

GAO Yuan, CHEN Xiaoliang, LIU Qiusheng. Double-channel experimental device used under microgravity for in-orbit fluid transport in space (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 590-594. DOI:10.11728/cjss2016.04.590

空间在轨流体输运双槽道微重力实验装置^{*}

高源 陈小亮 刘秋生

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 空间在轨流体输运双槽道微重力实验装置通过在微重力环境下对开口槽道中的流动进行观察, 可以分析研究微重力下流体输运的稳定特性. 双槽道形式的实验装置在单次实验中可同时两种不同截面, 不同流量的槽道流动进行观测, 同时可有效提升落塔实验效率, 减少不同槽道对比实验中的不确定因素. 针对双槽道流体实验装置设计的关键问题, 例如密封、压力补偿、设备布局等, 提出了实验装置的系统结构及落塔实验步骤. 在落塔短时微重力环境中, 采用氟化液 (HFE7500) 流体介质, 利用本实验装置成功观测到槽道流体输运流动与失稳现象.

关键词 毛细流动, 开口槽道, 双槽道, 落塔

中图分类号 V 524

Double-channel Experimental Device Used under Microgravity for in-orbit Fluid Transport in Space

GAO Yuan CHEN Xiaoliang LIU Qiusheng

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*)

Abstract Double-channel experimental device used under microgravity for in-orbit fluid transport in space is designed. The device is used to observe the flow in open capillary channel under microgravity, and then the steady characteristic of flow transport is studied. The device with double-channel can observe the flow that has two kinds of sections and flow rate in single experiment. The double-channel device can improve the experimental efficiency and reduce uncertainty in contrast experiment. The key technology and difficulties of the design, such as sealing property and pressure compensation, are also discussed. The device system and experimental step are also presented. In microgravity conditions provided by drop tower, by using HFE7500 as fluid medium, the unsteady flow and steady flow are observed by the double-channel device.

Key words Capillary flow, Open capillary channel, Double-channel, Drop tower

* 国家自然科学基金项目 (11532015) 和国家高技术研究发展计划项目 (2014AA7045038) 共同资助

2015-11-10 收到原稿, 2016-04-07 收到修定稿

E-mail: liu@imech.ac.cn

0 引言

空间在轨流体管理是航天领域的研究热点之一, 涉及航天器在轨加注、液压系统、冷却系统及推进系统的正常运行. 例如在微重力下卫星进行变轨等动作时, 燃料在燃料箱中的流动会由于惯性失稳, 进而卷入气泡, 影响燃料输运.

2004 年德国不莱梅大学使用 4.7s 微重力时间的落塔^[1], 在微重力环境下对开口槽道流动的临界流量展开研究. 该落塔可使用多种液体进行实验. 随后的 Texus 探空火箭项目^[2] 将微重力时间延长至 6 min, 研制了可添加气泡扰动的实验装置, 近期在国际空间站 (ISS) 进行了更长时间的空间实验^[3-4], 实验装置在实验的精度与流量范围上均有较大提升.

本文提出的实验装置以中国科学院微重力落塔设备为平台, 具有与上述实验装置相同的流体输运实验研究基本功能. 区别在于本装置采用双槽道的形式, 即通过安装两个测试槽道, 可实现两组不同流道参数和不同流量的同时实验, 能够在提高实验效率的同时, 减少对比实验的不确定因素.

1 实验研究内容

研制该实验装置的目的是为非对称开口槽道流动的稳定性^[5] 提供实验依据. 实验模型如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 当液体沿 x 轴方向从入口流至出口时, 在流道的开口边形成弯曲的自由液面. 流速由外置的泵提供动力, 且仿照实际加注推进剂的过程, 以稳定流速 Q 从入口端流向出口端. 流道周围气体压力单位为 Pa. 假设液体是绝热且不可压的层流流动, 忽略流动沿 y 及 z 方向的流速, 同时假设沿流动方向的液体润湿面积变化足够小, 则可认为流动是沿 x 轴方向的一维流动. 液体的常物性参数包括动力粘

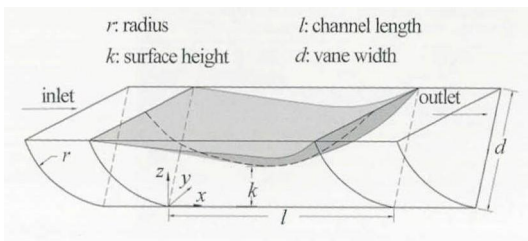


图 1 不对称内角流动模型

Fig. 1 Flow model with asymmetric inner angle

度 ν , 表面张力 σ 以及密度 ρ . 假设液体与固体壁面的接触角为 γ , 忽略接触角粘滞效应^[6-9].

实验使用工质为 HFE7500, 其物性参数列于表 1. 流道如图 2 所示, 分为对称与非对称两种, 具体参数见表 2.

实验在中国科学院微重力落塔内进行. 该落塔有效落高 63.7m, 微重力时间 3.6s, 最小可通过双舱创造 $10^{-5}g$ 的微重力环境. 降落结束时落舱通过回收网进行回收, 实现落舱软着陆, 保护舱内实验装置. 落塔要求装置可承受 21g 的过载. 受落舱空间限制, 装置只可在直径 550mm 的圆盘上布局. 并且在采用双层布局模式时, 单层高度应小于 300mm.

表 1 HFE7500 物性参数

Table 1 Physical properties of HFE7500

实验工质	HFE7500 (21°)
表面张力/($g \cdot s^{-2}$)	16.2
密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.62
运动粘性系数/($cm^2 \cdot s^{-1}$)	7.9×10^{-3}
固壁接触角/(°)	0

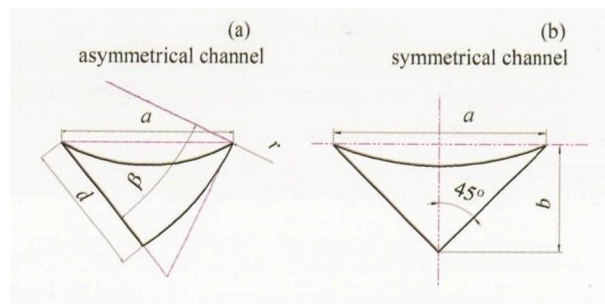


图 2 流道截面

Fig. 2 Sections of two channels

表 2 流道几何尺寸参数

Table 2 Geometry parameters of two channels

	流道 1	流道 2
宽度 d /mm	20	--
宽度 a /mm	--	32.43
圆弧半径 r /mm	47.32	--
高度 b /mm	--	16.22
顶角 β /(°)	30	45
流道长 L /mm	30	30
截面积/ mm^2	263	263

2 实验装置设计

实验系统由储液箱 (LST)、蓄液池 (R)、流道过渡段 (ED)、实验段 (TC)、集液箱 (DC)、节流阀 (TV)、流量计 (FM) 和泵 (P)^[10] 组成, 如图 3 所示. 蓄液池上方的排气阀开口与大气连通, 落舱内环境压力为一个大气压, 蓄液池内液体压力近似等于环境压力.

实验液体从储液箱进入蓄液池, 再分别流入两个流道内. 通过流道过渡段加速液体, 在实验段用 CCD 相机记录其流动特性. 随后液体进入集液箱, 通过节流阀与流量计, 经由泵体回到蓄液池, 完成流动循环. 节流阀可调整回路流动速度. 工作原理如图 4 所示.

装置的数据采集系统由光源、反光镜 (M) 和高速 CCD 组成. 光源在两个实验流道中间产生背景光; CCD 经由反光镜观察实验段流动情况. 高速 CCD 拍摄速率为 $200 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$, 分辨率为 1280×1024 . 实验段光路和数据采集系统及实物外观如图 5 所示.

实验装置主体位于实验装置的上层板, 发光部分分为可见光源, 其两侧分别为对称流道与非对称流道, 流道两侧是通过反射镜来获得实验图像的 CCD 相机, 如图 6 所示. 实验开始后, 在给出微重力信号的同时, 相机通过设计好的光路开始采集图像. 流道上方的两个容器分别为储水箱与蓄液池, 通过手阀与

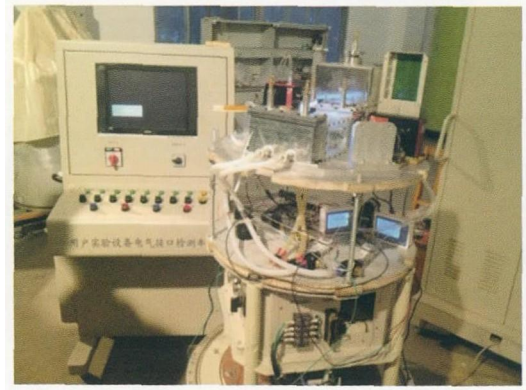


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental device on the fixing plate

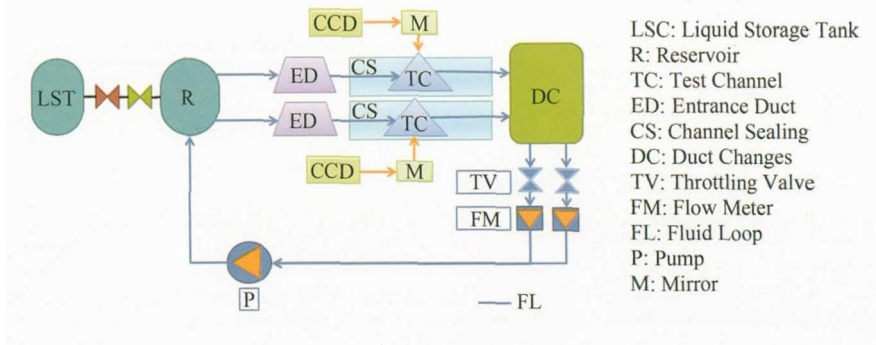


图 4 实验装置原理

Fig. 4 Principle of experimental device

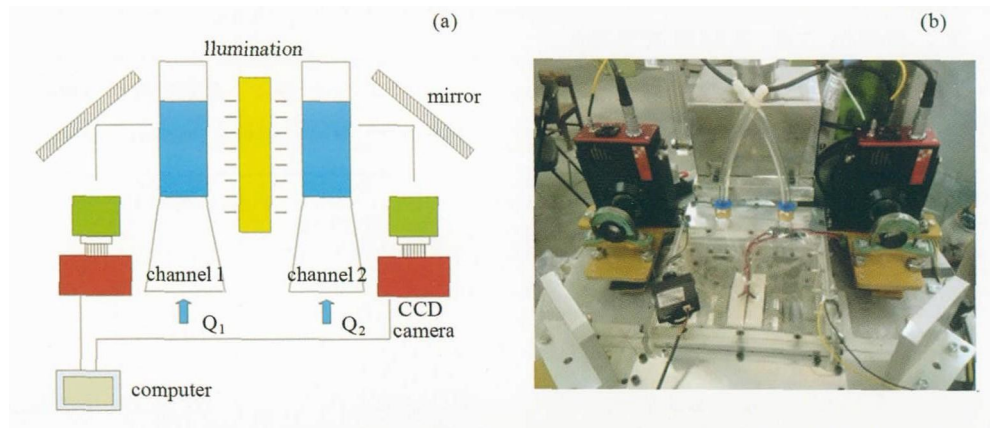


图 5 实验段光路和数据采集系统 (a) 及实物外观 (b)

Fig. 5 Light path and data collecting system (a) and photo of light path (b)

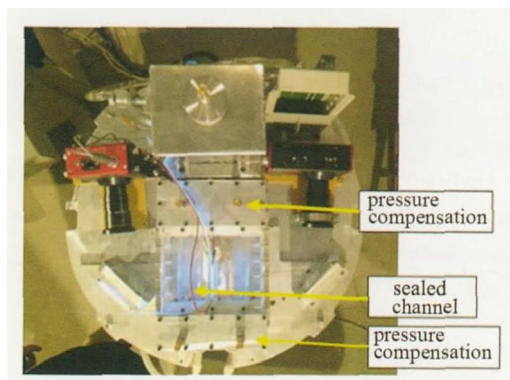


图 6 实验装置上层

Fig. 6 Upper plate of experimental device

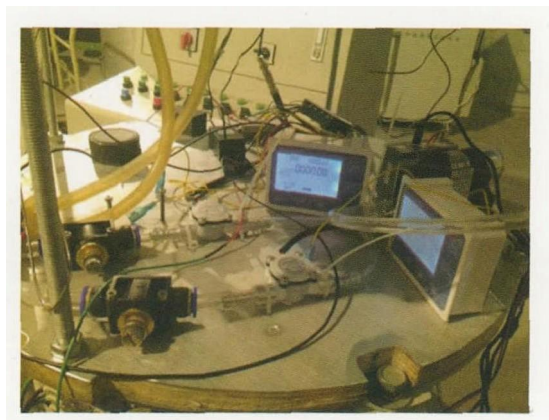


图 7 实验装置下层

Fig. 7 Lower plate of experimental device

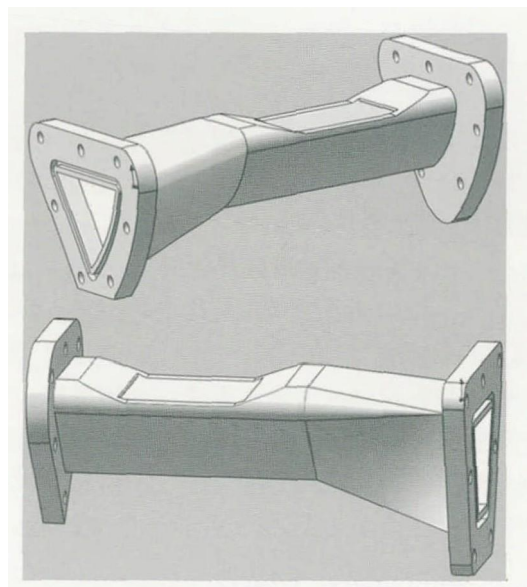


图 8 实验所用槽道

Fig. 8 Channels used in the experiment

电磁阀双重连接. 流道前调整段的主要功能是收缩流道, 通过选取合适的收缩比^[11-12], 可以使得液体在流动过程中更加稳定, 避免由于截面突变产生流动分离等情况.

实验装置的下层如图 7 所示, 包括节流阀, 流量计及泵体. 液体通过硅胶管流入到节流阀中进行流量调整, 再通过流量计具体测定其值, 最后由后方泵体将液体送回蓄液池中完成循环.

3 装置特点

这里所设计的实验装置特点在于双槽道, 如图 8 所示. 其特点是可用一次落塔实验完成两组不同截面形状与流量的探究实验, 或完成一组条件相似的对比实验. 双槽道装置尤其适合进行对比试验. 在对比实验中, 两个槽道内液体相同, 入口压强相同, 出口压强相近, 可对实验变量进行有效控制.

两个槽道共用一个蓄液池, 并且在蓄液池内处于

相同高度. 因此在有重力时, 入口压强相同, 而在微重力时, 可以通过蓄液池处的压力补偿特性来保持两个槽道压强相同, 确定入口条件.

双槽道型实验装置对设计布局要求较高, 如何有效利用落舱内空间来满足密封需求是最大的难点. 由于本次实验使用的工质为 HFE7500, 其是一种易挥发, 表面张力较小的液体, 因此更难密封. 实验所用槽道均为开口槽道, 因此在落塔用网回收装置时, 液体会从开口中溅射出来毁坏装置. 为满足密封性要求并充分利用空间, 在设计中将蓄液池和集液箱与流道连接面放大, 并在放大的边缘处用玻璃板连接两箱体, 将两槽道包围在其中, 使开口槽道在落塔回收过程中溅射出来的液体封闭在一个箱式空间内. 接口处利用 O 圈与法兰盘进行密封. 此外, 还需设计压力补偿功能, 防止蓄液池与集液箱压力过低干扰实验. 如图 6 所示, 蓄液池与集液箱始终通过两个阀门与大气相通, 通过确定入口处边界条件, 加快了微重力情况下两相界面的形成.

4 实验结果

该装置成功地在实验中观测到了流动的临界和超临界状态. 临界状态见文献 [13] 图 7 和图 8. 此时液面最低点在 x 方向不断振荡, 无向前发展趋势. 超临界状态见文献 [13] 图 11, 此时有气泡卷入流动, 液面最低点在 x 方向向前发展.

5 结论

对空间在轨流体输运双槽道流体微重力实验装置进行了研究,设计出一种可行的实验方法,验证了双槽道形式对于空间流体输运实验的可行性,观测到对称与非对称槽道的亚临界流态以及超临界流态.实验装置采用双槽道模式.其优点是能够提升实验效率,减少对比实验的不确定因素,缺点是对实验装置的布局与密封提出了更高要求.双槽道模式导致槽道垂向的可设计空间减少,与之相关的观测系统需要利用平面镜辅助设计光路.此外,双槽道模式导致需要密封的空间增大,因此需要特殊设计蓄液池与集液箱形成密闭空间来实现密封.

参考文献

- [1] ROSENDAHL U, OHLHOFF A, DREYER M. Choked flows in open capillary channels: theory, experiment and computations [J]. *J. Fluid Mech.*, 2004, **518**(7): 187-214
- [2] ROSENDAHL U, DREYER M. Design and performance of an experiment for the investigation of open capillary channel flows [J]. *Exp. Fluids*, 2007, **42**(5): 683-696
- [3] CANFIELD P J, BRONOWICKI P M, CHEN Y, *et al.* The capillary channel flow experiments on the International Space Station: experiment set-up and first results [J]. *Exp. Fluids*, 2013, **54**(5): 1-14
- [4] CONRATH M, CANFIELD P J, BRONOWICKI P M, *et al.* Capillary channel flow experiments aboard the International Space Station [J]. *Phys. Rev.: E*, 2013, **88**(6): 063009
- [5] TANG Y, CHEN X, HUANG Y. Capillary flow rate limitation in asymmetry open channel [J]. *Chin. J. Aeron.*, 2015, **28**(3): 720-728
- [6] BRONOWICKI P, CANFIELD P, GRAH A, *et al.* Free surfaces in open capillary channels—parallel plates [J]. *Phys. Fluids*, 2015, **27**(1): 012106
- [7] GRAH A, CANFIELD P J, BRONOWICKI P M, *et al.* Transient capillary channel flow stability [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2014, **26**(6): 385-396
- [8] ROSENDAHL U. Choked flows in open capillary channels [C]//34th COSPAR Scientific Assembly. Paris: COSPAR, 2002: 524
- [9] GRAH A, DREYER M E. Dynamic stability analysis for capillary channel flow: one-dimensional and three-dimensional computations and the equivalent steady state technique [J]. *Phys. Fluids*, 2010, **22**(1): 014101
- [10] WEI Yuexing. Research on the Flow in the Process of the Propellant Management in a Spacecraft Tank under Microgravity [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003 (魏月兴. 微重力条件下航天器贮箱推进剂管理过程中的流动特性研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013)
- [11] WU Ronglin. Wind Tunnel Designing Principle [M]. Beijing: Beihang University Press, 1985 (伍荣林. 风洞设计原理 [M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1985)
- [12] LI Guowen, XU Rangshu. Study of the performance of contractive curve for the wind tunnel [J]. *J. Exp. Fluid Mech.*, 2009, **23**(4): 73-77 (李国文, 徐让书. 风洞收缩段曲线气动性能研究 [J]. 实验流体力学, 2009, **23**(4): 73-77)
- [13] CHEN Xiaoliang, GAO Yuan, LIU Qiusheng. Drop tower experiment study of fluid transport with free surface in spacecraft [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(4): 542-546 (陈小亮, 高源, 刘秋生. 空间在轨流体输运稳定性落塔实验 [J]. 空间科学学报, 2016, **36**(4): 542-546)