0254-6124/2023/43(4)-0694-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Wen, CHEN Shuping, ZHU Ming, WANG Xin, DONG Chao, LIU Kai. Thermodynamic Characteristics of Cryogenic Liquid Krypton Tank in Microgravity (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 694–702. DOI:10.11728/cjss2023.04.2022–0040

微重力下低温液氪贮箱热力学特性*

李 文[1] 陈叔平[1] 朱 鸣[2]
王 鑫[1] 董 超[1] 刘 凯[1]

1(兰州理工大学石油化工学院 兰州 730050)

2(中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘 要 在轨滑行阶段液氪贮箱长期处于微重力环境。为研究其内部传热和相变过程对大轨道转移飞行器贮供单元工作性能的影响，建立了微重力液氪贮箱 CFD 模型，采用 VOF 法及 Lee 气液相变理论，研究了重力水平、初始液氪温度、初始充满率对微重力下液氪贮箱热分层及压力变化的影响。结果表明：常重力 g_0 下贮箱的压升率分别为 10^{-4} g_0，10^{-5} g_0，10^{-6} g_0 的 1.84 倍、1.98 倍、2.04 倍，微重力下温度分层程度（2～3 K）远低于常重力（90 K）；不同初始液氪温度下贮箱压力随时间呈先降低后升高的变化趋势，且初始液氪温度越低，贮箱压升率越小；微重力下液氪贮箱存在临界初始充满率，当初始充满率 Φ>70% 时贮箱压升率随初始充满率的升高而增大，当 Φ<70% 时贮箱压升率随初始充满率的升高而减小。

关键词 微重力，热分层，相变，增压，液氪贮箱

中图分类号 V19

Thermodynamic Characteristics of Cryogenic Liquid Krypton Tank in Microgravity

LI Wen[1] CHEN Shuping[1] ZHU Ming[2]
WANG Xin[1] DONG Chao[1] LIU Kai[1]

1(*School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050)

2(*China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing* 100029)

Abstract The cryogenic liquid krypton tank will be in microgravity environment for more than several hundred seconds during MECO (Main Engine Cut-off) phase, its internal heat transfer and phase change have an important impact on the performance of the storage and supply system of the large orbit transfer vehicle. To investigate the pressure variation and temperature distribution of on orbit cryo-

* 国家重点研发专项计划项目资助（2020YFB1506205）

2022-08-09 收到原稿，2022-11-30 收到修定稿

E-mail：lw13027578951@163.com

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

genic liquid krypton tank in microgravity conditions, establishing a CFD model of cryogenic liquid krypton tank, the effects of gravity level, initial liquid krypton temperature and initial filling rate on the thermal stratification and pressure variation of liquid krypton tank in microgravity conditions were studied by using VOF method and Lee gas-liquid phase change theory. The results show that, in the microgravity conditions, the tank pressure rise rate are lower than that in the ground condition, a smaller gravity causes a smaller tank pressure, and the pressure rise rate of tank under g_0 is 1.84 times, 1.98 times and 2.04 times of 10^{-4} g_0, 10^{-5} g_0 and 10^{-6} g_0 respectively, and the degree of temperature stratification (2～3 K) is much lower than that of ground condition (90 K). Under the microgravity level of 10^{-4} g_0, the tank pressure decreases first and then increases gradually with time at different initial liquid krypton temperatures (133.5 K, 134 K, 134.5 K), and the lower the initial liquid krypton temperature is, the smaller the pressure rise rate of the cryogenic liquid krypton tank is. Under the microgravity level of 10^{-4} g_0, there is a critical initial fill ratio (70%) of the cryogenic liquid krypton tank. When the initial fill ratio is larger than the critical value, the pressure rise rate increases with the increase of the initial fill ratio, and when the initial fill ratio is lower than the critical value, the pressure rise rate of the tank decreases with the increase of the initial fill ratio.

Key words　Microgravity, Thermal stratification, Phase change, Pressurization, Liquid krypton tank

0　引言

为适应多元化的空间任务发展需求，具有高比冲、连续可控推力等优点的电推进系统应运而生。氪气以低电离能、高原子量、高密度及小羽流发散角等特点，成为电推进最具代表性的工质[1,2]。深空探测和大轨道转移过程中氪气常采用低温液化方式贮存[3]，航天器在轨滑行期间，低温推进剂贮箱受到微重力及表面张力作用使贮箱内流体分布、温度及压力变化异于常重力，微重力下热对流逐渐减弱，表面张力效应逐渐增强。

有关贮箱热分层及压力变化现象，针对不同工况已有大量研究。Belmedani 等[4] 在地面开展了不同热通量的液氮储罐热分层实验研究，发现界面蒸发速率随热通量升高而不断增大，该实验较好地揭示了蒸发机理。Stewart 等[5] 模拟研究了液氢贮箱气液界面处的蒸发和冷凝，并预测了蒸发和冷凝速率。

关于微重力下低温推进剂贮箱内传热传质的研究主要包括理论分析和数值仿真两个方面。Panzarella 和 Kassemi 等[6,7] 采用理论分析中的 lump-vapor 法，研究了微重力条件下贮箱内压力、温度及热流密度分布规律，结果表明在微重力作用下，浮力效应仍使气相空间处于贮箱罐壁附近。但集总参数法通常将气相视为一个整体，不能很好地描述气枕温度分层现象。

在数值仿真研究方面已开展大量工作。为研究微重力下贮箱内气液分布，Yan 等[8,9] 模拟微重力条件下表面张力的作用，结果表明液体将沿壁面依附爬升，贮箱内“气枕”构型为椭球形回转体。为研究微重力贮箱分层增压规律，Aydelott 等[10] 建立气液均质模型与蒸发相变模型，对不同重力条件下的试验氢箱进行仿真并与试验对比，得出微重力条件下压力和温度的变化规律。Daigle 等[11] 提出液氢贮箱自然对流驱动温度分层的动力学模型，并采用 MATLAB 开发低温贮箱的温度分层模型，模拟不同重力条件下贮箱内温度分层情况。为研究微重力下低温推进剂贮箱分层增压的影响因素，Liu 等[12] 考虑相变及空间辐射热流的影响，分析微重力液氧贮箱温度分布，发现随重力水平降低，箱内自然对流受到抑制，箱体壁面附近的液相温度出现局部过热现象。Wang 等[13] 研究了微重力下贮箱绝热时不同初始液氢温度对贮箱压力和温度的影响，发现初始液氢过冷度越大，箱内压降速率越大。Jiang 等[14] 采用 RANS 方法结合 Lee 模型与 VOF 方法求解 Navier-stokes 方程，模拟不同重

力加速度、初始温度和初始充满率下液氢储罐内的传热过程。Vishnu 等[15] 研究了不同重力条件下环境传热和流体内部的换热，发现微重力条件下的自增压是由相变而非热分层引起的。Fu 等[16] 从表面张力、接触角及重力水平方面研究了微重力下液氢储罐的压力变化，结果表明压力及其上升速率随接触角和表面张力的增大而减小。为了使仿真结果更准确，Kartuzova 等[17] 分别采用 Sharp Interface 法和 VOF 法建立低温储罐增压的两相 CFD 模型，考虑气液相间的传质并将仿真结果与 AS-203 试验数据进行对比，发现 VOF 模型与试验一致性更好。Wang 等[18] 对比研究了 4 种相变模型对微重力环境中液氢推进剂受热蒸发过程的影响，并与国外探空火箭试验进行比较，结果表明在特定环境下，采用与环境相适应的非平衡模型将进一步提高仿真的准确性。

现有文献关于微重力下贮箱分层增压研究集中于液氢、液氧等低温推进剂，针对电推进用的低温液氪贮箱鲜有研究。与液氢、液氧相比，液氪具有比热容小、热导率低等属性，为预测液氪贮箱在轨滑行期间的热力学特性，这里以某大轨道转移飞行器用球形液氪试验贮箱为例，研究重力水平、初始充满率及初始液氪温度对贮箱分层增压的过程，为低温液氪贮箱在轨控压设计提供技术参考。

1 理论模型

1.1 VOF 模型

贮箱内部的气液界面随时间动态变化，采用流体体积函数法（VOF）可较好地处理气液两相流及气液界面的变形，确定贮箱内气液分布情况。界面的质量、动量以及能量平衡均通过加载到离散项中的源项实现，低温液氪贮箱箱体内部流动换热的连续性方程、动量方程以及能量方程分别为

$$\frac{1}{\rho_{\boldsymbol{q}}}\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_{\boldsymbol{q}}\rho_{\boldsymbol{q}}\right)+\nabla\left(\alpha_{\boldsymbol{q}}\rho_{\boldsymbol{q}}\nu_{\boldsymbol{q}}\right)\right]=\frac{1}{\rho_{\boldsymbol{q}}}S_{\alpha_{\boldsymbol{q}}}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial\left(\rho\nu\right)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho\nu\nu\right)=-\nabla p-\rho\beta g\left(T-T_0\right)+\nabla\cdot\left[\mu\left(\nabla\nu+\nabla^{\mathrm{T}}\nu\right)\right]+F_{\mathrm{vol}}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial\left(\rho E\right)}{\partial t}+\nabla\cdot\left[\nu\left(\rho E+p\right)\right]=\nabla\cdot\left(k\nabla T\right)+S_{\mathrm{h}}. \tag{3}$$

式中，相份额 α_q 满足 $\sum_{\boldsymbol{q}=1}^{n}\alpha_{\boldsymbol{q}}=1$，这里 q 代表相；变量 ρ, μ, k 通过体积分数加权计算；能量 E 按照质量加权平均求得。相组分连续性方程中界面质量传递通过源项实现，即

$$S_{\alpha_q}=\dot{m}_i\times A_i. \tag{4}$$

式中，$\dot{m}_i$ 为质量转移矢量，可由施拉格（Scharge）方程确定；A_i 为气液界面密度矢量，$A_i=|\nabla\alpha|$。

1.2 相界面力学平衡模型

气液界面的形状主要由接触角、表面张力及惯性力共同决定，接触角反映液体分子和固体分子间附着力与液体分子间内聚力的相对大小。将接触角取值为 10°，表面张力与重力对气液界面的相对影响通过无量纲数 Bond 数（Bo）表示，即

$$Bo=\frac{g\left(\rho_{\mathrm{L}}-\rho_{\mathrm{V}}\right)L^2}{\sigma}. \tag{5}$$

式中，ρ_{v} 和 ρ_{L} 分别为气液相密度，L 为贮箱特征尺寸，σ 为表面张力。重力水平为 g_0, 10^{-4} g_0, 10^{-5} g_0, 10^{-6} g_0 时的 Bo 数分别为 250000, 25, 2.5, 0.25，这里 g_0 为重力加速度。

Lin 等[19] 提出，当$Bo\gg1$时，重力起主导作用，气相位于液相上方，当 Bo<1 时，表面张力起主导作用。采用连续表面张力模型（CSF）对界面处的表面张力进行建模，界面处的表面张力以体积力源项加载到动量方程中，有

$$F_{\mathrm{vol}}=\sigma_{\mathrm{lv}}\frac{\alpha_{\mathrm{l}}\rho_{\mathrm{l}}h_{\mathrm{l}}\Delta\alpha_{\mathrm{l}}+\alpha_{\mathrm{v}}\rho_{\mathrm{v}}h_{\mathrm{v}}\Delta\alpha_{\mathrm{v}}}{0.5\left(\rho_{\mathrm{l}}+\rho_{\mathrm{v}}\right)}. \tag{6}$$

式中，σ_{lv} 为气液界面张力，$h_{\mathrm{v}}=\dfrac{\Delta\alpha_{\mathrm{v}}}{|\Delta\alpha_{\mathrm{v}}|}$ 和 $h_{\mathrm{l}}=\dfrac{\Delta\alpha_{\mathrm{l}}}{|\Delta\alpha_{\mathrm{l}}|}$ 为气液界面表面曲率。

1.3 相变模型

在外界漏热情况下，气液界面及壁面处会发生传热传质过程。采用 Lee 模型考虑传质过程，相变强度控制因子 C 根据试错法取为 0.1。计算过程中可通过如下网格温度 T_{cell} 与对应压力下饱和温度 T_{sat} 的相对大小作为相变的判据，即

$$\dot{m}=\begin{cases}C\rho_{\mathrm{l}}\alpha_{\mathrm{l}}(T_{\mathrm{cell}}-T_{\mathrm{sat}})/T_{\mathrm{sat}}, & T_{\mathrm{cell}}>T_{\mathrm{sat}}\\ & \text{(液氪蒸发为氪气);}\\ C\rho_{\mathrm{v}}\alpha_{\mathrm{v}}(T_{\mathrm{cell}}-T_{\mathrm{sat}})/T_{\mathrm{sat}}, & T_{\mathrm{cell}}<T_{\mathrm{sat}}\\ & \text{(氪气冷凝为液氪).}\end{cases} \tag{7}$$

式中，$\dot{m}$ 为质量转移速率（单位 $\mathrm{kg\cdot s^{-1}}$）；α 为容积分数，C 为相变强度控制因子（单位 $\mathrm{s^{-1}}$）；下标 l, v 分别代表

液相与气相。

能量源项 S_h 可表示为

$$S_h = \dot{m} h_{fg}. \tag{8}$$

式中, h_{fg} 为蒸发气化潜热(单位 J·kg^{-1})。

2　计算方法

考虑贮箱结构的对称性, 采用 Spaceclame 软件以中轴线为基准建立二维轴对称模型, 采用非结构化网格(见图 1), 在贮箱壁面及气液界面区域作加密处理, 并进行网格无关性验证(见图 2), 为节省计算资源并提高计算精度, 选取网格数为 26094、网格质量为 0.95、最大网格尺寸为 2 mm 的网格开展计算。

采用 FLUENT 双精度求解器进行求解, 利用 VOF 两相流模型计算箱体分层增压过程, 贮箱内气枕空间增压气体为氮气, 计算工质为液氢, 氮气采用理想气体模型, 液氢密度采用 Boussinesq 假设, 运动黏度、表面张力等物性参数设置均参考物性软件 NIST 设置。通过瑞利数 $Ra = g\beta\rho^2 L^4/\mu\lambda^2$ 确定流动类型。低温液氢贮箱内径为 380 mm, 不同重力条件下, 向罐壁施加 10 W·m^{-2} 的恒定热流, 经计算 Ra = (5.642～5.642) × 10^6, 表明液体中的自然对流为层流, 因此选用层流模型模拟箱内流体与贮箱壁面间流固耦合作用。压力–速度耦合项采用 SIMPLE 算法, 压力插值采用 PRESTO! 方法, 动量、能量方程等采用二阶迎风格式, 体积分数采用压缩格式。贮箱自增压过程的初始条件设置为气液两相饱和状态, 压力为 300000 Pa, 液氢对应饱和温度相为 135.59 K, 初始接触角为 10°。对于初始气液界面的确定, 在上述求解的基础上将贮箱壁面设为绝热条件, 当计算结果达到收敛状态, 即认为此时气液界面为初始液面。

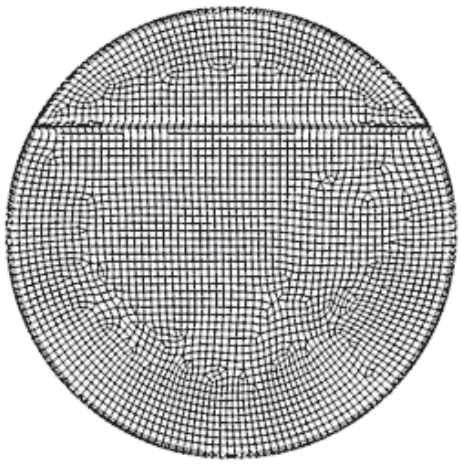

图 1　贮箱整体网格

Fig. 1　Grides of the tank

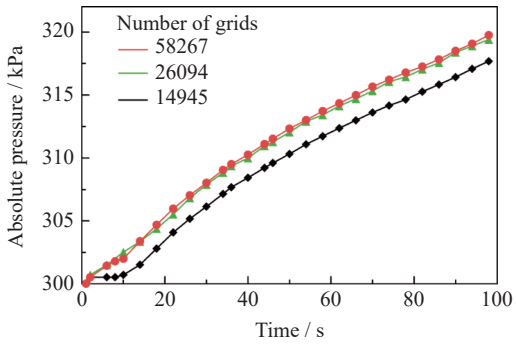

图 2　网格无关性验证

Fig. 2　Grid independence verification

3　计算结果与分析

3.1　模型验证

为准确预测液氢贮箱的自增压过程, 将数值模型得出的结果与 Seo 等[20] 的实验结果进行对比。试验装置为直径 0.201 m、高 0.213 m 的储罐, 工质为 90% 充满率的液氮, 在壁面施加 1.6 W 的恒定热流, 初始压力为 99 kPa, 温度与饱和值对应。230 s 内的自增压与模拟结果如图 3 所示, 通过模拟获得的压力略低于实验值, 原因在于数值模拟中采用集总参数法将气相空间视为一个整体, 即气相空间温度是均匀的, 而实验中气相空间温度存在微小差异, 导致模型验证时模拟压力略低于实验值。由图 3 可知二者间最大相对误差为 1.5%。本文构建的数值模型可用于液氢贮箱自增压的模拟研究。

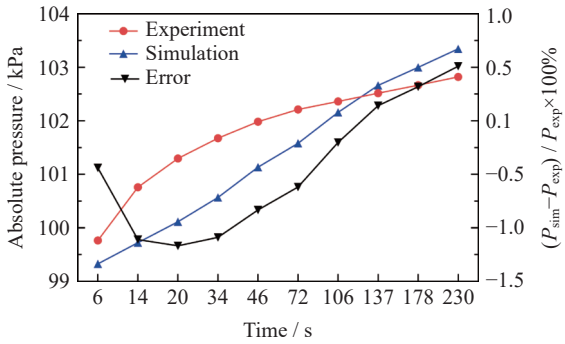

图 3　数值模型验证

Fig. 3　Validation of the numerical model

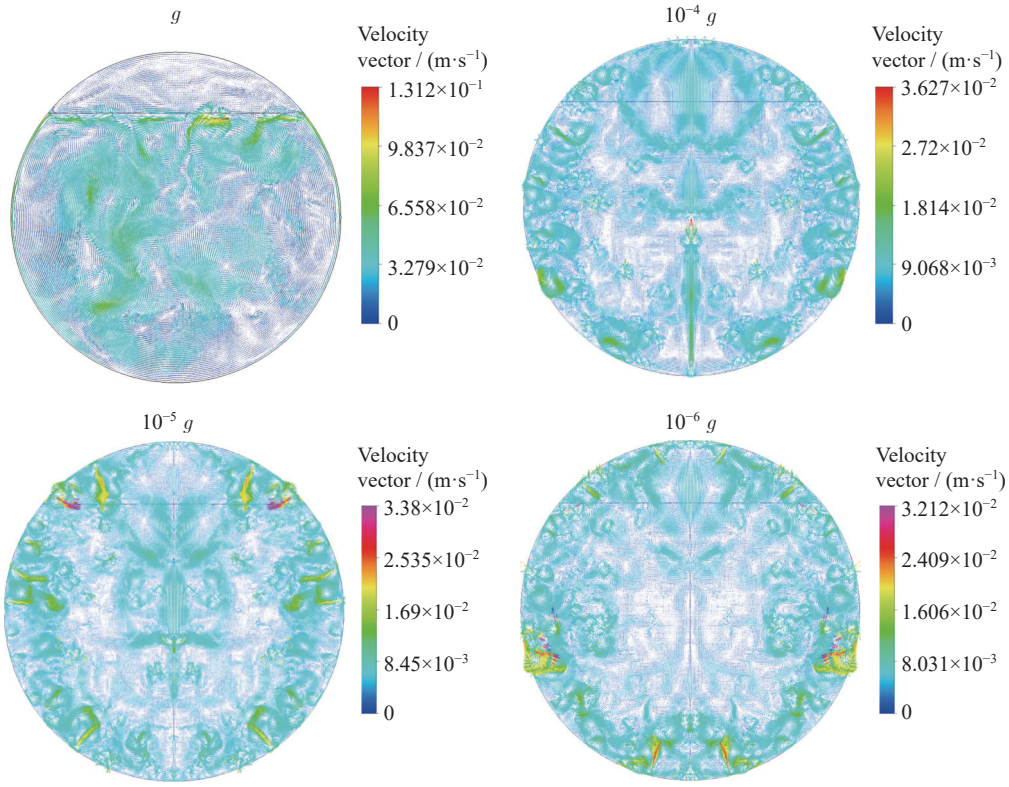

图 4 300 s 时不同重力水平下速度场分布

Fig. 4 Contour of velocity distribution under different gravity levels at 300 s

3.2 不同重力水平下气枕压力变化

贮箱内的速度矢量如图 4 所示，重力水平为 g_0, 10^{-4} g_0, 10^{-5} g_0, 10^{-6} g_0 时贮箱内的最大流速分别为 0.131, 0.036, 0.038, 0.032 m·s^{-1}，最大流速随重力水平降低而减小，表明贮箱内自然对流随重力水平降低而减弱。贮箱内气枕压力随时间的变化规律如图 5 所示，气枕压力随时间的增加而增大，且重力水平越高，贮箱内气枕压力越高。

同一时刻常重力水平的压力远大于微重力水平，其平均压升率分别为 319.67, 173.44, 161.052, 157.18 Pa·s^{-1}。其原因在于，随着重力水平降低，表面张力作用凸显，液体在表面张力作用下沿壁面爬升，贮箱内湿壁面积增加，贮箱内由浮力引起的自然对流效应减弱，外部漏热主要通过液相导热传递给气相空间，导致传热效率降低，致使液氢贮箱内压升率随重力水平的降低而逐渐减小。

结合质量和能量守恒方程、状态方程和热量定义，气枕压力变化率可表示为[21]

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=\frac{(\beta_{\mathrm{v}}Q_{\mathrm{v}}/C_{\mathrm{p,v}})+m_{\mathrm{e}}-\rho_{\mathrm{v}}\,(\mathrm{d}V_{\mathrm{v}}/\mathrm{d}t)}{\rho_{\mathrm{v}}V_{\mathrm{v}}\kappa_{\mathrm{v}}\,(C_{\mathrm{v,v}}/C_{\mathrm{p,v}})}. \tag{9}$$

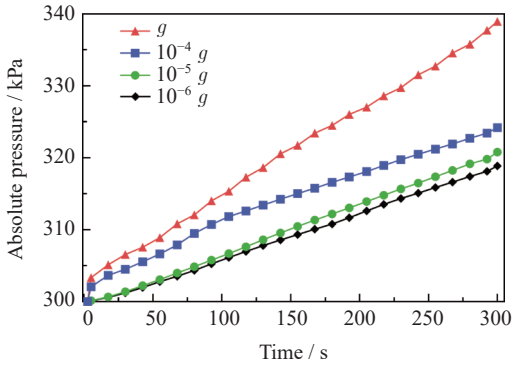

图 5 不同重力水平下的气枕压力变化

Fig. 5 Pressure changes inside tank under different gravity levels

式中，β_{v} 为气相热膨胀系数，ρ_{v} 为气相密度，Q_{v} 为气相热输入速率，$C_{\mathrm{p,v}}$ 为气相定压比热，$C_{\mathrm{v,v}}$ 为气相定容比热，m_{e} 为液气界面净传质速率，V_{v} 为气相体积，κ_{v} 为气相等温压缩系数。

由式(9)可知，常重力下贮箱内气枕压力升高主要受 3 种因素影响：外界对气枕的加热，液相蒸发使得气相增加，液相受热体积膨胀。微重力下气枕在表

面张力作用下收缩成球形, 不与壁面直接接触, 因此气枕区 Q_v=0, 微重力下压力变化率为[21]

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=\frac{m_e-\rho_v\left(\mathrm{d}V_v/\mathrm{d}t\right)}{\rho_v V_v\kappa_v\left(C_{v,v}/C_{p,v}\right)}. \tag{10}$$

式中, m_e 为液气界面净传质速率, ρ_v 为气相密度, V_v 为气相体积, κ_v 为气相等温压缩系数, $C_{p,v}$ 为气相定压比热, $C_{v,v}$ 为气相定容比热。

通过图 6 分析可知, 相变速率随重力水平降低而升高, 达到平衡后重力水平为 g_0, 10^{-4} g_0, 10^{-5} g_0, 10^{-6} g_0 时的蒸发速率分别为 0.31, 1.65, 3.24, 3.28 g m^{-3}·s^{-1}, 表明在同一充满率下, 常重力水平气枕压力的升高主要由外界对气枕的加热导致, 微重力下的压力上升则由液相蒸发导致。

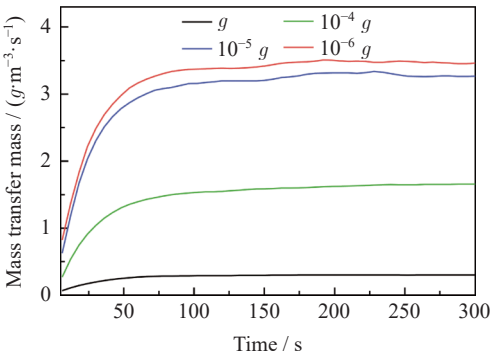

图 6　不同重力水平下气液传质速率变化

Fig. 6　Variation of gas-liquid mass transfer rate under different gravity levels

为分析低温液氪贮箱内流体温度分布, 取 100, 200 和 300 s 温度场及相图进行分析, 如图 7 所示。气液界面在常重力作用下始终保持水平, 气枕区存在明显的轴向温度分层, 最大温度差值为 90 K。微重力下的热分层异于常重力水平, 微重力下贮箱热分层由球形气枕中心向气液界面沿径向分布, 气液相间最大温度差值范围为 2～3 K, 这是由于微重力条件下自然对流减弱, 表面张力开始对热分层产生影响, 热量以导热的方式传递到贮箱内部。三种微重力水平下, 气枕区温度均高于液相, 因为初期气枕区在贮箱壁面附近, 气体比热容小, 更易吸收热量, 300 s 时气液温差分别为 2.587, 2.387, 1.981 K, 气液最大温差随重力水平的降低而降低。液相主体区温度基本一致, 壁面附近液体由于外界漏热温度略高于液相主体温度, 分别为 135.033, 135.045, 135.069 K, 壁面最高温度随微重力水平降低而升高, 原因在于自然对流的减弱导致液相混合不足, 壁面处漏热不能被及时传递至贮箱内部, 从而出现贮箱壁面处液体最高温度随重力水平降低而升高的现象。此外, 壁面附近液体不断吸热蒸发产生的气泡会黏附于壁面而形成局部热点, 不利于低温液氪的长期贮存。因此, 为保证低温液氪贮箱在轨运行阶段的安全贮存, 有必要采取措施消除贮

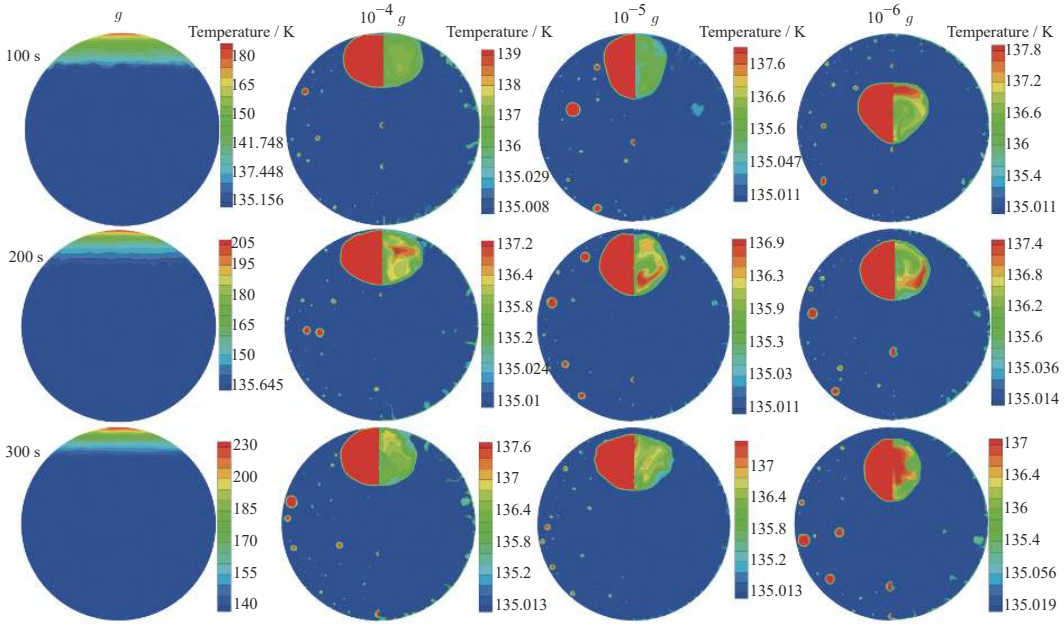

图 7　不同重力水平下不同时刻箱体内部流体温度及相分布

Fig. 7　Liquid temperature and phase distribution over time under different gravity levels

箱内的温度分层，并解决由贮箱壁面局部高温带来的安全隐患。

3.3 初始液体温度对贮箱气枕压力的影响

在 10^{-4} g_0 的微重力水平下，初始氮气温度均为压力 0.3 MPa 下相对的饱和温度 135.59 K，对初始液氮温度分别为 133.5, 134, 134.5 K 三种情况下贮箱内的流动、传热及相变过程进行计算分析。不同初始液氮温度下的气枕压力变化如图 8 所示，压力变化主要分为两个阶段。

第一阶段，气枕压力降低，且初始液氮温度越低，贮箱压降越大，134.5, 134, 133.5 K 时压降速率分别为 103.86, 117.83, 163.16 Pa·s^{-1}。由图 9 可知，随初始液氮温度降低，液相贮存的冷量增大使得气相冷凝增加，导致贮箱压力下降速率更快。

由于外界热流的持续输入，第二阶段随着初始液氮温度升高，贮箱压升增大。134.5, 134, 133.5 K 时压升率分别为 33.75, 25.94, 8.91 Pa·s^{-1}。气相空间质量变化趋势与压力变化一致，如图 10 所示。

在初始氮气温度为饱和温度 135.59 K 时，不同初始液氮温度下贮箱内的温度变化如图 11 所示，在初始阶段，由于气液两相间的传热传质效应，随着贮箱压力的降低，贮箱内温度整体降低，随着外界环境热流的持续输入，至 500 s 时贮箱内温度出现缓慢升高的趋势。并且初始液氮温度越低，贮箱内的整体温度越低。

综上分析可知，随初始液氮温度升高，液相达到饱和温度所需热量降低，导致液氮在较高初始温度下蒸发加剧，致使气枕压力上升更快，因此可通过提高过冷度提升推进剂的品质，降低由液相蒸发导致压力快速上升带来的安全风险。

3.4 微重力下初始充满率对压力的影响

在 $10^{-4}g$ 的微重力水平下，初始充满率对贮箱气枕压力上升的影响如图 12 所示，不同初始充满率下

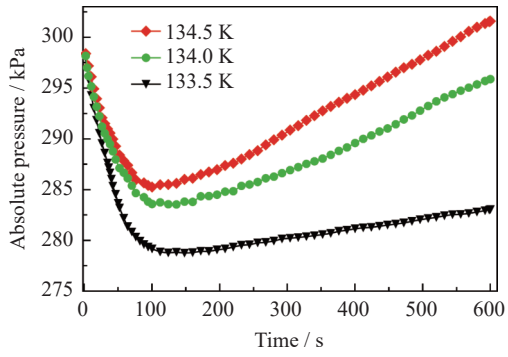

图 8 微重力下贮箱压力随时间变化

Fig. 8 Variation of pressure with time under microgravity condition

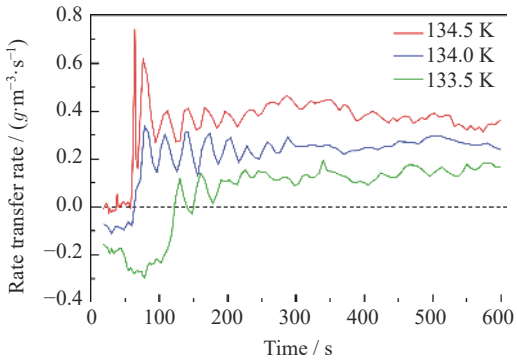

图 9 微重力下气液传质速率随时间的变化

Fig. 9 Variation of mass transfer rate with time under microgravity condition

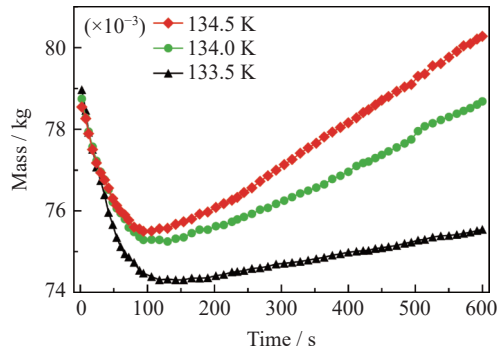

图 10 微重力下气相质量随时间的变化

Fig. 10 Variation of ullage mass with time under microgravity condition

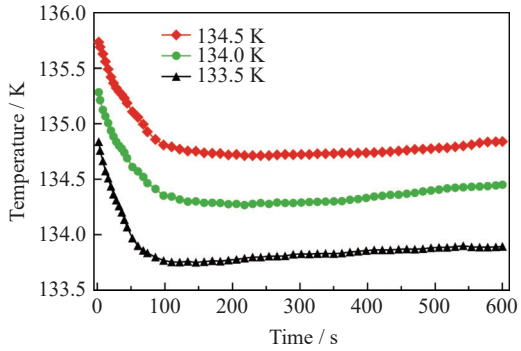

图 11 微重力下贮箱温度随时间的变化

Fig. 11 Variation of tank temperature with time under microgravity condition

液氢贮箱气枕压力均随时间增加而增大。

初始充满率为 30%, 50%, 70%, 80%, 90% 的压升率分别为 165.71, 119.50, 65.97, 102.11, 147.15 Pa·s^{-1}。贮箱的临界初始充满率Φ_c=70%, 即当初始充满率Φ<70% 时, 初始充满率越小, 贮箱内气枕压力升高越快; 当初始充满率Φ>70% 时, 初始充满率越大, 贮箱气枕压力升高越快, 贮箱气枕压力由液相蒸发和液相热膨胀两种因素控制。

由图 13 可知, 气液相间蒸发速率随时间动态变化, 初始充满率越低, 蒸发越快。在初始充满率较低的贮箱中, 液氢蒸发对贮箱气枕压力升高起主导作用, 对于给定的储罐, 初始充满率越大, 液氢热膨胀对贮箱气枕压力上升的影响越显著。

4　结论

针对某大轨道转移飞行器用液氢贮箱, 从重力水平、初始液氢温度及初始充满率方面进行了数值模拟, 计算结果表明, 模型可以较好地预测低温箱体在轨增压过程, 相关结论如下。

(1)微重力下贮箱压力及分层程度均低于地面, 地面工况(g_0)的压升率分别是 10^{-4} g_0, 10^{-5} g_0, 10^{-6} g_0 微重力水平下的 1.843 倍、1.98 倍、2.04 倍。微重力下温度分层程度为 2～3 K, 远低于地面工况的 90 K, 且温度分层为径向分布, 异于地面工况的轴向分布。

(2)贮箱压力随时间先降低后升高, 同一时刻贮箱压力随初始液氢温度的降低而降低, 133.5 K 时的压降率分别是 134, 134.5 K 时的 1.38 倍、1.57 倍。随着漏热的持续进行, 液相蒸发, 贮箱压力开始升高, 134.5 K 时的压升率分别是 134, 133.5 K 时的 1.31 倍、3.78 倍。

(3)贮箱存在临界初始充满率Φ_c=70%, 当初始充满率Φ<70% 时, 液相蒸发对贮箱压力升高起主导作用, 初始充满率越低, 蒸发越快, 压力升高越快。当初始充满率Φ>70% 时, 液相热膨胀对贮箱压升率起主导作用, 初始充满率越大, 液氢热膨胀对贮箱压力上升的影响越显著。

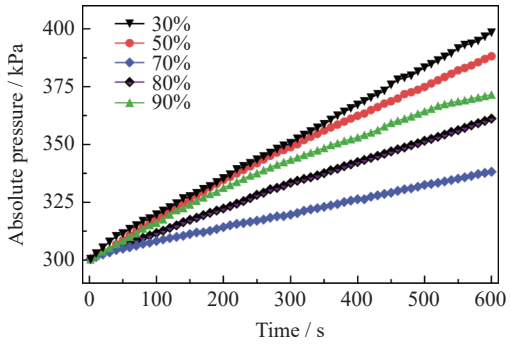

图 12　不同初始充满率下贮箱压力随时间变化

Fig. 12　Variation of tank pressure with time under different initial filling rates

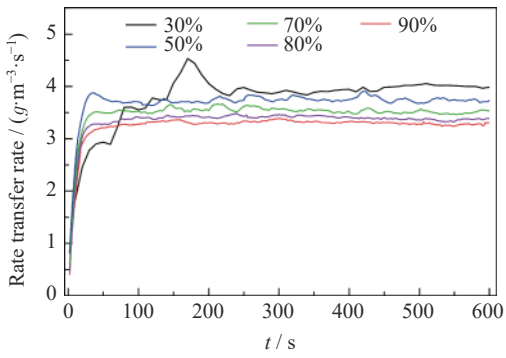

图 13　不同初始充满率下气液传质速率随时间的变化

Fig. 13　Variation of mass transfer rate with time under different initial filling rates

参考文献

[1] SHEN Lianhua, ZHANG Xing, CHENG Yi, *et al.* Research progress and development trend of working medium for electric propulsion[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, **43**(6): 7-13,75 (申连华, 张星, 陈艺, 等. 电推进工质的研究进展及发展趋势[J]. 火箭推进, 2017, **43**(6): 7-13,75)

[2] DUCHEMIN O, VALENTIAN D, CORNU N. Cryostorage of propellants for electric propulsion[C]//45 th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Denver: AIAA, 2009

[3] CHEN Jidong, ZHU Jianbing, ZHAO Jipeng, *et al.* Key technology analysis of liquid krypton cryogenic propellant tank in electric propulsion system[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2022, **28**(6): 660-667 (陈既东, 朱建炳, 赵积鹏, 等. 电推进系统液氪低温推进剂贮箱关键技术分析[J]. 真空与低温, 2022, **28**(6): 660-667)

[4] BELMEDANI M, BELGACEM A, REBIAI R. Analysis of natural convection in liquid nitrogen under storage conditions[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2008, **8**(14): 2544-2552

[5] STEWART M. Pressurization of a flight weight, liquid hydrogen tank: evaporation & condensation at the liquid/vapor interface[C]//53 rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propul-

sion Conference. Atlanta: AIAA, 2017

[6] PANZARELLA C H, KASSEMI M. Self-pressurization of large spherical cryogenic tanks in space[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2005, **42**(2): 299-308

[7] PANZARELLA C, PLACHTA D, KASSEMI M. Pressure control of large cryogenic tanks in microgravity[J]. *Cryogenics*, 2004, **44**(6/8): 475-483

[8] YANG Peng, YAN Chunjie, ZHENG Yongyi, *et al*. Bubble movement and coalescence characteristics in cryogenic propellant tank in microgravity environment[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, **56**(9): 84-91 (杨鹏, 闫春杰, 郑永煜, 等. 微重力环境下低温推进剂贮箱内气泡运动及融合特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, **56**(9): 84-91)

[9] YAN Chunjie, ZHENG Yongyi, YANG Qi, *et al*. Deformation characteristics of gas-liquid interface in cryogenic propellant tank under microgravity environment[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2022, **28**(3): 285-290 (闫春杰, 郑永煜, 杨祺, 等. 微重力环境下低温推进剂贮箱内气液界面形变特性研究[J]. 真空与低温, 2022, **28**(3): 285-290)

[10] AYDELOTT J C. Effect of Gravity on Self-pressurization of Spherical Liquid-hydrogen Tankage[R]. Washington: NASA, 1967

[11] DAIGLE M J, SMELYANSKIY V N, BOSCHEE J, *et al*. Temperature stratification in a cryogenic fuel tank[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2013, **27**(1): 116-126

[12] LIU Zhan, SUN Peijie, LI Peng, *et al*. Research on thermal stratification of cryogenic liquid oxygen tank in microgravity[J]. *Cryogenics*, 2016(1): 25-31,53 (刘展, 孙培杰, 李鹏, 等. 微重力下低温液氧贮箱热分层研究[J]. 低温工程, 2016(1): 25-31,53)

[13] WANG Yanhui, ZHOU Binghong. Effect of initial liquid hydrogen temperature on the pressure changes in the cryogenic propellant tank[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(3): 394-400 (王妍卉, 周炳红. 微重力条件下初始液氢温度对低温推进剂贮箱气枕压力的影响[J]. 空间科学学报, 2020, **40**(3): 394-400)

[14] JIANG Y B, YU Y S, WANG Z, *et al*. CFD simulation of heat transfer and phase change characteristics of the cryogenic liquid hydrogen tank under microgravity conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, **48**(19): 7026-7037

[15] VISHNU S B, KUZHIVELI B T. Effect of micro- and elevated gravity condition on the evolution of stratification and self-pressurization in a cryogenic propellant tank[J]. *Sādhanā*, 2019, **44**(3): 63

[16] FU J, SUNDEN B, CHEN X Q, *et al*. Influence of phase change on self-pressurization in cryogenic tanks under microgravity[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, **87**: 225-233

[17] KARTUZOVA O, KASSEMI M. Modeling interfacial turbulent heat transfer during ventless pressurization of a large scale cryogenic storage tank in microgravity[C]// 47 th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Diego: AIAA, 2015

[18] WANG Xi, WANG Yu, RONG Yi, *et al*. Computational research on phase change model for cryogenic propellant in microgravity[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2018(1): 36-40 (王夕, 王珏, 容易, 等. 微重力下低温贮箱内推进剂相变仿真模型研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(1): 36-40)

[19] LIN C S, HASAN M M. Self-pressurization of a spherical liquid hydrogen storage tank in a microgravity environment[C]//30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA, 1992

[20] SEO M, JEONG S. Analysis of self-pressurization phenomenon of cryogenic fluid storage tank with thermal diffusion model[J]. *Cryogenics*, 2010, **50**(9): 549-555

[21] BROWN J S. Vapor Condensation on Turbulent Liquid [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1991