

DOI: 10.7652/xjtuxb201609006

# 地面停放低温液氧贮箱热物理过程研究

刘展<sup>1</sup>, 孙培杰<sup>2</sup>, 李鹏<sup>2</sup>, 厉彦忠<sup>1</sup>, 晋永华<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 上海宇航系统工程研究所, 201108, 上海)

**摘要:** 针对低温推进剂箱体射前停放阶段,采用CFD技术数值研究了某低温液氧贮箱在地面停放阶段所经历的开口放置及高温气氧预增压过程。详细分析了该过程中箱体的压力变化、气液相变以及热分层现象。通过与相关试验结果对比,验证了本数值模型的有效性。计算结果表明:在液氧箱体开口停放阶段,在外部漏热下,箱体内部将出现剧烈的沸腾相变现象,并伴随着大量气泡的产生。随着时间的增加,用于低温流体相变的热量主要来自于外部漏热,此时相变过程主要发生在气液界面。在约150 s时,相变强度逐渐趋于稳定。经过250 s的地面开口停放,蒸发气体排放量约6.88 kg。当低温箱体封闭,预增压过程开始,箱体压力将在所设定的压力上下限内波动变化。由于气相过热、液相过冷,在整个过程中气相都处于冷凝状态。随着高温气体的注入,气相质量呈现波动变化,由15.84 kg增加到27.27 kg。液相质量则近似线性增加,由最初的12 243.10 kg增加到12 303.95 kg。气液界面以下的液相呈现出较好的温度分层,气相温度分布则受增压气体影响较大,产生了一定的扰动。

**关键词:** 低温液氧箱体;地面停放;热物理过程;增压

**中图分类号:** V511 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)09-0036-07

## Research on the Thermal Physical Process of Cryogenic Liquid Oxygen Tank in Ground Parking

LIU Zhan<sup>1</sup>, SUN Peijie<sup>2</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, LI Yanzhong<sup>1</sup>, JIN Yonghua<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** The computational fluid dynamics (CFD) was used to investigate the pressurization process of cryogenic liquid oxygen tank including the open parking and pre-pressurization stages in the ground parking before launch. The tank pressure change, liquid-vapor phase change and fluid thermal stratification were analyzed in detail. The present CFD model was proven to have effective prediction ability in comparison with the experimental results. The results showed that under the external heat leakage, the intensive boiling phase change occurred in the tank with a large amount of gas bubbles moving upwards in the fluid during the ground open parking stage. As the heat used to generate phase change became less and mainly from the external heat leakage, the phase change intensity became weak and tended to stable in about 150 s, with the phase change focused on the interface. The total evaporation loss was about 6.88 kg for 250 s ground open parking. When the cryogenic liquid oxygen tank was locked and the ground pre-

收稿日期: 2016-01-27。 作者简介: 刘展(1988—),男,博士生;厉彦忠(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376142);航天低温推进剂技术国家重点实验室开放课题(SKLTSCP1505);上海航天核攀项目(ZY2015-015)。

网络出版时间: 2016-06-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160608.1034.004.html>

pressurization started, the tank pressure fluctuated between the maximum and minimum pressure limits. As the ullage was superheated and the liquid was subcooled, the ullage condensation appeared in the whole pre-pressurization process. With the high temperature gas injecting into the tank, the ullage mass presented fluctuation change, with the value increasing from 15.84 kg to 27.27 kg. While the liquid mass displayed an almost linear increasing tendency, and rose from 12 243.10 kg to 12 303.95 kg. An obvious thermal stratification appeared in the liquid region below the liquid-vapor interface, while the ullage was largely influenced by the injection gas with some disturbances.

**Keywords:** cryogenic liquid oxygen tank; ground parking; thermal physical process; pressurization

低温推进剂贮箱在地面停放阶段,将依次经历开口停放以及闭口预增压过程。在外部空气强制对流或自然对流的影响下,研究低温箱体的地面停放热物理过程对确定低温箱体发射的初始状态具有重要意义。

有关低温贮箱的增压过程,研究人员开展了大量的研究。部分国外研究人员针对低温贮箱的增压过程开展了地面原理性试验,验证了箱体的增压过程以及相关的流体温度分层情况<sup>[1]</sup>。在数值计算方面,不同的数值计算模型,如 Lump-vapor 模型<sup>[2]</sup>、Active-vapor 模型<sup>[3]</sup>、EOF 模型<sup>[4]</sup>、自适应的 Eulerian-Lagrangian 方法<sup>[5]</sup>以及 VOF 方法<sup>[6-7]</sup>,都得到了有效的发展;在数值模拟软件上,除了常用的 Fluent、CFX 软件,Flow-3D 软件<sup>[8-9]</sup>也被应用在箱体增压过程中。通过数值模拟,可有效预测箱体的增压过程,展示箱体内部各物理场分布。国内研究人员在低温箱体增压方面也做了部分研究。代予东针对推进剂贮箱的增压过程,提出了一种数学方法来模拟箱内的增压、传热和传质过程<sup>[10]</sup>。范瑞祥针对高温氦气增压液氧箱体,充分考虑了气氦与贮箱壁面间的换热,建立了一种用于计算贮箱壁温的一维模型<sup>[11]</sup>。陈春富采用标准  $k-\epsilon$  模型数值研究了液氧贮箱的增压排液过程<sup>[12]</sup>。文献<sup>[13]</sup>采用 CFD 技术研究了低温贮箱的压增过程,对增压过程中所涉及到的物理场变化进行了分析介绍。文献<sup>[14]</sup>考虑了低温液氢箱体内部的分层情况。

通过对上述文献总结可知,研究人员采用不同方法对低温贮箱开展了增压方面的数值模拟,但对低温箱体计算的初始化往往较模糊,对箱体内部初场认识不够。在低温箱体发射之前,低温推进剂贮箱往往要经历地面开口停放、过冷补加以及地面预增压阶段(具体如图 1 所示),之后才进入发射阶段。目前来看,研究人员所开展的研究主要集中在发射

后箱体内部的增压过程,对射前低温贮箱所经历的热物理过程研究较少。因此,本文针对低温火箭射前停放阶段,采用数值手段着重研究低温贮箱在地面开口停放以及预增压过程箱体内部物理场分布,对箱体的压力变化、气液界面相变以及流体分层现象进行了详细的分析。本文所做工作不仅能为低温箱体射前增压过程提供较为合理的初始物理场,同时可为低温贮箱系统设计提供一定的技术参考。

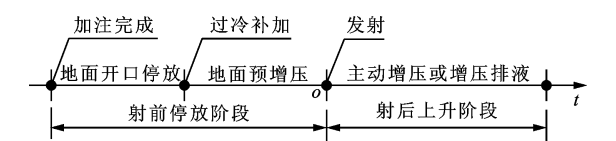


图 1 设计流程

1 物理模型

本处选取某型低温液氧箱体作为研究对象,该箱体由柱段以及上下椭球形封头组成,箱体柱段直径 2 250 mm、高度 1 887 mm、封头高度 800 mm。金属层外包裹有绝热材料,柱段和下封头外包裹等厚度的绝热材料 1。上封头外部包裹变厚度绝热材料 2,其厚度从与筒段连接处的 20 mm 增加到封头顶部的 80 mm。金属壁与绝热层的各物性参数详见表 1。箱体液氧初始液位为 2 962 mm,气枕初始温度为 170 K,液相初始温度为 88.6 K。

表 1 箱体壁面及绝热层参数

| 物性                                                  | 金属壁   | 绝热材料 1 | 绝热材料 2 |
|-----------------------------------------------------|-------|--------|--------|
| 厚度/mm                                               | 2.4   | 20     | 20~80  |
| $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$                  | 2 800 | 40     | 75     |
| $c_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$    | 830   | 1 470  | 1 000  |
| $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ | 159   | 0.03   | ①      |

①:  $0.013\ 19+1.436\ 51\times 10^{-7}\ T+1.587\ 3\times 10^{-7}\ T^2$

低温液氧贮箱在发射前,先在地面开口停放 2

~3 h,之后进行液氧过冷补加。当液位达到所设定的液位高度时,贮箱封闭,开始地面预增压过程。贮箱上封头开有直径为 200 mm 的增压气体入口,增压气体采用 360 K 高温气氧。预增压时间约 18 min,贮箱增压压力为 0.405 MPa,安全压力为 0.47 MPa。外部大气压力为 85.495 kPa。箱体柱段部分所测外部风速约 10 m/s,下封头风速 3 m/s。

## 2 计算设置

### 2.1 初始设置

采用前处理器 Gambit 2.4.6 对所研究液氧箱体进行分区网格划分。网格划分分为 3 个区域,即流体区、金属壁区和绝热材料区。流体区根据箱体结构分别对箱体柱段以及上下封头划分网格;柱段划分结构化网格,上下封头为非结构网格;金属壁面以及绝热层分别划分网格,紧贴壁面处采用边界层网格。根据箱体结构特征,同时考虑节省计算资源,采用二维轴对称面网格来预测该物理过程。通过计算对比最终选定计算网格数约为 43 000。

采用 ANSYS Fluent 15 双精度求解器对该物理过程进行非稳态数值求解,计算时间步长为 0.002 s。选用 VOF 两相流模型捕捉气液界面运动。为了准确预测流体与固壁间的耦合换热作用,采用标准  $k-\epsilon$  模型<sup>[7]</sup>来精确计算紧贴壁面处的流动换热过程。压力速度耦合项选用 PISO 算法,其他参量均采用二阶迎风格式。增压入口设为质量入口边界。另外,气相当做理想气体处理;液相密度采用 Boussinesq 假设,其余参数均为定值。

### 2.2 相变模型

在外部漏热下,气液界面会发生传热传质过程。计算过程中,可通过对比网格温度  $T_{\text{cell}}$  与饱和温度  $T_{\text{sat}}$  的相对大小来作为相变发生的判据。相变模型<sup>[7,13]</sup>具体如下。

当  $T_{\text{cell}} \geq T_{\text{sat}}$  时,液相蒸发

$$\dot{m}_v = C(1 - \alpha_v)\rho_l |T_{\text{cell}} - T_{\text{sat}}| / T_{\text{sat}} \quad (1)$$

当  $T_{\text{cell}} < T_{\text{sat}}$  时,气相冷凝

$$\dot{m}_l = C\alpha_v\rho_v |T_{\text{cell}} - T_{\text{sat}}| / T_{\text{sat}} \quad (2)$$

式中: $\dot{m}$  为质量转移速率; $\alpha_v$  为体积分;  $C$  为相变强度控制因子;下标 l、v 分别代表液相与气相。能量转移速率  $S_h = -\dot{m}_v h_{\text{fg}}$ ,  $h_{\text{fg}}$  为液相蒸发所需气化潜热。基于上述模型,通过编写相变自定义函数来求解箱体增压过程。在计算过程中,相变温度与相变压力的数值可通过 NIST 获得,有效拟合后输入数值计算模型。在本文所计算温度区间,两者满足

如下关系

$$T = 82.33 + 8.70 \times 10^{-5} p - 6.98 \times 10^{-11} p^2$$

### 2.3 边界条件

低温液氧箱体在地面停放阶段,其柱段及上下封头将受到强制对流的影响。当外部风速为 10 m/s 时,箱体柱段将受到近似外掠圆管的强制对流,其换热满足如下关联式<sup>[15]</sup>

$$Nu = \begin{cases} 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3} & 40 < Re < 4\,000 \\ 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3} & 4\,000 < Re < 40\,000 \\ 0.026 6 Re^{0.805} Pr^{1/3} & 40\,000 < Re < 400\,000 \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha = \lambda_a Nu / D \quad (4)$$

式中: $Re$  中特征长度为柱段外径  $D$ ,特征速度为来流速度  $u_\infty$ ;  $\alpha$  为强制对流换热系数; $\lambda_a$  为来流气体导热系数。计算中定性温度取  $(T_w + T_\infty)/2$ ,  $T_w$  为壁面温度,  $T_\infty$  为来流温度。这里采用试凑法对箱体壁面温度进行预估,然后根据相关公式计算箱体壁面与外部气流间的对流换热系数。

长时间停放,箱体壁面向内部的漏热达到相对稳定。箱体壁面与外部空气的对流换热应与通过其向箱体内部的导热相等,即

$$\alpha(T_\infty - T_w) = \lambda \frac{T_w - T_l}{\delta} \quad (5)$$

式中: $\lambda$  为绝热层导热系数; $\delta$  为绝热层厚度。根据该关系可迭代求解箱体壁面温度。通过计算,当外部气流温度在 253.15~313.15 K 之间时,  $\alpha$  在 16~23 W/(m<sup>2</sup>·K) 之间,箱体壁面温度在 240~300 K 之间。为详细反映外部气流与箱体壁面间的换热,可通过自定义函数 UDF 实现  $\alpha$  随时间的变化。

对于贮箱下封头,其所受风速较小,为 3 m/s。考虑到下封头为椭球型结构,因此本处采用外掠球体对流公式<sup>[15]</sup>进行计算

$$Nu = 2 + (0.4 Re^{1/2} + 0.06 Re^{2/3}) Pr^{0.4} (\eta_\infty / \eta_w)^{1/4} \quad (6)$$

这里,定性温度取来流温度 283.15 K;特征长度为等价球体直径; $\eta_\infty$  和  $\eta_w$  分别为来流温度和箱壁温度对应的空气黏度;使用范围为  $0.71 < Pr < 380$ ,  $3.5 < Re < 7.6 \times 10^4$ 。同样,采用试凑法对该部分换热进行迭代计算,最终解得箱体后底与外部气流间的对流换热系数在 5~6 W/(m<sup>2</sup>·K) 之间。

箱体上封头由于受气流影响不大,可视为定壁面边界条件,对本文所研究工况,箱体上封头壁面温度取 288 K。

3 模型验证

针对德国某低温液氮地面晃动试验<sup>[16]</sup>,选取箱体增压段进行模型验证。低温杜瓦瓶由 0.505 m 高的柱段以及 0.145 m 高的半球形下封头组成,杜瓦瓶直径为 0.29 m,初始液位高度为 0.29 m。箱体初始压力为外部大气压,在外部漏热(约 6.0 W)下进行箱体的自增压过程。为节省计算时间,本处选取试验工况的前 600 s 进行数值模拟验证,计算模型设置均与 2.1 节相同。验证结果如图 2 所示,容易看出,该数值模型较好地预测了箱体的增压过程,可将计算误差控制在 5% 以内,因此后续的计算均采用该数值模型进行预测。

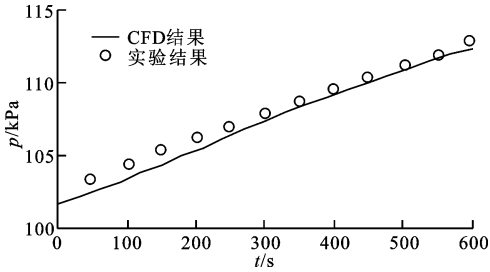


图 2 模型验证结果

4 结果分析

4.1 地面开口停放阶段

由于贮箱液氧初始温度为 88.6 K,约等于外界大气压力 85.495 kPa 所对应的饱和温度,因此液氧处于近饱和状态。在外部漏热下,低温液氧将发生剧烈沸腾相变。由于该过程计算十分耗时,本处仅进行了 250 s 数值计算,用以观察箱体内部各物理场的分布。图 3 展示了低温液氧箱体在不同时刻的相分布云图,图 4 展示了蒸发气氧排放量随时间的变化。从图中可以看出,在 0.5 s 时,箱体内部将出现剧烈相变。在浮力作用下,气泡向气液界面运动。在从 0 s 到 10 s 的过程中,伴随着低温流体的剧烈相变以及大量气泡的产生,液相质量将急剧下降,直到 30 s 时,气液界面相变过程仍较为明显,剧烈的相变过程大约持续了 30 s。在 30 s 时,气泡的产生逐渐变弱,到 50 s 时,气泡的产生趋于相对稳定,这是因为气泡产生过程是吸热过程。在气泡产生过程中,气枕被冷却,同时箱体底部的液体也被冷却。随着液相温度降低,从液相区所获得的热量越来越少,用于液体相变的热量将主要来自于外部漏热,这就导致了界面处气泡产生速率最终会趋于稳定。因此,

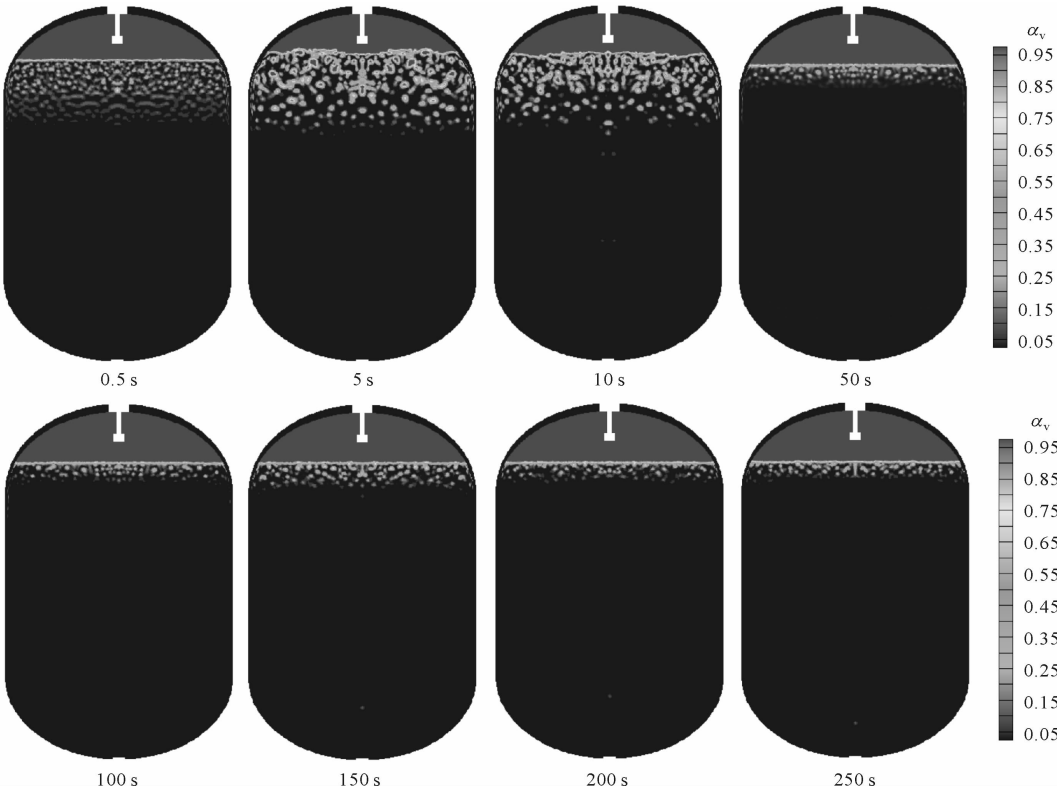


图 3 地面开口停放阶段不同时刻箱体内部相分布图

在 50~100 s 的时间内,箱体气液界面气泡相变速率基本趋于稳定。至于在 100 s 时出现的气泡产生量突然增加,主要是由于箱体内部流体温度降低、外部漏热增加,导致气泡产量增加。大约在 150 s 以后,箱体内部气泡产生速率又趋于相对稳定。在低温液氧箱体开口的 250 s 内,蒸发气体排放量约 6.88 kg。

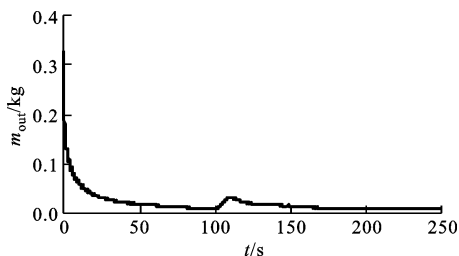


图4 地面开口停放阶段蒸发气体排放量变化

## 4.2 地面闭口预增压阶段

低温箱体在地面停放 2~3 h 后,由于低温流体的大量蒸发使得液位降低,此时过冷补加开始,当补加到所设定液位高度时,箱体封闭,地面预增压过程开始。经过地面长时间停放,箱体内部流体温度将基本一致,并最终趋于外部大气压力所对应的饱和温度。因此,在对低温液氧箱体闭口预增压的过程中,认为箱体内部初始温度为外部大气压力所对应的饱和温度,液氧保持初始液位 2.962 m。另外,由于箱体封闭前,气体增压入口与外部大气连通,因此气相温度按线性分布假设。

**4.2.1 增压性能分析** 过冷补加结束后,贮箱封闭,液氧箱体预增压开始,360 K 高温气氧以 0.18 kg/s 的质量流率注入箱体内部。随着增压气体不断注入贮箱,气枕压力将持续升高,由最初的 85.495 kPa 增加到箱体压力上限,此时停止注入气体。由于增压速度快,增压结束时,气相整体处于高温高压状态,然而随着注气停止,过冷的液相将逐渐冷却高温高压的气相。在液相的冷却下,气相温度及体积均有不同程度减小,并且部分气体开始冷凝,以致于箱体压力降低。当箱体压力降低到所设压力下限 0.405 MPa 时,贮箱又开启注气增压模式,因此气枕压力会在所设定的压力下限 0.405 MPa 与压力上限 0.47 MPa 内波动变化。该过程的实现是在气相区设置监测点来监测箱体压力,通过判断箱体压力的大小来确定是否注气以及注气何时停止,具体的操作已通过用户自定义程序 UDF 在模型中实现。图 5 展示了预增压 18 min 内气枕压力的变化曲线,可以看出在大约 78 s 时,气枕压力第一次达到增压上限,随后在液相冷却下,箱体压力逐渐降

低,并开始波动变化,直到 18 min 时预增压过程结束。

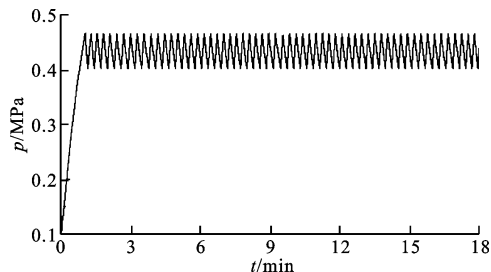


图5 气枕压力随时间的变化

图 6 给出了箱体内部气液相质量 ( $m_v$ 、 $m_l$ ) 及总质量  $m_t$  在整个预增压过程中随时间的变化。在增压开始阶段,贮箱压力低于增压压力,贮箱连续增压。随着高温气氧注入箱体,气枕压力迅速升高,气相质量增加。当箱体压力达到增压上限后,注气停止。此时气相处于高温高压状态,而液相过冷,热量将由高温高压的气体传给低温液体。在液相的冷却下,气枕开始冷凝,其质量减少。当箱体压力低于增压下限时,高温气氧再次注入箱内,新一轮箱体增压开始,气相质量又有所增加。当箱体压力达到增压上限后,注气停止,气相又会被液相冷凝,因此贮箱间歇性增压导致气相质量波动变化。在整个过程中,气相质量由 15.84 kg 增加到 27.27 kg。尽管高温气氧间歇性注入箱体内部,但整体上气相处于冷凝状态,因此液相质量是一直增加的。另外,由于箱体压力控制在 0.405~0.47 MPa 内,箱体压力所对应的饱和温度为 105.9~107.9 K,较小的温度变化导致气相冷凝速率变化也较小,因此液相质量近似线性增加,液相总质量由 12 243.10 kg 增加到 12 303.95 kg。由于气相质量相对液相质量较小,气液相总质量  $m_t$  与  $m_l$  具有相同的变化趋势,均随时间的增加而增加,整个过程中  $m_t$  由最初的 12 258.95 kg 增加到 12 331.22 kg。

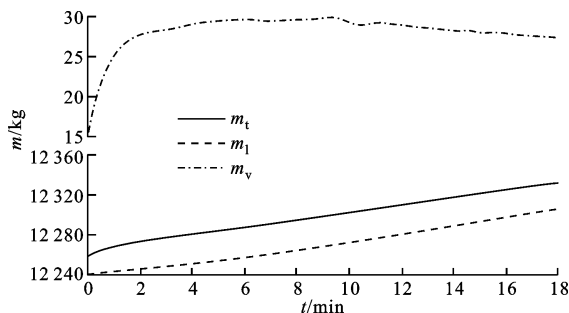


图6 气液相质量及总质量随时间的变化

**4.2.2 热分层现象** 图 7 展示了不同时刻贮箱液相区和气枕区中心线温度沿高度方向上的变化,图

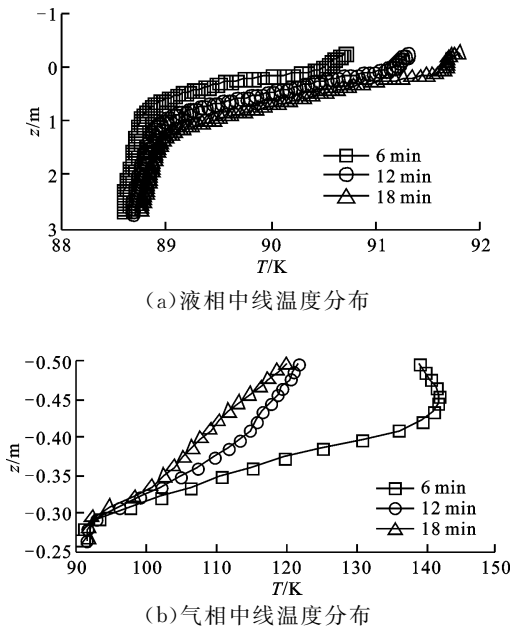


图 7 贮箱气液相中心线温度变化

8 展示了不同时刻箱体内部流体温度分布及相分布云图。从图 7a 可以看出:液相区中间区域单位高度上温度变化较大;液相顶部由于受增压气体扰动影响较大,流体温度分布呈漩涡状扩散;在外部漏热下,紧贴壁面处液体受热膨胀,在浮升力下沿壁面向上运动,直至气液界面,并在此处累积,导致液相温度分层自上而下逐渐渗透。如图 8 所示:在气液界面下一定高度,增压气体扰动的影响逐渐变弱,流体温度分层变得有规律;另外,不同时刻液相温度分布大致相同;随着时间的增加,液相温度近似平行向前推进,而气相区温度没有呈现出规律变化,出现这种现象主要与不同时刻所处的增压状态有关。6 min 时贮箱处于增压刚结束阶段,高温增压气体主要聚集在贮箱顶部;12 min 时,贮箱处于增压过程,高温气体通过扩散器进入贮箱,向贮箱顶部聚集,然后沿壁面向周围扩散;18 min 时,贮箱处于非增压阶段,

气枕区内气体温度分层基本达到稳定。不同的增压状态导致气相区能量分布不同。由于高温气体从增压入口注入箱体内部将在浮力的作用下向箱体顶部运动,因此该处热量分布不均匀,这也就导致该部分气相中线温度分布的不规律性。从图 7b 中处于  $-0.25 \sim -0.28$  m 区域的气相温度分布可以看出,时间越长,中线温度越高,也就是说分层是一直发展的,这符合分层发展的整体规律。

图 8 左边部分展示了气液相分布,很容易看出,气液界面在不同时刻均近似为水平状态。事实上,随着气相的冷凝以及增压气体的注入,气液界面是波动变化的,只不过该变化较小,没有明显地展现出来。

5 结 论

针对射前地面停放低温液氧贮箱,采用 CFD 技术数值研究了其所经历的开口停放以及封闭预增压过程,考虑了气液界面相变过程以及外部强制对流的影响,分析了该过程中箱体压力变化以及流体热分层现象。计算结果表明,该数值模型较好地预测了射前停放的相关物理过程,主要结论如下。

(1)地面开口停放阶段,在外部漏热以及气相传热的作用下,低温液氧贮箱内出现剧烈相变,并伴随着大量气泡的产生。随着时间的延长,用于低温液氧蒸发的热量将主要来自于外部壁面漏热,此时箱内相变强度减弱,主要发生在气液界面处。在大约 150 s 时,相变强度趋于相对稳定。通过 250 s 的数值计算,气体蒸发排放量约为 6.88 kg。由于液相被冷却,与液相所接触的壁面漏热会有所增加,由此将造成液相蒸发量微弱的突增,该现象在本文数值模拟中也有所体现。

(2)在液氧箱体预增压过程中,由于气相过热、液相过冷,整个过程中气枕均被液相冷却,界面处始

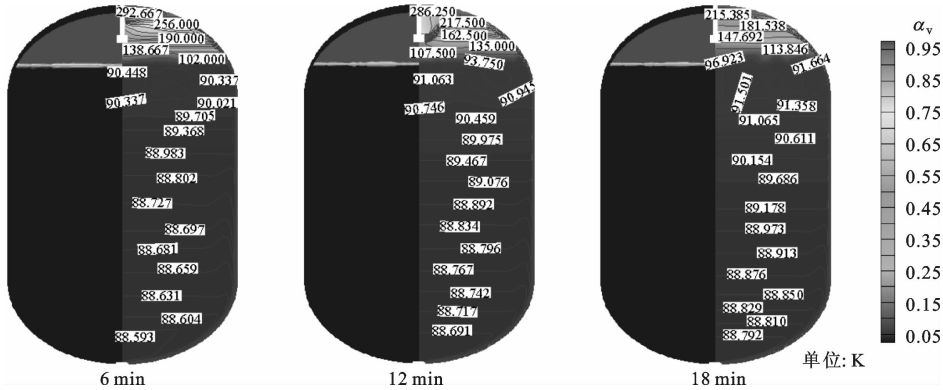


图 8 不同时刻下箱内气液相温度分布及相分布云图

终处于冷凝状态。随着高温气体的注入,气相质量呈波动变化,并由初始的 15.84 kg 增加到 27.27 kg,而液相质量近似线性增加,由 12 243.10 kg 增加到 12 303.95 kg。由于气相质量相对液相质量较小,气液相总质量与液相质量具有相同的变化趋势,均随时间的增加而增加。伴随着高温气体的注入以及气相的冷却,箱体压力在所设定的压力上下限范围内波动变化。液相气液界面下呈现出较好的温度分层,而气相由于受增压气体的影响,扰动较大。

### 参考文献:

- [1] AYDELOTT J C. Normal gravity self-pressurization of 9-inch (23 cm) diameter spherical liquid hydrogen tankage: NASA TN D-4171 [R] Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration, 1967: 1-47.
- [2] PANZARELLA C H, KASSEMI M. Self-pressurization of large spherical cryogenic tanks in space [J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2005, 42(2): 299-308.
- [3] STEPHEN B, CHARLES P, MOHAMMAD K. An active vapor approach to modeling pressurization in cryogenic storage tanks [C] // Proceedings of 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2007: 1-17.
- [4] WINTER A, MARCHETTA J. An energy of fluid (EOF) approach to modeling self pressurization in propellant tanks [C] // Proceedings of 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2007: 1-7.
- [5] SIM J, KUAN C K, SHYY W. Simulation of spacecraft fuel tank self-pressurization using Eulerian-Lagrangian method [C] // Proceedings of 49th AIAA Aerospace Science Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, VA, USA: AIAA, 2011: 1-20.
- [6] LUDWIG C, DREYER M E. Investigations on thermodynamic phenomena of the active-pressurization process of a cryogenic propellant tank [J]. Cryogenics, 2014, 63: 1-16.
- [7] WANG L, LI Y, ZHAO Z, et al. Transient thermal and pressurization performance of LO 2 tank during helium pressurization combined with outside aerodynamic heating [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 62: 263-271.
- [8] LOPEZ A, GRAYSON G D, CHANDLER F O, et al. Cryogenic pressure control modeling for ellipsoidal space tanks [C] // Proceedings of 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2007: 1-8.
- [9] LOPEZ A, GRAYSON G D, CHANDLER F O, et al. Cryogenic pressure control modeling for ellipsoidal space tanks in reduced gravity [C] // Proceedings of 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2008: 1-9.
- [10] 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.  
DAI Yudong, ZHAO Hongxuan. Numerical modeling of pressurization of a propellant tank [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2003, 29(3): 34-40.
- [11] 范瑞祥, 黄兵, 田玉蓉. 高温气体增压对液氧贮箱壁面温度影响研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2013(5): 76-81.  
FAN Runxiang, HUANG Bing, TIAN Yurong. Study of the effect of high-temperature gas pressurization on LOX tank wall temperature [J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(5): 76-81.
- [12] 陈春富, 李茂, 王树光. 液氧贮箱增压过程研究 [J]. 火箭推进, 2013, 39(4): 80-84.  
CHEN Chunfu, LI Mao, WANG Shuguang. Numerical study on pressurization process of liquid oxygen tank [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(4): 80-84.
- [13] 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 Zhan, LI Yanzhong, WANG Lei, 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.
- [14] LIU Z, WANG L, JIN Y, et al. Development of thermal stratification in a rotating cryogenic liquid hydrogen tank [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(43): 15067-15077.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 258-259.
- [16] ARNDT T, DREYER M, BEHRUZI P, et al. Cryogenic sloshing tests in a pressurized cylindrical reservoir [C] // Proceedings of 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2009: 1-10.

(编辑 荆树蓉)