

激光驱动液滴迁移的机理研究¹⁾叶致君 段 俐²⁾ 康 琦³⁾

(中国科学院力学研究所微重力实验室, 北京 100190)

(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 液滴热毛细迁移是微重力流体科学中的典型科学问题, 微重力液滴动力学研究不仅具有流体力学的理论意义, 而且具有重要的实际应用价值. 建立了二维轴对称激光驱动液滴迁移模型, 通过仿真计算研究微重力环境下激光驱动液滴迁移的过程, 研究了液滴直径、母液参数等对液滴迁移速度及行为的影响. 首先研究了母液和液滴对激光系数均较小, 液滴初始位置不同时液滴的迁移行为; 然后研究了母液对激光吸收系数较小, 液滴对激光吸收系数较大时, 不同液滴直径与母液宽度比条件下液滴的迁移行为. 仿真结果表明: 当母液和液滴对激光的吸收系数都很小时, 液滴迁移的方向主要受到液滴初始位置的影响; 当母液对激光的吸收系数较小, 液滴对激光的吸收系数较大时, 液滴会朝激光方向迁移, 液滴初始位置对迁移方向影响较小, 但液滴直径与母液宽度之比会影响液滴迁移行为. 将模拟结果与 YGB 理论对比, 仿真结果与理论结果趋势一致. 研究激光驱动液滴迁移的物理机制, 探索界面张力作用机理, 得到激光驱动液滴迁移的规律, 探索对液滴的驱动控制方法.

关键词 激光驱动, 液滴, 热毛细迁移, 微重力

中图分类号: O363.2 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-522

MECHANISTIC STUDY OF LASER-DRIVEN DROPLET MIGRATION¹⁾Ye Zhijun Duan Li²⁾ Kang Qi³⁾

(NML, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(College of Engineering Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Droplet thermocapillary migration is a typical scientific problem in microgravity fluid science, and the study of microgravity droplet dynamics not only has the theoretical significance of fluid mechanics, but also has important practical value. A two-dimensional axisymmetric laser-driven droplet migration model was established. The laser-driven droplet migration process in microgravity environment is studied by simulation calculations, and the effects of droplet diameter and mother liquor parameters on droplet migration speed and behavior are investigated. Firstly, the migration of the droplets was studied when the mother liquor and the droplets have smaller laser coefficients and the initial positions of the droplets are different; then the migration of the droplets was studied the mother liquor has a smaller laser absorption coefficient and the droplets have a larger laser absorption coefficient and the ratios of the diameter to the width of the mother liquor are different. Simulation results show that when the absorption coefficients of both mother liquor and droplet for laser are small, the direction of droplet migration is mainly influenced by the initial position of the

2021-10-14 收稿, 2021-12-17 录用, 2021-12-18 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (12072354, 12032020) 和载人航天空间站资助项目.

2) 段俐, 研究员, 主要研究方向: 微重力流体物理. E-mail: duanli@imech.ac.cn

3) 康琦, 研究员, 主要研究方向: 微重力流体物理. E-mail: kq@imech.ac.cn

引用格式: 叶致君, 段俐, 康琦. 激光驱动液滴迁移的机理研究. 力学学报, 2022, 54(2): 316-325

Ye Zhijun, Duan Li, Kang Qi. Mechanistic study of laser-driven droplet migration. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(2): 316-325

droplet. When the absorption coefficient of the mother liquor to the laser is small and the absorption coefficient of the droplet to the laser is large, the droplet will move toward the laser. The initial position of the droplet has less influence on the migration direction, but the ratio of the droplet diameter to the width of the mother liquor will affect the droplet migration behavior. By comparing with the YGB theory, the simulation results are consistent with the trend of the theoretical results. The physical mechanism of laser-driven droplet migration is studied, the mechanism of interfacial tension effect is explored, the law of laser-driven droplet migration is obtained, and the driving control method for droplets is explored.

Key words laser-driven, droplet, thermocapillary, microgravity

引言

液滴是自然界中的一类典型和普遍存在的物质形态. 液滴的平衡、迁移和运动、以及液滴之间的相互作用等一直都是流体力学的研究热点. 在微重力环境下, 液滴的行为具有新的特性. 由于有效重力作用极小, 液滴受外部压力场均匀, 可以保持较好的球形, 并且液滴可以在空中悬浮, 为研究液滴的行为提供了极好的条件^[1]. 在微重力环境中, 重力场不再是驱动液滴运动的主要作用场, 温度场引发的液滴界面张力不均匀, 成为驱动液滴运动的主要作用场, 使液滴产生热毛细迁移运动. 液滴的运动规律与众多空间应用技术密切相关, 在微重力条件下, 对液滴运动规律与行为的研究在空间合金制备^[2]、两相分离^[3]、晶体生长^[4-5]、空间玻璃制备^[6]、空间液滴燃烧与消防安全^[7]、空间流体管理^[1, 8]等方面有着巨大的应用价值, 其在空间应用中的重要性将得到进一步的提升. 对液滴运动规律的探索, 实现液滴的主动驱动控制, 是近几年提出的新理论和新思想, 不仅有重要的学术意义, 同时具有巨大的工业价值.

1959年 Young 等^[9]针对气泡或液滴热毛细迁移问题提出 YGB (Young-Goldstein-Block) 理论, 忽略了惯性项与对流项等非线性项的影响. 介于此问题 Subramanian^[10]提出了准稳态假设, 并使用渐进展开的方法得到液滴的迁移速度结果^[11]. Balasubramaniam 和 Chai^[12]考虑惯性项和对流项影响, 得到液滴周围的速度场, 并得到液滴迁移速度以及液滴内外的温度场分布, 发现在 Re 和 Ma 均较大时, 液滴周围存在边界层. 1990年 Barton 和 Subramanian^[13]分析得到了液滴的热毛细迁移速度、液滴周围的速度场与温度场. 对于双液滴热毛细迁移研究, Keh 和 Chen^[14]分析了轴对称双液滴的热毛细迁移过程, 得到母液中的速度场和液滴迁移速度.

对于单液滴稳态迁移的定常数值模拟研究, 随着运动界面追踪数值计算方法的发展而进展迅速. Haj-Hariri 等^[15]对三维可变形黏性液滴的热毛细迁移进行数值模拟, 探讨了惯性项、对流项、液滴变形和流体介质物理属性对液滴迁移速度和液滴表面温度分布的影响. 对于单液滴热毛细迁移的非定常数值模拟也开展了很多相应的研究. Yin 等^[16]研究了不变形液滴的热毛细迁移过程, 讨论了无量纲参数及初始条件对迁移的影响. Brady 等^[17]分析了三维可变形液滴的热毛细迁移过程, 并且发现液池壁面形状最终影响液滴迁移过程. 对于双液滴热毛细迁移定常数值模拟研究, Loewenberg 和 Davis^[18]计算得到了轴对称排列的双液滴不同半径比条件下的热毛细迁移速度. Lavrenteva 和 Nir^[19]讨论了重力与热毛细力共同作用下的轴对称双液滴迁移及相互作用, 存在热边界层和热尾迹. 对于双液滴热毛细迁移非定常数值模拟研究, Berejnov 等^[20]给出了两个液滴中心间距随时间的演变, 讨论了不同半径比的两个液滴热毛细迁移过程及相互作用. Yin 和 Li^[21]研究了具有不同半径比双液滴热毛细迁移及相互作用, 分析了后继大液滴与前导小液滴的迁移速度.

与理论研究和数值模拟相比, 液滴迁移的相关实验较少. 对于单液滴热毛细迁移, Barton 和 Subramanian^[22]实验发现, 迁移速度与液滴半径成正比, 与 YGB 理论预测的趋势相同. 对于双液滴热毛细迁移, Hähnel 等^[23]观察到大液滴超越小液滴的过程. Kang 等^[24]实验研究了双液滴热毛细迁移及其相互作用, 发现前导小液滴出现倾斜“8”字的迁移轨迹; 近年利用数字全息干涉方法实时观测了单液滴和双液滴迁移过程^[25-26], 从全新的视角研究温度场对液滴迁移速度的影响. Vincent 和 Delville^[27]实验研究了微流道中通过局部激光限制生长液滴前沿前进的热毛细迁移, 发现激光能够控制微流道中液滴的流

动,起到“软门”(soft gate)的作用。

本文工作利用 COMSOL 软件对激光驱动单液滴迁移进行的仿真计算,研究了影响单液滴迁移的参数及单液滴持续迁移的条件,为地面实验及空间实验提供了依据,基于仿真计算在实验中利用激光驱动液滴迁移,初步验证激光驱动液滴迁移的可行性,为实现对液滴的有效驱动和控制打下基础。

1 驱动液滴迁移原理和仿真计算模型

1.1 激光驱动液滴迁移原理

在微重力环境中,温度场引发的液滴界面张力不均匀,成为驱动液滴运动的主要作用场,由于界面张力一般会随着温度升高而减小,这种界面温度的不均匀导致界面张力的不均匀,使得液滴界面上受力不均匀,从而驱动界面两侧的流体发生流动,使液滴产生热毛细迁移运动。不考虑重力的情况下激光沿液滴直径竖直向下照射时,母液与液滴均会吸收激光能量,激光与液滴界面接触上下两点的温度分别为 T_1 和 T_2 ,母液温度为 T_0 , $T_1 > T_2 > T_0$ 。由于激光照射在液滴界面附近产生了温度差,导致液滴界面附近产生表面张力梯度,同时引起母液流动,在界面热毛细力与母液流动的共同作用下驱动液滴迁移。原理如图 1 所示。

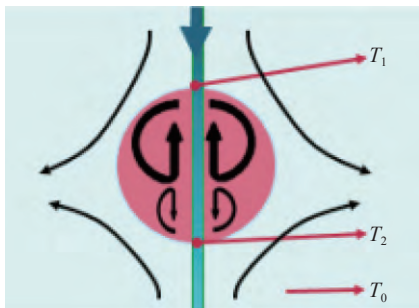


图 1 激光驱动液滴迁移原理图

Fig. 1 Schematic of laser-driven droplet migration

1.2 仿真计算模型

利用 COMSOL 软件进行仿真计算,激光沿液滴直径竖直向下照射,二维模型示意图见图 2。激光能量由颜色表示,红色表能量最强,蓝色表能量最弱。光强在光束横截面上为高斯分布,符合实际激光器激光光束光强分布情况。由于液滴与母液不混溶,二者之间界面的存在导致了表面张力梯度的产生,使得液滴在母液中迁移,则选用了动网格为两种不混溶流体的层流建模,可以跟踪流体-流体界面的位

置。进行仿真模拟时液滴界面附近的网格相比其他区域需要进行细化,如图 3 所示。液滴与母液的界面处设置了随温度线性减小的表面张力,符合实际情况;母液四边设置无滑移条件,模拟母液与液池壁面接触的边界条件。计算时采用了液滴不变形假设。为了研究母液尺寸、液滴直径、母液和液滴对激光的吸收系数^[28-29]等参数对液滴迁移的影响,本文选择了母液尺寸为宽 50 mm 高 50 mm 及宽 50 mm 高 20 mm,液滴直径为 3, 4, 4.5, 5 和 6 mm,吸收系数 0.06 m^{-1} 和 47 m^{-1} 进行了详细的仿真计算和分析。

ρ_i 表示液体密度, ν_i 表示液体运动学黏性系数, μ_i 表示液体动力学黏性系数, κ_i 表示液体热扩散系数, A_i 表示液体热传导系数, Γ 表示母液中的温度梯度, R 表示液滴半径, σ_T 表示界面张力随温度变化系数, A_r 表示液滴直径与母液宽度之比,下标 1 和 2 分别代表母液及液滴。

Re 表示惯性力与黏性力之比,定义如下

$$Re = \frac{|\sigma_T| \Gamma R^2}{\rho \nu^2} \quad (1)$$

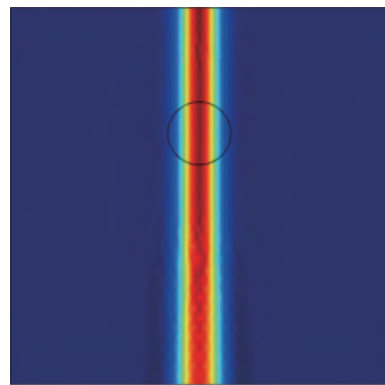


图 2 激光驱动液滴迁移模型

Fig. 2 Laser-driven droplet migration model

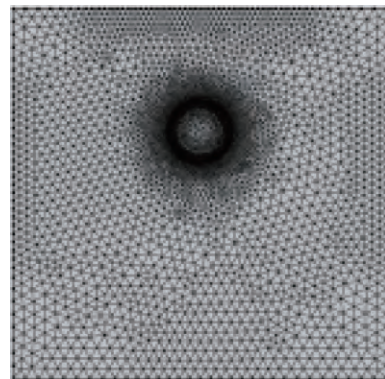


图 3 网格划分

Fig. 3 Mesh division

马朗戈尼数 (Ma) 表示热对流传输与热扩散之比, 定义如下

$$Ma = \frac{|\sigma_T| \Gamma R^2}{\rho \nu \kappa} \quad (2)$$

利用密度匹配法, 母液选择 30 cSt 硅油, 液滴选择水和乙醇的混合液, 减小重力引起的浮力效应, 故模拟计算时选用了相应的物性参数, 见表 1.

表 1 物性参数

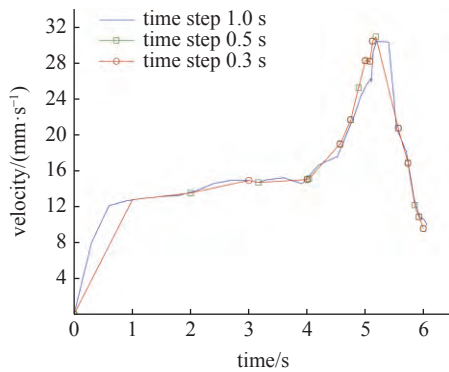
Table 1 Physical property parameters

| | $\nu/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | $\sigma_T/(\mu\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ |
|---------------|---|--|--|--|
| mother liquor | 30.0 | 955 | 0.151 | |
| droplet | 2.8 | 955 | 0.410 | -86.3 |

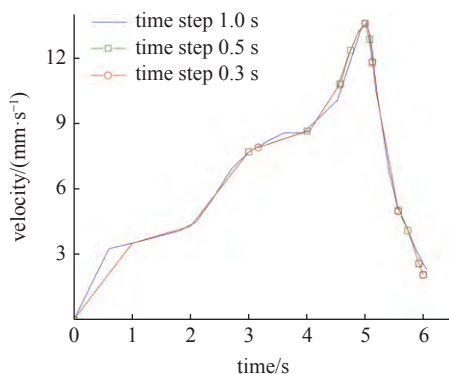
2 模拟结果与分析

2.1 时间步长无关性验证

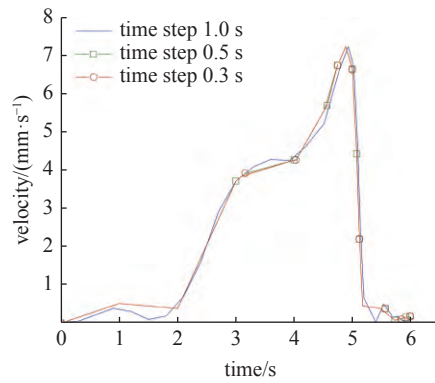
对于瞬态数值模拟, 需要确定计算中时间步长与计算结果之间无关联性, 即要进行时间步长无关性验证. 对同一工况选取时间步长 Δt 分别为 0.3 s, 0.5 s 和 1.0 s 的计算. 得到不同时间步长下同一工况液滴界面附近母液流速及液滴速度图, 图 4 中蓝线



(a) 不同时间步长液滴上边界处母液流动最大速度
(a) Max velocity of mother liquor at the upper boundary of the droplet in different time steps



(b) 不同时间步长液滴速度
(b) Droplet velocity in different time steps



(c) 不同时间步长液滴下边界处母液流动最大速度
(c) Max velocity of mother liquor at the bottom boundary of the droplet in different time steps

图 4 不同时间步长下同一工况液滴界面附近母液流速及液滴速度图

Fig. 4 Velocity of droplet and mother liquor around droplet interface for the same working condition at different time steps

均表示时间步长 1.0 s 时的速度, 绿色中空方块线均表示时间步长 0.5 s 时的速度, 红色中空圆形线均表示时间步长 0.3 s 时的速度.

由图 4 可看出, 时间步长选用 0.3 s 和 0.5 s, 速度曲线重合度极高. 时间步长选用 0.5 s 和 1.0 s 时液滴上界面附近母液流动最大速度与有一定差别, 但其他两种速度没有太大差异. 由于步长取得太小会大大增加计算周期, 取得太大又会影响计算精度, 综合考虑, 在本文计算中取计算的时间步长大部分为 1.0 s, 当选用时间步长 1.0 s 时速度曲线平滑度较差的情况下选用时间步长为 0.5 s.

2.2 母液流动对液滴迁移的影响

当母液与液滴吸收系数很小时, 激光穿过母液射到液滴界面上时, 温度变化很小, 引起非常小的界面张力变化, 此时液滴行为主要受母液流动的影响. 选取母液和液滴的吸收系数均为 0.06 m^{-1} , 选择液滴直径与母液宽度之比 A_r 均为 50/300, 分别研究液滴处于不同初始位置时的母液流动状态对液滴迁移行为的影响, 探讨母液流动的作用机理.

液滴初始位置在母液上部, 液滴直径 $R=5 \text{ mm}$, $\Gamma_{\text{max}} = 1/30 (\text{K} \cdot \text{mm}^{-1})$. 计算发现 (见图 5), 液滴界面附近母液流动较快, 且液滴下方母液流速小于液滴上方母液流速; 黑色箭头表示流场施加于液滴的压力, 由伯努利原理可知, 此时液滴所受压力的合力向上, 用红色箭头表示, 因此液滴向上迁移但迁移速度较慢. 图 6 给出液滴初始位置在母液上部时液滴界面附近母液流速及液滴速度, 其中绿线表示液滴上

边界附近母液的最大流速, 红线表示液滴下边界附近母液的最大流速, 蓝线表示液滴速度. 图 7 给出液滴界面附近的压力图, 蓝线表示上边界附近最大压力, 绿线表示下边界附近最大压力. 由于吸收系数小, 温度梯度引起的热毛细力较小, 母液流动导致液滴

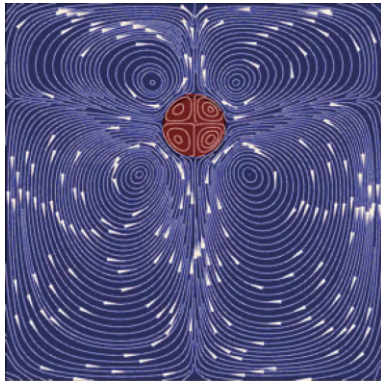


图 5 液滴初始位置在母液上部时的流线图

Fig. 5 Streamline when the initial droplet position droplet is in the upper part of the mother liquor

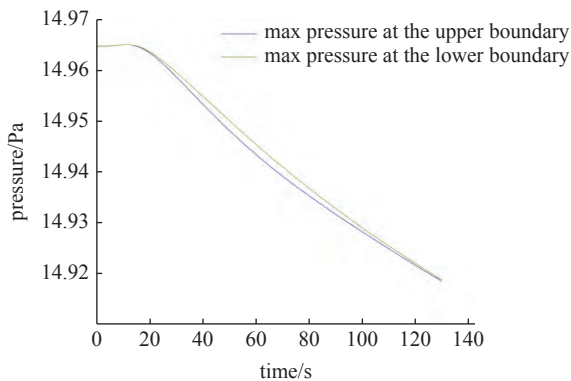


图 6 液滴初始位置在母液上部液滴界面附近母液流速及液滴速度图

Fig. 6 Velocity of droplet and mother liquor around droplet interface when initial droplet position is in the upper part of the mother liquor

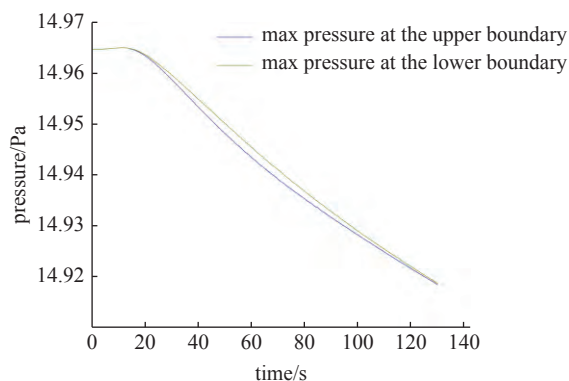


图 7 液滴初始位置在母液上部液滴界面附近压力图

Fig. 7 Pressure variation around droplet interface when initial droplet position is in the upper part of the mother liquor

上边界的最大压力小于液滴下边界的最大压力, 合力方向向上, 液滴向上迁移.

当液滴初始位置在母液正中, $\Gamma_{\max} = 2.61/30$ ($\text{K} \cdot \text{mm}^{-1}$). 计算发现 (见图 8), 液滴周围形成对称的流场, 下方母液流速等于液滴上方母液流速, 流场施加于液滴的合力为 0, 因此液滴始终处于初始位置. 图 9 给出液滴初始位置在母液正中时液滴界面附近母液流速及液滴速度, 其中绿线表示液滴上边界附近母液的最大流速, 红线表示液滴下边界附近母液的最大流速. 图 10 给出液滴界面附近的压力图, 蓝线表示上边界附近最大压力, 绿线表示下边界附近最大压力. 液滴上边界的最大压力等于液滴下边界的最大压力, 液滴受到的压力合力为零, 液滴始终处于初始位置.

当液滴初始位置在母液下部, $\Gamma_{\max} = 3.64/30$ ($\text{K} \cdot \text{mm}^{-1}$). 计算发现 (见图 11), 液滴上方母液流速小于液滴下方母液流速; 黑色箭头表示流场施加于液滴的压力, 由伯努利原理可知, 此时液滴所受压力

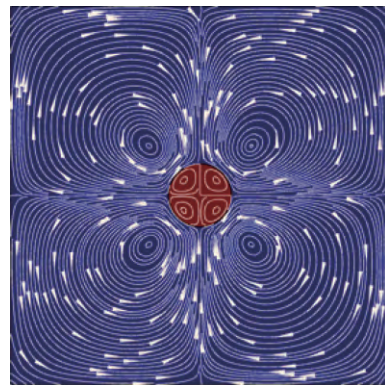


图 8 液滴初始位置在母液正中时的流线图

Fig. 8 Streamline when the initial droplet position droplet is in the middle of the mother liquor

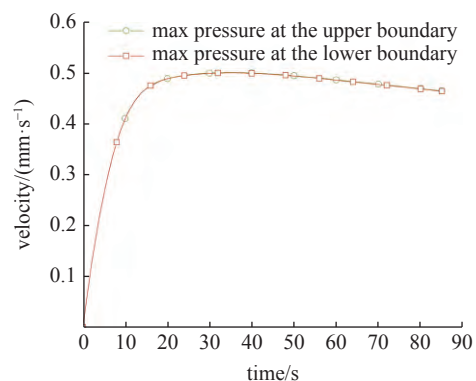


图 9 液滴初始位置在母液正中液滴界面附近母液流速图

Fig. 9 Velocity of droplet and mother liquor around droplet interface when initial droplet position is in the middle of the mother liquor

的合力向下, 用红色箭头表示, 因此液滴向下微微迁移. 图 12 给出液滴初始位置在母液下部时液滴界面附近母液流速及液滴速度, 其中绿线表示液滴上边界附近母液的最大流速, 红线表示液滴下边界附近

母液的最大流速, 蓝线表示液滴速度. 图 13 给出液滴界面附近的压力图, 蓝线表示上边界附近最大压力, 绿线表示下边界附近最大压力. 在吸收系数较小的情况下, 温度梯度引起的热毛细力较小, 母液流动对液滴迁移的影响占主导地位. 液滴上边界的最大压力大于液滴下边界的最大压力, 液滴受到的压力合力方向向下, 液滴向下迁移.

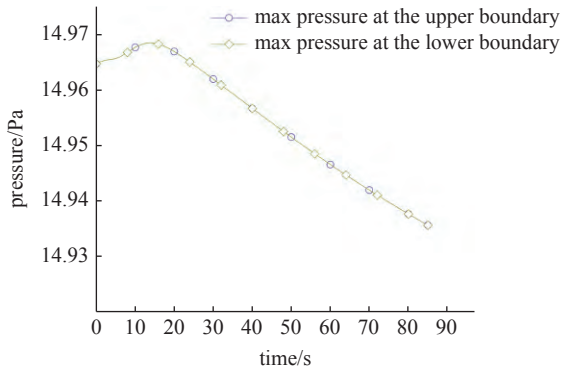


图 10 液滴初始位置在母液正中液滴界面附近压力图

Fig. 10 Pressure variation around droplet interface when initial droplet position is in the middle of the mother liquor

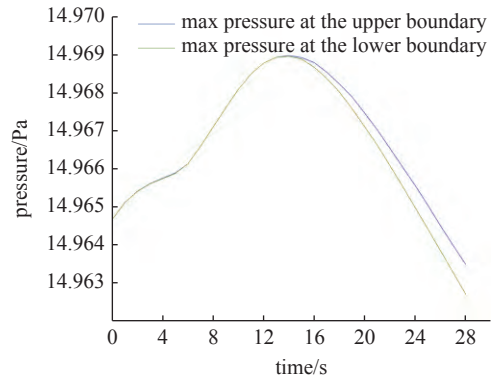


图 13 液滴初始位置在母液下部液滴界面附近压力

Fig. 13 Pressure variation around droplet interface when initial droplet position is in the lower part of the mother liquor

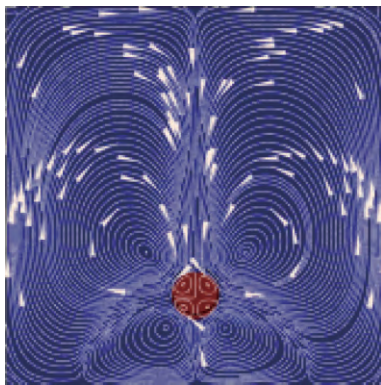


图 11 液滴初始位置在母液下部时的流线图

Fig. 11 Streamline when the initial droplet position droplet is in the lower part of the mother liquor

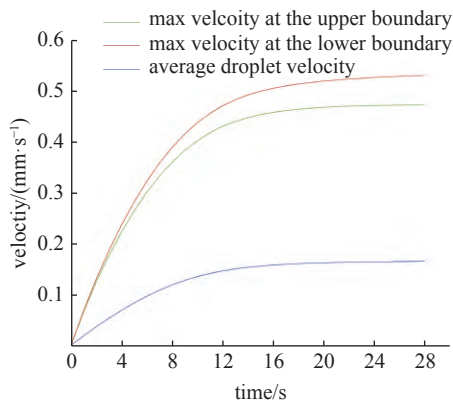


图 12 液滴初始位置在母液下部液滴界面附近母液流速及液滴速度图

Fig. 12 Velocity of droplet and mother liquor around droplet interface when initial droplet position is in the lower part of the mother liquor

在母液、液滴吸收系数均较小的情况下, 界面张力梯度很小, 热毛细驱动力很小, 此时母液流动对液滴在竖直方向上运动的影响占主导地位. 这种情况下, 液滴向上或向下运动取决于液滴的初始位置.

2.3 界面张力对液滴迁移的影响

当母液吸收系数小而液滴吸收系数大时, 液滴界面上形成较大的温度梯度, 影响液滴迁移行为的主要因素是由该温度梯度引起的界面张力梯度. 选取母液吸收系数为 0.06 m^{-1} , 液滴吸收系数为 47 m^{-1} 进行计算, 当液滴初始位置在母液下部, $A_r=1/10$, 液滴周围 $\Gamma_{\max} = 50/2.5 (\text{K} \cdot \text{mm}^{-1})$. 发现液滴向上迁移, 并于 6 s 时接触母液顶部, 见图 14. 初始时刻母液中有 4 个涡存在, 与母液和液滴吸收系数均很小时相比, 液滴下方母液中产生的涡较小, 且在液滴迁移过程中母液中演化成沿 y 方向对称的两个涡. 图 15 给出液滴初始位置在母液下部时液滴界面附近母液流速及液滴速度, 其中绿线表示液滴上边界附近母液的最大流速, 红线表示液滴下边界附近母液的最大流速, 蓝线表示液滴速度. 由速度图可以看出, 液滴上边界母液流速大于液滴下边界母液流速, 当液滴即将接触母液顶部时, 由于边界的限制, 液滴速度及液滴上下边界母液流速都会骤减.

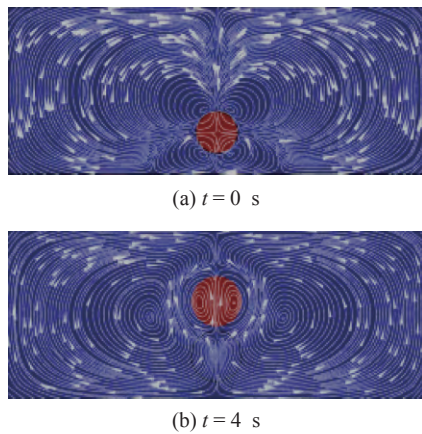


图 14 液滴初始位置在母液下部时的流线图

Fig. 14 Streamline when the initial droplet position droplet is in the lower part of the mother liquor

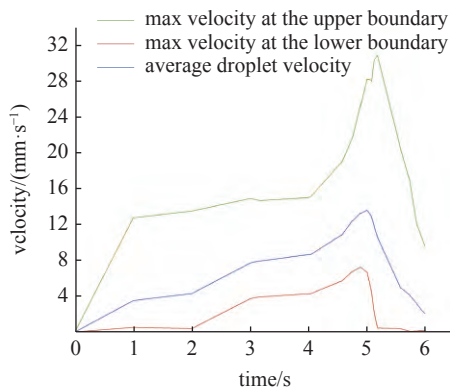


图 15 液滴初始位置在母液下部液滴界面附近母液流速及液滴速度图

Fig. 15 Velocity of droplet and mother liquor around droplet interface when initial droplet position is in the lower part of the mother liquor

当母液吸收系数小而液滴吸收系数大时,即使液滴初始位置在母液下部,液滴仍将向上迁移.因此,实现激光驱动液滴迁移,需要选取母液吸收系数小而液滴吸收系数大的液滴迁移模型.

2.4 液滴直径与母液宽度比 A_r 对液滴迁移的影响

液滴直径与母液宽度比 A_r 也是液滴迁移的重要影响因素,因为母液流动和界面张力的耦合作用控制液滴迁移行为.选取与 2.3 小节相同的吸收系数,即母液吸收系数为 0.06 m^{-1} 以及液滴吸收系数为 47 m^{-1} ,通过选取不同的 A_r 计算流场状态,考察 A_r 对液滴迁移的影响,进而探索母液流动和界面张力的耦合作用机理.

当母液吸收系数远小于液滴吸收系数时,在液滴直径与母液宽度比 $A_r < 1/10$ 的情况下,液滴位于母液下部时仍会向上迁移,但此时液滴会出现往复运动.通过速度图发现(见图 16 和图 17),液滴上边界

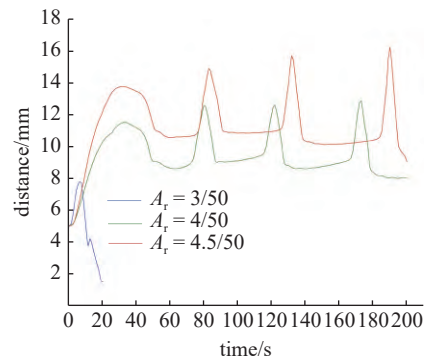


图 16 不同 A_r 时液滴球心距母液底端距离

Fig. 16 Distance variation from the center of the droplet sphere to the bottom of the mother liquor with different A_r

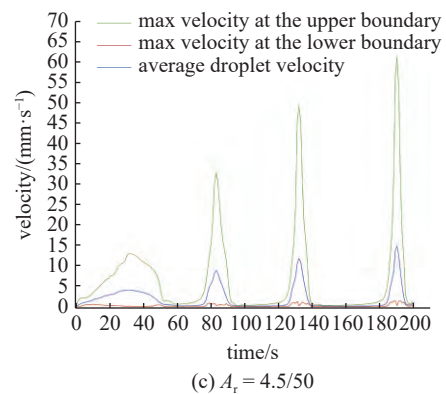
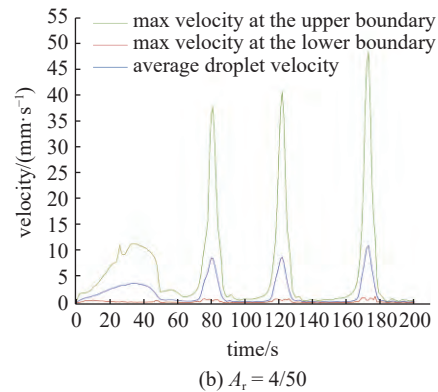
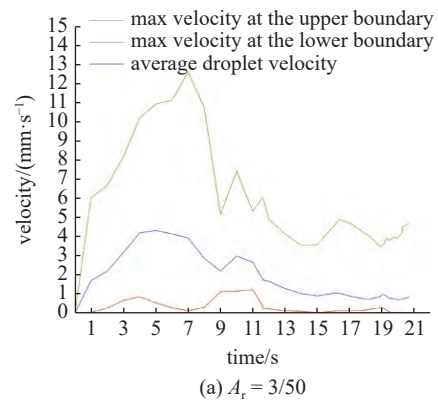


图 17 液滴初始位置在母液下部液滴界面附近母液流速及液滴速度图

Fig. 17 Velocity of droplet and mother liquor around droplet interface when initial droplet position is in the lower part of the mother liquor

处母液流动速度远大于液滴迁移速度, 母液对流影响了液滴持续向上迁移的趋势, 造成液滴失稳, 产生往复运动. 但从液滴球心距母液底端距离的趋势中发现液滴球心距母液顶端的距离在减小, 推测计算时间足够长的情况下, 液滴最终会到达母液顶端.

当母液吸收系数远小于液滴吸收系数时, 在 $1/10 \leq A_r < 1$ 的情况下, 当液滴初始位置处于母液下部时, 在初始阶段, 由于此时液滴界面周围温度梯度较小, 液滴会首先向下迁移, 由于液滴吸收系数远大于母液吸收系数, 较短时间后热毛细驱动力起主导作用, 液滴持续向上迁移并很快到达母液顶端, 见图 18 和图 19.

仿真结果与原理分析一致, 由于温度梯度与液滴界面的存在, 母液中最初会形成 4 个涡. 在母液吸收系数小、液滴吸收系数大的情况下, 液滴界面周围的温度梯度较大. 当母液吸收系数小而液滴吸收系数大时, 激光照射液滴使液滴界面上形成较大的温度梯度而引起较大的界面张力梯度, 进而驱动液滴迁移. 在液滴迁移过程中, 母液中的涡逐渐由 4 个发展成 2 个. 液滴的初始位置对液滴迁移的方向影

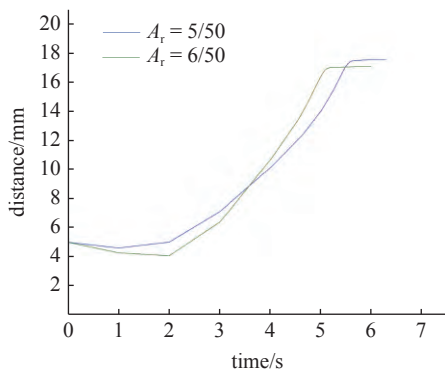
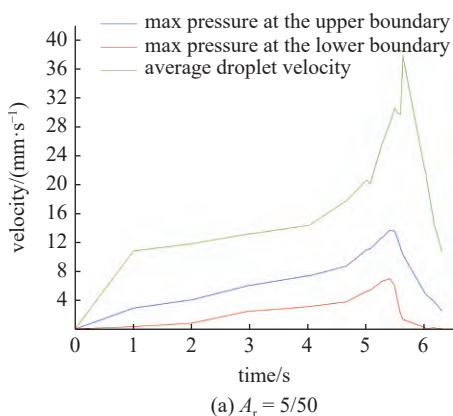
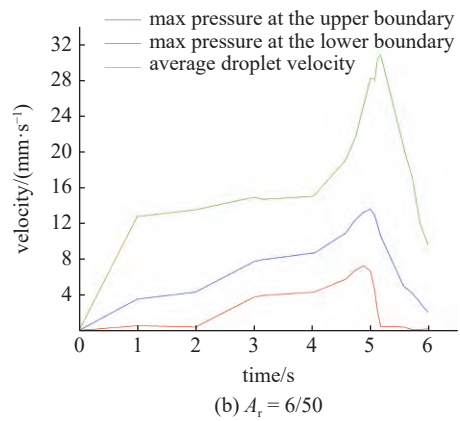


图 18 不同 A_r 时液滴球心距母液底端距离

Fig. 18 Distance variation from the center of the droplet sphere to the bottom of the mother liquor with different A_r



(a) $A_r = 5/50$



(b) $A_r = 6/50$

图 19 液滴初始位置在母液下部液滴界面附近母液流速及液滴速度图

Fig. 19 Velocity of droplet and mother liquor around droplet interface when initial droplet position is in the lower part of the mother liquor

响较小, 热毛细力对液滴迁移方向的影响更大. 液滴界面附近温度梯度越大, 液滴的运动速度越大, 液滴周围母液流速越大.

3 YGB 理论与仿真结果的对比

YGB 理论忽略了流体运动的黏性项和流体传热的对流项等非线性项, 也不包含时间项, 解决的是定常线性问题. 但实际上液滴在迁移过程中, 由于液体中各种的物性参数随温度变化, 周围条件的不断改变使得液滴迁移运动最终不一定能达到稳定状态. Subramanian 介于此问题提出了一个准稳态假设, 如果气泡迁移足够慢, 使得相对于由气泡运动而产生的周围母液物性参数变化所花费的时间, 速度场和温度场重新到其稳定状态所花费的时间非常小, 那么可以认为此状态为准稳态. 液滴迁移系统也同样适用准稳态假设, 如果液滴迁移系统符合准稳态假设, 则仍然可以认为液滴最终可以达到一个稳定状态, 关于液滴迁移的研究大都是建立在这个假设的基础上的, 在分析过程中所有的物性参数都以常数来表示, 不随温度而变化.

通过 YGB 理论计算得到的气泡迁移速度一般也可以应用在液滴热毛细迁移中, 理论迁移速度为

$$V_{YGB} = \frac{2|\sigma_T| R \Lambda_0 \Gamma}{(2\mu_0 + 3\mu_1)(2\Lambda_0 + \Lambda_1)} + \frac{2(\rho_0 - \rho_1) g R^2 (\mu_0 + \mu_1)}{3\mu_0 (2\mu_0 + 3\mu_1)} \quad (3)$$

仿真计算得到的液滴迁移速度 V_{max} 与 YGB 理论计算速度 V_{YGB} 见表 2.

在液滴直径和母液尺寸相同的情况下, 温度梯

表 2 不同直径不同温度梯度液滴迁移仿真计算速度与 YGB 理论迁移速度及 Re , Ma 对照表
Table 2 Size of droplets, simulation calculation migration velocity, YGB model velocity, Re and Ma

| R/mm | $\Gamma/(K \cdot mm^{-1})$ | $V_{max}/(mm \cdot s^{-1})$ | $V_{YGB}/(mm \cdot s^{-1})$ | Re | $Ma/10^3$ |
|--------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|-----------|
| 2.50 | 0.03 | 0.145 | 2.921 | 0.002 | 0.016 |
| 2.50 | 0.12 | 0.162 | 10.629 | 0.009 | 0.057 |
| 1.50 | 13.30 | 4.124 | 34.713 | 0.344 | 2.255 |
| 2.00 | 25.00 | 11.046 | 87.000 | 1.150 | 7.536 |
| 2.25 | 33.33 | 14.900 | 130.370 | 1.939 | 12.704 |
| 2.50 | 20.00 | 13.677 | 87.000 | 1.438 | 9.420 |
| 3.00 | 30.00 | 13.541 | 156.600 | 3.105 | 20.347 |

度越大,液滴迁移速度越大,与 YGB 理论预测一致. YGB 理论考虑的是小 Re 和小 Ma 情况,仿真计算考虑了黏性项,对流项, Ma 并没有远小于 1,线性假设不能成立,能量损耗会使液滴迁移速度降低.当液滴吸收系数远大于母液吸收系数时,液滴界面附近有局部强温度梯度,但整体温度梯度远小于最大温度梯度,导致理论迁移速度大于仿真计算速度.

4 结论

利用 COMSOL 软件计算微重力环境下激光驱动液滴迁移过程,发现当母液和液滴对激光的吸收系数都很小时,母液流动对液滴在竖直方向上运动的影响占主导地位.这种情况下,液滴向上或向下运动取决于液滴的初始位置.当母液吸收系数远小于液滴吸收系数时,液滴的最终趋势均为向上迁移,但液滴迁移行为受液滴直径与母液宽度之比 A_r 的影响,当 $A_r < 1/10$ 时,液滴会有往复运动的行为,当 $1/10 \leq A_r < 1$ 时,液滴不会出现往复运动的现象.

将仿真结果与理论结果对比,发现在液滴直径和母液尺寸相同的情况下,温度梯度越大,液滴迁移速度越大,与 YGB 理论一致.由于 YGB 理论未考虑非线性项,且温度梯度随时间变化,仿真计算得到的液滴迁移速度小于理论计算速度,但在母液尺寸相同的情况下,液滴直径、温度梯度越大,液滴迁移速度越大,与 YGB 理论计算的趋势一致.仿真计算为激光驱动液滴迁移的地面实验及空间实验提供了研究基础,基于仿真计算结果进行了激光器选型,选择了近红外光波段激光器,搭建实验台进行了初步实验,实现激光驱动液滴迁移,为解决工业生产问题提供了思路.

参 考 文 献

- 1 胡文瑞,徐硕昌.微重力流体力学.北京:科学出版社,1999:1-23 (Hu Wenrui, Xu Shuochang. Microgravity Fluid Mechanics. Beijing: Science Press, 1999: 1-23 (in Chinese))
- 2 Egry I, Herlach D, Ratke L. Properties and solidification of metallic melts under microgravity. *International Foundry Research*, 2009, 61(4): 30-41
- 3 Perrot F, Guenoun P, Beysens D. Phase Separation of Binary Fluids Near a Critical Point Under Microgravity. Springer, 1988
- 4 Antar BN, Ethridge EC, Maxwell D. Viscosity measurement using drop coalescence in microgravity. *Microgravity - Science and Technology*, 2003, 14(1): 9-19
- 5 Zhang T, Hu R, Zhang S, et al. Superfast growth dynamics of high-quality silicon nanowires on polymer films via self-selected laser-droplet-heating. *Nano Letters*, 2021, 21(1): 569-576
- 6 Neilson GF, Weinberg MC. Outer space formation of a laser host glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1977, 23(1): 43-58
- 7 Dietrich DL, Nayagam V, Hicks MC, et al. Droplet combustion experiments aboard the international space station. *Microgravity Science and Technology*, 2014, 26(2): 65-76
- 8 Wang TG, Anilkumar AV, Lee CP. Oscillations of liquid drops: results from USML-1 experiments in space. *Journal of Fluid Mechanics*, 1996, 308: 1-14
- 9 Young NO, Goldstein JS, Block MJ. The motion of bubbles in a vertical temperature gradient. *Journal of Fluid Mechanics*, 1959, 6(3): 350-356
- 10 Subramanian RS. Slow migration of a gas bubble in a thermal gradient. *Aiche Journal*, 2010, 27(4): 646-654
- 11 Subramanian RS. Thermocapillary migration of bubbles and droplets. *Advances in Space Research*, 1983, 3(5): 145-153
- 12 Balasubramanian R, Chai AT. Thermocapillary migration of droplets: An exact solution for small Marangoni numbers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1987, 119(2): 531-538
- 13 Barton KD, Subramanian RS. Thermocapillary migration of a liquid drop normal to a plane surface. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1990, 137(1): 170-182
- 14 Keh HJ, Chen SH. The axisymmetric thermocapillary motion of two

- fluid droplets. *International Journal of Multiphase Flow*, 1990, 16(3): 515-527
- 15 Haj-Hariri H, Shi Q, Borhan A. Thermocapillary motion of deformable drops at finite Reynolds and Marangoni numbers. *Physics of Fluids*, 1997, 9(4): 845-855
- 16 Yin Z, Chang L, Hu W, et al. Numerical simulations on thermocapillary migrations of nondeformable droplets with large Marangoni numbers. *Physics of Fluids*, 2012, 24(9): 092101
- 17 Brady PT, Herrmann M, Lopez JM. Confined thermocapillary motion of a three-dimensional deformable drop. *Physics of Fluids*, 2011, 23(2): 022101
- 18 Loewenberg M, Davis RH. Near-contact thermocapillary motion of two non-conducting drops. *Journal of Fluid Mechanics*, 1993, 256: 107-131
- 19 Lavrenteva OM, Nir A. Axisymmetric thermal wake interaction of two drops in a gravity field at low Reynolds and high Peclet numbers. *Physics of Fluids*, 2003, 15(10): 3006-3014
- 20 Berejnov V, Lavrenteva OM, Nir A. Interaction of two deformable viscous drops under external temperature gradient. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, 242(1): 202-213
- 21 Yin Z, Li Q. Thermocapillary migration and interaction of drops: two non-merging drops in an aligned arrangement. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 766: 436-467
- 22 Barton KD, Subramanian RS. The migration of liquid drops in a vertical temperature gradient. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1989, 133(1): 211-222
- 23 Hähnel M, Delitzsch V, Eckelmann H. The motion of droplets in a vertical temperature gradient. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1989, 1(9): 1460-1466
- 24 Kang Q, Hu L, Huang C, et al. Experimental investigations on interaction of two drops by thermocapillary-buoyancy migration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(15): 2636-2641
- 25 Zhang ST, Duan L, Kang Q. Experimental research on thermocapillary migration of drops by using digital holographic interferometry. *Experiments in Fluids*, 2016, 57(7): 113
- 26 Zhang ST, Duan L, Kang Q. Experimental research on thermocapillary-buoyancy migration. *Microgravity-Science and Technology*, 2018, 30: 183-193
- 27 Vincent M, Delville JP. Thermocapillary migration in small-scale temperature gradients: application to optofluidic drop dispensing. *Physical Review E*, 2012, 85: 026310
- 28 邓孺孺, 何颖清, 秦雁等. 近红外波段 (900 ~ 2500 nm) 水吸收系数测量. 遥感学报, 2012(1): 192-206 (Deng Ruru, He Yingqing, Qin Yan, et al. Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900 ~ 2500 nm). *Journal of Remote Sensing*, 2012(1): 192-206 (in Chinese))
- 29 邓孺孺, 何颖清, 秦雁等. 分离悬浮质影响的光学波段 (400 ~ 900 nm) 水吸收系数测量. 遥感学报, 2012(1): 174-191 (Deng Ruru, He Yingqing, Qin Yan, et al. Pure water absorption coefficient measurement after eliminating the impact of suspended substance in spectrum from 400 nm to 900 nm. *Journal of Remote Sensing*, 2012(1): 174-191 (in Chinese))