

可再充填启动篮表面张力推进剂 管理装置设计及试验研究

宁继荣, 陈祖奎, 马 键, 穆小强
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 对启动篮表面张力推进剂管理装置工作原理进行了说明, 建立了可再充填启动篮再充填过程仿真模型, 根据仿真结果对影响启动篮再充填的各种因素进行了分析。加工原理性试验件进行了静态充填试验和动态充填试验, 试验结果和仿真结果基本一致, 验证了计算模型的正确性。初步掌握了可再充填启动篮表面张力推进剂管理装置设计、加工和地面试验技术。

关键词: 可再充填启动篮; 推进剂管理装置; 设计; 分析

中图分类号: V511-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 02-0025-05

Design and test of refillable start-basket surface tension PMD

NING Ji-rong, CHEN Zu-kui, MA Jian, MU Xiao-qiang
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The working principle of the start-basket surface tension PMD is described. A simulation model of the refilling process of the refillable start-basket is established and the factors which affect the refilling process are analyzed. A test sample was manufactured, and then the static and dynamic refilling tests were carried out. The test results have a good agreement with the simulation tests, which indicates the validity of the simulation model. The design, manufacture and test technology of the refillable start-basket have been mastered preliminarily. The design is important to develop the tank used in restartable propulsion system.

Keywords: refillable start-basket; PMD; design; analysis

0 引言

卫星及各种轨道飞行器的反作用控制系统、机动系统及主推进系统多采用液体火箭, 在微重

力环境下贮箱内的推进剂处于漂浮状态, 必须进行管理才能为发动机提供不夹气的液体, 使之在轨道上正常启动和工作。表面张力推进剂管理装置利用液体与多孔材料或板片相接触的表面张力作用维持液、气分离, 具有无活动部件, 可靠性

收稿日期: 2010-11-13; 修回日期: 2010-12-22

作者简介: 宁继荣 (1980—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭推进系统总装设计

高,相容性好,结构重量轻,排出效率高,可重复使用等特点,因此广泛应用于各种轨道飞行器的推进剂管理。

上世纪60年代至今,国外已经有多种表面张力贮箱应用于实际飞行任务,表面张力推进剂管理装置形式多样,包括通道、叶片、槽、海绵、启动篮及其各种组合。国内西安航天动力研究所、兰州物理研究所、北京控制工程研究所等单位进行了表面张力推进剂管理装置的研究工作,已有多种通道式表面张力贮箱实现了工程应用,其他理论研究和工程预研工作主要集中在叶片、海绵管理装置,对于表面张力推进剂管理装置主要类型之一的启动篮,尚未见提及。

本文对启动篮工作原理进行了说明;对可再充填启动篮再充填过程进行了建模分析,并加工原理样机进行地面试验,为可再充填启动篮工程应用奠定基础。

1 启动篮介质蓄留机理

当液体与气体的分界面为曲面时,由于液体表面张力的作用,气液界面存在着一定的压差

$$\Delta p = p_{\text{gas}} - p_{\text{liquid}} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

式中: σ 为液体表面张力; R_1 、 R_2 为气液界面曲率半径。

筛网或多孔板等多孔毛细元件,表面分布液体形成液膜时,微观各个孔隙也形成气液界面,其毛细压差极限值通过泡破点试验来确定。在多孔元件上端覆盖一薄层液体(通常为酒精),在元件下端充气增压,当第一个气泡逸出时,气液两端压差称为泡破点。

由于泡破点的存在,表面张力毛细元件具有液体保持能力,流动过程中具有气体隔离能力。

如图1所示,只要加速度产生的静压差小于泡破点,气体不能从筛网顶端进入容器,从而液体不能排出,实现液体保持。图2中,气体从前隔舱增压,液体从后隔舱出口排出,只要液体流经筛网的流阻损失和高度 h 产生的静压头之和小于泡破点,即能够一直保持后舱满,仅排出前舱

的液体。

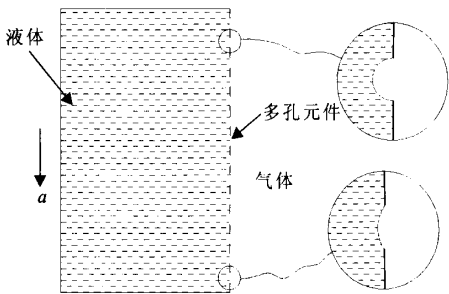


图1 多孔元件静压保持特性

Fig. 1 Liquid static retention with a porous element

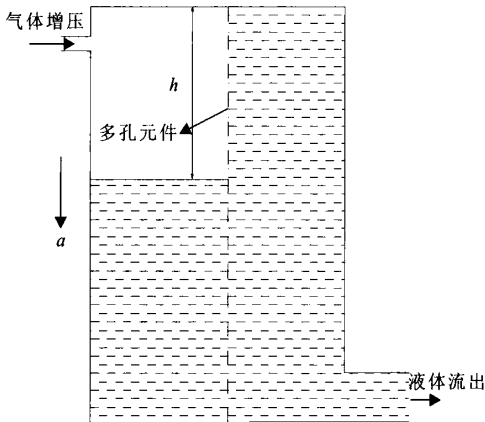


图2 气体隔离液体流动

Fig. 2 Isolation of gas in liquid flow by a porous element

多孔毛细元件的液体保持还涉及到气液界面稳定性问题。气液界面的稳定性由邦德数来表征,邦德数是质量力和表面张力比值的无量纲数

$$Bo = \frac{\rho a r^2}{\sigma}$$

式中: ρ 为液体密度; a 为加速度; r 为结构特征尺寸。

给定液体和结构尺寸,只要邦德数满足一定的要求,气液界面即可以实现稳定。对于接触角为0的湿润型液体,临界邦德数为0.84,只要邦德数小于等于0.84,气液界面即保持稳定。图3示出了部分充填的圆柱形贮箱内气液界面稳定实例。邦德数满足要求,气体压力大于液体静压差,液体就以图示状态保持在贮箱内。

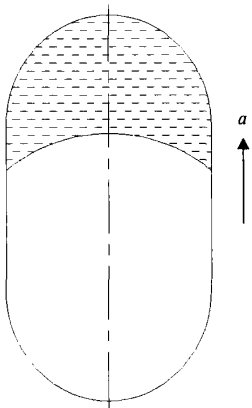


图 3 气液界面稳定实例
Fig. 3 Stability of liquid-gas interface

启动篮是由筛网或多孔板等毛细元件组成的封闭结构, 由于毛细元件的上述特性, 启动篮具有液体保持和气体隔离能力。启动篮布置在贮箱出口附近, 在微重力或者较小加速度条件下, 能将一定量推进剂蓄留在自身封闭空间内, 满足动力系统启动需求。

2 启动篮分类

启动篮分为可再充填和不可再充填两种类型。基本结构如图 4 所示。

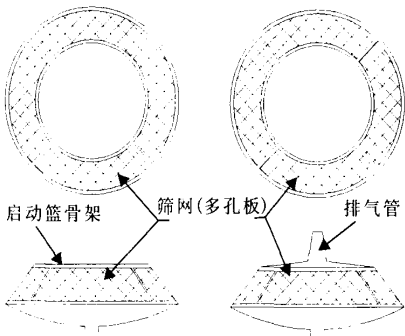


图 4 不可再充填和可再充填启动篮
Fig. 4 Non refillable and refillable start-basket

不可再充填启动篮用于有限的启动动作。启动过程中, 液体被气体所代替, 气体在余下的任务期间蓄留在启动篮中, 启动篮不可再充填, 启

动次数及推进剂供应量受到启动篮尺寸的限制。
可再充填启动篮顶端设计排气管, 排气管顶端筛网较稀疏, 其泡破点小于启动篮篮网。保持在启动篮内的推进剂可实现发动机点火; 发动机工作产生沉底加速度, 推进剂沉底; 一次长程工作中, 该加速度产生的静压驱动启动篮内进入的气体从排气管排出, 完成推进剂再充填; 启动篮充填满, 可实现发动机下一次启动。
可再充填启动篮具有液体保持和再充填特性, 应用于多次启动动力系统, 可省略姿控发动机或固体火箭等沉底系统, 可减少动力系统结构质量, 降低研制成本, 简化工作程序。

3 可再充填启动篮再充填研究

可再充填启动篮用于多次启动动力系统, 具有可再充填能力, 对启动篮再充填过程进行研究, 是进行可再充填启动篮设计的前提。

3.1 再充填模型

启动篮再充填过程是多种因素综合作用的结果, 加速度、介质沉底过程的动压头、贮箱结构、启动篮结构及多孔元件选材、贮箱增压压力、推进剂流量等都对再充填过程有影响。简化的再充填模型取外部加速度和气体参数为固定值, 以液体进入和气体排出平衡方程来进行再充填计算, 假设充填过程中启动篮排气管顶端筛网始终被液体覆盖。

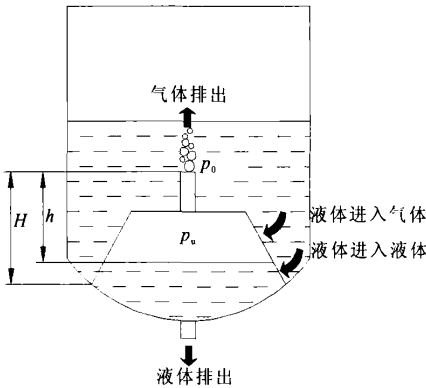


图 5 启动篮再充填示意图
Fig. 5 Diagram of refilling process of start-basket

如图5所示, 充填状态, 气液流动存在以下四种状态: 液体进入液体充填启动篮; 液体进入气体充填启动篮; 气体由排气管顶端排出启动篮; 液体由贮箱出口排出启动篮。

启动篮再充填过程满足如下连续性方程

$$A_{l-1}v_{l-1} + A_{l-g}v_{l-g} - q_l = A_{\text{vent}}v_g \quad (1)$$

式中: A_{l-1} 、 A_{l-g} 分别为液体进入液体、液体进入气体的流通面积, m^2 ; v_{l-1} 、 v_{l-g} 分别为液体进入液体、液体进入气体的流速, m/s ; q_l 为液体流出启动篮容积流量, m^3/s ; A_{vent} 为排气管流通面积, m^2 ; v_g 为气体流出流速, m/s 。

取排气管出口液体压力为 p_0 , 启动篮内气体压力为 p_u , 排气管出口筛网泡破点为 p_σ , 驱动液体进入液体的压差为 Δp_{l-1} , 驱动液体进入气体的压差为 Δp_{l-g} , 气体流经顶部筛网排出的压差为 Δp_g , 可得

$$\Delta p_{l-1} = p_0 + p_h - p_u \quad (2)$$

$$\Delta p_{l-g} = p_0 - p_u + \frac{p_h}{2} \quad (3)$$

$$\Delta p_g = p_u - p_\sigma - p_0 \quad (4)$$

对于流体流经筛网的流动, 有如下关系式

$$\Delta p_{l-1} = f(A_l, B_l, v_{l-1}) \quad (5)$$

$$\Delta p_{l-g} = f(A_l, B_l, v_{l-g}) \quad (6)$$

$$\Delta p_g = f(A_g, B_g, v_g) \quad (7)$$

式中: A_l 、 B_l 、 A_g 、 B_g 分别为液体、气体流经筛网的粘性修正系数和惯性修正系数。

为了便于方程求解, 令 $\Delta p' = p_u - p_0$, 将公式(5)至公式(7)分别带入公式(2)至公式(4), 求解方程, 可得

$$v_{l-1} = f_1(p_h, \Delta p') \quad (8)$$

$$v_{l-g} = f_2(p_h, \Delta p') \quad (9)$$

$$v_g = f_3(p_\sigma, \Delta p') \quad (10)$$

对于一定结构形状的启动篮, 充填至某一位置, 静压高度为 h 时, 求解几何关系可得

$$A_{l-1} = f_4(h) \quad (11)$$

$$A_{l-g} = f_5(h) \quad (12)$$

将公式(8)~公式(12)代入公式(1), 对

于给定 h , 可采取迭代法求解该方程得到 $\Delta p'$, 进而求解出瞬时介质的充填流量。 $\Delta p'$ 的取值范围: $p_\sigma \leq \Delta p' \leq p_h$ 。

启动篮在充填过程中, 随着静压差高度 h 的变化, $\Delta p'$ 、 A_{l-1} 、 v_{l-1} 、 A_{l-g} 、 v_{l-g} 、 v_g 等参数也不断变化。计算某一时刻充填流量, 给出一定的时间步长, 该时间步长乘以充填流量为充填容积, 至下一点, 以牛顿迭代法求解新的静压差高度 h , 重复求解, 流量对时间进行积分可获得充填量, 并可获得整个充填过程各项参数的变化。

3.2 再充填影响因素分析

称启动篮出口在没有介质排出状态下充填为静态充填; 称启动篮出口在有介质排出状态下充填为动态充填。建立启动篮再充填模型, 对于某设计参数启动篮再充填过程进行仿真分析, 根据分析结果评估相关因素对再充填过程的影响, 得出以下结论:

1) 静压差的影响

静压差驱动液体进入、气体排出启动篮, 实现启动篮再充填。静压差越大(图5中, h 确定的条件下, 排气管高度越大), 越有利于启动篮再充填;

2) 篮网和排气管筛网面积的影响

对于静态充填而言, 增大排气管筛网面积效果优于增大篮网面积; 对于大排放流量动态充填而言, 增大篮网面积效果优于增大排气管筛网面积。主要取决于充填过程中液体过网压差和气体过网压差占静压的权重。相应的, 在满足筛网液体保持特性的条件下, 采取较为稀疏的筛网, 充填流量增大, 启动篮再充填时间减小。篮网和排气管顶端筛网的选取需综合考虑;

3) 排气管筛网泡破点的影响

减小顶部筛网泡破点, 可有效降低静态充填时间; 对于大排放流量状态动态充填, 改善效果明显;

4) 动态充填结果与排放流量关系

贮箱排出流量小于某一值时, 启动篮可实现完全再充填; 排出流量大于某一值时, 启动篮实现部分充填后进入稳定状态, 稳定状态下, 进入

启动篮的流量等于贮箱排出流量。

根据仿真计算结果, 还可得到动态充填过程中净充填时间、净充填效率和排放流量的关系等, 这里不再赘述。

4 原理样机及地面试验

启动篮表面张力管理装置具有地面 1g 重力场中可验证其再充填性能的特性, 加工原理性试验件进行了地面试验。试验件为全不锈钢结构, 排气管顶端筛网组件为可拆卸结构, 方便进行对比试验。试验介质为无水乙醇。

更换顶部筛网组件, 进行了多次静态充填试验, 试验结果表明: 液体能实现静态再充填, 试验现象与预期一致, 启动篮管理装置原理正确; 静态充填时间和贮箱内部液体高度无关, 只和静压差相关; 增大排气管顶端筛网面积, 或者排气管顶端覆盖更粗的筛网, 可降低静态充填时间; 当排气管顶端筛网和篮网相同时, 启动篮充填未进行, 主要原因在于静压差小于排气管顶端筛网泡破点, 气体不能从排气管逸出。

动态充填状态, 某一流量下, 排气管顶端没有气泡逸出, 关闭出口排放阀, 排气管顶端又有气泡逸出, 证明排放过程中启动篮部分充填, 关闭排放阀后出现了二次充填现象。增大排气管顶端筛网面积, 或增加排气管高度, 以相同流量排放, 没有发生二次充填现象, 启动篮完全充填。减小排放流量, 也可以实现完全充填。试验结果验证了 3.2 第 4 条结论, 还表明, 增加排气管筛网面积、或者增加排气管高度以增加静压差, 都可以改善再充填效果。

5 结论

地面试验表明, 可再充填启动篮原理正确,

各项因素对于启动篮再充填效果的影响和仿真模型计算所得到的信息一致, 证明了再充填模型的正确性。可再充填启动篮管理装置可以实现液体保持和加速度下再充填, 主要应用于实现多次启动任务贮箱, 对于该类型在轨动力系统的研制具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] JAEKLE D E, Jr. Propellant management device conceptual design and analysis: traps and troughs, AIAA 95-2531 [R]. USA: AIAA, 1995.
- [2] ROLLINS J R, GROVE R K, JAEKLE D E, Jr. Twenty three years of surface tension propellant management system design, development manufacture test and operation, AIAA 85-1199[R]. USA: AIAA, 1985.
- [3] BLATT M H, MERINO Fred, SYMONS E Patrick. Capillary device refilling. AIAA 80-1095 [R]. USA: AIAA, 1980.
- [4] BLATT M H, AYDELOTT J C. Centaur propellant acquisition system, AIAA 75-1194[R]. USA: AIAA, 1975.
- [5] DODGE F T, RICKER R E. Flow of liquid jets through closely woven screens, AIAA 78-1031 [R]. USA: AIAA, 1978.
- [6] GAINES R D, ORTIN G F. Recent development in propellant acquisition technology, AIAA 84-1477 [R]. USA: AIAA, 1984.
- [7] CHAPTER J J, RIDER S B. Surface tension propellant management system computerized flow analysis, AIAA-80-1098[R]. USA: AIAA, 1980.
- [8] HEUREUX J M. Computational solution for the free surface in a propellant tank, AIAA 87-2020[R]. USA: AIAA, 1987.

(编辑: 马 杰)