

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20161347

液氢贮箱热力学排气系统建模及控压特性

汪彬^{1,2}, 王天祥¹, 黄永华², 吴静怡², 雷刚¹

(¹航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100028; ²上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

摘要: 以低温推进剂液氢贮箱压力控制为目标, 建立了热力学排气系统 (TVS) 和贮箱内流体流动及气液相变过程的数学模型。以 18.09 m³ 液氢贮箱在地面工况充注率 75%、漏热量 0.76 W·m⁻² 为例, 计算了贮箱自增压过程及开启 TVS 后对贮箱压力控制的效果。结果表明, 气枕升压速率远大于液体温度对应的饱和压力的升压速率; TVS 运行后可将贮箱压力有效地控制在 165.5~172.4 kPa 范围内。对比了混合与排气两种不同运行模式下贮箱气枕的升降压特性, 发现排气模式下的气枕降压速率为混合模式的 7 倍, 升压速率为混合模式的 95%。同时还分析了贮箱内液体的温度变化规律。

关键词: 液氢贮箱; 热力学排气系统; 压力控制; 仿真分析

中图分类号: V 511.6

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) S2—0020—06

Modeling and pressure control characteristics of thermodynamic venting system in liquid hydrogen storage tank

WANG Bin^{1,2}, WANG Tianxiang¹, HUANG Yonghua², WU Jingyi², LEI Gang¹

(¹State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China;

²Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To study the pressure control of cryogenic propellant container, an analytical lumped parameter model is established to predict the behavior of pressure variation inside a liquid hydrogen tank with TVS installed. Simulations are conducted for the tank with volume of 18.09 m³ initially filled with 75% LH₂ and with a heat leak load of 0.76 W·m⁻². Calculation results are compared with literature to verify the feasibility of the proposed model. The results show that the ullage pressure rises much faster than the liquid saturation pressure, and TVS is highly effective and feasible in controlling the tank pressure within 165.5—172.4 kPa. The pressure change characteristics under mixing mode and venting mode are compared and analyzed. The pressure decreasing rate under venting mode is found to be 7 times of that under mixing mode. However, the pressure rising rate under venting mode is about 95% of that under mixing mode. The temperature profiles are also studied.

Key words: liquid hydrogen tank; thermodynamic vent system; pressure control; simulation analysis

2016-06-17 收到初稿, 2016-09-26 收到修改稿。

联系人: 黄永华。第一作者: 汪彬 (1990—), 男, 博士研究生。

基金项目: 航天低温推进剂技术重点实验室基金课题项目 (SKLTSCP1206-W); 国家自然科学基金项目 (51676118)。

Received date: 2016-06-17.

Corresponding author: HUANG Yonghua, huangyh@sjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the Open Research Fund of the State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants (SKLTSCP1206-W) and the National Natural Science Foundation of China (51676118).

引言

深空探测、空间站以及载人探月等任务对液氢、液氧、液态甲烷等低温推进剂的在轨贮存提出了需求。低温推进剂沸点低，易受空间恶劣的热辐射漏热而快速蒸发。为了实现中长期在轨贮存，除必要的被动热防护技术外，配合流体搅拌混合、对空排放和低温制冷机制冷等主动控压技术是必需的。由于空间用大制冷量低温制冷机技术尚未成熟，NASA 在 20 世纪 90 年代开发的热力学排气系统 (TVS) 被认为是实现低温推进剂长期在轨贮存最可行的方法之一。

早期的 TVS 系统其动力装置位于低温贮箱内部，产生的热量全都传递给低温液体从而加速其气化。之后，喷射棒概念被引入 TVS^[1]，并开展了以液氢、液氧、液氮和液态甲烷为实验工质的 TVS 地面运行性能实验^[2-6]。结果表明，喷射杆 TVS 都能有效地将贮罐内这几种流体的压力控制在 ± 3.45 kPa 变化范围内。我国在低温推进剂长期在轨贮存技术研究方面才刚刚起步，大多为文献搜集和综述^[7-13]，但近来相关研究逐渐活跃，如马原等^[14]从套管式换热器的角度验证 TVS 的控压效果；刘展等^[15]采用 FLUENT 软件对低温液氢贮箱进行 500 s 内的增压过程模拟。

综上，目前国内外对 TVS 在系统层面的仿真研究还不够充分，且缺乏对低温流体在 TVS 运行后温度、压力等参数的分析及对 TVS 系统不同运行模式的对比分析。开展理论仿真对于指导优化 TVS 实验系统的搭建和节约建造成本具有重要意义。本文主要对喷射棒型热力学排气系统及低温贮箱内流体进行数学建模，通过仿真计算来分析地面状态及微重力状态下 TVS 系统的压力控制特性及低温液体的质量损失情况，同时分析了混合及排气模式下液氢贮箱的升降压特性。

1 喷射棒型 TVS 的工作流程数理建模

1.1 喷射棒型 TVS 的工作原理

喷射棒型热力学排气系统的结构如图 1 所示。该系统主要由低温泵、J-T 节流阀、同轴套管式换热器与喷射棒组成。TVS 系统循环泵和节流阀的开闭以气枕压力 p_u 和液体温度对应的饱和压力 p_{sat} 为控制信号。在贮箱自增压过程中，当气枕压力 p_u 上升到压力控制带上限 p_{max} 时，仅开启循环泵，

流经循环泵的液体通过喷射棒的喷射实现贮箱内气枕区的降温降压。当气枕压力 p_u 上升到压力控制带上限 p_{max} 又液体饱和压力 p_{max} 上升到压力控制带下限 p_{min} 时，同时开启循环泵与节流阀，循环泵抽取的液体一部分流经节流阀，通过节流阀的节流降温后通过同轴换热器与主流液体换热，实现主流液体的降温，降温后的过冷主流液体通过喷射棒的喷射与箱内气枕和液体换热，实现贮箱内气枕与液体的降温降压。节流后的液体换热后以过热蒸汽的形式排出箱外。这种排放方式与液体是处于微重力还是地面重力环境无关。

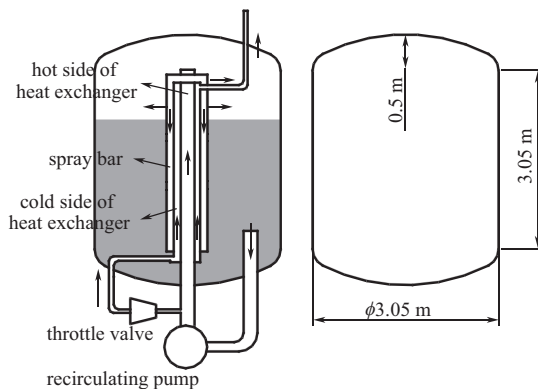


图 1 喷射棒型 TVS 的结构

Fig. 1 Schematic diagram of spray bar TVS

1.2 TVS 的热力学模型

TVS 系统的整体模型主要分为 3 部分：喷射器模型、低温泵模型和贮箱热力模型。其中核心为贮箱热力模型和低温泵模型。贮箱模型主要分为气枕区、液相区和贮箱壁面 3 部分。对贮箱气枕区和液相区分别进行零维计算，即采用集总参数法；同时假设低温泵及节流阀内流体为等焓流动的理想过程，考虑外界漏热及气液相之间自然对流与相变等过程。贮箱热力模型如图 2 所示。下文以气枕模型为例详细介绍贮箱的数学模型，液相区和贮箱壁面的数学模型与之类似，限于篇幅不再赘述。

气枕内的气体质量变化率可由式 (1) 计算

$$\dot{m}_u = \dot{m}_{du} + \dot{m}_{bw} + \dot{m}_{lu} - \dot{m}_{ul} - \dot{m}_c \quad (1)$$

式中， $\dot{m}_u$ 为气体质量， $\dot{m}_{du}$ 为气体中液滴的蒸发率， $\dot{m}_{bw}$ 为灌壁上的液体蒸发率， $\dot{m}_{lu}$ 为聚集液体的蒸发率， $\dot{m}_{ul}$ 为气体的冷凝率， $\dot{m}_c$ 为液面上的冷凝率。

气体的温度变化率可由式 (2) 计算

$$\frac{dT_u}{dt} = \frac{\Delta e_u - w_u - q_e - c_{v,u} T_u \dot{m}_u}{m_u c_{v,u}} \quad (2)$$

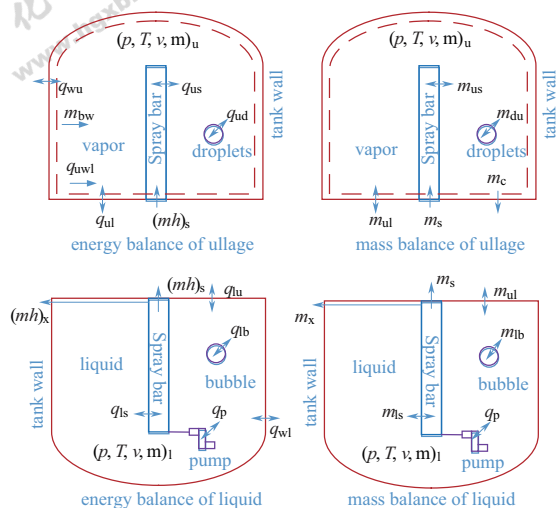


图 2 贮箱热力模型

Fig. 2 Diagram of tank thermal model

式中, $\frac{dT_u}{dt}$ 为气体温度变化率; Δe_u 为传入热气体的热量, w_u 为气体对外做功, q_e 为进出质量携带的能量, $c_{v,u}$ 为气体的比定容热容。同时, Δe_u 、 w_u 、 q_e 分别由式 (3)~式 (5) 计算。

$$\Delta e_u = q_{wu} - q_{ul} - q_{ud} - q_{us} - (mh)_s \quad (3)$$

$$w_u = p_u \frac{dv_u}{dt} \quad (4)$$

$$q_e = \left(\frac{dm_u}{dt} \right) h_g \quad (5)$$

式中, q_{wu} 为罐壁和气体之间的热流, q_{ul} 为气体和聚集液体之间的热流, q_{ud} 为气体和小液滴之间的热流, q_{us} 为气体和未浸没的喷射棒之间的热流。

气体的体积由式 (6) 计算

$$\frac{dV_u}{dt} = \frac{dV_l}{dt} + \frac{dV_{wl}}{dt} \quad (6)$$

式中, V_l 为液体体积, V_{wl} 为壁面液体体积。

气体压力变化由理想气体状态方程式 (7) 计算

$$p_u = \frac{m_u R T_u}{V_u M_u} \quad (7)$$

式中, R 为理想气体常数, M_u 为气体摩尔质量。

低温泵模型如图 3 所示, 沿泵内流体流动方向划分一维网格进行计算。泵任意时刻的转速由式 (8) 计算

$$N(t) = n_f [1 - \exp(-t/T_{na})] \quad (8)$$

式中, n_f 为设计转速, T_{na} 为转速从静止上升

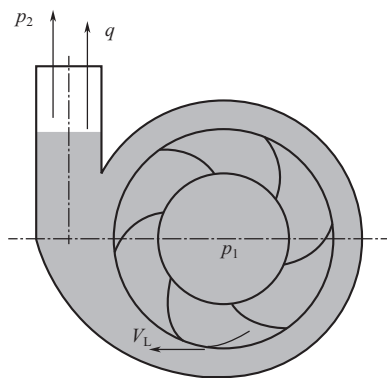


图 3 低温泵模型

Fig. 3 Cryogenic pump model

到最终转速的 63% 时所需要的时间。

扬程由式 (9) 计算

$$H_l = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} \quad (9)$$

式中, p_2 为泵出口压力, p_1 为泵入口压力。在额定转速 n_e 下, 泵的扬程 H_e 和流量 q_e 的关系可拟合成

$$H_e = A q_e^2 + B q_e + C \quad (10)$$

式中, A 、 B 、 C 为常数。本文对节流阀和换热器采用了简化处理, 给定节流阀的压降为 200 kPa, 流体经过换热器换热后温度降低 2 K。液氢贮箱的尺寸与工况参数如表 1 所示。

表 1 尺寸与计算工况参数

Table 1 Tank size and working conditions parameters

g	V	q	f	Q_v	T	p	Δp
$/m^2 \cdot s^{-1}$	$/m^3$	$/W \cdot m^{-2}$	$\%$	$/L \cdot min^{-1}$	$/K$	$/kPa$	$/kPa$
9.8	18.1	0.76	75	1070	21.5	137.9	165.5— 172.4

1.3 TVS 的仿真计算流程

TVS 系统控制逻辑的核心是低温泵与节流阀的开闭。低温泵的开闭取决于气枕压力, 当气枕压力大于压力控制带的上限 p_{max} 时, 开启低温泵, 仅用喷射棒进行喷射混合, 系统处于混合模式运行, 直到气枕压力降低到压力带下限 p_{min} 后关闭低温泵。当贮箱内液体温度对应的饱和压力上升到压力控制带的下限时, 开启低温泵的同时还是打开节流阀, 当气枕压力降低到压力带下限 p_{min} 后同时关闭低温泵和节流阀。对上述数学模型采用 Fortran 编程, 具体计算流程如图 4 所示。

2 计算结果与分析

以液氢贮箱为例计算了 TVS 系统运行后贮箱

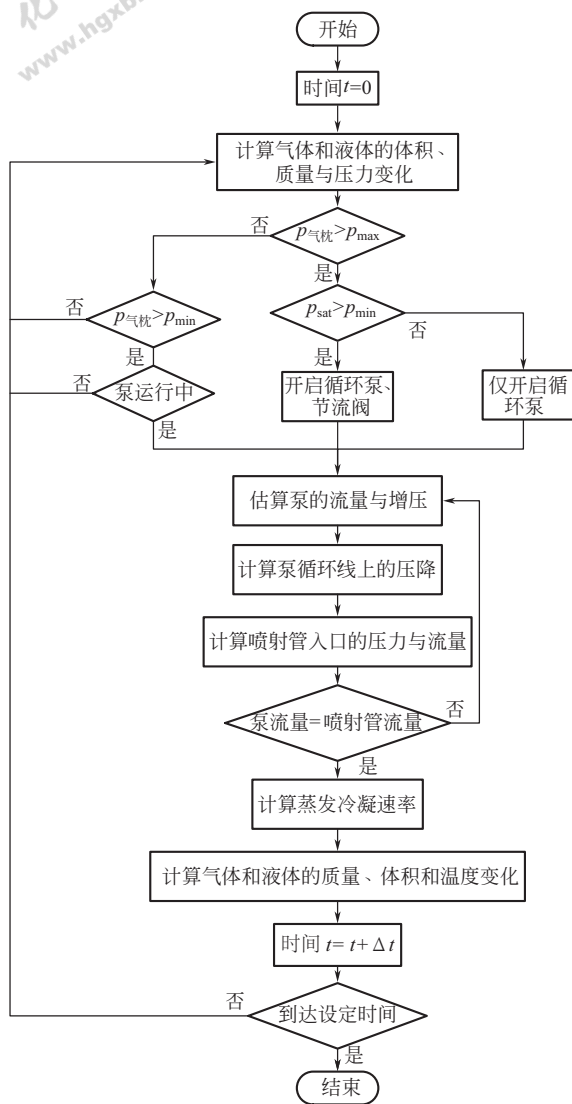


图 4 TVS 系统编程计算流程

Fig. 4 Flow chart of program for pressure control

压力变化过程。参考目前低温贮箱常用的多层绝热材料的保温性能，设置外部漏热热流为 $0.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。同时由于低温下氢气偏离理想气体较大，液氢/气氢的物性参数采用实时调用 NIST REFPROP 数据库的方式获取。分析贮箱充注率为 75% 时的自增压过程及 TVS 系统运行后气枕压力和液体温度对应的饱和压力变化情况，同时对比分析了不同运行模型对贮箱内流体热物理的影响。

2.1 贮箱自增压过程分析

在封闭液氢贮箱的最初一段时间内，贮箱处于自增压阶段。箱内气枕压力 p_u 和液相压力 p_{sat} 不断上升，如图 5 所示。从图中可以看到在自增压过程中，气枕压力上升速率为 $1.03 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。液相温度对应的饱和压力上升速率为 $0.07 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。主要原

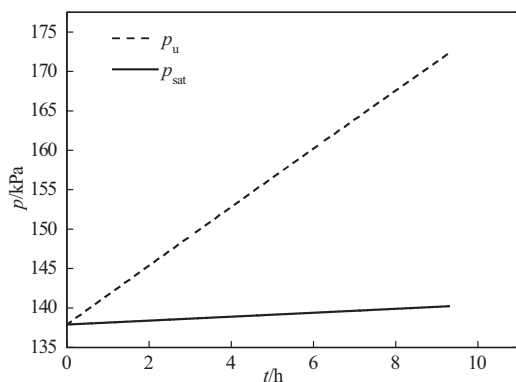


图 5 液氢贮箱自增压过程

Fig. 5 Self-pressurization process of LH_2 tank

因是受热后气体更易于膨胀，在相同空间下气体压力上升得更快。可以推测气枕区的漏热对贮箱压力上升速率的影响更大，为了减慢贮箱的升压速率需尽可能地降低气枕区域贮箱的漏热量。

2.2 TVS 压力控制特性分析

TVS 系统的压力控制特性如图 6 所示。在前期增压过程中，气枕压力上升速率远大于液体温度对应的饱和压力；当气枕压力上升到压力带上限时，TVS 系统开启混合模式运行；当气枕压力下降到压力带下限时 TVS 停止运行，贮箱又开始增压过程。自此气枕压力开始周期性变化，该模式下 TVS 可以将贮箱的压力控制在 $165.5 \sim 172.4 \text{ kPa}$ 。当液体温度对应的饱和压力上升到压力带下限时，仅混合模式已无法控制住气枕压力。此时需要开启排气模式，随着节流阀的开启气枕压力和液体温度对应的饱和压力同时下降。主要原因是排气阀开启后贮箱内气枕压力瞬间下降，此时液体的饱和温度随之下降。除此之外，低温泵内的液体有一部分经过节流阀，节流降温后的流体与主流流体换热，使得喷射出的流体温度低于贮箱内液体温度，从而使贮箱内液体的温度降低，对应的饱和压力随之降低。与 Hastings 等^[16]在相同的充注率 75%，单位面积漏热 $0.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 工况下的实验数据对比可以发现，TVS 模型可以成功预测贮箱增压过程及 TVS 系统启动后贮箱压力的变化过程。但是在自增压阶段理论计算的增压速率略大于实验数据，模型计算的增压时间为 32000 s，而实验数据为 61000 s。主要原因是此模型为采用集总参数法的零维模型，不考虑气枕和液体的热分层，同时忽略气液界面的能量传递。然而，一旦 TVS 开始运行，理论计算压力变化曲线与实验数据吻合较好。

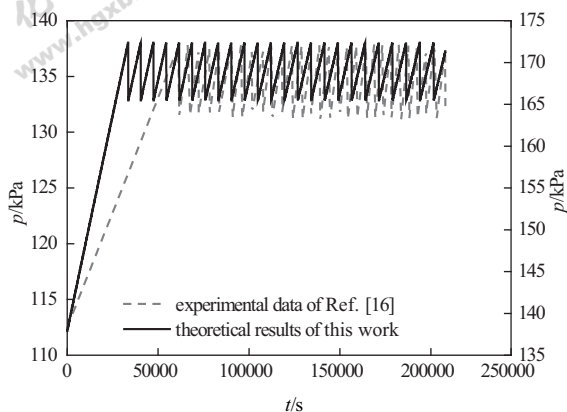


图 6 热力学排气系统运行特性

Fig. 6 Operating characteristics of thermodynamic venting system

2.3 混合模式与排气模式的对比分析

为了便于对比两种运行模式下贮箱压力变化的不同,在相同时间内各自选取一个循环进行对比。如图 7 所示,排气模式下气枕压力的下降速度为 $639 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 约为混合模式下气枕压力的下降速度 $95.8 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 7 倍。这主要是由于排气模式下当排气阀开启后贮箱气枕压力会瞬间下降,而混合模式时气枕压力的下降只能依靠气体与喷射流体的换热,其压力下降速率必然小于排气模式下的降压速率。

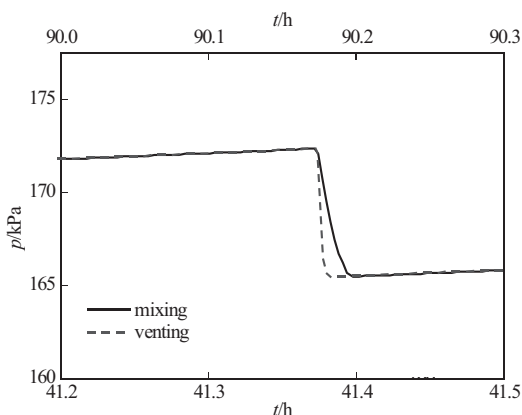


图 7 混合模式与排气模式降压速率对比

Fig. 7 Depressurization rate comparison of mixing and venting modes

从图 8 可以看到,排气模式下气枕压力上升的速度 $0.89 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 略小于混合模式下气枕上升的速度 $0.93 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 单个周期内气枕压力的上升时间延长了 0.15 h。这是在流体循环喷射混合条件下增加了节流制冷效应所带来的收益,降低了气枕的过热度。同时,液氢温度与饱和压力下降,而混

合模式下液氢的温度与饱和压力是上升的,这就使得排气模式下液氢由于外界漏热引起的蒸发量减小。由于 TVS 的周期性运行,每个周期内排气模式下延长的气枕压力上升时间会得到成倍的增加,这样更有利于低温液体的长期贮存。

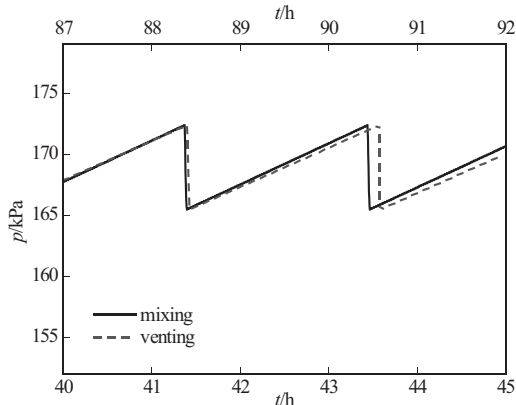


图 8 混合模式与排气模式升压速率对比

Fig. 8 Pressure rise rate comparison of mixing and venting modes

图 9 给出了在一次 TVS 升压-排放循环中,混合模式和排气模式同时先后出现的情况。前期在混合模式下,喷射流体与气枕换热,气枕压力随之下降。由于液体饱和温度对应的压力已处于较高值且依然逐渐升高,当气枕压力下降到 169 kPa 时仅依靠混合模式的换热降压已无法继续降低气枕压力,此时必须开启排气模式,随着排气阀的打开,贮箱气枕压力迅速降低,同时液体饱和温度降低,其对应的饱和压力也随之降低。

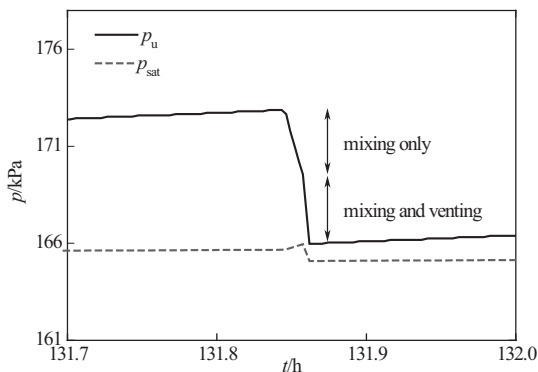


图 9 TVS 混合-排气运行模式

Fig. 9 Mixing-venting mode of TVS

3 结 论

本文对低温贮箱内流体及 TVS 系统进行了数

学建模, 并进行 Fortran 编程, 针对液氢贮箱内 TVS 的工作过程进行了仿真计算。结果表明, TVS 可以有效地将液氢贮箱的压力控制在所需的小范围内周期性变化。同时分析了地面状态及微重力状态下液氢贮箱的升降压特性。得到如下结论。

(1) 在外部漏热热流为 $0.76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 贮箱气枕的升压速率远长于为液相区升压速率。气体在相同空间内更易于膨胀, 减小贮箱气枕区域漏热量可以有效减慢贮箱的升压速率。

(2) 排气模式下气枕降压速率快于混合模式下气枕压力的下降速率。同时单个周期内该模式下气枕压力上升时间略长于混合模式下的升压时间。

(3) 综合对比两种模式, 可以发现混合模式只能降低贮箱气枕压力, 而排气模式在降低气枕压力的同时可以有效地降低液体温度对应的饱和压力。

References

- [1] FLACHBART R, HASTINGS L, MARTIN J. Testing of a spray bar zero gravity cryogenic vent system for upper stages [C] //The 35th AIAA/SAE /ASME /ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Los Angeles, California, 1999: 1-10.
- [2] HEDAYAT A, HASTINGS L, BAILEY J, *et al.* Thermodynamic venting system modeling and comparison with liquid hydrogen test data [C] //The 39th AIAA/SAE /ASME /ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, Alabama, 2003: 1-8.
- [3] FLACHBART R, HASTINGS L, HEDAYAT A, *et al.* Testing of a spray-bar thermodynamic vent system in liquid nitrogen [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2006, **823** (1): 240-247.
- [4] HEDAYAT A, NELSON S, HASTINGS L, *et al.* Analyzing the use of gaseous helium as a pressurant with cryogenic propellants with thermodynamic venting system modelling and test data [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 2008, **985** (53): 1491-1498.
- [5] FLACHBART R, HASTINGS L, HEDAYAT A, *et al.* Thermodynamic vent system performance testing with subcooled liquid methane and gaseous helium pressurant [J]. *Cryogenics*, 2008, **48** (5/6): 217-222.
- [6] VANOVERBEKE T. Thermodynamic vent system test in a low earth orbit simulation [C] //The 40th AIAA/SAE /ASME /ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida, 2004: 1-11.
- [7] 刘展, 厉彦忠, 王磊, 等. 低温推进剂蒸发量控制试验研究进展与展望 [J]. *低温工程*, 2013, **5**: 57-64.
LIU Z, LI Y Z, WANG L, *et al.* Progress of study and prospect on experiments of boil-off losses control of cryogenic propellant [J]. *Cryogenics*, 2013, **5**: 57-64.
- [8] 刘展, 厉彦忠, 王磊, 等. 低温推进剂长期在轨压力管理技术研究进展 [J]. *宇航学报*, 2014, **35** (3): 254-261.
LIU Z, LI Y Z, WANG L, *et al.* Progress of study on long term in-orbit pressure management technique for cryogenic propellant [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, **35** (3): 254-261.
- [9] 胡伟峰, 申麟, 杨建民, 等. 低温推进剂长时间在轨的蒸发量近年技术进展 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2009, **6**: 28-34.
HU W F, SHEN L, YANG J M, *et al.* Progress of study on transpiration control technology for orbit long-term applied cryogenic propellant [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2009, **6**: 28-34.
- [10] 胡伟峰, 申麟, 彭小波, 等. 低温推进剂长时间在轨的蒸发量控制关键技术分析 [J]. *低温工程*, 2011, **3**: 59-66.
HU W F, SHEN L, PENG X B, *et al.* Key technology analysis of boil-off control study on cryogenic propellant long-term application on orbit [J]. *Cryogenics*, 2011, **3**: 59-66.
- [11] 李鹏, 孙培杰, 包轶颖, 等. 低温推进剂长期在轨储存技术研究概述 [J]. *载人航天*, 2012, **18** (1): 30-36.
LI P, SUN P J, BAO Y Y, *et al.* Cryogenic propellant long-term storage on orbit technology overview [J]. *Manned Spaceflight*, 2012, **18** (1): 30-36.
- [12] 朱洪来, 孙沂昆, 张阿莉, 等. 低温推进剂在轨贮存与管理技术研究 [J]. *载人航天*, 2015, **21** (1): 13-18.
ZHU H L, SUN Y K, ZHANG A L, *et al.* Research on on-orbit storage and management technology of cryogenic propellant [J]. *Manned Spaceflight*, 2015, **21** (1): 13-18.
- [13] 颜露, 黄永华, 吴静怡, 等. 低温推进剂在轨储存热力学排气系统 TVS 研究进展 [J]. *低温与超导*, 2015, **43** (2): 5-13.
YAN L, HUANG Y H, WU J Y, *et al.* Development of thermodynamic venting system technology for cryogenic propellant storage on orbit [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2015, **43** (2): 5-13.
- [14] 马原, 厉彦忠, 王磊, 等. 低温燃料贮箱热力学排气系统优化分析与性能研究 [J]. *低温与超导*, 2014, **42** (7): 10-15.
MA Y, LI Y Z, WANG L, *et al.* Optimized analysis and performance study on thermodynamic vent system in cryogenic fuel tank [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2014, **42** (7): 10-15.
- [15] 刘展, 厉彦忠, 王磊, 等. 在轨运行低温液氢箱体蒸发量计算与增压过程研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, **49** (2): 135-140.
LIU Z, LI Y Z, WANG L, *et al.* Evaporation calculation and pressurization process of on-orbit cryogenic liquid hydrogen storage tank [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, **49** (2): 135-140.
- [16] HASTINGS L, FLACHBART R, MARTIN J, *et al.* Spray bar zero-gravity vent system for on-orbit liquid hydrogen storage [R]. NASA/TM, 2003: 212926.