

微重力条件下与容器连通的毛细管中的毛细流动研究

周宏伟 王林伟 徐升华 孙祉伟

Capillary-driven flow in tubes connected to the containers under microgravity condition

Zhou Hong-Wei Wang Lin-Wei Xu Sheng-Hua Sun Zhi-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124703 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳观接触角的确定方法

The method for determining nano-contact angle

物理学报.2015, 64(11): 116802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.116802>

壁面材质和温度场对熔融硅润湿角的影响

Effect of temperature field and different walls on the wetting angle of molten silicon

物理学报.2015, 64(11): 116801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.116801>

微液滴在超疏水表面的受迫振动及其接触线的固着-移动转变

Stick-slip transition of a water droplet vibrated on a superhydrophobic surface

物理学报.2014, 63(21): 216801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.216801>

微重力条件下不同截面形状管中毛细流动的实验研究

Experimental study on the capillary flow in tubes of different shapes under microgravity condition

物理学报.2013, 62(13): 134702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134702>

微重力条件下不同截面形状管中毛细流动的实验研究

Experimental study on the capillary flow in tubes of different shapes under microgravity condition

物理学报.2013, 62(13): 134702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.134702>

微重力条件下与容器连通的毛细管中的毛细流动研究*

周宏伟¹⁾ 王林伟¹⁾²⁾ 徐升华^{1)†} 孙祉伟¹⁾

1)(中国科学院力学研究所, 中国科学院微重力重点实验室, 北京 100190)

2)(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

(2014年10月9日收到; 2014年12月12日收到修改稿)

利用落塔的短时微重力条件, 实验研究了与容器连通的毛细管中的流体在微重力条件下的毛细流动过程, 并通过理论分析建立了相应的毛细管中弯月液面高度随时间变化的微分方程. 结果表明, 对于不同的接触角和不同的容器/毛细管参数, 由建立的理论公式得到的数值解结果都与实验结果在定量上较为一致. 此外, 实验中发现, 改变乙醇和去离子水混合液的比例可以明显地改变接触角参数, 但对毛细流动的影响很小, 建立的理论公式也对这一现象给出了合理的解释. 该研究对于预测和分析微流道及空间微重力条件下的毛细流动行为具有明显的应用价值.

关键词: 毛细流动, 毛细管, 微重力, 接触角

PACS: 47.55.nb, 68.03.Cd, 68.08.Bc

DOI: 10.7498/aps.64.124703

1 引言

毛细流动一直是国际上长期关注的问题^[1]. 在地面条件下, 由于重力的存在, 只有当体系的特征尺度很小时, 毛细作用的影响才会变得较为显著, 因此人们对于地面条件的毛细流动主要关心的是小尺度问题^[2], 如多孔介质、微流控器件等^[3-5]. 然而, 在微重力条件下, 液体的形态、液体在容器中的分布及流动特征等都主要由界面张力来控制^[6-11], 因此毛细流动变得更为常见, 即便对于大尺度体系, 毛细作用也是影响流体流动的关键因素之一.

随着航天技术和空间实验研究的发展, 人们遇到了越来越多的微重力环境下的毛细流动问题, 对界面张力引起的流体界面现象的深入研究也变得更加迫切. 因此, 微重力条件下的毛细流动行为也越来越受到人们的重视, 在内角处、叶片-壁面缝隙处、长鼻形容器、两平板间、毛细管等不同的几何形状条件下的毛细流动行为, 以及接触角、黏性等因

素对毛细流动的影响都已经得到了非常广泛的研究^[12].

浸入在液体中的毛细管是研究毛细流动的一类典型系统, 针对这一系统, 人们已经利用落塔的短时微重力条件来研究毛细管中弯月面高度随微重力时间的变化过程, 以及管径等因素对微重力条件下毛细流动的影响规律^[10,11]. 虽然这一系统对于理解毛细流动的动态行为有重要价值, 但是它并不能很好地代表实际应用中的很多存在的毛细管体系. 实际上, 有不少毛细管是与容器直接连通而不是浸润在液体中的, 例如航天器中的一些流体传输、给液系统, 以及微流控系统微通道等^[13]. 因此, 研究与容器连通的毛细管中的毛细流动现象对于这些相关的应用有着重要的意义.

对于微重力条件下浸入液体中的毛细管中的毛细流动来说, 毛细管内的弯月面通常被认为具有球面的形状. 然而, 由于毛细管外壁的存在, 在毛细管外的容器中的液体, 其气液界面无法被看成球面, 而是一个形状复杂的几何界面. 为了便于

* 国家自然科学基金(批准号: 11032011, 11172302)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xush@imech.ac.cn

分析, 在实验研究中常常在毛细管外壁增加一个挡板^[10,11], 从而将容器内壁以及毛细管外壁的三相接触线都固定在挡板之上. 与之相比, 如果毛细管是与容器直接连通, 那么在微重力条件下, 无论是容器内部还是毛细管中的弯月面都可以近似看成是一个球面, 因此与浸润在液体中的毛细管相比, 不仅与容器连通的毛细管体系更接近实际情况, 也可以更方便地将实验与理论分析进行定量对比. 然而, 目前对于微重力条件下连接到容器壁上的毛细管中的毛细流动研究还很少有文献报道.

本文利用北京的落塔设施^[14]提供的3.6 s的微重力环境, 针对与圆形容器连通的圆形毛细管这一基本的模型系统, 研究了不同几何尺寸的容器/毛细管中不同液体在微重力条件下的毛细流动. 对于此模型系统, 本文建立了管内毛细流动的理论模型, 并将实验结果与理论分析进行了对比, 结果表明两者具有很好的一致性.

2 微重力落塔实验

本文中所使用的实验装置与以往的装置^[15,16]类似, 实验装置如图1所示, 其主要部分为含有毛细管的实验池、光源和电荷耦合器件(CCD). 所使用的CCD摄像头型号为WAT-660D, 有效像素为537(H)×597(V), 采集速率为25帧/s.

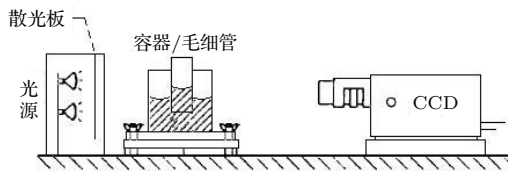


图1 实验装置示意图

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

容器/毛细管的示意图如图2(a)所示, 容器/毛细管的材质为丙烯酸塑料. 在进入微重力条件之前, 容器/毛细管中的液体需要在常重力条件下保持稳定状态, 因此必须要求容器和毛细管的开口都朝向上方. 基于此, 容器/毛细管的设计是将实验池外部接了一个向上弯曲的弯管. 容器/毛细管的主要几何参数包括容器的半径 R_{con} , 毛细管半径 R , 液面初始高度 h_0 以及毛细管的横向长度 l 等, 这些参数已在图2(a)中标出. 图2(b)给出了已有文献^[10, 11]研究的浸入液体中的毛细管体系的示意图, 以便与图2(a)对比.

本文的研究中, 所有容器/毛细管的实验池半径 R_{con} 的值均为70 mm, 但不同的容器/毛细管系统的 R , h_0 和 l 等参数有所不同, 从而可以用来研究不同几何参数条件下的毛细管中的毛细流动, 相关参数的数值列于表1.

表1 图2(a)所示的两种不同的容器/毛细管参数
Table 1. Parameters of the container/tube as shown in Fig. 2(a).

| 容器/毛细管编号 | R_{con}/mm | R/mm | l/mm | h_0/mm |
|----------|--------------|--------|--------|----------|
| R2 | 70 | 2 | 54 | 20 |
| R8 | 70 | 8 | 51 | 40 |

与已有的一些微重力落塔实验类似^[11,15,17], 我们采用的测试液体为乙醇/去离子(Eth/H₂O)水混合液, 由于这两种液体与丙烯酸塑料的接触角分别为0°和80°, 因此可以通过改变这两种液体的不同比例来调节混合液与容器/毛细管的接触角. 本研究中采用的Eth/H₂O的体积百分比分别为: 20/80(%vol.), 30/70(%vol.)和40/60(%vol.). 三种混合液体的相关参数列于表2, 其中 σ 为表面张力系数, ρ 为液体密度, ν 为运动学黏性系数, γ_s 为静态接触角.

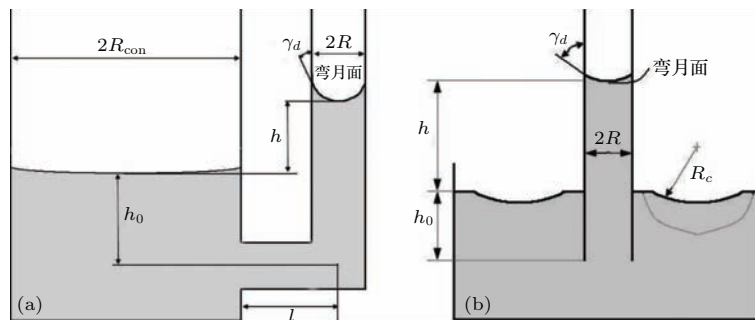


图2 (a) 本文所采用的与容器连通的容器/毛细管的实验池的示意图; (b) 浸入液体中的毛细管的容器/毛细管示意图
Fig. 2. (a) Schematic diagram of container/tube system in which the tube is connected to the container; (b) schematic diagram of the container/tube system in which the tube is immersed in fluid.

表2 不同体积百分比 Eth/H₂O 混合液的基本参数
Table 2. The relevant parameters of Eth/H₂O mixtures at different volume percents.

| | $\sigma/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ($\pm 5\%$) | $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\pm 5\%$) | ν/cSt ($\pm 1\%$) | $\gamma_s/(\text{°})$ ($\pm 2\text{°}$) |
|-----------------------------------|---|--|--------------------------------|---|
| Eth/H ₂ O 20/80(%vol.) | 0.0443 | 958 | 1.49 | 66 |
| Eth/H ₂ O 30/70(%vol.) | 0.0364 | 937 | 1.83 | 54 |
| Eth/H ₂ O 40/60(%vol.) | 0.0328 | 916 | 2.11 | 42 |

落舱释放之后,在几毫秒的时间内就可以进入微重力条件,在地面条件下,由于重力的作用,毛细管与容器池存在一定的毛细压力差(被液面高度差引起的静水压力差抵消),进入微重力条件后,毛细压力差将驱动液体从容器池流入毛细管中,在3.6 s的落塔微重力时间内,我们可以利用图1所示的实验装置记录不同时刻毛细管内弯月液面爬升的过程.与文献[10, 11, 15]中的方法类似,我们在毛细管旁沿着毛细管方向安放了刻度尺,这样就能根据不同时刻记录的图像,将液面与刻度尺进行比较来得到 t 时刻的液面高度 h .通过改变容器/毛细管的几何尺寸、溶液和器壁的接触角等参数,可以得到一系列液面高度随微重力时间变化的 $h-t$ 曲线,从而可以分析不同参数条件下的毛细流动行为.

3 结果与讨论

3.1 实验结果

对于表1中所列的两种容器/毛细管系统,采用表2中所列的接触角为 42° , 54° 和 66° 的三种不同比例的乙醇/去离子水的混合液进行了落塔微重力实验.实验测得的微重力条件下毛细管中液面高度 h 随时间 t 变化的曲线如图3所示.从图3可以看出,对于半径为2, 8 mm的毛细管,虽然这两种管的几何条件有很大差别,但是无论是哪种容器/毛细管,三种不同接触角的液体所对应的 $h-t$ 曲线的差别并不明显,这与浸入在液体中的毛细管的情形有很大不同.对于文献中报道的浸入液体中的毛细管,同样采用本文中的三种不同类型的液体,其 $h-t$ 曲线差别非常大.这一差别显然是由于两种体系毛细管外(或实验池中)的界面不同所导致的.

3.2 理论分析

为了分析本文的实验结果,并理解与容器连通的毛细管中的毛细流动行为规律,我们在已有的浸入液体中的毛细管体系的理论上,通过分析建

立了相关的理论模型.

对于如图2(b)所示的浸入液体中的毛细管这类系统,已经被广泛采用的弯月面高度随时间变化的微分方程如下[10,11]:

$$\ddot{h} = \frac{1}{h + h_0 + \frac{73}{60}R} \left\{ \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{2s \cos \gamma_d}{R} - \frac{1}{R_c} \right) - \left[\frac{8}{R^2}(h + h_0) + \frac{2}{R} \right] \nu \dot{h} - (1 + K_{ts2}) \frac{1}{2} \dot{h}^2 \right\}, \quad (1)$$

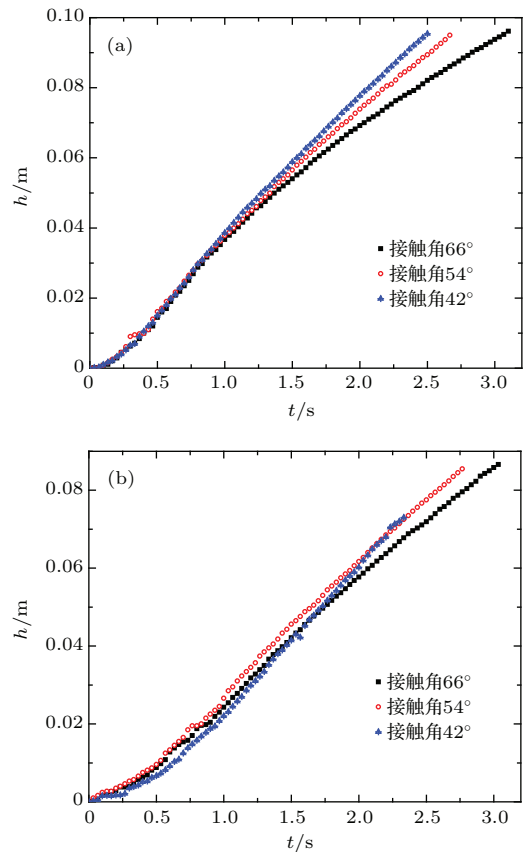


图3 (网刊彩色) 两种不同的容器/毛细管中液面高度 h 随微重力时间 t 的变化 (a) R2容器/毛细管,毛细管半径为2 mm; (b) R8容器/毛细管,毛细管半径为8 mm
Fig. 3. (color online) Meniscus height h as a function of microgravity time t for two different containers/tubes: (a) container/tube R2, the radius of the tube is 2 mm; (b) container/tube R8, the radius of the tube is 8 mm.

式中, h 为弯月面高度, h_0 为毛细管中液面的初始高度, R 为毛细管半径, R_c 为毛细管外的容器池中液面的曲率半径, 这四项参数的意义如图 2(b) 所示. 另外, 方程 (1) 右侧第一项中的 γ_d 为前进动态接触角, s 为描述弯月面从重力状态到微重力状态重定位过程的一个函数, 可近似为 1. 可以看出方程 (1) 右侧第一项描述的是毛细管内外的气液界面的表面张力引起的压力差, 为驱动液面爬升的毛细力. 方程 (1) 右侧的后两项分别描述管内的摩擦力以及对流和黏性损耗, 其中 K_{ts2} 描述的是毛细管入口的速度分布过渡到管内的速度分布产生的额外压力降, 可近似为 $4/3$ [10,18,19].

对于本文所关注的图 2(a) 所示的容器/毛细管系统, 影响弯月面爬升的作用力实际上与 (1) 式所描述的系统类似, 主要作用仍然是驱动液面爬升的毛细力、管内的摩擦力以及对流和黏性损耗等, 因此对于图 2(a) 所示的系统, 其微分方程可以在 (1) 式的基础上进行修正得到. 图 2(a) 所示系统和 (1) 式对应的系统主要有三方面的不同.

首先, 由于几何形状的不同, 对于浸入液体中的毛细管来说, 毛细管外液面的表面张力引起的压力项由 σ/R_c 表示, 这是因为实验池中存在毛细管和挡板, 因此将外部液面近似看作一个环形面. 而对于图 2(a) 所示的系统, 容器池中的液面在微重力条件下也将是一个球面, 因此这一项应改为 $2\sigma s' \cos \gamma_r / R_{con}$, 其中 γ_r 是池中液体的后退接触角, R_{con} 是容器池的半径, s' 描述实验池中的弯月面从重力状态到微重力状态的重定位过程, 为了与毛细管中的 s 函数相区别, 增加了一个上标.

其次, 对于弯管的情况, 管内的液体量, 无论是水平的部分还是竖直的部分, 都应该对惯性力 (如 (1) 式的分母项) 和摩擦力有贡献, 因此所有的 h 项都应当由 $h+l$ 来替代, 其中 l 为图 2(a) 中所示的水平部分的长度.

最后, 由于图 2(a) 的毛细管中存在弯曲, 因此需要考虑这部分弯曲所引起的损耗, 对于不同的几何条件, 这部分损耗可以用局部阻力系数 K_l 来表示, 应当增加在 (1) 式的最后一项中.

基于以上分析, 得到图 2(a) 的毛细管中液面爬升的微分方程为

$$\ddot{h} = \left(h + l + h_0 + \frac{73}{60}R \right)^{-1} \times \left\{ \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{2s \cos \gamma_d}{R} - \frac{2s' \cos \gamma_r}{R_{con}} \right) - \left[\frac{8}{R^2}(h + l + h_0) + \frac{2}{R} \right] \nu \dot{h} \right.$$

$$\left. - (1 + K_{ts2} + K_l) \frac{1}{2} \dot{h}^2 \right\}. \quad (2)$$

3.3 实验结果与理论分析的对比

利用本文实验中的相关参数, 采用 (2) 式得到了 $h-t$ 的数值解. 其中, (2) 式中的 $h_0, R, R_{con}, l, \sigma, \rho, \nu$ 等与容器/毛细管系统的几何条件、液体性质相关的参数等可直接对应, 但 s, s' , 动态接触角等参数需要进行一些近似处理, 如前文所述, 描述弯月面从重力状态到微重力状态重定位过程的 s 和 s' 函数可近似为 1. 为简单起见, 我们将 (2) 式中的动态接触角全部用静态接触角来近似处理. 另外, 其中 K_{ts2} 的值参考文献中的结果取为 $4/3$ [10,18,19], 考虑到 K_l 的值对于同样类型的弯曲应为一个定值. 参考已有的文献, 本文中的毛细管在弯曲处的剖面 (图 2(a)) 为 90° 方形, 因此应当为 90° 方形弯头, 其阻力系数为 1.3 [20], 取 K_l 的值为 1.3 . 在确定了这些关键参数之后, 就可以通过对 (2) 式求数值解, 并与实验结果进行对比, 具体如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 通过采用与实验中相同的几何尺寸等参数, 根据 (2) 式得到的数值结果与实验结果符合得很好, 即使对于两种几何尺寸差别相当大的容器/毛细管, 数值结果都基本上与实验结果定量地一致.

基于理论公式, 可以分析三种液体的接触角有很大差别的原因, 但是 $h-t$ 曲线的差别很小. 从表 2 可以看出, 随着接触角变小, 混合液体的密度变小, 表面张力变小, 黏度变大. 接触角变小, 密度变小将导致第一项驱动力项变大, 从而加快毛细流动的速度, 但是表面张力变小又趋向于减少第一项驱动力, 而黏度变大导致第二项的摩擦力项的增大, 这两个参数的贡献与接触角变化的贡献相反. 这两种相反的作用使得接触角的变化对毛细流动速度的影响变得不那么明显, 因而对于三种不同的混合液体和给定的容器/毛细管, 其毛细流动的 $h-t$ 曲线的差别并不明显, 从而可以解释本文的落塔微重力实验结果.

4 结 论

本文针对与容器连通的毛细管, 利用落塔的短时微重力条件, 通过实验研究了不同参数条件下的毛细流动过程, 并建立了相应的理论公式, 将实验结果与理论分析进行了对比.

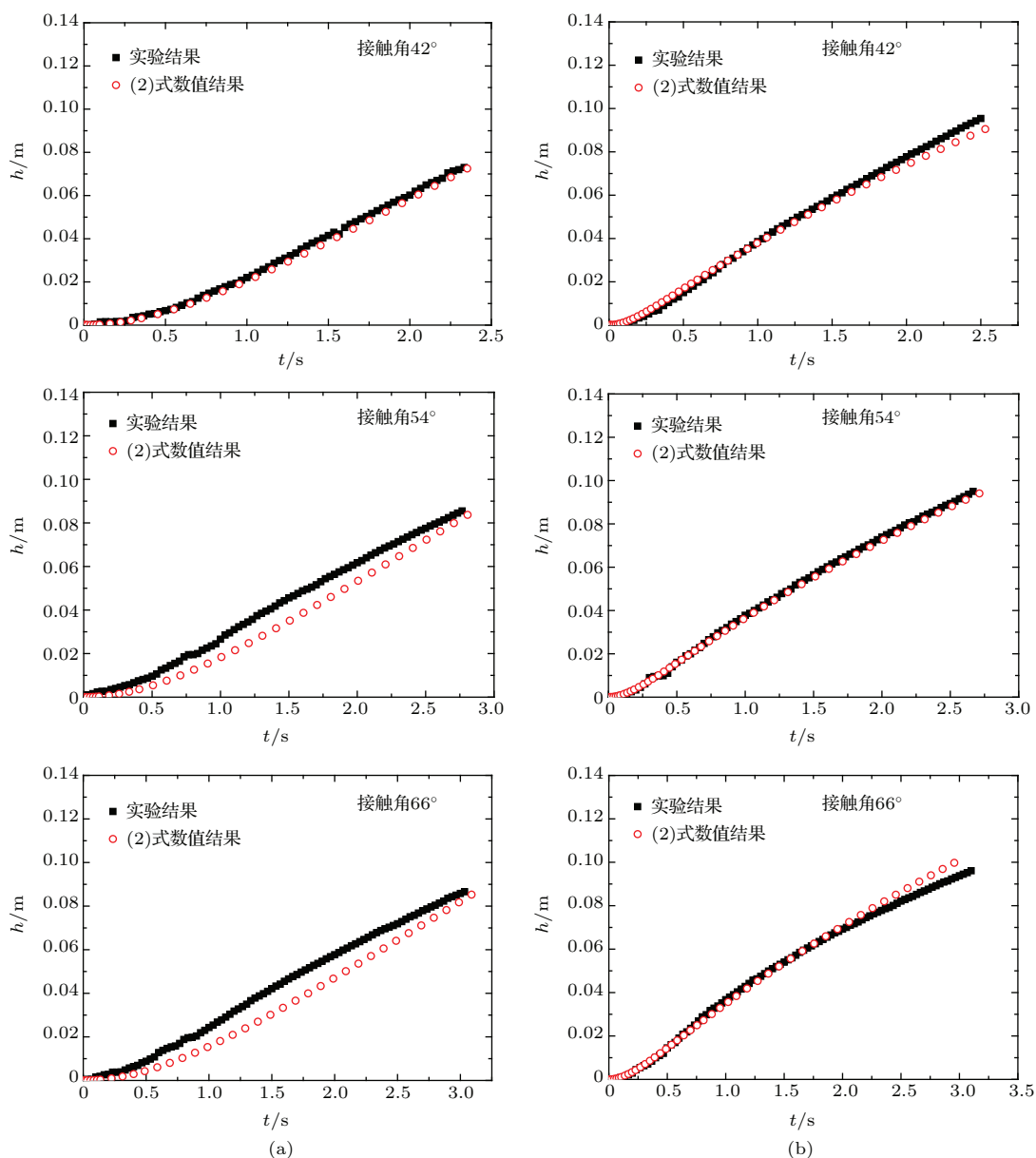


图4 (网刊彩色) 不同条件下 $h-t$ 曲线的实验值与采用 (2) 式得到的数值结果的对比 (a) R2 容器/毛细管, 毛细管半径为 2 mm; (b) R8 容器/毛细管, 毛细管半径为 8 mm

Fig. 4. (color online) The comparison of experimental results of $h-t$ curves and numerical results from Eq. (2) under different conditions: (a) container/tube R2, the radius of the tube is 2 mm; (b) container/tube R8, the radius of the tube is 8 mm.

根据不同的接触角和不同的容器/毛细管系统的参数, 采用实验中的实际参数代入理论公式, 所得到的毛细流动的数值结果都可以和实验结果在定量上较为一致. 此外, 实验结果表明, 当容器/毛细管系统的其他参数都相同时, 如果通过改变乙醇和去离子水混合液的比例来改变接触角参数, 对毛细流动的影响很小. 实验和理论结果对比表明, 这是因为随着混合液接触角的变化, 界面张力和黏度也随之改变, 这些参数的改变部分抵消了接触角变化的影响, 因而乙醇/去离子水混合液的变化对毛

细流动的影响不大.

本文结果表明, 我们建立的理论公式可以比较准确地描述与容器连通的毛细管中的毛细流动行为, 这对于微通道中以及空间微重力条件下的毛细流动、流体传输、流动速度等方面的预测和分析有一定的应用价值.

参考文献

[1] Oron A, Davis S H, Bankoff S G 1997 *Rev. Mod. Phys.* **69** 931

- [2] Sui Y, Ding H, Spelt P D M 2014 *Annu. Rev. Fluid Mech.* **46** 97
- [3] Benner E M, Petsev D N 2013 *Phys. Rev. E* **87** 033008
- [4] Gunde A, Babadagli T, Roy S S 2013 *J. Petrol. Sci. Eng.* **103** 106
- [5] Kim D S, Lee K C, Kwon T H, Lee S S 2002 *J. Micromech. Microeng.* **12** 236
- [6] Chen Y, Collicott S H 2004 *AIAA J.* **42** 305
- [7] Chen Y, Collicott S H 2005 *AIAA J.* **43** 2395
- [8] Chen Y, Collicott S H 2006 *AIAA J.* **44** 859
- [9] Dreyer M E, Delgado A, Rath H J 1994 *J. Colloid Interf. Sci.* **163** 158
- [10] Stange M, Dreyer M E, Rath H J 2003 *Phys. Fluids* **15** 2587
- [11] Wang C X, Xu S H, Sun Z W, Hu W R 2009 *AIAA J.* **47** 2642
- [12] Wang L W 2012 *M. S. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王林伟 2012 硕士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [13] Conrath M, Canfield P J, Bronowicki P M, Dreyer M E, Weislogel M M, Grah A 2013 *Phys. Rev. E* **88** 063009
- [14] Zhang X Q, Yuan L G, Wu W D, Tian L Q, Yao K Z 2005 *Sci. China: Ser. E* **35** 523 (in Chinese) [张孝谦, 袁龙根, 吴文东, 田兰桥, 姚康庄 2005 中国科学 E 辑 **35** 523]
- [15] Wang C X, Xu S H, Sun Z W, Hu W R 2010 *Int. J. Heat Mass Trans.* **53** 1801
- [16] Xu S H, Zhou H W, Wang C X, Wang L W, Sun Z W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134702 (in Chinese) [徐升华, 周宏伟, 王彩霞, 王林伟, 孙祉伟 2013 物理学报 **62** 134702]
- [17] Weislogel M M, Ross H D 1990 NASA-TM-103641 (NASA report)
- [18] Schmidt F W, Zeldin B 1969 *AICHE J.* **15** 612
- [19] Sparrow E M, Lin S H, Lundgren T S 1964 *Phys. Fluids* **7** 338
- [20] He C H, Feng X 2001 *Principles of Chemical Engineering* (Beijing: Science Press) p50 (in Chinese) [何潮洪, 冯霄 2001 化工原理 (北京: 科学出版社) 第 50 页]

Capillary-driven flow in tubes connected to the containers under microgravity condition*

Zhou Hong-Wei¹⁾ Wang Lin-Wei¹⁾²⁾ Xu Sheng-Hua^{1)†} Sun Zhi-Wei¹⁾

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

2) (School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 9 October 2014; revised manuscript received 12 December 2014)

Abstract

The capillary-driven liquid flow in tubes connected to containers under a microgravity condition is systematically studied in a drop tower experimentally. The microgravity time lasts up to 3.6 s and the working liquids are mixtures of ethanol and deionized water with different ratios. Theoretically, based on the previous theory for tubes directly immersed in fluid, a modified formula is developed to describe the change tendency of the height of meniscus with microgravity time for such a container/tube system exposed to a microgravity environment. From the theoretical formula, the numerical results of meniscus height at different microgravity time can be obtained, utilizing the geometrical parameters of container/tube systems and the relevant physical quantities of Eth/H₂O mixtures with different ratios. By comparing the numerical results with experimental results for different contact angles between working liquid and container in different container/tube systems, we show that the theoretical model is able to quantitatively predict the capillary-driven flow in tubes connected to containers, and the numerical results have good consistence with the experimental results. In addition, the experimental results also show that though the ratio of ethanol to deionized water can change the contact angle remarkably, it has little influence on the capillary flow if the geometrical parameters of the container/tube systems are the same. This is because not only the contact angle, but also the surface tension and viscosity coefficient of the working liquid change with the ratio of ethanol to deionized water. It is found that when the contact angle increases from 42° to 66°, the surface tension increases from 0.0328 N/m to 0.0443 N/m correspondingly, but the viscosity coefficient decreases from 2.11 cSt to 1.49 cSt. As a result, the changes of surface tension and viscosity coefficient offset the influence of the change of contact angle, which can be explained by our theoretical model. Compared with the extensively studied system in which tubes are directly immersed into liquid, the container/tube system studied in this paper is more similar to many actual systems such as fluid transfer systems in the microgravity condition and in micro-fluidic devices. Therefore, this study is useful for predicting and analyzing the capillary flows of these actual systems.

Keywords: capillary flow, capillary tube, microgravity, contact angle

PACS: 47.55.nb, 68.03.Cd, 68.08.Bc

DOI: 10.7498/aps.64.124703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11032011, 11172302).

† Corresponding author. E-mail: xush@imech.ac.cn