

微重力条件下不同截面形状管中毛细流动的实验研究*

徐升华 周宏伟 王彩霞 王林伟 孙祉伟†

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

(2012年12月21日收到; 2013年1月16日收到修改稿)

利用落塔设施创造的短时间微重力条件, 研究了不同尺寸的正方形和三角形截面的毛细管中的流体在微重力条件下的流动行为, 并与圆形毛细管中的毛细流动进行了对比, 总结出了毛细管尺寸和截面形状对界面张力主导的毛细流动行为的影响规律. 结果显示, 对于同样形状的毛细管, 其尺寸对于毛细流动的影响规律基本相同; 而对于不同的截面形状, 方形管和三角形管都与截面积小得多的圆形管有一定的类似性. 相关结果对于深入理解不同条件下的界面张力主导的毛细流动特性, 以及在空间微重力条件下通过改变毛细管的形状来实现流速和流量的独立控制等方面都具有明显的现实意义.

关键词: 微重力, 毛细流动, 毛细管形状

PACS: 47.55.nb, 68.03.-g, 68.08.Bc

DOI: 10.7498/aps.62.134702

1 引言

流体的界面现象是长期以来一直受到人们关注的问题. 在理论和实验上, 与之相关的固液界面接触角^[1-5]、接触线的移动^[6-10]、毛细流动^[11-16]等基本问题都有着广泛的研究. 在地面条件下, 除非体系的尺度很小, 通常重力对流体影响都明显大于界面张力的影响, 在没有外力的情况下, 流体在容器、管道中的形态和流动行为主要受重力支配. 然而, 在微重力条件下, 液体的形态, 在容器中的分布及流动特征等都主要由界面张力来控制, 从而会表现出与地面完全不同的行为. 例如在容器内角处, 当接触角和内角满足 *Concus-Finn* 条件^[17-19]时, 在微重力条件下根本不存在稳定的构型, 液体将自发地在表面张力驱动下沿着内角流动, 这与在地面上液体能稳定存在于有内角的容器中的情形有着巨大的区别.

随着航天科技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具有气-液自由

界面的体系, 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. 空间微重力条件下液体的输运和排放、液体推进剂和制冷剂的储存和处理、用于生命维持的水处理、用于温度控制和能量供给的流体相变热系统、液态材料的处理、在轨生物流体行为等问题都和流体界面现象密切相关. 在这些问题中, 微重力条件下容器中液体的分布、瞬时状态、流动速度、以及稳定性等定量信息尤为重要. 因此, 要对空间流体进行有效的管理并认识相关的物理、生物现象, 就必须充分认识到微重力条件下界面张力主导的流体行为. 因此微重力条件下的流体行为特征也越来越受到人们的重视^[10,14-16,20-22].

作为流体传输体系的基本模型, 微重力条件下液体在毛细管中的流动行为在国际上受到广泛关注^[14-16,23]. 目前人们已经对微重力条件下圆管和平行平板间的毛细流动进行了非常详细的实验研究和理论分析, 并给出了一系列数学理论模型^[14,15,24]. 实际上, 之所以目前的研究主要针对这两类毛细流动的体系, 主要是因为它们的流动截面

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

† 通讯作者. E-mail: sunzw@imech.ac.cn

上的速度分布都是一维的, 对于圆形毛细管, 其速度分布与径向位置有关, 而对于平板毛细流动, 其速度分布主要与垂直于平板方向的位置有关, 对这类一维的速度分布, 比较容易求出解析解. 目前除这类情况之外, 针对其他截面形状微重力条件下毛细流动的研究还很少, 即使是对于这类速度分布为一维的情况, 实验结果也往往与理论结果有一定的偏差^[16]. 因此, 有必要通过进一步的实验来深入研究和比较具有不同截面形状的毛细管中液体在微重力条件下的毛细流动特性.

本文主要介绍我们利用落塔对正方形和三角形截面的毛细管中的流体在微重力条件下的流动行为的实验研究结果, 并与已有的圆形管中的结果进行了对比, 得到了毛细管尺寸和截面形状对界面张力主导的毛细流动行为的影响规律, 并对其原因进行了相应的分析. 相关结果对于深入理解不同条件下的界面张力主导的毛细流动特性, 以及在空间微重力条件下利用截面形状对液体流动速度、液体分布的控制等方面, 都具有明显的现实意义.

2 微重力落塔实验

本文中的微重力实验是在北京落塔实验设施^[25]中完成的, 其主要技术性能为: 微重力时间 3.6 s, 微重力水平 $10^{-5} g_0$, 其中 g_0 为地面常重力加速度. 落塔中的实验装置与我们以往的实验装置^[10]类似, 主要采用 CCD 拍摄微重力条件下实验池中的流体在毛细管中的毛细流动过程.

实验装置的示意图如图 1 所示, 实验池采用的是内边长为 150 mm、总高度 150 mm 的方形丙烯酸塑料容器. 实验池中的毛细管为由丙烯酸塑料加工而成的上下相通的不同截面形状和尺寸的空心棱柱, 毛细管从上方插入到容器中, 并与容器固定. 本文的实验中, 所使用的毛细管的横截面形状分别为正方形和正三角形, 正方形毛细管的边长分别为 5, 10 和 20 mm, 正三角形毛细管边长分别为 10, 20 和 30 mm. 由于实验过程是在封闭的落舱中完成, 因此必须要加入照明光源, 图 1 中的散光板是用来将光源的光均匀化, 以使 CCD 能拍摄到较为理想的视频图像.

与已有的一些微重力落塔实验类似^[10,16,26], 我们采用的测试液体为乙醇/去离子水混合液. 本研究中, 这两种液体的混合比例为 30/70(%vol.), 该混合液与丙烯酸塑料容器的接触角约为 54° .

落塔的实验过程与文献 [16] 中的类似, 实验开始前, 将图 1 示意的实验测试装置在落舱中安装好, 并在实验池中注好液体, 然后将落舱封闭, 并将其提升到一定高度后再释放. 落舱释放之后, 在几毫秒的时间内就可以进入微重力条件. 对插入液体中的空心柱体, 在地面条件下, 由于重力的作用, 毛细管内外存在一定的压力差 (被毛细管内液面高度引起的压力差抵消). 在落舱下落的过程中, 体系进入微重力条件, 重力引起的流体静压力消失, 毛细管内外的压力差将驱动液体在微重力条件下在毛细管内爬升. 在 3.6 s 的落塔微重力时间内, 整个爬升过程可以利用图 1 所示的实验装置进行摄像、记录并存储.

我们在进行实验时, 毛细管的外侧已事先附上刻度尺, 因此可根据每一帧记录的液面和刻度尺的图像来进行不同时刻液面高度 h 的测量. 实验中所附的刻度尺的最小刻度是 1 mm, 在我们的测试中, 在毫米以下再估读一位, 这一液面高度的测量方法与我们对圆形管的实验测量类似^[16]. 这里需要指出的是, 进入微重力状态后, 随着液面速度的增大, 液体的动态接触角增大得很快, 对于试验中静态接触角为 54° 的测试液体, 柱体中的液面以与柱体接近 90° 的动态接触角爬升, 因此可以将柱体内角处液面尖端的高度 h 近似看作为柱体中液面的高度.

通过改变管的形状以及边长 a , 我们可以得到一系列的液面高度随微重力时间变化的 $h-t$ 曲线, 再进一步通过对实验结果的分析, 可以得出毛细管尺寸和截面形状等因素对微重力条件下毛细流动行为的影响规律.

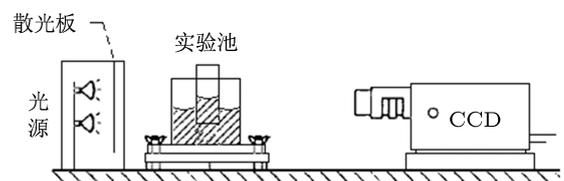


图 1 实验装置示意图

3 结果和讨论

接触角、毛细管形状和尺寸是影响微重力条件下毛细流动的几个重要因素. 在这几个影响因素中, 接触角的影响较为简单. 由于接触角主要影响的是毛细管内外的压力差, 也即是驱动微重力条件下毛细爬升的驱动力, 随着接触角的增大, (浸润情

况下) 毛细管内外界面曲率差别变小, 压力差也即驱动力也随之减小. 因此, 管中的液面爬升速度和高度一般都随着接触角的增加而单调减小, 这一点已经由圆形管的落塔微重力试验所证实^[16]. 由于接触角的影响较为简单, 因此本文中我们主要对比毛细管形状以及尺寸对毛细流动行为的影响规律.

3.1 管的尺寸的影响

我们已有的圆形管的落塔实验结果表明, 管径的影响比接触角的影响要更为复杂. 随着管径的增加, 在一定的微重力时间内, $h-t$ 曲线并不是单调变化, 在有些情况下, 不同管径尺寸的 $h-t$ 曲线可能发生交叉, 较小的管径在毛细流动初期液面要比大管径要高, 而在后期则会被大管径赶超.

针对正方形的毛细管, 我们也发现了类似的实验结果, 如图 2 所示. 而对于三角形截面的毛细管, 在 3.6 秒的微重力时间内未发现 $h-t$ 曲线交叉的情况, 如图 3 所示. 为了方便与方形管与三角形管的落塔实验结果进行比较, 图 5 还给出了我们已有的圆形截面管中的毛细流动落塔实验结果^[16], 其中 d 为圆形截面的直径, 与图 2 和图 3 一样, 图 4 中液体与毛细管间的接触角也是 54° .

从图 3 可以看出, 对于正三角形截面的毛细管, $h-t$ 曲线都有向上弯曲的趋势, 这说明毛细流动在约 3.6 s 的微重力时间内主要处于加速阶段. 而对于正方形截面毛细管来说, 虽然在 3.6 s 的微重力时间内, 不同管径的 $h-t$ 曲线发生了交叉, 然而在毛细流动的初期, 曲线也都是向上弯曲的, 并且在曲线向上弯曲的部分, 不同管径的 $h-t$ 曲线并不发生交叉, 而是管径越小, 液面爬升越快, 如图 2(b) 所示. 同样地, 在图 4 所示的圆形管爬升的前期, 其结果与图 3 所示的三角形管结果以及与图 2(b) 所示的方形管结果也很类似. 几种不同形状毛细管的实验结果表明, 在毛细爬升的初期, 对给定的截面形状, 管径的影响是一致的.

由于三角形截面毛细管在 3.6 s 的微重力时间内基本都处于加速阶段, 因此在分析后期的减速阶段, 即 $h-t$ 曲线向下弯曲的阶段时, 我们只针对方形管和圆形管进行比较. 从图 2(a) 可以看出, 对于方形管的情况, 边长为 5 mm 与边长为 10 mm 的毛细管在 3.6 s 的微重力时间内出现交叉, 并且曲线的交叉发生在小管径毛细管中液面爬升的减速阶段及大管径毛细管液面爬升的加速阶段, 这与图 4 所示的圆形管结果类似.

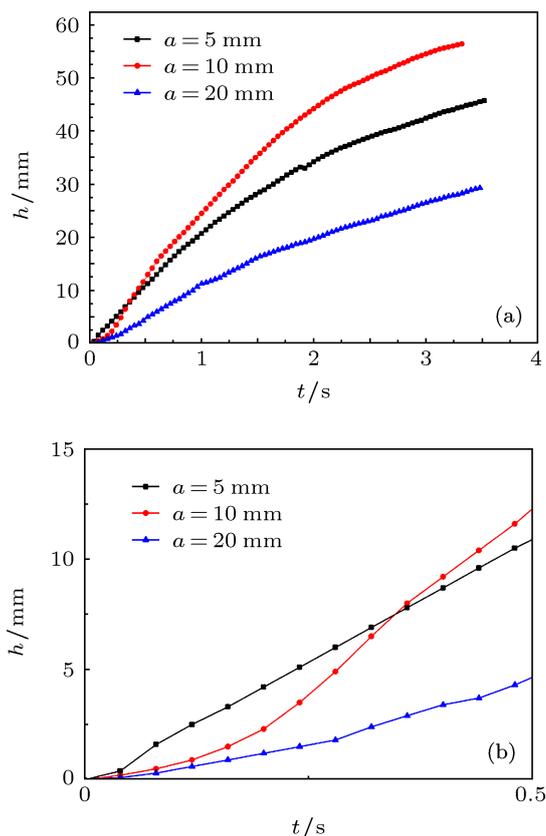


图 2 不同尺寸的正方形毛细管中上升流动的落塔实验结果 (a) 约 3.6 s 的微重力时间的实验结果; (b) 前 0.5 s 的实验结果

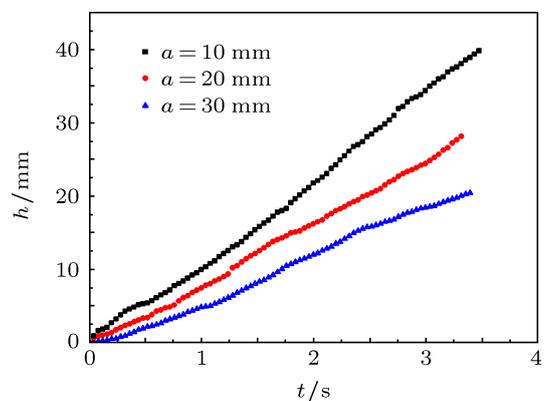


图 3 不同尺寸的正三角形毛细管中上升流动的落塔实验结果

但图 2(a) 和图 4 的结果仍有一定的区别, 从图 4 中可以看出, 在 3.6 s 的微重力时间内已经进入减速阶段的直径为 4 mm 的毛细管, 虽然其 $h-t$ 曲线与仍处于加速阶段的直径为 10 mm 的毛细管对应的曲线未发生交叉, 但是已经有明显的将要发生交叉的趋势. 然而对于方形管来说, 图 2(a) 中边长为 5, 10 和 20 mm 的 $h-t$ 曲线都已经进入了减速阶段, 但是两种小尺寸毛细管与 20 mm 边长的毛细管的 $h-t$ 曲线并没有交叉的趋势.

在文献 [16] 中, 我们根据微重力条件下圆形毛细管中的毛细流动理论, 分析了不同管径中 $h-t$ 曲线产生交叉的原因. 根据相关理论, 影响毛细流动的液面加速度主要由两项决定, 即管内外液面曲率不同导致的压力差产生的毛细力, 以及管内的摩擦力. 我们曾指出 [16], 不同管径的圆形管对应的 $h-t$ 曲线发生交叉的原因在于管径在毛细爬升的初期 (速度增加阶段) 和后期 (速度下降阶段) 的影响不同. 在毛细流动的初期, 毛细力 (驱动力) 主要由惯性力对抗, 因此管径越小, 加速度越大, 这与本文中不同形状毛细管在爬升初期的结果完全一致; 在毛细爬升的后期, 黏性力 (摩擦阻力) 起主要作用, $h-t$ 曲线为减速阶段, 由于随着管径的增大, 黏性力减小, 因此粗的管径中液面爬升更快. 这两种相反的影响趋势导致 $h-t$ 曲线发生交叉.

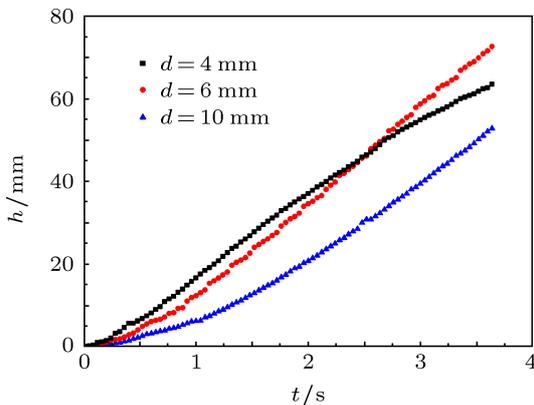


图 4 不同尺寸的圆形毛细管中上升流动的落塔实验结果

文献 [16] 中的这一分析主要针对圆形管, 但对于其他形状的毛细管, 在定性上这种分析也应当适用, 但它却不能很好地解释图 3 中小尺寸方形毛细管与 20 mm 的毛细管的 $h-t$ 曲线没有交叉的趋势这一现象, 这是因为上述分析中没有考虑容器的尺寸效应. 由于盛放液体的外部容器的尺寸限制, 当毛细管尺寸增加到一定程度时, 毛细管外部也会出现较为明显的液面弯曲, 同时管中的液面的初始曲率也会明显减小, 这导致管内外的压力差变小, 也即引起毛细流动的驱动毛细力下降, 在这种条件下, 虽然大的管径在毛细爬升后期的粘性力比小管径小, 但是驱动力也同样比小管径小, 因而无论是速度增加阶段还是速度减小阶段, 大管径的 $h-t$ 曲线都可能一直低于小管径.

3.2 管的形状的影响

以上讨论主要是针对同样类型的毛细管截面

形状来分析毛细管尺寸的影响, 为了方便进一步讨论毛细管截面的影响, 我们将不同截面形状的 $h-t$ 曲线放在同一张图中进行比较. 图 5 给出的是方形管和圆形管的对比结果, 从图中可以看出, 对于边长为 5 和 10 mm 的方形管, 在初始阶段液面的高度要比三种不同直径的圆形管都要大, 而随着时间的变化, 边长为 5 mm 的正方形的 $h-t$ 曲线先后与三种不同尺寸圆形截面的 $h-t$ 曲线发生交叉, 边长为 10 mm 的正方形对应的曲线也与直径为 4 和 6 mm 的圆形管的 $h-t$ 曲线交叉, 并且与直径为 10 mm 的圆形管的曲线也有明显的交叉的趋势. 因此, 参考前面的分析, 边长为 5 和 10 mm 的方形管中的毛细流动应当类似于直径小于 4 mm 的圆形管的情形.

对于圆形截面管来说, 不同直径的 $h-t$ 曲线的交叉先后是有一定的先后次序的, 即先与小尺寸的管先发生交叉, 后与大尺寸的管发生交叉. 正方形边长为 5 mm 的管与三个圆形截面管的曲线交叉情况与此类似, 但图 5 中边长为 10 mm 的正方形管却先与 6 mm 直径的圆管交叉, 后与 4 mm 直径的圆管交叉, 这一结果是由于毛细管的形状效应所导致的, 也说明方形管中的毛细流动并不能完全等效成小尺寸的圆形管.

类似地, 边长为 20 mm 的方形管与直径为 10 mm 的圆形管的 $h-t$ 曲线也存在交叉, 因此这一方形管也可类比于小于 10 mm 的圆形管. 另外, 它与直径 6 mm 的圆形管的 $h-t$ 曲线在初期较为接近, 而到后期有非常显著的差别. 其原因除正方形的形状效应外, 还由于 3.1 节所述的外部容器的尺寸效应 (针对边长为 20 mm 的方形管). 与边长为 20 mm 的方形管相比, 直径 6 mm 和 10 mm 的圆形管的尺寸比 20 mm 边长方形管都要小得多, 所以没有明显的尺寸效应.

需要指出的是, 由于方形管的毛细流动速度或者爬升高度与小得多的圆形管情况较为类似, 但是截面积要大很多, 因此这一结果表明, 可以通过改变毛细管的形状来实现流速和流量的独立控制.

造成方形管的毛细流动与小得多的圆形管类似的原因, 就在于内角的存在. 很容易理解, 对于圆形截面毛细管, 管壁上液面应处于同一高度, 而当毛细管有内角存在时, 在内角附近液面则比壁面其他地方的液面明显要高. 因而, 体系进入微重力条件之前, 界面张力和重力的平衡使得内角附近液面有更大的曲率. 这样, 当尺寸差不多时, 有内角的毛细管中液面平均曲率与圆形管相比更大, 驱动液体

流动的毛细力也更大. 只有当有内角的毛细管的尺寸比圆形管大时, 它们的毛细力大小才可能会比较接近, 这就导致了图 5 所示的上述结果.

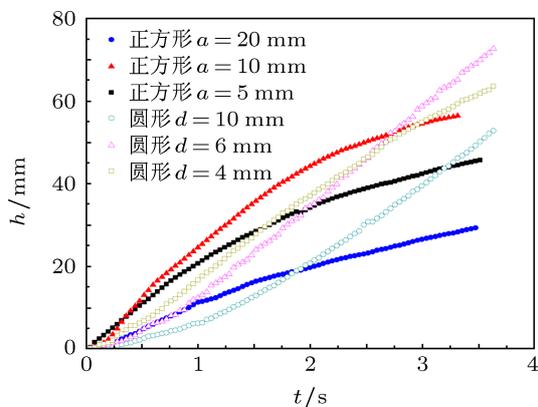


图 5 方形管与圆形管的落塔实验结果的比较

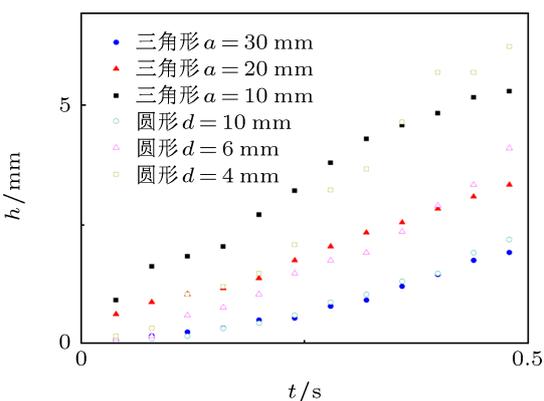
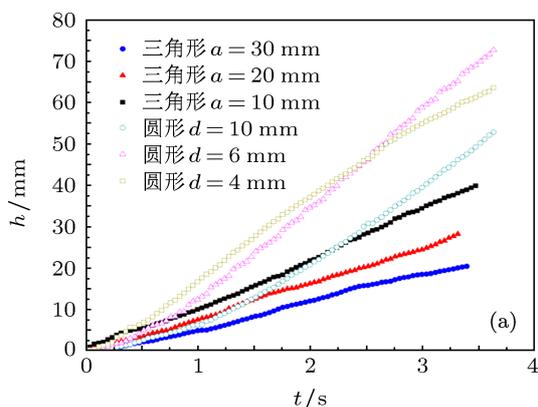


图 6 三角形管与圆形管的落塔实验结果的比较 (a) 3.6 s 的微重力时间结果; (b) 短时间的微重力实验结果

除了将方形管与圆形管进行比较之外, 三角形管和圆形管的对比见图 6, 其中图 6(a) 是 3.6 s 的微重力时间的实验结果, 而图 6(b) 是短时间的结果. 从图 6 可以看出, 边长为 10 和 20 mm 的三角形, 其初期的爬升高度要比三种圆形管都要快, 但后期都要更慢. 因而三角形截面管中的毛细爬升也与更小

尺寸的圆形管有类似的地方, 但是明显地, 三角形管中的毛细爬升速度要比圆形管中的要小得多, 并且曲线的交叉并没有发生在三角形管毛细爬升的减速阶段, 可见三角形管的形状效应的影响要比方形管更为突出. 这也表明, 与圆形毛细管中液体在微重力条件下的毛细爬升相比, 当毛细管截面与圆形差距越大, 其形状效应的影响也越明显.

4 结论

本文针对不同尺寸和三角形、正方形、圆形三种不同截面形状的毛细管, 利用落塔的短时微重力条件, 通过实验研究了界面张力主导的毛细流动过程, 并对实验结果进行了对比和分析.

实验结果表明, 当管的形状相同时, 在毛细流动的初始阶段, 管径越细, 在相同的微重力时间内液面的爬升高度越大, 若管径相对于外部容器尺寸较小, 在毛细流动的后期, 不同尺寸的 $h-t$ 曲线可能会发生交叉, 也即管径越粗反而爬升高度越大, 这一结果与文献中针对圆形管的已有结果类似, 说明毛细流动的不同阶段起主导作用的力是类似的.

另一方面, 本文的实验结果还表明, 这种 $h-t$ 曲线发生交叉的情况, 是管径相对于外部容器尺寸很小的时候才会发生, 当毛细管管径大到一定程度时, 外部容器的有限尺寸效应会显示出来, 此时随着管径增大, 驱动毛细流动的驱动力会明显减小, 导致小管径的 $h-t$ 曲线一直会高于大的管径.

通过对不同形状的管中的毛细流动行为的比较我们还发现, 对于方形管和三角形管中的毛细流动, 其 $h-t$ 曲线也会与圆形管的 $h-t$ 曲线发生交叉, 并且毛细流动的初期, 这两种管中的液面爬升高度都要比具有更细管径的圆形管要快, 因而都可以近似类比为更细尺寸的圆形管. 由于这种 $h-t$ 曲线的类似性的存在, 并且具有 $h-t$ 曲线类似性的 (不同截面形状的) 毛细管之间的截面积差别很大, 因此这一结果为在微重力条件下通过改变毛细管的形状来实现流速和流量的独立控制提供了实验基础和研究思路.

然而, 这种类比性是一个较为粗略的近似, 当管的形状与圆形差别越大时, 毛细管的形状效应的影响也越明显, 导致不同形状的毛细管中的 $h-t$ 曲线的趋势或者交叉情况变得更为复杂, 为了更深入认识管径形状的影响规律, 还需要更为详细的实验结果和更为定量的理论分析.

- [1] Young T 1805 *Phil. Trans. Roy. soc. Lond.* **95** 65
 [2] Bonn D, Eggers J, Indekeu J, Meunier J, Rolley E 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 739
 [3] De Gennes P G 1985 *Rev. Mod. Phys.* **57** 827
 [4] Chibowski E 2007 *Adv. Colloid Interface Sci.* **133** 51
 [5] Xu S H, Wang L W, Sun Z W, Wang C X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 166801 (in Chinese) [徐升华, 王林伟, 孙祉伟, 王彩霞 2012 物理学报 **61** 166801]
 [6] Sikalo S, Wihelm H D, Roisman I V, Jakirlic S, Tropea C 2005 *Phys. Fluids* **17** 062103
 [7] Reznik S N, Yarin A L 2002 *Phys. Fluids* **14** 118
 [8] Bazhlekov I B, Shopov P J 1997 *J. Fluid Mech.* **352** 113
 [9] Xu S H, Wang C X, Sun Z W, Hu W R 2011 *Int. J. Heat Mass Trans.* **54** 2222
 [10] Wang C X, Xu S H, Sun Z W, Hu W R 2010 *Int. J. Heat Mass Trans.* **53** 1801
 [11] Brady V, Concus P, Finn R 2003 *Phys. Fluids* **15** 1545
 [12] Tsori Y 2006 *Langmuir* **22** 8860
 [13] Erickson D, Li D, Park C B 2002 *J. Colloid Interface Sci.* **250** 422
 [14] Dreyer M E, Delgado A, Rath H J 1994 *J. Colloid Interface Sci.* **163** 158
 [15] Stange M, Dreyer M E, Rath H J 2003 *Phys. Fluids* **15** 2587
 [16] Wang C X, Xu S H, Sun Z W, Hu W R 2009 *AIAA J.* **47** 2642
 [17] Concus P, Finn R 1974 *Acta Math.* **132** 177
 [18] Concus P, Finn R 1974 *Acta Math.* **132** 207
 [19] Finn R 1984 *J. Reine Angew. Math.* **353** 196
 [20] Chen Y, Collicott S H 2004 *AIAA J.* **42** 305
 [21] Chen Y, Collicott S H 2005 *AIAA J.* **43** 2395
 [22] Chen Y, Collicott S H 2006 *AIAA J.* **44** 859
 [23] Ichikawa N, Satoda Y 1994 *J. Colloid Interface Sci.* **162** 350
 [24] Wolf F G, dos Santos L O E, Philippi P C 2010 *J. Colloid Interface Sci.* **344** 171
 [25] Zhang X Q, Yuan L G, Wu W D, Tian L Q, Yao K Z 2005 *Scien. China 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]
 [26] Weislogel M M, Ross H D 1990 *NASA-TM-103641* (NASA report)

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

Xu Sheng-Hua Zhou Hong-Wei Wang Cai-Xia Wang Lin-Wei Sun Zhi-Wei[†]

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

(Received 21 December 2012; revised manuscript received 16 January 2013)

Abstract

In this paper, we study the capillary flows in square tubes and in equilateral triangle tubes under microgravity condition by performing experiments in drop tower, and also compare them with those in circular tubes. Experimental results showed the influence of both size and shape of tubes on the capillary flow driven by interfacial forces. For tubes of the same shape, the influence of tube size is quite similar. Moreover, the capillary flows in square tubes and equilateral triangle tubes have some similarity with those in circular tubes with much smaller sizes. The results are helpful for understanding the capillary flows driven by interfacial forces with different parameters. And they are also useful for independently controlling the flow velocity and the volume flow rate by choosing appropriate tube shapes under microgravity condition.

Keywords: microgravity, capillary flow, shapes of capillary tubes

PACS: 47.55.nb, 68.03.-g, 68.08.Bc

DOI: 10.7498/aps.62.134702

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

[†] Corresponding author. E-mail: sunzw@imech.ac.cn