

液氧煤油发动机低温组元 两相充填过程研究

杨永强, 刘站国, 徐浩海

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 制定液氧煤油发动机的起动点火程序时, 必须考虑液氧充填燃气发生器氧头腔的特性。为此, 建立了一种用于模拟低温推进剂充填和换热过程的动态模型。模型考虑了液相与结构壁面、气相与结构壁面以及气—液两相之间的非稳定换热过程以及气—液两相流动过程。同时, 通过分相假设描述了气相对充填过程的影响。仿真结果的准确性已经得到综合热调试验数据的验证。

关键词: 液体火箭发动机; 低温推进剂; 传热; 充填过程; 仿真

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2006)02-0011-05

Research on two-phase filling process of cryogenic propellant for a LOX/Kerosene LRE

Yang Yongqiang, Liu Zhanguo, Xu Haohai

(Shaanxi Power Machine Design and Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Characteristic of oxygen filling the gas generator must be taken into account when the starting scheme of a LOX/ Kerosene LRE is decided. So, a dynamic model has been built to simulate liquid oxygen's filling course. Heat transfer between gas-liquid phase and the structural wall, as well as two-phase flow, are considered in the model. At the same time, influence of gas phase on filling process is described by the hypothesis of separated phase flow. Further application to engineering has been verified by engineering method the veracity of the simulation result.

Key words: liquid rocket engine (LRE); cryogenic propellant; heat transfer; filling process; simulation

收稿日期: 2005-05-09; 修回日期: 2006-03-15。

作者简介: 杨永强 (1979—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机系统设计。

1 引言

液氧煤油作为火箭发动机推进剂,具有无毒、环保、密度比冲高和使用费用低等优点。我国目前正在研制的液氧煤油发动机均采用补燃循环方案,起动方式包括自身起动和强迫起动,而起动过程的研究是补燃发动机研制的一个关键^[1]。低温推进剂的传热流动过程对整个发动机的起动瞬变特性影响很大^[2]——低温推进剂在流动过程中与结构壁面之间的换热作用,决定着推进剂进入燃烧组件的时间和质量流量,并且最终影响燃烧组件的点火过程。对于目前的补燃循环液氧煤油发动机而言,液氧的充填特性决定着发生器氧化剂阀、燃料阀的打开时序,是制定起动点火程序的重要依据。

本文介绍了某液氧煤油补燃循环发动机强迫起动过程仿真^[3]研究中所采用的低温组元两相充填模型。同时,通过仿真计算,得到了该型发动机低温组元——液氧的充填特性,并与实际试车结果进行了对比。

2 物理模型

在发动机起动时,液氧充填发动机氧路分为两个阶段^[2]。第一阶段为“预冷”,即液氧对氧贮箱到发动机氧阀之间的氧供应系统进行充填和冷却。由于其动态特性不直接影响发动机起动过程的动态特性,所以本文不考虑该阶段。第二阶段,是指发动机氧阀打开之后,液氧对管路的充填以及与壁面产生热交换的动态换热充填过程。虽然这个过程的持续时间很短,但对发动机的点火和起动过程有显著的影响。

因此,在建立物理模型时,首先认为液氧充填至发动机氧主阀前,且“预冷”过程已完成。发生器氧供应系统包括氧阀、管路和发生器氧化剂头腔,见图 1。为了模型建立的方便,将氧阀后管路与发生器氧头腔作为一个整体来考虑,从而可以得到液氧充填过程的示意图,见图 2。

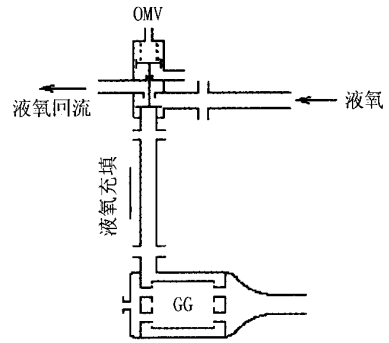


图 1 发生器氧供应系统

Fig.1 Oxygen feeding system of GG

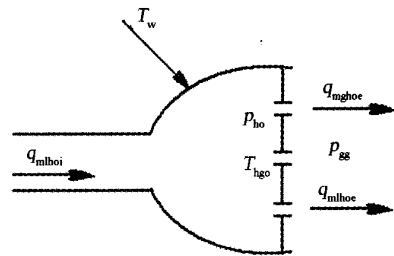


图 2 液氧充填示意图

Fig.2 Illustration of oxygen filling process

3 数学模型

对于该型发动机,氧主阀打开后,在泵后压力的作用下液氧开始充填阀后管路及发生器氧头腔。由于液氧临界温度低,在其跨越临界点的过程中,推进剂流动呈现不稳定的两相流状态。充填过程中,液氧与结构壁面会发生强烈的换热过程,换热产生的氧蒸气最初通过氧喷嘴进入发生器。随着充填过程的进行,液氧与气氧之间、气氧与结构壁面之间同样会发生换热作用,同时,氧蒸气伴随部分液氧进入发生器。以上过程中,液相和气相的相互转化取决于结构壁面向液氧、气氧传热量的大小以及氧蒸气、头腔的压力变化规律。

建立数学模型时,认为头腔中液氧充填峰面为截锥形状。因此当第一部分液体到达氧喷嘴时,全部容腔还没有充满液体。随着结构壁被逐步冷却,降低了传给液氧的热量,使得氧喷嘴中两相介质总流量中蒸气份额减少,这种两相流逐步变

为液氧流动^[3]。建立数学模型时作如下假设:

- (1) 不考虑发生器头腔与外界环境的热交换;
- (2) 采用液体不同状态的稳态换热系数近似描述动态换热;
- (3) 认为结构壁面、气体、液体之间换热面积的大小与液氧的充填程度有关。

3.1 质量积存和液体的气化

$$\frac{dm_{lo}}{dt} = q_{mihoi} - q_{mihoe} - q_{mev} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{go}}{dt} = q_{mev} - q_{mghoe} \quad (2)$$

式中, m_{lo} 、 m_{go} 分别为头腔中液态和气态氧的质量积存量; q_{mihoi} 、 q_{mihoe} 分别为流入、流出氧头腔液态氧的质量流量; q_{mghoe} 为流出氧头腔的气态氧的质量流量; q_{mev} 为液态氧的总汽化质量流量, 包括液氧表面蒸发以及液氧被结构壁面加热而汽化的质量流量 (q_{mevo} 、 q_{mevwo}) 两部分。

q_{mihoi} 根据与氧头腔直接关联的管路流量确定。 q_{mihoe} 、 q_{mghoe} 分别由发生器氧头腔压力、发生器压力以及结构和液氧的物性参数决定, 计算公式如下:

$$q_{mihoe} = (\mu A)_{lo} \sqrt{2\rho_{lo}(p_{ho} - p_{gg})} \quad (3)$$

$$q_{mghoe} = \frac{(\mu A)_{go} A(k) q(\lambda) p_{ho}}{\sqrt{R_{hgo} T_{hgo}}} \quad (4)$$

式中, $(\mu A)_{lo}$ 、 $(\mu A)_{go}$ 为充填过程中流出喷嘴两相流中液氧、气氧分别所占的有效面积; k 、 λ 分别为气氧在头腔中的绝热指数和在氧喷嘴处的速度系数; R_{hgo} 、 T_{hgo} 分别为头腔中气氧的气体常数和温度; p_{ho} 、 p_{gg} 分别为氧头腔压力和发生器压力; ρ_{lo} 为头腔中液氧的密度。

$(\mu A)_{lo}$ 、 $(\mu A)_{go}$ 根据下列公式确定:

$$(\mu A)_{lo} = (\mu A)_{lo}^* \bar{V}^a \quad (5)$$

$$(\mu A)_{go} = (\mu A)_{go}^* (1 - \bar{V}^a) \quad (6)$$

$$\bar{V} = \frac{V_{lo}}{V_{ho}} = \frac{m_{ho}}{\rho_{lo} V_{ho}} \quad (7)$$

式中, $(\mu A)_{lo}^*$ 、 $(\mu A)_{go}^*$ 分别为液氧和气氧单独流过氧喷嘴时的有效面积; V_{lo} 、 V_{ho} 分别为头腔中液氧的体积和氧头腔总容积; a 为充填峰面修正系数; \bar{V} 为液氧在氧头腔中的充填系数。

液氧对氧头腔的充填过程中, 由于换热的存在会不断在结构面与液氧的界面析出氧蒸气, 这部分汽化量 q_{mevwo} 与结构壁面的结构质量以及液氧的充填系数有关。除此之外, 液氧表面也会与氧蒸气换热, 同时氧蒸气也会凝结再次成为液氧。这一过程的汽化量由下式确定:

$$q_{mevo} = \frac{m_{lo}}{\tau_{lo}} - \frac{m_{go}}{\tau_{go}} \quad (8)$$

式中, τ_{lo} 、 τ_{go} 分别为液氧的蒸发时间和气氧的冷凝时间。

$$\tau_{lo} = \frac{\tau_{lo}^* p_{ho}}{p_{slo} - p_{ho}} \left(\frac{273}{T_{iho}} \right)^2 \quad (9)$$

$$p_{slo} = \left[\left(\frac{T_{iho}}{118.9} \right)^{6.075} - 0.088 \right] \quad (10)$$

$$\tau_{go} = \frac{\tau_{go}^* p_{ho}}{p_{ho} - p_{sgo}} \left(\frac{T_{hgo}}{273} \right)^2 \quad (11)$$

$$p_{sgo} = \left[\left(\frac{T_{hgo}}{118.9} \right)^{6.075} - 0.088 \right] \quad (12)$$

式中, τ_{lo}^* 、 τ_{go}^* 分别为氧液相的蒸发特征时间和气相的冷凝特征时间, 与结构参数有关; p_{slo} 、 p_{sgo} 分别为氧液相和气相温度下的饱和蒸气压(MPa); T_{iho} 、 T_{hgo} 分别为头腔中氧的液相和气相温度。

3.2 液体和气体的加热, 结构壁面的冷却

对于氧蒸气, 根据能量守恒原理, 其内能变化可表示为:

$$\frac{d(c_{v,go} m_{go} T_{hgo})}{dt} = \Delta Q_{w-g} - \Delta Q_{ev} - \Delta Q_{g-l} - c_{v,go} q_{mev} (T_{hgo} - T_{iho}) \quad (13)$$

根据上式可以得到头腔中氧蒸气温度变化的表达式为:

$$\frac{dT_{\text{hgo}}}{dt} = [\Delta Q_{\text{w-g}} - \Delta Q_{\text{ev}} - \Delta Q_{\text{g-l}} - c_{\text{v,go}} q_{\text{mev}} (T_{\text{hgo}} - T_{\text{iho}})] / \left(c_{\text{v,go}} m_{\text{go}} \right) - \frac{T_{\text{hgo}}}{m_{\text{go}}} \frac{dm_{\text{go}}}{dt} \quad (14)$$

式中, $\Delta Q_{\text{w-g}}$ 、 ΔQ_{ev} 、 $\Delta Q_{\text{g-l}}$ 分别代表单位时间内, 氧头腔结构壁面与气氧的换热量、液氧蒸发的汽化潜热量和氧蒸气与液氧之间的换热量。

$$\Delta Q_{\text{w-g}} = h_{\text{w-g}} (T_{\text{w}} - T_{\text{hgo}}) A_{\text{w}} (1 - \bar{V}^m) \quad (15)$$

$$\Delta Q_{\text{ev}} = q_{\text{mev}} r_{\text{lo}} \quad (16)$$

$$\Delta Q_{\text{g-l}} = h_{\text{g-l}} (T_{\text{hgo}} - T_{\text{iho}}) A_{\text{w}} \bar{V} (1 - \bar{V}) \quad (17)$$

式中, $h_{\text{w-g}}$ 、 $h_{\text{g-l}}$ 分别为氧蒸气与结构壁面间和液氧之间的换热系数; r_{lo} 、 $c_{\text{v,go}}$ 为液氧的汽化潜热和气氧的定容比热; A_{w} 、 T_{w} 分别为氧头腔内表面的面积和温度; m 为充填峰面系数。

从结构壁面传给液体和蒸气的热流以及传热系数, 取决于各段出口的平均质量流量。换热面积取各段内部总侧面积的某个变化的比例, 即取决于当前充填系数的大小和流动峰面形状系数。最初估计的换热系数、流动和相转化公式, 可以根据具体管路的试验数据得到确认。

同理, 根据能量守恒原理, 可以得到氧头腔壁面温度的变化规律:

$$\frac{dT_{\text{w}}}{dt} = - \frac{\Delta Q_{\text{w-g}} + q_{\text{mevwo}} r_{\text{lo}}}{m_{\text{w}} c_{\text{w}}} \quad (19)$$

式中, m_{w} 、 c_{w} 分别为氧头腔壁面金属质量和比热。

3.3 两相介质压力

充填完成之前, 根据气体状态方程确定氧头腔压力, 即:

$$p_{\text{ho}} = \rho_{\text{go}} R_{\text{go}} T_{\text{hgo}} \quad (20)$$

$$\rho_{\text{go}} = \frac{m_{\text{go}}}{V_{\text{go}}} = \frac{m_{\text{go}}}{V_{\text{ho}} (1 - \bar{V})} \quad (21)$$

式中, ρ_{go} 为头腔中气氧的密度。

通过上述数学表达式, 就可以描述发动机起

动过程中氧阀后管路及燃气发生器氧头腔的充填特性。

4 充填过程计算结果与综合热调试验结果的对比

本文中, 将该发动机综合热调试验获得的试验参数 (图 3、4) 与模型的仿真计算结果进行了对比。综合热调试验是指: 发生器氧阀前管路完成预冷之后, 火药起动器点火工作、通过起动涡轮起旋涡轮泵并打开氧主阀对发生器氧头腔进行充填的过程。

通过仿真计算, 对上述模型进行数值积分, 就可以得到综合热调试验中液氧充填发生器氧头腔的特性。其中, 图 3 为仿真计算充填压力 (氧泵后压力) 与试验对应测量参数数值的对比, 从图中可以看出计算结果与实测压力基本接近。这样就为充填特性的对比提供了一个参考。

在图 4 中, 给出了发动机氧阀后腔道充填系数的计算结果, 从中可以看出, 0.47s 充填开始。由于初始充填程度小, 因此反压较小、充填系数增长比较快。0.6s 以后充填速度减缓, 截止到 0.73s 氧头腔充填完毕, 充填时间为 0.26s。对于试验数据, 要通过分析后才能间接得到实际的充填特性。

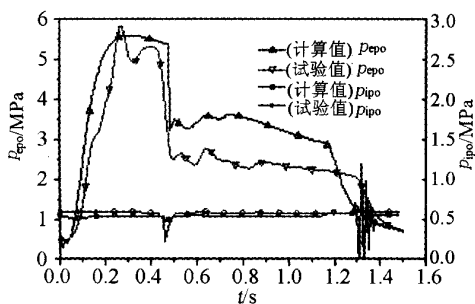


图 3 氧泵入口压力与出口压力对比

Fig.3 Pressure comparison of experimental data and numerical result

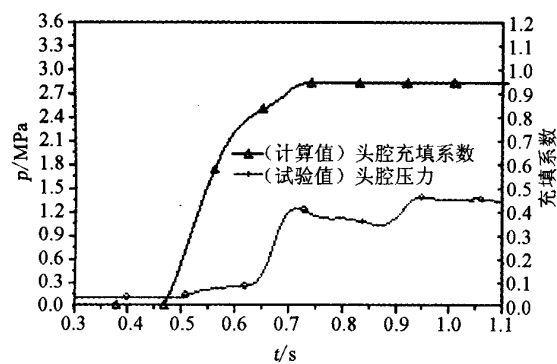


图 4 发生器氧头腔的充填特性
Fig.4 Oxygen head filling process of GG
(experimental data and numerical result)

从图 3 中的试验数据可以看出，0.47s 氧泵后压力急剧降低，这是因为发生器氧阀打开、氧泵流量增大引起的。该时刻也是氧头腔开始充填的时刻。本次试验中，发生器氧头腔压力变化曲线如图 4 所示。由于液氧是低温推进剂，在开始充填时结构壁面的温度相对于液氧的温度非常高，因此液氧在接触结构壁面的时候会沸腾产生氧蒸气，蒸气首先通过氧喷嘴进入发生器。这也是 0.63s 前发生器氧头腔压力维持在较小数值的原因。随着充填程度的不断增加，开始有小液滴和氧蒸气的混物流过氧喷嘴，氧头腔压力急剧上升，0.7s 达到 1.2MPa。随着氧头腔完全被冷透，气相物所占比例大大减小，头腔压力缓慢降低，认为氧头腔充填完毕，对应的时刻为 0.72s（图 4）。因此可以得到综合热调试验中氧头腔的充填时间为 0.25s。

通过以上分析可以看出，计算结果与试验结果一致，说明该模型能较好模拟发动机起动过程中液氧的换热充填过程。

5 结论

在本文中，基于分相假设建立了一种用于描述火箭发动机起动过程中低温推进剂充填和换热的动态模型。模型考虑了其充填流动过程中，液相与结构壁面、气相与结构壁面以及气液两相之间的换热过程。同时，采用液体不同状态的稳态换热系数近似描述动态换热。

利用仿真程序对某型液氧煤油发动机联试系统综合热调试过程进行了仿真计算，得到了低温组元两相充填模型的计算结果。并且，通过试验数据对计算结果的准确性进行了验证。

参考文献：

[1] （俄）В.Ф.格列克曼（著）. 液体火箭发动机自动调节[M]. 顾明初，郁明桂，邱明煜（译）. 北京：宇航出版社. 1995, 3.

[2] А А Шемяков, В М Калнин, Н В Науменкова, В Г Дят. ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАКЕТНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ[M]. Москва Машиностроение, 1978.

[3] 杨永强. 液氧煤油补燃循环发动机强迫起动过程研究[D]. 陕西动力机械设计研究所. 2005.

（编辑：王建喜）