

文章编号:0253-4339(2025)05-0039-08

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.05.039

氢液化与低温储运

微重力条件下推进剂管理装置对低温液氢贮箱的蓄流稳定性研究

王云龙¹ 马原^{1,2} 张荣达¹ 王康¹ 厉彦忠¹

(1 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049; 2 西安交通大学深低温技术与装备教育部重点实验室 西安 710049)

摘要 为研究航天低温推进系统实际工况中网幕通道式贮箱对液氢的在轨管理能力,通过构建充注率-扰动强度耦合作用的三维多相流仿真模型,研究了微重力重定位过程中网幕通道式贮箱内毛细-惯性力竞争机制及蓄流稳定性。结果表明:网幕通道式贮箱的推进剂蓄流能力主要由集液通道与贮箱壁面的复合结构提供。在5%~50%充注率时,贮箱能够抵抗 10^{-3} g大小的多向扰动,维持集液通道入口区域始终保持连续液相覆盖的蓄流稳定性;低充注下,重定位过程中气液相分布主要受到网幕通道结构表面的强约束,相界面演化受扰动影响很小,随着充注量增大,流体惯性力和扰动动量输运效应成为相分布重构的重要因素,重定位过程相分布出现明显振荡;贮箱重定位过程中对扰动方向的敏感性不同,底部加速度引起的质心降幅最大,顶部加速度对相对质心高度影响较小,正侧向扰动比斜侧向扰动引起的质心波动幅度和波动频率均更大。

关键词 蓄流稳定性;重定位;网幕通道式贮箱;推进剂管理装置;微重力

中图分类号:TK91;V19;V421.33

文献标识码:A

Investigation on Fluid Retention Stability of Propellant Management Devices in Cryogenic Liquid Hydrogen Tank under Microgravity Conditions

Wang Yunlong¹ Ma Yuan^{1,2} Zhang Rongda¹ Wang Kang¹ Li Yanzhong¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. MOE Key Laboratory of Cryogenic Technology and Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract This study investigates the in-orbit liquid hydrogen management capability of screen channel tanks in cryogenic propulsion systems by developing a three-dimensional multiphysics model that integrates filling ratios (5%–50%) and microgravity disturbances (10^{-3} g). The competition mechanism between capillary and inertial forces, as well as the fluid retention stability during tank reorientation, was systematically analyzed. The key findings include the following. The fluid retention capability was attributed to the structural synergy between liquid collection channels and tank walls, ensuring continuous liquid coverage at the channel inlets under all operating conditions. At low filling ratios, surface tension dominated the phase distribution with a quasi-static interfacial evolution. Increased filling enhanced inertial forces, inducing phase oscillations via momentum transport. The directional sensitivity analysis revealed that bottom acceleration induced the largest centroid depression, top acceleration had a minimal impact on the relative centroid height, and lateral disturbances caused larger centroid oscillation amplitudes and higher frequencies than oblique lateral disturbances.

Keywords liquid retention stability; reorientation; screen channel tank; propellant management device; microgravity

液氢和液氧等低温推进剂因高比冲、无毒无污染等优点,在可重复运载火箭、深空探测等领域具有广阔前景。然而,空间微重力环境下,传统重力场主导的流体调控机制失效,变轨机动、姿态调控等操作极易影响贮箱内推进剂的分布形态,导致气液相态混杂,无法满足推进器可靠点火以及轨道燃料补给等关键操作的单相介质输运要求^[1]。SCLAD(网幕通道式液体获取装置, screen channel liquid acquisition device)通过利用空间环境中主导的毛细力,在零能

耗条件下实现持续气液相分离,尤其适用于未来深空探测任务对长周期、高可靠性推进系统的严苛需求^[2]。

网幕通道式贮箱沿贮箱内壁周向排布集液通道阵列,其中面向贮箱内壁侧安装金属丝织网幕,通过毛细-表面张力协同作用实现推进剂的气液相分离,展现出优秀的微重力适应性和流量调控能力。该装置不仅适用于常规推进剂,低温工况下的气液相分离能力已通过空间实验获得验证^[3-4]。国内外学者针

对网幕本身,如芯吸作用^[5-6]、泡破压力^[7-8]、穿透压损^[9-10]等关键参数开展大量的理论计算与实验研究,对网幕的基础理论研究已进入成熟阶段。目前,针对网幕通道式贮箱的研究多聚焦于单根通道出流性能。王晔等^[11]以液氮为工质研究了网幕通道在稳定运行工况和临界泡破失效工况下的相分离性能,研究了多种规格网幕的极限取液性能。Wang Zheng 等^[12]结合粒子图像测速与多物理场仿真,揭示了网幕入口处流体输运的非均匀特性。Li Jian 等^[13]构建了压力驱动边界的网幕通道出流模型,分析了通道结构尺寸,驱动压力及网幕规格对出流性能的影响。张悦等^[14-15]通过水平出流实验构建了网幕参数与穿透压损的量化关联模型,并研究了网幕通道布置形式对其取液性能的影响。刘畅等^[16]针对不同的网幕暴露高度和出流流量通过计算及实验研究了地面环境下网幕通道液体获取装置的压降规律,发现网幕穿透压损主要受过网速度影响。D. Chato 等^[17-18]采用计算流体力学方法,系统分析了通道取向对出流压力损耗的耦合作用机制。然而,现有研究多局限于稳态工况分析,对实际扰动条件下的微重力相态调控机理研究尚为薄弱,特别是整器级网幕通道式贮箱的动态蓄流特性研究仍亟待开展。

本研究基于计算流体力学数值模拟技术,通过构建充注率耦合扰动作用下的三维多相流仿真模型,重点分析微重力条件下,受不同扰动作用时网幕通道式贮箱在非稳态重定位过程中的气液相管理机制。从相界面演化特征、质心动态响应参数等视角,揭示不同充注率水平协同扰动作用时对集液通道的蓄流能力及毛细-惯性力竞争机制对气液相态分布的控制规律。

1 模型构建

1.1 物理模型

本文研究的网幕通道式贮箱为球形贮箱,参考文献[3]中贮箱结构参数,容积为 4 L,半径为 98.5 mm。贮箱内沿 +x、-x、+z 和 -z 方向分别布置了 4 通道 SCLAD,网幕面与贮箱内壁之间距离取 2.5 mm,截面 A 位于 xoy 平面。集液通道的宽度设计为 26 mm,高度为 4.5 mm。构造的网幕通道式如图 1 所示。

1.2 数学模型

采用基于 VOF(流体体积法, volume of fluid)的多相流数值求解框架,以精确解析扰动条件下贮箱内气液相界面的多尺度演化特征。构建的连续性方程如式(1)所示:

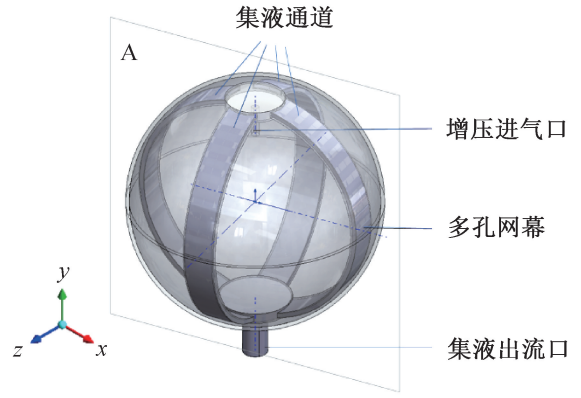


图 1 贮箱三维结构模型

Fig.1 3D structural model of tank

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_q \rho_q) + \nabla(\gamma_q \rho_q \mathbf{v}_q) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; \mathbf{v} 为速度矢量, m/s ; γ 为体积分数, 满足式(1); 下标 q 代表第 q 相。

$$\sum_{q=1}^n \gamma_q = 1 \quad (2)$$

在微重力环境流体动力学分析中,表面张力效应占据主导地位。采用 CSF(连续表面张力, continuum surface force)模型对界面张力效应进行数学表征,其动量方程引入源项可表述为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{vol}} \quad (3)$$

式中: μ 为黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; \mathbf{g} 为微重力加速度(矢量), m/s^2 ; p 为贮箱压力, Pa ; \mathbf{F}_{vol} 为考虑表面张力作用引入的体积力源项(矢量), N/m 。其中, μ 和 \mathbf{g} 均通过体积分数加权计算。

金属网幕作为典型多孔介质,在宏观贮箱尺度与微观孔隙结构跨尺度建模模拟会面临计算精度与计算效率的矛盾。鉴于集液通道出流特性的工程分析需求,采用等效边界层假设:将三维多孔介质简化为二维阻抗界面,忽略法向速度梯度($\partial v/\partial y \approx 0$)。使用多孔跃迁模型(Porous Jump)将金属网幕简化为多孔阶跃面,通过网幕面的压降为:

$$\Delta p_{\text{FST}} = \left(\frac{\mu v}{\alpha} + \frac{C_2 \rho v^2}{2} \right) \delta \quad (4)$$

式中: v 为通过网幕的速度(标量), m/s ; α 为面渗透率, m^2 ; C_2 为惯性阻力系数, m^{-1} ; δ 为网幕厚度, m 。

在微重力流体动力学研究中,由于贮箱内流体流动较为微弱,采用层流控制方程描述推进剂重定位过程。壁面边界采用速度-应力耦合约束,并设置接触角为 0° ^[19]。工质体系选取液氢(LH_2)、气氢(GH_2)两相介质,表面张力为 $1.919 \text{ mN}/\text{m}$ 。基于等温过程

假设,物性参数设为定值,如表 1 所示。

表 1 气氢及液氢的物性参数

Tab.1 Physical property parameters of GH₂ and LH₂

材料	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	动力黏度 $\mu / (\text{Pa}\cdot\text{s})$
GH ₂	1.316	9.938×10^{-7}
LH ₂	70.899	1.354×10^{-5}

2 模型验证及网格无关性验证

2.1 模型验证

基于日本 MMX (火星卫星探测任务, Martian Moons eXploration) 中的贮箱重定位落塔实验^[20],开展了对比仿真分析。实验装置采用直径为 87 mm 的球形储罐,以水作为工质。实验的重力序列如下 (g 为重力加速度的标量大小):1)维持 $0.04g$ 加速度 20 s;2)施加 $2g$ 加速度 0.067 s;3)保持零重力环境 0.172 s;4)施加 $-5g$ 加速度 0.022 s。图 2 所示为文献结果与本文在 0、0.2、0.4、0.5 和 0.6 s 时刻的仿真结果。仿真结果表明,不同工况下的气液相界面演化特征与实验数据呈现显著一致性,验证了本模型对微重力条件下贮箱内部两相迁移行为及界面动态变化的预测精度,尤其在复杂重力场转换过程中能够有效捕捉界面形态演变规律。

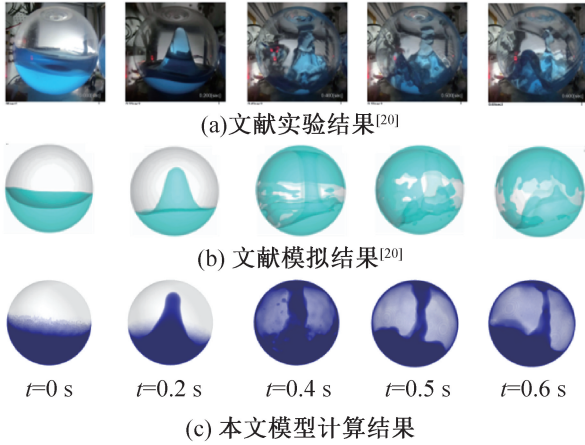


图 2 文献[20]工况验证结果

Fig.2 Verification results of operating conditions in reference [20]

2.2 网格无关性验证

针对目标网幕通道式贮箱,构建 6 组网格模型,分别为 2 197 200、2 269 492、2 443 100、2 702 936、3 388 044 和 3 742 212。选取 $10^{-3}g$ 底部加速度 ($-y$ 方向),50%充注率的工况开展网格独立性分析。以计算 5 s 后得到的液相质心高度进行对比,

结果如图 3 所示。由图 3 可知,当网格规模增至 270 万单元时,液相质心高度在 5 s 时间尺度的计算结果趋于稳定,网格加密仅引起 0.02% 的数值波动。在保证计算精度的同时考虑到时间成本,本文后续均采用数量为 2 702 936 对应精度的网格进行计算。

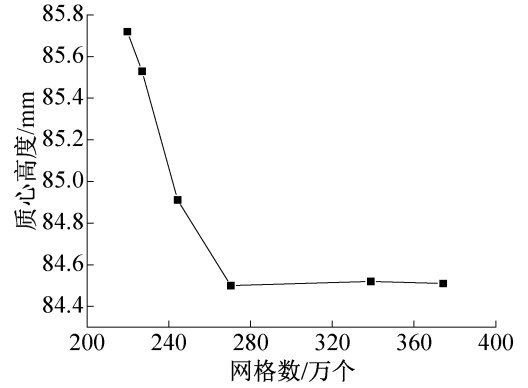


图 3 不同网格数对应液相质心高度计算结果

Fig.3 Calculation results of liquid phase centroid height for different grid numbers

3 结果与讨论

基于轨道环境中可能存在的扰动效应,本研究对目标网幕通道贮箱在 3 种加注水平及 4 类扰动工况下的重定位过程开展了多参数耦合数值模拟,其中,底部加速度为 $-y$ 方向,正侧加速度为 $+x$ 方向,斜侧加速度为 $+x$ 耦合 $+z$ 方向 ($x&z$ 方向),正侧 & 顶部加速度为 $+x$ 方向耦合 $+y$ 方向 ($x&y$ 方向),具体工况如表 2 所示。

表 2 仿真条件设置

Tab.2 Simulation condition settings

扰动方向	案例	扰动强度	充注率/%
底部加速度	1		5
	2	$y: -10^{-3}g$	25
	3		50
正侧加速度	4		5
	5	$x: 10^{-3}g$	25
	6		50
斜侧加速度	7		5
	8	$x&z: 10^{-3}g$	25
	9		50
正侧 & 顶部加速度	10		5
	11	$x: 10^{-3}g;$ $y: 10^{-3}g$	25
	12		50

贮箱内初始气液相分布设定为空间环境下 ($10^{-6}g$) 的气液相界面分布。可以观察到,在不同充注率条件下,网幕与贮箱内壁之间的区域受毛细作用影响始终被液体完全覆盖。当充注率为5%时,液体主要附着于集液通道结构处;随着充注率的升高,液体沿贮箱内壁分布,并在中心区域形成气枕区,具体分布形态如图4所示。在初始时刻($t=0$),施加相应的扰动条件。

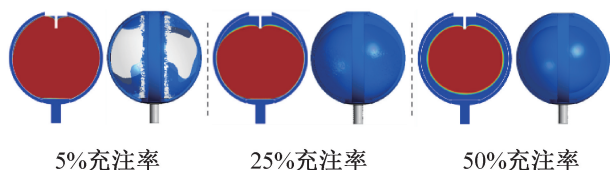


图4 不同充注率工况下初始时刻的气液相分布

Fig.4 Initial gas-liquid phase distribution under varied filling ratio conditions

3.1 重定位过程气液分布变化规律

以表2中的案例3为例,图5呈现了贮箱内气液相在0、3、4、5、9及20s时刻的二维和三维数值模拟结果,其中,二维云图始终取图1中标注的A截面位置进行展示。

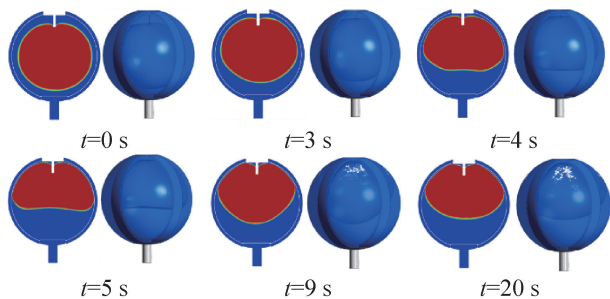


图5 案例3条件下重定位过程相态分布变化云图

Fig.5 Contours of phase distribution during reorientation under condition 3

0s时刻,在空间微重力环境下,液体依附于集液通道和贮箱内壁上,形成液体包裹气相区的“液封气”分布形态。当在 $-y$ 方向施加 $10^{-3}g$ 加速度 ($x=0g, z=0g$) 后,可以看出,在该重力水平下,表面张力作用不足以继续维持气液相的初场分布,液相在扰动加速度作用下沿集液通道和贮箱壁面向下移动,开始进行重定位。贮箱内质心高度变化可以分为2个阶段:第1阶段,质心高度变化剧烈阶段,施加扰动后,原有的气液相分布界面被破坏,贮箱内液体沿壁面和集液通道向下流动,质心高度变化剧烈;第2阶段,质心震荡平稳阶段,由于液体向下运动的动量扰动,到达贮箱底部后需经历界面形态调整和衰减性波动阶

段方能达到稳定状态。此时,原有的“液封气”分布形态改变,气枕区上移,与贮箱内壁直接接触。

图6所示为流体质心随时间的变化,并给出了几个节点上的气液相云图,用黄点标出了此时的质心位置,可以看出,初始阶段,质心从初始位置快速下移,这与图5中重力作用下液体沿集液通道及贮箱内壁的向下迁移观测结果相吻合。随后质心高度呈现振荡特性并逐步趋于稳定,该动态过程与图5呈现的相界面变形、振荡衰减及最终平衡状态具有时间同步性。

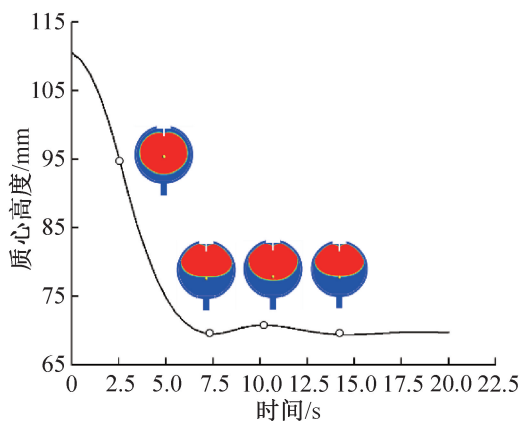


图6 案例3条件下重定位过程质心变化

Fig.6 Change of centroid during reorientation under condition 3

3.2 充注率耦合扰动下的蓄流稳定性分析

对表2所列12种工况条件进行变工况计算,图7所示为重定位结束后,计算达到稳定后得到的液氢贮箱内的二维和三维气液相分布云图。

在5%充注率工况下,受到4种不同扰动模式作用后,贮箱内推进剂液体均主要集中于集液通道与内壁间隙区域。由图7可知,仅微量液体以膜形态分布于贮箱内壁并脱离控制,这验证了网幕通道具有显著的液体聚集蓄留作用。同时还可以看出,SCLAD的有效作用范围存在物理边界约束,当扰动导致局部液体脱离主体时,若无法及时接触主流体或SCLAD表面,则可能被贮箱壁面捕获形成离散液膜,从而超出装置管理能力。仿真结果表明,在低充注条件下,扰动会引起局部管理失效,但网幕通道式贮箱在经受多类型扰动时仍能对主体推进剂液体维持良好的蓄流稳定性。

在25%充注率工况下,液体仍主要分布于网幕通道结构区域,网幕入口界面始终维持完全浸润状态。对比低充注率(5%)工况,贮箱对推进剂液体约束存在双重机制:与网幕通道直接接触的液相在SCLAD表面张力作用下形成强约束域,展现出优异

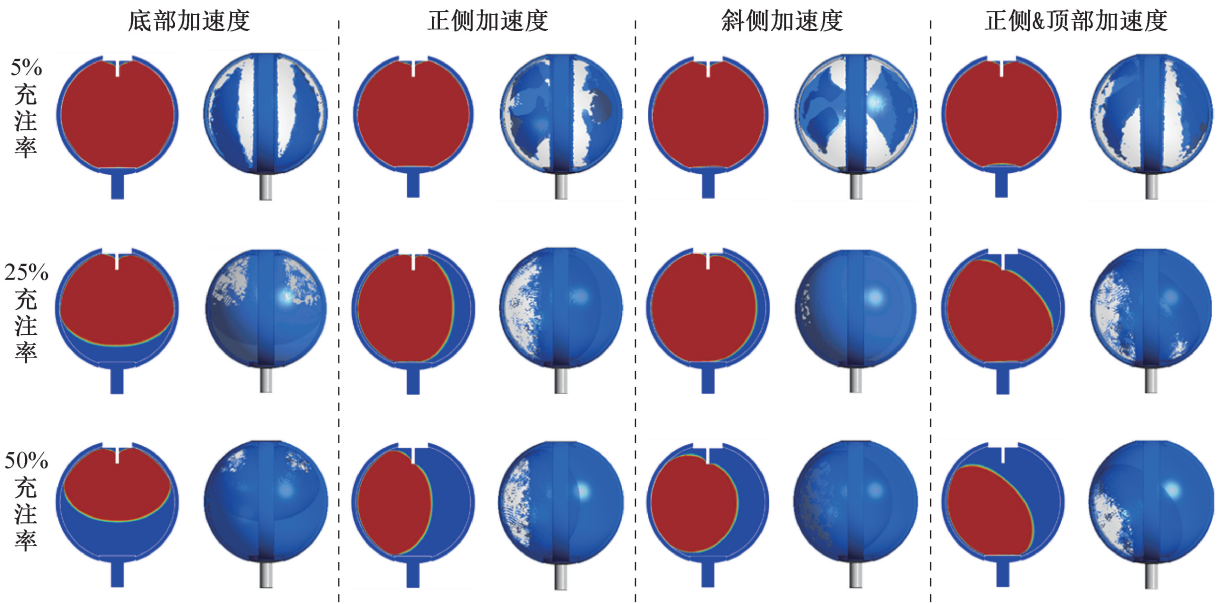


图 7 网幕通道式贮箱重定位稳定后的相分布云图对比

Fig.7 Comparison contours images of the screen channel tank after reorientation and stabilization

的抗扰动蓄流能力;而游离于通道外的液相则受液团内聚力和贮箱内壁润湿效应协同作用,呈现方向敏感性的弱约束特征,扰动激励引发的动量输运效应成为相分布重构的重要因素。值得注意的是,充注量提升使液相与 SCLAD 结构及主液团的接触概率显著提升,大幅降低壁面离散液膜的形成风险。仿真结果表明,网幕通道式贮箱在此充注条件下可实现液体的有效管理,不会形成局部脱离液团,其蓄流效果较低充注工况有所提升。

充注率增至 50%时,重定位结束后的气液界面分布模式与 25% 工况呈现相似特性,部分无法被 SCLAD 和贮箱壁面强约束的推进剂会响应加速度方向变化发生位置迁移,该迁移过程致使气相区始终稳定于扰动相反方向处,两者的区别体现在气相体积分数的差异。

为系统分析不同扰动条件下网幕通道式贮箱对液体的分布管理和稳定性管控能力,图 8 呈现了重定位进程中推进剂归一化质心坐标(液相质心高度/贮箱高度,贮箱球形部分)的演变规律。该量化指标有效表征了推进剂管理系统的瞬态响应特征及稳态控制精度。

初始时刻,在初始 $10^{-6}g$ 微重力条件下,除蓄流于网幕与贮箱内壁之间区域及集液出流口内的液相以外,其他液体周向依附于贮箱内壁。5%充注率时,液相不足以环绕整个贮箱内壁,且底部集液出流口上方空间蓄流的液体量占比较大,相对质心高度约为 0.475。随着充注率的提高,贮箱内形成“液封气”形

态,并且有更多液体在表面张力作用下依附于贮箱顶部进气口的结构表面,使得贮箱内液相相对质心高度较低充注率工况上移。

充注率仅为 5%时,液相主要受集液通道和贮箱内壁间的表面张力的强作用,施加不同方向的扰动加速度对贮箱内的气液分布影响较弱,网幕通道式贮箱的相对质心高度变化幅度在 ± 0.03 以内。随着充注率的增加,液相的增多使游离于集液通道的液团增多,不同方向的加速度对贮箱内液相迁移行为的影响逐渐增大。在 25%充注率,在稳定前相对质心高度存在较为明显的波动振荡。当充注率增至 50%时,不同方向的扰动加速度引起的贮箱质心变化幅度较 25%充注率工况均有所下降,这可能是由于液体的进一步增多,使液团内聚力对扰动的抵抗性和迟滞性均有所增强。

进一步对比 25%和 50%充注率工况,不同扰动条件引起的贮箱质心变化规律发现, $-y$ 方向扰动将引发贮箱质心降幅最大,侧向扰动($+x$ 或 $x&z$ 方向)则使相对质心高度稳定于约 0.50。当施加 $x&y$ 方向的扰动时由于存在 $+y$ 相的加速度,液体有沿 SCLAD 和贮箱壁面向上爬升的趋势,因此相对质心高度呈先升高后稳定趋势,且最终稳定的质心高度最高。施加 $+x$ 方向和 $x&z$ 方向的扰动后,贮箱质心变化高度及变化幅度较为接近,但正侧加速度($+x$ 方向)比斜侧加速度($x&z$ 方向)的波动频率和幅度更为剧烈,这是由于当施加斜侧加速度,贮箱两侧的集液通道对液相有更强的阻尼和蓄流能力。

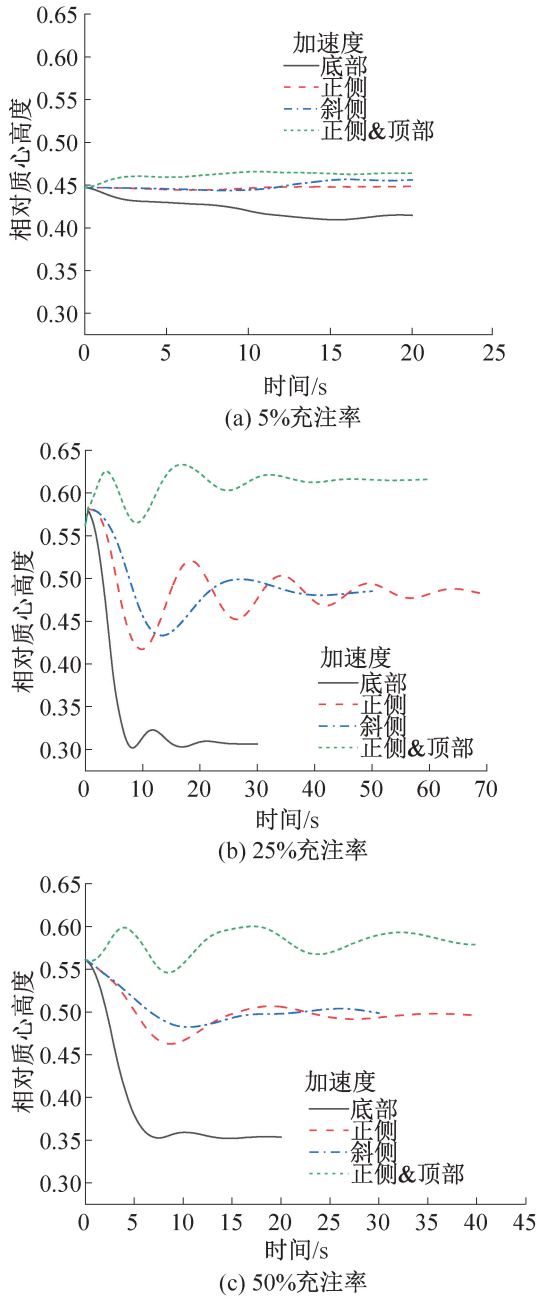


图8 不同充注率下网幕通道式贮箱重定位过程中相对质心变化对比

Fig.8 Comparison of the relative centroid change during the reorientation of the screen channel tank under different fill ratios

4 结论

本研究根据航天器推进系统实际工况需求,通过构建充注率-扰动强度耦合作用的三维多相流仿真模型,研究了重定位过程中网幕通道式贮箱内毛细-惯性力竞争机制及蓄流稳定性,得到如下结论:

1)网幕通道式贮箱的推进剂管理能力主要源于

网幕集液通道与贮箱壁面等结构表面的复合作用。基于网幕表面及网幕通道与贮箱壁面间狭缝区域的表面张力和毛细作用,针对5%~50%充注率条件,在 $10^{-3}g$ 量级的多向扰动下,液氢贮箱集液通道入口区域能够始终保持连续液相覆盖,呈现良好的蓄流稳定性。

2)在低充注工况下,重定位过程中气液相分布主要受到SCLAD结构表面的强约束,其相界面演化呈现准静态特征,受外界扰动影响小。随着充注水平的升高,蓄流能力转变为部分液体强约束和部分液体弱约束的双重蓄流机制,惯性力对主流液团气液相分布的影响增强,扰动激励引发的动量输运效应成为相分布重构的重要因素,从而导致推进剂贮箱质心在外界扰动下呈现非稳态波动特征。

3)针对 $10^{-6}g$ 微重力条件的初始气液相分布情况,网幕通道式贮箱对于底部加速度扰动的重定位响应最敏感,引发的质心变化幅度最大,顶部加速度对相对质心高度影响较小。侧向扰动使相对质心高度稳定于约0.50,但正侧加速度扰动比斜侧加速度扰动引起的质心波动频率和波动幅度更为剧烈。

本文受2024民用航天技术预先研究项目资助。(The project was supported by 2024 Civil Aerospace Technology Pre-research Project.)

参考文献

[1] 马原, 厉彦忠, 王磊, 等. 低温推进剂在轨加注技术与方案研究综述[J]. 宇航学报, 2016, 37(3): 245-252. (MA Yuan, LI Yanzhong, WANG Lei, et al. Review on on-orbit refueling techniques and schemes of cryogenic propellants[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(3): 245-252.)

[2] HARTWIG J W. Propellant management devices for low-gravity fluid management: past, present, and future applications[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2017, 54(4): 808-824.

[3] DOMINICK S M, GEORGE C. Marshall space flight center. fluid acquisition and resupply experiments on space shuttle flights STS-53 and STS-57[EB/OL]. (2011-10-20) [2025-04-30]. <https://purl.fdlp.gov/GPO/gpo14213>.

[4] 马原, 陈虹, 邢科伟, 等. 低温推进剂网幕通道式液体获取装置性能研究进展[J]. 制冷学报, 2019, 40(3): 1-7. (MA Yuan, CHEN Hong, XING Kewei, et al. Review of screen channel liquid acquisition device for cryogenic propellants[J]. Journal of Refrigeration, 2019,

- 40(3): 1-7.)
- [5] YAEGERS D A, HARTWIG J W, CAMAROTTI C, et al. Liquid nitrogen wicking rate experiments for screen channel liquid acquisition devices [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 145: 106851.
- [6] 马原, 雷刚, 徐元元, 等. 液体获取装置金属筛网内饱和液氢芯吸性能研究[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(10): 124-130. (MA Yuan, LEI Gang, XU Yuanyuan, et al. Wicking performance of saturated liquid hydrogen within metallic screens of liquid acquisition devices[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(10): 124-130.)
- [7] 马原, 孙靖阳, 厉彦忠, 等. 增压速率对多孔金属筛网泡破压力影响的实验研究[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(11): 192-198. (MA Yuan, SUN Jingyang, LI Yanzhong, et al. Experimental study on the effects of pressurization rate on bubble point pressure of porous metallic screens[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(11): 192-198.)
- [8] HARTWIG J, CHATO D, MCQUILLEN J. Screen channel LAD bubble point tests in liquid hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(2): 853-861.
- [9] WANG Ye, YANG Guang, HUANG Yiye, et al. Analytical model of flow-through-screen pressure drop for metal wire screens considering the effects of pore structures [J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 229: 116037.
- [10] CAMAROTTI C, DENG O, DARR S, et al. Room temperature bubble point, flow-through screen, and wicking experiments for screen channel liquid acquisition devices[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149: 1170-1185.
- [11] 王晔, 杨光, 金鑫, 等. 网幕通道式液体获取装置相分离特性低温实验研究[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(12): 253-260. (WANG Ye, YANG Guang, JIN Xin, et al. Cryogenic experimental study on the phase separation performance of screen channel liquid acquisition device [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(12): 253-260.)
- [12] WANG Zheng, YANG Guang, WANG Ye, et al. A three-dimensional flow model of screen channel liquid acquisition devices for propellant management in microgravity [J]. *NPJ Microgravity*, 2022, 8(1): 28.
- [13] LI Jian, LI Yanzhong, MA Yuan, et al. Performance analysis and improved design of screen channel liquid acquisition device for hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(56): 23856-23870.
- [14] 张悦, 马原, 王云龙, 等. 网幕通道式液体获取装置水平出流性能研究[J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(11): 196-204. (ZHANG Yue, MA Yuan, WANG Yunlong, et al. Research on horizontal outflow performance of screen channel liquid acquisition devices[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(11): 196-204.)
- [15] 张悦, 马原, 王云龙, 等. 通道布置形式对网幕通道式液体获取装置取液性能的影响研究[J/OL]. *西安交通大学学报*, 2025: 1-10. (2025-02-26) [2025-04-30]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XAJT20250225001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (ZHANG Yue, MA Yuan, WANG Yunlong, et al. Study on the influence of channel arrangement on the liquid fetching performance of the screen channel liquid fetching device [J/OL]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025: 1-10. (2025-02-26) [2025-04-30]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XAJT20250225001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.)
- [16] 刘畅, 肖泽宁, 胡声超, 等. 筛网通道液体获取装置降压模型及试验研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2021(1): 56-60. (LIU Chang, XIAO Zening, HU Shengchao, et al. Study on pressure drop model of screen channel liquid acquisition device [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2021(1): 56-60.)
- [17] CHATO D, MCQUILLEN J, MOTIL B, et al. CFD simulation of pressure drops in liquid acquisition device channel with sub-cooled oxygen [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, 58: 146-151.
- [18] MCQUILLEN J B, CHATO D J, MOTIL B J, et al. Porous screen applied in liquid acquisition device channel and cfd simulation of flow in the channel [J]. *Journal of Porous Media*, 2012, 15(5): 429-437.
- [19] HARTWIG J, DARR S. Influential factors for liquid acquisition device screen selection for cryogenic propulsion systems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66(1/2): 548-562.
- [20] ANI K, HIMENO T, SAKUMA Y, et al. Dynamics of low-gravity sloshing in spherical tanks during touchdown phases of landers [C]//AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. Indianapolis: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019.

通信作者简介

马原,女,副教授,西安交通大学能源与动力工程学院,17792410890,E-mail: yuan.ma@xjtu.edu.cn.研究方向:低温气液两相流机理(微重力、多孔介质、相变等);低温推进剂空间管理技术(气液分离、热防护等);低温液体发动机技术(涡轮泵轴密封、发生器燃料雾化等);低温储运技术(液氢、液氧、液甲烷,预冷与过冷、加注、结构热应力等)。

About the corresponding author

Ma Yuan, female, associate professor, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 86 - 17792410890, E-mail: yuan.ma@xjtu.edu.cn. Research fields: gas-liquid two-phase flow mechanism of cryogenic fluids (microgravity, porous media, phase change); space management technology for

cryogenic propellants (gas-liquid separation, thermal protection); cryogenic liquid rocket engine technology (turbo seal, fuel atomization); storage and transportation technology for cryogenic fluids (liquid hydrogen, liquid oxygen, liquid methane, pre-cooling and supercooling, filling, structural thermal stress).