

文章编号: 0253-4339(2026)03-0001-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251119003

低温技术

基于落塔实验的液氧气液界面形状演化特性研究

郭松源¹ 肖明堃¹ 岳莉¹ 罗威¹ 杜王芳² 赵建福² 杨光¹ 吴静怡¹

(1 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2 中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘 要 在航天器深空探测任务中,低温推进剂贮箱内的流体常经历复杂的变过载环境,该过程中气液界面剧烈变化,引发强烈的相变传热与热力状态改变响应。本文基于落塔实验,搭建了液氧重定位实验系统,观测并记录了微重力转变过程中气液界面形态、气相温度与压强的动态变化。结果表明:在由常重力转为微重力的下落阶段,液氧三相接触线沿贮箱壁面爬升,并在首次回退时在壁面形成残留液体层。由于接触线爬升增大了气液界面面积,界面附近液氧持续蒸发,再叠加残留液体层的作用,最终使得增压速率上升。距离界面 15.2 mm 处的温度变化不仅受到固壁传热的影响,还受到界面振荡所引起的低温气体流动的干扰,在整个 2.5 s 的重定位过程中,该测点的温度增加量低于另外 2 只温度传感器。本研究为低温推进剂在轨管理装置的设计和重定位仿真模型的校验提供了重要的实验依据。

关键词 液氧;落塔实验;微重力;界面

中图分类号: V511⁺.6;O363.2

文献标识码: A

Evolution of Liquid-Oxygen Interface Shape Based on Drop-Tower Experiments

Guo Songyuan¹ Xiao Mingkun¹ Yue Li¹ Luo Wei¹ Du Wangfang² Zhao Jianfu²

Yang Guang¹ Wu Jingyi¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract

Objective: To support complex aerospace missions including manned spaceflight, Mars exploration and space station construction, it is critical to conduct deep-space exploration research for solar-system planets and even extrasolar space. High-specific-impulse cryogenic fluids such as liquid hydrogen-liquid oxygen (LH₂-LOX) and liquid oxygen-liquid methane (LOX-LCH₄) are primary propellant for deep-space missions. During flight, cryogenic fluids in propellant tanks undergo gravity changes, leading to interface relocation. Owing to low surface tension and viscosity, their interfaces easily deform and break up, resulting in complicated flow behaviors. Meanwhile, increased interfacial and contact areas enhance heat transfer, triggering intense phase change due to low boiling points and latent heats, making thermal states unpredictable. This study aims to reveal the evolution of interface dynamics and thermal behavior during relocation, which is essential for the design of on-orbit propellant management devices.

Methods: In this study, a drop-tower experimental platform for LOX reorientation was constructed. The setup, housed in a stainless-steel vacuum chamber with sapphire windows for optical access, uses multilayer insulation and combined LED lighting to enable high-speed visualization. A liquid nitrogen cooling circuit connected via copper braids provides stable precooling and suppresses boiling. The test cell, made of sapphire with high pressure resistance, is instrumented with multiple temperature sensors. LOX is condensed and stabilized at a height of 18.5 mm until thermal drift is below 0.000 1 K/s. The system is then installed in the drop tower tube, adjusted for center-of-mass, and released from 83 m to generate nearly 3.5 s of microgravity at approximately 0.004 4 g₀. High-speed images are recorded and processed using a MATLAB edge-detection algorithm to analyze interface evolution during the relocation process. Meanwhile, the vapor-phase temperature and pressure were measured. During the drop-tower process, the overload environment transitioned from normal gravity to microgravity.

Results and Discussions: The LOX propagated along the inner wall and formed a liquid layer. The motion of this liquid layer was decoupled from that of the bulk liquid, and the interface center oscillated continuously. Owing to the ascend of the contact line, the gas-liquid interface area increased, and LOX evaporated continuously at the contact line. The emergence of the liquid layer resulted in a

基金项目:国家自然科学基金(52276013)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52276013).) 收稿日期:2025-11-19;修回日期:2025-11-27;录用日期:2025-12-15

pressurization rate of 3 227 Pa/s at the first oscillation of the contact line, which is approximately 1.8 times higher than the final stabilized pressurization rate. During the entire 2.5 s reorientation process, the pressure in the gas-phase region increased by 4 217 Pa. The temperature variation at 15.2 mm from the interface was affected by not only heat transfer from the solid wall but also disturbances from the low-temperature gas flow induced by interface oscillations. Additionally, the temperature at this measurement point increased by only 0.351 K during the entire reorientation process.

Conclusions: This study concludes that the evolution of the LOX interface, temperature and pressure in the ullage in the interface reorientation process. This experiment provides the cryogenic fluid data for simulation validation and guidance for the configuration and design of cryogenic-propellant management devices.

Keywords liquid oxygen; drop tower; micro-gravity; interface

为支撑载人航天、火星探测与空间站建设等复杂航天任务,开展面向太阳系内行星乃至系外空间的深空探测研究具有重要意义。其中液氢-液氧,液氧-液甲烷等大比冲低温推进剂是深空探测的首要选择^[1]。在航天器的深空探测过程中,推进剂贮箱内低温流体常经历过载条件的变化,界面位置发生变化,通常称为界面重定位过程^[2]。同时由于低温流体表面张力和黏性较小,界面容易发生过大变形和破碎,使其运动行为更加复杂^[3]。此外,随着重定位过程中的界面变形,气-液和固-液接触面积增大,而低温推进剂沸点较低,汽化潜热较小^[4],传热面积增加会引发剧烈的相变传热,使得重定位过程中贮箱内的热力状态同样难以预测。因此,揭示界面波动与热力行为在重定位过程中的变化规律,对于直接推进剂在轨管理装置的安装和设计具有关键意义。

目前公开的在轨低温流体重定位实验较少,研究者常通过地面等效重力水平的实验手段进行相应的重定位实验^[5]。W. J. Masica等^[6]最早使用Lewis实验中心的落塔进行重定位实验。实验过程中,利用弹力绳添加轴向过载使得气相由中心冲入液相中,并重点对过载条件下界面运动速度和加速度进行分析,最终得到气液界面接触线处的加速度与速度的平方成正比关系,界面中心的速度接近常量。M. Michaelis等^[7]使用Bremen大学的落塔进行自由界面由常重力向微重力转变的重定位实验,通过使用不同壁面接触角的硅油溶液,发现在奥内佐格数(Oh)小于 2×10^{-3} ,且壁面接触角小于 10° 时,界面中心会经历欠阻尼振荡过程,接触线处移动到最大位移后会保持不动。J. Gerstmann等^[8]依旧在Bremen大学的落塔进行实验,他们聚焦于不同壁面温度对零度接触角液体重定位过程的影响。他们发现马兰戈尼对流会引起液体从接触线向着界面中心移动,从而增大表观接触角。S. N. C. Govindan等^[9]使用HFE-7500进行重定位实验, 0° 接触角的作用下界面振荡9 s后达到平衡位置。由于低温流体对热泄漏较为敏感,在落塔中难以保证其不发生剧烈沸腾,因此

上述重定位实验均采用常温流体来模拟低温流体的界面运动规律。M. Stief等^[10]发展了低温流体的落塔重定位实验系统,利用真空夹层和液氮冷浴的方式确保低温流体不会在壁面热泄漏下发生剧烈沸腾现象;采用液氮进行实验,研究了重力水平骤降后低温流体的界面行为,观察到液氮在重定位过程中的三相接触线并未出现回退现象。基于上述研究,N. Kulev等^[11]利用液氮进行实验,分析轴向温度梯度对重定位过程的影响。结果表明,接触线的后退会导致增压速率的上升,同时界面中心振荡频率随着轴向温度梯度的增加而减少。

目前,多数研究通过分析常温流体在常重力至微重力转变下的界面波动来模拟低温流体的运动规律。然而低温流体因其较低的饱和温度对漏热极为敏感^[12],微小的热泄漏就会引发相变甚至沸腾,不仅导致低温流体重定位过程中界面变化规律与热力学行为难以预测,也增大了实验的实现难度。因此,本文搭建了液氧重定位实验系统,并在落塔中实现了从常重力到微重力转变过程的实验观测。该系统采用液氮冷源结合真空夹层绝热的设计,有效降低漏热量,防止液氧沸腾。本研究记录了重力阶跃后的界面演变,分析了三相接触线及界面中心的波动特性,研究了实验腔内温度与压强随时间的变化。

1 研究方法

1.1 物理模型

在常重力条件下,液氧处于静力学平衡状态,气液界面整体保持水平,仅受壁面效应影响在接触边界处出现小幅弯曲。气相区呈现明显的温度分层,液相区温度几乎为饱和温度。在落塔实验开始时,实验腔内液氧由常重力环境转变为微重力环境,由于液氧属于完全润湿流体^[13],当界面形态由重力主导转变为毛细力主导,三相接触线迅速沿壁面爬升。在黏性力和表面张力的耦合作用下,接触线的运动传递到界面中心,诱发其产生波动。在液氧的重定

位过程中,接触线后退时会形成残留液体层。同时,受壁面区域较高温度的影响,接触线上升后,固-液、气-液接触面积增大导致更多的热量传递到液氧中,从而引起蒸发主导区域增大,造成增压速率上升。基于此物理过程,本文搭建了液氧重定位实验系统,使用北京落塔实验平台^[14],进行从常重力到微重力转变的重定位实验,观测液氧界面演变规律和气相区温度压强演化规律。以下将详细介绍重定位实验系统的基本结构和实验过程。

1.2 实验系统

本文设计并搭建了液氧重定位实验台,并将其集成于落塔实验系统进行变重力重定位实验。落塔实验系统如图 1 所示,实验台主体装入内径为 204 mm 的不锈钢真空套筒,如图 1(a)所示。真空套筒两侧安装蓝宝石玻璃视窗用于界面变化的可视化记录,高速相机安装在真空腔外侧。真空腔内实验系统除液氧实验腔,其余部分均包裹多层绝热材料用于减少热辐射对实验系统的影响。光源采用 LED 灯带缠

绕在多层绝热上,利用真空腔内的漫反射将可视化视野内照亮;同时面光源被安装在相机对侧的玻璃视窗后用于补光。液氧实验腔是进行重定位实验的装置,采用液氮为冷源,冷却高压氧气形成液氧,并在落塔准备阶段持续补充冷量以减小液氧损耗。液氮冷源和液氧实验腔通过铜辫子相连。液氧实验腔由半径为 20 mm、高为 45 mm 的蓝宝石玻璃制成,具备良好的承压能力,确保落塔强冲击力下实验腔的安全。液氮贮箱通过两根管道连接真空腔上的法兰,一根管道用于液氮的加注,另一根管道用于蒸发氮气的出气口。将该液氧重定位实验系统安装到落塔单舱安装平台上(图 1(a)),液氧实验腔下法兰与液氮罐使用铜辫子软连接。实验测试段如图 1(b)所示,液氮罐上贴有加热膜用于实验系统复温。实验腔上下法兰处通过螺纹孔安装温度传感器,腔体内部布置 3 个温度测点,如图 1(c)所示。最终,将液氧重定位实验系统安装进北京落塔单舱实验平台内,如图 1(d)所示。实验中使用的传感器与精度如表 1 所示。

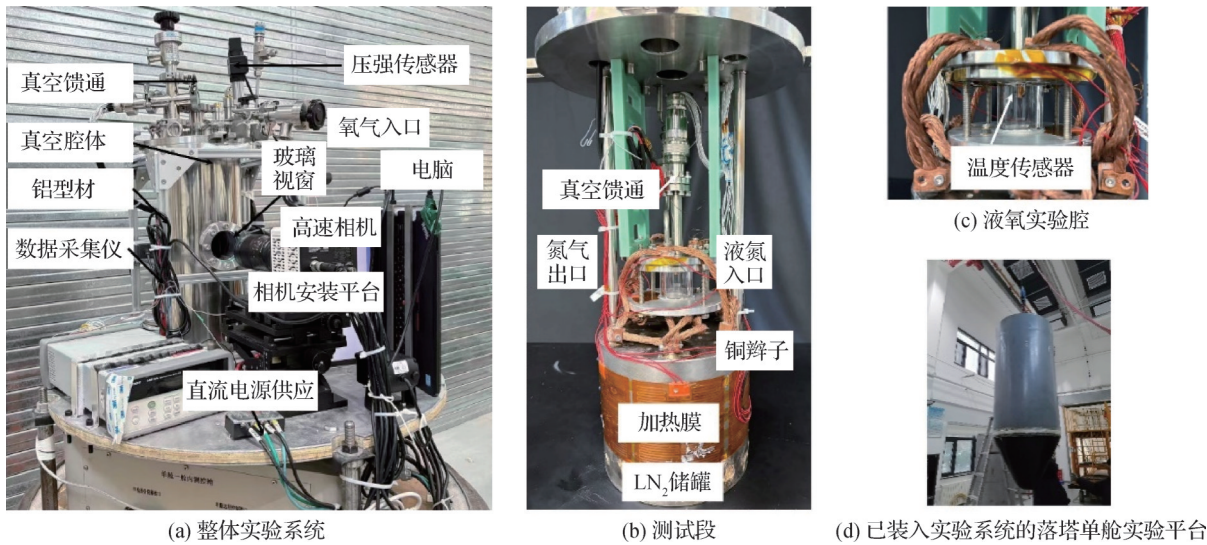


图 1 重定位实验系统实物

Fig.1 Experimental apparatus of interface reorientation

表 1 实验中主要设备与传感器精度

Tab.1 Detailed parameters of the main devices in the reorientation experiment

设备	品牌	型号	范围	精度
温度传感器(上下法兰)	Lake Shore	CX 1030-CU	4~325 K	40 mK
温度传感器(实验腔内)	Lake Shore	CX 1030-SD	4~325 K	40 mK
相机	SSZN	SH3-103 32 G	1 280×1 024 500 fps	35×35 μm
压强传感器	Weiyisen	WYS-803	0~1 MPa	0.000 5 MPa

1.3 实验流程

实验流程主要分为 2 个阶段,首先是液氧冷凝以及稳定阶段,其次是重定位实验阶段。液氧冷凝以

及稳定阶段在地面完成,将液氧通过液氮冷凝到实验要求的高度,使得液氧实验腔内温度压强随时间变化速率很小,接近稳定状态。随后将稳定状态的

液氧重定位实验系统装入落塔单舱实验平台,调配质心并将实验腔起吊至83 m落塔释放,完成重定位过程实验,即为重定位实验阶段。

首先描述地面液氧稳定阶段,在实验开始之前,对液氧实验腔上下法兰进行清洁。同时检查并拧紧所有接口,防止泄漏影响真空度,将液氧实验腔加热至80℃,对实验腔抽真空除去其中残留水汽,并使用纯度为99.999%的高压氧气对实验腔内气体进行置换,最终使得液氧实验腔内压力保持在0.4 MPa。再使用分子泵连接真空腔上法兰真空抽口,直至真空度达到 5×10^{-4} Pa。此时给液氮罐加注液氮,对液氧实验腔、液氮储罐等进行预冷,高纯度高压氧气持续

通入,液氧实验腔内与上下法兰温度如图2(a)所示。下法兰温度由于距离液氮储罐较近,温度下降极快。上法兰由于距离液氮储罐较远,热阻较大,温度下降较慢。同时,不同高度氧气温度不同,形成线性温度分层,由于后续落塔实验,高压氧气管路需要关闭,因此在5.8 h时,关闭氧气通入管路等待实验腔内液氧稳定,如图2(b)所示。刚关闭氧气通入管路后,实验腔内温度会先上升后缓慢下降,在7 h后达到稳定状态,此时温度变化速率小于0.000 1 K/s。液氧高度随时间的变化如图2(c)所示,最终液氧稳定在18.5 mm高度,此时将其装入落塔单舱实验系统中进行后续的重定位实验。

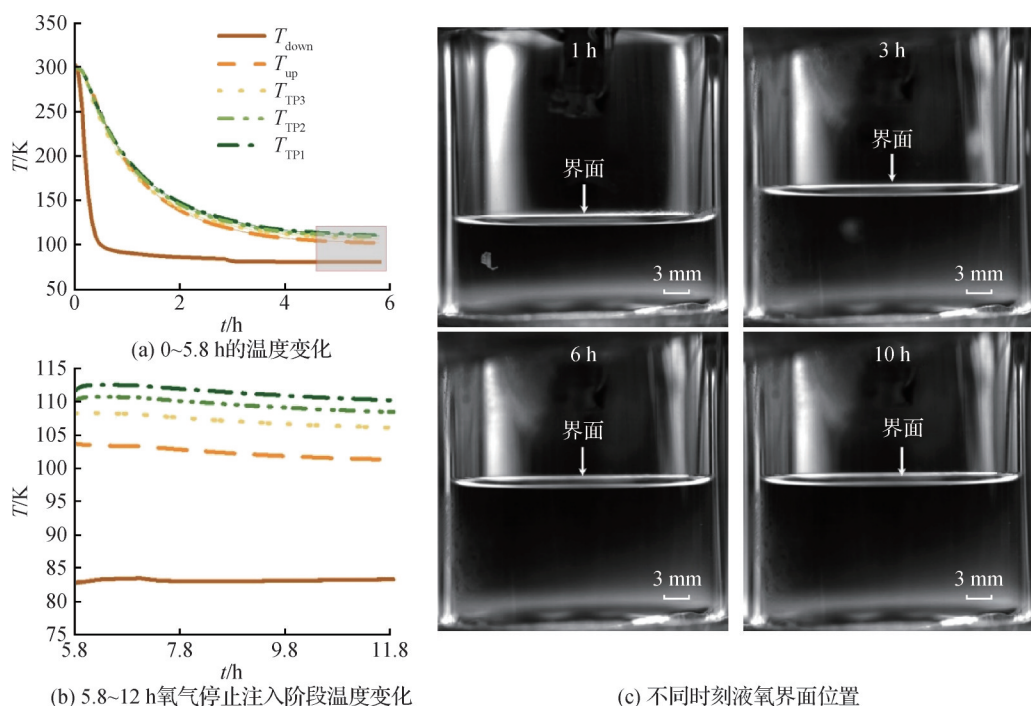


图2 液氧冷凝和稳定阶段

Fig.2 Cooling and stabilization periods of the ground-based LOX (liquid oxygen) condensation process

在重定位实验阶段,将整个实验系统接入单舱实验系统的蓄电池中。接入蓄电池后,数据采集仪开始采集,为了节省相机储存空间,由常重力转变为微重力环境后再开始记录图像数据。将电源接好后,对实验系统进行封仓(图1(d)),调配质心保证落塔实验系统轴线与实验系统下落轴线重合。之后将实验系统吊至83 m落塔最高处释放。准备阶段约1 h,实验系统释放后,高速相机开始记录,初始为常重力阶段,之后存在持续约3.5 s的微重力阶段,该过程界面通过MATLAB边缘提取算法进行提取。重力水平如图3所示,0~2.5 s,实验系统自由落体,实验腔内液氧重力水平 g 保持为0.004 4 g_0 (g_0 为标准重力加速度9.8 m/s²),为重定位过程界面运动规律的核心阶段。图中,定义常重力变为微重力的这一时刻为0时刻,

以便于对比分析常重力向微重力转变前后传热传质规律的不同。例如:-1 s代表常重力变为微重力的前1秒,后文同理。

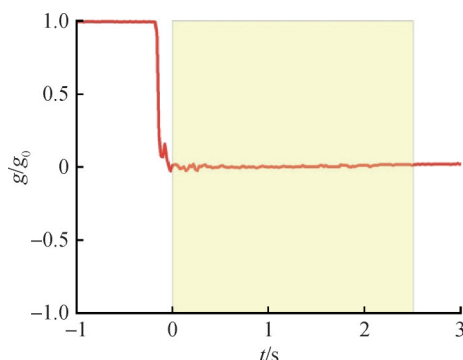


图3 重力水平随时间变化规律

Fig.3 Evolution of gravity level over time

2 结果与讨论

2.1 液氧重定位过程界面形状变化

微重力阶段界面演化规律如图 4 所示,微重力阶段开始时,接触线沿着壁面迅速上升,之后接触线处

与界面中心均上下波动。可以发现在接触线后退过程中会形成一部分粘连在壁面处的液氧液体层,该部分运动与主流液体运动解耦,液体层形成后接触线高度 z_w (mm) 会变为液体层上缘高度 z_{w-up} 和下缘高度 z_{w-down} 。

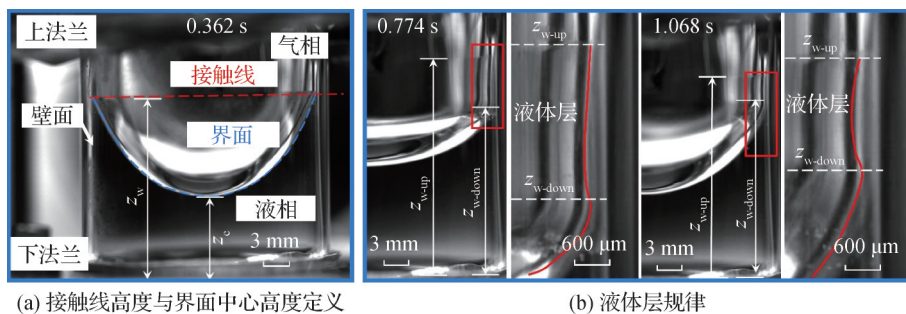


图 4 微重力阶段界面演化规律

Fig.4 Evolution of interface in the LOX reorientation process

根据前 3 s 的界面运动规律,常重力到微重力过程的界面运动转化主要有 4 个阶段的规律:1)界面中心弛豫过程;2)接触线的持续爬升;3)存在液体层的界面中心振荡;4)不存在液体层的界面中心振荡。第 1 阶段界面变化如图 5 所示,挑选了其中关键帧进行界面运动规律的分析,重定位开始初期($t=0.05$ s),界面接触线处在重力水平突变后,率先发生显著向上移动,其上移速度明显快于界面中心的弛豫过程。界面中心则展现出明显的弛豫特性与动力学滞后现象,在体积力突变后,界面中心因内部黏性阻力与表面张力的共同作用未能进行同步调整,形成一个瞬态上凸结构,界面的不同位置受到体积力突变的响应时间不同。直到界面演化后期($t=0.168$ s),界面中心的上凸结构逐渐被拉平并转为下凹,在第 1 阶段呈现出边界驱动中心滞后的完整界面运动规律。

第 2 阶段界面变化如图 6 所示,当界面中心由上凸形状转变为下凹后,接触线持续上升,界面中心持

续下降。在 0.486 s 接触线附近开始产生气泡。在文献[11]的液氧重定位实验研究中也发现了接触线附近出现的小气泡。这是由于接触线快速上移后,此时壁面温度较高,壁面处的热量迅速传导至薄液体层内,出现小幅度的沸腾现象。在接触线二次上移后,由于壁面温度已经被液氧的初次浸没降温,因此温差较小不会产生小气泡。

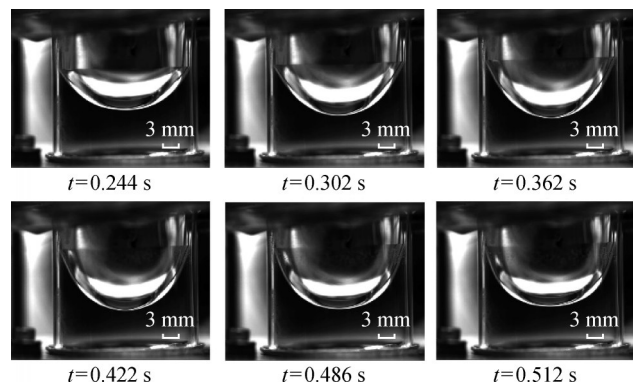


图 6 0.244–0.512 s 界面运动规律

Fig.6 Evolution of interface in the LOX reorientation process from 0.244–0.512 s

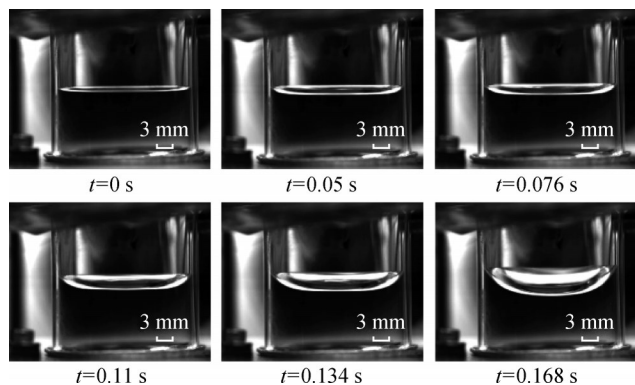


图 5 0–0.168 s 界面运动规律

Fig.5 Evolution of interface in the LOX reorientation process from 0–0.168 s

第 3 阶段为界面在壁面液体层存在时,界面的振荡过程,如图 7 所示。液体层在图 7 的红框中出现,可以看到壁面附近的液氧界面存在 1 个残余液体层,该部分液体层不参与界面主体的振荡,与主流运动解耦。液体层的形成过程为,在接触线达到最高点处后,接触线最高处几乎保持不动。但壁面附着的液氧量随时间的推移持续下降;随着壁面附着液氧量减少,壁面附着液体量降低,界面中心随之上升。至 $t=0.866$ s 时,壁面附着液氧量极小,形成 1 个液体层,该液体层中间部分较厚,在靠近主流液体与接触

线处的两侧较薄,如图7中红色区域所示。随着时间的推移,界面开始经历二次振荡,界面中心高度持续下降,液氧又由界面中心向壁面附近移动,此时液体层长度逐渐变短,液体层厚度不会随着液体层长度减小而产生变化,随着液氧在壁面附近的二次爬升,液体层被覆盖,完成存在液体层的界面振荡过程。

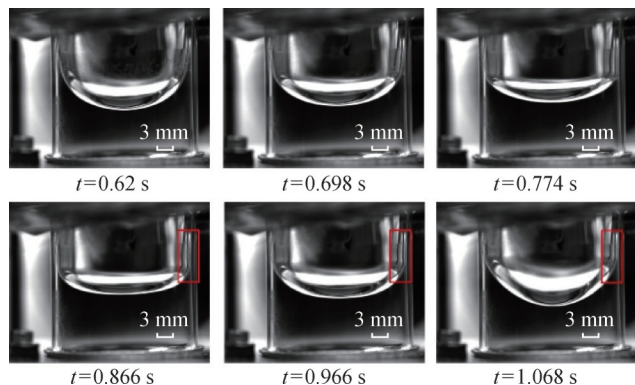


图7 0.62~1.068 s界面运动规律

Fig.7 Evolution of interface in the LOX reorientation process from 0.62~1.068 s

图8所示为界面重定位过程的第4阶段,在液体层被覆盖后,接触线二次后退过程中液体层消失,此时液氧界面的振荡,接触线处和界面中心的振荡幅度相比于存在液体层时的振荡明显降低。液氧接触线和界面中心之间的垂直高度差缩小,且此时完全不会出现沸腾引起的小气泡。这是由于此时壁面温度已经明显降低,温差不足以产生沸腾。同时可以发现,由于落塔单舱下落时,舱体经历空气阻力从而产生轻微的倾斜,界面轴线与实验腔轴线偏差逐渐增大。

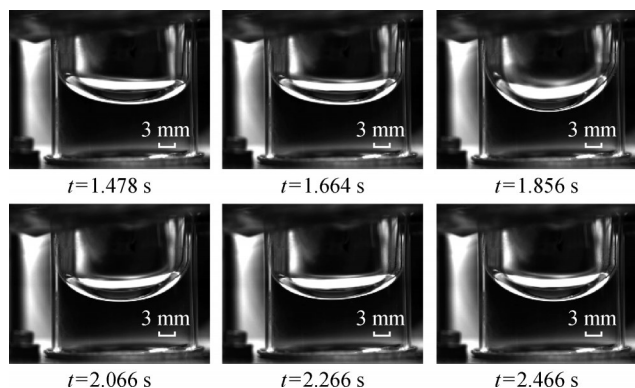


图8 1.478~2.466 s界面运动规律

Fig.8 Evolution of interface in the LOX reorientation process from 1.478~2.466 s

2.2 液氧重定位过程界面高度变化

图9所示为接触线与界面中心高度随时间的变化。根据相同初始液位高度、压强与气相区温度进行了重定位重复实验保证了数据的复用性。首先针

对界面接触线和界面中心波动规律进行分析,可以发现接触线首次达到最高点时,接触线下降速度极慢,之后在界面中心达到极大值点0.86 s时,壁面附着液体层下缘变薄,形成液体层。在接触线二次后退时,液体层消失。同时接触线振荡幅度随振荡次数逐渐减小。接触线中心经历3次完整的振荡,振幅随时间减小,但周期几乎维持在0.86 s,表现出欠阻尼振荡的规律。奥内佐格数 Oh 计算如下:

$$Oh = \mu \sqrt{\rho \sigma L} \quad (1)$$

式中: μ 为液氧黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ 为液氧密度, kg/m^3 ; σ 为表面张力, N/m ; L 为特征长度, m ,本文选择实验腔半径为特征长度。

由式(1)计算可知,液氧在该实验腔内的 Oh 为 1.97×10^{-3} 。对于低静态接触角(即静态接触角小于 10° ^[15])与低 Oh 数(即 $Oh < 2 \times 10^{-3}$)的常重力向微重力变化的重定位实验中,液体层会形成^[16]。符合常温流体的液体层形成规律,但在二次振荡后,固壁面与液氧的持续换热导致液体层消失,这是低温流体所独有的现象。

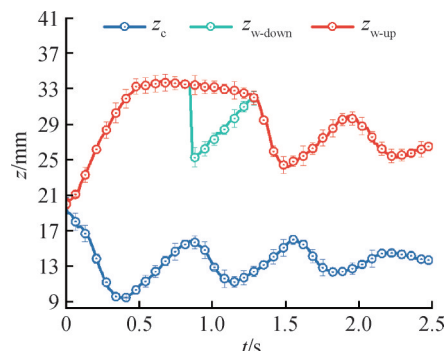


图9 重定位过程界面位置演化

Fig.9 Interface location evolution in the reorientation process

重定位过程中不同时刻的界面形状如图10所示。由图10可知,初始状态下近壁面处界面保持弯曲^[17],随着时间的推移,界面并未出现文献[18]中由无滑移边界条件计算界面重定位过程得到的界面固定点,界面上的每个点均随着时间的推移而移动。在1 s的界面形状可以清晰地看到液体层的出现,液体层下缘处极薄,几乎贴近固体内壁面。

2.3 液氧重定位过程热力学行为

在从常重力到微重力转变的过程中,气相区内不同高度处的温度变化如图11所示。常重力阶段,由于冷源液氮罐的存在,气相区温度随着时间持续下降。当重力水平转化为微重力时,由于弱浮力对流的影响,温度立刻上升。进入微重力阶段后,在0.5 s前,测点3的温度上升速率较为缓慢,而测点1和测点2的温度则在几乎整个2.5 s的观测期内以相

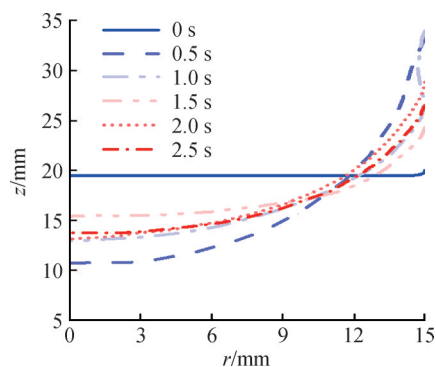


图 10 重定位过程界面形状随时间变化

Fig.10 Interface shape evolution in the reorientation process

对均匀的速率持续上升。该现象表明,位置越低的气体受重力转变过程的影响越明显,温度响应也越慢,进一步说明在重定位过程中,温度变化的影响方向是由上向下传递的,而非由气液界面处由下向上传播。各测点温度的持续上升主要受到固壁面传热的影响。由于测点 1 和测点 2 均位于接触线波动最高点(34.8 mm)以上,其温度变化规律较为一致,主要表现为受流固换热的持续加热作用,温度均匀上升。相比之下,测点 3 距离界面初始位置仅 15.2 mm,其温度变化不仅受到固壁传热的影响,还受到界面振荡所引起的低温气体流动的干扰。具体而言,随着接触线向上爬升,半径较大区域内液氧附近的低温气体随之向上迁移,并在界面中心波动过程中被反冲至较高气相区域,从而使得测点 3 处的温升速率相对较缓。在整个 2.5 s 的重定位过程中,该点温度上升较慢。

图 12 所示为液氧界面重定位过程气相区压强的变化。由图 12 可知,常重力过程受到冷源的影响,压强缓慢下降。在进入微重力阶段后,氧气压强上升,同时其增压速率随时间动态变化。在初始阶段(前 0.5 s),压强基本保持稳定,上升速率较低。该阶段液氧接触线刚开始爬升,流固之间的换热强度较弱,尚未引发显著的液氧蒸发现象,因此增压效果有限。0.5 s 后,增压速率显著提高,并伴随界面振荡呈现周期性波动。进一步观察发现,增压速率的每个极大值均出现在接触线波动达到下峰值的位置。这是因为接触线处于下峰值时,蒸发区域扩大,同时气相从固壁面吸收的热量达到最大,共同导致蒸发增强,从而使增压速率达到峰值。

3 结论

本文针对液氧重定位过程的界面运动规律与换热规律建立了重定位实验系统,并利用地面落塔开展了微重力和变重力条件下的重定位研究。得到针

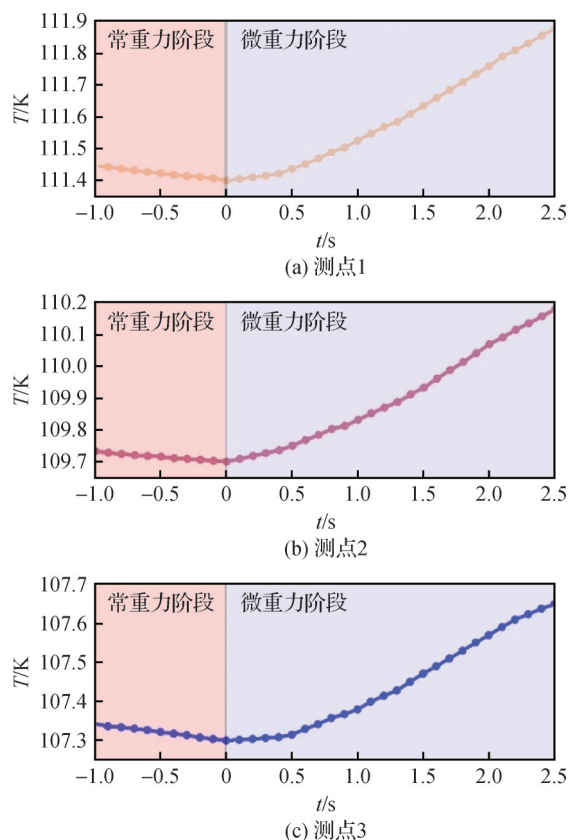


图 11 液氧界面重定位过程气相区温度演化规律

Fig.11 Temperature evolution of different locations in the LOX interface reorientation

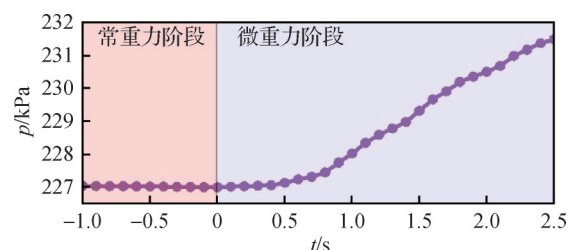


图 12 液氧界面重定位过程气相区压强演化规律

Fig.12 Pressure evolution of different locations in the LOX interface reorientation

对常重力转变为微重力阶段的实验结果进行分析,主要结论如下:

1) 在从常重力向微重力转变的初始阶段,界面中心受到接触线爬升的影响运动滞后,形成短时间的上凸形状。实验腔内液氧的三相接触线迅速爬升,达到 34.8 mm 的最高点后开始缓慢下降,同时壁面附着液层的厚度逐渐减薄。约在 0.86 s 时,形成独立的壁面液体层,其运动与主流液体的欠阻尼振荡无关。随后,当液体层下缘被再次上升的主流液体覆盖后,接触线发生回退,在蒸发效应的作用下,该壁面液体层最终消失。

2) 在微重力阶段,气相区的压强呈现持续上升趋势。0.5 s 前,接触线刚开始爬升,增压速率几乎为

0.随着接触线波动,壁面液体层的形成显著增大了液氧的蒸发面积,致使蒸发量急剧增加,从而造成增压速率上升。

3)重定位过程温度变化规律表明,距离界面15 mm处的气体温度在前0.5 s时几乎保持不变。在高于接触线最大波动高度(34.8 mm)的气相区域,温度几乎不受界面振荡的影响,在固壁导热的影响下温度匀速升高。距离界面初始位置15.2 mm处的测点,其温度变化不仅受固壁传热的影响,还受到界面振荡所引起的低温气体流动的干扰,在整个2.5 s的重定位过程中,该测点的温度上升量低于另外2个温度传感器测得的数值。

参考文献

- [1] 郭松源,周晓庆,缪五兵,等.火箭上升段含多孔板液氧贮箱增压输运数值研究[J].化工学报,2025,76(增刊1):62-74.(GUO Songyuan, ZHOU Xiaoqing, MIAO Wubing, et al. Numerical study on pressurized transport of liquid oxygen tank with perforated plate in rocket ascent stage[J]. CIESC Journal, 2025, 76(Suppl. 1): 62-74.)
- [2] GUO Songyuan, JIANG Zan, LI Jianqiang, et al. Numerical investigation on helium pressurization behavior of cryogenic propellant in microgravity [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 269: 125926.
- [3] KULEV N, BASTING S, BÄNSCH E, et al. Interface reorientation of cryogenic liquids under non-isothermal boundary conditions[J]. Cryogenics, 2014, 62: 48-59.
- [4] GUO Songyuan, XIAO Mingkun, XIE Fang, et al. Optimization of helium consumption for feedback pressurization in liquid oxygen tanks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 230: 125739.
- [5] KÖNEMANN T, KACZMARCZIK U, GIERSE A, et al. Concept for a next-generation drop tower system [J]. Advances in Space Research, 2015, 55(6): 1728-1733.
- [6] MASICA W J, PETRASH D A. Motion of liquid-vapor interface in response to imposed acceleration[R]. Cleveland: Lewis Research Center, 1965.
- [7] MICHAELIS M, DREYER M E, RATH H J. Experimental investigation of the liquid interface reorientation upon step reduction in gravity[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2002, 974: 246-260.
- [8] GERSTMANN J, MICHAELIS M, DREYER M. Capillary driven oscillations of a free liquid interface under non-isothermal conditions[J]. Pamm, 2004, 4(1): 436-437.
- [9] GOVINDAN S N C, DREYER M E. Experimental investigation of liquid interface stability during the filling of a tank in microgravity [J]. Microgravity Science and Technology, 2023, 35(3): 23.
- [10] STIEF M, GERSTMANN J, DREYER M E. Reorientation of cryogenic fluids upon step reduction of gravity [J]. Pamm, 2005, 5(1): 553-554.
- [11] KULEV N, DREYER M. Drop tower experiments on non-isothermal reorientation of cryogenic liquids[J]. Microgravity Science and Technology, 2010, 22(4): 463-474.
- [12] 王峥,王晔,金鑫,等.网幕通道式液体获取装置的入口速度分布特性研究[J].真空与低温,2022,28(5):556-564.(WANG Zheng, WANG Ye, JIN Xin, et al. Investigation on the velocity distribution in screen-channel liquid acquisition device [J]. Vacuum and Cryogenics, 2022, 28(5): 556-564.)
- [13] BELLUR K, ME'DICI E F, KULSHRESHTHA M, et al. A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants [J]. Cryogenics, 2016, 74: 131-137.
- [14] 范志杰,王俊表,陈来夫,等.北京落塔落舱质心快速测量与调整方法研究[J].力学与实践,2025,47(4):754-758.(FAN Zhijie, WANG Junbiao, CHEN Laifu, et al. Methodology study on measurement and adjustment of drop capsule's centroid in the drop tower Beijing [J]. Mechanics in Engineering, 2025, 47(4): 754-758.)
- [15] 王磊,贾洲侠,瞿森,等.低温流体管理技术重力依赖性分析与微重力试验方案[J].制冷学报,2021,42(4):1-11.(WANG Lei, JIA Zhouxia, QU Miao, et al. Gravity-dependence analysis of cryogenic fluid management techniques in space and experimental scheme suggestions [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(4): 1-11.)
- [16] MICHAELIS M, GERSTMANN J, DREYER M E, et al. Damping behavior of the free liquid interface oscillation upon step reduction in gravity [J]. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 2003, 2(1): 320-321.
- [17] 易天浩,邱一男,徐元元,等.微重力下低温流体动态毛细爬升的数值模拟[J].制冷学报,2023,44(4):141-149.(YI Tianhao, QIU Yinan, XU Yuanyuan, et al. Numerical simulation of dynamic capillary rise with cryogenic fluids under microgravity [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(4): 141-149.)
- [18] GERSTMANN J, DREYER M E. Axisymmetric surface oscillations in a cylindrical container with compensated gravity[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2006, 1077(1): 328-350.

通信作者简介

杨光,男,副教授,上海交通大学机械与动力工程学院,021-34206814,E-mail:y_g@sjtu.edu.cn.研究方向:低温流动与传热。

About the corresponding author

Yang Guang, male, associate professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 86-21-34206814, E-mail:y_g@sjtu.edu.cn. Research fields: flow and heat transfer of cryogenic fluids.