

网幕通道式贮箱在轨重定位过程的蓄流稳定性研究

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, 710049, 西安;

2. 西安交通大学深低温技术与装备教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为明确网幕通道式贮箱在实际飞行中的工作特性及推进剂管理能力,基于流体体积法和连续表面张力模型,针对某网幕通道式贮箱建立了三维仿真模型,对不同充注率和不同扰动条件下贮箱重定位过程进行计算。研究了网幕通道式贮箱重定位过程中气液相分布规律及推进剂质心变化规律,并将网幕通道式与板式贮箱内的推进剂管理装置蓄流能力进行了对比分析。结果表明:面对多变的充注率与扰动条件,网幕通道式贮箱整体具有比板式贮箱更强的蓄流稳定性,特别是在5%低充注率条件下更不容易发生局部蓄流失效;低充注率下,重定位过程气液相分布主要受到网幕通道结构表面张力的强约束,随着充注率的增加,外加扰动对重定位过程气液相分布的影响逐渐增强,质心振荡幅度增大;针对液相位于底部的初始条件,网幕通道式贮箱对于反向加速度扰动的重定位响应最敏感,对于侧向加速度的扰动影响最难克服。研究可为网幕通道式贮箱在未来新型航天任务中的工程应用及设计优化提供参考。

关键词: 推进剂管理装置;网幕通道式贮箱;扰动条件;重定位;蓄流稳定性

中图分类号: V19 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202508005 **文章编号:** 0253-987X(2025)08-0042-11

Study on the Liquid Retention Stability During On-Orbit Reorientation Process of Screen Channel Tank

WANG Yunlong¹, MA Yuan^{1,2}, ZHANG Rongda¹, WANG Kang¹, LI Yanzhong¹

(1. Department 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: To clarify the working characteristics and propellant management capabilities of screen channel tanks during actual flight, a three-dimensional simulation model of a specific screen channel tank is established based on the volume of fluid model and the continuous surface tension model. The reorientation process of the tank is simulated under different filling rates and disturbance conditions. The distribution patterns of gas-liquid phases and the changes in the center of mass of the propellant during the reorientation process is examined, comparing the flow management capabilities of the screen channel tank with those of a vane-type tank. The results indicate that, in the face of varying filling rates and disturbance conditions, the screen channel tank exhibits greater liquid retention stability than the vane-type tank, particularly under a low

收稿日期: 2025-02-18。 作者简介: 王云龙(2001—),男,硕士生;马原(通信作者),女,副教授,硕士生导师。

基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(52476016);国家自然科学基金重大资助项目(52495001)。

网络出版时间: 2025-04-14

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250414.1534.004>

filling rate of 5%, where localized flow failure is less likely to occur. Under low filling conditions, the gas-liquid phase distribution during the reorientation process is primarily constrained by the surface tension of the screen channel structure. As the filling rate increases, the impact of external disturbances on the gas-liquid phase distribution during the reorientation process gradually intensifies, leading to an increase in the amplitude of center of mass oscillations. For initial conditions where the liquid phase is at the bottom, the screen channel tank responds most sensitively to reverse acceleration disturbances, while overcoming the effects of lateral acceleration disturbances is more challenging. This research provides a reference for the engineering application and design optimization of screen channel tanks in future aerospace missions.

Keywords: propellant management device; screen channel tank; disturbance condition; reorientation; liquid retention stability

空间环境下,在微重力、表面张力等弱力场作用下,推进剂贮箱内的气液分布极不稳定,很可能无法满足控压排气、发动机点火、在轨加注等任务对单相气体或液体推进剂的排放及输送需求。因此,必须对贮箱内气液相进行定位及分离^[1]。相比于需要额外耗能的主动助推式分离技术,表面张力式推进剂管理装置(PMD)能够充分利用空间环境下起主导作用的表面张力,在不消耗能量的条件下实现持续气液管理,对于未来大型长期深空探索任务更具优势^[2]。目前两种最典型的表面张力式 PMD 分别为板式和网幕通道式。

板式贮箱内部安装有一组或多组导流板,在表面张力作用下,对贮箱内推进剂进行定位并引流至出口位置。板式贮箱已成功应用在地球静止卫星、Viking 火星探测器、Cassini 土星探测器等多种航天器中^[3]。近年来,研究人员针对板式贮箱导流叶片的优化与设计进行了持续研究,Weislogel 等^[4]提出了一种用于预测带内角叶片自发毛细流的准确分析求解方法。Manning 等^[5]研究了叶片形状对 PMD 性能的影响,提出了一种可抗晃动的 PMD 设计方案。庄保堂等^[6]研究了微重力条件下不同截面形状导流叶片的传输性能,提出了导流叶片的优化方案。Chen 等^[7]基于实验测试,得出了最佳叶片和贮箱内壁间的最佳间隙宽度。Liu 等^[8]采用落塔实验,研究了叶片形状、微重力水平和方向及充注率对 PMD 性能的影响。近期,我国在中国空间站上开展了板式贮箱加注和排空过程微重力实验,验证了带中心柱板式贮箱良好的排空性能^[9]。

网幕通道式贮箱的 PMD 通常也称为网幕通道式液体获取装置(SCLAD),由安装在贮箱内壁附近的多根网幕集液通道构成。集液通道面向贮箱内壁一侧安装有金属丝织网幕,利用多孔网幕的表面张

力和毛细力对液体推进剂进行芯吸获取,对于重力水平及流量的适用范围较板式结构更广。该装置不仅能够适用于常温推进剂,低温流体适用性也获得了在轨实验验证^[10]。近年来,国内外研究学者针对网幕部件的关键性能指标,如芯吸引流^[11]、泡破压力^[12]、穿透压损^[13-14]等进行了深入研究,特别针对低温流体也开展了大量网幕性能的实验与理论研究^[15-18]。

航天器在执行任务过程中的滑行、变轨、姿态调整及误差修正等都会对推进剂贮箱内流体分布及流体行为产生扰动影响,若破坏贮箱内 PMD 蓄流稳定性则可能影响航天器的安全运行^[19]。Imai 等^[20]通过微重力实验可视化观测了微重力及扰动工况下,重定位过程中贮箱内气液相分布变化特征,但贮箱结构都较为简单。对于板式贮箱,研究学者多采用计算流体力学(CFD)的仿真方法,研究了微-变重力条件下的气液重定位特性。Collicott 等^[21]利用数值计算研究了不同叶片的临界润湿、叶片安装方向及初始条件对流体行为的影响。Wang 等^[22]对 4 种不同充注率水平和 5 种不同扰动条件下板式贮箱重定位过程的气液相分布及壁面应力分布特性进行了数值仿真。黄滨等^[23]对侧向激励下板式贮箱内推进剂的晃动行为进行了仿真分析,发现贮箱内液体的晃动幅度随充注率呈现先增加后减小的趋势。针对网幕通道式贮箱,现有研究多集中于单根集液通道的出流性能研究,Wang 等^[24]通过粒子图像测速技术和数值模拟,研究了流体进入网幕通道入口的不均匀性。张悦等^[25]基于水平出流实验测试与理论建模,明确了不同网幕规格和通道尺寸下沿程穿透压损和局部流量变化规律。文献[26-27]基于 CFD 方法对集液通道进行了水平与竖直出流的仿真研究,揭示了通道内流体行为对通道出流压力损

失的重要影响。然而,相关研究都只针对稳定工况,并未考虑实际任务中的扰动影响,针对整体网幕通道式贮箱的微重力重定位及蓄流特性研究更鲜有报道。

为进一步明确网幕通道式贮箱在微重力扰动条件下的推进剂管理能力,本文采用 CFD 方法,首次系统性地对某网幕通道式贮箱在扰动耦合充注率影响下的重定位过程开展了数值仿真研究。同时,对照板式贮箱,从相态分布、质心变化、稳定时间等方面分析了网幕通道式贮箱在重定位过程的蓄流稳定性。

1 模型构建

1.1 物理模型

贮箱结构尺寸取自文献[22]中板式贮箱相同的参数,容积为 4 L,上、下半球半径为 85 mm,圆段高度为 71 mm。贮箱内布置有 SCLAD,采用四通道结构,分别沿 X、-X、Z 和 -Z 方向布置,与贮箱内壁之间的距离为 2 mm,A 截面位于 XOY 平面。为方便与板式 PMD 进行对照分析,与文献[22]中板式结构总表面积相等为依据,设置各集液通道宽为 20 mm,高为 7 mm,所构建的网幕通道式贮箱如图 1 所示。

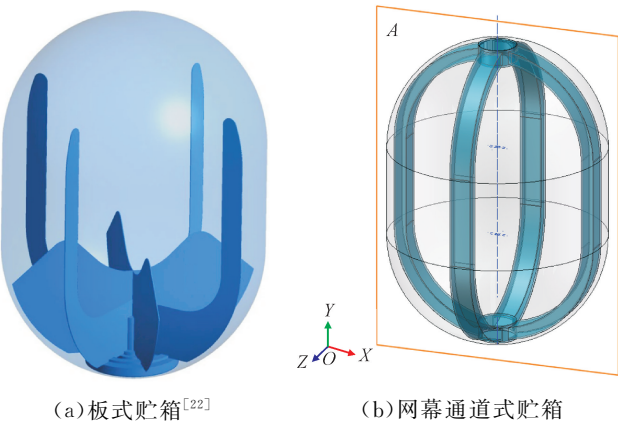


图 1 贮箱三维结构模型
Fig. 1 3D structural model of tank

1.2 数学模型

为准确追踪贮箱晃动过程中气液相界面的变化,采用 VOF 模型进行相界面捕捉。贮箱内的连续性方程如下

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

式中: α_q 为第 q 相的体积分数,满足

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

ρ_q 、 $\mathbf{v}_q$ 分别为第 q 相的密度和速度。

贮箱内动量方程为

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

式中: 密度 ρ 、黏度 μ 通过体积分数加权计算; $\mathbf{F}_{\text{vol}}$ 为考虑表面张力作用引入的体积力源项。微重力条件下,表面张力作用不可忽略,通过激活连续表面张力(CSF)模型加载该源项

$$\mathbf{F}_{\text{vol}} = \sigma_{ij} \frac{2\kappa_i \nabla \alpha_i}{(\rho_i + \rho_j)} \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 为表面张力系数; κ_i 为 i 相界面的曲率; α_i 为 i 相的体积分数; ρ_i 、 ρ_j 分别为 i 、 j 相密度。

微重力条件下,由于贮箱内流体流动较为微弱,采用层流模型描述重定位过程的流体运动。壁面设置为无滑移边界条件,接触角设置为 5° 。气、液相工质采用氦气(He)和肼(N_2H_4),气液相间表面张力 σ 为 0.069 8 N/m,忽略气液相间温度变化,流体物性均设置为定值,如表 1 所示。

表 1 氦气及肼的物性参数

Table 1 Physical property parameters of helium and hydrazine

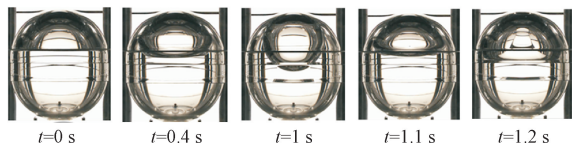
材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
He	0.162 5	1.99×10^{-5}
N_2H_4	1 008	9.35×10^{-4}

2 模型验证

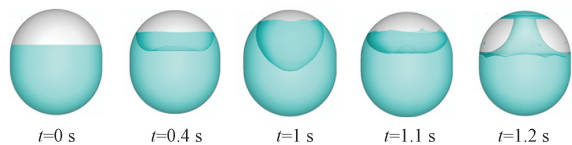
2.1 模型验证

选取日本火星月球探测(MMX)项目中开展的 2 组贮箱重定位落塔实验进行对比仿真分析。

文献[28]中的贮箱上、下半球直径为 80 mm,柱段高为 11 mm,实验工质为 FC40,实验工况如下:0 重力维持 1 s; -3 m/s^2 重力维持 0.14 s;后续维持 0 重力。图 2 给出了 0、0.4、1、1.1、1.2 s 时的文献结果与本文仿真计算结果。



(a) 文献[28]实验结果



(b) 文献[28]模拟结果

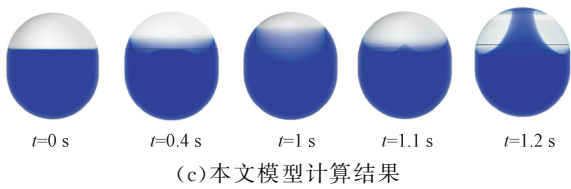


图 2 文献[28]工况验证结果

Fig. 2 Verification results of operating conditions in Ref. [28]

文献[29]中的贮箱为直径为 87 mm 的球形贮箱,实验工质为水,实验工况如下:0.04 g 重力维持 20 s;2 g 重力维持 0.067 s;0 重力维持 0.172 s;−5g 重力维持 0.022 s,后续维持 0 重力。图 3 给出了 0、0.2、0.4、0.5、0.6 s 时的文献结果与本文仿真计算结果。

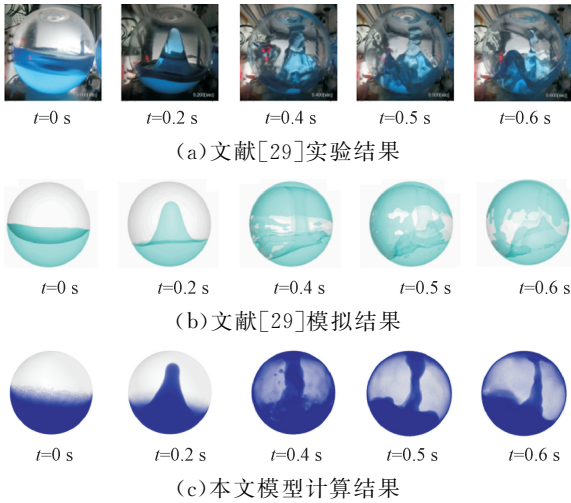


图 3 文献[29]工况验证结果

Fig. 3 Verification results of operating conditions in Ref. [29]

针对不同贮箱结构、不同工质及不同扰动条件,本文模型计算所得不同时刻下的气液相分布均与实验结果吻合良好,证明本文所建数值模型能够较为准确地预测微重力重定位过程中贮箱内气液相分布及相界面形态变化规律。

2.2 网格无关性验证

针对目标网幕通道式贮箱进行了网格数分别为 112 968、176 643、208 368、339 700、446 306 的 5 组网格划分。取正向(−Y 方向)加速度,50%充注率的工况为代表,进行网格无关性验证计算。图 4 给出了 5 组网格计算 20 s 得到的液相质心高度对比,可以看出,随着网格数增加至 20 万左右后,继续增加网格数不再对质心高度结果产生显著影响,变化幅度在 0.8%以内。综合考虑计算时间与精度,本文均采用网格数为 208 368 的网格进行计算。

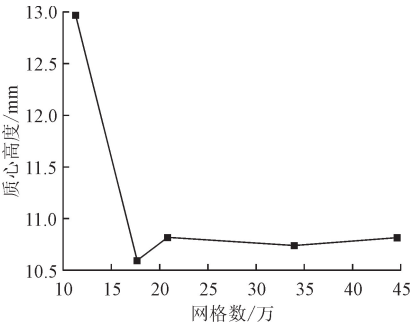


图 4 不同网格数对应液相质心高度计算结果

Fig. 4 Liquid phase centroid height for different grid numbers

3 结果与讨论

结合在轨环境可能遇到的扰动作用,参照文献[22]对目标网幕通道式贮箱开展 4 种充注率及 5 种扰动条件下的重定位过程计算,具体工况参数如表 2 所示,表中 g 为重力加速度。初始时刻气液相分布均设置为液体在贮箱底部且气液界面水平,0 s 时开始施加相应的扰动条件。

表 2 仿真条件设置

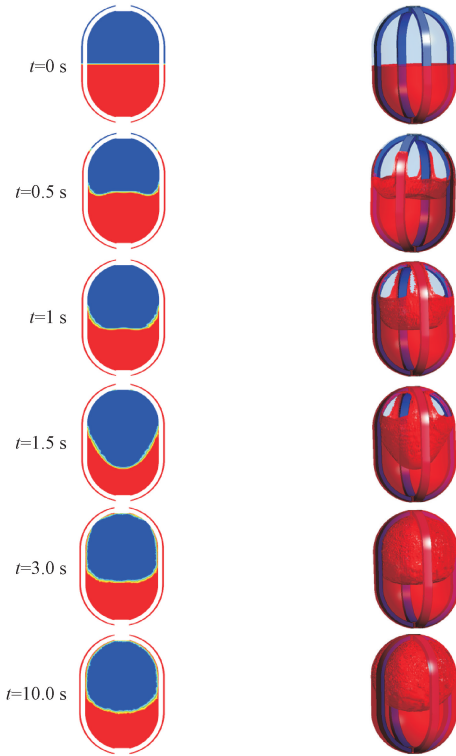
Table 2 Simulation condition settings

扰动条件	案例	扰动数值	充注率/%
正向 加速度	1	$2 \times 10^{-3} g$ (−Y 向)	5
	2		25
	3		50
	4		75
侧向 加速度	5	$2 \times 10^{-3} g$ (X 向)	5
	6		25
	7		50
	8		75
反向 加速度	9	$2 \times 10^{-3} g$ (Y 向)	5
	10		25
	11		50
	12		75
侧向+反向 加速度	13	$2 \times 10^{-3} g$ (X 向)	5
	14		25
	15		50
	16		75
旋转 速度/($^{\circ}$ ·s $^{-1}$)	17	5	5
	18		25
	19		50
	20		75

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,给出了 0、0.5、1、1.5、3、10 s 时计算得到的贮箱内二维和三维相分布云

图,二维云图始终取图 1 中标注的 A 截面位置进行展示,如图 5 所示。



(a) 二维气液相云图 (b) 三维气液相界面云图

图 5 案例 3 条件下的重定位过程相态分布变化云图

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

0 s 时,初始气液分布与常重力条件下相似,随即在 Y 向施加 $-2 \times 10^{-3} g$ 加速度。在该微重力水平下,重力作用不足以继续维持气液相的初场分布,液相在表面张力作用下具有润湿和铺展于结构表面的趋势,开始进行重定位。在集液通道与贮箱壁面间夹缝处,表面张力作用更为明显,液体爬升速度更快,1 s 内液体已经充满所有通道与贮箱壁面间的狭缝,即作为集液通道入口的网幕面已经被液相全部覆盖。随后,无通道覆盖的贮箱壁面也逐渐被液体润湿,形成液体包裹气相区的“液封气”分布形态。由于液体向上运动的动量扰动,液体包裹气相区后经历了一段时间的相界面变形、振荡后才逐渐趋于稳定。

图 6 给出了流体质心随时间的变化,可以看出,重定位初期,质心由初始位置迅速升高,图 6 中液体在表面张力作用下沿集液通道与贮箱壁面结构不断攀升相一致。随后,质心高度出现一定程度的振荡后逐渐趋于稳定,相界面的变形、振荡后趋于稳定相一致。本文统一取质心变化幅度小于贮箱高度 0.1% 作为重定位达到稳定的判定标准^[30],工况 3 的重定位时间为 9.3 s。

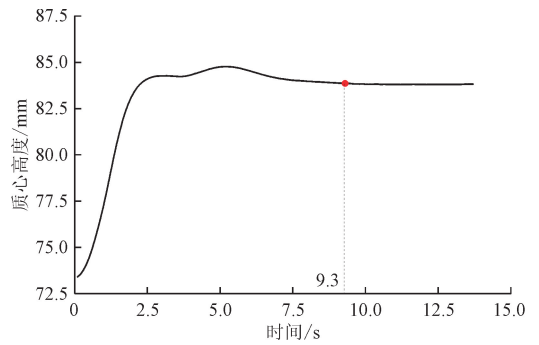


图 6 案例 3 条件下的重定位过程质心变化

Fig. 6 Change of centroid during reorientation under condition 3

3.2 与板式贮箱的蓄流稳定性对比

对表 2 所列 20 种工况条件进行计算,得到了网幕通道式贮箱与板式贮箱达到重定位稳定后的二维和三维云图对比。其中,相同工况条件下的板式贮箱结果取自文献[22]。

充注率为 5% 条件下,施加 5 种不同扰动完成重定位后,板式贮箱中液体均主要集中在贮箱底部叶片区域,而网幕通道式贮箱中的液体均主要依附于集液通道与贮箱内壁狭缝区域,如图 7 所示,表明

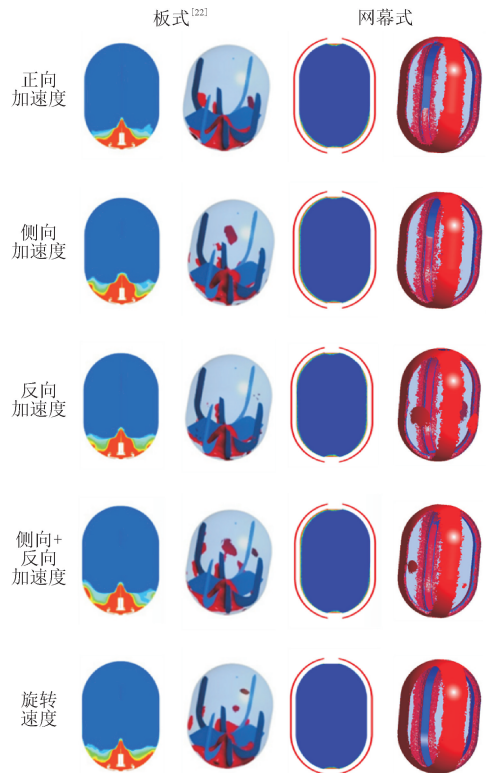


图 7 充注率为 5% 时网幕通道式贮箱与板式贮箱重定位稳定后的相分布云图

Fig. 7 Comparison contours images of the screen channel tank and the vane-type tank after reorientation and stabilization under 5% filling ratio

叶片板及网幕通道结构均能够对液体推进剂产生蓄流效果。5 种扰动条件下,板式贮箱中均有不同程度的局部液体脱离了 PMD 的管理,而网幕通道式贮箱仅在反向加速度和侧向+反向加速度条件下有较少的局部液团脱离管理。这主要是因为,PMD 的结构接触与管理范围是有限的,当局部液体在扰动作用下脱离主流液团,若无法继续接触到主流液团或 PMD 表面,则很可能被贮箱壁面等其他结构面捕获,形成散落于贮箱表面的局部液团,无法继续被 PMD 蓄流管理。这表明在充注率很低的条件下,在扰动作用下更容易发生局部蓄流失效,而网幕通道式贮箱面对多种扰动作用时具有比板式贮箱更优的蓄流稳定性。

充注率为 25%条件下,不同扰动作用下贮箱中液体依旧主要依附于叶片板或网幕通道结构处,网幕通道的网幕入口面始终保持液相全覆盖,而板式贮箱在侧向和侧向+反向加速度条件下出现了局部叶片暴露于气相区内而未蓄流液体的情况,如图 8 所示。对比充注率为 5%工况,贮箱内液体可以分为被 PMD 强控制和弱控制两部分:一部分流体与

板式^[22]网幕式

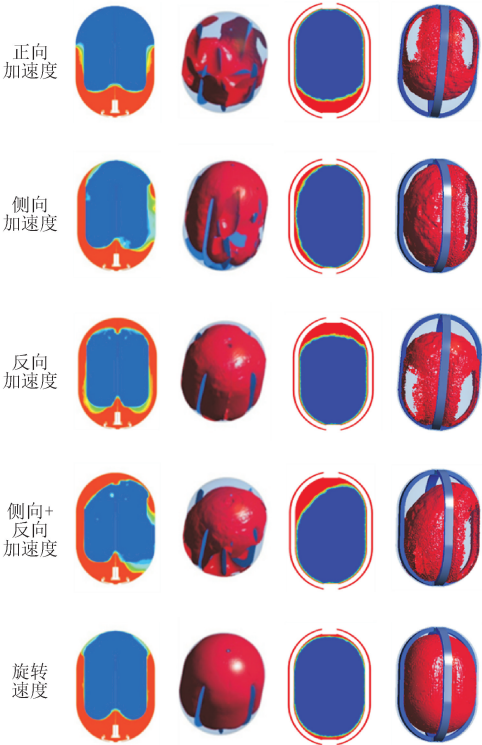


图 8 充注率为 25%时网幕通道式贮箱与板式贮箱重定位稳定后的相分布云图

Fig. 8 Comparison contours images of the screen channel tank and the vane-type tank after reorientation and stabilization under 25% filling ratio

叶片或网幕通道直接接触,受到 PMD 表面张力作用的直接约束,在多种扰动力作用下均具有较强稳定性;另一部分流体则主要受液团凝聚力及贮箱壁面表面张力的综合作用,无法被 PMD 强约束,会随着不同加速度扰动方向汇集于对应方向处,也会在旋转作用下平铺于贮箱壁面四周。同时,液体量的增多,也使出现局部散落于贮箱壁面而不与主流液团或 PMD 结构接触的可能性降低,板式与网幕通道式贮箱均能够充分接触主流液体,蓄流效果均有所改善。

充注率增至 50%时,增加的液体量足以覆盖贮箱全部内壁面,形成了液封气的分布形式,如图 9 所示。与充注率为 25%工况相似的是,部分无法被 PMD 和贮箱壁面强约束的液体会随着不同扰动而改变分布位置,从而导致气枕始终稳定于加速度相反方向处。同时,板式贮箱在较高充注率下也呈现相似的液封气分布形式,但由于 PMD 结构与位置的差异,两种贮箱中心气枕的形状和位置有所不同。以旋转工况为例,网幕通道式贮箱由于 PMD 结构的对称性,气枕是较为规则的椭球型并稳定于贮箱

板式^[22]网幕式

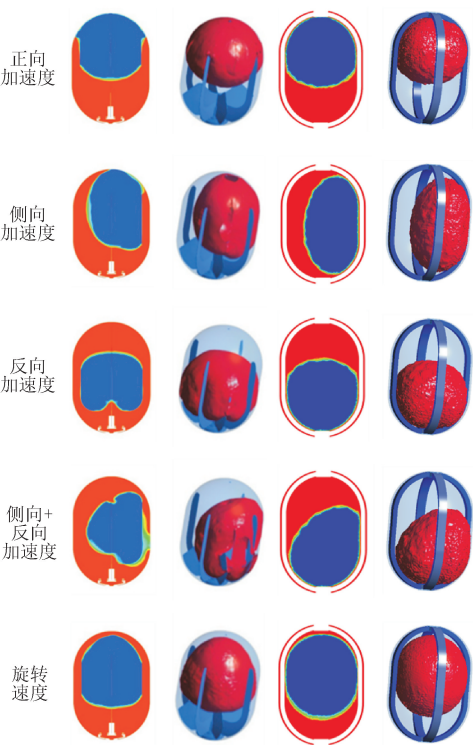
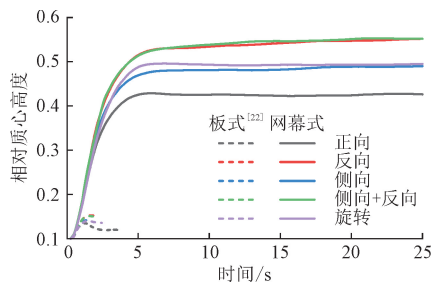


图 9 充注率为 50%时网幕通道式贮箱与板式贮箱重定位稳定后的相分布云图

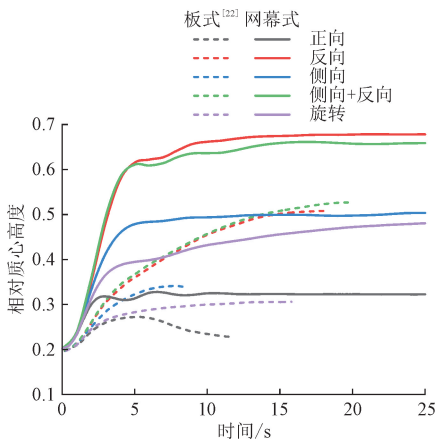
Fig. 9 Comparison contours images of the screen channel tank and the vane-type tank after reorientation and stabilization under 50% filling ratio

中心,而板式贮箱由于更多液体被约束于贮箱底部的叶片板区域,气枕最终稳定于中心偏上的位置,且顶部曲率更大。充注率为 75% 工况重定位结束后的气液分布特征与充注率为 50% 工况较为相似,主要区别体现在气枕大小的不同。另外,对于旋转扰动工况,由于液体量足够多,两种贮箱内气液界面形态均已不再受 PMD 和贮箱壁面的约束影响,而是在界面张力的作用下形成了更趋于球型的中心气枕。

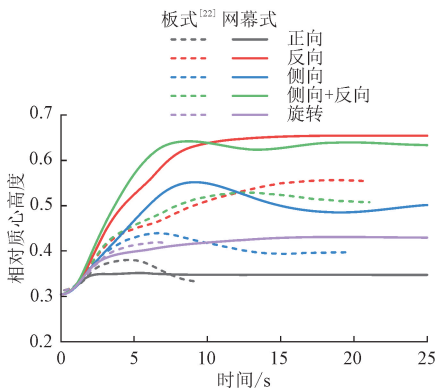
为进一步明确各工况下网幕通道式和板式贮箱的流体管理差异,图 10 给出了两种贮箱在重定位过程中推进剂质心相对高度(质心、贮箱高度之比)随时间的变化。



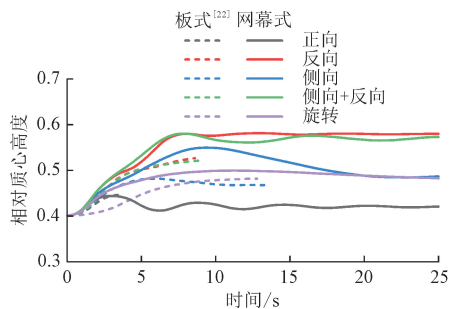
(a) 充注率为 5%



(b) 充注率为 25%



(c) 充注率为 50%



(d) 充注率为 75%

图 10 不同充注率下网幕通道式贮箱与板式贮箱重定位过程中相对质心的变化

Fig. 10 Diagram of the relative centroid change during the reorientation of the screen channel tank and the vane-type tank under different fill ratios

由于液相初始状态分布于贮箱底部,在微重力条件下液体均有沿 PMD 和贮箱壁面向上爬升的趋势,因此所有工况中相对质心高度均呈现先升高后稳定的趋势,只是稳定后的质心高度及稳定时间有所不同。对比两种贮箱结构,由于板式贮箱的叶片板更多布置于贮箱底部,而网幕通道式贮箱的集液通道沿高度方向的布置差异较小,因而在所有工况下板式贮箱的质心稳定高度始终相对更低,这种差异在低充注率下更为显著。

充注率为 5% 时,网幕通道式贮箱的相对质心高度大幅增加至 50% 附近后逐渐趋于稳定,而板式贮箱的相对质心高度则稳定于 15% 附近,且稳定速度明显更快,这主要是因为初始条件更利于板式贮箱,前期有关重定位的研究中也发现了初始状态对重定位过程的影响显著^[30]。随着充注率的增加,板式贮箱的质心稳定高度不断上移,而网幕通道式贮箱的质心稳定高度变化幅度较小,侧面反映了网幕通道式贮箱在不同充注率下的稳定性更强。此外,由于文献[22]关于板式贮箱的数据不全,无法一一对照两种贮箱在各工况下的重定位稳定时间。从整体来看,随着充注率的增加,两种贮箱质心稳定时间之间的差异也较 5% 充注率有明显缩小,且有多组工况下网幕通道式贮箱在克服初始状态劣势的情况下仍然具有更快的稳定速度,进一步说明了网幕通道式贮箱对多种工况条件的广泛适应性和蓄流稳定性。

3.3 重定位特性分析

为进一步深入分析网幕通道式贮箱的重定位特性,以正向和侧向加速度两种典型扰动条件为例,图 11 给出了不同充注率下重定过程相对质心的变化。正向加速度扰动下,在充注率为 5% 时由于大

部分液体都蓄流于 SCLAD 与贮箱内壁的夹缝中,仅少量液体在正向加速度作用下分布于贮箱底部,质心稳定于超过贮箱高度 40% 的较高位置。随着充注率的增加,受正向加速度影响的液体量增多,重定位后的质心有所降低。当充注率继续增加后,由于液体总量的增加,表面张力与液团聚合力的作用抵消了正向加速度的部分影响,质心稳定高度又出现回升,充注率为 75%、5% 对应的稳定质心高度基本相同,随着充注率的升高,重定位过程中液体运动的动量影响也随之增大,反映为质心振荡幅度的增大。

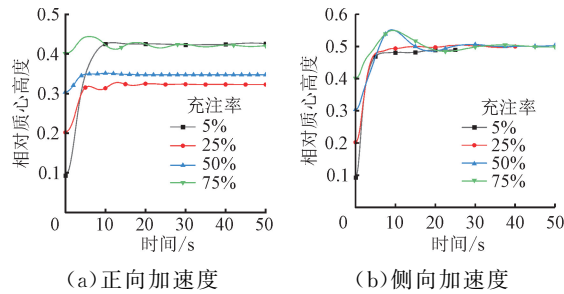


图 11 典型扰动条件下的不同充注率对重定位过程质心变化影响

Fig. 11 Centroid variation diagrams during reorientation under typical disturbance conditions with different filling ratios

对于侧向加速度扰动工况,由于没有 Y 向的作用力,在表面张力作用下,不同充注率下重定位后的质心始终稳定在贮箱中心附近。同理,旋转工况也具有相似的结果,随着充注率的增加,充注率为 50%、75% 工况下都能够观察到施加扰动后质心迅速升高后有一个较大幅度的回落,这是因为液体开始重定位时,在更大的动量冲击作用下发生了更剧烈的液团振荡。

由图 12(b)可以看出,任一充注率下,反向加速度扰动工况的质心始终最高,侧向与旋转工况次之,正向加速度工况质心最低,质心变化幅度也具有相同的规律。随着充注率的增大,所有扰动工况的质心变化幅度均下降,这主要是由初始质心随充注率增大而上升引起的。

图 13、图 14 分别给出了不同工况下的重定位过程质心最大运动速度和质心稳定时间的结果。从图 13 可以看出,存在反向加速度扰动的两组扰动工况始终具有最大的质心运动速度。这主要是因为重定位时,由于初始液相分布于贮箱底部,表面张力和反向加速度均有使液体向上运动的作用,同向叠加使液体获得了更大加速作用,重定位过程的相分布变化对反向加速度扰动最为敏感,反向加速度扰动时的重

定位稳定时间却最为稳定,几乎不受充注率变化的影响。相比而言,正向加速度和旋转工况的重定位稳定时间受充注率的影响最为显著。在 4 种不同充注率下,分别是侧向+反向、旋转、侧向、侧向扰动的重定位稳定时间最长,由此可以推断,侧向扰动对网幕通道式贮箱蓄流稳定性影响最大。重定位稳定时间直接受初始场条件的影响,相关结果仅针对本文工况条件。

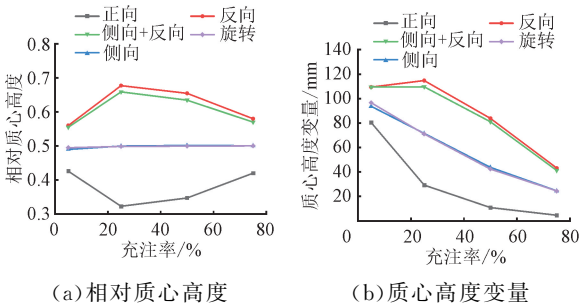


图 12 不同工况下的重定位前后质心变化特征
Fig. 12 Diagrams of centroid variation during reorientation process under different operating conditions

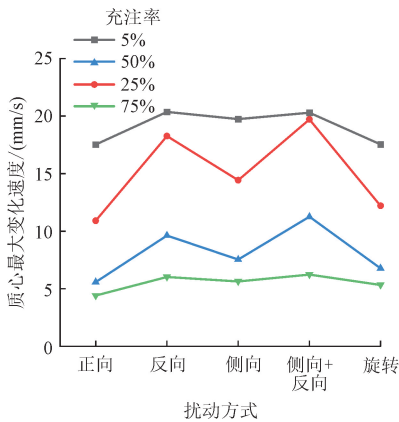


图 13 不同工况下重定位过程质心最大变化速度
Fig. 13 Diagram of maximum centroid variation velocity during reorientation process under different operational conditions

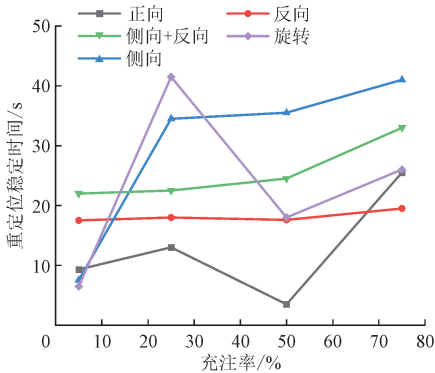


图 14 不同工况下重定位过程稳定时间
Fig. 14 Diagram of stabilization time of the reorientation process under various operating conditions

4 结 论

为明确实际飞行任务中网幕通道式液体获取装置的推进剂管理能力,本文通过构建三维 CFD 模型,首次系统性地利用数值计算对不同充注率及扰动条件下网幕通道式贮箱的重定位过程及蓄流稳定性开展了研究,得到如下主要结论。

(1)网幕通道式贮箱主要依靠集液通道与贮箱间狭缝、通道表面及贮箱表面进行推进剂管理。面对多变的充注率与扰动条件,相比于相同表面积的板式结构,网幕通道式贮箱整体具有更强的蓄流稳定性,特别是在低充注率条件下更不容易发生局部蓄流失效。

(2)充注率较低时,重定位过程气液相分布主要受到 PMD 结构表面张力的强约束,网幕通道式贮箱重定位稳定后的质心高度较板式贮箱更高。随着充注率的增加,外加扰动对重定位过程气液相分布的影响逐渐增强,液体开始重定位的动量影响也随之增大,质心振荡幅度增大。

(3)受反向加速度扰动时,网幕通道式贮箱重定位稳定时间几乎不受充注率变化的影响。正向加速度和旋转工况的重定位稳定时间受充注率的影响最为显著,充注率为 25% 时最难稳定。

(4)针对液相位于底部的初始条件,网幕通道式贮箱重定位过程对于反向加速度扰动最为敏感,具有最大的质心运动速度。不同充注率下,网幕通道式贮箱均最难克服侧向加速度扰动影响,重定位稳定时间最长。因此,在设计网幕通道式贮箱时,考虑到反向和侧向加速度对贮箱内部流体行为的影响,建议可通过优化通道间距、在贮箱内部增加环形挡板或在通道上增加引流板等方式以增强扰动抵抗能力。

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 M S, TEGART J R, DRISCOLL S L, et

al. Fluid acquisition and resupply experiments on space shuttle flights STS-53 and STS-57 [EB/OL]. (2011-04-01) [2024-12-17]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20110011736>.

[4] WEISLOGEL M M, COLLICOTT S H. Capillary re-wetting of vanned containers: spacecraft tank rewetting following thrust resettling [J]. AIAA Journal, 2004, 42(12): 2551-2561.

[5] MANNING R E, BALLINGER I, BHATIA M, et al. Design of the Europa clipper propellant management device [C]//AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. Reston, VA, USA: AIAA, 2019: AIAA 2019-3858.

[6] 庄保堂, 李永, 潘海林, 等. 微重力环境下导流叶片流体传输速度的试验研究 [J]. 空间控制技术与应用, 2012, 38(6): 1-5.
ZHUANG Baotang, LI Yong, PAN Hailin, et al. Experiment investigation on transportation velocity of the fluid on propellant acquisition vanes under microgravity environment [J]. Aerospace Control and Application, 2012, 38(6): 1-5.

[7] CHEN Shangtong, HAN Zhiyi, DUAN Li, et al. Experimental and numerical study on capillary flow along deflectors in plate surface tension tanks in microgravity environment [J]. AIP Advances, 2019, 9(2): 025020.

[8] LIU Jintao, LI Yong, LI Wen, et al. Testing liquid distribution in a vane-type propellant tank under conditions of microgravity using a drop tower test [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020 (1): 6402083.

[9] 陈舒扬, 张璞, 胡良, 等. 板式贮箱排空过程的在轨实验和仿真研究 [J]. 力学学报, 2024, 56(11): 3351-3358.
CHEN Shuyang, ZHANG Pu, HU Liang, et al. On-orbit experimental and numerical study on the emptying process of tank models [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(11): 3351-3358.

[10] 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.

[11] MA Yuan, LI Yanzhong, WANG Lei, et al. Investigation on isothermal wicking performance within metallic weaves for screen channel liquid acquisition devices [J]. International Journal of Heat and Mass

- Transfer, 2019, 135: 392-402.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] MA Yuan, ZIMNIK D, DREYER M, et al. Investigation on cryo-wicking performance within metallic weaves under superheated conditions for screen channel liquid acquisition devices [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 530-541.
- [18] YAEGER 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(Part B): 106851.
- [19] 杨琦, 肖汀兰, 彭若玲, 等. 大加速度环境下板式贮箱内极限导流特性 [J]. 空间控制技术与应用, 2024, 50(4): 87-94.
- YANG Qi, XIAO Tinglan, PENG Ruoling, et al. Limit diversion characteristics of a vane-type tank under high acceleration conditions [J]. Aerospace Control and Application, 2024, 50(4): 87-94.
- [20] IMAI R, MICHIHARA M. Study on the sloshing behavior under microgravity condition targeted for a propellant tank (dynamic liquid behavior in axially applied acceleration) [J]. International Journal of Microgravity Science and Application, 2023, 40(1): 400102.
- [21] COLLICOTT S H, CHEN Yongkang. Studies of the wetting of gaps in weightlessness [J]. Microgravity Science and Technology, 2010, 22(4): 487-498.
- [22] WANG Lu, ZHANG Xiangyun, YUN Yinyin, et al. Numerical simulation of the reorientation process under different conditions in a vane-type surface tension propellant tank [J]. Microgravity Science and Technology, 2022, 34(3): 37.
- [23] 黄滨, 王璐, 陈磊, 等. 侧向微重力环境下板式表面张力贮箱内推进剂晃动行为分析 [J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47(1): 63-69.
- HUANG Bin, WANG Lu, CHEN Lei, et al. Analysis of propellant sloshing behavior in vane-type surface tension tank in lateral microgravity environment [J]. Aerospace Control and Application, 2021, 47(1): 63-69.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] CHATO D J, MCQUILLEN J B, MOTIL B J, et al. CFD simulation of pressure drops in liquid acquisition device channel with sub-cooled oxygen [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering, 2009, 3: 782-787.
- [27] 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.
- [28] FURUICHI Y, HIMENO T, WATANABE T, et al. Evaluation of sloshing effect on a tank during landing phases of spacecrafts in a micro-gravity environment [C]//ASCEND 2022. Reston, VA, USA: AIAA, 2022: 4312.
- [29] ANII 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. Reston, VA, USA: AIAA, 2019: 4437.

[30] 梁佳佳, 马原, 周振君, 等. 微重力液氢贮箱气液两相重定位特性数值研究 [J]. 载人航天, 2023, 29(6): 720-727.

LIANG Jiajia, MA Yuan, ZHOU Zhenjun, et al. Numerical research for microgravity gas-liquid two-phase reorientation characteristics in liquid hydrogen tank [J]. Manned Spaceflight, 2023, 29(6): 720-727.

(编辑 赵炜)