

液滴在不同润湿性表面上蒸发时的动力学特性

叶学民 张湘珊 李明兰 李春曦

Dynamics of evaporating drop on heated surfaces with different wettabilities

Ye Xue-Min Zhang Xiang-Shan Li Ming-Lan Li Chun-Xi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 114702 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180159

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180159>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[纳米通道内气体剪切流动的分子动力学模拟](#)

Molecular dynamics simulations of surface effects on Couette gas flows in nanochannels

物理学报.2018, 67(8): 084701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172706>

[水滴撞击结冰过程的分子动力学模拟](#)

Molecular dynamics simulation of freezing process of water droplets impinging on cold surface

物理学报.2018, 67(5): 054702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172174>

[非对称纳米通道内流体流动与传热的分子动力学](#)

Molecular dynamics simulation of fluid flow and heat transfer in an asymmetric nanochannel

物理学报.2017, 66(20): 204704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204704>

[分离压和表面黏度的协同作用对液膜排液过程的影响](#)

Synergistic effects of disjoining pressure and surface viscosity on film drainage process

物理学报.2017, 66(19): 194701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.194701>

[随活性剂浓度变化的分离压对垂直液膜排液过程的影响](#)

Effect of concentration-dependent disjoining pressure on drainage process of vertical liquid film

物理学报.2017, 66(18): 184702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.184702>

## 液滴在不同润湿性表面上蒸发时的动力学特性\*

叶学民 张湘珊 李明兰 李春曦†

(华北电力大学, 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 保定 071003)

(2018年1月22日收到; 2018年2月16日收到修改稿)

基于润滑理论, 采用滑移边界条件建立了二维液滴厚度的演化模型和移动接触线动力学模型, 利用数值计算方法模拟了均匀加热基底上固着液滴蒸发时的动力学特性, 分析了液-气、固-气和液-固界面张力温度敏感性对壁面润湿性和液滴动态特性的影响. 结果表明, 液滴的运动过程受毛细力、重力、热毛细力和蒸发的影响, 重力对液滴铺展起促进作用, 而毛细力、热毛细力则起抑制作用; 通过改变界面张力温度敏感性系数, 可使液滴蒸发过程中的接触线呈现处于钉扎或部分钉扎模式, 且接触线钉扎模式下的液滴存续时间低于部分钉扎模式; 提高液-气与液-固界面张力温度敏感系数均可改善壁面润湿性能, 加快液滴铺展速率; 而增大固-气界面张力温度敏感系数则导致壁面润湿性能恶化、延缓液滴铺展过程; 通过改变固-气界面张力温度敏感系数更有利于调控处于蒸发状态下的液滴运动.

关键词: 液滴, 蒸发, 润湿性, 钉扎

PACS: 47.61.-k, 47.85.mf, 47.61.Fg, 47.55.dk

DOI: 10.7498/aps.67.20180159

## 1 引言

液滴蒸发是制造业中的常见现象, 处于蒸发状态下的液滴在固体壁面上的运动特性与焊接、农药喷洒和喷墨打印质量密切相关<sup>[1-4]</sup>. 基底材质、表面粗糙度和润湿性<sup>[5]</sup>通过改变液滴运动过程中的接触角和三相接触线<sup>[6-8]</sup>, 从而影响液滴的动力学特性<sup>[9,10]</sup>. 深入研究其对液滴运动影响的内在机理有助于调控液滴运动, 进而改进工艺和提高产品质量.

在实验方面, Mollaret等<sup>[11]</sup>研究了不同基底加热温度下铝和聚四氟乙烯表面上液滴蒸发的动态过程, 发现基底温度较高时呈现接触线钉扎模式下的蒸发过程. Kuznetsov等<sup>[12]</sup>针对由 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 制成的固体基底上的纯水和盐水液滴的蒸发过程, 指出浓度为9.1%的盐水液滴蒸发过程中呈现接触线钉扎模式, 而浓度达到16.7%时则呈现接触线移动模式下的铺展过程. Kiper等<sup>[13]</sup>对比了环境压力

为1—101 kPa时疏水和超疏水基底上的液滴蒸发动态特征, 指出接触角随压力升高而减小; 在较低压力下, 液滴将从Cassie-Baxter状态转变到Wenzel状态. Lopes和Bonaccorso<sup>[14]</sup>探究了黏弹性基底上液滴的蒸发过程, 发现通过调整基底柔软度可控制接触线钉扎模式和恒定接触角模式间的转变. Gatapova等<sup>[15]</sup>在基底与环境温差为40 °C的条件下分析了壁面润湿性对液滴蒸发的影响, 指出液滴运动过程中接触线呈现钉扎、部分钉扎和去钉扎3种模式; 且在液滴存续的最后阶段, 蒸发速率急剧增加. Guan等<sup>[16]</sup>发现放置在光滑纹理表面上的液滴蒸发过程遵循理想的恒定接触角模式, 底面纹理的存在对蒸发起抑制作用. Kuznetsov等<sup>[17]</sup>分析了不同粗糙度铜基板表面上的液滴蒸发过程, 指出改变基底粗糙度可调控液滴铺展历程. 张文彬等<sup>[18]</sup>通过观测含 $\text{SiO}_2$ 颗粒的液滴蒸发后在固体表面上的环状沉积图案, 发现液滴蒸发过程中的接触线钉扎是形成环状沉积的必要条件.

理论研究方面, 早期对液滴蒸发过程的理论研

\* 国家自然科学基金(批准号: 11202079)和中央高校基本科研业务费(批准号: 13MS97)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: leechunxi@163.com

究多基于预置液膜模型. Ajaev 等<sup>[19]</sup>研究了在加热倾斜平面上重力驱动的挥发性液膜流动过程中表观接触角的静态值和动态值, 指出静态接触角随温度升高而增大. Karapetsas 等<sup>[20]</sup>模拟了不溶性表面活性剂和非相互作用的颗粒存在时液滴蒸发的动态特性, 发现活性剂通过抑制接触线的移动进而减缓蒸发过程. 值得注意的是, 采用预置液膜模型时, 液滴并非与固体表面接触, 因此无法探究壁面润湿性对液滴蒸发过程的影响. 为此, 近年来有学者研究液滴与固体表面直接接触时液滴蒸发的动态特征. Bouchenna 等<sup>[21]</sup>研究了接触线钉扎时液滴的蒸发速率和内部的流动模式, 指出可忽略热浮力效应对液滴内部流动的影响; 在蒸发的最后阶段, 接触线处蒸发速率的影响才变得重要; 热毛细力主要控制蒸发过程中液滴内部的流动模式. Amini 和 Homsy<sup>[22]</sup>通过建立接触线钉扎和具有恒定接触角不同蒸发模式下的理论模型, 模拟了光滑加热基底上二维挥发性液滴的形态演变历程, 指出尽管随时间推移, 液滴厚度的减小使蒸发质量增加, 但蒸发质量的总和与液滴的总面积变化使接触线在后退过程中以几乎恒定的速度移动.

上述关于处于蒸发状态的液滴在固体表面上的动力学特性研究虽然涉及壁面性质的影响和以接触线、接触角为代表的壁面因素, 但均未阐释壁面润湿性影响接触线动态特征的物理机制, 目前也鲜有这方面的文献报道. 为此, 本文采用滑移边界条件, 建立受热蒸发的液滴在固体表面上的二维演化模型, 通过数值模拟探讨液-气、固-气和液-固界面张力温度敏感性对壁面润湿性和液滴蒸发过程的影响, 揭示壁面润湿性对不同接触线运动模式影响的内在机理.

## 2 理论模型

### 2.1 物理模型

如图 1 所示, 一液滴放置在加热的固体表面上并不断蒸发, 液滴初始最大厚度为  $H^*$ , 流动方向尺度为  $L^*$ , 壁面温度为  $T_w^*$ . 由于  $\varepsilon = H^*/L^* \ll 1$ , 因此可应用润滑理论<sup>[23]</sup>进行解析(上角标\*表示有量纲量, 下同).

液滴运动过程的控制方程包括连续方程、动量方程和能量方程:

$$\nabla^* \cdot \mathbf{u}^* = 0, \quad (1)$$

$$\rho^*(\mathbf{u}_{t^*}^* + \mathbf{u}^* \cdot \nabla^* \mathbf{u}^*) + \nabla^* p^* - \mu^* \nabla^{*2} \mathbf{u}^* - \rho^* \mathbf{g}^* = 0, \quad (2)$$

$$\rho^* C_p^*(T_{t^*}^* + \mathbf{u}^* \cdot \nabla^* T^*) - \lambda^* \nabla^{*2} T^* = 0, \quad (3)$$

式中  $p^*$ ,  $T^*$  和  $t^*$  分别表示压强、温度和时间;  $\mu^*$  和  $\rho^*$  分别为液体动力黏度与密度,  $\lambda^*$  为液滴导热系数,  $C_p^*$  为液体的定压比热,  $\nabla^*$  为梯度算子;  $\mathbf{u}^* = (u^*, w^*)$ ,  $u^*$  和  $w^*$  分别为水平和垂直方向上的速度分量.

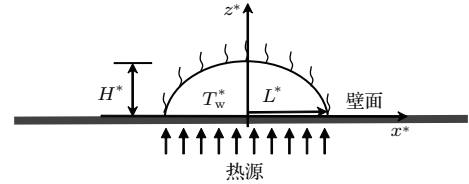


图 1 放置在加热表面上的液滴示意图

Fig. 1. Schematic of drop disposed on a horizontal heated substrate.

在液-气界面处, 满足切向和法向应力平衡:

$$\mathbf{n}^* \cdot \boldsymbol{\tau}^* \cdot \mathbf{t}^* = \mathbf{t}^* \cdot \nabla_s^* \sigma_{lg}^*, \quad (4)$$

$$\frac{J^{*2}}{\rho^*} + \mathbf{n}^* \cdot \boldsymbol{\tau}^* \cdot \mathbf{n}^* = k^* \sigma_{lg}^*, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{n}^* = \frac{-h_{x^*}^*, 1}{(1 + h_{x^*}^{*2})^{1/2}}$  和  $\mathbf{t}^* = \frac{1, h_{x^*}^*}{(1 + h_{x^*}^{*2})^{1/2}}$  分别为界面处的单位法向和切向向量,  $h^*$  为液滴厚度;  $k^* = -\nabla^* \cdot \mathbf{n}^*$  为液-气界面处的平均曲率,  $\boldsymbol{\tau}^* = -p^* \mathbf{I}^* + \mu^*(\nabla^* \mathbf{u}^* + \nabla^* \mathbf{u}^{*T})$  为总应力张量,  $J^*$  为界面质量迁移的质量跃变流率,  $\sigma_{lg}^*$  为液-气界面张力.

在液-气界面处, 运动学及热边界条件为

$$h_{t^*}^* + u^* h_{x^*}^* = w^* - \frac{J^*}{\rho^*}, \quad (6)$$

$$\lambda^* \mathbf{n}^* \cdot \nabla^* T^* + J^* L_a^* = 0, \quad (7)$$

式中  $L_a^*$  为气化潜热.

界面处的蒸发流量与界面温度有关, 其方程为

$$K^* J^* = T_i^* - T_s^*, \quad (8)$$

式中  $K^* = \frac{T_s^{*3/2}}{a \rho_v^* L_a^*} \cdot \left( \frac{2\pi R_g^*}{M_m^*} \right)^{1/2}$  为界面热阻;  $T_i^*$  为界面温度,  $T_s^*$  为液体的饱和温度,  $R_g^*$  为通用气体常数,  $M_m^*$  为单分子质量,  $\rho_v^*$  为蒸气密度,  $a$  为协同因数.

壁面温度满足

$$T_w^* = T_{w0}^*. \quad (9)$$

假设界面张力与温度满足线性关系 [8]:

$$\begin{aligned} \sigma_i^* &= \sigma_{i,T_0}^* + \alpha_{T_i}^* (T_i^* - T_0^*), \\ i &= \text{lg, ls, sg}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $\sigma_{i,T_0}^*$  为相应界面在  $T_0^*$  下的界面张力,  $\alpha_{T_i}^*$  为温度引起的张力梯度;  $T_0^*$  和  $T_i^*$  分别为参考温度和界面温度; lg, ls 和 sg 分别代表液-气、液-固和固-气界面.

将控制方程和边界条件采用下式进行无量纲化:

$$\begin{aligned} (x^*, z^*, h^*) &= L^*(x, \varepsilon z, \varepsilon h), \quad t^* = \frac{L^*}{U^*} t, \\ (u^*, w^*) &= U^*(u, \varepsilon w), \quad p^* = \frac{S^*}{H^*} p, \\ T^* &= T(T_m^* - T_0^*) + T_0^*, \quad \Sigma_i = \frac{\alpha_{T_i}^* (T_m^* - T_0^*)}{\sigma_{i,T_0}^* - \sigma_{i,T_m}^*}, \\ \sigma_i^* &= S^* \sigma_i + \sigma_{i,T_m}^*, \quad J^* = J_0 J, \quad K^* = \frac{K \varepsilon L^* L_a^*}{\lambda^*}, \end{aligned}$$

式中  $J_0 = \frac{\lambda_h^* (T_m^* - T_s^*)}{H^* L_a^*}$ ;  $U^* = \frac{S^* H^*}{\mu^* L^*}$  为特征速度,  $S^* = \sigma_{i,T_0}^* - \sigma_{i,T_m}^*$  为铺展系数,  $\lambda_h^*$  为液-气界面处液体的导热系数,  $T_m^*$  表示液滴的最高温度,  $\sigma_{i,T_m}^*$  为相应界面在  $T_m^*$  下的张力,  $\Sigma_i$  ( $i = \text{lg, ls, sg}$ ) 为相应界面张力对温度的敏感系数.

通过无量纲变换并保留数量级大于等于  $O(\varepsilon)$ , 可得无量纲控制方程组为:

$$u_x + w_z = 0, \quad (11)$$

$$p_x = u_{zz}, \quad (12)$$

$$h_t = \underbrace{\left[ -C_a h_{xxx} \left( \frac{h^3}{3} + \beta h^2 \right) \right]}_{\textcircled{1}} + \underbrace{\left[ \varepsilon B o h_x \left( \frac{h^3}{3} + \beta h^2 \right) \right]}_{\textcircled{2}} - \underbrace{\left[ \Sigma_{\text{lg}} \left( \frac{K \gamma_0}{(K+h)^2} h_x \right) \left( \frac{h^2}{2} + \beta h \right) \right]}_{\textcircled{3}} \underbrace{\left[ -\frac{E \gamma_0}{K+h} \right]}_{\textcircled{4}}, \quad (25)$$

(25) 式右侧依次代表毛细力、重力、热毛细力和蒸发在液滴运动过程中的作用. 当  $K = E = 0$ , 可简化为 Karapetsas 等 [24] 所建模型.

接触线处的液滴高度为零, 即  $h(x = x_{cl} = x_{cr}, t) = 0$ , 其中  $x_{cl}$  和  $x_{cr}$  分别代表左侧和右侧接触线的位置, 采用下式描述接触线移动速率与接触角间的关系 [24]:

$$v_c = \frac{dx_c}{dt} = B(\theta - \theta_a)^q, \quad (26)$$

式中  $B$  和  $q$  为常数, 忽略接触角滞后现象,  $\theta$  和  $\theta_a$  分别为液滴的动态接触角和平衡接触角.  $v_c > 0$  代

$$p_z = -\varepsilon B o, \quad (13)$$

$$T_{zz} = 0, \quad (14)$$

式中  $B o = \frac{\rho^* g^* H^{*2}}{\mu^* U^*}$  为邦德数, 下角标表示对该参数求偏导.

无量纲边界条件为:

$$z = 0, \quad w = 0, \quad (15)$$

$$u = \beta u_z, \quad (16)$$

$$T = \gamma_0, \quad (17)$$

$$z = h, \quad u_z = \sigma_{\text{lg}x}, \quad (18)$$

$$p = -C_a h_{xx}, \quad (19)$$

$$h_t + u h_x = w - E J, \quad (20)$$

$$T_z = -J, \quad (21)$$

$$K J = T, \quad (22)$$

式中  $C_a = \frac{\varepsilon^2 \sigma_{\text{lg},T_m}^*}{S^*}$ ,  $\beta = \frac{\beta^*}{H^*}$ ,  $\gamma_0 = \frac{T_w^* - T_0^*}{T_m^* - T_0^*}$ ,  $E = \frac{\lambda_h^{*2} (T_m^* - T_s^*)}{\varepsilon H^* U^* \rho^* L_a^*}$  分别表示毛细数、滑移系数、加热系数和蒸发数,  $\beta^*$  为滑移长度.

由 (17) 式和 (22) 式可得  $J = \frac{\gamma_0}{K+h}$ .

无量纲形式的界面张力与温度关系为

$$\sigma_{\text{lg}} = 1 - \Sigma_{\text{lg}} T, \quad (23)$$

$$\sigma_i = \sigma_{i,0} (1 - \Sigma_i T), \quad i = \text{ls, sg}. \quad (24)$$

采用积分法可得液滴厚度的演化方程为

表向外铺展,  $v_c < 0$  则代表向内收缩.

在接触线处, Young 方程为

$$\sigma_{\text{sg}}(x_c) = \sigma_{\text{lg}}(x_c) \cos \theta_a + \sigma_{\text{ls}}(x_c). \quad (27)$$

由于在液滴铺展中  $\theta_a$  很小, 故采用 Karapetsas 等 [24] 的假设:  $\cos \theta_a \rightarrow \cos(\varepsilon \theta_a)$ ; 又有  $1 - (\varepsilon^2 \theta_a^2)/2 \approx \cos(\varepsilon \theta_a)$ , 因此可得

$$\begin{aligned} \theta_a^2 &= -\frac{2}{\varepsilon^2} \left[ \frac{A(1 - \Sigma_{\text{sg}} \gamma_0)}{1 - \Sigma_{\text{lg}} \gamma_0} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(\Sigma_{\text{ls}} - \Sigma_{\text{sg}}) \sigma_{\text{ls},0} \gamma_0 + (\Sigma_{\text{lg}} - \Sigma_{\text{sg}}) \gamma_0}{1 - \Sigma_{\text{lg}} \gamma_0} \right], \end{aligned} \quad (28)$$

式中  $A = \sigma_{\text{sg},0} - \sigma_{\text{ls},0} - 1$ . 当 (28) 式右侧为负时,

取  $\theta_a = 0$ , 表示壁面“完全润湿”。

### 2.2 初始条件和网格选取

计算初始条件为

$$h(x, t = 0) = (1 - x^2)[H(1 - x) - H(-1 - x)], \quad (29)$$

$$x_{cl}(t = 0) = -1, \quad x_{cr}(t = 0) = 1, \quad (30)$$

式中  $H(x) = 0.5[1 + \tanh(20x)]$  为 Heaviside 函数 [25]。

模拟中采用 Karapetsas 等 [24] 所提方法, 把液滴运动区域采用坐标变换的方式固定在  $[-1, 1]$ ; 采用 Freefem 软件, 计算中将  $[0, 2] \times [0, 1]$  的计算域划分为  $500 \times 2$  个均匀网格. 因方程是一维的, 液滴厚度与  $y$  方向无关, 所以为节约计算时间在  $y$  方向仅划分 2 层网格. 计算中时间步长为  $10^{-6}$ . 模拟中,

在  $x$  方向上对比了网格数为 300, 500 和 700 的结果, 表明当网格数为 500 时可同时满足精确性与高效性的要求.

### 3 结果与讨论

$\Sigma_{lg}, \Sigma_{sg}, \Sigma_{ls}$  表征液-气、固-气和液-固界面张力对温度的敏感性. 为探究界面张力影响壁面润湿性和液滴运动过程的内在机理, 下文分别讨论上述 3 个敏感性系数在液滴蒸发中的作用. 参照 Mollaret 等 [11] 和 Gatapova 等 [15] 的实验, 可得液滴基本参数的取值范围 (表 1), 由此可推出模拟所用无量纲参数的取值范围 (表 2). 如无特殊说明, 取值如下:  $\varepsilon = 0.1, B = 0.001, q = 3, \sigma_{ls,0} = 1, A = -0.001, Bo = 0.5, \beta = 1 \times 10^{-5}, \gamma_0 = 0.1, Ca = 0.1, K = 10, E = 1 \times 10^{-3}$ .

表 1 有量纲液滴的基本参数取值范围  
Table 1. Typical range of dimensional parameters of drop.

物性参数	符号/单位	典型范围 [11]	典型范围 [15]
液滴厚度	$H/m$	$\geq 3.5 \times 10^{-4}$	$(2.24-5.00) \times 10^{-3}$
长度特征尺度	$L/m$	$(3.00-3.75) \times 10^{-3}$	$9.9 \times 10^{-3}$
黏度	$\mu/Pa \cdot s$	$(2.9-10.0) \times 10^{-4}$	$(2.9-10.0) \times 10^{-4}$
液体密度	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	$10^3$	$10^3$
蒸气密度	$\rho_v/kg \cdot m^{-3}$	1	1
界面张力	$\sigma/N \cdot m^{-1}$	$(6.0-7.7) \times 10^{-2}$	$10^{-2}-10^{-1}$
气化潜热	$L_a/kJ \cdot kg^{-1}$	$(2.2-2.5) \times 10^3$	$(2.2-2.5) \times 10^3$
比热	$C_p/kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1	1
导热系数	$\lambda/kW \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$(5.5-6.8) \times 10^{-4}$	$(5.5-6.8) \times 10^{-4}$
传热系数	$\alpha/kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	1-10	1-10

表 2 液滴的无量纲参数取值范围  
Table 2. Range of dimensionless parameters of drop.

无量纲参数	取值范围	取值范围
小量 $\varepsilon$	$(9.3-11.0) \times 10^{-2}$	$(2.26-50.00) \times 10^{-2}$
邦德数 $Bo$	$(6.3-18.0) \times 10^{-3}$	$1.16 \times 10^{-1}-5.76 \times 10^2$
加热系数 $\gamma_0$	0-1	0-1
蒸发数 $E$	$2.6 \times 10^{-5}-1.4 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-4}-4.7$
毛细数 $Ca$	$8.6 \times 10^{-3}-2.0 \times 10^{-1}$	$5.1 \times 10^{-5}-2.5$
界面张力敏感系数 $\Sigma_i$	$(0-1.9) \times 10^5$	$(0-3) \times 10^5$
界面热阻 $K$	$1.9 \times 10^{-5}-60$	$4.4 \times 10^{-6}-14$



### 3.1 相同的界面张力温度敏感性

当  $\Sigma_{lg} = \Sigma_{ls} = \Sigma_{sg} = 1$  时, 其平衡接触角  $\theta_a = 0.447$  为定值, 即此时壁面呈现均匀润湿特征 (图 2 和图 3). 因液滴运动在  $x = 0$  两侧呈对称形式 (图 2(a)), 下文以右侧接触角、接触线为例来阐明其动态过程. 如图 2(b) 所示, 液滴演化过程大致分为 3 个阶段: I)  $t = 0 - 1.0 \times 10^4$  为铺展阶段; II)  $t = 1.0 \times 10^4 - 2.55 \times 10^4$  为接触线钉扎阶段;

III)  $t = 2.55 \times 10^4 - 3.4 \times 10^4$  为液滴直径和接触角同时减小、直至被蒸干阶段.

由 (25) 式可知, 液滴运动历程受毛细力、重力及热毛细力和蒸发等因素的影响. 由图 3 可知, 重力对液滴铺展起促进作用, 而毛细力、热毛细力则起抑制作用. 整个运动过程中, 随时间持续, 毛细力、重力和热毛细力对液滴厚度变化的影响在降低, 而蒸发对液滴厚度减少的影响在增强. 图 2(a) 和图 2(c) 表明, 在阶段 I, 液滴厚度最大时下降最快,

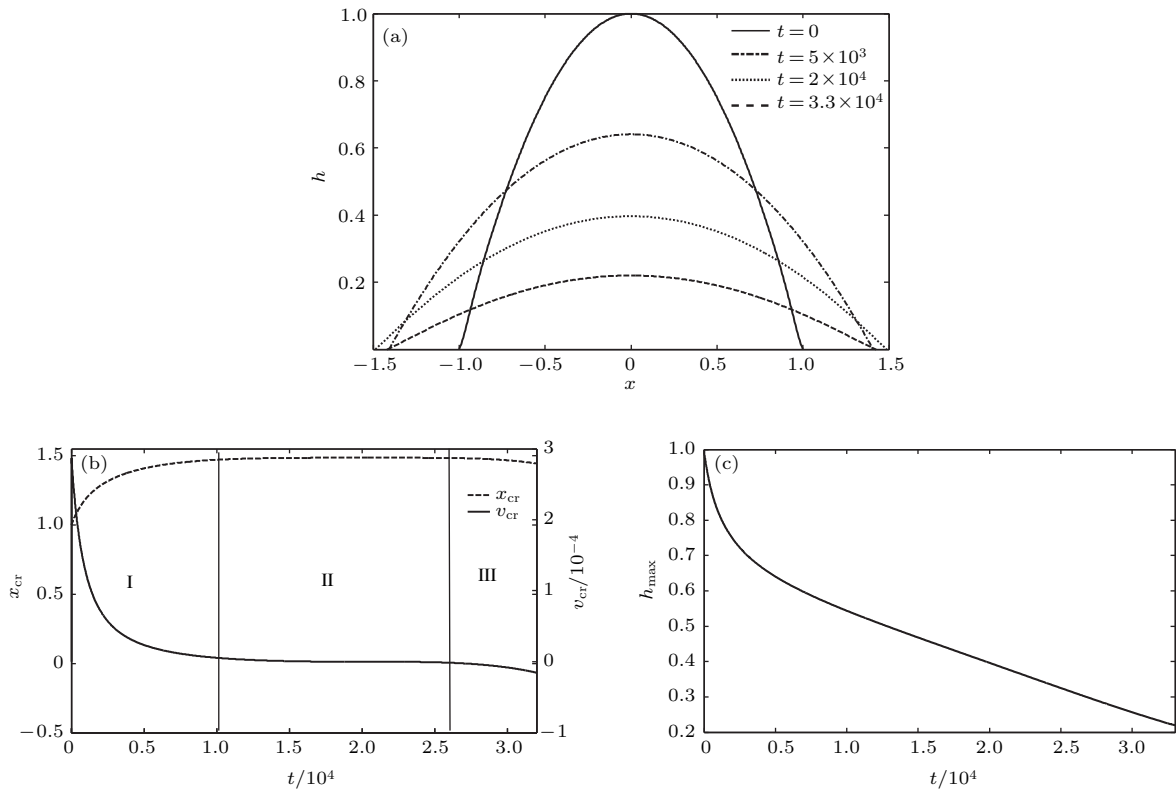


图 2 液滴演化过程 (a) 轮廓; (b) 接触线; (c) 最大高度

Fig. 2. Evolution of drop with time: (a) Profile; (b) contact line; (c) maximum thickness.

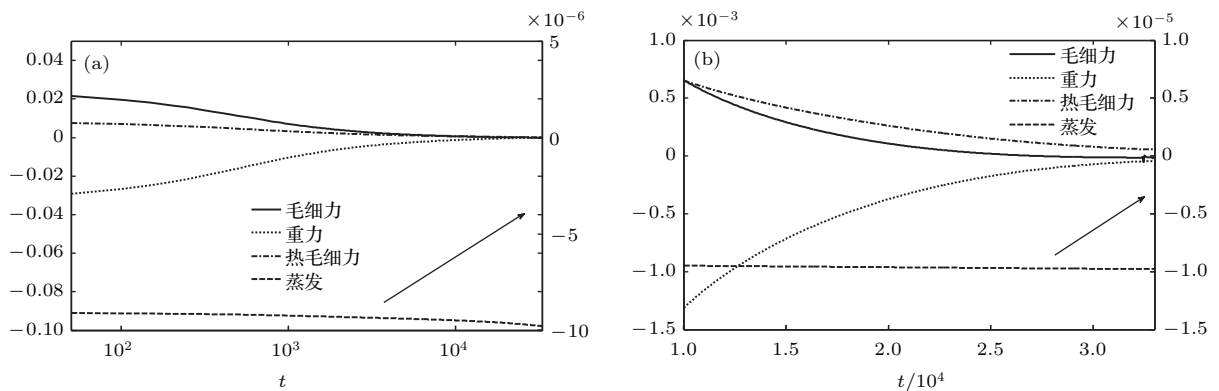


图 3 液滴演化过程中的各作用项影响 (a) 整体过程; (b) 阶段 II 和 III

Fig. 3. Effect of items during evolution of drop: (a) Entire process; (b) stage II and stage III.

此时重力占主导作用,且在阶段I时毛细力对铺展的抑制作用比热毛细力和蒸发更显著(图3(a));在阶段II和III,热毛细力对铺展的抑制作用超过毛细力的影响(图3(b)).因液滴表面温度与液滴厚度成反比,随液滴铺展其表面温度增加,且接触线处的温度最高,所以液滴蒸发量由最大厚度处到边缘处逐渐增大.因此,在阶段II接触线呈现钉扎现象,是由于重力、毛细力与热毛细力等3项作用之和对液滴接触线处的质量补充与蒸发携带走的质量达到平衡所致;而在阶段III接触线呈现去钉扎特征,是由于此时3项作用之和对液滴接触线处的质量补充已不能弥补蒸发携带走的质量.

Mollaret等<sup>[11]</sup>将初始直径约为3.25 mm的水滴放置在加热到60 °C的铝表面进行蒸发实验,将其所得接触角变化的实验结果采用文中所给无量纲变换式进行变换后,与本文模拟值进行对比,如图4所示.图4表明,模拟值与实验结果趋势相同、符合良好,但实验结果中并未包含液滴铺展阶段,因此无法呈现阶段I的特征.接触角变化的斜率大于模拟值是实验所用加热温度高于模拟值所致.

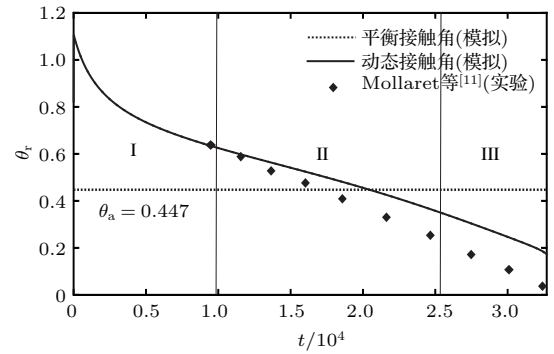


图4 接触角变化的模拟值和实验值对比  
Fig. 4. Comparison of variation of contact angle with time between simulated and experimental results.

### 3.2 不同界面张力温度敏感性

#### 3.2.1 液-气界面张力温度敏感性

取 $\Sigma_{lg} = 1.005$ 和 $1.008$ ,其他参数不变,以体现液-气界面张力敏感系数的影响.液滴演化历程如图5—图7所示.由(25)式可知,液-气界面张力系数发生变化时,将改变液滴所受热毛细力,且由图3可知,增大 $\Sigma_{lg}$ ,即增大热毛细力,可抑制液滴铺展过程.

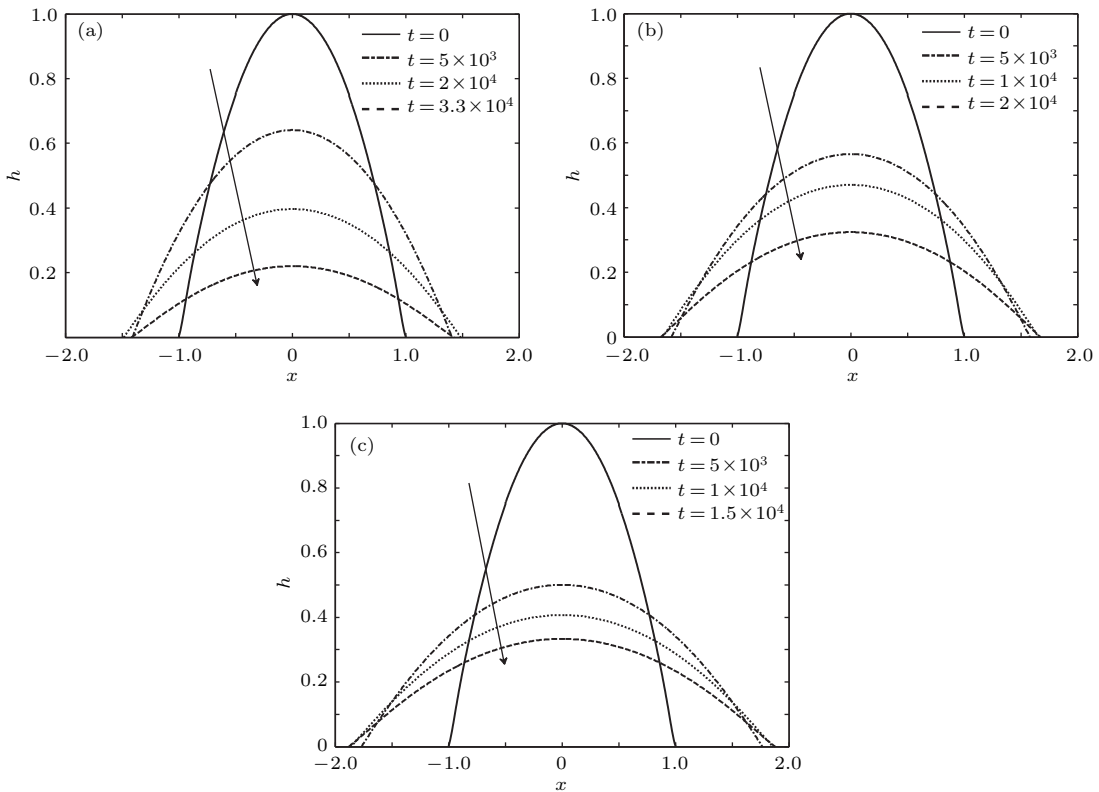


图5 液滴轮廓变化 (a)  $\Sigma_{lg} = 1.0$ ; (b)  $\Sigma_{lg} = 1.005$ ; (c)  $\Sigma_{lg} = 1.008$   
Fig. 5. Evolution of drop profile with time: (a)  $\Sigma_{lg} = 1.0$ ; (b)  $\Sigma_{lg} = 1.005$ ; (c)  $\Sigma_{lg} = 1.008$ .

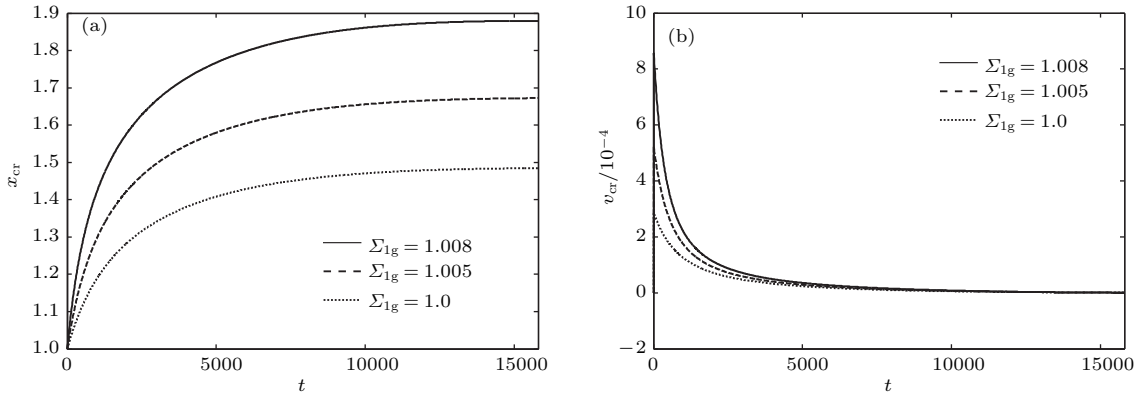


图6 不同  $\Sigma_{lg}$  时接触线变化 (a) 位置; (b) 速度  
Fig. 6. Changes of contact line with different  $\Sigma_{lg}$ : (a) Location; (b) velocity.

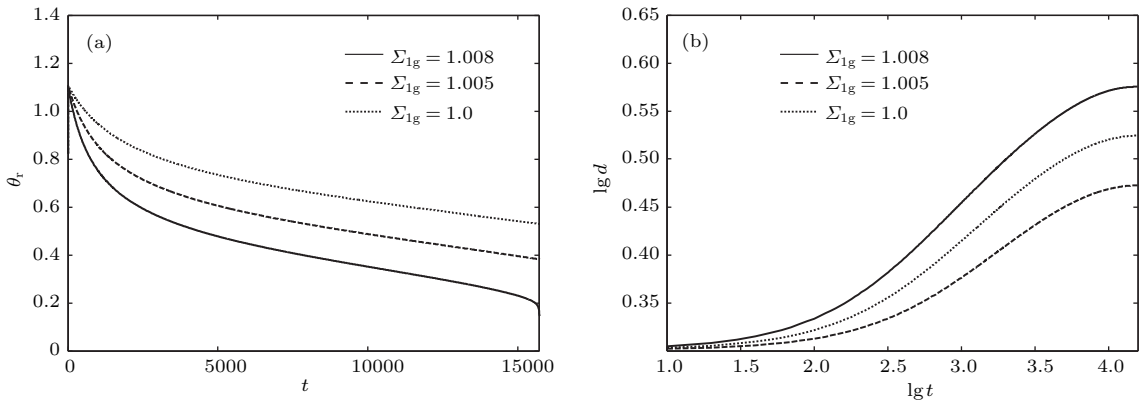


图7 不同  $\Sigma_{lg}$  时液滴的演化过程 (a) 接触角; (b) 直径  
Fig. 7. Evolution of drop with different  $\Sigma_{lg}$ : (a) Contact angle; (b) diameter of the drop.

由(28)式可得, 此时的平衡接触角分别为  $\theta_a = 0.2982$  和  $0.1491$ , 即增大  $\Sigma_{lg}$ , 将减小液滴在固体壁面铺展时形成的平衡接触角, 进而提高其壁面润湿性能. 液滴内部流体的水平方向速度为

$$u = (-Ch_{xxx} + \varepsilon Boh_x) \left( \frac{z^2}{2} - hz - \beta h \right) - \frac{\Sigma_{lg} K \gamma_0}{(K + h)^2} h_x (z + \beta). \quad (31)$$

(31)式表明, 提高  $\Sigma_{lg}$  可增大  $u$ , 即提高液-气界面张力敏感系数可加速液滴铺展. 当  $\Sigma_{lg} = 1.005$  和  $1.008$  时, 接触线达到钉扎的时刻分别为  $t = 1.41 \times 10^4$  和  $1.51 \times 10^4$ , 如图6(a)所示. 因此, 提高液-固界面张力敏感系数后形成的较小平衡接触角将推迟接触线达到钉扎现象的出现.

$\Sigma_{lg} = 1.005$  和  $1.008$  时, 接触线  $x_{cr}$  与  $t$  的幂律关系分别为  $x_{cr} \approx t^{0.041}$  和  $x_{cr} \approx t^{0.059}$ , 即上述作用的综合结果提高了液-气界面张力敏感系数  $\Sigma_{lg}$ , 进而显著加快了液滴的铺展速度(图5和图6), 并使液滴厚度加快减薄. 因液滴表面温度与其厚度呈反比, 此时液滴表面温度得以提高, 而蒸发速率

与液滴表面温度呈正比, 故提高液-气界面张力系数可增大液滴表面的蒸发速率. 该情形下液滴的蒸干时间分别为  $t = 2.39 \times 10^4$  和  $1.64 \times 10^4$ , 相对于  $\Sigma_{lg} = 1.0$  的情形,  $\Sigma_{lg} = 1.005$  和  $1.008$  时液滴蒸干时间分别缩短了30%和52%. 虽然  $\Sigma_{lg}$  仅改变了0.5%和0.8%, 但却对液滴铺展和蒸发过程产生了显著影响.

### 3.2.2 固-气界面张力温度敏感性

为探讨固-气界面张力敏感系数的影响, 将  $\Sigma_{sg}$  增至  $1.005$  和  $1.008$ , 其他参数不变. 此时的平衡接触角分别为  $\theta_a = 0.650$  和  $0.745$ , 即提高固-气界面张力敏感性系数  $\Sigma_{sg}$  可增大平衡接触角, 致使液滴在壁面上的润湿效果变差. 模拟显示, 这两种情形下的液滴蒸干时间分别为  $t = 6.94 \times 10^4$  和  $7.8 \times 10^4$ , 相对于  $\Sigma_{sg} = 1.0$ , 其蒸干时间分别延长了104%和129%. 由图8可知, 同一时刻下 ( $t = 1 \times 10^4$ ), 液滴铺展速度明显减慢, 因液滴表面温度与其厚度呈反比, 此时液滴表面温度降低, 而蒸发速率与液滴表面温度呈正比, 故提高  $\Sigma_{sg}$



可减慢液滴表面的蒸发速率.  $\Sigma_{sg} = 1.005, 1.008$  时接触线达到钉扎状态的时刻分别为  $t = 8 \times 10^3, 7 \times 10^3$  (图 9). 由此可知提高  $\Sigma_{sg}$  可使接触线提前达到钉扎状态.

下文以  $\Sigma_{sg} = 1.005$ , 即平衡接触角  $\theta_a = 0.650$  时做具体分析. 图 10 为液滴的接触线钉扎蒸发模式与恒定接触角蒸发模式. 由图 11 (a) 和图 11 (b) 可知, 液滴演化过程经历 4 个阶段: I)  $t = 0 - 8 \times 10^3$  迅速铺展阶段; II)  $t = 8 \times 10^3 - 3.5 \times 10^4$  接触线钉扎、接触角减小阶段; III)  $t = 3.5 \times 10^4 - 6.7 \times 10^4$  接触线去钉扎、接触角近似恒定阶段; IV)  $t = 6.7 \times 10^4 - 6.94 \times 10^4$  液滴直径和接触角同时减小、直至被蒸干阶段. 阶段 I 和阶段 IV 的时间较短, 而阶段 II 和阶段 III 时间相对较长, 且二者大体相当. 这与 Semenov 等 [4] 总结出的液滴在固

体壁面蒸发的 4 个阶段特征相符合 (见图 11 (c) 和图 11 (d)).

Gatapova 等 [15] 在控制基底与环境温差为  $40\text{ }^\circ\text{C}$  的情形下, 采用初始体积为  $92.6\text{ }\mu\text{L}$ , 直径为  $4.5\text{ mm}$  的水滴在涂有六甲基二硅氮烷的表面进行蒸发实验. 类似于 3.1 节, 将其所得接触角和接触线的实验数据无量纲化后与模拟值进行对比, 如图 11 (a) 和图 11 (b) 所示. 该图表明, 文中所得模拟值与 Gatapova 等 [15] 实验结果总体符合良好, 即模拟结果可反映液滴在主要阶段的典型特征. 但值得注意的是, Gatapova 等 [15] 的实验结果并未呈现液滴铺展阶段与最后的蒸干阶段, 前者是因接触角迟滞作用的影响所致, 而后的可能原因是受此阶段变化较快、不易观测记录影响.

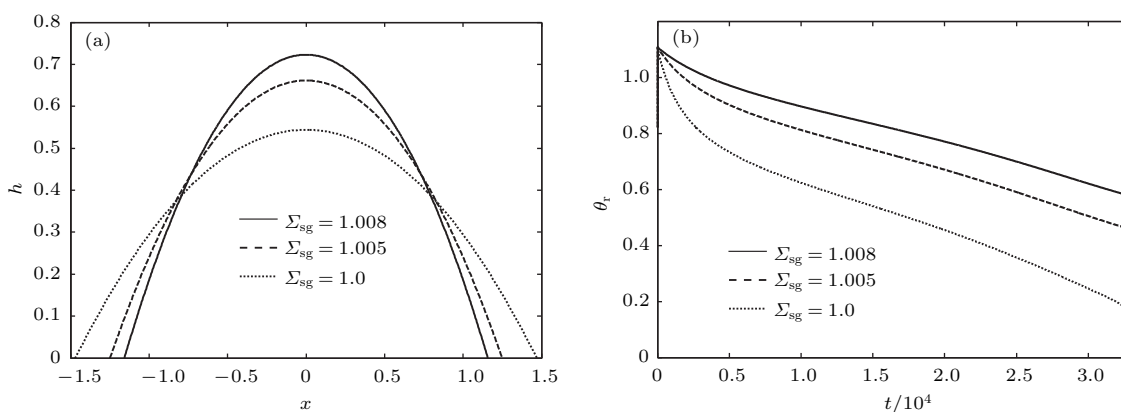


图 8 液滴演化过程 (a) 轮廓; (b) 接触角  
Fig. 8. Evolution of drop with time: (a) Profile; (b) contact angle.

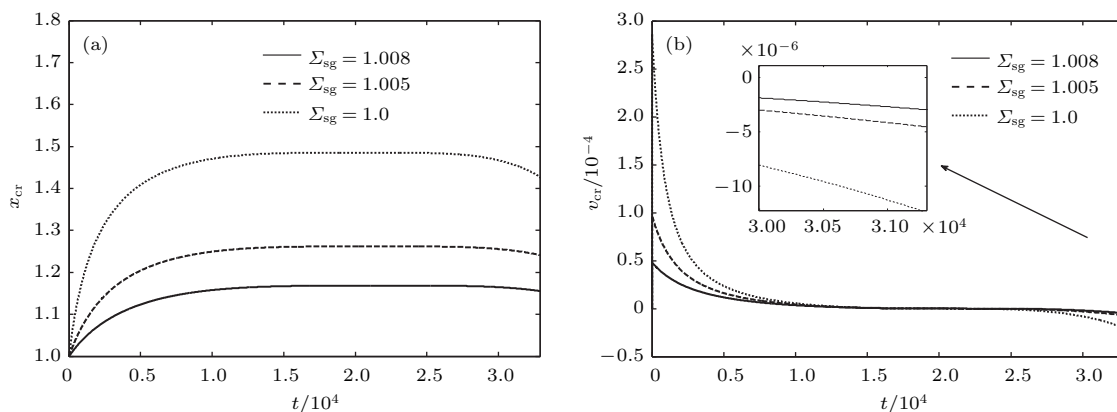


图 9 接触线变化 (a) 位置; (b) 速度  
Fig. 9. Changes of contact line with time: (a) Location; (b) velocity.

在 3.2.1 节中, 液滴接触线并未出现去钉扎现象就已被蒸干, 从而未呈现本节提到的阶段 III 和 IV, 这是由于与较大的  $\Sigma_{lg}$  相比, 较大的  $\Sigma_{sg}$  对接

触线的影响更加明显, 所以接触线的动力学特征受  $\Sigma_{sg}$  影响更为显著, 在工业应用中可利用此特性调控接触线的移动过程来满足实际需要. 此结论与

Gatapova 等<sup>[15]</sup>使用不同润湿性的基底对液滴蒸发进行控制,从而观察到接触线钉扎、部分钉扎、去钉扎现象的实验结果符合.

为进一步分析液滴演化过程中的内流特征,图 12 给出了不同时刻下液滴内部的速度与流线. 内部流动大致可为 3 个阶段. 1)  $t = 0 - 6.7 \times 10^4$ , 流线由液滴内部指向边缘处. 但  $t = 0 - 8 \times 10^3$  接触线处的水平速度为正, 表明此时液滴处于阶段 I, 如图 12 (a) 和图 12 (b) 所示. 当  $t = 0.8 \times 10^4 - 3.5 \times 10^4$  时, 接触线处的水平速度为

零, 表明此时液滴处于阶段 II; 当  $t = 3.5 \times 10^4$  时接触线处的水平速度为负, 表明此时液滴开始出现接触线去钉扎, 即开始进入阶段 III, 如图 12 (c) 所示. 2)  $t = 6.7 \times 10^4 - 6.9 \times 10^4$ , 回流阶段.  $t = 6.7 \times 10^4$  时, 可发现液滴内部靠近接触线处流线出现回折, 而在  $t = 6.8 \times 10^4$  时可看到明显的回流, 表明此时液滴处于阶段 IV. 3)  $t = (6.9 - 6.94) \times 10^4$ , 流线由液滴边缘处指液滴内部. 此时液滴内部的流线已经完全改变方向, 表明液滴已接近阶段 IV 的最后时刻.

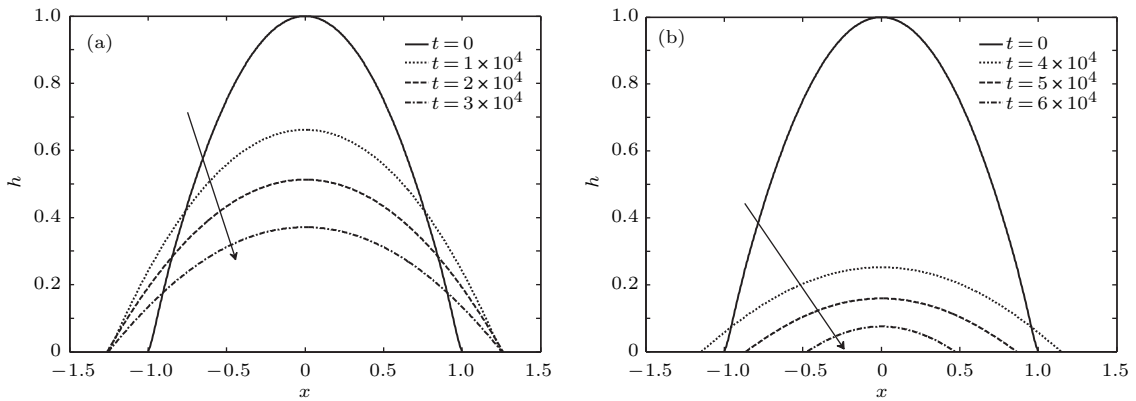


图 10 液滴轮廓变化 (a) 接触线钉扎阶段; (b) 接触线去钉扎阶段

Fig. 10. Evolution of drop profile with time: (a) Contact line pinning process; (b) contact line de-pinning process.

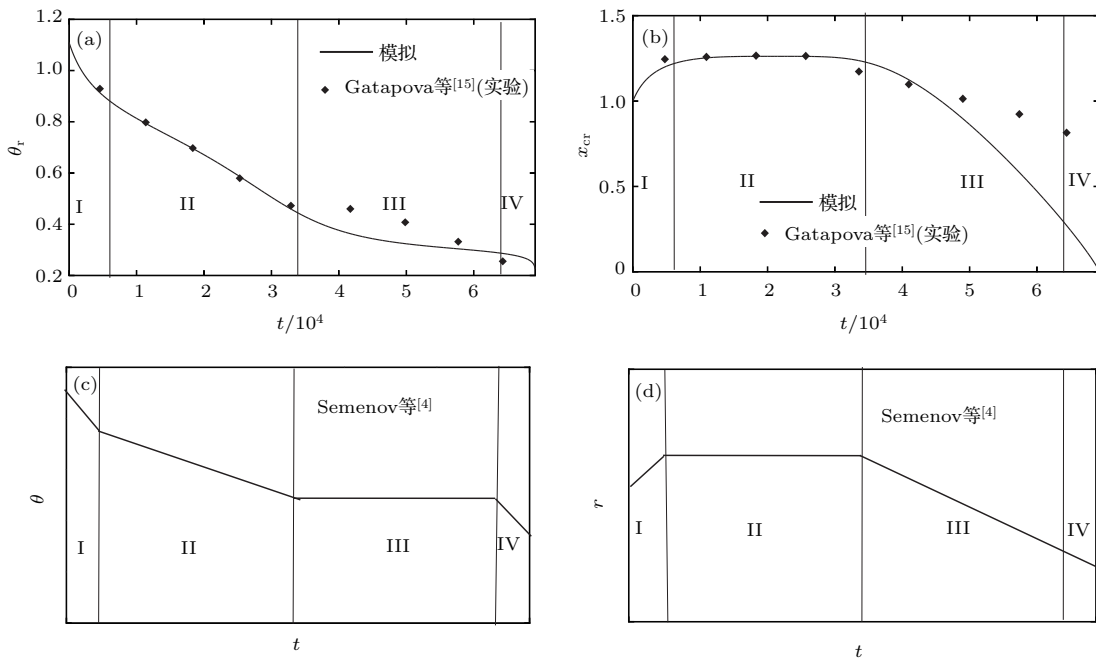


图 11 接触角和接触线随时间的变化

Fig. 11. Changes of contact angle and contact line with time.

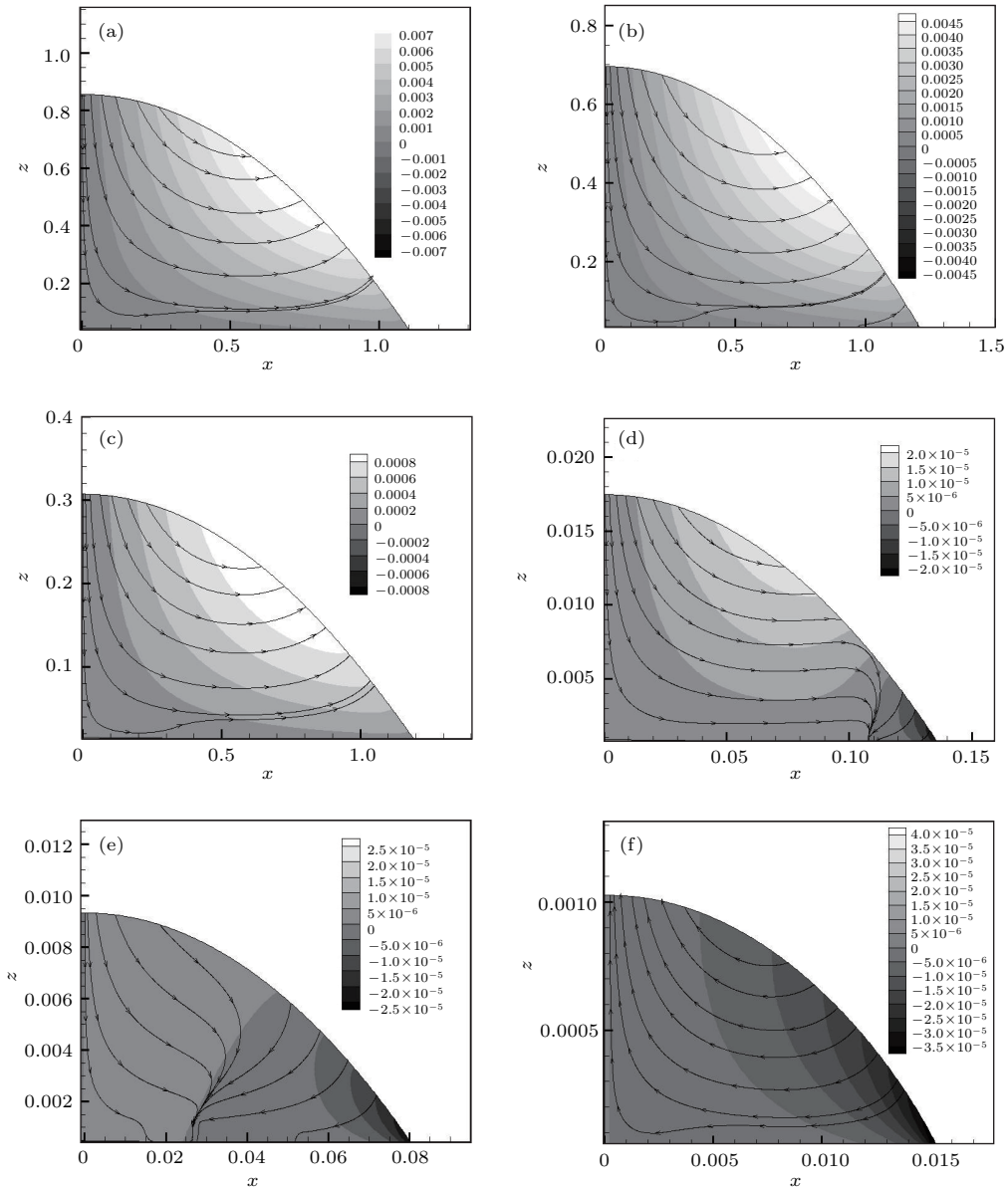


图12 不同时刻下液滴内部的流线与水平方向分速度 (a)  $t = 2.0 \times 10^3$ ; (b)  $t = 8.0 \times 10^3$ ; (c)  $t = 3.5 \times 10^4$ ; (d)  $t = 6.7 \times 10^4$ ; (e)  $t = 6.8 \times 10^4$ ; (f)  $t = 6.9 \times 10^4$   
 Fig. 12. Horizontal velocity contour within the drop along with streamlines at different time: (a)  $t = 2.0 \times 10^3$ ; (b)  $t = 8.0 \times 10^3$ ; (c)  $t = 3.5 \times 10^4$ ; (d)  $t = 6.7 \times 10^4$ ; (e)  $t = 6.8 \times 10^4$ ; (f)  $t = 6.9 \times 10^4$ .

### 3.2.3 液-固界面张力温度敏感性

将3.1节中的  $\Sigma_{ls} = 1.0$  增至  $\Sigma_{ls} = 1.005$  和  $1.008$ , 其他参数不变进行分析. 此时的平衡接触角分别为  $\theta_a = 0.2981$  和  $0.1490$ , 与  $\Sigma_{lg} = 1.005$  和  $1.008$  时相比, 平衡接触角值仅在小数点第4位有差别, 因此该情形下的液滴运动过程与3.2.1节中几乎完全相同, 由此可知  $\Sigma_{ls}$  和  $\Sigma_{lg}$  对壁面润湿性能的影响总体相同. 而  $\Sigma_{sg}$  变化  $0.5\%$  和  $0.8\%$  时的影响则非常显著, 因此通过改变固-气界面张力温度敏感系数调控处于蒸发状态下的液滴运动更

加有效.

## 4 结 论

液滴运动过程中受毛细力、重力、热毛细力及蒸发等因素的影响, 重力对液滴铺展起促进作用, 而毛细力和热毛细力则起抑制作用. 随时间持续, 毛细力、重力和热毛细力对液滴厚度变化的影响逐渐降低, 而蒸发对液滴厚度减少的影响则逐渐增强. 界面敏感性系数是影响液滴运动过程的重要因素, 通过改变界面张力温度敏感系数, 可使液滴蒸

发过程中的接触线呈现钉扎或部分钉扎模式下的动力学特征.

当界面张力温度敏感性相同时,液滴演化过程呈现3个典型阶段:1)铺展阶段;2)接触线钉扎阶段;3)液滴直径和接触角同时减小、直至被蒸干阶段.而界面张力温度敏感性不同时,则呈现不同的液滴演化过程和动力学特征.当 $\Sigma_{lg} > \Sigma_{sg} = \Sigma_{ls}$ 或 $\Sigma_{ls} > \Sigma_{lg} = \Sigma_{sg}$ 时,演化过程呈现两个典型阶段:1)铺展阶段;2)接触线钉扎阶段.与 $\Sigma_{ls} = \Sigma_{sg} = \Sigma_{lg}$ 时相比,该情形下的平衡接触角减小,壁面润湿性能得以改善,进而提高液滴铺展速率,延长接触线达到钉扎状态的时间,增大液滴蒸发速率和缩短液滴存续时间.

当提高 $\Sigma_{sg}$ ( $\Sigma_{sg} > \Sigma_{ls} = \Sigma_{lg}$ )时,液滴演化过程呈现4个典型阶段:1)铺展阶段;2)接触线钉扎阶段;3)接触线去钉扎且接触角近似恒定阶段;4)液滴直径和接触角同时减小、直至被蒸干阶段.与 $\Sigma_{ls} = \Sigma_{sg} = \Sigma_{lg}$ 时相比,该情形下平衡接触角增大,壁面润湿性能恶化,致使液滴铺展变慢,接触线达到钉扎的时间缩短.因此,通过改变固-气界面张力温度敏感系数调控处于蒸发状态下的液滴运动更加有效.

## 参考文献

- [1] Saada M A, Chikh S, Tadrist L 2013 *Int. J. Heat Mass Transf.* **58** 197
- [2] Li C X, Yang B C, Ye X M 2015 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **47** 71 (in Chinese) [李春曦, 杨保才, 叶学民 2015 力学学报 **47** 71]
- [3] Kavehpour P, Ovryn B, Mckinley G H 2002 *Colloids Surf. A* **206** 409
- [4] Semenov S, Trybala A, Agogo H, Kovalchuk N, Ortega F, Rubio R G, Starov V M, Velarde M G 2013 *Langmuir* **29** 10028
- [5] Erbil H Y 2012 *Adv. Colloid Interface Sci.* **170** 67
- [6] Zang D, Yu Y, Zhen C, Li X, Wu H, Geng X 2017 *Adv. Colloid Interface Sci.* **243** 77
- [7] Sefiane K 2006 *J. Petrol. Sci. Eng.* **51** 238
- [8] Ye X M, Li Y K, Li C X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 104704 (in Chinese) [叶学民, 李永康, 李春曦 2016 物理学报 **65** 104704]
- [9] Zhu J Y, Duan Y Y, Wang X D, Min Q 2014 *CIESC J.* **65** 765 (in Chinese) [朱君悦, 段远源, 王晓东, 闵琪 2014 化工学报 **65** 765]
- [10] Sefiane K 2004 *J. Colloid Interface Sci.* **272** 411
- [11] Mollaret R, Sefiane K, Christy J R E, Veyret D 2004 *Chem. Eng. Res. Des.* **82** 471
- [12] Kuznetsov G V, Feoktistov D V, Orlova E G 2016 *Thermophys. Aeromech.* **23** 17
- [13] Kiper I, Fulcrand R, Pirat C, Simon G, Stutz B, Ramos S M M 2015 *Colloids Surf. A* **482** 617
- [14] Lopes M C, Bonaccorso E 2012 *Soft Matter* **8** 7875
- [15] Gatapova E Y, Semenov A A, Zaitsev D V, Kabov O A 2014 *Colloids Surf. A* **441** 776
- [16] Guan J H, Wells G G, Xu B, McHale G, Wood D 2015 *Langmuir* **31** 11781
- [17] Kuznetsov G V, Feoktistov D V, Orlova E G, Batishcheva K A 2016 *Colloid J.* **78** 335
- [18] Zhang W B, Liao L G, Yu T X, Ji A L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 196102 (in Chinese) [张文彬, 廖龙光, 于同旭, 纪爱玲 2013 物理学报 **62** 196102]
- [19] Ajaev V S, Gambaryan-Roisman T, Stephan P 2010 *Colloid Interface Sci.* **342** 550
- [20] Karapetsas G, Sahu K C, Matar O K 2016 *Langmuir* **32** 6871
- [21] Bouchenna C, Saada M A, Chikh S, Tadrist L 2017 *Int. J. Heat Mass Transf.* **109** 482
- [22] Amini A, Homsy G M 2017 *Phys. Rev. Fluids* **2** 043603
- [23] Zhao Y P 2012 *Phys. Mech. Surf. Interface* (Beijing: Science Press) pp185–186 (in Chinese) [赵亚溥 2012 表面与界面物理力学(北京: 科学出版社) 第185页—186页]
- [24] Karapetsas G, Sahu K C, Matar O K 2013 *Langmuir* **29** 8892
- [25] Craster R V, Matar O K 2000 *J. Fluid Mech.* **425** 235

# Dynamics of evaporating drop on heated surfaces with different wettabilities\*

Ye Xue-Min Zhang Xiang-Shan Li Ming-Lan Li Chun-Xi<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

( Received 22 January 2018; revised manuscript received 16 February 2018 )

## Abstract

The dynamics of evaporating sessile drop on a uniformly heated, horizontal, solid substrate is considered. On the basis of lubrication theory and Navier slip condition, an evolution equation for the height of the two-dimensional drop is established. The numerical results show that the drop evolution is governed by capillary force, gravity, thermal capillary force and evaporation. Gravity exerts a promoting effect on drop spreading, while capillary force and thermal capillary force inhibit drop spreading. The typical dynamic features including contact line pinning or partial pinning modes during the drop evaporation are illustrated by changing the temperature-sensitive coefficient in the present model, and the drop lifetime of contact pinning mode is found to be shorter than that of contact line partial pinning mode. Under the same temperature-sensitive coefficient of three interfaces, the drop evolution is indicated with three typical stages: 1) spreading stage, 2) contact line pinning stage, and 3) both contact line and contact angle decreasing stage. As interface tension of liquid-gas or liquid-solid is more sensitive to temperature, the drop evolution is divided into two typical stages: 1) spreading stage and 2) contact line pinning stage. The equilibrium contact angle tends to be smaller and the substrate wettability is improved, leading to the increased spreading speed, the prolonged time of the contact line to reach pinning: the faster the evaporation rate, the shorter the lifetime of drop is. Additionally, the same effect of sensitivity of liquid-gas and liquid-solid interface tension to temperature on the wettability of substrate is observed.

When the interface tension of solid-gas is more sensitive to temperature, the drop evolution is characterized in four typical stages: 1) spreading stage, 2) contact line pinning stage, 3) contact line de-pinning and constant contact angle stage, and 4) both contact line and contact angle decreasing stage. The equilibrium contact angle tends to be greater and the substrate wettability is deteriorated, leading the spreading speed to decrease. Hence, it is more effective to manipulate the drop movement in the presence of evaporation by regulating the temperature-sensitive coefficient of the solid-gas interface.

**Keywords:** drop, evaporation, wettability, pinning

**PACS:** 47.61.-k, 47.85.mf, 47.61.Fg, 47.55.dk

**DOI:** [10.7498/aps.67.20180159](https://doi.org/10.7498/aps.67.20180159)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11202079) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. 13MS97).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [leechunxi@163.com](mailto:leechunxi@163.com)