

文章编号: 1001-2486(2003)03-0001-05

低温推进剂供应管道系统充填过程的动力学模型^{*}

刘 昆, 程谋森, 张育林

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 研究了低温推进剂液体火箭发动机供应管道系统充填过程的建模问题。低温推进剂的充填相变过程采用均相模型, 对推进剂充填管道系统进行有限元分割, 应用基本守恒定律于充满推进剂的单元和充满气体的单元, 两相单元采用等效流容方程, 建立了低温推进剂管道充填过程的有限元状态变量模型。充填的容腔视为两相单元, 建立了其动力学模型。利用本文的模型, 对液氢、液氧推进剂的管道充填过程进行了仿真计算, 给出了有关计算结果。

关键词: 液氢液氧发动机; 推进剂供应管道; 充填过程; 动力学模型

中图分类号: V421 文献标识码: A

Dynamic Model of Priming Processes of Cryogenic Propellant Feed Lines

LIU Kun, CHENG Mousen, ZHANG Yulin

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The priming process of feed lines of cryogenic propellant liquid rocket engines was studied. The two-phase flow of cryogenic propellant priming process was treated homogeneously as pseudo-fluid with average properties. A feed pipe was divided into uniform finite elements. By applying the basic conservation laws to the elements filled with propellant or purge gas, and employing the equivalent flow-capacitance equation to deal with the two-phase element, the finite element state-variable model for the priming process of the cryogenic propellant feed pipe was developed. By treating vessel as two-phase element, we also obtained the equations of its priming process. Using our models, the processes of LH₂ and LOX priming a pipe were calculated respectively. The calculation results are given.

Key words: LH₂/LOX rocket engines; propellant feed pipes; priming processes; dynamic model

对低温推进剂的充填过程, 有代表性的工作是文献[1, 2]。文献[1]采用均相模型, 并假设充填推进剂与保护气体有明确的分界面, 使用特征线计算模型, 对气液两相流的相变过程通过流动起泡传热起始点、最大泡核沸腾传热点和膜态沸腾传热起始点三个特征点的驱动温差来判断和进行相应的计算处理。文献[2]采用分相模型, 用有限元方法建立模型方程, 考虑了管壁对气相、液相的传热, 以及气、液相之间的传质、传热, 模型十分复杂。作者在文献[3]中研究了氢氧液体推进剂供应管路预冷充填过程瞬变流的特征线计算方法, 建立了涵盖主要传热工况的管壁与流体之间的传热模型; 在文献[4]中研究了常温推进剂液体火箭发动机充填过程的建模问题, 建立了常温推进剂管道系统充填过程的有限元状态变量模型。本文基于流体介质有限控制体积守恒方程建立低温推进剂供应管道系统的充填过程的有限元状态变量模型, 该模型适合于低温推进剂液体火箭发动机系统的模块化建模与仿真^[5]。

1 低温推进剂管道充填过程

采用均相模型来建立低温推进剂单管道充填过程的分段集中参数有限元状态变量模型, 并针对泵后充填过程的特点, 对充填过程推进剂均相流物性计算、相变过程及其对应的对流换热计算做一定的简化。

* 收稿日期: 2002-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(50206026)

作者简介: 刘昆(1965—), 男, 副教授, 博士。

1.1 非充填单元方程

对低温推进剂的充填过程,需要对所有单元同时建立质量、动量、能量守恒方程,还要加上管壁释热控制方程。管道的单元分割形式及其变量含义同文献[4]。基于流体介质有限控制体积守恒方程建立的有限元状态变量方程如下:

质量守恒方程:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{1}{\Delta V_i}(\rho_i^{\text{in}} u_i A_i - \rho_i^{\text{ex}} u_{i+1} A_{i+1}), \quad i \in \{0, 1, \dots, n-1\} \text{ 且 } i \neq k-1 \quad (1)$$

能量守恒方程:

对液体单元:

$$\frac{d(\rho e)_i}{dt} = \frac{1}{\Delta V_i}[(\rho e + p)_i^{\text{in}} u_i A_i - (\rho e + p)_i^{\text{ex}} u_{i+1} A_{i+1}] + \frac{4q_i}{D_i}, \quad 0 \leq i < k \quad (2)$$

对气体单元:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{\gamma}{\Delta V_i}(p_i^{\text{in}} u_i A_i - p_i^{\text{ex}} u_{i+1} A_{i+1}) + \frac{4(\gamma-1)q_i}{D_i}, \quad k < i < n \quad (3)$$

对方程(2),需要利用内能热力状态方程来导出压力方程。采用内能的如下形式的热力状态方程:

$$e = e(p, \rho) \quad (4)$$

则

$$\frac{d(\rho e)}{dt} = \rho \frac{\partial e}{\partial p} \cdot \frac{dp}{dt} + \left[e + \rho \frac{\partial e}{\partial \rho} \right] \frac{d\rho}{dt} \quad (5)$$

记 $e'_p = \rho \frac{\partial e}{\partial p}$, $e'_\rho = e + \rho \frac{\partial e}{\partial \rho}$, 将(5)式代入(2)式,整理后得:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{1}{\Delta V_i e'_\rho} [(\rho e + p)_i^{\text{in}} u_i A_i - (\rho e + p)_i^{\text{ex}} u_{i+1} A_{i+1}] + \frac{4q_i}{D_i} - \frac{e'_\rho}{e'_\rho} \cdot \frac{d\rho_i}{dt} \quad (6)$$

对单元速度,考虑到变截面管道的一般情况,对前面已充满液体的($k-1$)个单元和后面未充填的气体单元,有

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{0.5(\Delta V_{i-1} \rho_{i-1} + \Delta V_i \rho)} [(p_{i-1} A_{i-1} - p_i A_i) + 0.5(p_{i-1} + p_i)(A_i - A_{i-1})] - \frac{f_i}{2D_i} u_i |u_i| \quad (7)$$

$i \in \{0, 1, \dots, n\}$, 且 $i \neq k-1, k$

1.2 充填单元方程

对低温推进剂的充填单元的方程形式同文献[4]。对低温推进剂,由于存在两相流,充填单元中推进剂混合流的波速是变化的,按下面的方法来求解。单元的充填过程很快,可近似认为单元中的推进剂温度不变,则

$$a_l = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T} \quad (8)$$

根据 Maxwell 关系: $\left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$, $\left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$, 有

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T = \frac{- \left(\frac{\partial T}{\partial \rho} \right)_p}{\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v} = - \frac{\left(\frac{\partial e}{\partial \rho} \right)_p}{\left(\frac{\partial e}{\partial p} \right)_v} \quad (9)$$

计算时,假定充填单元中推进剂混合流的密度 ρ_i 总是等于上一单元中推进剂混合流的密度,即 $\rho = \rho_{k-2}$ 。

1.3 传热计算方程

基于以下原因:(1)按照 Leiden-Frost 关系式确定的液氧膜态沸腾的最低壁温低于 154.5K,液氢膜态

沸腾的最低壁温低于 32.5K, 要使管壁温度从室温降至该温度, 需要一定的时间(仿真计算表明, 对 1.5mm 的管壁, 液氢约需 4s, 液氧约需 2s), 而这时, 泵后的充填过程已从自由充填转为强迫充填过程, 泵后的出口压力已大于低温推进剂的临界压力; (2) 对常用的管壁材料, 温度越低, 比热容越小, 也就是说, 管壁温度从最低膜态沸腾温度到流动起泡温度的过渡过程是一个越来越快的短暂过程, 在这一短暂过程中, 利用单相液态低温推进剂的对流换热公式来计算管壁与气、液两相流低温推进剂的对流换热所造成的误差对泵后大流量的低温推进剂的流动瞬变特性的影响是不大的。因此, 在下面的传热计算中, 我们只考虑膜态沸腾传热和单相液体推进剂对流传热两种工况。

对推进剂和气体, 其对流换热密度可以写成下面统一的形式^[1]:

$$q \approx \xi \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \frac{\kappa}{D} (T_w - T_f) \quad (10)$$

式中: T_w 为壁面温度; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特常数; D 为水力直径; κ 为导热系数; T_f 为流体温度, 对气体, 取气流的整体温度, 对推进剂, 当压力大于临界压力时, 取推进剂的整体温度, 当压力小于或等于临界压力时, 取当地压力下的饱和温度; ξ 为常数, 对氢 $\xi = 0.021$, 对其它介质 $\xi = 0.023$ 。

推进剂的 Re、Pr、 κ 的定性参数如下:

- (1) $p > p_{cr}$ 时, 用推进剂的整体温度、密度定性;
- (2) 当 $p \leq p_{cr}$ 且 $T_w \geq T_L$ 时, 用当地压力下的饱和温度和饱和蒸汽密度定性;
- (3) 当 $p \leq p_{cr}$ 且 $T_w < T_L$ 时, 用当地压力下的饱和温度和推进剂的整体密度定性。

其中 T_L 为推进剂膜态沸腾的最低壁温, 由下式决定^[1]:

$$T_L = \left[0.87 + 0.13 \cdot \frac{p}{p_{cr}} \right] T_{cr} \quad (11)$$

式中, p_{cr} 、 T_{cr} 分别为推进剂的临界压力与温度。

1.4 管壁释热控制方程

采用和管流状态单元相同的有限元分割, 则管壁单元的释热控制方程为

$$\frac{dT_{w_i}}{dt} = - \frac{q_{\text{放}} S_i}{c_w m_i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (12)$$

式中, T_{w_i} 、 S_i 、 m_i 分别为第 i 单元的管壁温度、内表面积和管壁质量, c_w 为管壁材料的比热容。

2 容腔的充填与吹除过程

低温推进剂容腔的充填与吹除方程的建立过程同文献[4]。只是方程中 ρ 取液体端口流入容腔的液体密度的算术平均值, 如果液体端口都是从容腔流出液体, 则容腔中的液体密度保持不变。声速 a_l 是变化的, 按方程(8)计算。

此外, 对低温推进剂容腔的充填(吹除)过程, 如要考虑容腔壁的温度变化过程, 采用平均壁温, 按等效集中质量来建立其释热控制方程:

$$\frac{dT_w}{dt} = - \frac{Q_{\text{放}}}{c_w M_w} \quad (13)$$

容腔壁面传给流体的热流量 $Q_{\text{放}}$ 确定如下:

$$Q_{\text{放}} = \phi \cdot \Delta S_1 \cdot q_{\text{放}} + (1 - \phi) \cdot \Delta S_1 \cdot q_{\text{保}} \quad (14)$$

式中, $\phi = \frac{V_l}{V_{ol}}$ 为充填单元中推进剂所占体积份额, ΔS_1 为容腔的内表面积, $q_{\text{放}}$ 为容腔内推进剂的对流换热密度, $q_{\text{保}}$ 为容腔内保护气体的对流换热密度。

3 算例与讨论

对图 1 所示的管道的充填过程进行了仿真计算, 假定膜片阀瞬时破裂, 并忽略其流阻损失, 壁面摩

擦损失按准稳态计算。

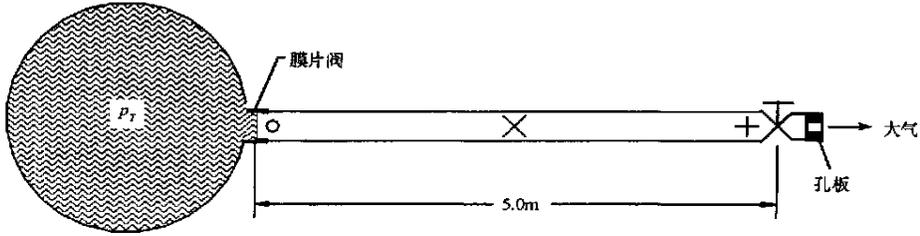


图 1 低温推进剂管道充填过程示意图

Fig. 1 The sketch map of cryogenic propellant priming a pipe with an open end

计算条件为: 管道末端阀门一直为打开状态, 孔板与阀门的等效流阻损失系数为 5.0, 从膜片阀开始到管道中间位置, 管壁温度从推进剂温度线性递增至室温 293.16K, 管壁材料为不锈钢, 管壁厚度为 0.002m, 管道内径 $D=0.01\text{m}$, 计算两种低温推进剂的充填过程: (1) 流体介质为液氢, 温度 $T=21\text{K}$, 贮箱压力 $p_T=1.0\text{MPa}$, 密度 $\rho=71.2\text{kg/m}^3$, 管道充填前充满标准大气压的氦气; (2) 流体介质为液氧, 温度 $T=90\text{K}$, 贮箱压力 $p_T=1.0\text{MPa}$, 密度 $\rho=1142.9\text{kg/m}^3$, 管道充填前充满标准大气压的氮气。管道分段数 $n=10$, 仿真计算结果见图 2 和图 3。

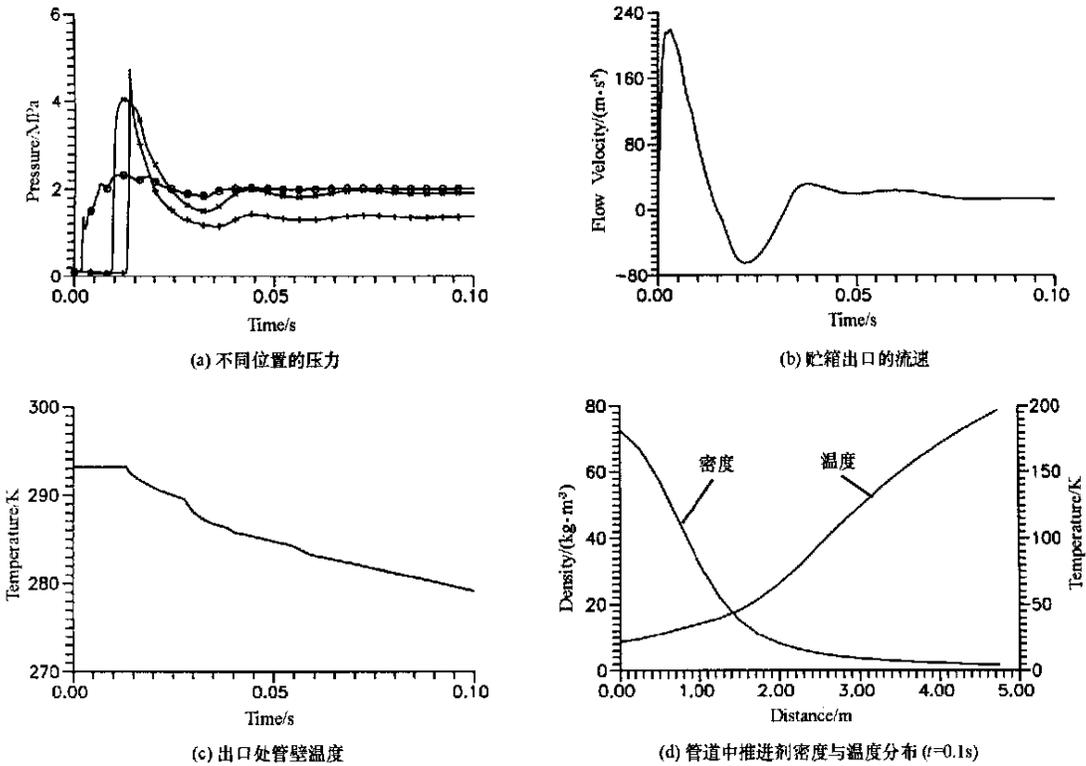


图 2 液氢对开端管道充填的仿真计算结果曲线

Fig. 2 The calculation results of LH2 priming a pipe with an open end

从图 2 可以看出, 传热对液氢的充填过程有十分重要的影响。在管道中间位置“x”处, 形成了一个压力峰, 该压力峰是由于管壁对推进剂的传热使推进剂汽化而引起的, 该压力峰使得推进剂产生了倒流, 该流动特征与文献 [1] 报道的实验结果是相类似的。管道末端的压力峰的成因有二: 一方面是传热的作用; 另一方面是推进剂充填至管道末端时, 管道末端的局部流阻的水击作用。此外, 推进剂在管道的流动过程中, 温度逐步上升, 密度逐步下降, 到管道出口, 已变成过热氢气。

从图 3 可以看出, 由于导热性能的差异以及密度的不同, 传热对液氧的充填过程的影响远不如对液

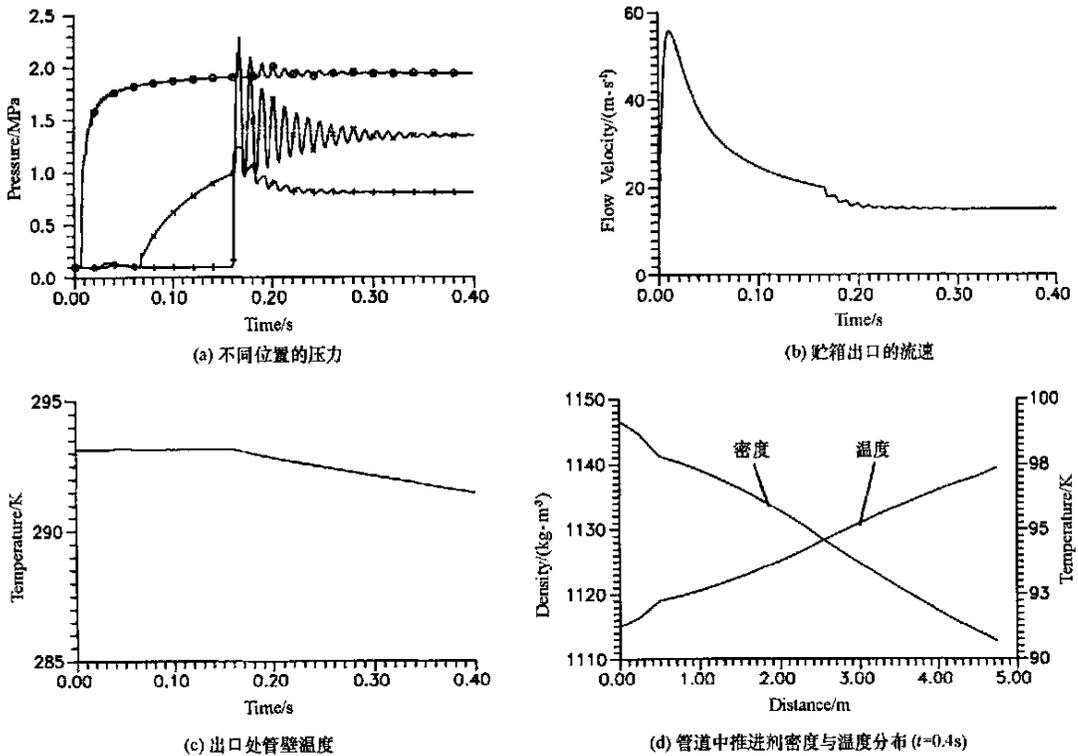


图3 液氧对开端管道充填的仿真计算结果曲线

Fig. 3 The calculation results of LOX priming a pipe with an open end

氢的影响显著, 管道中的压力振荡主要是由于管道末端的局部流阻引起的水击而产生的。

4 结论

建立了低温推进剂管道系统充填过程有限元状态变量模型, 模型抓住了充填过程流动瞬变与传热的主要特征, 简化了相变与传热的计算, 可较好地描述低温推进剂对管道系统的充填瞬变过程。

参考文献:

- [1] Sassnick Hagen D, Knuelle Gerd. Numerical Simulation of Transients in Feed Systems for Cryogenic Rocket Engines[R]. AIAA 95- 2967, 1995.
- [2] 程谋森, 刘昆, 张育林, 张育林, 张育林, 张育林, et al. 液氧对开端管道充填的仿真计算结果曲线 [M]. 国防科技大学, 1978.
- [3] 程谋森, 刘昆, 张育林. 低温推进剂供应管路预冷充填瞬变流计算[J]. 推进技术, 2000, 21(5): 38- 41.
- [4] 刘昆, 张育林. 液体推进系统充填过程的有限元状态变量模型[J]. 推进技术, 2001, 22(1), 19- 21.
- [5] 刘昆. 分级燃烧循环液氧/液氢发动机系统分布参数模型与通用仿真研究[D]. 国防科技大学, 1999.