

El、Scopus 收录 中文核心期刊

基于磁补偿实验的微重力下毛细管内动态流动特性研究

金宇鹏,肖明堃,邱一男,王天祥,杨 光,黄永华,吴静怡

INVESTIGATION ON FLUID DYNAMICS IN A CAPILLARY TUBE UNDER MICROGRAVITY BASED ON THE MAGNETIC COMPENSATION EXPERIMENT

Jin Yupeng, Xiao Mingkun, Qiu Yi' nan, Wang Tianxiang, Yang Guang, Huang Yonghua, and Wu Jingyi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.6052/0459-1879-22-346

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超疏水小球低速入水空泡研究

STUDY ON LOW-SPEED WATER ENTRY OF SUPER-HYDROPHOBIC SMALL SPHERES 力学学报. 2019, 51(1): 36-45

轻敲模式下原子力显微镜的能量耗散

ENERGY DISSIPATION IN TAPPING MODE ATOMIC FORCE MICROSCOPY

力学学报. 2017, 49(6): 1301-1311

基于LBM的铝微滴斜柱沉积水平偏移研究

A LATTICE-BOLTZMANN METHOD SIMULATION OF THE HORIZONTAL OFFSET IN OBLIQUE COLUMN DEPOSITION OF ALUMINUM DROPLETS 力学学报. 2021, 53(6): 1599-1608

多相流动的光滑粒子流体动力学方法研究综述

A REVIEW OF SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS FAMILY METHODS FOR MULTIPHASE FLOW 力学学报. 2021, 53(9): 2357-2373

滴状模式下液桥形成及断裂的电流体动力学特性研究

ELECTROHYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF LIQUID BRIDGE FORMATION AT THE DRIPPING MODE OF ELECTROSPRAYS

力学学报. 2019, 51(2): 425-431

纳米阵列中气体驱替液体的流动特征

THE CHARACTERISTICS OF WATER FLOW DISPLACED BY GAS IN NANO ARRAYS 力学学报. 2018, 50(3): 553-560



关注微信公众号,获得更多资讯信息

2022 年 12 月 流体力学

基于磁补偿实验的微重力下毛细管内动态流动 特性研究¹⁾

金宇鹏* 肖明堃* 邱一男* 王天祥* 杨 光*,2) 黄永华* 吴静怡*

*(上海交通大学制冷与低温工程研究所,上海 200240) †(航天低温推进剂技术国家重点实验室,北京 100028)

(加入版础)=近刑股不固尔至高关题主, 犯不 100020)

摘要 微重力环境下流体由于受到毛细力的主导作用,其流动特性相较于地面常重力环境有着本质上的不同. 基于磁补偿原理,在地面上建立了具有高可调性的微重力模拟流动实验台,通过将实验数据与理论模型进行对 比的方法验证了实验系统的准确性,并对不同等效重力水平下竖直毛细管内水基磁流体的动态流动行为进行 研究.实验数据与两种采用不同动态接触角模型的理论模型解的平均相对偏差分别为 7.1% 和 13.7%,验证了利 用磁补偿方法开展微重力流动研究的可行性.进一步,定量研究了管径大小、等效重力水平以及接触角等因素 对毛细管内动态流动特性的影响.在近似零重力的环境下,可将动态流动过程分成三个阶段:即液面高度 h 先 后与 t², t, √t 成线性关系.管径对毛细爬升过程的影响复杂,其对流动的影响并不随着管径呈线性变化,在不同 的流动阶段对流速的影响规律也不相同.等效重力加速度越大,水基磁流体在管内的毛细爬升能力越差,且越 难观察到第一毛细爬升阶段的存在.相同条件下,流体的前进接触角越大,其毛细爬升速率越小.

关键词 微重力,磁补偿,水基磁流体,毛细力,流体动力学

中图分类号: TQ028.8 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-22-346

INVESTIGATION ON FLUID DYNAMICS IN A CAPILLARY TUBE UNDER MICROGRAVITY BASED ON THE MAGNETIC COMPENSATION EXPERIMENT¹⁾

Jin Yupeng * Xiao Mingkun * Qiu Yi'nan [†] Wang Tianxiang [†] Yang Guang ^{*, 2)} Huang Yonghua * Wu Jingyi * * (Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China) [†] (State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China)

Abstract Due to the dominance of capillary force, the flow characteristics of fluid in microgravity environment are essentially different from those in normal gravity environment. Based on the principle of magnetic compensation, an experiment platform simulating the flow under microgravity with high tunability is established on the ground. The accuracy of the experimental system is verified by comparing the experimental data with the theoretical models, and the dynamic flow behavior of water-based magnetic fluid in vertical capillary tube under different equivalent gravity levels is studied. By comparing the experimental data with the different theoretical model solutions, the feasibility of using the

²⁰²¹⁻¹¹⁻³⁰ 收稿, 2022-10-18 录用, 2022-10-19 网络版发表.

¹⁾ 国家自然科学基金 (51936006, 52276013) 和航天低温推进剂技术国家重点实验室基金 (SKLTSCP202005, 02021A16297) 资助项目. 2) 杨光, 副教授, 主要研究方向: 多相流动与低温传热. E-mail: y_g@sjtu.edu.cn

引用格式:金字鹏,肖明堃,邱一男,王天祥,杨光,黄永华,吴静怡.基于磁补偿实验的微重力下毛细管内动态流动特性研究.力学学报,2022,54(12):3408-3417
 Jin Yupeng, Xiao Mingkun, Qiu Yi'nan, Wang Tianxiang, Yang Guang, Huang Yonghua, Wu Jingyi. Investigation on fluid dynamics in a capillary tube under microgravity based on the magnetic compensation experiment. *Chinese Journal of Theoretical and Applied*

Mechanics, 2022, 54(12): 3408-3417

magnetic compensation method to carry out the investigation on microgravity flow is verified. The average deviation between the experimental results obtained by the magnetic compensation method and the two theoretical model solutions using different dynamic contact angle models is 7.1% and 13.7% respectively. Furthermore, the influence of factors such as pipe diameter, equivalent gravity level and dynamic advancing contact angle on the dynamic flow characteristics in the capillary tube has been quantitatively studied. In a near zero-gravity environment, the flow development process can be divided into three stages where the liquid level *h* has a linear relationship with t^2 , t, \sqrt{t} successively. The pipe diameter has a complicated affect on the capillary climbing process. The influence of pipe diameter on flow does not change linearly with pipe diameter and its influence on the flow velocity is different among flow stages. For the capillary flow in the vertical direction, the greater the equivalent gravitational acceleration, the worse the capillary climbing ability of the magnetic fluid in the tube, and the more difficult it is to observe the existence of the first capillary climbing stage. Under the same conditions, the larger the dynamic advancing contact angle of the fluid, the smaller the capillary climbing velocity.

Key words microgravity, magnetic compensation, water-based magnetic fluid, capillary force, fluid dynamics

引 言

随着航天技术不断发展, 微重力下的流体贮存 和管理问题变得至关重要^[1-3], 如维持生命所需的液 体获取、废水的回收处理、推进剂的存储与输运、 冷却剂的管理等. 在这些问题中, 由于重力作用的减 弱, 表面张力在流动控制方面发挥着主导作用. 提高 微重力条件下的液体管理能力有赖于对表面张力主 导下的毛细流动机理的深入探究^[4-9].

毛细管内的液体流动作为基本流体输运模型之 一,从上世纪便受到了人们的广泛研究[10-13].如 Levine 等^[14] 提出了描述圆管内毛细爬升运动的方 程,并考虑了入口流的效应.之后, Stange 等[15] 提出 了被人们广泛接受的微重力环境下圆管内毛细爬升 理论模型,该理论模型反映的毛细爬升规律在许多 微重力实验中得到了验证. 徐升华等[16] 探究了管截 面对微重力环境下毛细爬升的影响. 李永强等[17] 基 于 Stange 等^[15] 的理论模型,利用同伦法研究了微重 力环境下圆管毛细流动的近似解析解.之后, Wang 等[18]研究了接触角与管径对微重力环境下圆管内 毛细爬升的影响,并与 Stange 等[15] 提出的理论模型 进行对比验证.周宏伟等[19]还在 Stange 等[15]的理 论模型上进行修正,提出了微重力条件下与容器相 连的毛细管中液面爬升理论模型. Wang 等^[20] 探究 了动态接触角对管内液体爬升的影响,并针对振荡 行为建立了理论模型. Chen 等[21] 推导了椭圆截面管 内毛细管驱动流动方程.目前微重力环境下管内液 体流动行为的理论研究已经较为成熟,然而各因素 对爬升动态规律影响的实验验证研究仍有欠缺.并 且由于实验手段的限制,在不同重力水平下的管内 毛细爬升行为仍有待探索.

在实验研究方面,传统用于微重力流动特性研 究的实验方法还有探空火箭、载人飞船、空间站和 落塔等[22-24]. 其中探空火箭、载人飞船、空间站等 方式成本高且任务排队周期长,不利于进行长期的 微重力研究. 落塔作为一个相对容易获得的微重力 实现方式,是目前人们研究微重力环境下液体流动 特性的主要手段[25-27]. 然而由于落塔无法实现重力 水平的调节,等效重力水平对管内毛细流动的影响 规律仍然缺少实验验证,并且落塔由于其实验过程 短暂,也难以实现微重力下流体热物理规律的研究. 基于磁补偿原理可在地面上实现微重力模拟环境, 利用梯度磁场产生的磁场力对含有磁性纳米颗粒的 磁流体进行等效重力补偿.该方法具有重力水平可 调节、微重力时间长、可视化成本低以及允许介入 操作等优点.张泽宇等[28-29]探究了磁补偿系统非均 匀度对液体流动的影响. 肖明堃等[30] 模拟了非均匀 磁场作用下微重力环境中液氧气液相界面分布规 律. 沈逸等[31] 利用磁补偿系统进行了微重力下内角 流动研究.

本文以水基磁流体为实验工质,基于磁补偿方 法开展微重力模拟实验.通过将实验数据与理论模 型对比,验证了利用磁补偿方法进行微重力下流体 流动研究的可行性.探究微重力环境下毛细管内的 动态毛细爬升规律,并明确毛细管结构参数、等效 微重力水平以及接触角对毛细管内毛细流动行为的 影响规律,相关结果对下一步开展低温推进剂在空 力

间微重力环境下表面张力管理研究有重要指导意义.

1 基于磁补偿原理的微重力模拟实验

本文研究所利用的常温磁补偿实验系统如图 1 所示^[31]. 主要由亥姆霍兹-麦克斯韦双对超导线圈、 水冷系统、精准定位装置、实验腔体等组成. 亥姆 霍兹-麦克斯韦双对超导线圈同轴装配, 使得产生的 均匀磁场与均匀梯度磁场在双对超导线圈中间. 其 中均匀磁场对磁流体起到磁化作用, 磁场强度大小 沿高度方向线性变化的均匀梯度磁场使磁流体受到 与重力方向相反的力. 实验腔体采用内径为 30 mm, 高度为 70 mm 的圆柱亚克力玻璃容器. 通过实验系 统内的精准定位装置 (定位精度 1 µm), 调整实验腔 体在双对超导线圈内部的物理空间位置, 使得实验 腔体可放置于磁场的中轴线上. 使用高速相机对毛 细管内的动态毛细爬升过程进行拍摄. 为了更清晰 地捕捉液面运动, 使用 LED 光源对实验腔体进行辅 助照明.



磁补偿实验系统中,磁体最大磁场为 1000 Gs. 有效实验区域为 Φ40 mm × 80 mm,该区域内对实验 工质达到完全磁补偿时,梯度磁场的纵向非均匀度 为 ±2.5%^[31-35].利用装载有步进电机的测磁装置对 加入磁流体前后实验系统内的磁场强度大小进行测量对比,结果显示加入磁流体造成的实验系统内磁场强度变化可以忽略.实验前利用装有实验工质的玻璃容器和拉力计对实验区域内磁场力补偿重力的效果进行校准.将玻璃容器悬挂在拉力计上,拉力计示数随着补偿磁场的增大而减小,示数减少的数值即为容器内实验工质的等效重力补偿值.使用的拉力计精度为1mN,玻璃容器内的实验工质的重力为2N,因此可以认为本实验系统对于微重力环境的分辨率为5.0×10⁻⁴g.该实验系统的重力补偿水平与麦克斯韦线圈电流之间近似呈线性关系^[31],实验区域内等效重力水平为0g,g/6,g/2时,麦克斯韦线圈中的电流分别为76A,63A,38A.

实验腔体内部构造示意图如图 2 所示,在实验 腔体内装有中间打孔的亚克力玻璃挡板,既能够使 毛细管竖直插入在实验腔体中间,也能够抑制实验 过程中水基磁流体沿着实验腔体内壁爬升.实验所 使用的毛细管通过亚克力挡板中间的小孔插入水基 磁流体中,每次实验的初始插入深度 h₀ 均为 10 mm.



图 2 实验腔体内部示意图 Fig. 2 Schematic diagram of the inside of the experimental chamber

磁补偿微重力实验的工质为在外加磁场下具有 超顺磁性的水基磁流体.采用的磁流体在被磁化后 仍具有良好的流动性能和稳定性,且其均匀性和主 要物性不发生明显变化^[36-41].将水基磁流体与去离 子水进行配比,水基磁流体/去离子水的体积比为 40/60.配比得到的水基磁流体溶液的相关物性参数 经过多次测量取平均值,列于表 1.其中 ρ 为液体密 度, σ 为液体表面张力,v为运动黏度. σ 与v分别采 用悬滴法、旋转法测量. a_{a1} 和 a_{a2} 分别为水基磁流 体溶液在石英玻璃和亚克力玻璃上的前进接触角, 采用液滴体积增加法测量 (图 3). 文献 [38] 表明,对 于本实验系统中的磁场强度范围,磁场对流体表面 张力和固体表面特性的影响可忽略,因此在本实验

3411

表1 体积比为 40/60 的水基磁流体/去离子水溶液的物性参数

Table 1 Physical properties of water-based magnetic fluid/deionized water solution with a volume ratio of 40/60

Physical property	$ ho/(kg \cdot m^{-3})$	$\sigma/(mN \cdot m^{-1})$	v/(mPa·s)	$\alpha_{a1}/(^{\circ})$	$\alpha_{a2}/(^{\circ})$
(measurement error)	(2%)	(2%)	(2%)	(±5%)	(±5%)
Result	1163	36.2	0.93	66	88

研究中忽略磁场对接触角的影响.为了避免表面污 染对于测量与实验结果的影响,实验所使用的石英 玻璃平板与石英毛细管都经过两次无水乙醇的冲 洗,并在无水乙醇溶液中进行 300 s 的超声清洗,然 后用去离子水进行 3 次冲洗,最后使其自然风干.由 于无水乙醇对亚克力玻璃有腐蚀作用,亚克力玻璃 平板与毛细管的清洗过程均采用去离子水,其清洗 步骤与石英玻璃相同.



 (a) 水基磁流体在石英玻璃上的前进接触角
 (a) Forward contact angle of water-based magnetic fluid on quartz glass



(b) 水基磁流体在亚克力玻璃上的前进接触角(b) Forward contact angle of water-based magnetic fluid on acrylic glass

图 3 磁流体在不同表面上的前进接触角测量 Fig. 3 Forward contact angle measurement of magnetic fluid on different surfaces

实验过程中通过高速相机进行液面形态的记录 与存储.最后通过基于 Matlab 的图像识别程序对实 验视频进行处理,记录水基磁流体溶液在毛细管中 的动态爬升特性.图4为0(±5.0×10⁻⁴)g环境下 2mm 管径石英玻璃管内磁性流体动态爬升示意图.



quartz glass tube with a diameter of 2 mm

2 实验结果与讨论

2.1 毛细管流动实验结果与理论模型的对比分析

由于实验目标区域内梯度磁场的纵向非均匀度 为 ±2.5%,为定量研究该因素对实验结果的影响并 进一步验证基于磁补偿原理开展微重力环境下流体 流动实验的可行性,将近似零重力条件下的流体爬 升特性与理论模型进行对比.

式 (1) 是由 Stange 等^[15] 基于数值解和实验相结合的方法提出的微重力下圆管内毛细爬升高度随时间变化的理论模型, 该模型已通过落塔实验验证并被用于更深入的研究^[16-19]

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

其中, h 为毛细管内弯月面高度, h₀ 为毛细管的初始 插入深度, R 为毛细管内径, σ 为液体表面张力, ρ 为 液体密度, s 反映了微重力环境下初始爬升阶段毛细 管内弯月面重新定向的过程, α, 为前进接触角, R_c为实验腔体液面的曲率半径, v为液体黏度, K_{ts2}为对流损失的修正系数.等式右边大括号内从左 到右依次为表面张力驱动项、黏滞力项和对流损失 项.该理论模型考虑了弯月面的重新定向、前进接 触角、惯性力以及流动损失等因素的影响.式(1)描 述的微重力下圆管内毛细流动分为三个连续的阶 段. 第一阶段为纯惯性阶段, 由惯性力对抗毛细驱动 力,毛细管内弯月面高度 h 与 t² 成线性关系;第二阶 段为对流损失主导,弯月面高度 h 与时间 t 成线性 关系; 第三阶段主要考虑到黏滞力的影响, 毛细管内 爬升规律遵循 Lucas-Washburn 行为,弯月面高度 *h* 与√*t* 成线性关系^[15].

本文采用 0 (±5.0×10⁻⁴)g 环境下内径为 1, 2, 4 mm 石英玻璃毛细管中的毛细爬升与理论模型进 行对比, 对磁补偿实验台的实验偏差进行验证. 值得 注意的是, 由于目前没有绝对完善的动态接触角理 力

论模型,本文在式(1)中分别使用由液滴体积增加法测得的前进接触角(图3)以及由Jiang模型^[20,42]所表示的动态接触角,获得解析解.

理论模型与实验的对比结果如图 5 所示,图中 的误差线为四次独立重复实验结果的标准差.实验 与采用两种不同接触角模型的理论解析解的平均相 对偏差分别为 7.1%(液滴体积增加法)和 13.7% (Jiang 动态接触角模型).综合考虑对比结果和实验







误差,可以认为本文使用的磁补偿实验台能够用于 对微重力下毛细管内动态流动特性的实验分析.

2.2 管径对毛细爬升的影响

图 6 为 0 (±5.0 × 10⁻⁴)g 下不同管径的石英玻璃 毛细管内流体动态运动的 *h-t* 图. 从图中可以看出, 1 mm 毛细管中的液面高度随时间变化与理论模型 一致,其爬升先后经历了三个阶段,三个阶段之间的 时间分界点分别约为 0.1 s 和 0.3 s; 2 mm 毛细管的 爬升曲线虽然没有出现明显的第三阶段,但已经呈 现向下弯折的趋势;由于实验区域大小的限制,在实 验结束时, 4 mm 毛细管内毛细爬升仍处于第二阶 段. 文献 [15,18] 中的落塔实验也有类似的现象,即 当高度或流动时间有限时,大管径的毛细管内只能 观察到前两个爬升阶段.

在 0.15 s 之前, 同一时刻内毛细管弯月面的高度随着管径的变小而变大. 当磁补偿环境开启, 毛细爬升开始时, 管内液体的高度与速度较小, 对应的黏



图 6 不同管径石英玻璃管内的毛细爬升过程

Fig. 6 Capillary climbing process in quartz glass tubes with different diameters

滞力与对流损失可忽略不计,管内液体的爬升主要 由毛细压强驱动.由于毛细压强随着管径的增大而 减小,因此在初始爬升阶段,同一时刻内小的毛细管 对应高的弯月面高度与速度.例如在 t=0.08 s 时,1, 2,4 mm 毛细管内弯月面的爬升速率分别约为 86 mm/s, 79 mm/s, 56 mm/s.

随着时间 t 的增长, 管径 1 mm 的毛细管液面爬 升率先经历第二阶段,并转向第三阶段,最终趋于平 缓. 在 0.17 s 左右, 其弯月面高度被 2 mm 毛细管超 过,并在 0.5 s 左右被 4 mm 毛细管超过.由式 (1) 可 得,导致毛细爬升过程由第一阶段向第二阶段转换 的关键因素是随着流动的发展,液面上升速率h的增 大使得与h² 成正比关系的对流损失项变得不可忽 略.小管径毛细管内虽然有大的驱动力.但是在爬升 初期其对应的对流损失阻力较大.因此,导致了 2 mm 管内弯月面高度在 0.17 s 超过 1 mm 管. 1 mm 管在 0.1 s 附近就开始受到对流损失项的主导 作用,弯月面上升速率在 0.1 s 左右达到峰值并开始 下降. 而此时 2 mm 管内弯月面上升仍受毛细驱动 力的主导作用,处于速度上升阶段,并且在0.15 s 左 右其速度增大趋势才开始变得缓慢.

在实验区域内,4mm 毛细管内弯月面的高度总 是低于2 mm 毛细管. 但是在实验区域末段, 2 mm 管内毛细爬升已经有了向第三阶段转换的趋 势,4mm管内则仍处于第二阶段并且管内弯月面高 度已经有了赶超 2 mm 毛细管的趋势. 促使近似 0g环境下毛细流动由第二阶段进入第三阶段的主 要因素是黏滞力作用的变大.由式(1)可得,黏滞力 项的影响因素有管径大小 R、弯月面高度 h 与弯月 面爬升速率h.其中对毛细爬升过程进入第三阶段起 关键作用的是速率 h. 速率的下降同时对黏滞力项与 对流损失项起削弱作用. 然而黏滞力项与h 成线性关 系, 对流损失项则与h² 成线性关系. 进入第二阶段 后,毛细爬升速率的波动下降加强了黏滞力项的作 用.随着速率的减小,黏滞力占主导地位,流动也因 此进入第三阶段. 在观察范围内, 4 mm 毛细管内爬 升速率并未出现持续的急剧下降, 而是一直在 83 mm/s 附近波动, 这也是导致 4 mm 管内观察不到 明显的第三阶段规律的原因.由此推测,若是能够将 磁补偿实验区域增大,4mm 毛细管内弯月面爬升会 经历第三阶段,并且其高度 h 将会超越 2 mm 毛细管. 如图 6,不同管径的毛细管内弯月面爬升速率变 化趋势显示出良好的一致性. 初始阶段, 管内的弯月 面爬升速率迅速变大,速率达到峰值以后,会经历波 动下降的过程,其中1,2,4 mm 管内爬升速率达到 峰值的时间分别约为 0.11 s, 0.17 s, 0.18 s. 在爬升速 率达到峰值之前,同一时刻内小管径毛细管中的弯 月面爬升速率大于大管径毛细管. 值得注意的是, 由 于加速阶段的时长不同,最大速度并不与管径大小 的变化一致.其中2mm毛细管内速率峰值最大, 1 mm 毛细管次之, 4 mm 毛细管最小. 实际上, 由式 (1) 可得,相同材质毛细管内弯月面上升加速度的大 小不仅受到上升速率的影响,还与管内弯月面高度 与管径等有关,因此管内弯月面上升速率达到峰值 的时刻以及峰值大小并不与管径成线性关系.同样 地,管内流动状态由前一阶段转向后一阶段的时刻 也不与管径成线性关系.

从图 6(a) 中可以发现, 1, 2, 4 mm 管内爬升曲线 在初始阶段都是下凹趋势,经历短暂的 $h = t^2$ 成线 性关系趋势后,会马上进入近似h与t成线性关系 阶段.对比图 6(b),均稍早于其各自速率达到峰值的 对应时刻.这说明,在毛细爬升速率达到峰值之前, 毛细管内的爬升过程就已处于第二阶段.1 mm 毛细 管内流动进入第三阶段的时刻约为 0.3 s; 2 mm 毛细 管内在 0.4 s 附近呈现进入第三阶段的趋势; 经历 0.58 s 后 4 mm 毛细管内流动并未进入第三阶段.

如图 7 所示,为了更准确地反映管径对管内液 体爬升规律的影响和管内动态流动特性,参照文 献 [15] 对 h 与 t 进行无量纲化: h_{*} = h/v_c, t_{*} = t/t_c. 其 中 $v_{c} = \sqrt{4\sigma/(\rho d)}$,为管内爬升的理论最大速度,表征 流动进入第二阶段; $t_c = \rho d^2/(32\nu)$,为理论上黏滞力 主导时刻, 表征流动进入第三阶段. 观察图 7 得, 管



图 7 不同管径石英玻璃管内的毛细爬升速度--时间的无量纲化 Dimensionless representation of velocity-time for quartz glass Fig. 7 tubes with different diameters

径越小,其流动过程越趋向于第三阶段,反之,管径 越大,其流动过程越趋向于第一阶段.在各组实验结 束时:4 mm 管内t_{*}约等于t_c,且*h*_{*}仍在高位,表明其 流动仍处于第二阶段;2 mm 管内t_{*}超出t_c不远,且无 量纲速度开始呈现下降的趋势,说明其流动正从第 二阶段向第三阶段转换;1 mm 管内t_{*}远大于t_c,且无 量纲速度已经呈明显下降,这说明其流动已经进入 第三阶段,这与前文分析相符合.

2.3 等效重力水平对毛细爬升的影响

为了研究等效重力水平对管内毛细爬升特性的 影响,采用管径 1 mm 石英玻璃毛细管在 g/6, g/2, 1g 下进行毛细爬升实验,并与近似 0g 实验结果进行 对比,结果如图 8.随着环境重力水平的提高,弯月面 上升的速率与高度都有明显的下降.在环境重力存 在的三种情况下,都可以观察到弯月面高度趋于稳 定.根据其爬升曲线的趋势推断, g/6, g/2 与常重力 环境下管内弯月面高度将分别稳定在 30 mm,



图 8 等效重力水平对管内毛细爬升的影响 (重力水平不确定度 ±5.0×10⁻⁴g)

Fig. 8 Influence of equivalent environmental gravity level on capillary climb in tubes (the gravity uncertainty is $\pm 5.0 \times 10^{-4}g$)

20 mm, 10 mm 附近. 在三种微重力环境下, 管内毛 细爬升速度都可以观察到明显的先急剧增大后波动 下降的规律. 常重力环境下则观察不到明显的速度 上升阶段.

观察图 8 可知,环境重力存在的情况下,管内弯 月面上升都存在明显的第二、第三阶段.为了探究 不同等效环境重力的情况下管内弯月面上升是否会 经历第一阶段,如图9,将观察的时间和高度范围分 别缩小到 0.15 s 和 6 mm. 可以看到, 在 6 mm 的观察 范围内, 0g 环境下弯月面高度 h 与 t² 成线性关系, 这与前文的分析所符合;g/6环境下也是如此.g/2环 境下毛细管内弯月面的高度 h 仅仅在初始的约 0.05 s 内与 t² 成线性关系, 而后转换为与时间 t 成弱 线性关系.1g环境下管内毛细爬升过程中,基本观察 不到第一阶段的存在,其弯月面高度从初始时刻便 呈现与时间 t 的弱线性关系. 在约 0.12 s 以后, 其爬 升趋势开始逐渐变缓.在重力存在的环境下,弯月面 爬升速率较小且上升较慢,对应的对流损失项较小, 这有利于毛细流动第一阶段的存在. 但是环境重力 不仅会直接影响毛细爬升中惯性力的大小,还会在 毛细管内液柱体积增大时使弯月面上升速率减小. 因此等效环境重力越大,对应的管内毛细流动过程 中越难以观察到第一阶段规律的出现.



图 9 0.15 s 内不同等效环境重力下的石英玻璃管内毛细爬升过程 (重力水平不确定度 ±5.0×10⁻⁴g)



2.4 接触角对毛细爬升的影响

接触角也是影响管内毛细爬升的关键因素. 图 10 为 0 (±5.0 × 10⁻⁴)g 环境下水基磁流体在管径 1 mm 的石英玻璃和亚克力玻璃管内毛细爬升过程. 大的前进接触角会降低管内毛细爬升的高度与速



Fig. 10 Capillary climb in tubes with different materials

度,并且当前进接触角较大时,很难在毛细爬升初期 观察到明显的第一阶段.在观察范围内,亚克力管内 的爬升高度 h 整体与时间 t 成弱线性关系.大的接 触角对应小的毛细驱动力.亚克力管内较大的前进 接触角使得其内毛细爬升在纯惯性阶段的加速度较 小,其初始阶段的加速时间也较小,因而对流损失项 与黏滞力项变得不可忽略,故亚克力管内的爬升过 程无法观察到明显的第一阶段.

3 结论

本文利用常温磁补偿实验系统进行微重力环境 下毛细管内动态流动特性研究.依托于该常温磁补 偿实验系统,对微重力环境下不同管径的毛细管内 动态流动规律进行研究,并探究了等效环境重力水 平、接触角对管内流动规律的影响.

(1) 在近似零重力环境下不同管径的毛细管内 弯月面爬升高度、爬升速率与 Stange 等^[15] 提出的 理论模型具有良好的一致性, 模型结果在实验误差 之内.实验结果与利用两种不同动态接触角模型获 得的理论模型解的平均偏差分别为 7.1% 和 13.7%, 因此进一步验证了利用磁补偿方法进行微重力下液 体流动研究的可行性.

(2) 微重力环境下液体爬升高度会经历三个不同的阶段, 先后与 t², t 与√t 成线性关系. 弯月面上升速率会先迅速增大, 而后波动下降, 是影响管内毛细流动过程在三个阶段之间转换的重要因素.

(3) 管径对毛细爬升规律的影响较为复杂. 初始 阶段, 管径越小弯月面上升高度越大; 随着毛细爬升 过程的发展, 大管径毛细管内弯月面高度可能会超 过小管径. 管内弯月面上升速率都会经历迅速上升 后波动下降的过程, 然而上升速率的峰值与速率峰 值对应的时刻大小不与管径成线性关系.

(4)环境重力的存在会影响管内弯月面上升的 规律.重力存在的情况下,管内弯月面上升高度最终 会趋于稳定.等效环境重力水平越大,对应的速率与 高度越小.等效环境重力水平越高,越难以观察到管 内毛细爬升过程中第一阶段的规律.

(5)前进接触角的增大会减缓管内毛细爬升速度,且随着前进接触角的变大,越难以观察到第一阶段的存在.

参考文献

- Doherty M, Gaby J, Salerno L, et al. Cryogenic fluid management technology for moon and mars missions//AIAA Space 2009 Conference & Exposition, 2009: 6532
- 2 魏月兴,陈小前,黄奕勇.内角流动及其在卫星贮箱设计中的应用.中国科学:技术科学,2011,41(9):1218-1224 (Wei Yuexing, Chen Xiaoqian, Huang Yiyong. Interior corner flow theory and its application to the satellite propellant management device design. *Scientia Sinica: Technologica*, 2011, 41(9):1218-1224 (in Chinese))
- 3 王磊, 厉彦忠, 马原等. 液体推进剂在轨加注技术与加注方案. 航 空动力学报, 2016, 31(8): 2002-2009 (Wang Lei, Li Yanzhong, Ma Yuan, et al. On-orbit refilling technologies and schemes of liquid propellant. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(8): 2002-2009 (in Chinese))
- 4 Weislogel MM, Lichter S. Capillary flow in an interior corner. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 373: 349-378
- 5 Xu SH, Wang CX, Sun ZW, et al. The influence of contact line velocity and acceleration on the dynamic contact angle: An experimental study in microgravity. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2011, 54(9-10): 2222-2225
- 6 李京浩, 陈小前, 黄奕勇. 基于内角流动的板式表面张力贮箱内推 进剂流动过程研究. 国防科技大学学报, 2012, 34(4): 18-21 (Li

力

Jinghao, Chen Xiaoqian, Huang Yiyong. A study of propellant flow in the vane-type surface tension tank based on interior corner flow. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(4): 18-21 (in Chinese))

- 7 李永强, 刘玲. 微重力下变内角毛细驱动流研究. 物理学报, 2014, 63(21): 214704 (Li Yongqiang, Liu Lin. A study of capillary flow in variable interior corners under microgravity. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 214704 (in Chinese))
- 8 Zouganelis GD, Gkigkitzis I, Haranas I. Enhanced capillary rise of wetting liquids in reduced gravitational shielding under microgravity conditions. *Physics International*, 2014, 5(2): 140-151
- 9 陈上通, 吴笛, 王佳等. 微重力下成一定夹角平板间的表面张力驱 动流动的研究. 力学学报, 2022, 54(2): 326-335 (Chen Shangtong, Wu Di, Wang Jia, et al. Capillary rise of liquid between plates with a certain angle under microgravity. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(2): 326-335 (in Chinese))
- 10 Brittin WE. Liquid rise in a capillary tube. *Journal of Applied Physics*, 1946, 17(1): 37-44
- 11 Sparrow EM, Lin SH, Lundgren TS. Flow development in the hydrodynamic entrance region of tubes and ducts. *Physics of Fluids*, 1964, 7(3): 338-347
- 12 Schmidt FW, Zeldin B. Laminar flows in inlet sections of tubes and ducts. *AIChE Journal*, 1969, 15(4): 612-614
- 13 Zhmud BV, Tiberg F, Hallstensson K. Dynamics of capillary rise. Journal of Colloid & Interface Science, 2000, 228(2): 263-269
- 14 Levine S, Reed P, Watson EJ, et al. A theory of the rate of rise of a liquid in a capillary. *Colloid and Interface Science*, 1976, 3: 403-419
- 15 Stange M, Dreyer ME, Rath HJ. Capillary driven flow in circular cylindrical tubes. *Physics of Fluids*, 2003, 15(9): 2587-2601
- 16 徐升华,周宏伟, 王彩霞等. 微重力条件下不同截面形状管中毛细 流动的实验研究. 物理学报, 2013, 62(13): 134702 (Xu Shenghua, Zhou Hongwei, Wang Caixia, et al. Experimental study on the capillary flow in tubes of different shapes under microgravity condition. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13): 134702 (in Chinese))
- 17 李永强, 张晨辉, 刘玲等. 微重力下圆管毛细流动解析近似解研 究. 物理学报, 2013, 62(4): 044701 (Li Yongqiang, Zhang Chenhui, Liu Lin, et al. The analytical approximate solutions of capillary flow in circular tubes under microgravity. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044701 (in Chinese))
- 18 Wang C, Xu S, Sun Z, et al. Influence of contact angle and tube size on capillary-driven flow under microgravity. *AIAA Journal*, 2015, 47(11): 2642-2648
- 19 周宏伟, 王林伟, 徐升华等. 微重力条件下与容器连通的毛细管中 的毛细流动研究. 物理学报, 2015, 64(12): 124703 (Zhou Hongwei, Wang Linwei, Xu Shenghua, et al. Capillary-driven flow in tubes connected to the containers under microgravity condition. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 124703 (in Chinese))
- 20 Wang Q, Li L, Gu J, et al. A dynamic model for the oscillatory regime of liquid rise in capillaries. *Chemical Engineering Science*, 2019, 209: 115220
- 21 Chen S, Ye Z, Duan L, et al. Capillary driven flow in oval tubes un-

der microgravity. Physics of Fluids, 2021, 33(3): 032111

- 22 韦明罡, 万士昕, 姚康庄等. 国家微重力实验室落塔及微重力实验研究. 载人航天, 2007(4): 1-3, 22 (Wei Minggang, Wan Shixin, Yao Kangzhuang, et al. Drop tower and microgravity experiment research of national microgravity laboratory. *Manned Spaceflight*, 2007(4): 1-3, 22 (in Chinese))
- 23 姜秀杰, 刘波, 于世强等. 探空火箭的发展现状及趋势. 科技导报, 2009, 27(23): 101-110 (Jiang Xiujie, Liu Bo, Yu Shiqiang, et al. Development status and trend of sounding rocket. *Science & Technology Review*, 2009, 27(23): 101-110 (in Chinese))
- 24 杨彪, 胡添元. 空间站微重力环境研究与分析. 载人航天, 2014, 20(2): 178-183 (Yang Biao, Hu Tianyuan. Study and analysis of microgravity environment onboard manned space station. *Manned Spaceflight*, 2014, 20(2): 178-183 (in Chinese))
- 25 Weislogel MM, Nardin CL. Capillary driven flow along interior corners formed by planar walls of varying wettability. *Microgravity-Science and Technology*, 2005, 17(3): 45-55
- 26 Chen YK, Weislogel MM, Bolleddula DA. Capillary flow in cylindrical containers with rounded interior corners//45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2007: 745
- 27 Wang CX, Xu SH, Sun ZW, et al. A study of the influence of initial liquid volume on the capillary flow in an interior corner under microgravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(9-10): 1801-1807
- 28 张泽宇. 磁补偿微重力下磁流体毛细流动特性仿真和实验研究. [博士论文]. 上海: 上海交通大学, 2019 (Zhang Zeyu. Simulation and experimental study of magnetofluid capillary flow under magnetic compensation microgravity. [PhD Thesis]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019 (in Chinese))
- 29 张泽宇,黄永华,梁益涛等.磁场力非均匀度对液氧磁补偿微重力 自由界面的影响.真空与低温, 2019, 25(6): 372-378 (Zhang Zeyu, Huang Yonghua, Liang Yitao, et al. Impact of magnetic force inhomogeneity on free surface of liquid oxygen under magnetically compensated microgravity. *Vacuum and Cryogenics*, 2019, 25(6): 372-378 (in Chinese))
- 30 肖明堃,黄永华,吴静怡等.非均匀磁场力作用下微重力液氧气液 界面特性. 制冷技术, 2020, 40(6): 1-11 (Xiao Mingkun, Huang Yonghua, Wu Jingyi, et al. Gas-liquid interface behavior of liquid oxygen in compensated microgravity field with inhomogeneous magnetic force. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2020, 40(6): 1-11 (in Chinese))
- 31 沈逸,张泽宇,梁益涛等. 磁补偿微重力环境实现及磁流体微重力 内角流动研究. 化工学报, 2020, 71(8): 3490-3499 (Shen Yi, Zhang Zeyu, Liang Yitao, et al. Realization of microgravity environment by magnetic compensation and study on interior corner flow of magnetic fluid in microgravity. *CIESC Journal*, 2020, 71(8): 3490-3499 (in Chinese))
- 32 Wunenburger R, Chatain D, Garrabos Y, et al. Magnetic compensation of gravity forces in (p-) hydrogen near its critical point: Application to weightless conditions. *Physical Review E*, 2000, 62(1): 469-476

- 33 Quettier L, H Félice, Mailfert A, et al. Magnetic compensation of gravity forces in liquid/gas mixtures: surpassing intrinsic limitations of a superconducting magnet by using ferromagnetic inserts. *European Physical Journal Applied Physics*, 2005, 32(3): 167-175
- 34 Nikolayev VS, Garrabos Y, Lecoutre C, et al. Magnetic gravity compensation. *Microgravity Science and Technology*, 2011, 23(2): 113-122
- 35 Nikolayev VS, Garrabos Y, Lecoutre C, et al. Evaporation condensation-induced bubble motion after temperature gradient set-up. *Comptes Rendus Mécanique*, 2017, 345(1): 35-46
- 36 Hamedani HM, Davis LR. An experimental investigation of the properties of magnetic fluid in thermal rejection applications//Proceedings of Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, ASME, New York. 1988: 359-364
- 37 Qiang L, Xuan Y, Jian W. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2006, 30(2): 109-116
- 38 Flament C, Lacis S, Bacri JC, et al. Measurements of ferrofluid surface tension in confined geometry. *Physical Review E*, 1996, 53(5): 4801-4806

- 39 许春龙. 磁重力补偿下磁流体的自然对流与沸腾传热实验研究. [博士论文]. 上海: 上海大学, 2015 (Xu Chunlong. Study on natural convection and boiling heat transfer of magnetic fluid under magnetic gravity compensation. [PhD Thesis]. Shanghai: Shanghai University, 2015 (in Chinese))
- 40 胡臻尚, 吴张永, 莫子勇等. 水基 NiFe₂O₄ 磁流体在无磁场时的沉 降稳定性. 化工进展, 2017, 36(9): 3414-3421 (Hu Zhenshang, Wu Zhangyong, Mo Ziyong, et al. Sedimentation stability of water-based NiFe₂O₄ ferrofluid in the absence of magnetic field. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(9): 3414-3421 (in Chinese))
- 41 陈文, 吴张永 张莲芝等. 环烷 NiFe₂O₄ 磁流体的制备及有磁场沉 降稳定性. 化工进展, 2019, 38(6): 2665-2673 (Chen Wen, Wu Zhangyong, Zhang Zhilian, et al. Preparation of oil-based NiFe₂O₄ magnetic fluid and stability of magnetic field settlement. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(6): 2665-2673 (in Chinese))
- 42 Jiang TS, Soo-Gun OH, Slattery JC. Correlation for dynamic contact angle. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1979, 69(1): 74-77