

CHEN Xiaoliang, GAO Yuan, LIU Qiusheng. Drop tower experiment study of fluid transport with free surface in spacecraft (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, 36(4): 542-546. DOI:10.11728/cjss2016.04.542

# 空间在轨流体输运稳定性落塔实验<sup>\*</sup>

陈小亮 高源 刘秋生

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

**摘要** 空间流体管理是微重力流体科学的重要研究方向之一, 而有外力驱动的开口流道毛细流动界面稳定性研究是其重要的内容. 设计研制了一种微重力双流道流体输运实验装置, 采用的两个流道分别为截面相同的对称内角和非对称内角, 并有相同的开口长度, 在百米微重力落塔进行了 10 次双舱实验. 通过分析不同流量下的液面特性, 判定流动的类型, 将流动形态分为亚临界、临界和超临界三种, 确定了两个流道的临界流量, 并对两个流道毛细流动的特征进行了比较.

**关键词** 开口流道, 界面稳定性, 临界流量, 落塔实验

**中图分类号** V 524

## Drop Tower Experiment Study of Fluid Transport with Free Surface in Spacecraft

CHEN XiaoLiang GAO Yuan LIU Qiusheng

(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** With the development of the space industry, space liquid management become one of the important techniques in realizing in-orbit refueling of the spacecrafts, and free surface flow stability is the critical problem in this field. The experiment set-up is designed for microgravity fluid transport study with two channels. In the experiments, symmetrical channel and asymmetrical channel with identical open length for comparison are used, and 10 experiments in the drop tower of Chinese Academy of Sciences are performed. By analyzing the free surface characters, it is found that there exist three typical flow patterns: subcritical, supercritical and critical. Meanwhile, the critical flow rate is obtained. Finally, the free surface flow characteristics of two different channels are compared.

**Key words** Open channel, Capillary flow, Surface flow stability, Critical flow rate, Drop tower experiment

---

\* 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, 2016-05-26 收到修定稿  
通信作者刘秋生, E-mail: liu@imech.ac.cn

## 0 引言

航天器在轨加注技术的发展与应用对于提高航天器机动能力、延长航天器寿命和适应多样化任务需求具有重要意义。空间液体管理是实现航天器在轨加注的重要技术之一<sup>[1-2]</sup>。微重力环境下,以表面张力为主要作用力的液体流动具有许多区别于常重力环境下的特性,了解和掌握微重力环境下液体推进剂的流动规律,是确保推进剂在轨传输得以顺利进行的前提和基础。当从贮箱内排出推进剂时,为保持贮箱内推进剂处于气液分离状态,流体输运速率存在最大值限制。若流体输运速率超过临界值,将由于毛细压力不足以平衡界面上的气液压力差而导致液面失稳,气体卷入推进剂中,致使推进剂输运失败,这就是推进剂排液以及为推进器加注过程中存在的过流稳定性问题<sup>[3]</sup>,显然这对空间在轨航天器的安全以及长时间运行有至关重要的意义。此外,随着微纳器件的发展,微纳流体受到越来越多的关注,其中微纳流体的控制和输运也是其中的热点问题<sup>[4]</sup>。

文献[5-8]利用不莱梅微重力落塔、探空火箭和国际空间站的微重力实验条件,研究了平板流道、矩形流道及对称小夹角流道的输运特征和界面临界流动现象,确定了临界流量。在理论方面提出了一维流动模型<sup>[10-12,14]</sup>,并进行了三维数值模拟计算<sup>[8,13]</sup>,较好地验证了实验结果。

流体输运过程对空间流体管理至关重要。在航天器推进剂管理装置中实现连续、无气泡的流动输运,这不仅是空间流体管理技术中的难点,也是界面流动科学问题中的难题。流道截面几何形状对毛细流道流动具有决定性影响,因此本次实验重点研究了非对称大开角流道的临界流量以及流动特征,并与对称流道进行对比。另外,中国尚无空间站和探空火箭实验平台,本次实验可以验证中国科学院微重力落塔是否能够实现相关研究,这对中国空间微重力技术发展具有一定促进作用。

## 1 落塔实验

为研究不同流道的流动特性和临界流量,设计了微重力双流道流体输运装置,采用 HFE-7500 为实验液体工质,并设计了截面积相同的不对称内角流

道(流道 1)与对称内角流道(流道 2,如图 1 所示)。

实验系统由储液箱、蓄液池、流道过渡段、实验段、集液器、流量计、节流阀和泵组成。储液箱上方的补偿管与大气连通,实验开始时,实验液体从储液箱进入储液箱,分流进入两个流道内,待流道内充满液体后关闭电磁阀,同时开启齿轮泵,经调整段流入开口的实验段,最后进入两个集液器完成循环,开启齿轮泵经过几分钟待流动稳定且回路中没有气泡后,调整两个阀门并改变泵的转速,达到期望的实验工况。两个流道的流量值由流量计测得并显示,实验装置工作原理及实物分别如图 2 和图 3 所示。

实验光路和数据采集系统由两个反光镜、两个高速 CCD 及光源组成,高速 CCD 分辨率为  $1280 \times 1024$  pixels,拍摄频率为  $200 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$ ,数据存储于相机中,待实验舱回收打开后用计算机提取数据并存储。

## 2 实验结果分析

实验中可以通过是否有气泡卷入来判别一些流量下的流动,但是受限于 3.6s 的微重力时间,对于近临界和亚临界流动的判别不是十分清楚,所以选取微重力时间的最后 0.8s,液面弯曲已经形成并稳定存在,选取最低点的坐标研究流动状态,采用软件来读取最低点,先在图像上生成网格,然后选定基准坐标,最后选取最低点,对应于实际尺度的最小网格尺度约为 0.2mm,所以选取点的精度为 0.2mm。实验图片液面最低点的选取方法如图 4 所示。

对比静态对照零流量实验,并与其他实验组流动

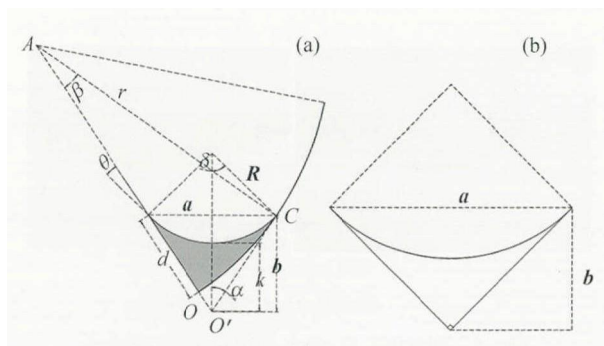


图 1 不对称内角流道 (a) 与对称内角流道 (b) 的几何示意  
Fig.1 Cross-sectional geometries of two capillary flow channels: asymmetrical channel (a); symmetrical channel (b)

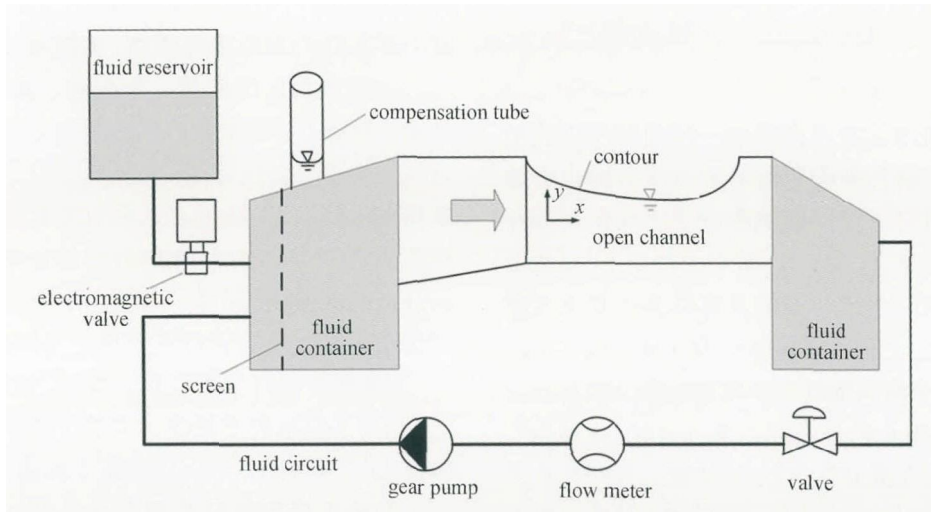


图 2 实验装置工作原理

Fig. 2 Principle of the experimental apparatus

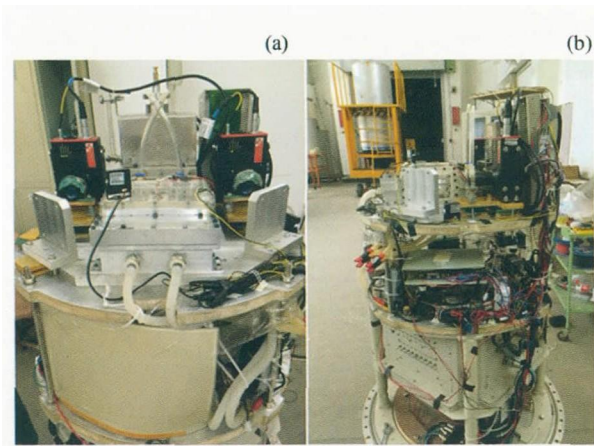


图 3 实验舱 (a) 和实验装置 (b) 实物

Fig. 3 Photographs of the drop capsule (a) and the experiment set-up (b)

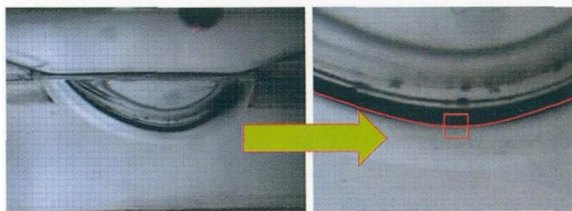


图 4 液面最低点选取方法

Fig. 4 Method to pick up the location of the lowest point of free surface

的液面最低点沿流向方向坐标变化曲线进行比较, 可以发现这里存在三种流动形态, 即亚临界、临界和超

临界流动。

无论是对称流道还是非对称流道, 在流量较小的情况下, 液面最低点在流动方向均存在振荡, 并无明显向前发展的趋势, 因此流动都是稳定的, 属于亚临界流动; 当流道中流量大于一定值时, 液面最低点在流向方向液面有持续向出口发展的趋势, 而且振荡效应微弱, 因此流动都是不稳定的, 属于超临界流动; 通过二分法设计临界流量并进行实验, 得到了介于亚临界与超临界之间的流动特性, 液面最低点在流向方向不仅存在振荡, 而且还有缓慢向出口发展的趋势, 这种流动应属于临界流动。此外, 对于两种流道, 选取实验中超临界流动最低流量和亚临界流动最高流量的实验结果作为对应流动的阈值, 并与实验最终确定的临界流动进行对比, 结果如图 5 和图 6 所示, 两个实验流道临界流量下的流动图像分别如图 7 和图 8 所示。

除探索流动在流动方向的特性外, 液面高度  $y$  方向上的特性反映了不同流道的差异, 液面最低点随时间下降的规律是, 对称流道比非对称流道液面下降快, 如图 9 所示。

如果流量继续增大, 超临界流动会呈现出更丰富的特征 (微重力时间在出口处鼓入气泡), 非对称流道在  $Q = 3.7 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$  的情况下, 液面最低点在流向 ( $x$  方向) 随时间呈近指数增长方式向出口发展, 对称流道相同, 如图 10 所示。

继续增大流量, 以非对称流道为例, 当  $Q = 5.3$

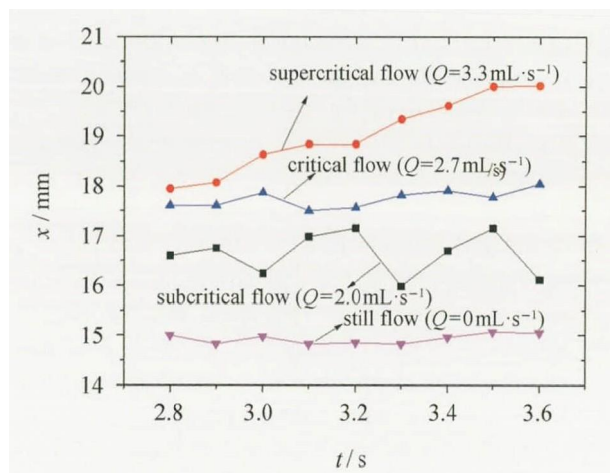


图 5 非对称渠道不同流量流动液面最低点坐标随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation of location of the lowest point of free surface during the microgravity time in  $x$  direction for asymmetrical channel

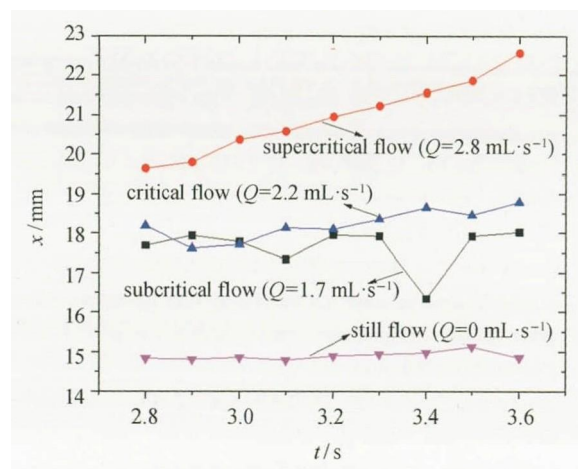


图 6 对称渠道不同流量流动液面最低点坐标随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation of location of the lowest point of free surface during the microgravity time in  $x$  direction for symmetrical channel

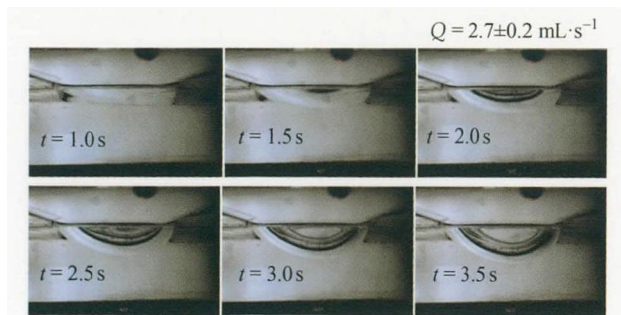


图 7 非对称渠道临界流量的流动实验结果

Fig. 7 Critical capillary flow in the asymmetrical channel. The flow direction is from left to right

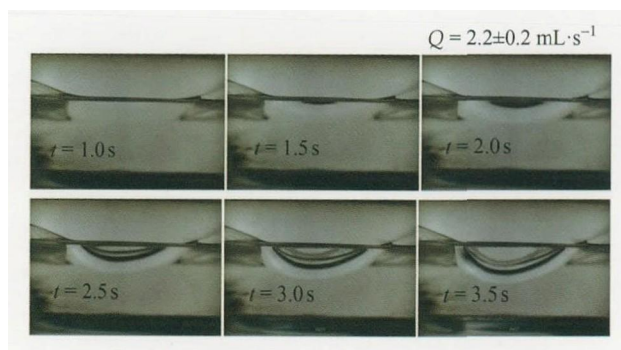


图 8 对称渠道临界流量的流动实验结果

Fig. 8 Critical capillary flow in the symmetrical channel. The flow direction is from right to left

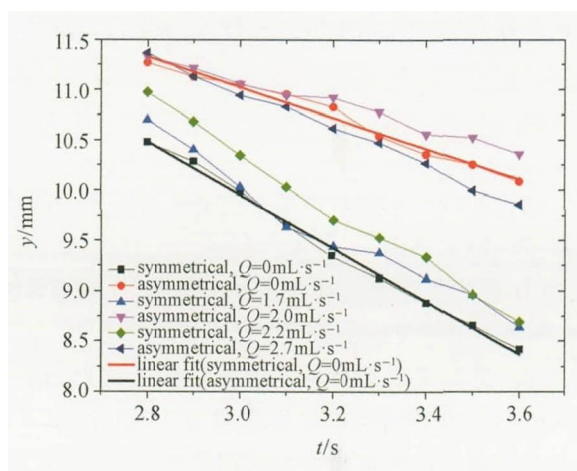


图 9  $y$  方向不同流量流动液面最低点坐标随时间的变化曲线

Fig. 9 Variation of the location of lowest points of free surface in  $y$  direction for two different channels

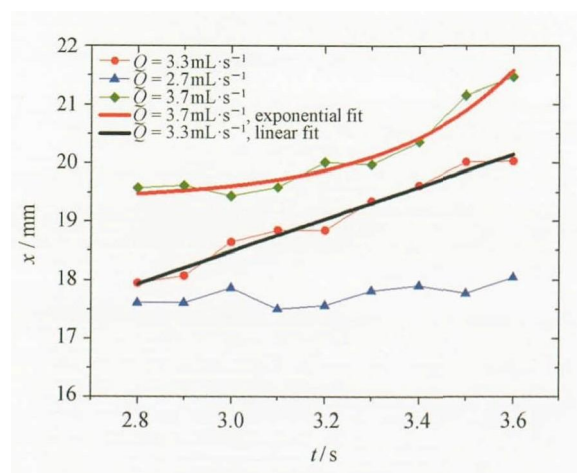


图 10 非对称渠道临界和超临界流动液面最低点坐标随时间的变化曲线

Fig. 10 Variation of the location of lowest points of free surface in  $x$  direction for the asymmetrical channel

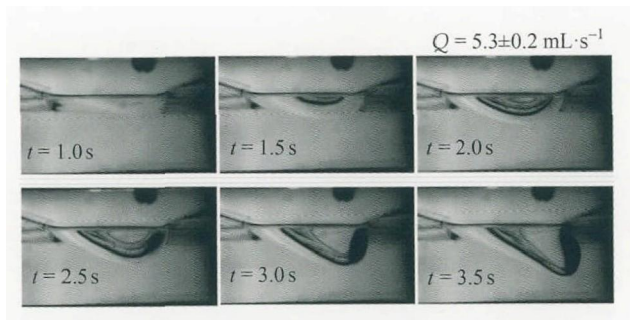


图 11 非对称流道超临界流量流动实验结果

Fig. 11 High-flow-rate flow in the asymmetrical channel direction is from left to right

$\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$ , 几乎是临界流量的两倍时, 在微重力时间内, 弯曲界面在流向发展形成气泡鼓入, 如图 11 所示.

### 3 结论

通过对两个不同流道毛细流动的落塔实验研究, 可以得到以下结论.

(1) 毛细流道流动存在三种流动形态: 超临界流动、临界流动和亚临界流动.

(2) 实验得到非对称流道的临界流量为  $2.7 \pm 0.2 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ , 对称流道的临界流量为  $2.2 \pm 0.2 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ , 非对称流道的临界流量大于对称流道.

(3) 由于流道截面的几何特性影响流动的流速分布和压力损失, 所以两种流道的临界流量存在差异.

### 参考文献

- [1] ROLLINS J R, GROVER R K, JAEKLE D E. Twenty-three years of surface tension propellant management system design, development, manufacture, test, and operation [J]. *AIAA J.*, 1985, **9**: 17-177
- [2] JAEKLE D E. Propellant management device conceptual design and analysis: Vanes [C]//27th Joint Propulsion Conference, Joint Propulsion Conferences. Sacramento: AIAA, 1991
- [3] ROSENDAHL U, OHLHOFF A, DREYER M E, *et al.* Investigation of forced liquid flows in open capillary channels [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2002, **4**: 53-60
- [4] HAEBERLE S, ZENGERLE R. Microfluidic platforms for lab-on-a-chip applications [J]. *Lab Chip*, 2007, **7**: 1094-1110
- [5] CONRATH M, CANFIELD P J, BRONOWICKI P M, *et al.* Capillary channel flow experiments aboard the international space station [J]. *Phys. Rev.*, 2013, **88**: 1-8
- [6] HAAKE D, ROSENDAHL U, OHLHOFF A, *et al.* Flow rate limitation in open capillary channel flows [J]. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 2006, **1077**(1): 443-458
- [7] KLATTE J. Capillary Flow and Collapse in Wedge-Shaped Channels. Bremen [D]. Bremen: University of Bremen, 2011
- [8] WEI Xingyue. Research on Flow Characteristics in the Process of Tank Propellant Management of Spacecraft under Microgravity Conditions [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013 (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)
- [9] ROSENDAHL U, OHLHOFF A, DREYER M E. Choked flows in open capillary channels: Theory, experiment and computations [J]. *J. Fluid Mech.*, 2004, **518**: 187-214
- [10] ROSENDAHL U, GRAH A, DREYER M E. Convective dominated flows in open capillary channels [J]. *Phys. Fluids*, 2010, **22**: 1-13
- [11] 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**: 1-14
- [12] HAAKE D, KLATTE J, GRAH A, *et al.* Flow rate limitation of steady convective dominated open capillary channel flows through a groove [J]. *Microgravity Sci. Technol.*, 2010, **22**: 129-138
- [13] 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**: 1-11
- [14] BRONOWICKI P, CANFIELD P, GRAH A, DREYER M. Free surfaces in open capillary channels-parallel plates [J]. *Phys. Fluids*, 2015, **27**: 1-21