

板式贮箱排空过程的在轨实验和仿真研究¹⁾陈舒扬^{*,†,2)} 张璞^{*,2)} 胡良^{*} 段俐^{*,†} 康琦^{*,†,3)}^{*}(中国科学院力学研究所, 北京 100190)[†](中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 板式推进剂贮箱的排空性能决定了推进剂的利用率, 同时排空过程推进剂质心的变化会影响贮箱乃至卫星质心的稳定, 因而是值得关注的. 文章提出了一种球形全管理板式贮箱的设计, 包含 4 片导流板、4 片小蓄液片和一个中心柱. 在中国空间站上开展了贮箱模型的流体输运和排空实验, 并建立贮箱的非结构网格模型, 开展匹配空间站排空实验的仿真分析, 通过实验和仿真的液体流动速度对比验证了网格模型和仿真方法的准确性. 基于该网格模型, 开展微重力下排空过程仿真、微重力下稳态气泡形貌仿真和机动加速度下排空过程仿真, 展现了气泡形貌受板式结构尤其是中心柱的影响在单侧气泡和环形气泡间的转变, 发现在排空过程中推进剂质心的跳变, 揭示微重力下贮箱形成环形气泡的条件, 机动加速度下的排空仿真显示该贮箱模型排空率高达 99.95%, 验证了该型流体管理装置的排空性能. 文章的实验和仿真研究验证该型板式贮箱具有良好的流体管理性能, 对于含有中心柱的全管理板式贮箱的流体界面与气液分离性能研究也具有重要的借鉴价值, 这些成果和发现对空间流体管理、板式贮箱设计和卫星姿轨控策略的制定具有重要参考意义.

关键词 板式贮箱, 气液界面, 排空, 中国空间站, 仿真

中图分类号: O359, V448

文献标识码: A

DOI: 10.6052/0459-1879-24-251

CSTR: 32045.14.0459-1879-24-251

ON-ORBIT EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON THE EMPTYING PROCESS OF TANK MODELS¹⁾Chen Shuyang^{*,†,2)} Zhang Pu^{*,2)} Hu Liang^{*} Duan Li^{*,†} Kang Qi^{*,†,3)}^{*}(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)[†](College of Engineering and Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The emptying performance of plate propellant tanks determines the utilization rate of the propellant. And the variation of the propellant's centroid during the emptying process is noteworthy, as it can affect the stability of the tank's and ultimately the satellite's centroid. In this paper, the design of a spherical fully-managed plate tank model is proposed, which includes four guide vanes, four small liquid storage vanes, and a central column. The fluid transport and emptying experiments in the tank model are carried out aboard the Chinese Space Station. And the unstructured grid model of the tank is established, and numerical simulation matching the emptying experiment is carried out. The accuracy of the grid model and the simulation method is verified by comparing the liquid flow velocity of the experiment and the simulation.

2024-05-29 收稿, 2024-09-21 录用, 2024-09-22 网络版发表.

1) 中国空间站首批空间科学实验项目和国家自然科学基金(12032020 和 12072354)资助.

2) 共同第一作者.

3) 通讯作者: 康琦, 研究员, 主要研究方向为微重力流体物理等. E-mail: kq@imech.ac.cn

引用格式: 陈舒扬, 张璞, 胡良, 段俐, 康琦. 板式贮箱排空过程的在轨实验和仿真研究. 力学学报, 2024, 56(11): 3351-3358

Chen Shuyang, Zhang Pu, Hu Liang, Duan Li, Kang Qi. On-orbit experimental and numerical study on the emptying process of tank models. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(11): 3351-3358

Based on the grid model, the simulation of emptying process under microgravity, the simulation of static bubble morphology under microgravity and the simulation of emptying process under maneuvering acceleration are carried out. It demonstrates the transition of bubble morphology between unilateral bubble and annular bubble, influenced by the plate structure, particularly the central column. The jump of propellant mass center during evacuation is found. The conditions for forming annular bubbles in the tank under microgravity are presented. The emptying simulation under maneuvering acceleration showed that the emptying rate of the tank model is up to 99.95%, which verified the excellent emptying performance of this kind of propellant management device. The experiment and simulation study in this paper verifies that this type of plate tank exhibits excellent fluid management performance, and it also provides valuable insights for studying the fluid interface and gas-liquid separation performance of fully-managed plate tanks with central columns. These results and findings have important reference significance for fluid management in space, plate tank design, and satellite orbit control strategy formulation.

Key words plate tank, liquid-gas interface, emptying process, Chinese Space Station, simulation

引言

板式贮箱利用板式推进剂管理结构 (propellant management device, PMD) 进行推进剂的管理和运输, 以确保为卫星的发动机和推力器提供不夹气的推进剂, 这不仅需要使液体聚集于液口使其形成“液封”, 还需要管理气泡的运动和分布. 推进剂如果夹气, 可能使航天器姿态控制不准确, 严重时将导致卫星严重翻转和空间任务的失败; 排空率也是贮箱的关键指标, 若排空率较低会导致推进剂的浪费, 从而影响卫星飞行寿命. 因此, 研究贮箱排空过程的气液界面变化规律具有重要意义.

板式贮箱利用板式 PMD 管理和运输推进剂, 因此有必要探究不同结构内的表面张力驱动流动与稳态液面形貌特性. 1998 年 Weislogel 等^[1]建立了理想尖内角处的毛细驱动流动方程, 此后, 由不同接触角的平板形成的尖内角处^[2]、圆内角处^[3]和非对称内角处^[4], 由圆弧板和平板组成的内角处^[5]、弯曲尖内角处^[6]的毛细驱动流动理论模型得到了建立. 李京浩等^[7]探究了板式表面张力贮箱内内角流动规律, 提出了内角数量配置优化方法. 庄保堂等^[8]探究了不同外形导流叶片的流体传输效率, 提出了优化导流叶片外形的方法. Dreyer 等^[9]推导出了平行平板间毛细驱动流动方程, 陈上通等^[10]将研究对象拓展到成一定夹角的平板间的毛细驱动流动, 并建立了其流动过程理论模型. Chen 等^[11]建立了微重力下环形内角处液面形貌理论模型, Chen 等^[12]提出了微重力下旋转对称容器内稳态液面理论模型, 并结合打靶法编制计算程序, 实现了稳态液面的高效准确预测.

许多学者对 PMD 的设计和性能验证也进行了广泛的研究. 1992 年, Lockheed Martin Space Center (LMSC) 主持了 fluid acquisition and resupply experiment project (FARE)^[13], 其目的主要包括探索微重力下补加过程中的液体重定位过程, 获得了不同加注流量下的液面演化特性. 1993 年, LMSC 又主持了 FARE2 项目^[14], 旨在验证新一代板式贮箱的在轨加注和排放性能, 探索新一代板贮箱内推进剂的界面形貌特征. Jaekle^[15-17]详细介绍了 PMD 的不同组成部分, 并展示了几种导流叶片和蓄液叶片等结构. Tam 等^[18]提出了一种 PMD, 由位于贮箱中部的 8 个相同的叶片组成, 2008 年又提出了另一种 PMD 设计, 其包含靠近液体出口的 32 个叶片^[19]. Chato 等^[20]提出了一种在微重力下分离液体和气体的板式 PMD, 这种 PMD 不仅包括靠近贮箱壁面的外叶片, 还包括位于贮箱中部的内叶片, 并展示了航天飞机上的实验结果. Chen 等^[21]在中国空间站上开展了板式贮箱流体双向运输实验, 建立了含中心柱贮箱内环形气泡形貌理论模型, 并讨论了气泡运动和形貌演变规律. 落塔实验和仿真分析也在贮箱内液面形貌的研究中得到了广泛应用, 众多学者探究了不同构型贮箱内液面形貌演变规律^[22-30].

本文提出了一种新型全管理板式 PMD, 结构简单, 包含 4 条导流板、4 条蓄液板和中心柱, 并在中国空间站 (Chinese Space Station, CSS) 上开展了流体管理与运输实验, 探究了在贮箱排空过程中液体运输、气泡运动和形貌演变规律, 同时开展了匹配空间站实验以及更多工况的仿真分析, 研究结果对空间流体管理和板式贮箱设计具有重要指导意义.

1 空间站实验

1.1 实验单元简介

实验单元 (experiment cabin, EC) 原理图如图 1 所示, 主要包含两个按比例缩小的贮箱模型、两个压力传感器、两个带有电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 的相机和若干泵及阀门. 贮箱模型壁面由透明的聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 制成, PMD 由钛合金制成. 控制阀门通断, 将气泵与其中一贮箱模型连通, 另一贮箱模型与大气连通, 两贮箱模型间连通液路, 即可实现依靠液泵或气泵提供的压力驱动前一贮箱中液体向后一贮箱运输. 实验中 CCD 相机帧频设置为 24 帧/秒, 采用 10 号硅油 (cst10) 作为实验介质, 与贮箱模型的接触角为 1°.

设计了贮箱模型 A(TA) 和贮箱模型 B(TB) 两种贮箱模型, 其中, TA 为球形, TB 为胶囊形, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 本文的研究针对 TA 开展, 验证其空间流体管理性能. 两个贮箱模型容积相等, 约为 108 mL. 两个贮箱模型设计状态对比如表 1 所示,

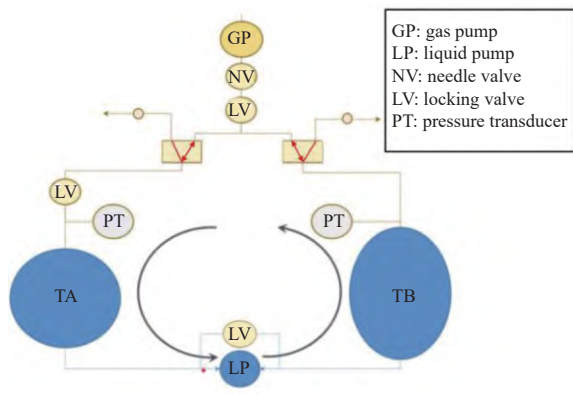
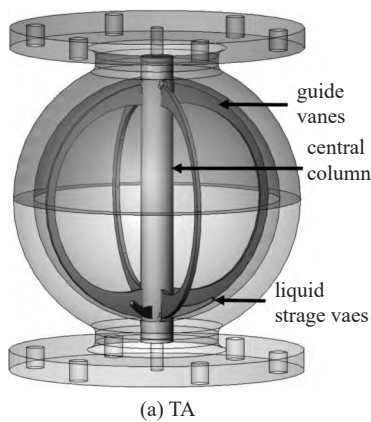
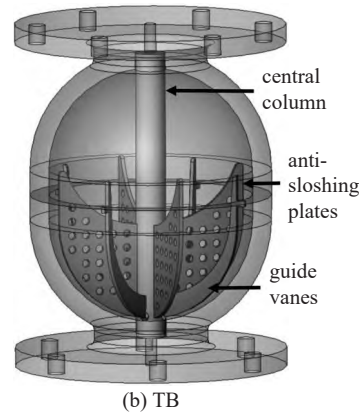


图 1 实验单元系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of EC



(a) TA



(b) TB

图 2 贮箱模型三维视图

Fig. 2 3D view of tank models

这两种贮箱模型涵盖了大部分贮箱的设计要点, 包括外形、PMD 组成和流体管理方式等, 以便在一个实验单元里尽可能多地对不同的设计状态进行验证. 在设计过程中合理选择了导流板与壁面的间隙以及宽度, 使之具有较好的液体运输能力; 设计防晃板几何外形使之有效减弱液体晃动等.

表 1 TA 和 TB 的对比

Table 1 Comparison between TA and TB

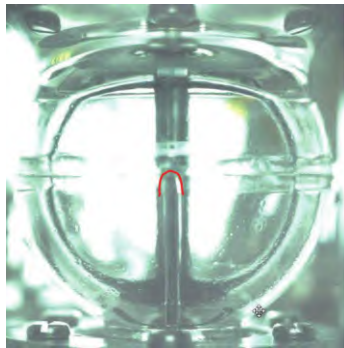
	TA	TB
Shape	spherical	capsule
Size	inner radius 30 mm	inner radius 27 mm, height of cylindrical section 13.4 mm
Components of PMD	4 guide vanes and 4 small liquid-storage vanes	4 guide vanes and 4 anti-sloshing plates
Type of management	fully managed	semi-managed
Width of gaps between the guide vanes and the model wall	gradually reduced from 1.4 mm at the gas port to 0.8 mm at the liquid port	gradually reduced from 1.4 to 0.8 mm at the liquid port

1.2 实验结果与分析

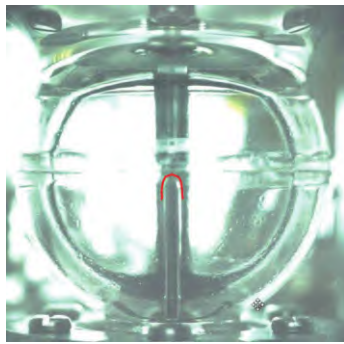
气泵向球形贮箱内加压, 可实现 TA 中的液体向 TB 运输. 在排液阶段后期, 随着气体从上方气口注入, 液体被气压挤压出下方液口. 由于导流板蓄留液体的能力导流板处仍残留有液体, 而其余区域液体基本从液口排出, 可观察到在液口开始排出夹气液体之前, 液体随导流板下降. 如图 3 所示, 从实验图像中可准确读出下降液体前缘的像素坐标, 并且根据与实际尺寸间的换算关系和贮箱内的几何关系计算出液体前缘的下降距离.



(a) $t = 0\text{ s}$



(b) $t = 2\text{ s}$



(c) $t = 3.2\text{ s}$

图 3 空间实验结果

Fig. 3 Experiments aboard CSS

2 数值模拟

2.1 匹配实验的模拟

贮箱模型的气口和液口的结构相同且较为复杂, 为了提高计算收敛性, 对其进行了简化, 如图 4 所示. 简化后的气口和液口为 4 个正对导流板的小圆柱段, 并且保证贮箱内出气口面积与简化前相近, 使得在相同注气流量下出气速度也近似相等.

利用 Fluent 对 TA 整体划分多面体非结构网格, 在壁面处增加 6 层边界层网格, 如图 5 所示, 网格数量为 2027636 个, 网格正交质量在 0.151 以上. 实验注气流量为 0.155 mL/s, 根据气口面积换算, 设置恒

定注气速度为 18.5 mm/s, 进行匹配实验的仿真, 液口设置为压力出口 (pressure outlet).

初始时刻液体分布如图 6(a) 所示, 与实验液体分布相近. 在排液过程中液体始终封住液口以保证排出不夹气的液体, 因此注气量与注气时间呈线性关系. 每隔 0.5 s 记录一次液体下降距离, 实验和仿真的下降距离对比如图 7 所示, 仿真液体下降距离与实验相近, 验证了仿真模型的准确性, 后续仿真均采用该仿真模型开展.

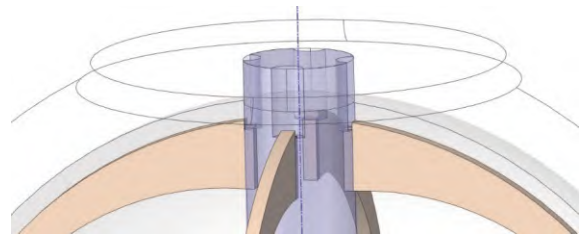


图 4 气口和液口

Fig. 4 Gas port and liquid port

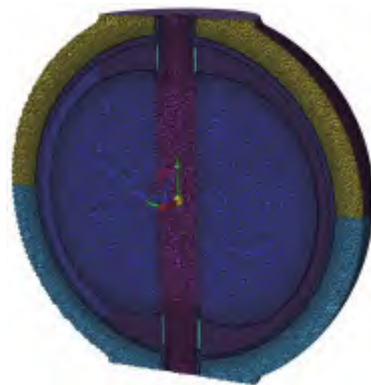
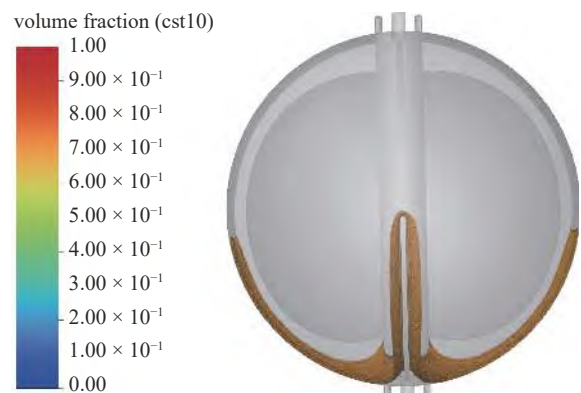


图 5 球形贮箱非结构网格

Fig. 5 Unstructured grid model of TA



(a) $t = 0\text{ s}$

图 6 匹配实验的仿真结果

Fig. 6 Corresponding numerical results



图 6 匹配实验的仿真结果 (续)

Fig. 6 Corresponding numerical results (continued)

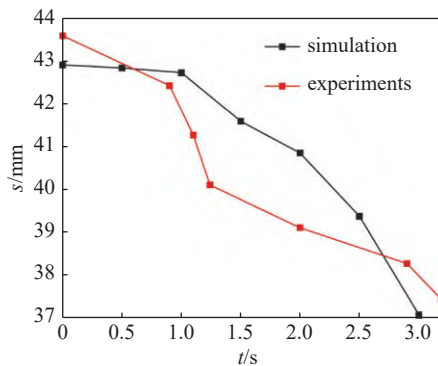


图 7 实验与仿真结果比较

Fig. 7 Comparison between experimental and numerical results

2.2 微重力下排空过程仿真

由于空间站排空实验中注气流量仅为 0.155 mL/s, 为减小仿真计算量, 将注气流量设置为 1.55 mL/s 开展仿真, 初始时刻贮箱内充满硅油. 一开始注入的气体在贮箱内中心柱两侧分别产生了两个较大气泡, 如图 8(a) 所示. 但在 $t = 18.4$ s 时这两个气泡即合并, 形成了围绕中心柱的环状气泡, 如图 8(b) 所示, 此时气体体积仅为 30.25 mL, 占贮箱总容积的 27.70%, 持续注气使气泡保持为环状. 在 20 s 以后停止注气, 气泡无法保持为环状, 在最小自由能的约束下开始转变, 最终稳定为单侧气泡, 如图 8(c) 所示. 待单侧气泡稳定, 在 $t = 24$ s, 继续以相同的注气流量开始仿真, 气泡体积逐渐增大并在两端产生凸起, 继而发生合并, 如图 8(d) 所示. 两端气泡连通后其中的气体迅速流动使环面加粗, 这一过程进行得非常迅速, 所用时间大概在 1 s 左右, 如图 8(e) 所示. 在继续注气挤压的过程中气泡继续保持为环状, 但在挤压气体作用下气泡整体向下移动.

推进剂排空过程质心变化至关重要, 推进剂质

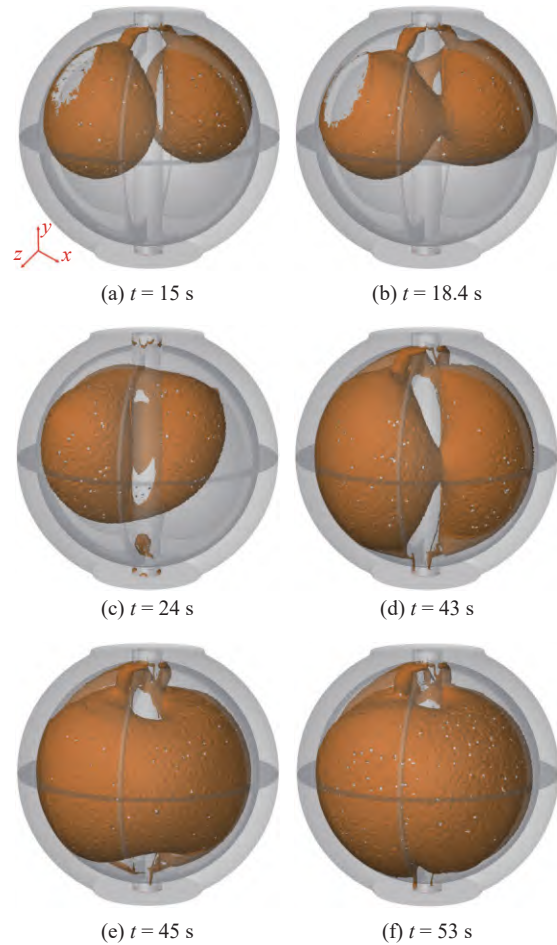


图 8 排空过程气泡形貌

Fig. 8 Shape of bubbles during emptying process

心的偏移将可能导致整星质心的偏移, 从而产生额外的干扰力矩, 造成姿控推进剂的浪费, 严重时会导致卫星姿态失控, 影响空间任务的成败. 因此从仿真结果中输出排空过程推进剂质心变化, 如图 9 所示, 图中还以虚线显示了贮箱中心的坐标 (39.72, 43.47, 49.93), 其中坐标系如图 8(a) 所示, x 坐标大致为两气泡间对称面与水平面的交线方向, y 坐标为竖直向上. 可以看出 y 方向上液体质心不断增大, 这是因为气泡向下移动. 影响卫星干扰力矩的主要是质心的横移, 也就是 x 和 z 方向上的质心变化. z 向液体质心坐标变化较小, 对整星质心的影响也较小. 在 $t = 20$ s 时停止注气, 气泡由环状逐渐变为单侧气泡, 此时 x 向液体质心不断偏离贮箱中心; 在 $t = 24$ s 继续注气后, 由于气泡仍为单侧形貌, 因此 x 向质心仍不断偏离贮箱中心; 直至 $t = 43$ s 时, 单侧气泡开始向环状气泡转变, 可以看到 x 向质心产生了明显的跳变, 之后由于环状气泡形貌越趋于对称, x 向质心不断向贮箱中心靠拢. 贮箱排空时的质心跳变会带

来整星干扰力矩的突然增大,影响卫星姿控效率;环状气泡更有利于推进剂质心趋向于贮箱质心,减小干扰力矩,而单侧气泡会使推进剂质心向一侧偏移,从而加剧卫星干扰力矩,这对空间推进剂管理和卫星姿控策略的制定具有重要意义.

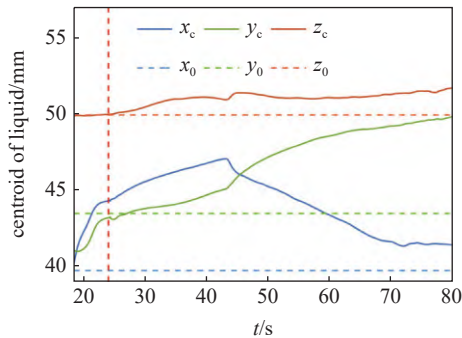


图 9 排空过程液体质心变化
Fig. 9 Development of mass center of liquid

2.3 微重力下稳态气泡形貌

不受外力干扰时,贮箱内稳态气泡形貌遵循最小自由能原则,当单侧气泡表面积小于环状气泡表面积时,即使将气泡初始形貌设置为环形,气泡也会在最小自由能原则下转变为单侧气泡.以贮箱模型几何中心为中心设置环形气泡,气泡与中心柱隔有一层液膜,气体体积为 13.15 mL,如图 10(a)所示. $t = 1$ s 时气泡形貌略微变化,但依然为环状气泡,如图 10(b)所示,此时气泡表面积为 3970.2 mm².但此时气泡未达稳态,继续形变直至在 $t = 3$ s 时转变为

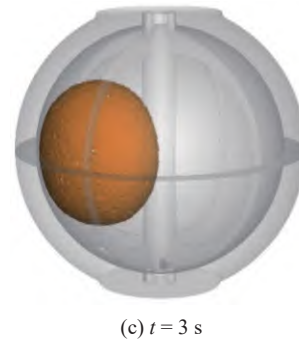
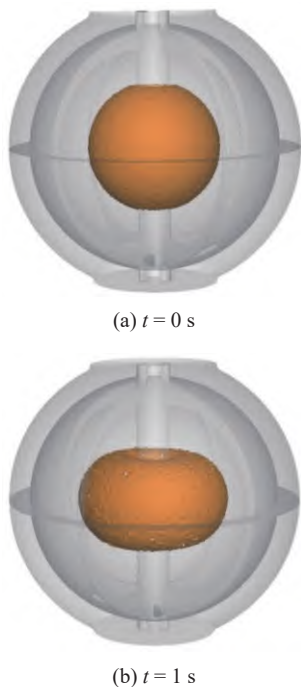


图 10 气体体积较小时形成表面能较小的单侧气泡
Fig. 10 Single-sided bubble with low surface energy is formed when the gas volume is low

单侧气泡,如图 10(c)所示,其表面积为 3381.4 mm²,此时单侧气泡表面积小于环状气泡,因此气泡最终稳定为单侧气泡.如图 11 所示,当气泡体积为 45.36 mL 时,气泡最终稳定为环状气泡,此时气泡自由能最小.

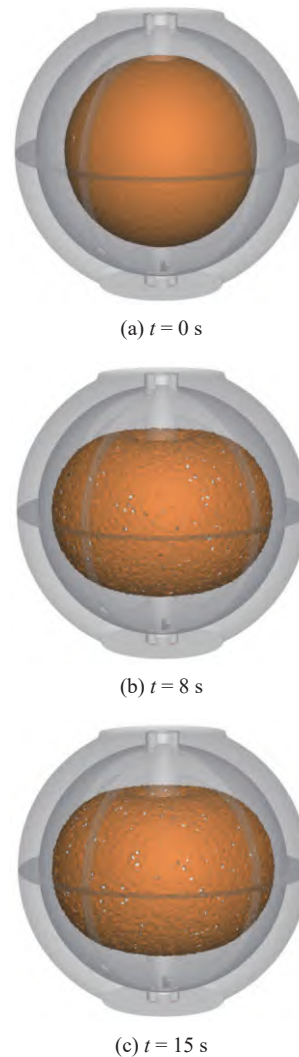


图 11 气体体积较大时形成表面能较小的环状气泡
Fig. 11 Annular bubble with low surface energy is formed when the gas volume is large

环形气泡更有利于推进剂质心的稳定. 卫星寿命初期, 充液率较大, 气泡体积较小, 呈单侧气泡形式, 此时易产生推进剂质心的横移; 卫星寿命末期, 充液率较小, 气泡体积较大, 呈环形气泡形式, 此时推进剂质心与贮箱质心较接近. 这对卫星不同寿命时期的干扰力矩监测和姿轨控策略的制定具有重要参考意义.

2.4 机动加速度下排空仿真

在实际航天任务中, 贮箱推进剂的挤出意味着卫星在执行机动任务, 将产生一定的加速度. 卫星机动加速度一般为 $0.001 \sim 0.1 \text{ m/s}^2$. 机动加速度较大时液体能全部沉底, 此时推进剂排空效率高, 因此本文探究机动加速度较小时的排空性能, 取 0.005 m/s^2 . 若卫星贮箱半径为 0.5 m , 推进剂为甲基肼, 此时 Bond 数约为 32, 根据动力相似准则

$$\left(\frac{\rho g l^2}{\sigma}\right)_m = \left(\frac{\rho g l^2}{\sigma}\right)_p = Bo \quad (1)$$

其中, m 代表模型, p 代表原型. 对于半径为 0.03 m 的贮箱模型 TA, 加速度设为 1.39 m/s^2 . 航天器加速度沿 y 轴正向, 并设注气速度为 18.5 mm/s .

排空末期气液界面如图 12(a) 和图 12(b) 所示, 绝大部分液体由于机动加速度的影响沉降在贮箱底部. 随着气体的挤入, 导流板和贮箱壁面上的液体逐渐减少, 贮箱上方已几乎没有液体残留, 如图 12(a) 所示. 排空结束时液体几乎全部排出液口, 导流板附近由于表面张力作用仍留有一小段液带, 如图 12(b) 所示. 从仿真结果中可得到剩余液体体积仅为 0.0123 mL , 排空率可高达 99.95% . 推进剂利用率

直接决定了卫星寿命, 高排空率可保证推进剂的充分利用, 延长卫星寿命.

3 总结

本文提出了一种板式贮箱的设计, 其流体管理装置由 4 条导流板和 4 条蓄液板组成, 并在中国空间站上开展了贮箱模型的流体输运和排空实验, 空间站实验结果显示, 在贮箱排空末期, 仅导流板和液口附近残留少量液体. 建立了贮箱的非结构网格模型, 开展了匹配空间站排空实验的仿真分析, 通过实验和仿真的液体流动速度对比验证了网格模型和仿真方法的准确性. 基于该网格模型, 开展了微重力下排空过程仿真、微重力下稳态气泡形貌仿真和机动加速度下排空过程仿真. 在微重力下排空过程中, 展现了气泡形貌在单侧气泡和环形气泡间的转变. 单侧气泡的形成将使推进剂质心产生明显的横移, 而环形气泡有利于保持推进剂质心的稳定, 在单侧气泡向环形气泡的转变过程中将产生明显的质心跳变, 这些发现对评估卫星干扰力矩、制定姿轨控策略具有重要意义. 微重力下稳态气泡形貌仿真表面, 环形气泡的形成需要具备一定的体积条件, 当气泡体积较小时, 气泡会在最小自由能的约束下形成单侧气泡, 只有当气泡体积超过一定值时才能形成环形气泡. 机动加速度下的排空仿真显示在排空末期仅残留极少液体无法排出, 排空率高达 99.95% , 高排空率可保证推进剂的充分利用, 延长卫星寿命. 本文的实验和仿真研究验证了该类型板式贮箱的流体管理性能, 发现了排空过程中推进剂质心的变化规律, 这些成果和发现对空间流体管理、板式贮箱设计和卫星姿轨控策略的制定具有重要参考意义.

参 考 文 献

- 1 Weislogel MM, Lichter S. Capillary flow in an interior corner. *J Fluid Mech*, 1998, 373: 349-378
- 2 Weislogel MM, Nardin CL. Capillary driven flow along interior corners formed by planar walls of varying wettability. *Microgravity Sci Technol*, 2005, 17(3): 45-55
- 3 Chen Y, Weislogel M, Nardin C. Capillary driven flows along rounded interior corners. *J Fluid Mech*, 2006, 556: 235-271
- 4 Li JH, Chen XQ, Huang YY, et al. Study on asymmetric interior corner flow in microgravity conditions. *Sci China Technol Sci*, 2012, 55(8): 2332-2337
- 5 Li YQ, Hu MZ, Liu L, et al. Study of capillary driven flow in an interior corner of rounded wall under microgravity. *Microgravity Sci Technol*, 2015, 27: 193-205

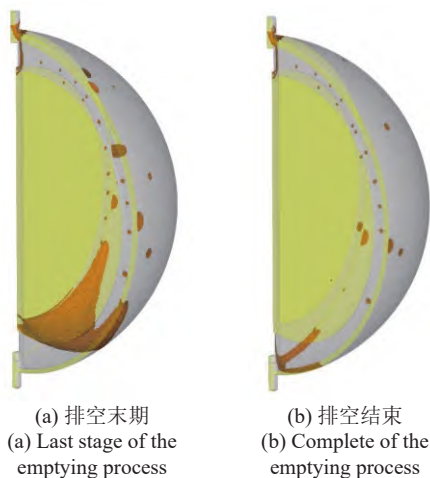


图 12 贮箱排空过程

Fig. 12 Tank emptying process

- 6 Wu ZY, Huang YY, Chen XQ, et al. Capillary driven flows along curved interior corners. *IJ Multiphase Flow*, 2018, 109: 14-25
- 7 李京浩, 陈小前, 黄奕勇. 基于内角流动的板式表面张力贮箱内推进剂流动过程研究. *国防科技大学学报*, 2012, 34(4): 18-21 (Li Jinghao, Chen Xiaoqian, Huang Yiyong. Research on propellant flow process in plate surface tension tank based on interior angle flow. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(4): 18-21 (in Chinese))
- 8 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. *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. *Aerospace Control and Application*, 2012, 38(6): 1-5 (in Chinese))
- 9 Dreyer M, Delgado A, Rath HJ. Capillary rise of liquid between parallel plates under microgravity. *J Colloid Interface Sci*, 1994, 163: 158-168
- 10 陈上通, 吴笛, 王佳等. 微重力下成一定夹角平板间的表面张力驱动流动的研究. *力学学报*, 2022, 54(2): 326-335 (Chen Shangtong, Wu Di, Wang Jia, et al. Capillary rise of liquid between plates with a certain angle under microgravity. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(2): 326-335 (in Chinese))
- 11 Chen ST, Zhang C, Li W, et al. Capillary phenomena in the corner of truncated-cone-shaped containers under microgravity. *Acta Mech Sin*, 2023, 39: 322347
- 12 Chen SY, Duan L, Li W, et al. Profiles of free surfaces in revolved containers under microgravity. *Microgravity Sci Technol*, 2024, 36: 11
- 13 Dominick S, Driscoll S. Fluid acquisition and resupply experiment (FARE 1) flight results//American Institute of Aeronautics and Astronautics 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Monterey, June 1993
- 14 Dominick S, Tegart J. Orbital test results of a vanned liquid acquisition device//American Institute of Aeronautics and Astronautics 30th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, June 1994
- 15 Jaekle D. Propellant management device conceptual design and analysis-Vanes//27th Joint Propulsion Conference, 1991
- 16 Jaekle D. Propellant management device conceptual design and analysis-Sponges//29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1993
- 17 Jaekle D. Propellant management device conceptual design and analysis-galleries//33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1997
- 18 Tam W, Taylor J. Design and manufacture of a propellant tank assembly//33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1997
- 19 Tam W, Ballinger I, Jaekle D. Propellant tank with surface tension PMD for tight center-of-mass propellant control//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2008
- 20 Chato D, Martin TA. Vented tank resupply experiment: Flight test results. *J Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(5): 1124-1130
- 21 Chen ST, Hu L, Chen SY, et al. Study on the shape and motion of bubbles in the tank model with a central column aboard the Chinese Space Station. *Phys Fluids*, 2024, 36: 012124
- 22 顾方. 微重力环境下半球形贮箱液体重定位试验研究. *空间科学学报*, 1991, 11(1): 24-32 (Gu Fang. Experimental investigation of liquid reorientation in semispheres under microgravity conditions. *Chinese Journal of Space Science*, 1991, 11(1): 24-32 (in Chinese))
- 23 Li YQ, Dong JY, Rui W. Numerical simulation for capillary driven flow in capsule-type vane tank with clearances under microgravity. *Microgravity Sci Technol*, 2020, 32: 321-329
- 24 姜志杰, 吴宗谕, 刘常青等. 基于 Surface Evolver 的推进剂贮箱气液界面分析. *空间科学学报*, 2020, 40(6): 1066-1073 (Jiang Zhijie, Wu Zongyu, Liu Changqing, et al. Liquid-gas interface analysis of propellant tank based on surface evolver. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(6): 1066-1073 (in Chinese))
- 25 肖立明, 李欣, 胡声超等. 微重力条件下上面级贮箱液体推进剂自由界面变形数值模拟研究. *航天器环境工程*, 2020, 37(2): 115-119 (Xiao Liming, Li Xin, Hu Shengchao, et al. Numerical simulation of free interface deformation of liquid propellant in upper stage tank under microgravity condition. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(2): 115-119 (in Chinese))
- 26 苗楠, 王菁, 刘战合等. 微重力落塔实验中的流体行为仿真与分析. *应用力学学报*, 2020, 37(4): 1763-1769 (Miao Nan, Wang Jing, Liu Zhanhe, et al. Simulation and analysis of fluid behavior in microgravity drop tower experiment. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, 37(4): 1763-1769 (in Chinese))
- 27 Zhang D, Meng L, Li Y. Numerical simulation analysis of liquid transportation in capsule-type vane tank under microgravity. *Microgravity Sci Technol*, 2020, 32: 817-824
- 28 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. *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. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(1): 63-69 (in Chinese))
- 29 Wang L, Zhang X, Yun Y, et al. Numerical simulation of the reorientation process under different conditions in a vane-type surface tension propellant tank. *Microgravity Sci Technol*, 2022, 34: 37
- 30 魏列, 杜王芳, 赵建福等. 微重力条件下部分充液贮箱气液界面波动特性的数值模拟. *力学学报*, 2022, 54(4): 1004-1011 (Wei Lie, Du Wangfang, Zhao Jianfu, et al. Numerical study on gas-liquid interface waves in partially filled tanks under microgravity condition. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(4): 1004-1011 (in Chinese))