

# 高温锯齿表面自推进液滴的动态特性

朱海涛, 贾志海\*

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093

\* 联系人, E-mail: zhhjia@usst.edu.cn

2016-05-11 收稿, 2016-09-25 修回, 2016-09-26 接受, 2017-03-09 网络版发表

国家自然科学基金(51176123)、上海市自然科学基金(11ZR1424800)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20103120120006)资助

**摘要** 利用铝片制备了不同倾角和高度的锯齿状结构表面, 采用高速摄影仪对高温锯齿状表面自推进液滴的动态行为特征进行了研究. 结果表明, 液滴在锯齿结构表面随温度变化会呈现不同的动态行为, 只有当表面温度达到Leidenfrost温度时, 才会形成稳定的Leidenfrost液滴和自推进现象. 对于一定几何尺寸的锯齿状结构表面, 随着其表面温度的升高, 自推进液滴的初始加速度先增大然后减小, 即液滴存在最大加速度及其对应的最佳温度值. 此外, 在相同温度的不同锯齿状结构表面, 当锯齿高度相同时, 锯齿倾角对液滴加速度影响显著, 锯齿倾角越大, 液滴自推进加速度越大, 并且液滴自推进加速度和温度的变化关系与液滴体积无关. 建立了模型对高温表面液滴自推进现象的动态特征进行了机理分析.

**关键词** 液滴, 锯齿状, Leidenfrost 现象, 自推进, 加速度

控制液滴的动态浸润特性是近年研究的热点. 一些浸润状态控制方法, 如电学方法<sup>[1,2]</sup>、机械振动法<sup>[3,4]</sup>、光化学法<sup>[5,6]</sup>、梯度法<sup>[7]</sup>等都得到了众多研究者的关注. 近年来, 在利用Leidenfrost现象进行液滴浸润状态的控制研究中, 发现在锯齿状等一些特殊结构表面可以实现液滴向某一固定方向运动<sup>[8]</sup>, 即液滴自推进现象.

对液滴自推进现象的研究激发了众多研究者的兴趣. Linke等人<sup>[8]</sup>研究了锯齿状热表面液滴的自推进现象, 发现液滴在毫米级的锯齿状表面上自推进的加速度可以达到 $1\sim 2\text{ m/s}^2$ , 速度可以保持在 $5\text{ cm/s}$ . Dupeux等人<sup>[9]</sup>研究了干冰在锯齿表面自推进运动的现象, 认为液体在不对称表面发生自推进现象是由于底部不均匀的蒸气流和蒸气层产生的压力造成, 由于薄层的存在, 使液滴发生自推进现象的温度降低, 远低于液滴的沸点<sup>[10]</sup>. 固体表面微观结构对自推进现象有着重要的影响, 研究者对此进行了大量

的工作. Ok等人<sup>[11]</sup>考察了微米级锯齿表面上液滴的自推进现象, 发现液滴在锯齿表面的自推进速度随着锯齿宽度的减小而增加, 并且发现瞬时速度甚至高达 $40\text{ cm/s}$ . Yang等人<sup>[12]</sup>进一步研究了具有微锯齿结构齿轮的热泳力现象, 发现当达到流体的Leidenfrost点时产生的作用力可使齿轮旋转, 阐述了该研究用于搅拌、泵等的工业生产前景. Cousins等人<sup>[13]</sup>则研究了一种具有圆形锯齿结构的圆盘表面Leidenfrost液滴的动态特性, 将直径为 $3\sim 5\text{ mm}$ 的液滴滴在圆盘靠外侧, 液滴会慢慢向中心旋转运动直至完全蒸发, 而Feng等人<sup>[14]</sup>研究了在固体表面由一层复合材料制成的锯齿结构薄膜, 发现该表面能够降低液滴的LFP并且能够在较低温度产生自推进现象. Kruse等人<sup>[15]</sup>研究了有一定倾角的不对称微凸起结构表面液滴的自推进现象, 发现液滴存在非常规方向的自推进运动现象. Lagubeau等人<sup>[16]</sup>则对不对称锯齿结构表面上, 当液滴有自推进运动趋势时的受力进行了分析.

**引用格式:** 朱海涛, 贾志海. 高温锯齿表面自推进液滴的动态特性. 科学通报, 2017, 62: 1422–1429

Zhu H T, Jia Z H. Dynamic properties of self-propelled droplets on hot ratchet surfaces (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1422–1429, doi: 10.1360/N972016-00591

综上所述,目前对液滴自推进现象的研究正成为热点,然而对自推进液滴的动态特性以及与锯齿状结构参数的关系等研究都还不充分,关于Leidenfrost液滴动态行为以及自推进的机理等的研究还不清晰.为此,本文利用铝片加工了不同结构参数的锯齿状结构表面,对其表面上自推进液滴的动态特性及自推进机理进行了探讨.

## 1 表面制备及实验设备

采用铝片制作了不同倾角和高度的锯齿状结构表面,液滴自推进现象和几何参数如图1所示.为了分析研究锯齿结构参数对液滴自推进动态特性的影响,制备了以下尺寸:  $\theta=30^\circ$ ,  $H=1.2\text{ mm}$ ;  $\theta=45^\circ$ ,  $H=0.8\text{ mm}$ ,  $H=1.2\text{ mm}$ ,  $H=1.6\text{ mm}$ ;  $\theta=60^\circ$ ,  $H=1.2\text{ mm}$ .

实验装置如图2所示.采用恒温加热平台为热源,利用热电偶测表面温度;介质采用去离子水,用FASTEC IMAGING Hispec 3型高速摄影仪(德国)(1000 帧/秒时像素为1280×1024)采集图像,实验中采集频率为1435 帧/秒.

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 液滴的动态行为特征

实验发现,随锯齿状表面温度升高,液滴在其表

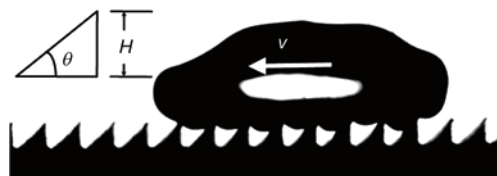


图1 锯齿状表面几何参数

Figure 1 Geometry size of ratchet surfaces

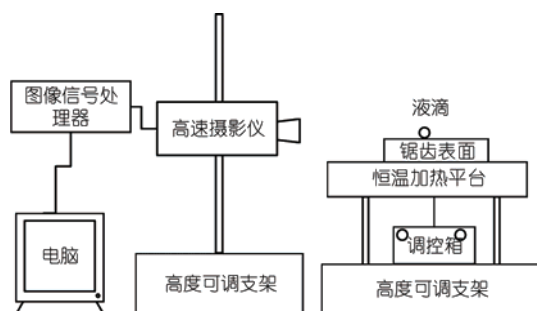


图2 实验装置

Figure 2 Experimental setup

面(以倾角 $\theta=60^\circ$ ,  $H=1.2\text{ mm}$ 为例)呈现图3所示的动态特征.随着锯齿状表面温度逐渐升高,当过热度 $\Delta T$ (锯齿表面温度和饱和温度之差)在 $4\sim 80^\circ\text{C}$ 时,液滴在高温锯齿结构表面处于核态沸腾和过渡沸腾状态,液滴与锯齿状结构表面之间产生气泡,由于扰动剧烈,呈现剧烈沸腾现象,沸腾过程中,液滴破裂产生诸多小液滴,如图3(a)所示.当锯齿状结构表面温度继续增加至过热度 $\Delta T$ 约在 $90^\circ\text{C}$ 时,液滴在锯齿结构表面进入到过渡沸腾末期,此时液滴和锯齿状结构表面产生的气泡汇聚,随过热度 $\Delta T$ 的增加逐渐在液滴和锯齿状表面之间形成不稳定的蒸气膜层,液滴并未进入稳定的膜态沸腾,所以蒸气膜层并不稳定,但液滴已经产生了不稳定的定向移动现象,即近Leidenfrost现象,在移动过程中液滴伴随剧烈沸腾现象,体积逐渐减小,飞溅出的小液滴也能够形成Leidenfrost现象,如图3(b)所示.

随着锯齿状结构表面过热度 $\Delta T$ 的进一步提高,液滴进入膜态沸腾,会产生Leidenfrost炸裂现象<sup>[17]</sup>,液滴与锯齿表面间蒸气膜层被破坏,液滴温度急剧升高,导致液滴内部压力瞬间增大,当液滴内部压力大于液滴表面张力,液滴发生爆炸,即Leidenfrost炸裂现象,液滴炸裂过程产生和飞溅出的许多小液滴,如图3(c)所示.当锯齿状结构表面温度继续增加,过热度 $\Delta T$ 在约 $100\sim 110^\circ\text{C}$ 时,液滴与锯齿结构接触面形成稳定的蒸气膜层,即形成稳定的Leidenfrost现象.由于锯齿结构的不对称,蒸气膜层各位置受力并不均匀,在其作用下,液滴产生了稳定的自推进现象,如图3(d)所示.

### 2.2 高温锯齿表面液滴自推进机理分析

当锯齿状结构表面温度达到Leidenfrost温度时,

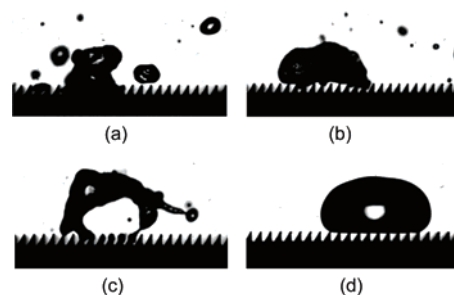


图3 液滴在高温锯齿表面的动态行为. (a) 剧烈沸腾; (b) 近Leidenfrost现象; (c) Leidenfrost炸裂; (d) 稳定的Leidenfrost现象

Figure 3 Dynamical characteristics of droplets on a ratchet surface. (a) Violent boiling; (b) nearly leidenfrost phenomenon; (c) leidenfrost explosion; (d) stable leidenfrost phenomenon

液滴悬浮在锯齿上,部分嵌入在锯齿间.为研究液滴在高温锯齿表面瞬间初始自推进加速度 $a$ 与温度 $\Delta T$ 、液滴体积 $V$ 以及锯齿几何参数之间的关系,建立如图4所示模型.由于不对称的锯齿结构,液滴与锯齿结构接触面产生了压力不均的蒸气膜层,在该压力作用下,液滴会产生垂直锯齿结构斜边向上水平 $x$ 分方向的定向移动,即液滴的自推进现象.

铝片表面被加工成锯齿型,在蒸气层与接触表面之间形成了带沟道的三角形结构.这三角形的非对称结构在液滴自推进运动中起到了决定性作用,由于锯齿的非对称性,导致蒸气层中的蒸气在逸出时,锯齿左侧蒸气主要沿锯齿直角边流动,并于锯齿下部沟道垂直于纸面方向泄流,而右侧蒸气主要沿锯齿坡面运动,最终和直角边蒸气汇合并于沟道下部泄流,由于液体和锯齿两侧接触面积的差异以及锯齿表面两侧温度不同,造成锯齿两侧液滴蒸发速度不同,导致锯齿尖端A点的压力 $P_A$ 大于沟道内的压力 $P_B$ ,从而产生了垂直锯齿结构斜边的水平 $x$ 方向的牵引力 $F$ ,于是液体发生向右的自推进运动.锯齿表面单位时间传给液体的能量 $Q$ 正比于液滴与锯齿表面的有效接触面积 $S_{\text{eff}}$ (下角标eff为有效的)、传热系数 $k$ 和温度梯度 $\Delta T/h$ , $h$ 为蒸气膜层厚度.液滴进入完全膜态沸腾时,液滴体积 $V$ 、质量 $m$ 以及有效接触面积 $S_{\text{eff}}$ 与时间 $t$ 的关系为<sup>[18]</sup>

$$t = -blnV + c, \quad (1)$$

其中, $b, c$ 均为常量,则液滴在运动过程中体积、质量和有效接触面积分别为

$$V = V_0 e^{-t/b}, \quad (2)$$

$$m = m_0 e^{-t/b}, \quad (3)$$

$$S_{\text{eff}} = S_{0\text{eff}} e^{-2t/3b}, \quad (4)$$

其中, $V_0$ 为液滴的初始体积, $m_0$ , $S_{0\text{eff}}$ 为液滴的初始质

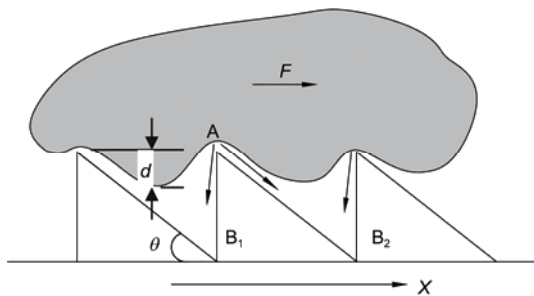


图4 液滴自推进现象

Figure 4 Analysis of the self-propelled phenomenon

量和初始有效接触面积.

液滴近似无高度滴下瞬间与蒸气薄膜之间无相对滑动,由 $P_A$ , $P_{B1}$ 产生的压力差主要为纵向支撑液滴重力作用,由 $P_A$ , $P_{B2}$ 产生的压差 $\Delta P = P_A - P_{B2}$ 产生的水平牵引力为<sup>[8]</sup>

$$F = 0.5S_{\text{eff}}h|dP/dx|\cos\theta, \quad (5)$$

其中, $\theta$ 为锯齿结构倾角, $h$ 为此处蒸气膜层的厚度. $h$ 由式(6)计算:

$$h = \left( \frac{3k\Delta T\eta d^2}{2L\rho_v\rho g\alpha} \right)^{1/4}, \quad (6)$$

其中, $L$ 为去离子水的汽化潜热, $\rho_v$ 为蒸气膜层蒸气密度, $\alpha$ 为液滴的毛细长度( $\alpha = \sqrt{\gamma/\rho g}$ ),实验环境温度 $T_0 = 23 \pm 2^\circ\text{C}$ ,去离子水液滴 $\gamma = 71.97 \text{ mN/m}$ , $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ , $d$ 为锯齿间波浪形内陷液滴高度.液滴自推进过程中与蒸气薄膜有相对滑动,受到的黏性阻力 $f$ 为<sup>[8]</sup>

$$f = \beta v_x = (\eta S_{\text{eff}}/h)v_x, \quad (7)$$

其中, $\eta$ 为蒸气动力黏度, ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), $v_x$ 为液滴在 $x$ 分量方向的速度并且与时间 $t$ 成一定函数关系:

$$v_x t = \left( v_0 x - \frac{am}{\beta} \right) e^{-\frac{t}{\beta}} + am/\beta, \quad (8)$$

其中, $t$ 为时间, $v_0$ 为速度.两个锯齿之间的一个波浪形液滴的质量为 $\rho l dR$ ,其中 $l$ 为锯齿宽度 $l = H/\tan\theta$ , $d$ 为锯齿间波浪形液滴的内陷高度(其与温度和锯齿几何参数有关 $d \propto H/\Delta T$ ).实验过程采用高速摄影仪拍摄记录图像,发现在同一表面,锯齿结构表面温度越高波浪形液滴内陷深度 $d$ 越小,反之越大;并且当温度相同时,不同锯齿结构表面, $H$ 越大,波浪形液滴内陷深度 $d$ 越大,由此可以确定 $d \propto H/\Delta T$ .每个锯齿间波浪形液滴的动能损失为 $1/2\rho l d R v_x^2$ (波浪形液滴近似为长为锯齿宽度 $l$ 、高为内陷深度 $d$ 以及宽为液滴直径 $2R$ 的三棱体),并且波浪形液滴的个数 $2R/l$ .总的损失 $W_1$ 为 $\rho d R^2 v_x^2$ ,这相当于一个摩擦力所做的功 $F_{f1}l$ .由此可得摩擦力为

$$F_{f1} \approx \rho d R^2 v_x^2 / l. \quad (9)$$

液滴自推进过程两个锯齿之间的波浪形液滴必须通过锯齿,这就要克服由于重力势能( $W_2 = 2R/l \times \rho l d^2 R g$ )变化产生的阻力 $F_{f2}$ :

$$F_{f2} = 2\rho g R^2 d^2 / l, \quad (10)$$

则液滴在锯齿表面的自推进运动中满足方程式:

$$a = \left[ 0.5S_{\text{eff}}h \left| \frac{dP}{dx} \right| \cos \theta - \left( \frac{\eta S_{\text{eff}}}{h} \right) v_x - \frac{\rho d R^2 v_x^2}{l} - \frac{2\rho g R^2 d^2}{l} \right] / m. \quad (11)$$

为研究液滴滴在高温锯齿表面瞬间初始自推进加速度 $a$ 与温度 $\Delta T$ 、液滴体积 $V$ 以及锯齿几何参数之间的关系,液滴近似无高度滴在高温锯齿表面,初速度 $v_0=0$ ,  $t \approx 0$ , 则式(8)为 $v_x(t) \approx 0$ , 代入式(7), 由液滴与蒸气膜层相对滑动速度 $v_x(t)$ 产生的黏性阻力 $f$ 即可忽略不计, 消去 $v_x(t)$ 项, 简化式(11)为

$$a = \left[ 0.5S_{\text{eff}}h \left| \frac{dP}{dx} \right| \cos \theta - \frac{2\rho g R^2 d^2}{l} \right] / m. \quad (12)$$

液滴底部蒸气流经锯齿沟槽底部 $B_1$ ,  $B_2$ 泄流, 此时锯齿沟槽底部泄流压力约为环境压力 $P_0$ , 液滴半径比毛细的长度更大, 由于重力的原因液滴比较平坦, 厚度由表面张力和重力之间的平衡控制, 液滴厚度约为 $2\alpha$ . 锯齿顶点A处压力为 $P_A = 2\rho g(\alpha + h)$ , 蒸气膜层厚度 $h$ 约为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = 2.7 \text{ mm} \gg h$ , 则

$$\left| \frac{dP}{dx} \right| = (2g\alpha - P_0) / \varphi, \quad (13)$$

其中,  $\varphi = 1 - \sin \theta H / \sin \theta$ , 为锯齿作用在液滴底部的有效反作用力长度. 研究液滴最推进加速度, 在式(11)中 $t \approx 0$ , 代入式(4)有 $S_{\text{eff}} = S_{0\text{eff}}$ . 液滴以初速度 $v_0=0$ 近似无高度滴下, 在锯齿间呈波浪形, 液滴瞬间与锯齿结构表面的有效接触面积集中在锯齿结构斜边与波浪形液滴边缘处:

$$S_{\text{eff}} = S_{0\text{eff}} = 4R^2 d \csc \theta / l. \quad (14)$$

将式(6), (13), (14)代入式(12)整理得液滴的初始自推进加速度:

$$a = \left[ \frac{2d^{3/2} (2\rho g\alpha - P_0) \left( \frac{3k\Delta T\eta}{2L\rho_v\rho g\alpha} \right)^{1/4}}{[Hl(1 - \sin \theta)] - \frac{2\rho g d^2}{l}} \right] R^2 / m. \quad (15)$$

随液滴体积增大, 液滴与锯齿表面接触半径 $R$ 以及液滴覆盖锯齿个数增多, 定义两锯齿之间与液滴有效接触面为一锯齿单元 $R^2$ , 锯齿单元间液滴体积单元 $V'$ , 由此液滴增加一单元体积, 则液滴多覆盖一锯齿单元, 由式(15)得出, 在同一高温锯齿结构表面一定温度下, 大液滴初始自推进加速度随液滴体积增加保持不变. 在同一锯齿表面, 随过热度 $\Delta T$ 增加,  $h$ 增大, 由式(9)知 $d \propto 1/\Delta T$ , 则式(15)中存在 $da/d\Delta T = 0$ , 即在一定温度范围内大液滴在高温锯齿表面的初始

自推进加速度存在极值. 式(15)中锯齿结构倾角 $\theta$ 不变, 随锯齿高度 $H$ 增大, 液滴初始自推进加速度 $a$ 减小;  $H$ 不变, 液滴与锯齿结构表面接触半径 $R$ 即液滴体积不变时, 液滴覆盖锯齿个数随锯齿结构倾角 $\theta$ 增大而增大, 由式(15)可知液滴加速度 $a$ 逐渐增大.

### 2.3 自推进液滴的动态行为和加速度特征

将液滴轻轻滴在锯齿表面上, 当锯齿状结构表面温度达到Leidenfrost温度时, 液滴悬浮在锯齿表面上, 液滴与高温锯齿状结构表面间产生厚度不均且不对称的蒸气膜层, 如图4所示, 锯齿结构顶部A点和底部 $B_1$ ,  $B_2$ 点均会产生一定压力差, 使得液滴产生自推进现象, 在液滴自推进过程中由于液滴具有形变特征, 由此液滴底部被拉伸并定向滑动的瞬间液滴上部保持滴下时的状态, 如图5(a)和(b).

液滴在自推进运动过程中, 底部被拉伸, 即液滴底部蒸气膜层部分使液滴受定向拉力 $F$ , 如图4所示, 同时液滴受液滴自身表面张力作用, 使得液滴逐渐恢复近似球形, 如图5(c)和(d)所示. 同时, 液滴在底部产生的自推进拉力的作用下以滚动状态向前(垂直锯齿斜边向上水平分方向)行进, 并且带动液滴上部

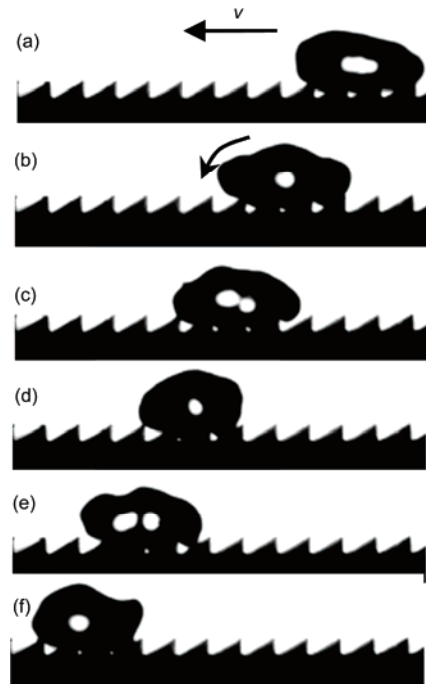


图5 锯齿状表面液滴的自推进特性(a)~(b) (液滴体积 $V=80 \mu\text{L}$ )

Figure 5 Dynamic behaviors of a self-propelled droplet (a)~(b) (Volume  $V=80 \mu\text{L}$ )

拉伸、收缩,如图5(e)和(f)所示.液滴在高温锯齿表面的自推进运动过程中,随自推进液滴运动速度增大,此时液滴与锯齿结构接触面的蒸气膜层之间的黏性摩擦力则不可忽略,根据公式(7)~(10),产生的摩擦力与速度 $v_x$ 之间的关系可知,液滴自推进加速度逐渐减小至达到最大速度后保持匀速前进.

利用实验对不同锯齿状结构表面自推进液滴滴在锯齿表面瞬间的加速度特征进行了测试,实验室温 $25\pm 2^\circ\text{C}$ ,相对湿度50%~60%,进行3次重复实验,然后取均值,结果如图6所示.同一锯齿结构表面(以 $\theta=60^\circ$ ,  $H=1.2\text{ mm}$ 锯齿结构表面为例),液滴初始自推进加速度 $a$ 先随温度 $T$ 增加而增加,达到最大值;后随温度 $T$ 的增加而减小.分析认为,这是由于在形成稳定的Leidenfrost现象后,液滴蒸发速度很慢,假设液滴的质量 $m$ 、体积 $V$ 及有效接触面积 $S_{\text{eff}}$ 近似不变,此时,液滴所受的力有推动其向前的 $\Delta P=P_A-P_{B_2}$ 产生的 $x$ 向的压力梯度 $|dP/dx|$ 在水平方向的牵引力,当锯齿结构表面温度逐渐升高且液滴发生自推进运动时,压力梯度 $|dP/dx|$ 逐渐增加,而液滴以水平方向分速度 $v_x$ 运动产生黏性阻力 $f$ 可忽略不计,见式(11), (12),导致液滴的加速度 $a$ 逐渐增大.当温度继续增加超过一定值时,此时蒸气薄膜辐射换热逐渐增强,液滴底部蒸气溢出速率明显增大,沟道底部 $B_2$ 处蒸气压力因此增大,导致压力差 $\Delta P=P_A-P_{B_2}$ 逐渐减小,即 $|dP/dx|$ 逐渐减小,使得液滴的加速度 $a$ 逐渐减小.由此可以看出,对于一定结构的锯齿表面,存在液滴自推进加速度的最大值.

此外,由图6(a)可以看到,在相同温度 $T$ 下,液滴滴下瞬间,液滴初始自推进加速度 $a$ 随倾角 $\theta$ 的增大而增大.这是因为在液滴体积 $V$ 和锯齿表面温度 $T$ 保持不变时,在自推进方向由于液滴与锯齿结构接触

面蒸气膜层厚度不均产生的压力梯度 $|dP/dx|$ 和液滴与蒸气膜层的有效接触面积 $S_{\text{eff}}$ 是液滴的初始自推进加速度 $a$ 的主要影响因素(式(12)),锯齿结构倾角 $\theta$ 越大,有效接触面积 $S_{\text{eff}}$ 和压力梯度 $|dP/dx|$ 越大,根据式(15)可知,液滴的初始自推进加速度 $a$ 越大,图6实验结果和前述理论分析相符.当液滴的初速度 $v_0=0$ 时,液滴前进一个锯齿结构长度距离为 $l$ ,由高速摄影的采样频率可得到运动时间 $t$ ,则可计算得液滴自推进过程中经过每一个锯齿结构的瞬时速度 $v$ ,液滴 $v$ - $t$ 曲线如图6(b)中所示( $T=220\pm 2^\circ\text{C}$ ),液滴滴下瞬间速度缓慢增加,随时间增加,速度增加变得缓慢直至速度趋于不变,实验结果与 $v$ - $t$ 理论曲线相符合;此外,实验发现,对于锯齿高度 $H$ 相同,倾角 $\theta$ 越大,液滴的加速度以及在相同时间及达到的最终速度均增大;分析认为, $H$ 不变,液滴体积不变时,液滴覆盖锯齿个数随锯齿结构倾角 $\theta$ 增大而增大,液滴受锯齿结构表面的合力增大,由式(15)可得液滴加速度 $a$ 逐渐增大,实验结果和式(8)理论曲线一致.

当锯齿结构表面倾角 $\theta$ 相同,锯齿高度 $H$ 不同时,如图7(a)所示,液滴达到相同的初始自推进加速度 $a$ ,锯齿高度 $H$ 较低的表面更容易在较低的表面温度时达到;并且高度 $H$ 越小,液滴在相对较低的温度下便可达到最大初始自推进加速度 $a_{\text{max}}$ ;高度 $H$ 越大,液滴达到的最大初始自推进加速度 $a_{\text{max}}$ 所需温度越高.分析认为,对于一定尺寸的液滴,当锯齿结构倾角 $\theta$ 相同、锯齿结构高度 $H$ 不同时,锯齿结构高度 $H$ 越小,在液滴与锯齿结构接触面部分,液滴可以覆盖更多的锯齿数,即液滴与锯齿结构表面的有效接触面积 $S_{\text{eff}}$ 越大,由此,根据式(15)液滴达到相同自推进加速度所需的表面温度越小.由图7(b)中液滴 $v$ - $t$ 曲线可知( $T=220\pm 2^\circ\text{C}$ ),液滴在各锯齿结构表面的速度变化规

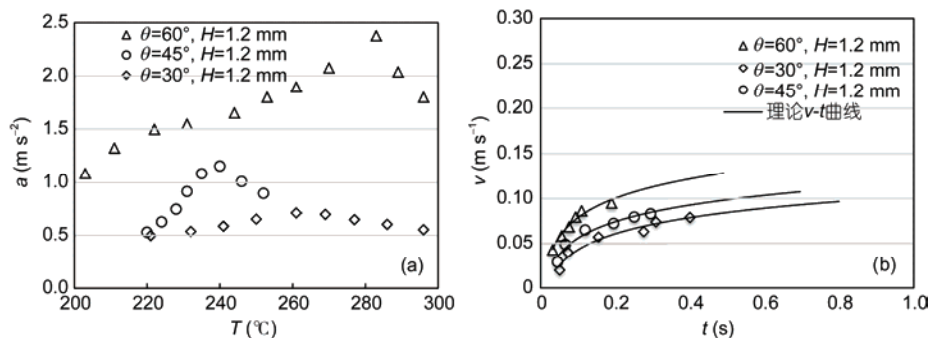


图6 锯齿倾角对液滴加速度(a)和速度(b)特征的影响(液滴 $V=80\text{ }\mu\text{L}$ )

Figure 6 The influence of the ratchet inclination  $\theta$  on the acceleration (a) and velocity (b) characteristics ( $V=80\text{ }\mu\text{L}$ )

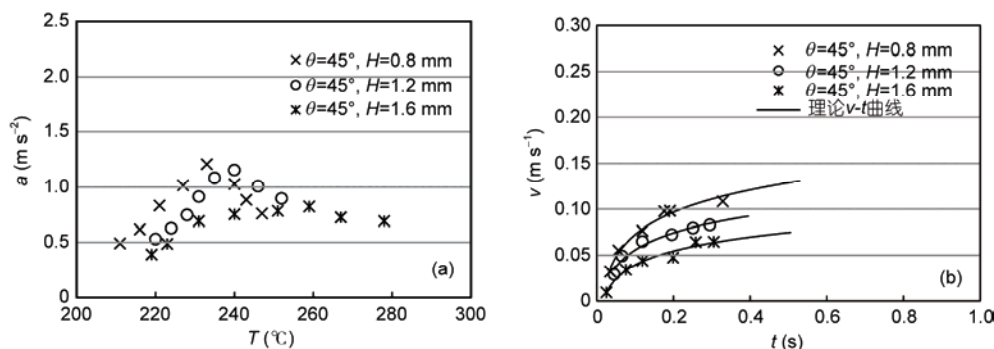


图7 锯齿高度对液滴加速度(a)和速度(b)特征的影响(液滴 $V=80\ \mu\text{L}$ )

Figure 7 The influence of the ratchet height  $H$  on the acceleration (a) and velocity (b) characteristics ( $V=80\ \mu\text{L}$ )

律近似,由开始的急剧增大至后期的缓慢增加然后趋于不变,锯齿结构倾角 $\theta=45^\circ$ 的3个表面, $H=0.8\ \text{mm}$ 的表面液滴在同时间内达到的瞬时速度最大, $H=1.6\ \text{mm}$ 的表面液滴同时间内达到的瞬时速度最小,并且实验结果与理论 $v$ - $t$ 曲线相符。

根据式(15),可以得到液滴的加速度特征和液滴体积无关,为了验证该结论本文进行了实验.实验选取了两种不同结构的锯齿表面 $\theta=30^\circ$ , $H=1.2\ \text{mm}$ 和 $\theta=60^\circ$ , $H=1.2\ \text{mm}$ ,液滴体积分别为60, 80, 100  $\mu\text{L}$ (图8).实验结果如图8所示,在两种结构表面,体积的变化对液滴的加速度特征影响甚微,每种表面的3种体积下的加速度特征几乎重叠在一起,与式(15)理论分析吻合,增大液滴体积 $V$ ,液滴底部与锯齿结构表面的接触半径 $R$ 增大,液滴覆盖锯齿个数增大并且单个锯齿结构对液滴的作用力 $F$ (式(5))、 $F_{f_2}$ (式(10))保持不变,由此覆盖的所有锯齿作用在整个液滴底部的合力随液滴体积增大成同比例增大,因此液滴的初始自推进加速度 $a$ 与锯齿结构表面温度的变化关系与液滴体积无关。

### 3 结论

(1) 液滴在高温锯齿结构表面,随温度升高,经历剧烈沸腾、近Leidenfrost现象,Leidenfrost炸裂阶段以及稳定Leidenfrost液滴自推进阶段。(2) 在同一锯齿结构表面,液滴自推进加速度随锯齿状结构表面温度的增加先增大、后减小,即存在达到最大加速度

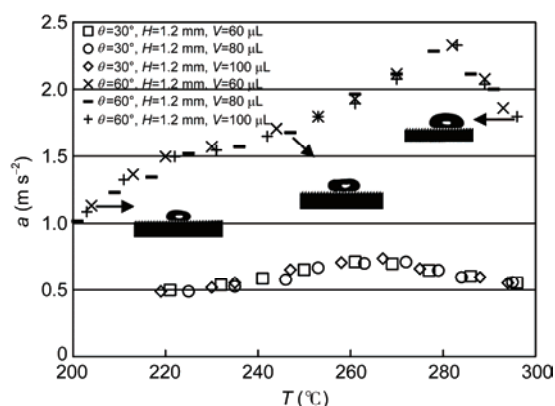


图8 锯齿结构表面自推进液滴加速度特征

Figure 8 Acceleration of self-propelled droplets on ratchet surfaces

的最佳温度值。在锯齿状结构表面,液滴的初始自推进加速度 $a$ 与锯齿结构表面的温度变化关系和液滴的体积无关。在同温度同锯齿深度 $H$ 时,液滴自推进加速度随锯齿倾角的增加而增加。同物性大液滴的自推进加速度与液滴体积无关,只与锯齿结构的几何参数以及温度有关。(3) 研究发现,在选取的3种倾角的锯齿表面中,倾角 $\theta=60^\circ$ 的锯齿结构表面更适用于实现液滴在较低温度得到较高自推进加速度及达到较理想的自推进速度, $\theta=30^\circ$ 结构表面上液滴自推进加速度和速度相对较小。此外,当锯齿结构倾角 $\theta$ 一定时,同温度下液滴自推进加速度随锯齿结构高度的减小而增大,液滴的自推进速度随锯齿高度的减小而增大。

### 参考文献

- 1 Dhindsa M S, Smith N R, Heikenfeld J, et al. Reversible electrowetting of vertically aligned superhydrophobic carbon nanofibers. *Langmuir*, 2006, 22: 9030–9034

- 2 Bahadur V, Garimella S V. Electrowetting-based control of droplet transition and morphology on artificially microstructured surfaces. *Langmuir*, 2008, 24: 8338–8345
- 3 Lei W, Jia Z H, He J C, et al. Dynamic properties of vibrated drops on a superhydrophobic patterned surface. *Appl Therm Eng*, 2014, 62: 507–512
- 4 Jia Z H, Lei W, He J C, et al. Vibration-induced Wenzel-Cassie wetting transition on rough patterned surface (in Chinese). *Ciesc J*, 2014, 65: 544–549 [贾志海, 雷威, 贺吉昌, 等. 振动诱导超疏水表面水滴的 Wenzel-Cassie 浸润状态转变特性. *化工学报*, 2014, 65: 544–549]
- 5 Jiang L. Dual-responsive tungsten oxide film of wettability and photochromism (in Chinese). *Chin Basic Sci*, 2007, 3: 22–23 [江雷. 光控浸润和变色双响应的氧化钨薄膜. *中国基础科学*, 2007, 3: 22–23]
- 6 Kim T, Tahk D, Lee H H. Wettability-controllable super water- and moderately oil-repellent surface fabricated by wet chemical etching. *Langmuir*, 2009, 25: 6576–6579
- 7 Liao Q, Gu Y B, Zhu X, et al. Dropwise condensation heat transfer on surface with gradient surface energy (in Chinese). *Ciesc J*, 2007, 58: 567–574 [廖强, 顾扬彪, 朱恂, 等. 梯度表面能材料表面上滴状凝结换热. *化工学报*, 2007, 58: 567–574]
- 8 Linke H, Alemán B J, Melling L D, et al. Self-propelled Leidenfrost droplets. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 154502
- 9 Dupeux G, Baier T, Bacot V, et al. Self-propelling uneven Leidenfrost solids. *Phys Fluids*, 2013, 25: 051704
- 10 Dupeux G, Bourrianne P, Magdelaine Q, et al. Propulsion on a superhydrophobic ratchet. *Sci Rep*, 2014, 4: 5280
- 11 Ok J T, Lopez-Ona E, Nikitopoulos D E, et al. Propulsion of droplets on micro- and sub-micron ratchet surfaces in the Leidenfrost temperature regime. *Microfluid Nanofluid*, 2011, 10: 1045–1054
- 12 Yang M, Ripoll M. A self-propelled thermophoretic microgear. *Soft Matter*, 2014, 10: 1006–1011
- 13 Cousins T R, Goldstein R E, Jaworski J W, et al. A ratchet trap for Leidenfrost drops. *J Fluid Mech*, 2012, 696: 215–227
- 14 Feng R, Zhao W, Wu X, et al. Ratchet composite thin film for low-temperature self-propelled Leidenfrost droplet. *J Colloid Interface Sci*, 2012, 367: 450–454
- 15 Kruse C, Somanas I, Anderson T, et al. Self-propelled droplets on heated surfaces with angled self-assembled micro/nanostructures. *Microfluid Nanofluid*, 2015, 18: 1–8
- 16 Lagubeau G, Le Merrer M, Clanet C, et al. Leidenfrost on a ratchet. *Nat Phys*, 2011, 7: 395–398
- 17 Moreau F, Colinet P, Dorbolo S. Leidenfrost explosions. *Phys Fluids*, 2013, 25: 1111
- 18 Pantón R L. *Incompressible Flow*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013

Summary for “高温锯齿表面自推进液滴的动态特性”

# Dynamic properties of self-propelled droplets on hot ratchet surfaces

ZHU HaiTao & JIA ZhiHai\*

*School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

\* Corresponding author, E-mail: zhhjia@usst.edu.cn

In recent years, self-propelling fluidic devices have received particular attention, due to their unique abilities to displace liquid at small scales without an external force. The ability to control the dynamics of liquids is crucial in applications such as thermal management, ink-jet printing, lab-on-a-chip technology and spray cooling. As known, Liquid spilled on a hot surface rapidly evaporates. At the Leidenfrost temperature, well above the boiling point, one observes long-lived droplets that levitate because of the excess pressure resulting from the permanent feed of vapor at the bottom of the droplet. So millimeter-scale liquid droplets on substrates can move spontaneously due to the imbalance of surface tension forces caused by a thermal gradient, and that makes Leidenfrost droplets very mobile because of their contact-free suspension. In recent years, using the Leidenfrost droplets to control wetting condition of droplet, the new phenomenon, named the self-propelled droplet, had been found that the droplets can move at a well-defined direction on some surfaces such as ratchet surfaces. However, according to the literature published recently, the relationship between the dynamic characteristics of self-propelled droplets and the ratchet structure parameters was not clear, and the mechanism of the Leidenfrost droplets was not clear either. So the different ratchet-structured surfaces were prepared with the aluminum sheet in this work. The dynamic behaviors and the mechanism of self-propelled droplets on hot ratchet surfaces were studied by analyzing the images captured by a high speed camera at the frame rate of 1435 Hz. The data were acquired with image analyzing technology. Ratchet surfaces were heated on constant temperature heating units. Deionized droplets with different volume  $V$  were deposited on hot ratchet surfaces with different inclination  $\theta$  and height  $H$  at different temperature  $T$ . The relationship among the various parameters was analyzed and the dynamic characteristics of droplets varied with the surface temperature were discussed. All experiments were carried out at room temperature of  $25\pm 2^\circ\text{C}$ , relative humidity for 50%–60%. The experimental images were captured three times by the high speed camera during the experiments, and the average values were adopted. A model was established according to the experiment data and the theoretical analysis on the mechanism of the self-propelled droplets on hot ratchet surfaces in this paper. The results showed that droplets on ratchet surfaces at different temperature presented different dynamic characteristics. The stable Leidenfrost droplets and self-propelled phenomenon could acquired only when the surface temperature reached the Leidenfrost temperature (LFP). With the increasing of surface temperature, the acceleration of the self-propelled Leidenfrost droplets firstly increased and then decreased, which meant there existed a fixed temperature value for a self-propelled droplet to reach its maximum acceleration. In addition, the inclined angles of ratchets had significant effects on the acceleration of the self-propelled Leidenfrost droplets. When the temperature of ratchet surfaces and the ratchet depth  $H$  were constant, the acceleration of self-propelled droplets would increase with the increase of the inclined angles of ratchets. The size of the droplets had no relationship with the acceleration of self-propelled droplets.

**droplet, ratchet surfaces, Leidenfrost effect, self-propelled, acceleration**

doi: 10.1360/N972016-00591