

基于板式表面张力贮箱的落塔实验

张晨辉^{2,1}, 芮伟^{2,1}, 段俐¹, 李永强², 胡良¹, 康琦¹

(1.中国科学院力学研究所实验流体力学实验室, 北京海淀区 100190;

2.东北大学理学院应用力学研究所, 沈阳 110819)

摘要: 表面张力贮箱是世界上使用最为广泛的卫星推进剂贮箱, 在微重力环境下, 由于失去平衡, 液体就会自动沿着内角进行毛细爬升, 它利用表面张力进行液体输送和气液分离, 从而为发动机或推力器提供不夹气的推进剂。因此, 板式贮箱的内部结构设计必须符合微重力环境下的要求。本实验利用中国科学院力学研究所国家微重力实验的落塔设施提供的微重力条件完成的, 主要对四个方面进行探讨: 1) 导流板对贮箱内毛细爬升的影响; (2) 导流板和蓄液池的叶片数量对流体形态的影响; 3) 不同工质对毛细爬升的影响; 4) 研究接触角相同的情况下, 粘度对毛细爬升的影响。

关键词: 板式贮箱; 落塔; 接触角; 毛细爬升

0 引言

在航空航天中, 贮箱用来储存液体, 贮箱的结构直接影响到推进剂的供给, 而推进剂的正常供给可以为航空航天提供保障, 按不同的要求可以分为下面一些类型。

按飞行任务要求分: 小加速度; 不同加速度方向及组合; 惯性飞行^[1]。

按推进剂种类分: 常温推进剂; 低温推进剂。

按使用次数分: 一次性使用(卫星用); 重复使用(航天飞机用)。

按性能分: 部分管理式, 全管理式, 联通管理式。

按推进剂管理装置(PMD)的类型来分: 卫星推进剂贮箱可以分为自旋式贮箱、隔膜式贮箱和表

面张力贮箱^[2]。

其中, 自旋式贮箱是最早应用于卫星上的贮箱, 这类贮箱只能用于自旋卫星。目前, 自旋式卫星数量已经很少。隔膜式贮箱容积比较小, 橡胶隔膜与推进剂还存在相容性的问题。目前, 除了俄罗斯还一直使用这种贮箱之外, 其他国家在大中型卫星上已经很少使用该类型贮箱了。表面张力贮箱是世界上使用最为广泛的卫星推进剂贮箱, 它利用表面张力进行液体输送和气液分离, 从而为发动机或推力器提供不夹气的推进剂。

表面张力贮箱可以分为, 第一代表面张力贮箱和第二代表面张力贮箱。第一代表面张力贮箱是筛网式结构的, 这种贮箱的推进剂管理装置使用了众多毛细筛网, 利用液体在筛网上的表面张力, 通过

基金项目: 国家自然科学基金(11032011, 10972224)、三期创新方向性项目(KJ951-A1-0108)、载人航天项目。

作者简介: 张晨辉(1988-), 男, 山西省, 硕士研究生, 研究方向: 实验流体力学, E-mail: zhangchenhui2011@126.com

筛网来收集推进剂,并通过筛网阻止气体进入管路通道,为发动机或推力器提供不夹气的推进剂。该类型贮箱可以满足各种微重力加速度和流量的要求,并可以进行地面环境下的挤出效率试验。第二代表面张力贮箱是以板式结构为主的,尽量减少筛网的使用。它的工作原理是利用表面张力通过导流板来驱动推进剂。这种贮箱同样可以满足各种流量的要求,并适应于不同的微重力环境,尤其是微重力环境相对较低的大型卫星平台,并且克服了第一代表面张力贮箱的不足。第二代表面张力贮箱是目前国际上大型卫星推进剂贮箱的主流,已经成功应用于很多重要卫星平台,它代表了当今表面张力贮箱发展的方向。

在微重力环境下,重力水平极低甚至达到可以忽略的地步,重力作用基本消失,液体表面张力、内聚力等次级力占主要地位,所以处在微重力环境中的物体行为表现就会与地面上明显不同尤其是液体。微重力环境中与地面上液体的特性明显不同对空间流体(液体和气体)的贮存、控制以及传输都提出了新的挑战,使得空间流体管理成为载人航天和空间探索中广泛存在的重大应用技术之一。在空间中对液体行为进行有效控制的前提就是要研究微重力下液体的分布规律、界面形貌以及流动行为等问题。比如,如何保证让进入航天发动机的燃料中无气泡。

为了研究这些规律,人们提供了很多的方法,其中包括,做抛物线的飞机、落塔(井)、绕地卫星、空间实验室及空间站等等,由于空间飞行实验的高耗资和机会少,费用低、实验机会多、使用频率高的落塔(井)成为了研究微重力科学实验不可

替代的一部分,本文中的实验是利用中国科学院力学研究所国家微重力实验的落塔设施提供的微重力条件完成的。

1 落塔实验

1.1 试验平台简介

下面给出研究表面张力贮箱内毛细爬升现象的落塔实验平台,从上往下依次是实验装置层1,实验装置层2,电池层,电池层负责整套系统的供电,实验装置层由贮箱毛细爬升液池、照明装置、图像采集器以及监控设备等组成。

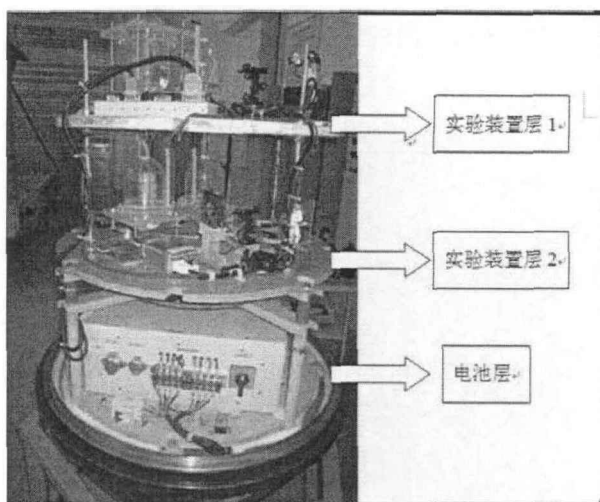


图1 试验平台

Fig. 1 The test platform

1.2 实验工质

在此实验中,我用到的1.5cs,5cs,10cs,去离子水(DI-water),乙二醇。下面给出了这些工质的参数,其中,表面张力系数和静态接触角都是在室温情况下利用全自动高温光学表面张力接触角仪测得的。

表1 液体物理特性

Table 1 Properties of the liquid

σ /(N/m $\times 10^{-3}$)	ρ /(kg. m^{-3})	μ /(pa. s $\times 10^{-3}$)	ν /(mm ² / s)	θ_{stat}	
1.5cs	17.7	0.852	1.278	1.5	0

5cs	18.50	0.915	4.575	5	0
10cs	19.32	0.935	9.350	10	0
DI-water	72.07	0.9982	1.005	1.0068	85.66
EG	46.76	1.1155	20.98	18.80771	62.93

2 实验结果分析

表面张力贮箱微重力落塔实验中，每次均对四组贮箱模型进行了实时的观测记录和图像采集，最终获得了不同工况和不同贮箱模型的微重力水平时的液体形位记录数据，采集液体的前缘位置数据并将实验数据分类进行下面几个方面的对比分析。

2.1 PMD 对贮箱内部液体的影响。

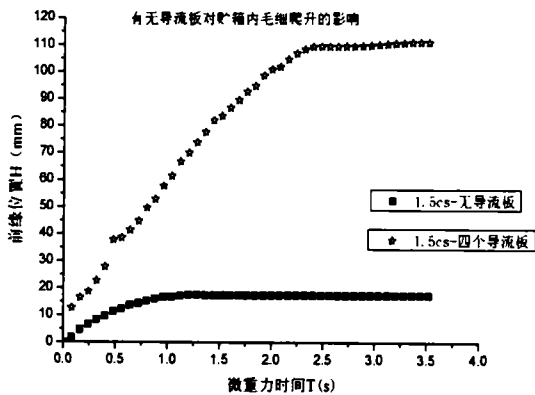


图 2 PMD 的影响

Fig. 2 The effect of PMD

从图中我们可以清楚的看出没有导流板的贮箱内的液体最终爬升高度是 17.3913mm，而有导流板的贮箱内的液体最终爬升高度是 110.7343mm，在相同的时间内，有导流板的贮箱内的液体把贮箱的出液口淹没，并将气体包裹在中间，形成一个大气泡，这样贮箱就可以为发动机提供不夹气的液体，提高效率。

2.2 PMD 数量对贮箱内部液体的影响。

为此，将贮箱内部结构进行改造，分别安装 4

个、6 个、8 个导流板，以下是这三种情况下液体前缘高度随时间的变化。

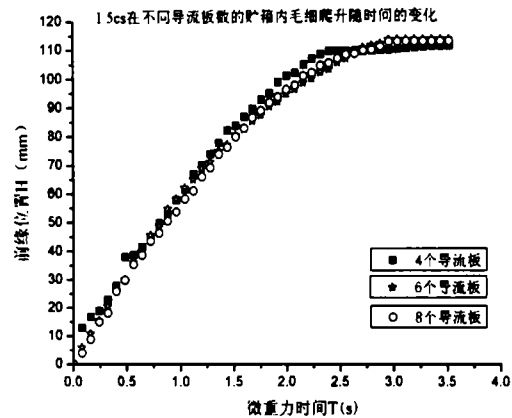


图 3 PMD 数量的影响

Fig. 3 The effect of quantity PMD

由上图可知，三种工况下，实验液体均爬升到出液口，将其全部覆盖，并且爬升过程中的速度几乎相同，这样，可以说明 PMD 数量不会对贮箱内毛细爬升的前缘高度以及速度产生影响，所以在实际中的表面张力贮箱的制造中，为了满足经济性以及安全性的要求，最好采用 4 个导流板。

2.3 不同工质（接触角）对液体爬升的影响。

我选取实验工质是去离子水（DI-WATER），乙二醇（EG），10CS 落塔实验结果进行对比，以下是这三种情况下液体前缘高度随时间的变化。

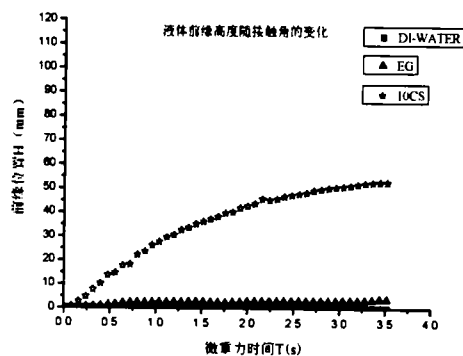


图 4 接触角的影响

Fig. 4 The effect of contact angle

从上图看出，随着接触角的变小，浸润性越来越好，液体沿着导流板爬升的高度也会越来越高。

2.4 接触角相同时，液体粘度对贮箱内毛细爬升的影响。

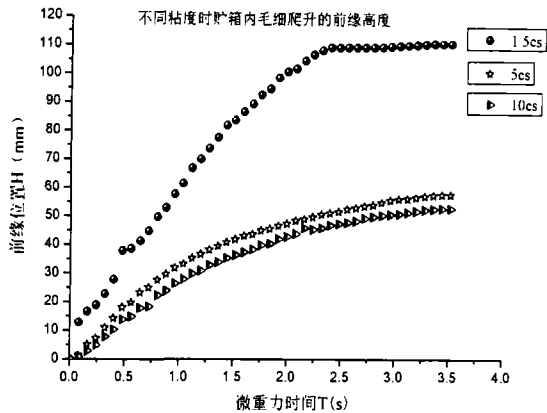


图 5 粘度的影响

Fig.5 The effect of viscosity

可以看出，相同时间内，在浸润性强的情况时，随着粘度的增大，贮箱内部液体爬升的前缘高度越来越低，粘度的增大阻碍了液体往上爬升的快慢。

2.5 蓄液器的叶片的数量对积液能力的影响。

下面给出一组装有 8 个叶片的蓄液池的贮箱内部液体在 0s、0.48s、0.96s、1.52s、2.08s、2.56s、3.04s、3.52s 时刻的液位分布图像。图中绿颜色的线代表液体与外壁的接触线，黄颜色的线代表液体液面中央线，红颜色的线代表液体与导流板的接触线。

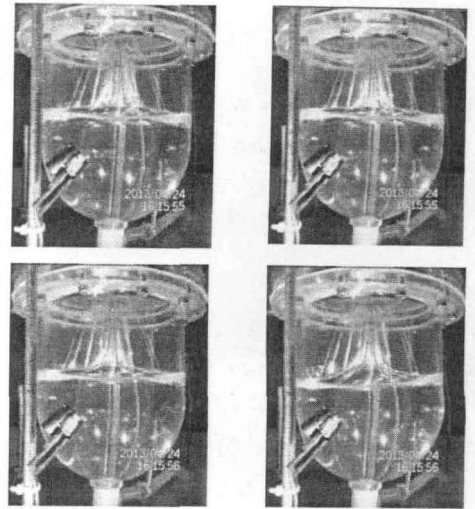
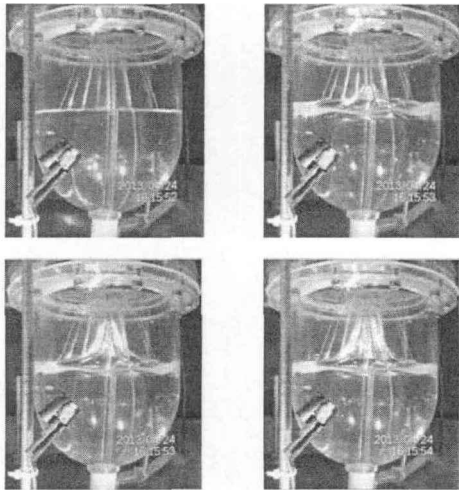


图 6 实验工质为 5cs (8 个蓄液池) 时，在 0s、0.48s、0.96s、1.52s、2.08s、2.56s、3.04s、3.52s 时刻的液位分布图

Fig.6 The Level distribution of 5cs at

0s、0.48s、0.96s、1.52s、2.08s、2.56s、3.04s、3.52s

研究表明，随着叶片数量的增多，液体爬升的高度以及速度明显提升，进而大大的增加了蓄液能力，可见在工程实际中应该在满足要求的情况下尽量增加叶片的密度，提高蓄液的效率。

3 结论

(1) PMD 可以加快毛细爬升的速度，更好更有效的为发动机提供不夹气的燃料。

(2) 可以说明 PMD 数量不会对贮箱内毛细爬升的前缘高度以及速度产生影响，为了满足经济性以及安全性的要求，最好采用 4 个导流板。

(3) 随着接触角的变小，浸润性越来越好，液体沿着导流板爬升的高度也会越来越高。

(4) 相同时间内，在浸润性强的情况时，随着粘度的增大，贮箱内部液体爬升的前缘高度越来越低，粘度的增大阻碍了液体往上爬升的快慢。

(5) 随着叶片数量的增多，液体爬升的高度以及速度明显提升，进而大大的增加了蓄液能力。

4 参考文献

[1] 李治. 卫星用表面张力贮箱设计研究[D]. 国防科学技术大学研究

生院, 2002.1-64.

[2] 李永, 潘海林, 魏延明. 第二代表面张力贮箱的研究与应用进展. 宇航学报, 2007-3, 28 (2): 504-507

The tower drop experiments based on the vane type surface tension tank

ZHANG ChenHui^{2,1}, RUI Wei^{2,1}, DUAN Li¹, LI YongQiang², HU Liang¹, KANG Qi¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Institute of Applied Mechanics, College of Science, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The vane type surface tension tank is most widely used as the satellite liquid propellant tank. The capillary flow caused by surface tension under microgravity environment would happen at interior corners and then the vane type propellant management devices (PMDs) transport liquid propellants to provide propellants without gas for engines or thrusters. So, careful structure design is necessary to meet the performance requirement under microgravity environment. Effects of PMDs, numbers of PMDs and sponges, contact angle, and liquid viscosity on the flow are studied by National Microgravity Laboratory drop tower equipment.

Key words: vane type surface tension tank; drop tower; contact angle; capillary flow