

航天器贮箱气液自由界面追踪数值模拟^{*}

李章国 刘秋生 纪岩

(中国科学院力学研究所 国家微重力实验室 北京 100080)

侯辉

(上海空间推进研究所)

摘要 主要讨论了航天器贮箱在轨道航行时的微重力状态下其液体推进剂在贮箱内的形态分布及控制。文中采用 VOF 方法, 加入了表面张力的效应, 追踪气液两相流的自由界面, 对液面在微重力条件下的位形变化进行了数值模拟。通过比较不同重力加速度及接触角下的两相流的相图, 分析了影响贮箱中液体推进剂位形变化的主要因素及对其有效的控制方法。

关键词 微重力; 空间流体管理; VOF 方法; 表面张力; 接触角

中图法分类号 V 524

Numerical Simulation of Liquid-Vapor Interface Tracking in Tank of Spacecraft

LI Zhangguo LIU Qiusheng JI Yan

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

HOU Hui

(Shanghai Institute of Space Propulsion)

Abstract This paper presents a comprehensive analysis of the transport processes of propellant in tank of spacecraft in different gravity. The motion of the liquid-vapor interface of propellant in the tank of on-orbit spacecraft is investigated numerically by solving the incompressible Navier-Stokes equations using the VOF method coupled with the surface tension effect under micro-gravity environment. The objectives of this study are to examine the robust method of controlling the interface transformation of the two phase flow by comparing and analyzing the effects of gravity and contact angle as the typical parameters. Results show that, the gravity effect plays a dominant role in determining the shape of gas-liquid interface and the relative location of the gas-liquid phase in the tank at large Bond number; when the Bond number is small enough, the wettability effect exert a great influence.

Key words Microgravity, Fluid management in space, VOF method, Surface tension, Contact angle

*国家自然科学基金项目 (10772185, 10372105) 和中国科学院知识创新工程项目 (KGCX-SW-409) 共同资助

2007-08-22 收到原稿, 2007-10-28 收到修定稿

1 引言

微小卫星技术的开发与应用近年来发展很快,在某种意义上代表了航天器小型化的趋势.微小卫星通常是指有实际应用价值的、重量在 100 kg 以下的卫星,其高新技术含量高,研制周期短,研制经费低,有很好的发展前景.

卫星在轨道运行过程中,推进系统对其姿态控制和轨道控制起着至关重要的作用.微小卫星推进系统必须提供卫星星座的组成和维持、轨道高度保持所需的阻力补偿、姿态控制、卫星寿命结束时的离轨及编队飞行等功能.液化气推进系统是近年来出现的小卫星及纳卫星的推进系统.其优点在于储存密度较高、无毒、造价低廉.其原理与储存液化石油气系统原理相同,即将大量液化气工质以气液共存的形式储存于密闭容器内,当打开阀门后,在液化气自身饱和蒸气压的作用下,以气体的形式喷出.在地面应用液化气时,由于重力场的作用,液化气始终以气体的形式喷出,但在空间微重力环境下,应用液化气推进系统则需要克服可能存在的液体喷出的问题.根据 SNAP-1 卫星的在轨数据^[1],其 30%~40% 左右的工质以液体形式喷出.因此需要进行针对性的设计和控制以防止液化气以液态形式喷出.

本文对几种简单工况下的卫星推进剂贮箱的气液分布进行了数值模拟,分析了贮箱中液体推进剂位形分布变化的主要因素.

2 卫星推进装置贮箱模型

国内自行研制开发的一卫星推进装置,贮箱形状为圆柱形贮箱,其一端开口,连接形式为 24 度锥形球头连接.贮箱的外形如图 1 所示.

3 物理模型和数值方法

3.1 物理方法

求解自由界面流动问题的数值方法可以分为拉格朗日方法与欧拉方法.一般对于包含液面破碎以及波浪的翻卷问题用拉格朗日方法并不适合.欧拉方法对于追踪自由界面应用比较多的主要有流体体积法 (VOF)^[2] 和 Level Set 方法^[3].VOF 法是一种处理复杂自由表面的有效方法,VOF 法的优点在



图 1 推进装置贮箱

Fig.1 Propellant tank geometry

于只用一个函数就可以描述自由表面的各种复杂变化,该方法既具有以前常用于处理自由面问题的 MAC 法的优点,又克服了 MAC 法所用计算内存多和计算时间长的缺点,同时也克服了标高函数法无法处理自由表面是坐标多值函数的缺点.

当液体与固体接触时,液体会沿着固体表面扩展,这种现象称为液体与固体的浸润现象.通常用接触角来反映浸润的程度.所谓接触角,是指以固壁为边界的自由面对固壁的倾斜角,如图 2 所示.

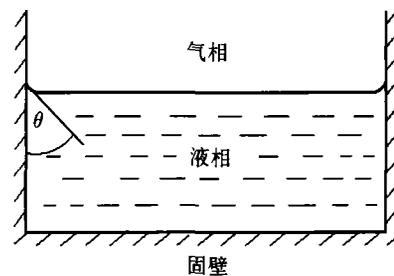


图 2 浸润现象与接触角

Fig.2 Wetting and contact angle

接触角 θ 反映液体分子和固体分子之间的相互吸引力 (附着力) 与液体分子间的内聚力的相对大小.当固液气三相接触并处于平衡状态时,接触角满足 Yong 氏方程:

$$\sigma_{13} = \sigma \cos \theta + \sigma_{12}.$$

其中, σ , σ_{12} , σ_{13} 分别为气液、液固和气固三种界面的表面张力系数,当温度和气体压力不变时, σ , σ_{12} 和 σ_{13} 均为常数.在这种条件下,上式等价于

$$\theta = \text{const.}$$

如果 $0 < \theta < 90^\circ$, 表示附着力大于内聚力, 液体浸润固体; 如果 $90^\circ < \theta < 180^\circ$, 则附着力小于内聚力, 呈现非浸润状态.

微重力环境下, 由于表面张力的作用静液面一般并非平面, 而是表现为一个弯曲界面^{[4],[5]}. 气液两相弯曲界面是与两相间的压力差相联系的, 由 Laplace 方程

$$\Delta p = \sigma C = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

给出. 其中, Δp 为流体界面压力差; σ 为表面张力系数; C 为界面的平均曲率, $C = R_1^{-1} + R_2^{-1}$; R_1 和 R_2 为两个主曲率半径.

没有重力(或其他外场)时, 压力差 Δp 在整个体积中是常数. 于是两相的界面形状只取决于接触角 θ 和表面张力的作用, 这不同于地球上的情况. 在地球上毛细现象一般是流体静压力(重力)和界面力平衡的结果.

3.2 控制方程

流体为不可压缩粘性流体, 则描述其运动的连续性方程和 Navier-Stokes 方程分别为

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \tau + \mathbf{g} + \mathbf{F}_s. \end{aligned}$$

其中, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{F}_s 为表面张力, τ 为粘性应力张量, 对于牛顿流体有

$$\tau = 2\mu S.$$

应变率张量 S 由下式给出:

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

流体体积由体积函数 F 确定. 体积函数的控制微分方程为

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla F = 0.$$

其中, 流体体积函数 F 定义为每个空间单元上, 单元内流体所占体积与该单元可容纳流体体积之比. 由定义可知. 当单元被流体占满时 F 值为 1, 空单元时值为 0. 单元的 F 值为 $0 < F < 1$ 时, 该单元含自由表面.

边界条件为: 在贮箱壁面上满足无穿透、无滑移条件, 即

$$\mathbf{v}_f = \mathbf{v}_w.$$

其中, \mathbf{v}_f 为流体速度, \mathbf{v}_w 为壁面速度.

用二阶迎风格式对方程进行离散, 速度与压力耦合采用 SIMPLE 方法, 用有限元方法对问题求解.

4 计算结果和讨论

由于计算的复杂性, 本文采用了二维模型. 模型贮箱内径为 10 cm, 圆柱体部份高为 8 cm, 箱顶部以及底部半球体部分都为 2.5 cm. 使用网格为 80. 为与实验进行比较, 以液氨和氨蒸气分别作为液相与气相的模拟工质, 取环境温度为 20°C , 压力为饱和蒸气压 857.2 kPa, 初始填充液体量为箱体体积的一半, 初始气液界面设为水平界面, 对不同的重力加速度环境和不同的壁面浸润性条件(即取不同的接触角)下非定常流动的情况进行数值模拟, 得到最终稳态的液面形状.

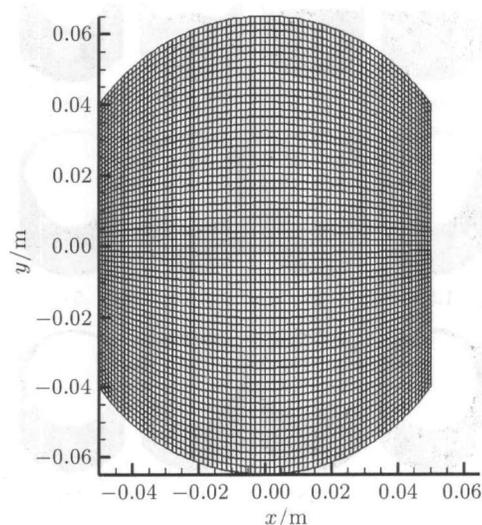


图3 计算模型及网格

Fig.3 Model and mesh

考虑在零重力条件下, 接触角取 10° (贮箱的合金材料与液氨浸润性较好). 液面从初始时刻的平面自由释放, 图 4 结果给出了靠近壁面处的点 (0.048, -0.005) 的垂直方向的速度, 由图可以看出, 释放后液面出现波动, 开始的时刻波动的幅值较大, 之后随着时间衰减而慢慢趋于稳定. 这与图 5 所示的数值模拟的液面分布变化过程相符.

表 1 氨在 20°C 下的物性参数
Table 1 Parameters of ammonia under 20°C

	density/(kg·m ⁻³)	viscosity/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	surface tension coefficients/(N·m ⁻¹)
ammonia-liquid	610	1.52 × 10 ⁻⁴	0.02099
ammonia-vapor	0.6894	1.01 × 10 ⁻⁵	

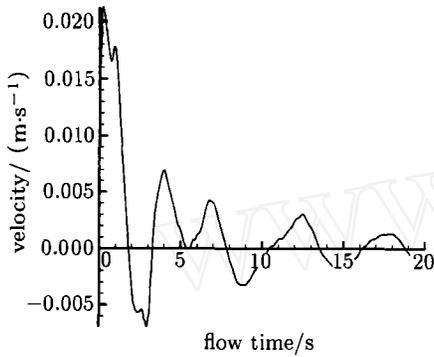


图 4 点 (0.048, -0.005) 垂直方向的速度
Fig.4 Vertical velocity at the point (0.048, -0.005)

程, 最终趋于稳定后的气液界面如图 6 所示.

毛细作用和重力的相对影响可以由无量纲数 Bond 数表示, 即

$$Bo = \Delta\rho g d^2 / \sigma.$$

其中, σ 为表面张力, d 为特征尺寸, $\Delta\rho$ 为两种流体相的密度差, g 为重力加速度.

随着 Bo 数的增大, 重力对液面的影响提高, 液面形状向趋于地球上常规的气液界面即平面的方向发展.

在零重力环境下, 改变液体相对固壁浸润性, 即改变接触角大小, 数值模拟液面从初始时刻的平面自由释放到趋于稳定的过程, 最终趋于稳定后的气液界面如图 7 所示.

随着接触角的增大, 即液体相对于固壁浸润性的减弱, 液体沿固壁向上爬升的能力降低. 所以如果在初始气液分布状况为液相端远离出口时, 较大的接触角有利于防止液相推进剂覆盖贮箱出口, 所以在实际应用中可以在贮箱内部壁面的出口附近喷涂如氟塑料之类的涂层, 以降低推进剂对固壁的浸润性, 达到有效控制液面位形, 防止液体流失的目的.

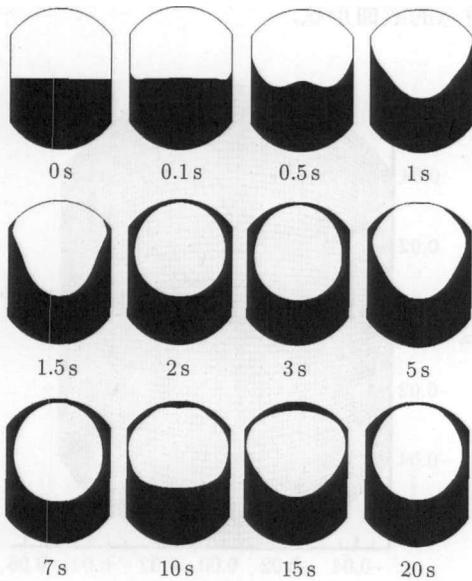


图 5 在零重力 10° 接触角下, 0~20 s 的液面变化过程
Fig.5 Transformation procedure of the liquid-vapor interface from 0~20s under the zero-gravity condition with contact angle of 10°

由以上结果可知, 在零重力环境, 浸润性较好的壁面条件下, 液体由于表面张力的作用, 沿着壁面爬升, 倾向于形成大球形气泡. 这样液体推进剂会覆盖贮箱出口, 当阀门打开时, 推进剂会以液态的形式喷出, 造成推进效率的降低.

在接触角取 10°, 改变重力加速度 g 时, 数值模拟液面从初始时刻的平面自由释放到趋于稳定的过

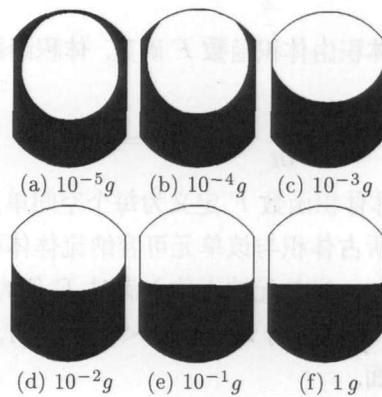


图 6 10° 接触角下不同重力加速度对应的稳态液面
Fig.6 Stable liquid-vapor interface under different gravity conditions with contact angle of 10°

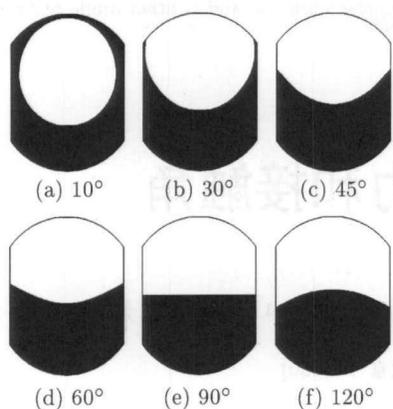


图7 零重力下不同接触角对应的稳态液面
Fig.7 Stable liquid-vapor interface under the zero-gravity condition with different contact angles

由以上数值模拟结果可知, 在 Bo 数比较大的情况下, 重力对气液位形分布起主导作用, 可以忽略表面张力的影响. 当在 Bo 数相对较小时, 即在微重力环境下, 由表面张力的作用, 气液界面与常规重力下有很大的差异, 液体与固壁间的浸润性即不同的接触角取值将决定气液形位的分布.

5 结论

用 VOF 方法数值模拟了贮箱内推进剂气液界面形位分布, 并给出了在不同重力加速度和接触角

下的一些计算结果. 在工程上, 利用数值仿真结合实验可以得出较完整的结论. 用数值仿真的方法可以考察贮箱内气液两相的运动状态, 分析推进系统能否在微重力状态下保证出口连续输送气体, 且尽可能防止液体覆盖出口情况. 结合相关的理论分析结果, 可为该液体管理方案的确定提供参考依据. 为与实际工况尽可能保持一致, 还需进行更详尽细致的仿真计算, 如考虑液体晃动及阀门开启, 推进系统处于工作状态, 推进剂高速蒸发等情况. 为了研究这些复杂的物理现象, 还要结合实验进行深入的理论研究.

参考文献

- [1] Gibbon D, Underwood C, Sweeting M, Amri R. Cost effective propulsion systems for small satellites using butane propellant. *Acta Astron.*, 2002, **51**:145~152
- [2] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, 1981, **39**:201~225
- [3] Sussman M, Smereka P, Osher S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *J. Comput. Phys.*, 1994, **114**:146~154
- [4] Stark J A, Bradshaw R D, Blatt M H. Low-g Fluid Behavior Technology Summaries. NASA-CR-134746, 1974
- [5] Dodge F T. Further Studies of Propellant Sloshing Under Low Gravity Conditions. NASA-CR-119892, 1971