

液氧贮箱增压过程研究

陈春富, 李 茂, 王树光

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 采用数值模拟方法对液氧贮箱增压过程进行研究。贮箱内流场采用流体体积函数 (VOF) 多相流模型考虑, 选择标准双方程 $k-\varepsilon$ 湍流模型分析湍流效应, 气液两项之间的热量、质量转移通过自定义程序 (UDF) 求解。获得了贮箱压力、排液流量、气垫温度、液氧温度对贮箱内流场温度分布的影响。计算结果表明, 在稳定增压过程中, 贮箱液面无扰动, 贮箱内温度分层分布; 各参数变化时, 对贮箱内温度分布的影响主要是温度梯度的变化, 并且各工况下液面附近和扩散器附近温度梯度基本相同。

关键词: 液氧贮箱; 增压; 温度分布; 数值模拟

中图分类号: V434*.13-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 04-0080-05

Numerical study on pressurization process of liquid oxygen tank

CHEN Chun-fu, LI Mao, WANG Shu-guang

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Pressurization process of the liquid oxygen tank was studied with a numerical simulation method. Volume of fluid (VOF) model was used for flow field inside the tank. The standard $k-\varepsilon$ turbulence model was selected to analyze the turbulence effect, and a user-defined function (UDF) for phase transition was used to solve the heat and mass transfer between the liquid and the ullage gas. The effects of the factors including the tank pressure, mass flow rate of liquid oxygen, ullage gas temperature and liquid oxygen temperature on the temperature distribution of flow field inside the tank were obtained. The calculated results show that the liquid surface has no disturbance and the distribution of the ullage gas temperature is stratified in the steady pressurization process; the main influence of the factors on the temperature distribution is the variation of temperature gradient; and the temperature gradient near the liquid surface and the injector is almost the same in different working condition.

Keywords: liquid oxygen tank; pressurization; temperature distribution; numerical simulation

收稿日期: 2012-12-13; 修回日期: 2013-04-17

作者简介: 陈春富 (1973—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验技术

0 引言

液体火箭发动机地面试验和飞行过程中, 需要通过增压系统增压贮箱, 维持一定的贮箱压力, 使发动机正常工作。在低温贮箱增压过程中, 贮箱内的传热传质过程极为复杂, 常温的增压气体进入低温贮箱, 与贮箱内的低温气体、贮箱壁面和低温液体表面进行换热; 在液体表面, 低温液体吸热汽化。同时, 增压气体的流动可能会对液面造成扰动, 影响对流换热, 或者使低温液体沸腾, 导致贮箱内气垫压力、温度剧烈变化, 影响增压过程^[1-2]。因此, 研究贮箱增压过程对发动机试验有重要意义。

目前, 研究人员采用零维模型、一维分层模型和二维模型分析贮箱增压过程壁面温度、气垫温度以及气垫压力随时间变化的规律^[3-8]。近些年, 随着计算机技术的发展, 计算流体力学 (CFD) 技术在科研领域得到了广泛应用。在贮箱增压过程模拟中, 采用 CFD 方法可以较为准确的获得贮箱内流场, 被很多研究者采用^[9-11]。本文采用 CFD 方法进行数值模拟, 对液氧贮箱增压过程进行研究。

1 计算模型与方法

1.1 几何模型

推进剂为液氧, 增压气体为氮气。贮箱结构如图 1 所示, 箱体由圆柱筒体和碟形封头组成, 贮箱直径 2 m, 圆柱段长度 3 m。气体扩散器开口向上, 增压气体进入贮箱后往上喷入, 避免气体直接冲击液面造成扰动, 网格数为 37 470 个。

1.2 数值仿真模型

采用 FLUENT 双精度求解器对液氧贮箱增压排液过程进行数值模拟, 计算模型为二维轴对称模型, 气体采用理想气体模型, 考虑气液定压热容 c_p 与温度的关系, 液氧密度采用 Boussinesq 模型以考虑其所受浮升力作用。增压排液过程中, 箱内始终存在气液相界面, 且相间没有互相穿插, 采用流体体积函数 (VOF) 多相流模型计算

气液相界面, 湍流模型采用标准双方程 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 气液两相之间的能量与质量交换采用 UDF 控制, 液氧与固体壁面之间的传热未作考虑, 详细描述见参考文献^[12]。采用 PRESTO 格式离散压力项, 其余项采用二阶迎风格式离散。求解过程中采用 SIMPLER 格式耦合压力与速度, 时间步长为 0.01 s。

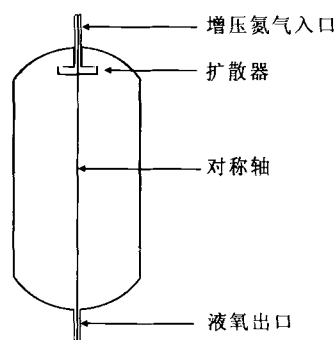


图 1 贮箱模型示意图

Fig. 1 Structural model of tank

1.3 边界条件

增压气体入口采用压力入口边界条件, 液氧出口采用压力出口边界条件。贮箱内状态为预增压完成状态 (达到额定压力), 并假定气垫温度和液氧温度相同, 非过冷氧条件下为 90 K, 过冷氧条件下为 80 K; 增压气入口温度与环境温度相同。根据发动机工况和环境状态对增压的影响, 本文选择的主要研究参数包括气垫压力 p , 排液流量 \dot{m} , 增压气温度 T_G , 液氧温度 T_L , 其中 80 K 液氧为过冷氧, 主要研究参数如表 1 所示。

表 1 研究参数

Tab. 1 Main parameters for research

p/MPa	$\dot{m}/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	T_G/K	T_L/K
0.62, 0.42, 0.82	95, 85, 75	260, 280, 300	80, 90

2 计算结果与分析

2.1 典型结果及分析

图 2 为不同时刻贮箱气液交界面位置及气垫

温度分布, 气垫压力 0.4 MPa, 增压气初始温度 300 K, 液氧初始温度 90 K。从图 2 可以看出, 在增压过程中, 贮箱内气垫温度呈现明显的分层现象, 在正常的增压过程中, 贮箱内液面处于平稳状态。增压气体从扩散器排出后, 对顶端较小区域的温度分布有一定的影响, 主体区域影响较弱, 从液面向顶端温度逐渐升高。不同时间节点, 受液面传热影响, 液面附近温度

梯度基本相同, 而在顶端区域, 受增压气体影响, 温度梯度较小。在 10 s 时, 气垫体积较小, 温度变化梯度大, 特别是气体出口与液面中间位置处的梯度最大。随试验时间增加, 温度梯度逐渐均匀。由于总计算时间较短, 且没有考虑壁面传热作用, 因此液体温度变化不明显, 壁面附近低温推进剂没有因为温度升高密度减小而向上运动。

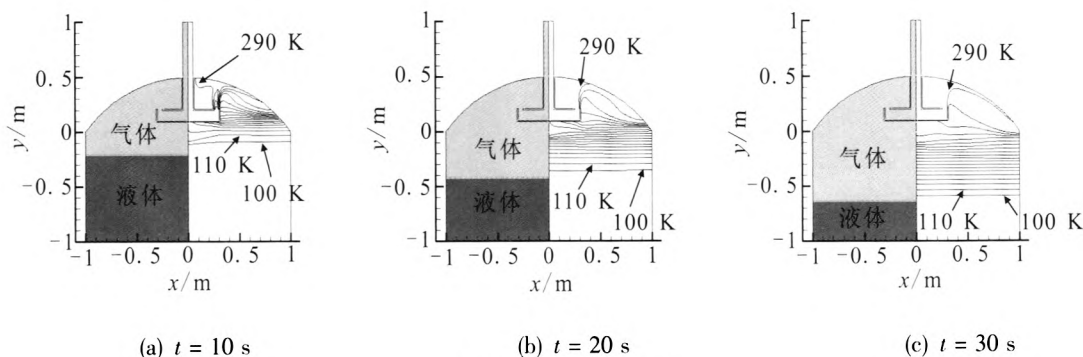


图 2 典型计算结果

Fig. 2 Typical calculation results

2.2 设计参数影响

2.2.1 气垫压力的影响分析

图 3 为排液 30 s 时不同气垫压力下贮箱内的温度分布, 压力分别为 0.42 MPa, 0.62 MPa, 0.82 MPa。在出口流量相同的情况下, 气垫压力升高对贮箱内的换热情况没有明显影响, 各压力下贮箱内主体区域温度分层情况基本相同, 不同

轴向位置温度梯度相同。主要区别是, 由于气垫压力升高, 增压气密度变大, 增压流量变大, 因此对扩散器出口附近的温度分布有一定的影响。而在液面附近, 其传热主要受液面温度影响, 液氧热容大, 传热快, 液氧温度基本稳定, 在液面无扰动情况下, 液面附近的对流换热情况基本不变, 因此, 液面附近温度梯度基本一致。

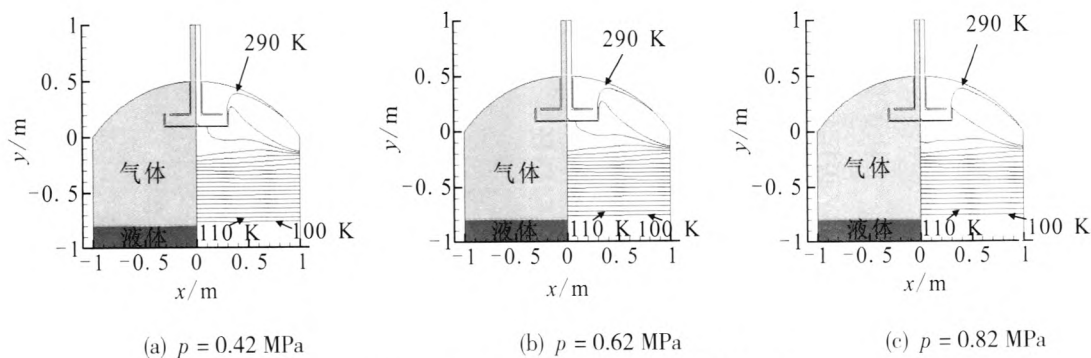


图 3 不同气垫压力下的贮箱内温度分布

Fig. 3 Temperature distributions in tank at different ullage gas pressures

2.2.2 排液流量的影响分析

图 4 为不同排液流量条件下的贮箱内气垫温

度分布, 排液流量通过降低贮箱出口压力控制。排液流量增加, 增压氮气流量增加, 但 3 种排液

工况下贮箱内温度分布基本一致, 对贮箱内温度分布基本没有影响。在不考虑壁面换热的情况下, 贮箱内换热主要依靠气液交界面的对流换热以及气垫内的对流换热。在气液面附近温度梯度

维持不变的情况下, 换热量没有有显著变化。因此, 即便排液流量增加, 只要气液交界面的换热没有破坏, 对贮箱内气体温度不会产生明显影响。

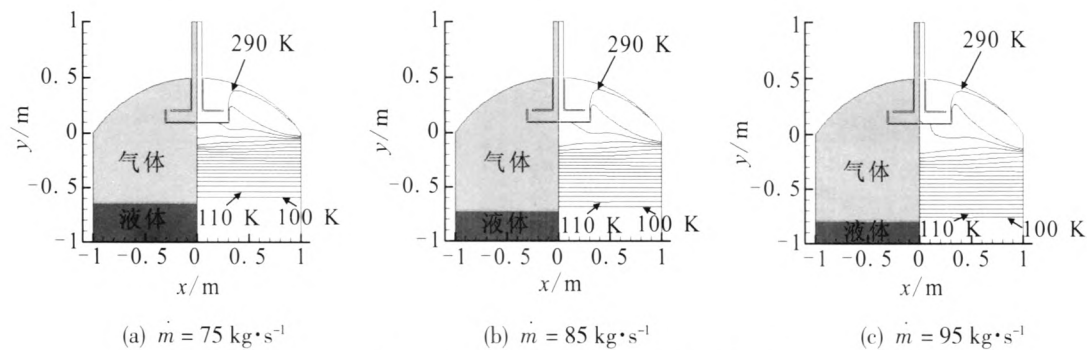


图 4 不同排液流量下的贮箱内温度分布

Fig. 4 Temperature distributions in tank at different mass flow rates of liquid oxygen

2.2.3 增压气体温度的影响分析

图 5 为不同增压气体温度下的主内温度分布, 增压气体温度分别为 260 K, 280 K, 300 K。图示结果表明, 增压气温度增加对贮箱内温度分布的主要影响是温度梯度减加, 变化比较明显的区域为液面与气体入口的中间部分。在液面, 受

传热的影响, 不同工况下温度梯度基本相同; 在增压气出口, 由于大量增压气进入, 温度梯度主要受增压气体温度影响, 温度梯度较小; 当增压气温度增加时, 气液之间的温差变大, 而扩散器和液面附近的温度梯度均比较稳定, 在两者之间区域, 温度梯度较大。

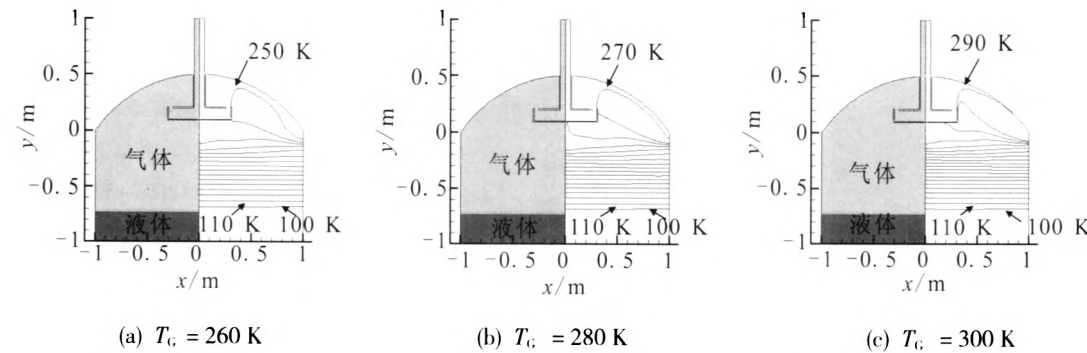


图 5 不同增压气体温度下的贮箱内温度分布

Fig. 5 Temperature distributions in tank at different pressurization gas temperatures

2.2.4 液氧温度的影响分析

在运载火箭中, 为提高火箭发动机低温贮箱的充装率、保证发动机入口温度, 常采用过冷液氧技术。在火箭发动机试车中, 为模拟火箭飞行的实际情况, 也采用过冷气进行试验。因此, 本

文研究了液氧温度变化时对贮箱内温度分布的影响。图 6 为不同液氧温度下贮箱内温度分布。从图示结果可以看出, 在稳定增压过程中, 液氧温度变化对气液交界面处温度有影响, 而对贮箱内温度整体分布影响不明显。

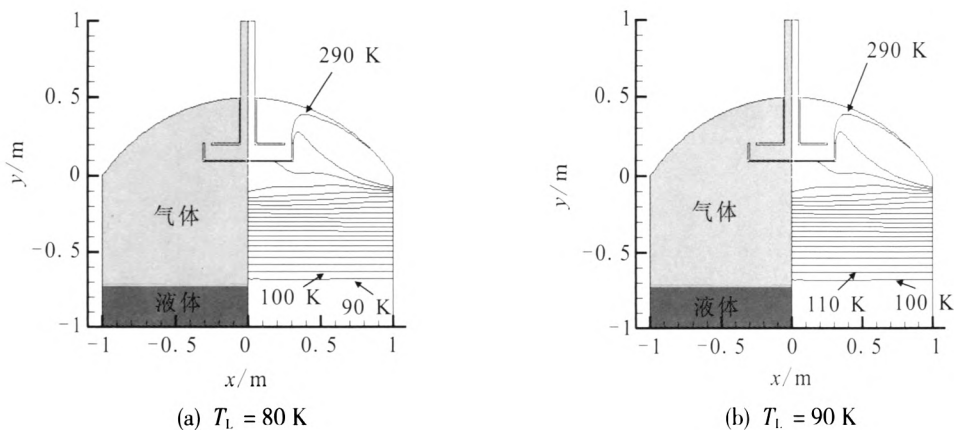


图 6 不同液氧温度下的贮箱内温度分布

Fig. 6 Temperature distributions in tank at different liquid oxygen temperatures

3 结论

从计算结果可以看出,对于扩散器开口朝上的贮箱,在稳定增压过程中,贮箱内温度分层分布。气垫压力、增压气体温度、排液流量及液体温度等参数的变化对贮箱内温度分布的影响主要是温度梯度的变化。在液面稳定的情况下,稳定增压时贮箱内换热为稳定的状态。在进一步的研究工作中,将考虑壁面传热的影响,并将研究液面受到扰动等异常情况时的贮箱内传热传质情况。

参考文献:

- [1] 范瑞详,田玉蓉,黄兵.新一代运载火箭增压技术研究[J].火箭推进,2012,38(4):9-16.
- [2] 王赞社,顾兆林,冯诗愚,等.低温推进剂贮箱增压过程的传热传质数学模拟[J].低温工程,2007(6):28-32.
- [3] 张勇,李正宇,李强,等.低温液体贮箱加压排液过程计算模型比较[J].低温工程,2007(2):25-27.
- [4] 王磊,厉彦忠,李翠,等.液体火箭贮箱增压排液过程三种气枕模型的数值对比[J].航空动力学报,2011,26(9):1995-2000.
- [5] 孙威,方杰,蔡国飙. N_2O 单组元微推进系统贮箱自增压特性[J].北京航空航天大学学报,2009,35(11):1290-1293.
- [6] 代予东,赵红轩.运用数学方法模拟推进剂贮箱增压[J].火箭推进,2003,29(3):34-40.
- [7] ZILLIAC G, KARABEYOGLU M A. Modeling of propellant tank pressurization, AIAA 2005-3549[R]. USA: AIAA, 2005.
- [8] 张超,鲁雪生,田丽亭.火箭低温推进剂增压系统数学模型[J].低温与超导,2005,33(2):35-38.
- [9] BARSİ S, KASSEMI M. A tank self-pressurization experiment using a model fluid in normal gravity[J]. Cryogenics, 2008, 48(3/4): 122-129.
- [10] BARSİ S, KASSEMI M. Numerical and experimental comparisons of the self-pressurization behavior of LH_2 tank in normal gravity, AIAA 2007-5524[R]. USA: AIAA, 2007.
- [11] GRAYSON G, LOPEZ A, CHANDLER F, et al. CFD modeling of helium pressurant effects on cryogenic tank pressure rise rates in normal gravity, AIAA 2007-5524[R]. USA: AIAA, 2007.
- [12] 王磊,厉彦忠,李翠,等.液体火箭贮箱增压排液过程温度场数值研究[J].航空动力学报,2011,26(8):1893-1899.

(编辑:张永秀)