

## Thermocapillary migration of heterogeneous droplets with unidirectional temperature gradient

Yuan ZHONG, Haicun DU, Ying ZHANG\*, Huiying PENG

College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

**Abstract:** The phenomenon of thermocapillary migration of the heterogeneous droplets of paraffin oil and deionized water in different proportions placed on the metal substrate surface driven by the nonuniform temperature field was investigated, a theoretical model was set up. The morphological changes of the droplets driven by temperature gradient from the high temperature region to the low temperature region were recorded by high-speed camera. The results showed that the contact angle of heterogeneous droplets decreased with the rising of temperature and the wettability was enhanced. The migration velocity of heterogeneous droplets decreased with the increasing of viscosity and increased with the increasing of temperature gradient, and the difference of velocities under different viscosities increased with the increasing of temperature gradient. The variation trend of migration velocities with time decreased rapidly, and then slowly decreased to 0. The relationship between the migration velocity and the Marangoni number ( $Ma$ ) was derived and verified, which indicated that the migration velocity increased markedly with the increasing of  $Ma$ . The greater the  $Ma$  was, the higher the matching degree between the experimental and simulation results were.

**Key words:** thermocapillary migration; contact angle; temperature gradient; moisture content; viscosity; Marangoni effect; heat and mass transfer

## 单向温度梯度下异质液滴的热毛细迁移

钟源, 杜海存, 张莹\*, 彭慧颖

南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031

**摘 要:** 石蜡油与去离子水按多种比例混合形成异质液滴, 放置在金属基板表面, 在外加不均匀温度场作用下进行热毛细迁移, 采用高速摄像机记录温度梯度驱动液滴从高温区迁移至低温区过程中液滴的形态, 建立了理论模型。结果表明, 异质液滴的接触角随温度升高而减小, 润湿性增强; 异质液滴的迁移速度随粘度增加而减小, 随温度梯度增加而增加, 不同粘度下的速度差随温度梯度增大而增大, 迁移速度随时间增加迅速降低, 后缓慢减小到趋于 0。推导了迁移速度与 Marangoni 数  $Ma$  的关系式并进行了实验验证, 迁移速度随  $Ma$  增加而显著增加,  $Ma$  越大, 实验结果与模拟结果的匹配程度越高。

**关键词:** 热毛细迁移; 接触角; 温度梯度; 含水率; 粘度; Marangoni 效应; 传热传质

中图分类号: TK124

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)04-0697-07

### 1 前言

液滴的热毛细迁移现象是流体力学、材料加工和化

学工程应用的重要研究方向<sup>[1]</sup>。在传热多相体系中, 由于温差引起局部表面张力梯度变化, 造成界面不稳定性对流被称为 Marangoni 效应。液滴外加不均匀温度场会

收稿: 2017-10-09, 修回: 2018-01-05, 网络发表: 2018-04-27, Received: 2017-10-09, Revised: 2018-01-05, Published online: 2018-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 11562011; 51566012)

作者简介: 钟源(1995-), 男, 江西省新余市人, 硕士研究生, 主要研究方向为多相流的传热传质, E-mail: 13907917155@163.com; 张莹, 通讯联系人, E-mail: yzhan2033@163.com.

**引用格式:** 钟源, 杜海存, 张莹, 等. 单向温度梯度下异质液滴的热毛细迁移. 过程工程学报, 2018, 18(4): 697-703.

Zhong Y, Du H C, Zhang Y, et al. Thermocapillary migration of heterogeneous droplets with an unidirectional temperature gradient (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 697-703, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217349.

因表面张力分布不均匀发生迁移运动,称为热毛细迁移。

近年来国内外学者采用模拟和理论分析方法研究了液滴或气泡的热毛细迁移机理<sup>[2-5]</sup>。郭子成等<sup>[6]</sup>采用多组分、多界面系统的热力学基本公式研究了沾湿、浸湿、铺展和毛细现象。高安然等<sup>[7]</sup>设计并制作了一种基于温度梯度驱动的液滴传输芯片,实现了对微液滴传输的精确控制,研究了液滴传输行为。Pradhan 等<sup>[8]</sup>在水平表面上形成温度梯度,研究了固定液滴内部的热毛细对流。Dai 等<sup>[9-11]</sup>研究了单个纯石蜡油液滴在光滑金属板表面的热毛细迁移及改变基板表面粗糙度和磨痕方向后液滴的定向迁移,并基于环形温度梯度研究了不锈钢基板表面蜂巢状微坑对液体润滑剂迁移的阻碍作用。Jiao 等<sup>[12]</sup>用多个微加热器改变平面微通道中的温度场,研究了硅油液滴的运动轨迹与速度变化规律。Alhendal 等<sup>[13]</sup>基于 Fluent 软件求解两相流控制方程,并用 VOF (Volume of Fluid) 方法对液/液界面进行追踪,研究了孤立液滴的热毛细迁移和两液滴在零重力下的相互作用。

很多液滴热毛细迁移研究基于以下实验条件<sup>[14,15]</sup>:在微重力环境下,浸含在流体介质(母液)中的液滴的浮力效应基本消失,界面的表面张力变为控制液滴运动的主要驱动力。由于表面张力反比于界面温度,外加不均匀温度场将导致液滴移动<sup>[16]</sup>。液滴在某些液态流体(如硅油)中由冷区域向热区域流动<sup>[13]</sup>,而在空气中的迁移方向相反。由实验结果可得到液滴迁移速度随 Marangoni 数的变化关系,结果与液滴在液态流体介质中的现象相反<sup>[17]</sup>。气态和液态两种流体介质实验条件下,液滴达到定态迁移的 Marangoni 数差异较大。

国内外对由温度梯度引起的异质液滴迁移问题尚缺乏研究,以往研究者采用单种纯物质液滴(如石蜡油或氟化液)进行热毛细迁移实验,未考虑含水率对液滴粘度和迁移速度的影响。本工作采用石蜡油-去离子水混合液滴(异质液滴)研究热毛细迁移,迁移效果显著,接触角测量方便,考察了不同比例的混合液的粘度、含水率和温度梯度对液滴迁移速度的影响,建立了单个异质液滴 Marangoni 数与迁移速度的关系式。

## 2 实验

实验装置示意图如图 1 所示。用电阻板加热基板一端成为高温端,另一端为常温端,形成长 25 mm 的温度梯度段,用温度巡检仪测量基板冷热两端及中间各点的实时温度并计算温差及温度梯度。初始液滴用微量进样器缓慢滴加,其半径为 2.5 mm (大于液滴迁移的临界半径),液滴在 50 mm×25 mm×3 mm 的矩形基板表面上固定

的初始位置开始热毛细迁移,基板由 SUS 304 不锈钢制成。热电阻板元件安装在基板热端底部,两者紧密接触,在基板上形成单向温度梯度表面。常温端用常规垫片使基板水平。加热端温度达 80℃ 以上,液滴沿基板表面迁移一定长度,产生的温度梯度分别为 2.3 和 2.9℃/mm。

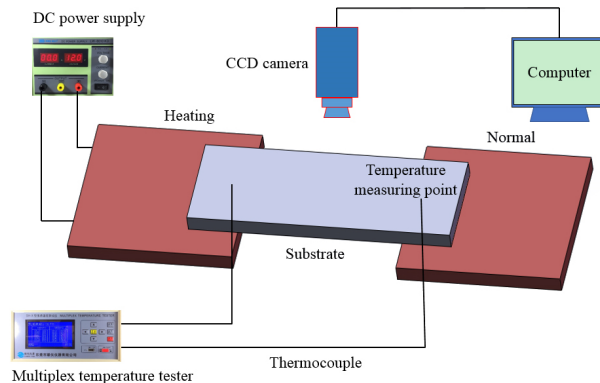


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

由 Lt365R 型高速 CCD 摄像机(加拿大 Lumenera 公司)记录液滴迁移过程,对比各时刻图像,观察形态变化,研究迁移速度与时间、粘度和 Marangoni 数的关系。改变温度梯度和液滴含水率,重复实验,得到多组数据。实验条件如下:环境温度为 18~22℃,温度梯度范围为 1~3℃/mm,工质为石蜡油-去离子水混合物,粘度在 30 mPa·s 以内,液滴体积为 4~5 μL。

基板表面温度场如图 2 所示。由图可知,温度梯度沿液滴迁移方向呈近似线性关系,采用平均温度梯度。

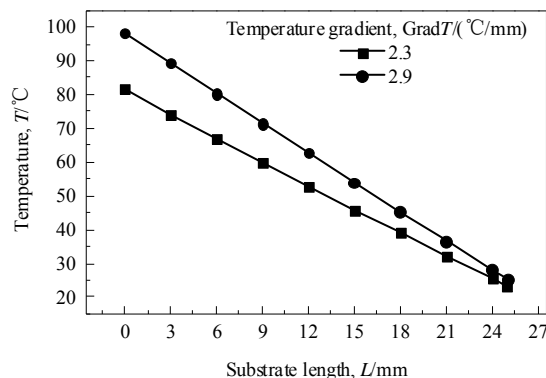


图 2 基板表面温度分布

Fig.2 Temperature distribution of substrate surface

## 3 理论模型和液滴几何特征

### 3.1 理论模型分析及迁移速度预测

液滴的几何特征对理论模型有显著影响,液滴在基板表面所受界面张力如图 3 所示,图中  $\sigma_{sg}$ 、 $\sigma_{sl}$  和  $\sigma$  分别为

固气、固液和液气界面张力,  $\theta$  为接触角,  $D$  为液滴横截面宽度. 在单向温度梯度下用接触角 Young 方程推导了精度较高的关系式, 预测液滴在基板表面上的迁移速度. 忽略液滴迁移过程中由温度梯度引起的接触角变化, 认为其保持恒定. 液滴的接触直径小于毛细长度, 满足球冠形的假设, 可忽略重力的影响<sup>[18]</sup>.

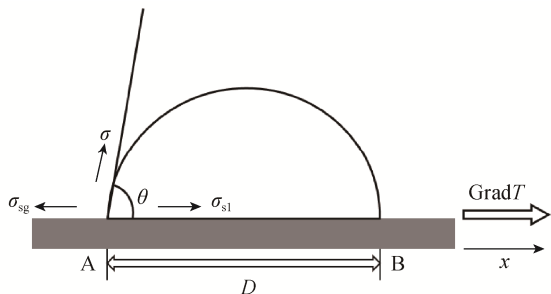


图3 液滴在基板表面的界面张力示意图  
Fig.3 Schematic diagram of interfacial tension of liquid droplet on substrate surface

对于放置在基板表面上的固着液滴, 杨氏方程定义了三相接触线附近的界面平衡张力  $\sigma$  和接触角  $\theta$ <sup>[19]</sup>:

$$\sigma_{sg} - \sigma_{sl} = \sigma \cos \theta. \quad (1)$$

液滴不平衡驱动力  $F_d$  为

$$F_d = (\sigma_{sg} - \sigma_{sl})_B - (\sigma_{sg} - \sigma_{sl})_A. \quad (2)$$

液滴两端点 A, B 之间沿液滴运动轨迹的表面张力为

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{\partial \sigma}{\partial x} x = \sigma_0 + \text{Grad}T \frac{\partial \sigma}{\partial T} x, \quad (3)$$

其中,  $\sigma_0$  为液滴的参考表面张力,  $x$  为液滴的运动位置, 即横坐标值, 温度梯度  $\text{Grad}T = \partial T / \partial x = \text{const.}$

根据式(1)~(3), 得:

$$F_d = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \text{Grad}T D \cos \theta. \quad (4)$$

由驱动力和阻碍液滴迁移运动的粘性力之间的平衡关系, 推导出在单向温度梯度下作用在液滴上的力:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} \text{Grad}T D \cos \theta = U \frac{3\mu_0}{D/2} g(x_A, x_B) - \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \text{Grad}T D, \quad (5)$$

$$g(x_A, x_B) = \left[ e^{b(x_B \text{Grad}T - T_S + T_0)} - e^{b(x_A \text{Grad}T - T_S + T_0)} \right] / (b \text{Grad}T),$$

式中,  $x_A$  与  $x_B$  为液滴的 AB 两端点在运动方向上的坐标值,  $\mu_0$  为参考温度下液滴的粘度,  $U$  为迁移速度,  $b$  为粘度-温度系数<sup>[21]</sup>,  $T_S$  为运动起始点液滴的温度,  $T_0$  为参考温度.

迁移速度为

$$U = \frac{(2\cos\theta + 1)(\partial\sigma/\partial T)\text{Grad}TD^2}{18g(x_A, x_B)\mu_0}. \quad (6)$$

假定基板表面完全光滑. 迁移速度随表面粗糙度降低而减小, 直至差异倾向逐渐消失<sup>[10]</sup>. 用 TR200 型触针式表面粗糙度测量仪测得基板的平均表面粗糙度为 0.1  $\mu\text{m}$ , 与液膜厚度相比可忽略不计.

液滴迁移速度方程表明迁移速度与液滴初始粘度成反比. 在温度梯度恒定的条件下, 随初始粘度增加, 液滴的平均迁移速度明显下降. 温度梯度也是影响速度的因素, 液滴的迁移速度与温度梯度成正比. 粘度和温度梯度对液滴迁移速度的影响如图 4 所示. 由图可知, 液滴迁移速度随粘度增加而减小, 随温度梯度增加而增加, 与液滴迁移速度方程吻合. 温度梯度较小时, 不同粘度的液滴迁移速度差异不明显, 但随温度梯度增大, 差异越来越大.

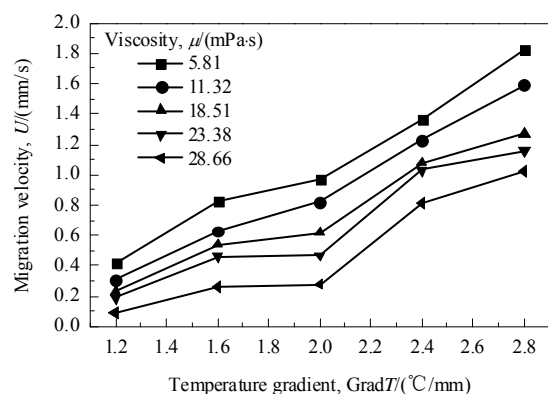


图4 不同粘度下液滴迁移速度随温度梯度的变化  
Fig.4 Variation of velocity of droplet migration with temperature gradient at different viscosities

### 3.2 迁移液滴形态变化

高速 CCD 摄像机可记录液滴动态迁移过程<sup>[20]</sup>, 温度梯度 2.36  $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ 、含水率 50% 的条件下液滴在基板上的热毛细迁移过程如图 5 所示. 异质液滴在单向温度梯度下由于气液界面冷、热端流体表面张力差产生一个切向力, 带动液滴内部的流体流动, 从高温区域迁移到常温区域, 同时伴随扩散过程. 迁移过程中会发生液滴纵向(沿基板长度方向)扩展的现象, 最后收缩回液滴原始形状. 除液滴运动过程中尾部滞留效应外, 异质液滴在受热面上易扩散, 最初因起始位置温度较高产生扩展效应, 在迁移过程中基板表面温度逐渐降低, 液滴温度降低, 液滴粘度和气液界面张力增加, 在沿基板长度方向上的扩散被阻塞, 液滴在接近常温区时收缩.

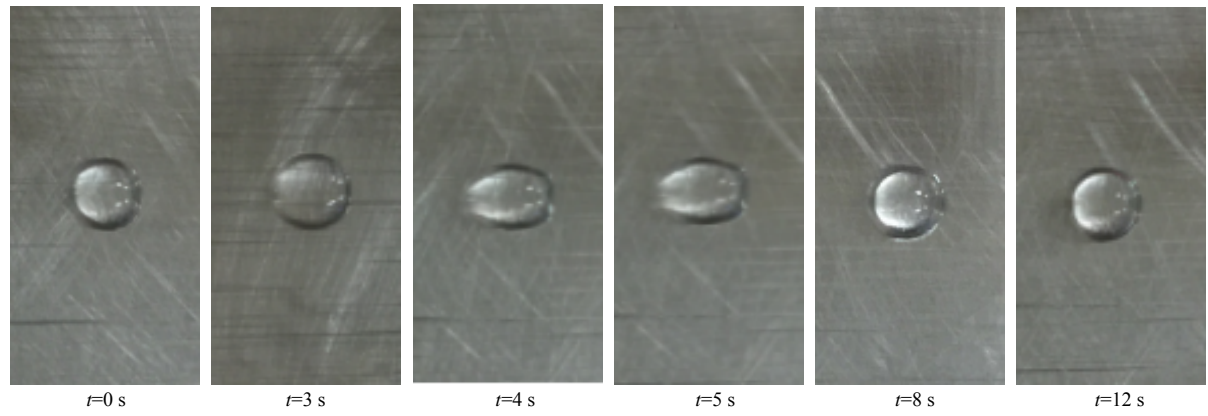


图 5 液滴在基板上的热毛细迁移过程  
Fig.5 Droplet migration process on the substrate

表 1 含水率 66.6%的异质液滴在不同温度下用不同方法测量的接触角

Temperature/°C	Contact angle/°				
	Automatic	Height-width	Basis point	Manual	Average
21	91.35	93.44	93.38	92.22	92.60
41	82.25	84.47	84.02	85.84	84.15
61	82.02	81.23	82.57	83.38	82.30
81	81.32	82.45	80.88	81.15	81.45
91	80.76	83.24	79.87	80.33	81.05

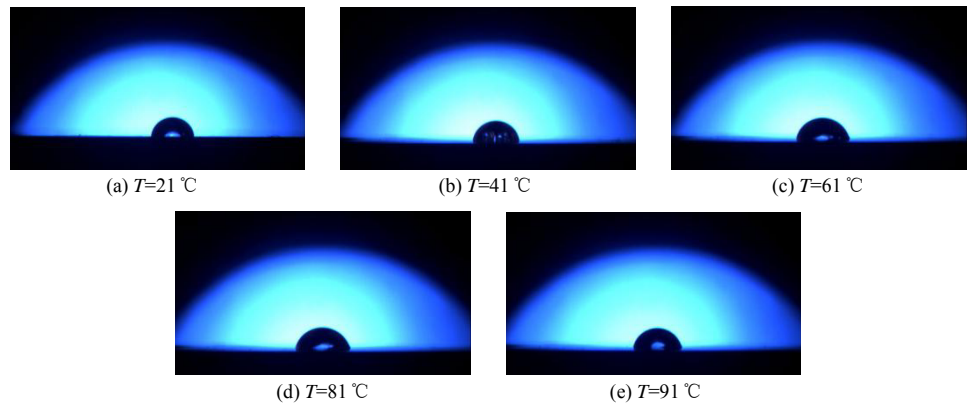


图 6 异质液滴在不同温度下的横截面  
Fig.6 Cross-section of heterogeneous droplets at different temperatures

3.3 接触角变化

高温下，纯石蜡油的接触角在粘度较低时太小，无法保证测量精度。采用含水率 $\phi=66.6\%$ 的油水异质液滴研究接触角随温度的变化，液滴在基板上的润湿效果不显著，接触角较大，测量方便。可由接触角解释润湿现象<sup>[21]</sup>。在不同温度下测量初始粘度(18.8 mPa·s)相同的油水异质液滴的平衡接触角，并观察液滴形成的真实横截面形状。基于接触角测量仪的悬滴法(静态液滴法)，采用自动、量高、基点和手动 4 种方法多次测量取平均值，如表 1 所示，结果接近动态接触角。液滴横截面如图 6 所示，异质液滴在基板上的接触角随温度变化，如图 7 所示。由图可知，21~91 °C 时，随温度升高，接触角迅速下降，由 92.6°降至 81.05°，下降趋势

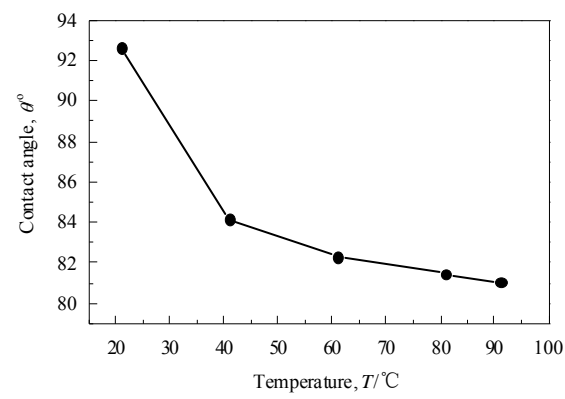


图 7 含水率 66.6%的液滴在基板上的接触角随温度的变化  
Fig.7 Variation of contact angle of droplets with 66.6% moisture on the substrate with temperature



先快后慢, 润湿性增强, 同时接触角随粘度降低而降低(含水率一定, 温度上升粘度下降)。

## 4 液滴粘度和迁移速度的影响因素分析

### 4.1 含水率及温度对油水混合物粘度的影响

根据 Ye1 等<sup>[22]</sup>推导的通过两相粘度预测转相点含水率的方程和 Richardson 等<sup>[23]</sup>提出的不同条件下计算油水混合物粘度的公式, 可得出混合液体粘度与含水率的变化关系<sup>[24]</sup>。常温下(25℃)油水混合物粘度随含水率的变化如图 8 所示。由图可知, 恒温下, 当含水率增大到一定程度时, 连续相(油)中的分散液滴(水)急剧增多, 液滴的相互作用增强, 液滴间发生碰撞和相对滑动, 粘度迅速上升, 含水率接近临界值(55wt%~60wt%)时发生转相, 混合液体粘度突然下降。

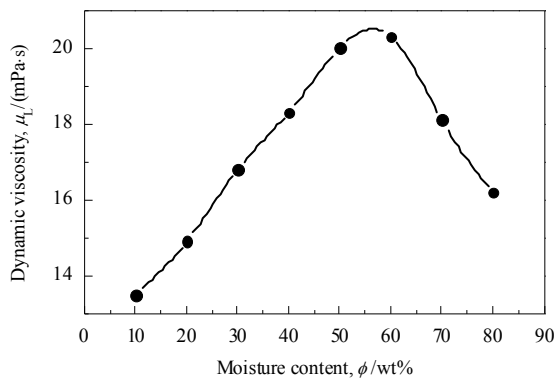


图 8 25℃下油水混合物粘度随含水率的变化

Fig.8 Variation of viscosity with moisture content of oil-water mixture at 25℃

可通过两相粘度预测转相点的含水率 $\phi$ (wt%):

$$\frac{\phi}{1-\phi} = (\mu_d / \mu_c)^{1/2}, \quad (7)$$

式中,  $\mu_c$  为连续相粘度(mPa·s),  $\mu_d$  为分散相粘度(mPa·s)。

当液相含水率小于转相点的含水率时, 油水混合物为 W/O 型, 此时连续相为油相(O), 分散相为水相(W),  $\mu_c = \mu_o$ ,  $\mu_d = \mu_w$ 。当液相的含水率大于转相点的含水率时, 油水混合物为 O/W 型, 此时的连续相为水相, 分散相为油相,  $\mu_c = \mu_w$ ,  $\mu_d = \mu_o$ 。

O/W(水包油)混合物的粘度:

$$\mu_L = \frac{\rho_o(1-\psi_w) + \rho_w\psi_w}{\rho_o(1-\psi_w) + \rho_w\psi_w} \cdot \frac{\mu_o}{\mu_w} \quad (8)$$

W/O(油包水)混合物的粘度:

$$\mu_L = \frac{\mu_o}{1-\psi_w} \left( 1 + \frac{1.5\mu_w\psi_w}{\mu_o + \mu_w} \right), \quad (9)$$

其中,  $\mu_L$  和  $\mu_o$  分别为油水乳状液和油相的粘度(mPa·s),  $\mu_w$  为水相粘度, 一般情况下认为其等于 1,  $\rho_o$  和  $\rho_w$  分别为油相和水相的密度, 混合液体中的含水率  $\psi_w = Q_w / Q_L = Q_w / (Q_w + Q_o)$ , 其中  $Q_w$ ,  $Q_o$  和  $Q_L$  分别为水、油和混合液的质量。

考虑粘性耗散, 温度对粘度的影响至关重要。采用 Seeton<sup>[25]</sup>提出的温度和粘度指数模型得到粘度与温度的关系, 如图 9 所示。由图可知, 随温度升高液体粘度下降。液滴与基板接触面的局部温度在迁移过程中逐渐降低, 液滴粘度增加, 液滴迁移速度在迁移方向上先迅速减小后缓慢减速, 最终趋于零。

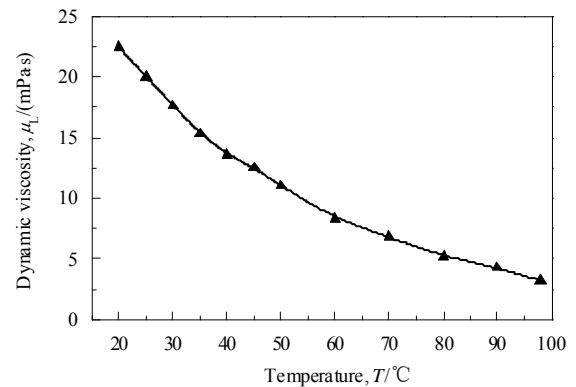


图 9 含水率 50% 的油水混合物的粘度随温度的变化

Fig.9 Variation of viscosity of oil-50% water mixture with temperature

### 4.2 含水率和温度梯度对液滴迁移速度的影响

当基板加热端升温至 81.5 和 98.3℃时, 常温端温度为 23.2 和 25.4℃, 温度梯度分别为 2.3 和 2.9℃/mm。含水率分别为 50wt%和 66.6wt%的石蜡油-去离子水异质液滴迁移速度  $U$  随时间  $t$  的变化见图 10。由图可知, 含水率由 66.6%降至 50%时, 温度梯度由 2.3℃/mm 增至

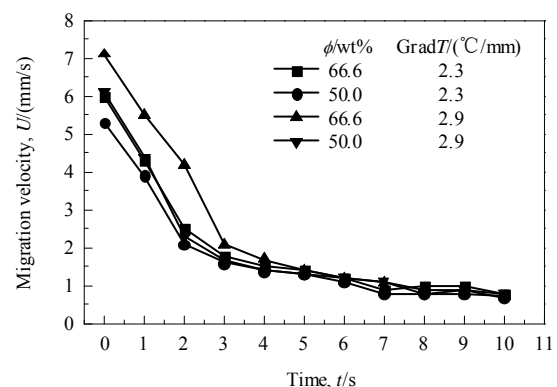


图 10 不同含水率和温度梯度下液滴迁移速度随时间的变化

Fig.10 Variation of migration velocity of droplets with time at different moisture contents and temperature gradients

2.9℃/mm, 液滴初始迁移速度由 5.3 mm/s 增至 6.1 mm/s, 温度梯度增加明显提高了液滴迁移速度. 保持温度梯度不变, 含水率升至 66.6wt%, 液滴初始迁移速度提高, 这是因为油水混合液体的粘度减小, 开始时液滴迁移速度较快, 迁移距离增加非常快, 而随时间推移, 迁移距离增加变缓.

#### 4.3 Marangoni 数对液滴迁移速度的影响

液膜上的温度梯度改变了流体的表面张力, 造成力失衡, 液滴运动的诱导力热毛细力将其从高温端推动至常温端, 直至平衡<sup>[26]</sup>. Marangoni 数( $Ma$ )是与表面张力成比例的无量纲数(由温度梯度引起), 可用于表征表面张力和粘滞力的相对影响:

$$Ma = \frac{(\partial\sigma/\partial T)\nabla T(D/2)}{\mu a}, \quad (10)$$

其中,  $\nabla T$  为横跨液滴层的特征温度差,  $a$  为热扩散系数.

假定液滴接触基板即达到表面温度,  $\nabla T$  为液滴的最低和最高层之间的温度差, 即液滴所在基板表面区域的局部温度与室温的差. 结合式(6)和(10), 得到迁移速度与 Marangoni 数的关系式:

$$U = \frac{(2\cos\theta + 1)D\text{Grad}Ta}{6\nabla T} Ma. \quad (11)$$

不同粘度和温度梯度下的迁移速度实验和计算结果与 Marangoni 数的关系如图 11 所示, 实验结果的微小误差由忽略室温代替液滴最高层温度和基板表面粗糙度引起的摩擦阻力导致.  $Ma$  数较小时, 实验和模拟结果有一定差异; 随  $Ma$  数增大, 实验和模拟结果吻合良好, 不同条件下  $Ma$  数相同时的迁移速度几乎相同.  $Ma$  数为表面张力与粘性力的比值,  $Ma$  数高, 表面张力发挥主导作用, 驱动力明显大于粘性阻力, 粘性力对液滴迁移的阻碍减弱.

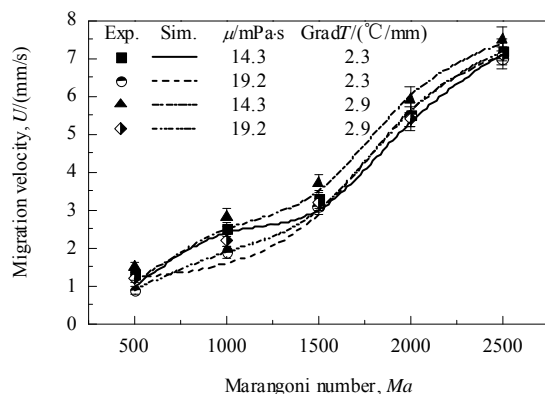


图 11 不同粘度和温度梯度下液滴迁移速度随  $Ma$  数的变化  
Fig.11 Variation of migration velocity of droplets with  $Ma$  at different viscosities and temperature gradients

Marangoni 效应是液滴运动的驱动力, Marangoni 数是衡量驱动力的无量纲参数.  $Ma$  数越大, 表面张力梯度越大, 驱动力越强, 随  $Ma$  数增大液滴运动速度明显增加<sup>[27]</sup>. 热毛细迁移过程中液滴并非一直加速, 一段时间后速度趋于稳定, 这是由于界面张力差与界面剪切力达到平衡, 使液滴以几乎恒定的速度运动.

## 5 结论

研究了金属基板表面上异质液滴的热毛细迁移, 考察了含水率相同的异质液滴在不同温度下的接触角变化规律及含水率和温度对粘度的影响, 分析了液滴在基板表面所受界面张力, 在单向温度梯度下用 Young 方程推导出有效预测液滴迁移速度的表达式, 研究了 Marangoni 数与液滴迁移速度的关系, 得到如下结论:

(1) 异质液滴在单向温度梯度下从高温区域迁移至低温区域, 同时伴随纵向扩散过程, 靠近常温端时收缩回原始形状.

(2) 异质液滴的接触角随温度升高和粘度降低而降低, 润湿性增强.

(3) 恒温条件下, 含水率较小时, 随含水率增大, 液滴粘度显著上升; 含水率接近临界值(55%~60%)时, 粘度最大, 发生转相, 粘度突然迅速下降. 油水混合物粘度随温度升高而下降, 流动性增加.

(4) 基板表面足够光滑时, 异质液滴的迁移速度随粘度增加而减小, 随温度梯度增加而增加. 温度梯度较小时, 不同粘度的液滴迁移速度差异较小, 随温度梯度增大, 差异增大.

(5) 基板表面温度分布不均造成液滴表面张力差异, 产生 Marangoni 效应, 液滴迁移并非一直加速, 当液滴界面受力平衡时液滴保持匀速运动. 液滴迁移速度先迅速降低, 然后缓慢减小到趋于 0. 随时间推移, 液滴迁移距离增速由快变慢, 后趋于稳定.

(6) 迁移速度随  $Ma$  数增加显著增加, 实验结果与模拟结果吻合较好,  $Ma$  数越大, 匹配程度越高.

#### 参考文献

- [1] 高鹏, 尹兆华, 胡文瑞. 液滴热毛细迁移问题的研究进展 [J]. 力学进展, 2008, 38(3): 329-338.  
Gao P, Yin Z H, Hu W R. The progresses of drop thermocapillary migration research [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(3): 329-338.
- [2] Chen J Z, Troian S M, Darhuber A A, et al. Effect of contact angle hysteresis on thermocapillary droplet actuation [J]. J. Appl. Phys., 2005, 97(1): 014906.
- [3] 武作兵. 液滴热毛细迁移研究进展 [C]//中国计算力学大会会议论文集. 2012: 276-280.  
Wu Z B. Advances in thermocapillary droplet migration [C]//Proceedings of Chinese Conference on Computational

- Mechanics. 2012: 276–280.
- [4] 黄聪, 胡良, 康琦. 双液滴热毛细迁移的实验研究 [J]. 力学学报, 2005, 37(2): 232–237.  
Huang C, Hu L, Kang Q. Experimental investigation of thermocapillary migration of two drops [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, 37(2): 232–237.
- [5] 张朔婷, 胡良, 段俐, 等. 多液滴热毛细迁移的研究 [J]. 力学学报, 2014, 46(5): 802–806.  
Zhang S T, Hu L, Duan L, et al. Droplet interactions in thermocapillary migration [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(5): 802–806.
- [6] 郭子成, 罗青枝, 荣杰. 润湿现象和毛细现象的热力学描述 [J]. 大学物理, 2000, 19(6): 19–21.  
Guo Z C, Luo Q Z, Rong J. Thermodynamic description of wetting phenomena and capillarity [J]. *College Physics*, 2000, 19(6): 19–21.
- [7] 高安然, 李铁, 刘翔, 等. 基于温度梯度驱动的液滴传输行为研究 [J]. 测试技术学报, 2010, 24(5): 377–380.  
Gao A R, Li T, Liu X, et al. Study on transportation behavior of droplet driven by thermal gradient [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, 24(5): 377–380.
- [8] Pradhan T K, Panigrahi P K. Thermocapillary convection inside a stationary sessile water droplet on a horizontal surface with an imposed temperature gradient [J]. *Exp. Fluids*, 2015, 56(9): 1–11.
- [9] Dai Q W, Khonsari M M, Shen C, et al. Thermocapillary migration of liquid droplets induced by a unidirectional thermal gradient [J]. *Langmuir*, 2016, 32(30): 7485–7492.
- [10] Dai Q W, Huang W, Wang X L. Surface roughness and orientation effects on the thermo-capillary migration of a droplet of paraffin oil [J]. *Exp. Therm Fluid Sci.*, 2014, 57(2): 200–206.
- [11] Dai Q W, Huang W, Wang X L. A surface texture design to obstruct the liquid migration induced by omni directional thermal gradients [J]. *Langmuir*, 2015, 31(37): 10154–10160.
- [12] Jiao Z J, Huang X Y, Nguyen N T, et al. Thermocapillary actuation of droplet in a planar micro channel [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2008, 5(2): 205–214.
- [13] Alhendal Y, Turan A, Kalendar A. Thermocapillary migration of an isolated droplet and interaction of two droplets in zero gravity [J]. *Acta Astronautica*, 2016, 126: 265–274.
- [14] Yin Z H, Chang L, Hu W R, et al. Thermocapillary migration and interaction of two nondeformable drops [J]. *Appl. Math. Mech.*, 2011, 32(7): 811–824.
- [15] 高鹏, 尹兆华, 胡文瑞. 大 Marangoni 数下液滴热毛细迁移的数值研究 [J]. 中国科学 E, 2007, 37(9): 1232–1234.  
Gao P, Yin Z H, Hu W R. Numerical investigation of thermocapillary migration of droplet at large Marangoni numbers [J]. *Science in China Series E*, 2007, 37(9): 1232–1234.
- [16] 武作兵. 大 Marangoni 数下液滴热毛细迁移实验的物理机制 [C]//全国实验流体力学学术会议论文集, 2013: 268–271.  
Wu Z B. Physical mechanism of thermocapillary migration experiment of droplet at large Marangoni numbers [C]//*Proceedings of National Conference on Experimental Fluid Mechanics*. 2013: 268–271.
- [17] Wu Z B. Terminal states of thermocapillary migration of a planar droplet at moderate and large Marangoni numbers [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2017, 105: 704–711.
- [18] 陈雪, 朱志强, 刘秋生, 等. 固体表面液滴热毛细迁移的实验研究 [C]//中国力学大会论文集, 2013: 1–7.  
Chen X, Zhu Z Q, Liu Q S, et al. Experimental study of thermocapillary motion of a droplet on a solid surface [C]//*Proceedings of The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics*. 2013: 1–7.
- [19] Tadmore R. Line energy and the relation between advancing, receding, and Young contact angles [J]. *Langmuir*, 2004, 20(18): 7659–7664.
- [20] Huang W, Wang X L. No migration of ionic liquid under temperature gradient [J]. *Colloids Surf., A*, 2016, 497: 167–170.
- [21] Mettu S, Chaudhury M K. Motion of drops on a surface induced by thermal gradient and vibration [J]. *Langmuir*, 2008, 24(19): 10833–10837.
- [22] 张昌艳. 油水混合物的转相及转相前后的粘度计算 [J]. 科技创新导报, 2010, (1): 50.  
Zhang C Y. Calculation of viscosity of oil–water mixtures before and after phase transformation [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2010, (1): 50.
- [23] Richardson E G. The flow of emulsions: II [J]. *Journal of Colloid Science*, 1953, 8(3): 367–373.
- [24] 刘德生, 宫敬, 吴海浩, 等. 三相流动条件下的油水混合物粘度 [J]. 油气储运, 2011, 30(2): 107–110.  
Liu D S, Gong J, Wu H H, et al. Viscosity of oil–water mixtures in three-phase flow [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2011, 30(2): 107–110.
- [25] Seeton C J. Viscosity–temperature correlation for liquids [J]. *Tribology Letters*, 2006, 22(1): 67–78.
- [26] Pratap V, Moumen N, Subramanian R S. Thermocapillary motion of a liquid drop on a horizontal solid surface [J]. *Langmuir*, 2008, 24(9): 5185–5193.
- [27] Balasubramaniam R, Subramanian R S. The migration of a drop in a uniform temperature gradient at large Marangoni numbers [J]. *Phys. Fluids*, 2000, 12(4): 733–743.