

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

杨鹏¹, 闫春杰², 郑永煜¹, 杨祺², 刘迎文¹, 王小军²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 730000, 兰州)

摘要: 在轨贮箱内气液分布特性极大影响箱内压力变化, 为了提高主动控压技术的效率, 延长推进剂在轨储存时间, 开展微重力下低温推进剂贮箱内气泡运动及融合特性的研究至关重要。本文采用流体体积函数法模拟微重力条件下低温推进剂贮箱内单个不同尺寸氧气泡的运动以及多个随机分布氧气泡的融合过程。结果表明: $10^{-5}g$ 微重力条件下, 随着贮箱内氧气泡半径增大, 氧气泡所受浮力以及上下面的压强梯度越大, 上升一定距离所需时间缩短; 当氧气泡的半径小于 100 mm 时, 氧气泡在释放后一段时间内最大速度小于 $10^{-4} m/s$, 基本处于停滞状态, 并且停滞时间随着氧气泡半径的减小而增长; 当不同尺寸氧气泡上升时, 即便有部分氧气泡半径小于 100 mm, 仍能在多个力场的综合作用下, 缓慢上升并发生碰撞与融合, 聚集于贮箱顶部, 形成了稳定的椭球回转体形状的“气枕”构型。本文研究结果证明“气枕”集中模型假设是可行的。

关键词: 微重力; 气泡运动; 气泡融合

中图分类号: V11 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202209009 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0084-08



OSID 码

Bubble Movement and Coalescence Characteristics in Cryogenic Propellant Tank in Microgravity Environment

YANG Peng¹, YAN Chunjie², ZHENG Yongyu¹, YANG Qi², LIU Yingwen¹, WANG Xiaojun²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The gas-liquid distribution characteristics in the orbital tank greatly affect the pressure change in the tank. To improve the efficiency of active pressure control technology and prolong the orbital storage time of propellant, it is very important to explore the bubble movement and coalescence characteristics in a cryogenic propellant tank under microgravity. In this paper, the volume of fluid method is used to simulate the movement of a single oxygen bubble of different sizes and the coalescence process of multiple randomly distributed oxygen bubbles in the tank under microgravity conditions. The results show that under a microgravity of $10^{-5}g$, the buoyancy and the pressure gradient on the upper and lower sides of oxygen bubbles increase as the bubble radius increases, and the time required to ascend a certain distance decreases. When the radius is less than 100 mm, the bubbles are basically in a stagnant state with a maximum speed lower than $10^{-4} m/s$ after they are released for a period of time, and the stagnation time

收稿日期: 2022-03-18。 作者简介: 杨鹏(1990—),男,副教授;刘迎文(通信作者),男,教授。 基金项目: 装备预研重点实验室基金资助项目(6142207190206);国家自然科学基金资助项目(51976146,52006164)。

网络出版时间: 2022-05-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220524.1819.004.html>

increases with the decrease of the bubble radius. When oxygen bubbles of different sizes rise, even if some of them have a radius of smaller than the critical separation radius, they can still rise slowly and complete coalescence under the combined action of multiple force fields, and form a stable ellipsoidal rotation at the top of the tank. The results of this paper prove that the hypothesis of lumped vapor model is feasible.

Keywords: microgravity; bubble movement; bubble coalescence

低温贮箱在空间在轨运行中会受到其他扰动,如变轨、燃料补给等,“气枕”原有构型存在破坏的可能,发生破裂与重组,形成分散于液相区的小气泡,弥散于整个贮箱内。对于可能出现在贮箱内任何位置的不同尺寸气泡,其受到微弱的残余重力所产生的浮力、液体的黏滞力及表面张力等多个力场的复杂耦合作用,使得微重力下气泡的分布与运动特性研究变得较为困难,并且直接关系到微重力下低温贮箱内“气枕”集中^[1-3]处理假定的理论合理性乃至对外排气降压过程的高效性^[4],成为影响到贮箱内压力动态变化模型构建的关键难点。

国内外对于气泡运动及融合特性开展了大量数值仿真研究。Pu等^[5]运用 Level Set 法模拟了常重力和微重力下两气泡的融合过程,结果表明两种工况下气泡周围速度场类似但常重力下气泡尾部的漩涡更强,气泡形变大且融合时间短。Alhendal等^[6]利用 VOF 法研究微重力下气泡在非均匀热场情况下由气泡表面张力所引起的马拉戈尼运动,研究空间环境下不同半径的气泡在不同热场下的上升运动规律,探讨不同的准则数对气泡运动的影响规律,验证了 VOF 法在微重力下追踪气液两相界面的可行性。Wang等^[7]利用 VOF 方法开展了微重力液氧贮箱内液上气下时两相分布随时间的变化,结果表明在微重力条件下,无论箱内气液界面的初始分布状态如何,贮箱内气液两相流体均会最终形成气相被液体包裹并稳定在箱顶的形态。Lv等^[8]将 Level Set 与 VOF 法耦合,模拟了 3 种尺寸贮箱内相同大小气泡的运动,结果表明初始时均在贮箱中部的气泡经过 1 ks 运动后,气泡的位置高度随贮箱尺寸的增大而升高。国外还有众多学者^[9-14]研究了气泡排列方式,雷诺数 Re 、莫顿数 Mo 等气泡特性参数,气泡的阻力、升力等因素的变化对气泡上升过程变形、吸引或排斥等运动影响规律。李彦鹏等^[15]采用 Level Set 法模拟了数值管道内两相邻气泡的上升,结果表明并排上升气泡不会聚并,而垂直上升气泡发生聚并现象。王太等^[16]将 PLIC 算法与气液两相流控制方程结合,模拟了同轴两气泡的融合过程,得

出了表面张力对气泡融合的影响规律。张淑君等^[17]研究了等径气泡在聚并过程中的形态变化,发现气泡先形成纺锤体再逐渐收缩成球形。庞明军等^[18]研究发现气泡分布与微重力量值有直接关系。王焕然等^[19]研究发现上升气泡的形状与气泡特性参数密切相关。此外,国内也有部分学者研究不同尺寸水平^[2]、初始形状^[21]、气泡黏性^[22]对气泡运动的影响以及气泡流体力学行为^[23]。

目前,对于连续界面的追踪定位的仿真研究主要基于 Level Set 和 VOF 法。Level Set 法需要在所有计算区域内定义一个光滑的连续相函数 Φ ,且 Φ 的初值必须为距离函数,因而限定其应用范围。VOF 法用流体体积函数 F 来表示相函数,可表示具有复杂相界面的结构及其变化,自身携带表面张力模型,运算收敛性及精确度能满足很高的工程要求,并且可以处理自由面折叠、自由面入水等非线性问题,计算过程相对简单,无硬性的计算机存储空间要求。在表面张力起主导作用的微重力情况下,VOF 法耦合连续表面张力模型是更佳选择。

关于气泡的动力学特性研究,国内外均有学者对其进行研究探讨,然而针对微重力下贮箱内的气泡动力学及融合特性,还鲜有可供参考的数据资料。本文利用数值方法对气泡的运动分布及融合动态特性进行深入的理论分析与研究,主要解决气泡在低温贮箱中运动轨迹和滞留特性,探明“气枕”集中假设模型的可行性。

1 物理数学模型

1.1 物理模型

图 1 所示为液氧低温贮箱的结构示意图。贮箱由中间的圆柱段和两端的椭圆封头组成,圆柱段半径 A 为 700 mm,高度 C 为 1 850 mm,椭圆封头长轴为 700 mm,短轴 B 为 375 mm。贮箱具体结构参数如表 1 所示。由于本文研究气泡的运动特性,因此在建模过程中不考虑贮箱内喷射泵以及导热元件对气泡运动的影响,即忽略上述元件。

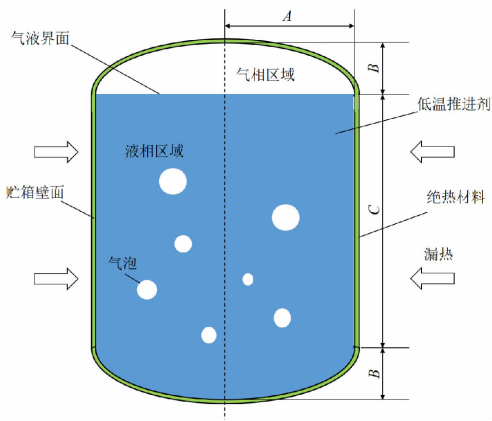


图1 液氧低温贮箱的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the liquid oxygen cryogenic tank

表1 贮箱几何结构参数

Table 1 Tank geometry parameters

m

A	B	C
0.700	0.375	1.85

1.2 数学模型

在轨航天器实际飞行过程中,贮箱中心流体处于一般处于过冷状态,但由于气泡上升的时间非常短(仅为数分钟至数十分钟),该时间段内进入气泡的冷量较少,气泡凝缩现象相对不明显。因此,本文参考文献[7],将箱内气液状态设置为饱和状态,忽略气泡运动过程中气液相间的传热传质。

本文通过在整个流体区域内求解质量守恒、动量守恒与能量守恒控制方程,来追踪微重力下贮箱内气泡的变化。

计算区域内质量守恒方程表达式如下

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}$ 表示求解体积相的速度矢量。

本文采用标准 $k-\epsilon$ 两输运方程模型来计算流动的发展,在 VOF 法中引入连续表面张力模型(CSF 模型),动量方程的具体形式如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{f} \quad (2)$$

式中: f 为体积力; μ 为动力黏度; p 为界面压力。

气液界面的应变曲率张量表达式为

$$S = \frac{1}{2}[(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] \quad (3)$$

VOF 法流体体积函数 F 的控制方程如下

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F = 0 \quad (4)$$

VOF 模型在处理各物理量时采用体积分数加权平均,因此任一物理量 χ 由下式确定

$$\chi = \sum_{q=1}^n \alpha_q \chi_q \quad (5)$$

式中: χ_q 为第 q 相该物理量的值; α_q 为第 q 相在计算的空间网格内所占体积。

在 VOF 模型计算中,气泡运动受到重力、浮力等体积力以及表面张力等表面力的作用。由于整个贮箱假设为饱和状态,因而附加质量力以及黏滞力等其他作用力在本研究中予以忽略。气泡受力如图2所示。上述作用力分别由下式确定

$$F_\sigma = 2\pi R \sigma \quad (6)$$

$$F_G = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_v g \quad (7)$$

$$F_v = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_l g \quad (8)$$

式中: F_σ 为表面张力; F_G 为重力; F_v 为浮力; ρ_l 为液体密度; ρ_v 为气体密度; R 为气泡半径。

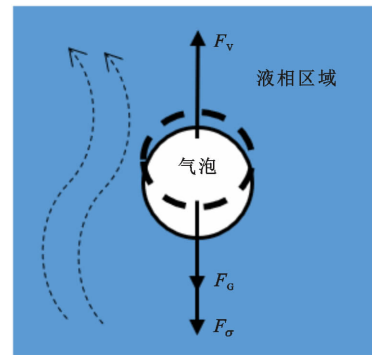


图2 气泡受力示意图

Fig.2 Schematic diagram of the force on the bubble

气泡的上升与融合过程中需要引入相应的准则数,即厄特沃什数 Eo 和莫顿数 Mo ,两者均为流体力学的无量纲数,用来描述气泡在流体或是连续相中移动时的外形及行为特性。其定义式如下

$$Eo = \frac{g \Delta \rho D^2}{\sigma} \quad (9)$$

$$Mo = \frac{g \mu^4 \Delta \rho}{\sigma^3 \rho_l^2} \quad (10)$$

式中: $\Delta \rho$ 为气泡与周围介质的密度差绝对值; D 为与气泡同体积的圆球的直径。在低 Mo 流体环境中,气泡上升的最终速度将随着其直径的增大而增大。 Eo 可以理解为浮升力和表面张力的比值,当 Eo 较小时,表面张力对气泡的形状及运动规律的影响作用占据主导地位,反之,浮升力的影响将会逐渐显著。 Mo 表征液体黏性力与表面张力之比,在低

Mo 中,气泡上升的最终速度将随着其直径的增大而增大。

2 数值方法

2.1 求解设置

本文速度与压力耦合方式选择适用于瞬变流动的 PISO 方案,压力插值算法选择 PRESTO 算法,VOF 捕捉的自由界面附近的插值选择几何重建 (geo-reconstruct) 格式,因其是目前较为精确的界面追踪方法,最适用于非结构化网格。壁面边界条件设置为无穿透、无滑移条件。

在计算过程中,设定气体为理想气体,液相为不可压缩流体,在 VOF 法 CSF 模型中,为了提高解的稳定性,在多相模型中设置可压缩的气相为主相,不可压缩液相为次相,用于平衡可压缩相的压力梯度和表面张力之间相互作用,以加速整个计算的收敛过程。

为保证计算准确性,时间步长设置为 0.01 s ,在计算过程中收敛具体判据为:第一,某次迭代的相对误差小于预设的容许误差,其中连续性残差小于 10^{-3} ,其余残差小于 10^{-6} ;第二,在某次迭代中某点的温度值或者速度值不再发生变化,则认为计算已经收敛。

2.2 物性设置

贮箱内气泡在运动过程中低温液体的温升约为 (以充灌率 95% 为例) $\Delta T=Q/mc_p=5.46\times10^{-4}\text{ K}$,其中热量 Q 为外界热负荷 (0.3 W/m^2)、壁面面积 (12 m^2) 以及气泡运动时间 (约 1 ks) 的乘积,估算值约为 $3\,600\text{ J}$; m 为贮箱内流体质量,为 $3\,902\text{ kg}$ 。如此微小的温升可认为工质热物性参数基本保持不变,物性具体设置见表 2。

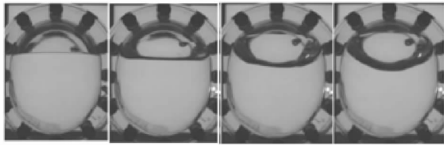
表 2 物性设置

Table 2 Physical property settings

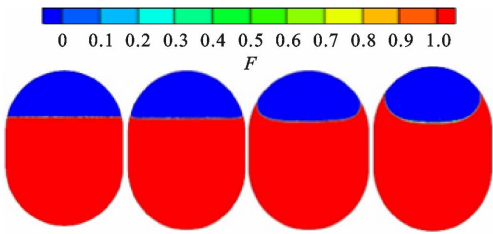
参数	数值
$\rho_l/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 141.2
$\rho_v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	4.464 1
$c_{pl}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 699.3
$c_{pv}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	970.67
$\lambda_l/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.15
$\lambda_v/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	8.14×10^{-3}
$\mu_l/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	1.95×10^{-4}
$\mu_v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	6.95×10^{-6}
$\sigma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.32×10^{-2}

2.3 模型验证

图 3 所示为采用 VOF 模型计算得到的箱内气液分布与 Li 等^[24]实验结果对比图。从图中可以看出,计算得到的箱内气液分布的变化趋势与实验较为吻合,证明 VOF 模型对于预测箱内气液分布规律具有一定的精度。



(a) 落塔实验结果



(b) 模型计算结果

图 3 落塔实验结果与模型计算结果对比
Fig. 3 Comparison of drop tower experiment results and calculation results

2.4 网格无关性验证

考虑到贮箱几何结构对称性,本文将贮箱模型简化为 2D 平面。在进行网格无关性验证过程中,在不同密度的网格下将 100 mm 的气泡从贮箱中心释放,观察气泡最高点随时间的变化,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,当网格数达到 $60\,837$ 时,气泡最高点的位置与网格数基本无关,因此本文选取 $60\,837$ 个网格进行模拟计算。

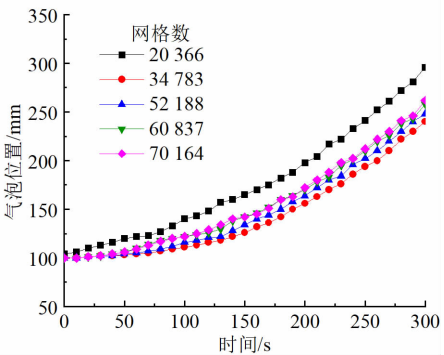


图 4 不同密度网格下气泡最高位置随时间变化曲线
Fig. 4 Highest position of bubbles with time under different grids

3 计算结果与讨论

3.1 气泡运动

微重力环境下,气泡会受到重力、浮力、表面张力和黏性滞力及其他附加质量力的作用。从式(6)~式(8)中可以发现,气泡半径影响着气泡受力,从而影响气泡运动。本文选取气泡半径分别为 50 mm、75 mm、100 mm、125 mm、150 mm、175 mm 以及 200 mm 等一系列气泡,初始时刻从贮箱的中心位置释放,观察其在多力场耦合的作用下的运动状况。为了定量研究气泡的动力学特性,本文采用气泡的几何中心在竖直方向上移动 500 mm 所需时间作为评判指标,以对比不同气泡间的动力学特性。

图 5 所示为本文所选取的不同半径气泡从贮箱中心位置向上移动 500 mm 所需要时间对比图。随着气泡半径增大,上升一定距离所需要的时间呈现下降趋势。由受力分析可知,气泡的半径越大,受到的浮力以及上、下面的压强梯度力越大,向上运动的驱动力也就越大,所以上升指定距离所需要的时间越短。当气泡半径下降至 100 mm 以下时,气泡初始运动速度小于 10^{-4} m/s,基本呈现出停滞状态,并且停滞时间随着气泡半径的减小而延长。

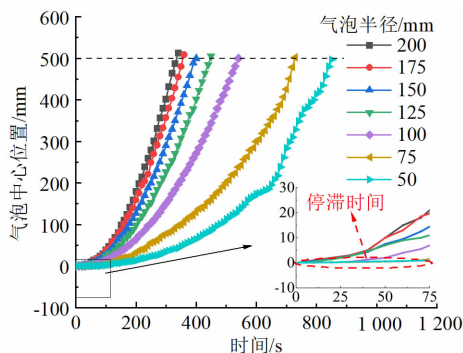


图 5 液氧贮箱中不同半径气泡运动 500 mm 所需时间对比图

Fig. 5 Time required for bubbles with different radii to move 500 mm in the liquid oxygen tank

图 6 所示为本文所选气泡到达指定距离时的上升平均速度以及上升 500 mm 所需时间随 Eo 的变化关系。 Eo 与气泡的半径有关,气泡半径越大,相应的 Eo 越大。由于气泡 Eo 在很小的范围内变化,即在上升过程中表面张力占据主导因素,气泡均未发生明显变形。随着 Eo 的增大,气泡的上升速度呈现近似线性的上升,即验证了在低 $Mo = 1.32 \times 10^{-16}$ 流体中,气泡上升速度随尺寸的增加而变快。上升时间在气泡半径为 100 mm ($Eo = 0.35$) 前后变

化明显,当其小于 100 mm 时,上升时间增长速率随气泡半径的减小变化快,而当其大于 100 mm 时,上升时间增长速度随气泡半径的减小变化慢。

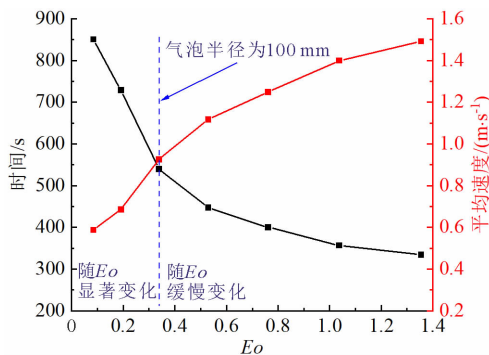


图 6 气泡平均速度以及上升时间随 Eo 的变化曲线

Fig. 6 Average bubble velocity and rise time under different Eo

3.2 气泡融合特性

假设低温液体贮箱在剧烈晃动后,“气枕”被分散成数个大小形状不一的小气泡,其位置随机地分散于贮箱内部的各个区域。

图 7 所示为重力水平 $10^{-5}g$ 条件下,95% 充灌率液氧贮箱内随机分布的 4 个气泡运动上升及融合过程中关键时间节点的相态分布。此工况下的 $Mo = 1.32 \times 10^{-16}$,最大气泡的 $Eo = 2.82$,表面张力对气泡的外形及运动规律占据着主导地位。气泡在浮力和上下表面压强梯度力的驱动作用下,由最初静止状态开始缓慢上升。当气泡开始上升时,由于气泡间的流体运动速度比周围流场大,形成了指向气泡间的压力梯度,使尺寸相近的气泡在上升过程中相互接触并逐渐融合。100 s 时,各个气泡相对于原来位置发生了显著移动,说明在气泡运动的初始阶段,黏性滞力在很大程度上限制着气泡的运动。此外,气泡的形状仅发生了轻微变形,这充分说明表面张力具有维持气泡形状,阻止其变形的作用。一旦气泡产生位移后,周围的流场迅速变化,气泡与周围流场间的相互扰动加强。180 s 时,中间的大气泡与其左上方的小气泡发生碰撞并相互融合,在低 Mo 流体环境中,气泡上升的速度随其直径的增大而增大。250 s 时,气泡发生二次融合,融合后的气泡半径进一步增大,在气泡的碰撞过程中,由于气泡运动的惯性动量使融合后的大气泡在上升的过程中液面不断地发生波动,但大气泡此后并未分裂,此时表面张力对自由界面的构型仍占据主导作用,贮箱内没有足够的扰动打破大气泡。图 7(f) 中大气泡已经接近贮箱顶部,并未与其右下方的小气泡发生再次

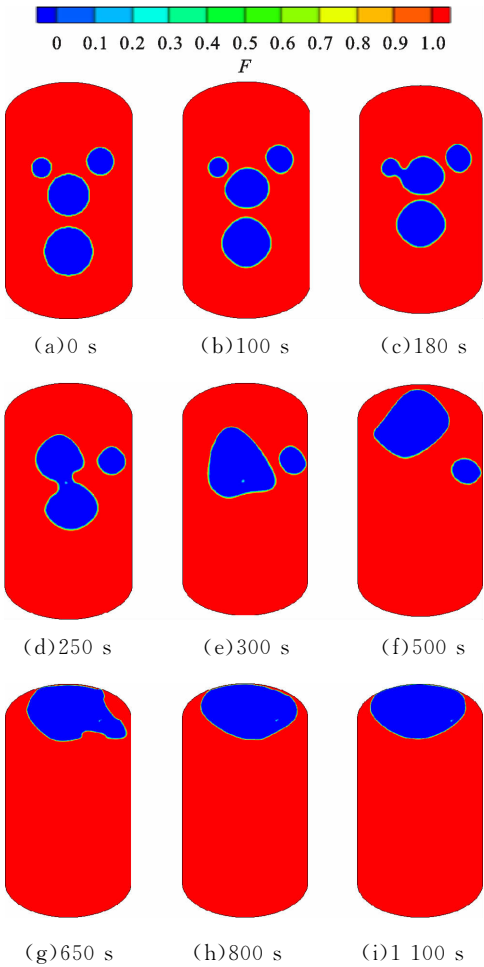


图 7 $10^{-5}g$ 微重力下气泡在液氧贮箱中的运动及融合过程图

Fig. 7 Movement and coalescence process of bubbles in the liquid oxygen tank under $10^{-5}g$ microgravity

由于大气泡的上升速率要大于小气泡,即便不考虑流场之间的相互作用,小气泡在竖直方向的速度也无法“追赶”上大气泡的上升速率。650 s 时,贮箱顶部的大气泡与下方小气泡发生融合,至此所有分散于贮箱内的气泡已融合为一体,聚集于贮箱顶部。融合后“气枕”的液面发生轻微的波动,此时箱内仍然存在着由于气泡上升所形成的流动循环,而“气枕”依旧固定于顶部并未发生转移。1 100 s 时,“气枕”形成了较稳定的液面构型,即类似于椭球的回转体。飞行器在外太空飞行中,剧烈的晃动和扰动通常存在于升空和变轨等过程,并且时间相对较短。因此,低温贮箱内的“气枕”绝大多数时间内是处于单个大气泡的浮动状态。

结合上述气泡运动特性,本文研究了当贮箱内存在小于 100 mm 半径的气泡时,箱内多气泡的融合特性。图 9 所示为 95% 充灌率的液氧贮箱在 $10^{-5}g$ 微重力下,当贮箱内存在半径小于 100 mm 的气泡时,多个气泡在液氧贮箱中的运动及融合过程示意图。设定在初始时刻,贮箱内随机分布多个尺寸各不相同的气泡。在图 9(a)中,气泡半径由小到大依次为 70 mm、85 mm、95 mm、110 mm、220 mm 以及 280 mm。

100 s 时,贮箱内半径为 270 mm 的大气泡首先与其右上侧半径为 110 mm 的气泡发生融合。随后,在图 9(d)中,气泡已完成二次融合,原位于底部大气泡左侧半径为 85 mm 的气泡也融入到大气泡中。随着底部大气泡的不断向上移动,受其周围所

融合。这是因为贮箱内的流场已经初步定型,大气泡的上升形成了其右侧液体向下的流动循环,如图 8 所示,而小气泡恰好处于这样的流场内,上升速度受到一定程度的抑制。

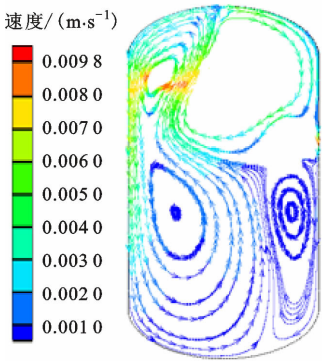
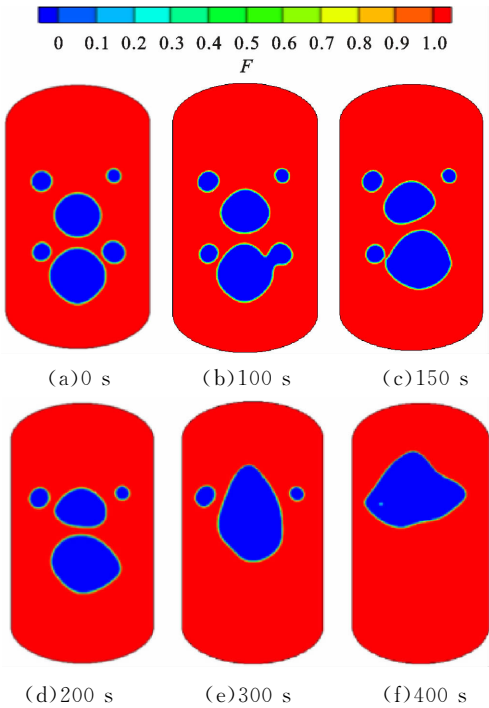


图 8 500 s 时贮箱内流场迹线分布示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the flow trace in the tank at 500 s



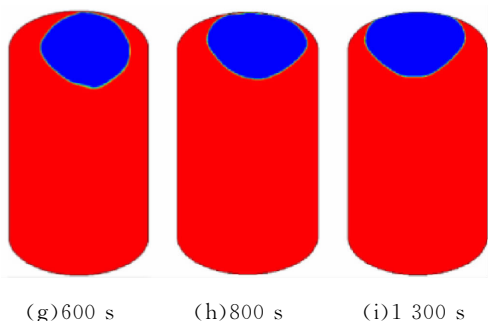


图9 $10^{-5}g$ 微重力下小气泡在液氧贮箱中的运动及融合过程图

Fig. 9 Movement and coalescence process of small bubbles in the liquid oxygen tank under $10^{-5}g$ microgravity

带动的流场影响,上方的气泡均发生位置移动和轻微变形。300 s时,大气泡在上升过程中速度不断地增大,并受到融合后界面波动的影响,形状已变为子弹型回转体,其两侧半径小于100 mm的气泡,相对初始时刻均发生了位置偏移和变形,表明小气泡已受到下方大气泡周围流场的作用而向上运动。400 s时,所有气泡融合为单一的大气泡。如图9(h)所示,当气泡到达贮箱顶部后,由于箱内流动循环的存在,气泡在一定程度上向右偏离了贮箱中心轴线。随着流体循环动能的不断衰减,气泡逐渐稳定在贮箱顶部,以集中“气枕”形式存在。因此,当多气泡存在于贮箱内时,即便有半径小于100 mm的气泡,小气泡也会在其他气泡的相互作用下发生融合,最终聚集于贮箱顶部,形成稳定的椭球回转体形状的“气枕”构型。

4 结 论

本文采用流体体积函数法模拟微重力条件下低温推进剂贮箱内氧气泡的运动及融合特性,得到如下结论。

(1)在 $10^{-5}g$ 微重力条件下,随着氧气泡半径增大,上升一定距离所需时间呈现出下降趋势,其主要原因是氧气泡的半径越大,产生的浮力以及上、下面的压强梯度力越大,向上运动的驱动力也就越大。当氧气泡半径小于100 mm时,氧气泡上升的前期出现一定停滞,停滞期内氧气泡最大速度小于 10^{-4} m/s。停滞时间随氧气泡半径的减小而增长。

(2)在重力水平 $10^{-5}g$ 条件下,95%充灌率的液氧的贮箱内不同尺寸气泡上升时,由于氧气泡间的流体运动速度要比周围流场大,形成了指向气泡间的压力梯度,使尺寸相近的氧气泡在上升过程中

相互接触并逐渐融合,最终形成椭球回转体形状的“气枕”构型。

(3)微重力环境下随机分布于贮箱内一定数量的氧气泡,即便有部分氧气泡半径小于100 mm,仍能够在多个力场的综合作用下,缓慢上升并发生碰撞与融合,最终聚集于贮箱顶部,形成稳定的椭球回转体形状的“气枕”构型。因此,一定程度上“气枕”集中模型假设是可行的。

考虑到实际轨航天器的低温贮箱一般处于过冷状态,后续的研究工作将加入相间的传热传质模型,考虑气泡运动过程中凝缩或者膨胀现象,使模型与实际状况更为符合。

参考文献:

- [1] SHUANG Jingjing, LIU Yingwen. Efficiency analysis of depressurization process and pressure control strategies for liquid hydrogen storage system in microgravity [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(30): 15949-15961.
- [2] 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.
- [3] PANZARELLA C H, KASSEMI M. On the validity of purely thermodynamic descriptions of two-phase cryogenic fluid storage [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 484: 41-68.
- [4] 颜露, 黄永华, 吴静怡, 等. 低温推进剂在轨储存热力学排气系统 TVS 研究进展 [J]. 低温与超导, 2015, 43(2): 5-13.
- [5] YAN Lu, HUANG Yonghua, WU Jingyi, et al. Development of thermodynamic venting system technology for cryogenic propellant storage on orbit [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2015, 43(2): 5-13.
- [6] PU Lin, LI Huixiong, LV Xiao, et al. Numerical simulation of bubble dynamics in microgravity [J]. Microgravity Science and Technology, 2008, 20(3): 247-251.
- [7] ALHENDAL Y, TURAN A, ALY W I A. VOF simulation of Marangoni flow of gas bubbles in 2D-axisymmetric column [J]. Procedia Computer Science, 2010, 1(1): 673-680.
- [8] WANG Bin, QIN Xujin, JIANG Wenbin, et al. Numerical simulation on interface evolution and pressurization behaviors in cryogenic propellant tank on orbit [J]. Microgravity Science and Technology, 2020, 32(1): 59-68.

- [8] LV Rongrong, HUANG Yonghua, WU Jingyi. Thermodynamic analysis of partially filled hydrogen tanks in a wide scale range [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 193: 117007.
- [9] FORTES A F, JOSEPH D D, LUNDGREN T S. Nonlinear mechanics of fluidization of beds of spherical particles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, 177: 467-483.
- [10] WIJNGAARDEN L V. The mean rise velocity of pairwise-interacting bubbles in liquid [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 251: 55-78.
- [11] YUAN H, PROSPERETTI A. On the in-line motion of two spherical bubbles in a viscous fluid [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 278: 325-349.
- [12] ROBINSON P B, BOULTON-STONE J M, BLAKE J R. Application of the boundary integral method to the interaction of rising two-dimensional deformable gas bubbles [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 1995, 29(5): 393-412.
- [13] TRYGGVASON G, BUNNER B, ESMAEELI A, et al. A front-tracking method for the computations of multiphase flow [J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, 169(2): 708-759.
- [14] LEGENDRE D, MAGNAUDET J, MOUGIN G. Hydrodynamic interactions between two spherical bubbles rising side by side in a viscous liquid [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 497: 133-166.
- [15] 李彦鹏, 张乾隆, 白博峰. 竖直通道内相邻气泡对上升的直接数值模拟 [J]. *热能动力工程*, 2007, 22(4): 375-379.
- LI Yanpeng, ZHANG Qianlong, BAI Bofeng. A direct numerical simulation of neighboring air-bubble rising process in a vertical channel [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2007, 22(4): 375-379.
- [16] 王太, 李会雄, 李阳. 同轴两个气泡融合特性的数值研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(7): 1-6.
- WANG Tai, LI Huixiong, LI Yang. Numerical investigation on coaxial coalescence of two gas bubbles [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(7): 1-6.
- [17] 张淑君, 吴锤结. 气泡之间相互作用的数值模拟 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2008, 23(6): 681-686.
- ZHANG Shujun, WU Chuijie. Numerical simulation of the interactions between two three-dimensional deformable bubbles [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2008, 23(6): 681-686.
- [18] 庞明军, 魏进家, 宇波. 微重力量值对气液两相流相分布及液相湍流统计量影响的数值研究 [J]. *空间科学学报*, 2012, 32(3): 368-375.
- PANG Mingjun, WEI Jinjia, YU Bo. Numerical investigation on influence of micro-gravity magnitude on phase distribution and liquid turbulence statistics in bubbly flow [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2012, 32(3): 368-375.
- [19] 王焕然, 李彦鹏, 杨栋, 等. 黏性液体中单个气泡上升的形状特性 [J]. *工程热物理学报*, 2009, 30(9): 1492-1494.
- WANG Huanran, LI Yanpeng, YANG Dong, et al. On the shape feature of a single bubble rising in viscous liquids [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009, 30(9): 1492-1494.
- [20] 蒋昌波, 王刚, 邓斌, 等. 不同尺度水平并列气泡运动特性三维数值研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(2): 233-245.
- JIANG Changbo, WANG Gang, DENG Bin, et al. Three-dimensional numerical simulation of movement characteristic of two parallel rising bubbles with different scales [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(2): 233-245.
- [21] 何丹, 李彦鹏, 刘艳艳. 初始形状对浮升气泡动力特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(1): 43-47.
- HE Dan, LI Yanpeng, LIU Yanyan. Effect of initial bubble shape on dynamics of a buoyancy-driven bubble [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(1): 43-47.
- [22] 王昭太, 吴忱韩, 赵万东, 等. 气泡黏性对上升运动特性影响的界面追踪算法模拟 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(13): 125-130.
- WANG Zhaotai, WU Chenhan, ZHAO Wandong, et al. Front tracking method simulation of the effect of bubble viscosity on rising motion characteristics [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(13): 125-130.
- [23] 冯俊杰. 气液两相体系气泡的流体力学行为研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- [24] LI Zhangguo, ZHU Zhiqiang, LIU Qiusheng, et al. Simulating propellant reorientation of vehicle upper stage in microgravity environment [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2013, 25(4): 237-241.

(编辑 荆树蓉 亢列梅)