

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*

李京浩^{1,2}, 陈小前¹, 黄奕勇¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073;
2. 91550 部队 91 分队, 辽宁 大连 116000)

摘要:分析了在微重力环境下,板式表面张力贮箱内推进剂的流动和定位过程。利用VOF方法对贮箱内推进剂的重定位过程进行了仿真计算,验证了贮箱及PMD的推进剂管理性能。用数学方法分析了液体在导流板的内角流动,用解析计算的方法求出流动过程中液面的长度,并和仿真计算结果进行了对比。因为实际的贮箱模型比较复杂,仿真计算结果和理论计算结果存在一定的误差,但其流动趋势保持一致。本文的工作能够为内角流动的研究提供有益的参考。

关键词:微重力;内角流动;板式表面张力贮箱;VOF方法;解析计算

中图分类号:V421 **文献标志码:**A **文章编号:**1011-2486(2012)04-0018-04

A study of propellant flow in the vane-type surface tension tank based on interior corner flow

LI Jinghao^{1,2}, CHEN Xiaolian¹, HUANG Yiyong¹

(1. College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Subunit 91, Unit 91550 of People's Liberation Army, Dalian 116000, China)

Abstract: The flow and distribution of propellant in the vane-type surface tension tank in microgravity condition was studied. The rewetting process of propellant in tank was calculated by numerical simulation using VOF method, and the liquid management capability of the tank and PMD was tested. The interior corner flow of propellant along the PMD was investigated by analytical solutions, and the length of the meniscus in the tank was calculated, and the results were compared with the numerical simulation results. Inevitably, errors were noticed between numerical simulation and analytical solution due to the complication of the model of spherical tank with PMD, but they were in accordance with the tendency of the flow. The present research can provide useful reference for the study of interior corner flow.

Key words: microgravity; vane-type surface tension tank; interior corner flow; VOF method; analytical solution

目前卫星上普遍采用表面张力贮箱作为推进剂管理装置,而近几年在轨服务技术的发展,为卫星贮箱提出了更高的要求。表面张力贮箱不仅要满足卫星供给燃料的需求,还要在推进剂加注过程中对推进剂进行有效管理。新型的板式表面张力贮箱就是在这种需求下诞生的,和筛网式表面张力贮箱相比,它的推进剂管理能力更强,结构更加坚固,质量更轻,寿命也 longer。

板式表面张力贮箱的主要驱动力是导流板之间的内角流动。在表面张力作用下,推进剂沿着两个导流板之间以及导流板和贮箱壁之间的夹角做毛细流动。板式表面张力贮箱和筛网式表面张力贮箱不同,不能在地面进行实验验证,只能在微重力环境下进行实验。因此,仿真计算是研究板式表面张力贮箱的重要手段。在满足一定的流动

条件时,可以对内角流动进行解析计算,求出液面的形状及流量等参数。目前国外对板式表面张力贮箱及内角流动已经有了深入的研究,而国内这方面研究还比较少。

针对板式表面张力贮箱的研究,本文建立了内角流动计算模型,利用解析计算方法对推进剂流动过程中的内角流动进行了计算和分析,并利用VOF^[1]方法对贮箱内的推进剂流动过程进行了仿真计算,得出了微重力环境下贮箱内的推进剂分布和气液分界面的形状。通过对比,理论计算结果虽然存在一定误差,但还是可以用来分析复杂结构的板式表面张力贮箱内的推进剂流动过程,能够为板式表面张力贮箱的设计提供有益的参考。

* 收稿日期:2011-12-02

基金项目:国家863计划资助项目

作者简介:李京浩(1980—),男,吉林延吉人,博士研究生,E-mail: jinghao0728@hotmail.com;

陈小前(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: chenxiaolian@nudt.edu.cn

1 内角流动计算

在微重力环境下,要想对液体的流动进行精确计算是非常困难的。因此在内角流动的计算中,常用的方法是把流动简化成垂直于 XY 平面的横向流动,进而对 $N-S$ 方程进行近似和简化。利用近似方法对流动方程进行转换和求解,可以得到各种流动状态下液面的近似解析解^[2]。下面简单介绍柱状容器内的毛细流动过程的计算方法。

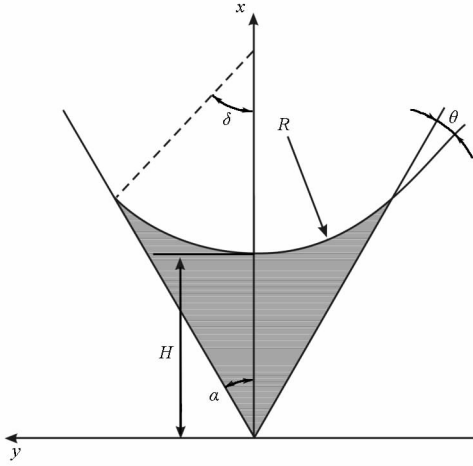


图1 内角流动过程中液面的截面视图

Fig.1 Sectional view of the meniscus at interior corner flow

首先,在流动方向的截面,即 XY 平面内求出弯曲液面的曲率及曲率半径^[3-4]。通过三角函数计算可得

$$f = \frac{R}{h} = \frac{\sin\alpha}{\cos\theta - \sin\alpha} \quad (1)$$

其中:

f ——液面的曲率;

α ——二分之一夹角;

θ ——液体与固壁的接触角。

在一个柱状容器内,同一高度横截面内的几个内角其液面的曲率半径的大小都是相同的,求解公式为

$$R = \frac{P_w \cos\theta}{2 \sum} \left[1 - \left(1 - \frac{4A \sum}{P_w^2 \cos^2\theta} \right)^{1/2} \right] \quad (2)$$

这里 A 是容器截面积, P_w 是容器横截面的周长, $\sum = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n k_j F_{Anj}$, k_j 表示每个夹角包含的半个液面个数,比如一个包含完整液面的夹角, $k_j = 2$ 。

F_{An} 是 α 和 θ 的函数,可由下式求得:

$$F_{An} = \cos\theta \cos(\alpha + \theta) / \sin\alpha - \frac{\pi}{2} + \alpha + \theta \quad (3)$$

得出液面的曲率及曲率半径以后,就可以求出毛细流动过程中液面的特征高度 H 。在毛细上升流动过程中初始液面,即 $z=0$ 处的液面高度 H

是保持不变的^[5]。

特征高度 H 是毛细流动过程中的一个重要参数,通过它可以进一步求解液面的形状、流量等参数。

通过对 $N-S$ 方程进行简化可得出^[11]

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \sin^2\alpha \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \cos^2\alpha \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (4)$$

在初始流动截面上,根据 z 方向的连续性方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} = - \frac{\partial \dot{Q}}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial z} (A \langle w \rangle) \quad (5)$$

式中 A 是液面的截面积,

$$A = F_A h^2 \quad (6)$$

\dot{Q} 表示流过该截面的流量, $\langle w \rangle$ 表示液体流过截面的平均流速。

对式(4)进行数值求解,可得出平均流速

$$\langle w \rangle = - F_i h^2 \frac{\partial P}{\partial z} = - F_i \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (7)$$

其中, F_i 是 α 和 δ 的弱函数,可利用数值方法进行求解。

将式(7)代入式(5)可得出

$$2 \frac{\partial h}{\partial t} = F_i \left(2 \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

引入一个时间参数 $\tau = F_i t / 2$, 式(8)可转化为

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = 2 \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 + h \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad (9)$$

通过引入几个近似函数及变量可以把偏微分方程转化为几个常微分方程进行求解,令

$$h = C_1 \tau^a F(\eta), \eta = C_2 z \tau^b, L = z_{tip} = \eta_{tip} C_2^{-1} \tau^{-b} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),可得

$$FF_{\eta\eta} + 2F_{\eta}^2 - \frac{\tau^{-1-a-2b}}{C_1 C_2^2} (aF + b\eta F_{\eta}) = 0 \quad (11)$$

通过对式(11)进行求解,可以求出在内角流动过程中液体流动距离 L_{tip} 以及流过初始截面的流量。

$$L_{tip} = \eta_{tip} (2\tau)^{1/2} = 1.702 G^{1/2} H^{1/2} t^{1/2} \quad (12)$$

$$\dot{Q} = A \langle w \rangle = A (-F_i h_z) = 0.349 F_A H^{5/2} (G)^{1/2} t^{-1/2} \quad (13)$$

其中

$$G = \frac{\sigma F_i \sin^2 \alpha}{\mu f} \quad (14)$$

$$F_A = f^2 F_{An} \quad (15)$$

2 贮箱内推进剂流动过程仿真

2.1 推进剂定位过程仿真

本文建立了一种具有内外导流板结构的板式表面张力贮箱及 PMD (Propellant Management Device) 模型。图 2 是贮箱及 PMD 模型的结构图。

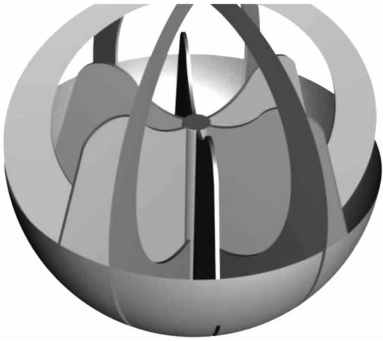


图 2 贮箱及 PMD 结构图

Fig. 2 The model of tank with PMD

贮箱采用球形贮箱,直径为 400mm。内外导流板都固定在贮箱中间的固定杆上,且外侧导流板和贮箱壁相连。内侧导流板固定杆连接处与杆同高,顶部形状由两个平滑曲线组成,底部有一部分和贮箱壁相连。外侧导流板底部最宽,然后逐渐变窄,顶部的宽度最小,这种设计符合内角流动中液面的形状。

本文采用 VOF 方法进行仿真计算,VOF 方法是一种求解气液两相流动和自由表面流动的算法。它最早是由美国 Los Alamos 科学实验室开发,该方法通过引入流体体积组分函数及其控制方程来表示混合流体的密度,并跟踪气液分界面的位置。利用 VOF 方法可以很好地处理贮箱内的气液两相流流动及气液分界面问题,进而确定贮箱内推进剂的流动及分布情况。

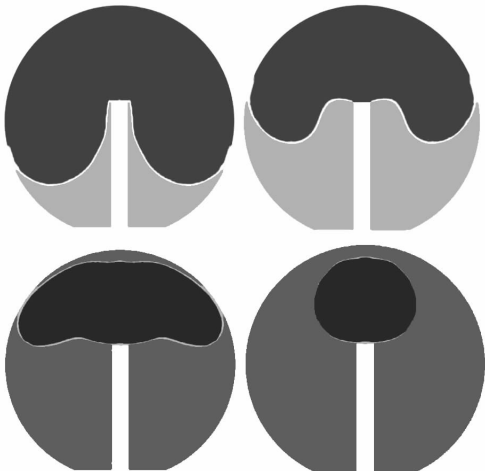


图 3 推进剂加注过程示意图

Fig. 3 The propellant filling in the tank

图 3 是加注过程中贮箱内推进剂流动过程示意图,贮箱内推进剂加注量可达到 90% 以上。

本文还对贮箱内的剩余推进剂的定位情况进行了仿真。在空间微重力环境下,对推进剂流动起主导作用的是表面张力。另外,由卫星的加速度变化引起的惯性力对推进剂的分布有很大影响。为了检验 PMD 的推进剂管理性能,假设贮箱内剩余 20% 的推进剂,并在惯性力的作用下全部流到了贮箱上部。然后计算了推进剂在 PMD 的作用下的重新定位过程。

图 4 是在定位过程中,贮箱内的推进剂流动过程示意图。推进剂沿着外侧导流板和贮箱壁之间的夹角向下流动。图 4(b) 中虚线表示的是图 4(a) 中的初始液面的高度,此时 $L(t)$ 表示内角流动过程中液面的长度。推进剂流到贮箱底部以后会在内侧导流板的作用下向上流动,最后推进剂在贮箱内形成如图 4(d) 所示的相对比较稳定的液面。

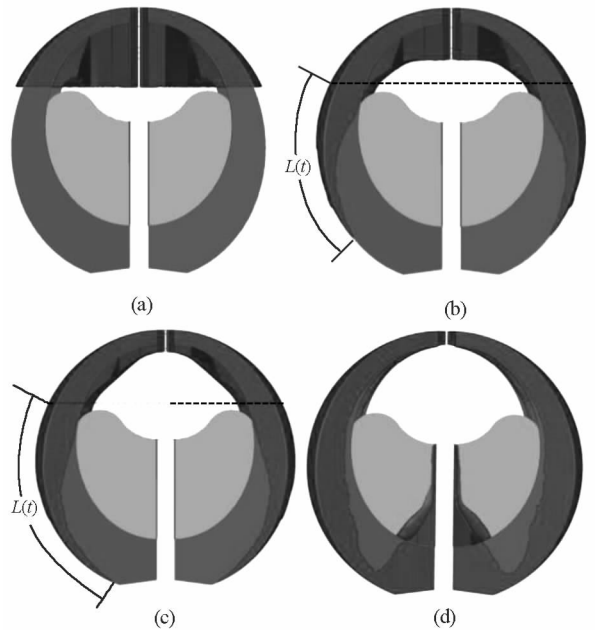


图 4 推进剂重新定位过程示意图

Fig. 4 The rewetting process of propellant in the tank

2.2 定位过程中的内角流动

上节介绍的内角流动的计算方法是对流动模型和边界条件提出很多假设的条件下得出的近似的计算方法。而本文采用的板式表面张力贮箱是球形,且导流板的结构比较复杂,因此贮箱内推进剂的流动严格来说不能满足内角流动的计算条件。而在图 4(b) 和图 4(c) 中,推进剂在流动到贮箱底部之前沿着外侧导流板和贮箱壁之间的夹角向下流动,虽然此时液体的流动轨迹不是直线,但还是可以利用内角流动的计算方法对其进行近

似计算,并对误差进行分析。

在流动刚开始的时候,因为贮箱体积比较大,液面受力不均匀,而且液体已经溢出了导流板的上沿,流动不能满足计算条件。所以在流动的初始阶段存在一些扰动及不确定因素,因此本文采集了流动开始 1s 以后的数据进行分析。

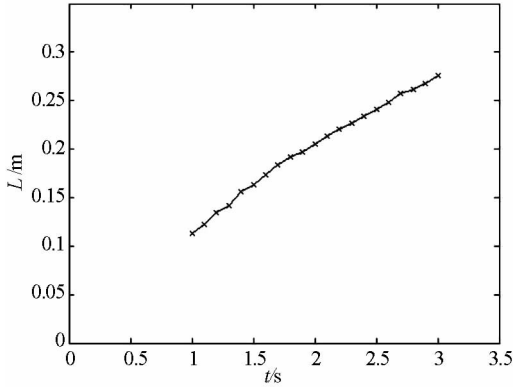


图5 重定位过程中液面长度 L 随时间的变化曲线

Fig. 5 Corner tip location L vs. t during rewetting

图5是仿真计算过程中液面长度 L 随时间的变化曲线。从式(12)可知,在内角流动过程中液面长度 L 的变化和时间 t 的平方根成正比。图6是液面长度 L 随时间 t 的平方根的变化曲线。虽然存在一定波动,但其轨迹总体上是一条直线,液面长度 L 和时间的关系式为 $L(t) = 0.223t^{1/2}$ 。

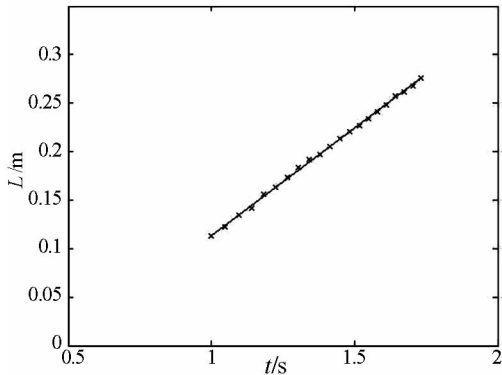


图6 重定位过程中液面长度 L 随时间平方根的变化曲线

Fig. 6 Corner tip location L vs. $t^{1/2}$ during rewetting

另外根据贮箱模型,本文利用式(12)对外侧导流板的内角流动进行了近似的解析计算,得出液面长度和时间的关系式为 $L(t) = 0.249t^{1/2}$ 。和仿真计算结果相比,误差超过了 10%。产生如此大的误差主要是如下原因引起的:

(1)给出的内角流动计算公式是用来计算简单的柱状容器内的毛细流动的,而贮箱结构是球形,且导流板的形状也不规则,因此贮箱模型不能

严格满足内角流动计算的假设条件。

(2)在流动的初始阶段,外侧导流板两侧的推进剂溢出了导流板的上沿并汇合在一起。此时的流动不符合内角流动计算的条件,因此对内角流动的计算产生了一定影响。

(3)因为模型比较大且结构复杂,在导流板边缘等地方网格模型的密度不够高。因此 VOF 方法在处理推进剂液面的形状的时候,其精度不够高。

虽然内角流动中液面的长度 L 的仿真结果和理论解存在不小的误差,但流动过程中的变化趋势还是满足内角流动方程。

3 结论

通过对板式表面张力贮箱内推进剂定位过程的仿真,很好地检验了板式 PMD 的推进剂管理性能。在仿真过程中本文还用数学方法对推进剂的内角流动进行了分析。因为目前内角流动的计算存在很多约束条件,仿真模型和理论结果存在一定误差,但总体趋势还是相同的。

通过研究得出,流动稳定以后,球形贮箱内的内角流动规律满足内角流动方程,因此在一定条件下,可以利用内角流动方程分析复杂结构贮箱内的内角流动过程。内角流动是板式表面张力贮箱的基础理论研究,是一项必须攻克和掌握的技术。虽然内角流动的研究目前还处于起步阶段,取得的成果也非常有限,但还是能够为板式表面张力贮箱的设计提供很多有益的指导。

参考文献 (References)

- [1] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Comput. Phys., 1981(1).
- [2] Weislogel M M, Liether S. Capillary Flow in an interior corner[J]. J. Fluid Mech. J. Fluid Mech., 1998, 373:349 - 378.
- [3] Weislogel M M. Some analytical tools for fluids management in space: isothermal capillary flows along interior corners [J]. Adv. Space Res., 32(2): 163 - 170, 2003.
- [4] Weislogel M M. Capillary flow in cylindrical containers of irregular polygonal section [R]. AIAA 2001 - 0765, 2000.
- [5] Weislogel M M. Capillary flow in containers of polygonal section: theory and experiment [R]. NASA/CR - 2001 - 210900, 2001.
- [6] David J, Timothy A. Vented tank resupply experiment—flight test results [R]. AIAA - 97 - 2815, 1997.
- [7] Collicott S H, Weislogel M M. Modeling of the operation of the VTRE propellant management device [R]. AIAA - 2002 - 4140, 2002.