

文章编号: 1672-9897(2008)02-0074-06

微重力下容器圆形倒角处的毛细驱动流

侯瑞,段俐,胡良,康琦

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室,北京 100190)

摘要:空间探索计划的需求对空间流体管理技术提出了新的挑战。流体管理设备的内角是主要的流体传输“管道”,因此研究微重力下容器内角处的毛细驱动流具有重要的意义。由于设计和制造等原因,完美的尖角并不常见,而是带有一定圆角过渡的内角。笔者设计不同的带有圆形过渡内角的容器,选用10cSt硅油为实验流体介质,通过一系列的落塔实验,研究了容器内角处不同的圆角半径对毛细驱动流的影响,并分析得到了有价值的实验规律。

关键词:微重力;流体管理;圆形内角;毛细驱动流

中图分类号:TP393 **文献标识码:**A

Capillary-driven flows along rounded interior corners in microgravity

HOU Rui, DUAN Li, HU Liang, KANG Qi

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

Abstract: Fluid management in space is facing new challenges because of the requirements of space exploration. It is crucial to investigate the capillary driven flows in vessel's interior corners as the fluid management devices' corners provide the main conduits for the transfer of fluids. In many instances, the interior corners are not perfectly sharp but rather possess a degree of roundedness due to the design or fabrication. In this work, different containers with rounded interior corners are designed and 10cSt silicone oil is used for a series of drop tower experiments. Based on the investigation into the impacts of the varying radius on the capillary driven flows, valuable experimental rules are found.

Key words: microgravity; fluid management; rounded interior corner; capillary driven flows

0 引言

载人航天技术的发展和空间探索计划的需求带动了微重力科学的蓬勃发展,其中微重力流体科学是重要的科学分支,它不仅推动了流体力学新的学科体系的发展,同时也在载人航天工程中有重大应用^[1]。在空间微重力环境中,重力水平是地球表面重力 g_0 的 10^{-6} 倍,重力的作用几乎消失,液体的表面张力起主导作用,微重力下液体的流动特性和平衡界面也会产生显著变化。比如,被地面上静压力掩盖只有在小尺度下(如毛细管、微流道)才能看到的表面张力驱动的流动现象^[2]以及容器内角处的液体平衡界面的爬升^[3]等。

正是液体这些在微重力环境中与地面上明显不同的特性,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工程应用技术之一^[4]。诸如飞船液体推进剂的贮存与供给中的大尺度流动控制、热控系统(热管技术)、生命保障系统(航天员生活用水供给与净化回收等)、电源冷却系统等。研究在表面张力作用下,流体的物性参数(表面张力系数、粘度 μ 、密度、液/固接触角等)以及不同的容器几何形状和圆角半径对毛细驱动流的影响是进行高效率空间流体管理的关键,并能提高载人航天和空间探测中流体管理的效率和设备的可靠性,在科学领域和工程应用中都具有重要意义。笔者为

收稿日期: 2007-10-30; 修订日期: 2008-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(10432060、10672171)

作者简介: 侯瑞(1982-),男,河南省开封市人,硕士研究生,研究方向:微重力流体管理、实验流体。

研究圆角半径这一影响因素的影响,设计出不同容器并进行了短时微重力落塔实验研究。

1 基本理论分析

1.1 微重力下毛细驱动流动的机理

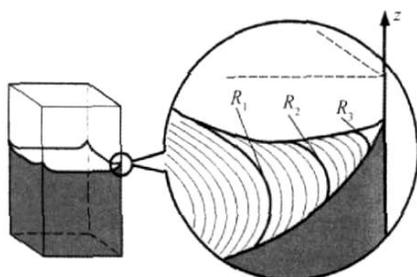
引入用以描述毛细力、重力和相对量级的无量纲参数 Bond 数

$$B_0 = \frac{gd^2}{\sigma} \quad (1)$$

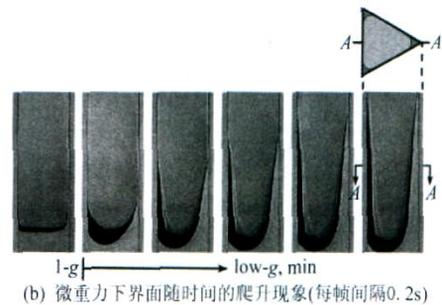
其中 σ 和 ρ 分别是两流体相之间界面的密度差和表面张力, g 是重力加速度, d 是特征长度。当 $B_0 \ll 1$, 就说明系统的表面张力占主导地位,重力作用可以忽略。对于给定的液体, σ 和 ρ 保持不变, g 和 d 的减小都可以使 $B_0 \ll 1$ 。比如地面上的微尺度系统和空间的微重力环境。然而,微重力环境中表面张力可以在大尺度范围 $0(1m)$ 仍起支配作用。

笔者所说的毛细流动可以定义为:在重力影响可以忽略的情况下,由液体的表面张力、容器几何形状以及液/固界面润湿性共同驱动的自发的界面流动现象。这种毛细流动是自然界和工业界许多传递过程的基础,比如地面上多孔介质中的微尺度流动以及空间液体推进剂储箱中的大尺度毛细流动。笔者主要是利用落塔提供的短时微重力环境来研究大尺度下的毛细驱动流动,其毛细流动机理可以用图 1 说明^[5]。

图 1(a) 是在常重力下方形横截面容器中液体的界面形貌,中心的液面是平的,但在内角处的液面会发生弯曲来满足接触角的条件,把角的局部放大之后可以看到,液面的弯曲半径沿靠近内角的逐渐减小,又因为附加压强和半径成反比,所以内角处液体内的压强沿靠近内角的方向是递减的,从而形成了压强梯度。在图 1(b) 中,由于重力水平突然降低,液体静压力消失,内角处形成了毛细力驱动的细长柱形流。本文之所以研究此类沿容器内角的毛细驱动流,是因为它提供了主要的液体传输“管道”。在空间流体管理



(a) 常重力下方形横截面容器中液体界面形貌



(b) 微重力下界面随时间的爬升现象(每帧间隔0.2s)

图 1 微重力下毛细驱动流动的机理

Fig. 1 The mechanism of capillary-driven flows in microgravity

过程中,几乎都会遇到这类的毛细驱动流。比如液体的定位、燃料储箱中的传输、热控系统中热管中的毛细抽吸回路等等。尤其在表面张力推进剂储箱里面,主要是这种内角结构^[6]。

1.2 Concus-Finn 条件

液体在微重力环境下在容器内是否有稳定的界面形貌取决于液体与壁面的接触角 θ 以及容器内角的一半 α 的大小。Concus 和 Finn 对其进行了充分的研究,并提出了容器内液体界面是否有稳定构型的判据^[7-8],即 Concus-Finn 条件

$$\theta + \alpha < \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

其中 θ 是液体与容器壁的接触角, α 是容器内角的一半。例如方形截面的容器 $\alpha = 45^\circ$ 。如果满足 Concus-Finn 条件,容器内部的流体将不断地爬升,最后液体将都会附着在容器内壁或者溢出容器;若不满足 Concus-Finn 条件,容器内部的流体将会出现一个稳定的界面构型。

需要指出的是,Concus-Finn 条件是针对理想的尖角情况,如图 2 所示。但是由于设计和加工制造的原因,在实际中这种完美的尖角并不常见,而是带有一定圆角曲率的内角。虽然目前对完美尖角的情况做了广泛的研究^[5,9,10],对其界面构型也有了较深入的理解,但是针对实际中常见的带有圆角过渡的内角情况仅有很少的理论分析和实验研究。但是,圆角曲率的影响又不可忽略。因此研究圆角曲率的影响对流体管理装置的设计、制造非常重要。目前仅有的理论分析结果表明:圆角过渡将阻止单个液滴在内角处的铺展^[11],圆角半径的增加将使 Concus-Finn 条件所预测的临界接触角逐渐降低,即液体更容易存在稳定的界面构型^[12],并且使内角处液体的爬升速度降低^[13]。但是目前尚没有较全面的微重力实验来研究圆形倒角内角处的毛细驱动流现象。

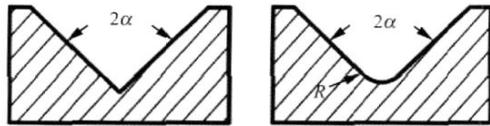


图2 理想内角与带圆角内角的示意图

Fig.2 Sketch of perfect sharp corner and rounded corner

2 实验装置介绍和方案设计

利用落塔设施进行了一系列短时微重力实验,以10cSt 硅油为介质,通过分析 CCD 摄像系统纪录下来的视频图像来研究容器内角处圆角半径大小对内角处液体毛细爬升速度、界面形貌的影响。

所有微重力实验都是在中国科学院力学研究所国家微重力实验室的落塔设施内进行的。微重力落塔设施主要由落塔、落舱系统、释放提升系统、落舱回收系统和测控系统及抽真空系统组成。该落塔的技术参数为:塔体总高 124m;地面上 116m,其中塔体 92m,其它 24m;地面下 8m,有效落高 60m,塔体内径 11m。本实验的实验舱为双舱,微重力时间 3.6s,微重力水平为 $10^{-5} g_0$,回收减速过载小于 $20 g_0$ 。落塔为用户提供 4 路 CCD 视频图像输出,拍摄速率均为 25 帧/s。

实验用的硅油为 Shim-Etsu 公司生产,其型号是用硅油的运动粘性系数来表示的,比如 2cSt 硅油的运动粘性系数为 $2.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。实验使用的 10cSt 硅油,它与实验用的有机玻璃 (PMMA) 容器的静态接触角为零度,即 $\theta_{\text{stat}} = 0^\circ$ 。其他关键物性参数 (25) 在表 1 中给出。

表 1 10cSt 硅油的物性参数 (25)

Table 1 Physical properties of 10cSt silicone oil (25)

	(N/m)	μ (kg/ms)	折射率	接触角
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	N_D	θ_{stat}
10 # 硅油	20.1	935	1.491	0°

实验用的容器材料均为有机玻璃 (PMMA),折射率 $N_D = 1.491$,透光率大约为 90%,实验设计了 4 种不同的容器,各容器的横截面示意图如图 3,不同的

表 2 实验容器的参数

Table 2 Test vessels data for capillary rise tests

材料	折射率	容器深度 N_D	容器深度 h (mm)	内角的一半	圆角半径 R (mm)
(a) 五边形	PMMA	1.491	100	45°	0 (即 90° 尖角)
(b) 五边形	PMMA	1.491	100	45°	2.4
(c) 五边形	PMMA	1.491	100	45°	4.8
(d) 五边形	PMMA	1.491	100	45°	6

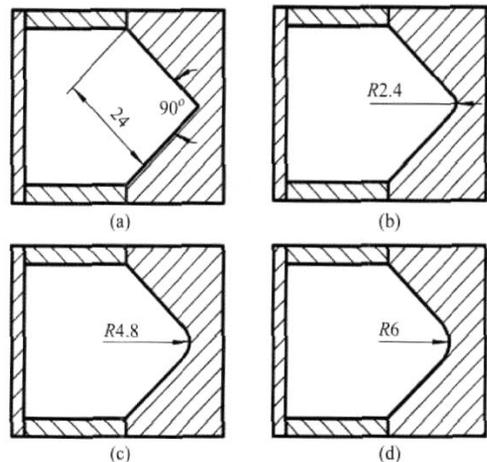


图 3 实验容器的横截面示意图

Fig.3 Cross sections of capillary rise test vessels

尺寸参数在表 2 中给出。为了减小容器折射现象对测量造成的影响,容器做了特殊设计和加工以保证观测表面与 CCD 视线垂直。4 种容器均用 10cSt 硅油做实验,每两个容器组成一个实验单元,其布局如图 4 所示。

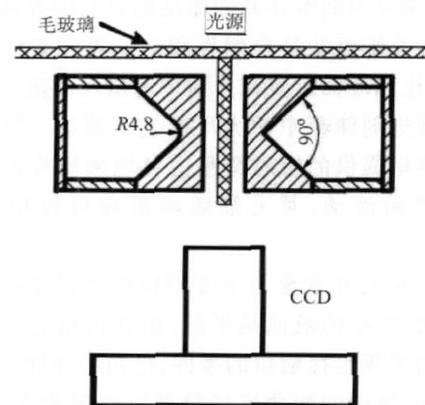


图 4 实验平台布局示意图

Fig.4 Sketch of the test stand

3 实验结果和讨论

笔者通过分析实验图像,主要研究了圆角半径大小对此内角处毛细驱动流爬升速度、高度的影响。图 5 中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别是 4 个容器的落塔实验视频截图,左半部分虚线框区域表示的是右半部分视频截图的视场。视频图片中白色横条指示的是液体弯月面顶端的高度,用 L 来表示,图片从左向右按时间轴排列,从而表明内角处弯月面尖端的高度随时间的变化情况,图片的时间点分别为 0、0.6、1.2、1.8、2.4 和 3.0s;图片从上至下是按照倒角半径的大小排列,依次为 R_0 、 $R_{2.4}$ 、 $R_{4.8}$ 和 R_6 。

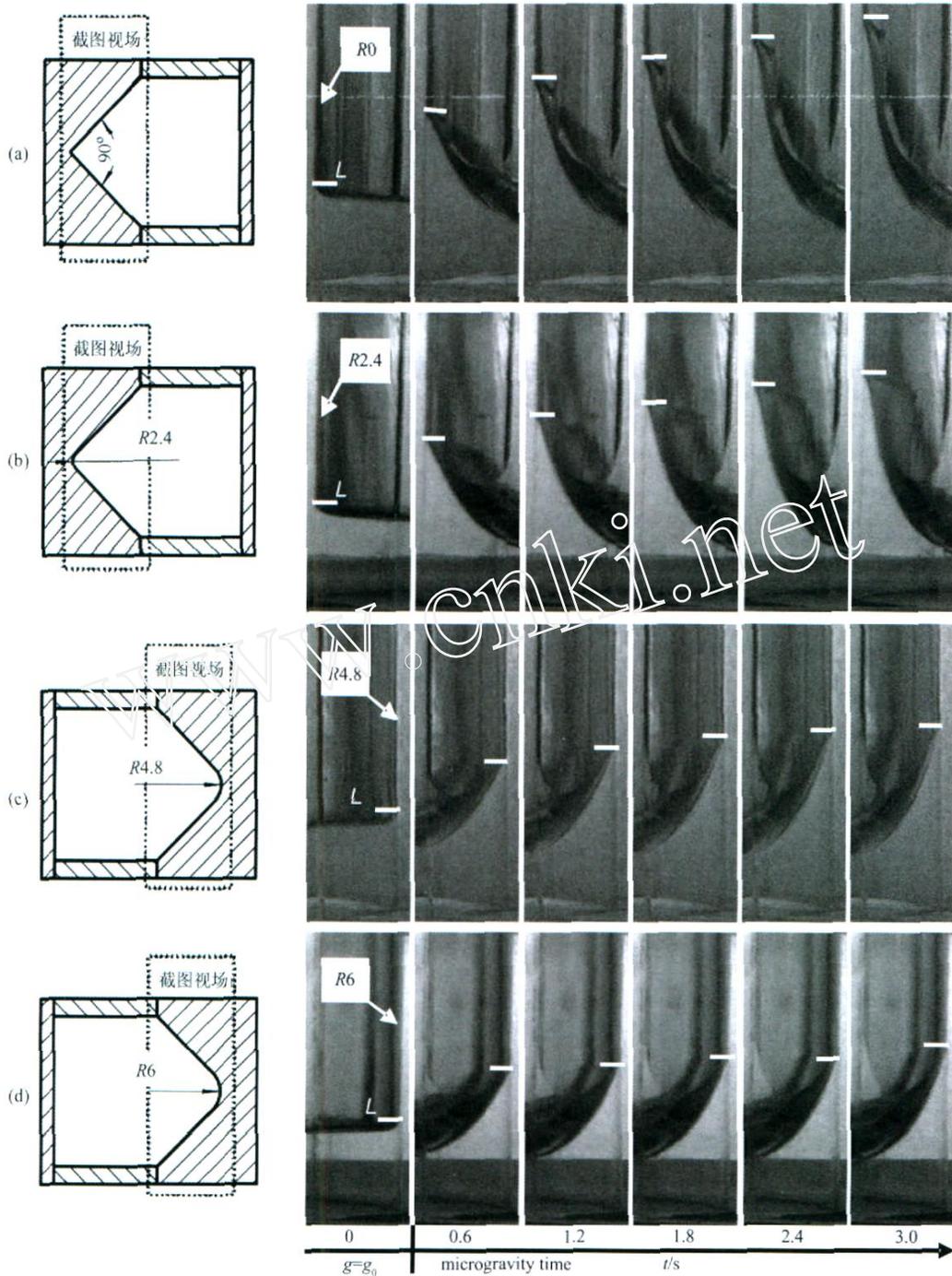


图 5 10cSt 硅油在 4 种容器中的微重力毛细爬升实验视频截面

Fig. 5 Selected frames of capillary rise in the four test vessels with different rounded corner for 10cSt fluid

从实验图像可以看到,进入微重力之前,浸润的硅油在内角处由于表面张力作用形成了向上弯曲的凹形弯月面,落舱释放后,重力突降至很小导致静压力作用几乎消失,液体就被“吸”入内角里,沿内角爬升、重新分布。从直观上可以看到,不同的圆角半径处液体的爬升速度不同,并且圆角半径越大,爬升速度越慢。把实验视频图像每隔 0.04s 进行逐帧分割为静态图片,测量每幅图片中弯月面顶端的位置,得

到了图 6(a) 所示的关系图,并且在纵坐标顶端位置 L 的数据不变的情况下,以 $t^{1/2} (s^{1/2})$ 为横坐标得到了图 6(b) 所示的关系图。

通过对图 5、图 6 进行分析可以得到以下实验结果:

(1) 微重力下,容器内角处的圆角半径对硅油在内角处的毛细爬升速度有显著影响。圆角半径越大,液体的毛细爬升速度越小, R_0 处爬升速度最快, R_6

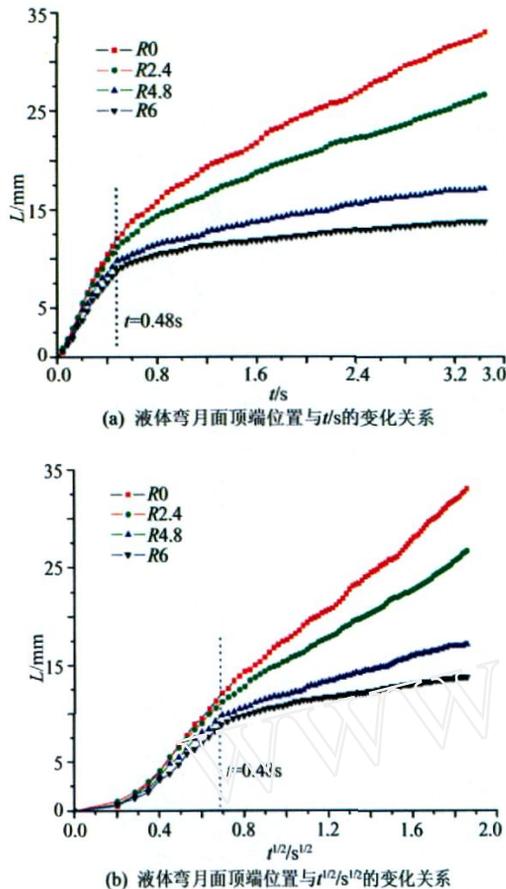


图6 弯月面顶端高度 L /mm 分别与 t/s 、 $t^{1/2}/s^{1/2}$ 的关系

Fig.6 Meniscus tip location L /mm as a function of t/s 、 $t^{1/2}/s^{1/2}$

处爬升速度最慢。也就是说,容器的圆形倒角会阻止液体微重力下的毛细爬升,而且倒角半径越大,阻止现象越明显。在圆角半径为 R_6 的容器中,液体在后半段时间里的爬升速度很小。在推进剂的管理设备中这种情况要坚决避免,如果出现,将会造成气泡进入发动机,影响飞行安全。但另一方面,这也提供了一种在微重力下进行液面控制的新方法,即在角处进行圆形倒角处理,就可以有效地阻止液体的爬升,再结合防爬液的使用,就可以使本来不稳定的液面出现稳定的构型,这一实验结果将为空间流体物理实验的液面控制提供简单而且有效的途径;

(2) 微重力下,实验容器的圆形倒角处毛细驱动流的液面变化过程以图6中虚线所示的 $t = 0.48s$ 为界可以分为两个阶段:当 $0 < t < 0.48s$ 时,为第一阶段;当 $t > 0.48s$ 时,为第二阶段;

第一阶段是重力作用突然消失后液面的重定位阶段,液体的惯性力占主要地位,液面变化比较明显,弯月面顶端爬升了10mm左右。而且在第一阶段0.48s内,弯月面顶端的爬升速度又经历先增大后减小的过程,速度增大过程是惯性力完全占主要地位,

速度减小的过程说明了惯性力和粘性力共同起作用,并且惯性力作用逐渐减弱,粘性力作用逐渐增强。

第二阶段是粘性力占起主要作用的“稳定”(不是说速度恒定不变)的毛细驱动爬升过程。从图6可以看到, $t = 0.48s$ 之后,以 $t^{1/2}(s^{1/2})$ 为横坐标的关系图6(b)中, R_0 即90°尖角处的弯月面顶端位置 L 随变量 $t^{1/2}$ 的变化呈较强的线性相关性也就是说 L 与 $t^{1/2}$ 成正比,这与 Weislogel^[3,5] 等人的研究结果相一致。同时可以看到,图6(b)中其它三个带圆角的内角处 L 与 $t^{1/2}$ 的关系同样比图6(a)中的关系具有更强的线性相关性,所以从本实验数据可以得出:微重力下,带圆形倒角的内角处的毛细驱动流在第二阶段的爬升高度 L 与 $t^{1/2}$ 成正比。

另外需要说明的是,实验确定的两阶段的时间分界点 $t = 0.48s$ 是在特定的容器尺寸以10cSt硅油为介质的条件下得到的实验结果,此时间分界点不是固定不变的,容器尺寸或者实验介质不同,将得到不同的实验值。

4 结论

笔者通过短时微重力落塔实验,研究了容器几何形状即倒角半径大小对容器内角处的毛细驱动流以及界面行为的影响,并得到了有价值的实验规律。实验结果可为航天工程中空间流体管理设备(如推进剂管理装置)的设计优化提供参考,并可以应用于空间微重力科学实验,提高实验液体介质注入和液体界面的控制技术。

致谢:

衷心感谢中国科学院力学研究所国家微重力实验室落塔组的全体工作人员,他们的辛苦工作和热心帮助使得落塔实验能够顺利完成。

参考文献:

- [1] 胡文瑞,徐硕昌.微重力流体力学[M].北京:科学出版社,1999.
- [2] STANGE M,DREYER M E,RATH H J. Capillary driven flow in circular cylindrical tubes[J]. Physics of Fluids, 2003, 15 (9): 2587-2601.
- [3] WEISLOGEL M M. Capillary flow in an interior corner[R]. NASA TM 107364, 1996.
- [4] EBERHARDT R N F. Orbital fluid management[R]. AIAA 85-1234, 1985.

(下接第83页)

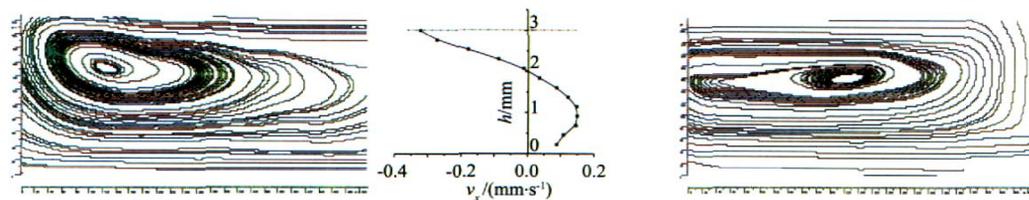
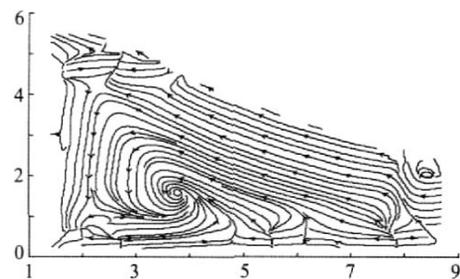


图 6 下落前距离冷、热端约 8mm 范围内的涡胞结构和远离冷端壁面 7mm 处不同高度上的水平速度分布 ($h_0 = 3.0\text{mm}$, $T = 10$)

Fig. 6 Streamlines near both ends and horizontal velocity profile at middle part of the pool for $h_0 = 3.0\text{mm}$ ($T = 10$ under normal gravity)



(a) 冷端附近流线 $h_0 = 3.0\text{mm}$, $\Delta T = 10^\circ\text{C}$



(b) 热端附近流线 $h_0 = 4.6\text{mm}$, $\Delta T = 20^\circ\text{C}$

图 7 微重力状态下的热毛细对流

Fig. 7 Streamlines near both ends for $h_0 = 3.0\text{mm}$, $T = 10$ and $h_0 = 4.6\text{mm}$, $T = 20$ under microgravity

对流模式将发生明显的变化。因此,通过系统的落塔实验,对比下落前后对流模式的变化情况,就可以得到这个厚度的限值,从而可得到对应的临界 Bo 。

3 结 论

笔者对短时微重力下的液面变形及浮力热毛细对流的转变进行了初步研究:对液面的变化过程

有了深入的了解,并且发现楔形结构利于控制液面;在 3.5s 的微重力时间内,观测到了热毛细对流。为进一步开展落塔实验和空间实验提供了很好的经验。

参 考 文 献:

- [1] SMITH M K, DAVIS S H. Instabilities of dynamic thermocapillary liquid layers[J]. Part 1. Convective instabilities. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive, 2006, 132(-1): 119-144.
- [2] MARCEIO L. Thermal convection and related instabilities in models of crystal growth from the melt on earth and in microgravity: Past history and current status[J]. Crystal Research and Technology, 2005, 40(6): 531-549.
- [3] BURQUETE J NM, DAVIAUD F, GARNIER N, and CHIFFAUDEL A. Buoyant-thermocapillary instabilities in extended liquid layers subjected to a horizontal temperature gradient[J]. Physics of Fluids, 2001, 13(10): 2773-2787.
- [4] RILAY R J, NEITZEL G P. Instability of thermocapillary-buoyancy convection in shallow layers. Part 1. Characterization of steady and oscillatory instabilities[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 359(-1): 143-164.
- [5] SHEVTSOVA V M, NEPOMNYASHCHY A A, LEGROS JC. Thermocapillary-buoyancy convection in a shallow cavity heated from the side[J]. Physical Review E, 2003, 67(6): 066308, 1-14.
- [6] CONCUS P, FINN R. On the behavior of a capillary surface in a wedge[J]. PNAS, 1969, 63(2): 292-299.
- [7] STANGE M, DREYER M E, RATH H J. Capillary driven flow in circular cylindrical tubes[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(9): 2587-2601.

(上接第 78 页)

- [5] WEISLOGEL M M, LICHTER S. Capillary flow in an interior corner[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 373: 349-378.
- [6] JAEKLE D E. Propellant management device conceptual design and analysis: vanes[R]. AIAA 91-2172.
- [7] CONCUS P, FINN R. On the behavior of a capillary surface in a wedge [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1969, 63(2): 292-299.
- [8] CONCUS P, FINN R. On capillary free surfaces in the absence of gravity[J]. Acta Math, 1974, 132: 177-198.
- [9] WEISLOGEL M M. Capillary flow in containers of polygonal section[J]. AIAA Journal, 2001, 39(12): 2320-2326.
- [10] DONG M, CHATZIS I. The imbibition and flow of a wetting

liquid along the corners of a square capillary tube[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1995, 172(2): 278-288.

- [11] WEISLOGEL M M, LICHTER S. A spreading drop in an interior corner: Theory and experiment [J]. Microgravity Science and Technology, 1996, 3: 175-184.
- [12] CONCUS P, FINN R. Dichotomous behavior of capillary surfaces in zero gravity[J]. Microgravity Science and Technology, 1990, 3: 87-92.
- [13] CHEN Y K, WEISLOGEL M M, NARDIN C L. Capillary-driven flows along rounded interior corners[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 566: 235-271.