kPa 时, 胶囊开始变形, 压力达到 58 kPa 时, 胶囊变形基本恢复至 0, 处于复位状态, 此时, 胶囊与壳体发生接触并限位。压力 50 kPa 时的变形云图见图 8, 此时胶囊六个位置首先发生内凹, 形状近似六边形。压力 58 kPa 时, 胶囊已处于复位状态, 变形云图见图

9。仿真结果表明, 假设大气压为 100 kPa, 当起动箱液腔抽真空至 42 kPa 时, 胶囊可自动复位。

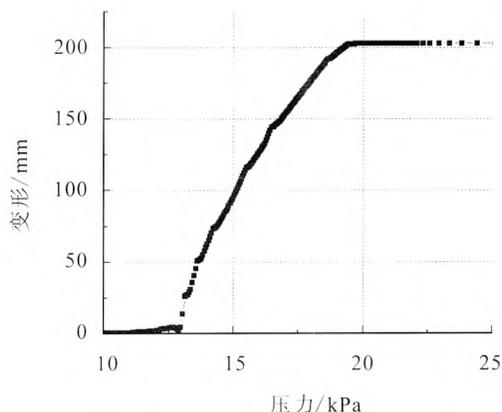


图 4 节点 55699 变形随压力变化曲线

Fig. 4 Variation of node 55699 displacement with pressure

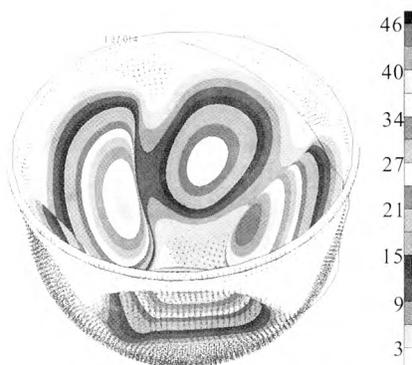


图 5 压力 13 kPa 胶囊变形

Fig. 5 Bladder distortion at 13 kPa

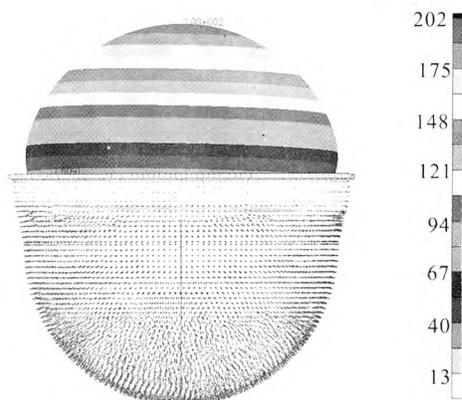


图 6 压力 20 kPa 胶囊变形

Fig. 6 bladder distortion at 20 kPa

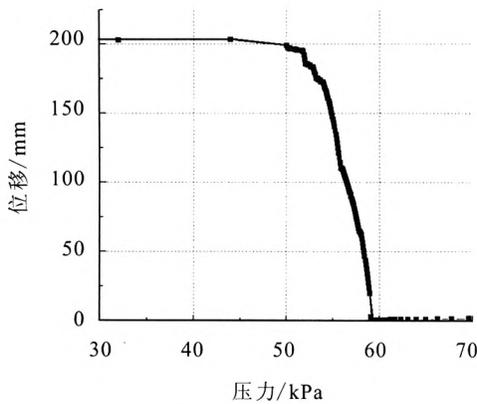


图7 节点 55699 变形曲线

Fig. 7 Variation of node 55699 displacement with pressure

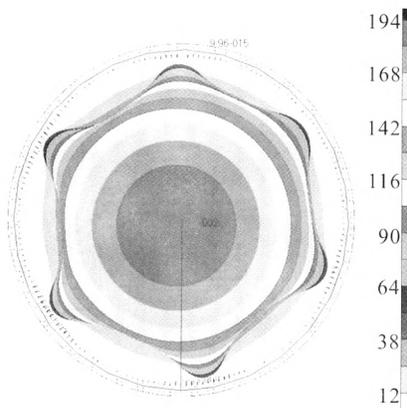


图8 压力 50 kPa 胶囊变形云图

Fig. 8 Bladder distortion at 50 kPa

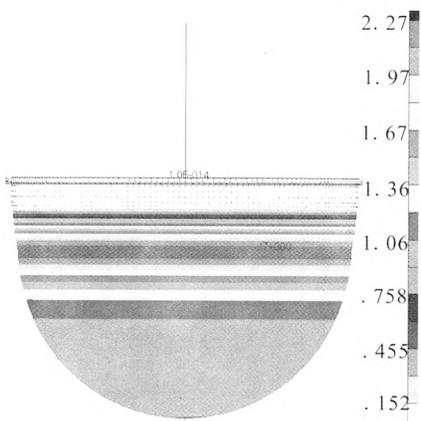


图9 压力 58 kPa 胶囊变形云图

Fig. 9 Bladder distortion at 58 kPa

4 起动箱抽真空试验

4.1 整机抽真空试验

试验系统简图见图 10。在起动箱液腔安装真空传感器，在真空泵入口安装真空传感器。

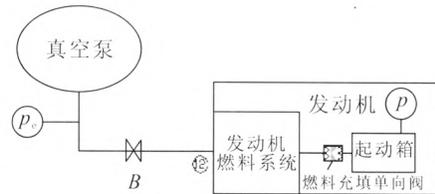


图 10 抽真空系统图

Fig. 10 Architecture of vacuum system for test

复位状态起动箱液腔压力 (p)、非复位状态起动箱压力 ($p-f$) 及发动机燃料系统压力 (p_e) 随抽真空时间的变化曲线见图 11。从图中可以看到，抽真空开始时，环境压力约 95 kPa；起动箱处于复位状态时，起动箱液腔压力 (p) 与抽真空设备前压力 (p_e) 跟随性良好。这是由于起动箱液腔体积较小，其抽真空速度与发动机燃料系统抽真空速度相当，350 s 左右起动箱内真空度达到要求。

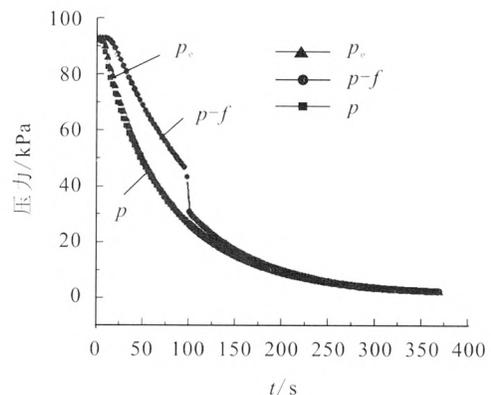


图 11 抽真空试验压力曲线

Fig. 11 Pressure curves of vacuum test

起动箱非复位状态时，从 0~100 s 起动箱液腔压力 ($p-f$) 滞后于发动机燃料系统压力 (p_e)。在约 100~101 s 期间，起动箱液腔压力迅速下降，在 200 s 后，二者压力基本相同。约 350 s 左右起动箱内真空度达到要求。

分析认为, 100 s 前, 处于非复位状态起动箱液腔体积较大, 通过起动箱入口燃料充填单向阀小孔对起动箱液腔抽真空速度较发动机燃料系统慢, 当抽真空至 100 s 时, 起动箱液腔压力降至约 48 kPa, 气囊气液两侧压差约 47 kPa, 在压差作用下, 气囊自动复位, 将液腔内剩余气体挤出, 液腔内气体减少, 液腔压力接近发动机燃料系统。

4.2 抽真空计算

为进一步分析起动箱非复位状态整机抽真空试验时起动箱压力迅速下降原因, 对起动箱非复位状态抽真空过程进行计算。

4.2.1 计算模型

质量方程:

$$\frac{dm}{dt} = -q_m \quad (4)$$

$$q_m = \begin{cases} \frac{\mu AP}{\sqrt{RT}} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \dots \frac{P_c}{P} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\mu AP}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_c}{P}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_c}{P}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]}, \dots \frac{P_c}{P} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (5)$$

能量方程 (假设绝热过程)

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{q_m T}{m} (k-1) \quad (6)$$

状态方程

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT}{V} \frac{dm}{dt} + \frac{mR}{V} \frac{dT}{dt} = -\frac{kRT}{V} q_m \quad (7)$$

式中: q_m 为液体流量; R , T , k 和 μ 分别为燃气气体常数、温度、绝热指数和流阻系数。

4.2.2 计算条件

假设真空泵入口真空度与发动机燃料系统真空度相同, 起动箱内气体通过燃料填充单向阀 $\Phi 0.5$ 小孔抽出。计算两种状态, 状态 1: 起动箱气囊位置在抽真空过程不发生变化。状态 2: 起动箱气囊在 140 s 发生复位, 体积突然减小至 0.1 L。

4.2.3 计算结果

状态 1 起动箱压力 p 计算值、试验值与发动机燃料系统压力 p_c 与抽真空时间关系对比见图

12, 若气囊在抽真空过程没有复位, 在 140 s 后, 起动箱液腔压力 p 与试验结果差别很大, 真空度到达要求需大约 700 s。

状态 2 起动箱压力 p 计算值、试验值与发动机燃料系统试验压力 p_c 与抽真空时间关系对比见图 13。140 s 气囊复位, 起动箱液腔气体迅速减小至 0.1 L 时, 起动箱压力计算值与试验值基本吻合, 由此验证了在压差下起动箱气囊可自动复位。

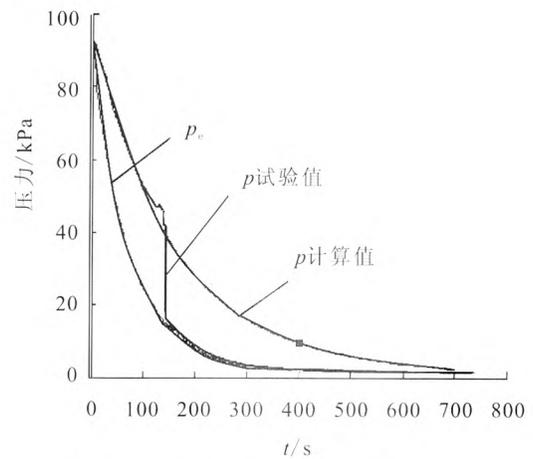


图 12 状态 1 计算结果与试验结果对比

Fig. 12 Comparison between simulation and test results of state 1

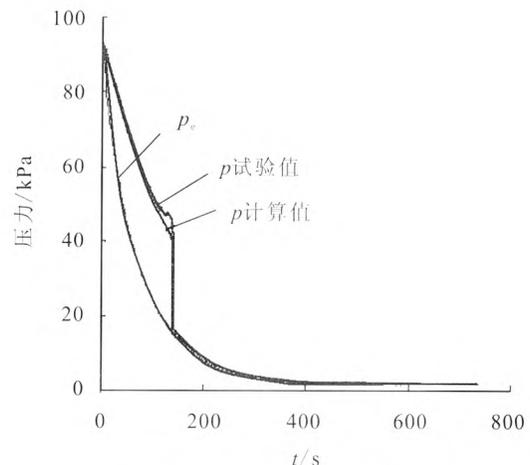


图 13 状态 2 计算结果与试验结果对比

Fig. 13 Comparison between simulation and test results of state 2

4.3 起动箱抽真空试验

为更加直接观察起动箱抽真空过程气囊自动

复位现象, 拆除起动箱气腔球壳, 在起动箱煤油入口安装燃料充填单向阀, 封堵起动箱煤油出口和煤油清洗泄出口, 从燃料充填单向阀对起动箱进行抽真空试验。试验中, 观察到起动箱液腔压力约 50~60 kPa 时, 胶囊自动复位, 并与液腔球壳紧密贴合, 与仿真计算结果 42 kPa 基本吻合。

5 结论

针对液氧/煤油发动机起动箱, 采用胶囊试件拉伸试验获得材料力学性能。通过仿真计算与试验对起动箱进行研究, 得到以下结论:

1) 仿真计算表明, 复位状态时, 当胶囊液气两侧压差约 20 kPa 时, 起动箱胶囊从液腔翻转至气腔; 非复位状态时, 当胶囊气液压差为 58 kPa 时, 起动箱自动复位。

2) 整机抽真空试验与计算表明, 起动箱复位状态, 起动箱液腔真空度与整机真空度基本一致; 非复位状态, 抽真空 100 s 前, 起动箱液腔真空度滞后于发动机真空度。当胶囊气液两侧压差为 45 kPa 时, 液腔内压力迅速下降, 胶囊发生快速翻转, 并在压差为 60 kPa 时, 起动箱真空度与发动机真空度基本相同, 胶囊复位完成。通过起动箱抽真空试验, 直接观察到起动箱自动复位过程, 液腔压力约 50~60 kPa 时, 起动箱自动完成复位。

3) 仿真结果与试验结果基本相同, 均表明

发动机燃料系统抽真空可使起动箱胶囊自动复位。因此, 可取消起动箱复位手动操作, 简化火箭发射流程。

参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧/煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 李妙婷. 发动机起动箱的研制[J]. 火箭推进, 2003, 29(5): 13-16.
LI Miao-ting. Development of rocket engine starting box [J]. Journal of rocket propulsion, 2003, 29(5):13-16.
- [3] 常洁, 陈同祥. 航天器中一种典型 O 形密封圈的有限元分析[J]. 航天器工程, 2008, 17(4): 104-108.
- [4] 陈红火. Marc 有限元室里分析教程[M]. 机械工业出版社, 2002.
- [5] 肖锋, 谌勇, 孙靖雅, 等. 超弹性橡胶材料分层圆孔蜂窝防护覆盖层动态压缩行为及性能研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 13-20.
- [6] 朱艳峰, 刘锋, 黄小清, 等. 橡胶材料的本构模型[J]. 橡胶工业, 2006 (2): 119-125.
- [7] 殷闻, 靳晓雄, 全光. 两种常用橡胶本构模型的有限元分析及其仿真[J]. 上海电机学院学报, 2010(4): 215-218.
- [8] 罗文波, 谭江华. 橡胶弹性材料的一种混合本构模型[J]. 固体力学学报, 2008 (3): 277-281.
- [9] 郑明军, 王文静, 陈政南, 吴利军. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业, 2003 (8): 462-465.
- [10] 李晓芳, 杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 弹性体, 2005 (1): 50-58.

(编辑: 王建喜)