

# 关于动静液滴聚结诱导跳跃的数值模拟

王 帅, 肖翔域, 赵嘉毅\*

上海理工大学, 能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2023年7月24日; 录用日期: 2023年8月2日; 发布日期: 2023年9月6日

## 摘 要

为了探究初始速度和液滴之间约束点对运动液滴和静态液滴聚结引起的液滴跳跃的影响, 我们采用单向有限元模型进行了模拟, 并结合实验验证了仿真结果。结果表明: 移动液滴的初始速度加速了跳跃过程中液滴变形, 随着移动液滴的初速度增加, 弹跳速度减小; 随着约束点高度增加, 弹跳速度增加。聚结液滴总动能的主要来源从释放的表面能转变为运动液滴的初始动能, 但弹跳动能占总动能的比例减小。此外, 移动液滴的初始速度加剧了液滴变形, 加速了聚结诱导跳跃的过程, 但是抑制了跳跃高度, 而约束点促进了液滴的弹跳。这项工作将为液滴跳跃行为带来新的见解, 并促进其在相关领域的应用。

## 关键词

液滴, 约束点, 聚结, 跳跃

# Numerical Simulation of Jump Induced by Coalescence of Static and Static Droplets

Shuai Wang, Xiangyu Xiao, Jiayi Zhao\*

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

Received: Jul. 24<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 2<sup>nd</sup>, 2023; published: Sep. 6<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to explore the effect of the initial velocity and the constraint point between droplets on the droplet jump caused by the agglomeration of moving droplets and static droplets, a one-way

\*通讯作者。

finite element model was used to simulate the droplet jump, and the simulation results were verified by experiments. The results show that the initial velocity of the moving droplet accelerates the droplet deformation during the jumping process, and the bouncing velocity decreases with the increase of  $u_0$  of the moving droplet. As the height of the constraint point increases, the bounding speed increases. The main source of total kinetic energy of the coalesced droplet changes from the released surface energy to the initial kinetic energy of the moving droplet, but the proportion of bouncing kinetic energy in total kinetic energy decreases. In addition, the initial velocity of the moving droplet increases the droplet deformation, and accelerates the coalescence-induced jump process, but inhibits the jump height, while the constraint point promotes the droplet bounce. This work will bring new insights into droplet jumping behavior and promote its application in related fields.

## Keywords

Droplets, Restraint Points, Coalescence, Jumps

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

液滴聚结引起跳跃[1]这一现象广泛存在于航空航天、化工、能源动力等领域。聚结诱导的液滴跳跃可以促进液滴的自去除,在传热增强[2][3][4]、能量收集[5][6]、自清洁[7][8]、发电[9]、辐射冷却[10]、和结冰防冻[11][12]、结冰等相关领域具有广泛应用。一直以来,学者们对液滴聚结引发跳跃这一过程进行了多方面的研究[13]。Boreyko 和 Chen [14]首次研究了在超疏水表面没有任何外力作用下的自跳行为,得出了这种运动是由液滴聚结时释放的表面能引起的,并指出这一跳动遵循毛细管—惯性尺度定律。Chen [15]通过多相流求解器模拟计算了液滴聚结诱导的自推进行为,通过比较液滴在有基底和无基底的情况下的聚结来研究跳跃机制,同时分析了液滴性质和初始速度对该过程的影响,并指出基底会阻止液滴伸长,使更多的表面能转化为动能,跳跃同样服从毛细管—惯性尺度定律,初始速度使液滴聚结成为一种以惯性为主的运动。Li [16]等采用流体体积法(VOF)和动态接触角模型进行模拟研究初始速度对动静液滴聚合引起液滴跳跃的影响,移动液滴的初始速度加速了跳跃过程中液滴的聚合和变形,从而导致液滴近似恒定,当雷诺数达到临界值后,垂直弹离速度明显增大,水平速度与初始速度成正比,比率为 0.4,初始速度对液滴中的能量转换有极大的影响。

除了这些关于液滴大小和初始状态的讨论外,表面特征也是影响行为的重要因素, Liu 和 Cheng [17]使用 3D 晶格玻尔兹曼方法研究了表面纹理对该过程的影响,并提出对于最大跳跃速度存在微观结构的最佳间距。Attarzadeh 和 Dolatabadi [18]同样使用流体体积(VOF)方法模拟了非均质表面对这种现象的影响,并表明异质表面增加了液滴的粘附,降低了跳跃速度和跳跃高度。设计特殊结构来增强跳跃也是该领域的热门话题。Wang 等人[19]和 Vahabi 等人[20]都在光滑的超疏水表面上设置了两个液滴之间的脊,并得出结论,与在没有脊的超疏水表面上跳跃相比,液滴跳跃高度和能量转换率显着增加。

以往的研究从跳跃速度[21]、能量转换[22]、尺寸效应[23]和跳跃控制[24]等方面对液滴聚结诱导跳跃进行研究。然而,聚结的液滴往往同时存在这些问题,这对于液滴跳跃现象的许多应用具有根本意义。据我们所知,目前还没有人研究运动液滴初始速度和跳跃表面纹理对液滴聚结诱导跳跃的共同影响。为

此, 我们使用了具有突出宏观结构的表面对一动一静液滴聚合的影响。我们期待这项工作能够拓宽对液滴跳跃现象的认识, 并在相关工程领域产生更多实际和积极的影响。

## 2. 研究方法

为了研究初始速度对动、静两种液滴聚结时液滴跳跃的影响, 本文采用了不同于以往采用的两相模型(如: 基于 VOF 的方法)的单向有限元模型进行数值模拟, 使用移动网格来模拟液滴聚结引起的弹跳过程。如图 1 所示, 几何模型如图 1 所示。为了驱动两液滴凝缩, 先给其中一个液滴一定的初速度, 而约束点设置在合并后液滴的下方, 用红圈表示。

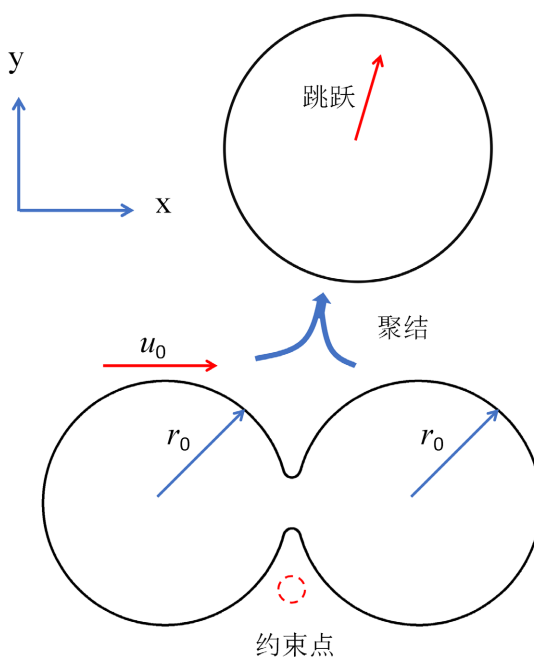


Figure 1. Schematic diagram of droplet coalescence jump process

图 1. 液滴聚结跳跃过程示意图

在聚结引起的跳跃过程中, 可以忽略周围流体的影响。与两相模型(例如, 基于 VOF 的方法)相比, 使用单相模型可以提高计算效率, 同时达到与先前研究报告相同的仿真效果。但是, 此过程需要对边界进行特殊处理。为了克服这一挑战, 我们引入了逐点约束, 并使用简单的约束效应纳入边界条件, 我们的研究通过有限元采用单相模型来模拟具有移动网格的聚结诱导跳跃过程。

图 2 显示了带网格的几何模型, 该模型由 3384 个网格节点和 6539 个单元组成。为了模拟该过程, 需要两个相邻的液滴模型。一旦它们接触, 它们之间会迅速形成液桥并开始聚结, 这是一个短暂的过程, 不会影响仿真结果。此外, 基于单相有限元模型, 我们必须首先模拟连接两个液滴的薄液桥, 并且液桥附近的网格是局部加密的。我们在聚结液滴下方设置了一个宏观结构脊, 该液滴在二维空间中表示为红色圆圈。液桥下部和液滴底部之间的脊高度通过调节  $h^*$  来控制。该脊的效果是通过逐点约束实现的。

在本文中, 将液滴瞬时速度定义为液滴表面的平均速度为:

$$v = \frac{\int_v v dA}{\int_v dA} \quad (1)$$

其中 A 表示计算域的区域。

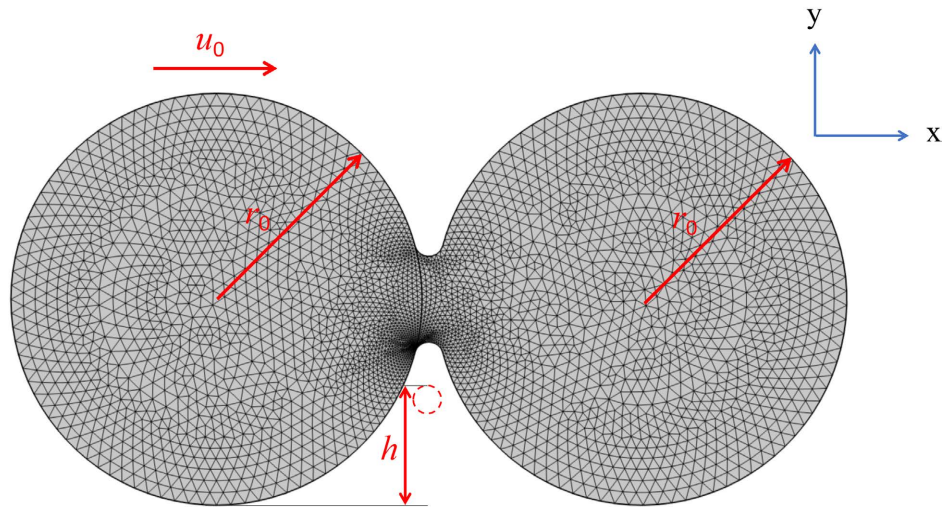


Figure 2. Model grid diagram  
图 2. 模型网格图

相应的液滴跳跃速度遵循惯性毛细管缩放定律[14] [25] [26]。

$$v_j, u_j \sim u_{ci} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho r_0}} \quad (2)$$

这里  $v_j$  垂直弹离速度， $u_j$  是水平弹离速度， $\sigma$  是液滴表面张力， $\rho$  是液滴密度， $r_0$  是液滴半径。根据毛细管惯性速度推导，相应的特征时间尺度为：

$$t_{ci} = \sqrt{\frac{\rho r_0^3}{\sigma}} \quad (3)$$

前面介绍的特征量，即  $u_{ci}$ 、 $r_0$  和  $t_{ci}$  分别用于非量纲化液滴的速度  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{u}$ ，脊高度  $h^*$ ，剖面位置和聚结时间  $\tau$ ：

$$\mathbf{v} = \frac{v}{u_{ci}} \quad (4)$$

$$h^* = \frac{h}{r_0} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{t}{t_{ci}} \quad (6)$$

### A. 控制方程

该模型是在单相系统框架内使用 COMSOL 软件和不可压缩的 Navier-Stokes 方程计算的，如下所述：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\nabla \cdot (2\mu \mathbf{D})}{\rho} \quad (8)$$

速度矢量由  $\mathbf{u} = (u, v)$  表示，其中  $u$  和  $v$  分别表示  $x$  和  $y$  方向上的速度分量。 $p$  表示压力， $\mathbf{D}$  是变形张量的速率。在本次仿真中，重力的影响被忽略了 0.6 mm 的液滴半径。自由表面的应力由力平衡方程决定：

$$p + n \cdot S \cdot n = \sigma \nabla \cdot n \quad (9)$$

$$n \cdot S \cdot t = 0 \quad (10)$$

其中  $\sigma \nabla \cdot n$  表示拉普拉斯压力,  $\sigma$  表示表面张力系数,  $S$  表示粘性应力张量,  $n$  和  $t$  分别表示相对于界面的法向量和切向量。

### B. 点约束

由于模型是单相的, 因此将脊效应视为自由表面上计算节点的边界条件。如图 3 所示, 具体来说, 选择液桥下半部分的曲线进行边界条件应用, 并在图中标记为蓝色。监测点生成在曲线上每对计算节点的中间, 如放大图中红色所示。图中的阴影区域代表圆形宏观结构, 用  $\Omega$  表示。在聚结过程中, 自由表面的变形可能导致监测点  $\Omega$  进入脊区域, 如图中的虚线圆圈所示。在这种情况下, 相应的计算节点受以下定义的逐点约束:

$$u = \begin{cases} u \notin \Omega \\ 0 \in \Omega \end{cases} \quad (11)$$

所选计算节点  $\Omega$  进入脊区域, 则它们的速度固定为零, 相当于施加无滑移边界条件。一旦这些节点离开  $\Omega$ , 它们的速度就会恢复到原来的自由状态。逐点约束允许合理考虑脊的影响, 下一节将介绍这种方法的验证。

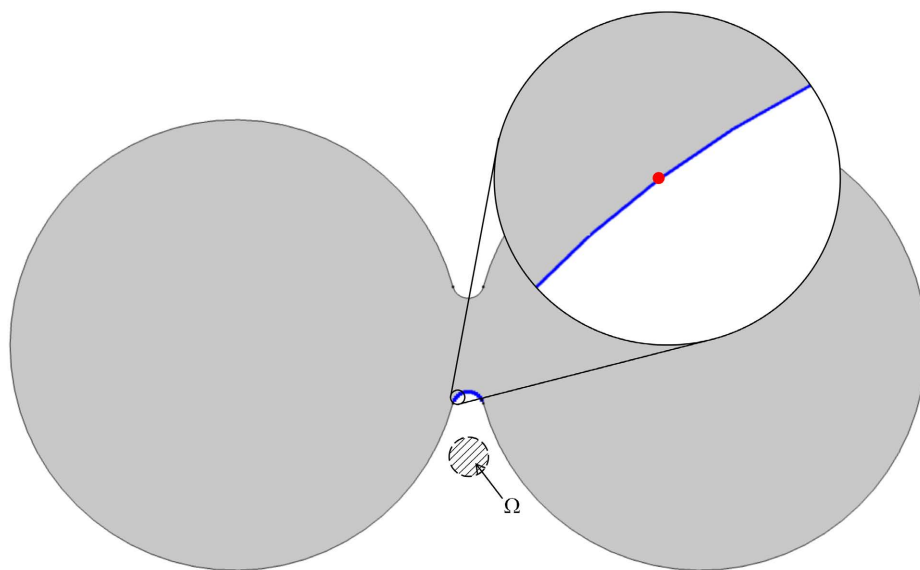


Figure 3. Point-by-point constraint diagram

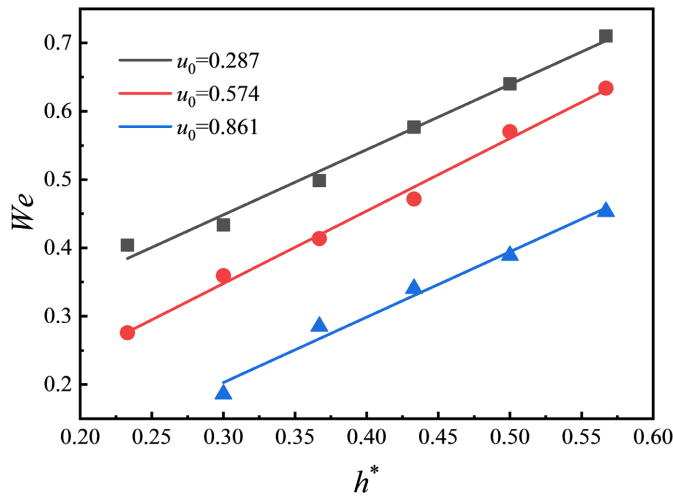
图 3. 逐点约束示意图

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 数值验证

为了指导实验的设计和优化, 在研究流动物理特性之前, 进行了网格灵敏度分析。在这项分析中, 我们系统地改变了网格密度来研究网格对液滴聚结跳跃的影响。模拟结果与实验进行比较, 聚结过程液滴形状的跳跃高度都基本一致。并通过对比模拟验证了韦伯数  $We$  与约束点  $h^*$  的关系, 图 4 中显示了动静液滴聚结诱导跳跃过程弹离时竖直方向  $We$  随约束点  $h^*$  的增加而线性增加。这表明更高的  $h^*$  导致表

面能更有效地转换为向上的动能，该实验结果与 Vahabi [20] 的模型研究结论一致，证明本文模型的可行性和实验数据的可靠性，同时保证了计算精度和计算效率，数值模型满足预期的用途。

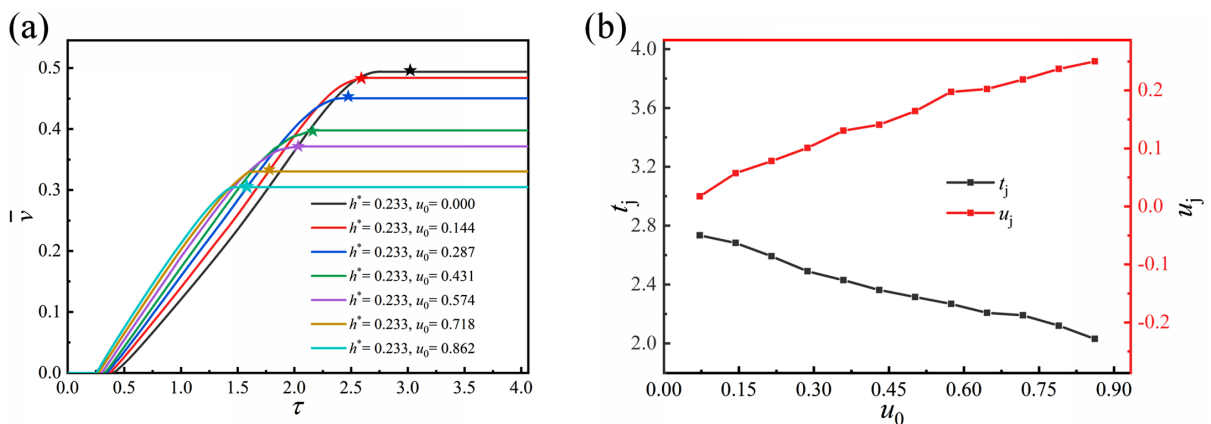


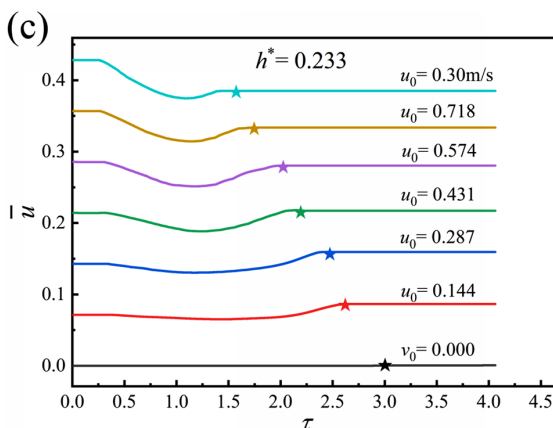
**Figure 4.** Under different initial velocity  $u_0$ , the number of  $We$  changes with the dimensionless height of the constraint point  
**图 4.** 不同初始速度  $u_0$  下,  $We$  数随约束点无量纲高度的变化

### 3.2. 速度分析

图 5 中显示了凝结液滴跳跃过程中无量纲速度与无量纲时间  $\tau$  的关系，在不同初始速度下得到的曲线用不同的颜色来区分。大致来说，竖直方向上的表面平均速度  $v$  随时间  $\tau$  增加而逐步增大，水平速度  $u$  先减小后增大，由于实验无重力的影响，最后两者都趋于平稳。具体来说，随着初速度  $u_0$  的增加，同一时间竖直方向上的速度相应增大，但最终趋于平稳的速度显著减小；而对于任何时间的无论是水平速度还是最终速度都随初速度的增加而增大。

另外，我们在每条曲线中标注了合并后液滴的弹离时间  $t_j$ ，随着初速度的增加，液桥膨胀和液滴收缩阶段花费的时间显著减小。在不同初速度  $u_0$  下，液滴弹离约束点的时间  $t_j$  和弹离速度是不同的，如下图所示，随初速度增加，弹离时间  $t_j$  和竖直方向上的速度  $v_j$  减小，但弹离时的水平速度则相反，随着初速度增加而增大，水平弹离速度与初速度成正比。弹离时间的变化趋势与水平弹离速度的变化趋势相似。如果考虑水平弹离速度与弹离时间之间的关系，我们可以得出结论，这两个参数是高度相关的。如果缩短弹离时间  $t_j$ ，水平弹离速度  $u_j$  增加。



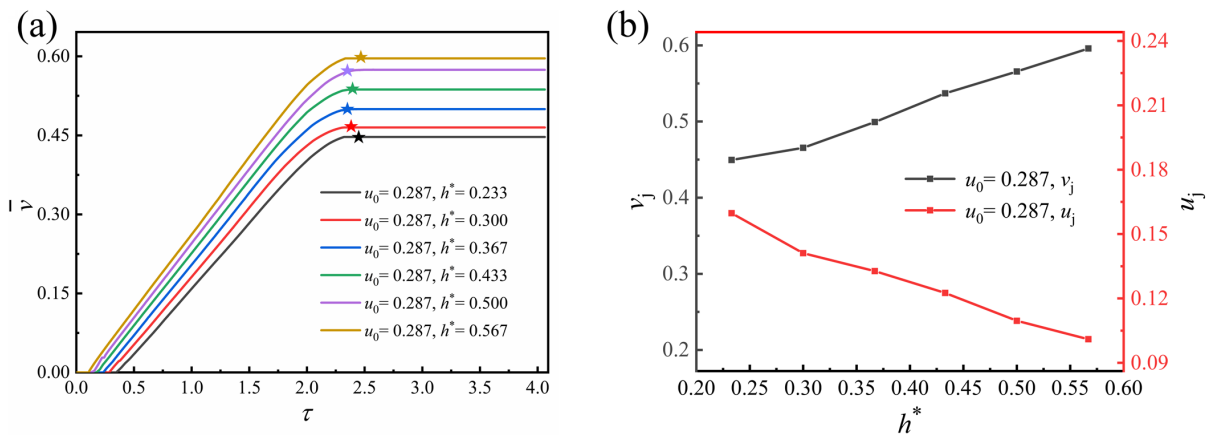


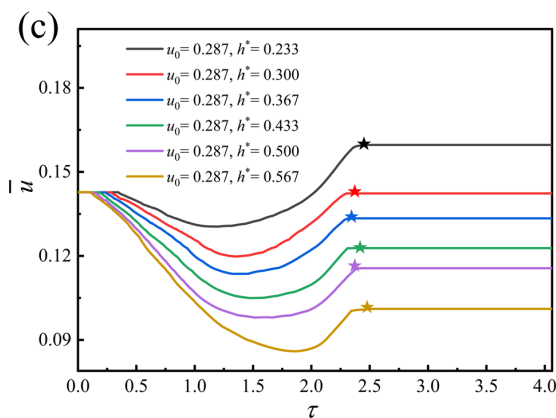
**Figure 5.** (a) Change of droplet vertical velocity  $v$  with time  $\tau$  at different initial velocities; (b) The change of the drop ejection time  $t_j$  and the horizontal ejection velocity  $u_j$  with the initial velocity at the same height of constraint point; (c) Change of droplet horizontal velocity  $u$  with time  $\tau$  at different initial velocities

**图 5.** (a) 不同初始速度下液滴垂直速度  $v$  随时间  $\tau$  的变化; (b) 约束点同一高度下, 液滴弹离时间  $t_j$  和水平弹离速度  $u_j$  随初始速度的变化; (c) 不同初始速度下液滴水平速度  $u$  随时间  $\tau$  的变化

研究继续通过改变约束区域的相对高度来进行实验。图 6 展示了区域  $\Omega$  在不同相对高度情况下, 聚合液滴无量纲表面平均速度与无量纲时间的关系。与改变初始速度的效果相反, 当初始速度保持一致时, 我们可以观察到约束区域的相对高度越高, 液滴在垂直方向上的速度就越大, 而在水平方向上的平均速度则随着  $h^*$  的增大而逐渐减小。值得注意的是, 液滴的弹离时间几乎不受  $h^*$  的影响, 如图中用星号标记的部分所示。随着  $h^*$  的增大, 融合后的液滴弹离约束点瞬间垂直方向上的速度增大, 水平方向上的速度相反而减小。这表明约束点的存在能够改变液滴跳跃的方向。Chen 的研究指出, 水平初始速度的存在使得液滴以惯性为主进行运动, 然而, 液滴之间的约束点会打破这种惯性, 导致液滴在聚结后的表面能更多地转化为垂直方向的动能。

合并的液滴离开约束点时同时具有垂直和水平速度分量, 由图 6 可知, 随  $u_0$  变化和  $h^*$  变化, 垂直弹离速度  $v_j$  和水平弹离速度  $u_j$  的变化趋势。增加水平初始速度  $u_0$  或减小约束点相对高度  $h^*$  都会使  $v_j$  增加, 而  $u_j$  增大。水平初始速度的存在加速左侧液桥膨胀, 使左侧液滴被抬起, 而右侧液滴在毛管压力下正常演变。约束点导致液滴不能自由向水平方向运动而改变原本运动轨迹, 左侧液滴遇到阻碍被挤压有往上运动的趋势, 继而带动合并的液滴跳跃, 使液滴在垂直方向具有更多的动能。运动液滴的初始速度和约束点的存在使合并的液滴倾斜向上跳跃。

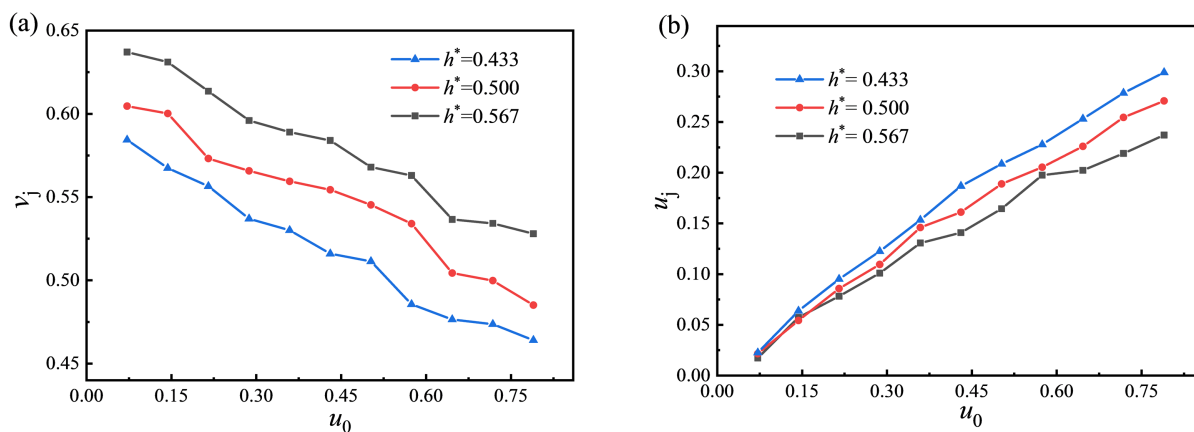




**Figure 6.** (a) Change of droplet vertical velocity  $v$  with time  $\tau$  at different constrained heights; (b) At the same initial velocity, the drop ejection velocity  $v_j$  and  $u_j$  in vertical direction and horizontal direction change with the height of the constraint point; (c) Change of droplet horizontal velocity  $u$  with dimensionless time  $\tau$  at different constrained heights

**图 6.** (a) 不同约束高度下液滴垂直速度  $v$  随时间  $\tau$  的变化; (b) 同一初始速度下, 液滴垂直方向上和水平方向上弹离速度  $v_j$  和  $u_j$  随约束点高度的变化; (c) 不同约束高度下液滴水平速度  $u$  随无量纲时间  $\tau$  的变化

如图 7 所示, 通过分析  $u_j$  和  $v_j$  可以得出, 合并的液滴随  $u_0$  增加, 跳跃方向越来越平行于水平方向。即液滴的离去角(离去角是指跳跃方向与水平方向之间的角度)减小, 此外,  $h^*$  增加会导致离去角增大。水平弹离速度  $u_j$  与  $u_0$  成正比, 随  $h^*$  的增加比例系数减小。Li [16] 的研究表明水平弹离速度不受液滴半径的影响, 它与初始速度成正比, 关系为  $u_j = 0.4u_0$ 。而约束点位置高低会影响比例系数, 图中  $u_j$  和  $u_0$  斜率由 0.4 (有量纲时的斜率) 减小到 0.36 到最后的 0.32, 这些结果表明液滴跳跃具有一定的可控性, 对相关工程具有指导意义。



**Figure 7.** At different constraint point heights, (a) The instantaneous velocity of vertical ejection (b) and horizontal instantaneous velocity change with the initial velocity  $u_0$  of the droplet

**图 7.** 在不同约束点高度下, (a) 垂直弹离瞬时速度和 (b) 水平弹离瞬时速度随液滴初始速度  $u_0$  的变化

### 3.3. 液滴形态分析

如图 8 显示了液滴聚结引起跳跃过程的轮廓图, 最初, 两液滴的速度都为零, 然后液桥收缩接触到约束点。在  $\tau = 0$  时, 左侧液滴以一定的初速度撞击静止液滴。之后, 两液滴之间的液桥膨胀相互融合, 合并过程伴随着液桥的膨胀和液滴的运动。如图所示, 在  $\tau = 0.58$  时, 液桥正在膨胀。由于左侧液滴具有初始速度, 因此液桥的形状不对称, 左侧部分的变形较快。液桥完成膨胀后, 液滴仍然在水平方向上不

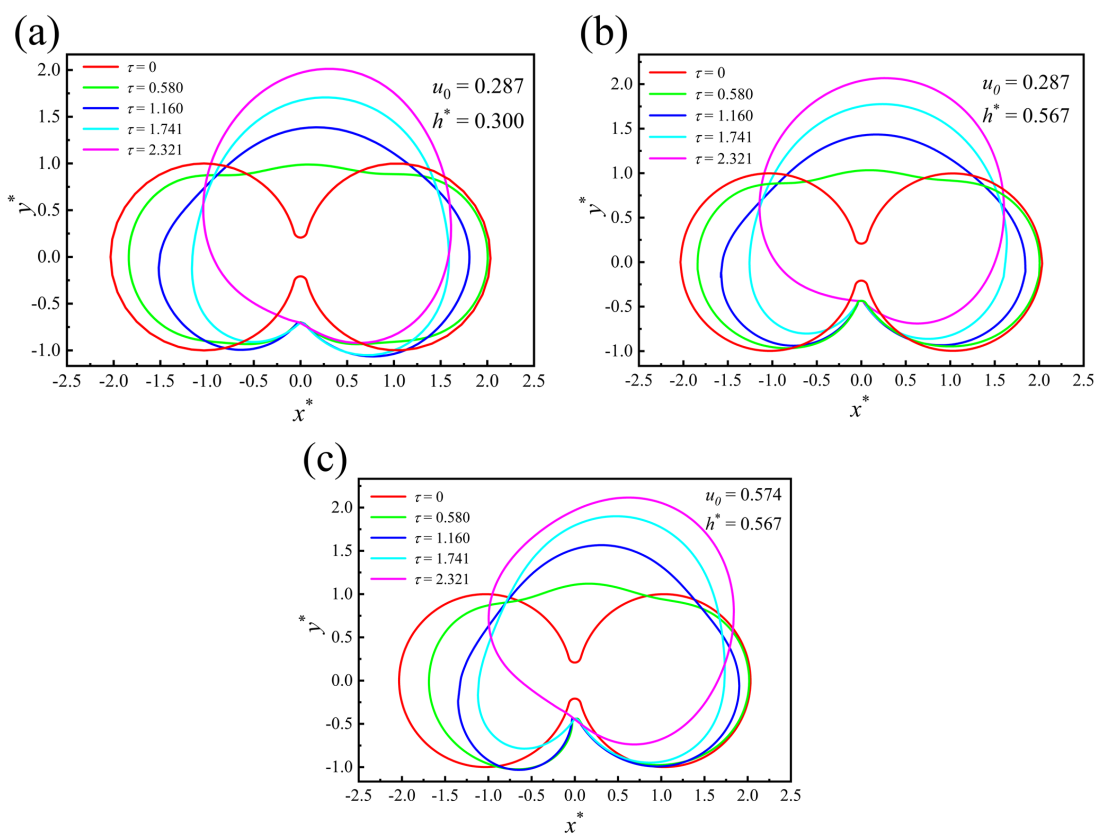


对称地振荡, 导致液滴形状不对称。由于撞击约束点的液桥产生反作用力, 液滴向上移动, 最终弹离约束点。离开约束点后, 液滴具有水平和垂直速度, 这表明液滴的倾斜跳跃。与无初始速度的液滴跳跃相比 Wang 等人[19]和 Yan 等人[27]的液滴跳跃实验进行比较, 初始速度的液滴跳跃主要具有两个明显的合并特征: 一个是不对称的液滴形状演变, 另一个是弹离后的斜跳跃。

图 9 和图 10 分别显示了  $\tau = 0.87$  和 1.74 两时刻聚结液滴的内部速度场和压强场。对于运动液滴的聚结诱导跳跃过程, 由于运动液滴侧面的流体具有初始速度, 聚结液滴中间的流体被运动流体向  $y$  方向挤压, 挤压效应随初始速度的增加而增大。当液桥接触约束点时, 液桥的膨胀速度随着移动液滴的  $u_0$  增加而增加。表面张力使液滴的两侧仍然向中间收缩, 但内部速度场表现出明显的不对称性。运动液滴侧的流体速度大于静态液滴侧的速度, 差异随  $u_0$  的增加而增大。具有初始速度的流体将更快地流向聚结液滴的中间, 从而加速聚结过程。在分离的瞬间, 速度矢量的方向逐渐向运动液滴初始速度的方向(即  $+x$  方向)移动, 表明跳跃速度占聚结液滴总速度的比例减小。这就解释了为什么跳跃动能占总动能的比例会随着  $u_0$  增加而降低。

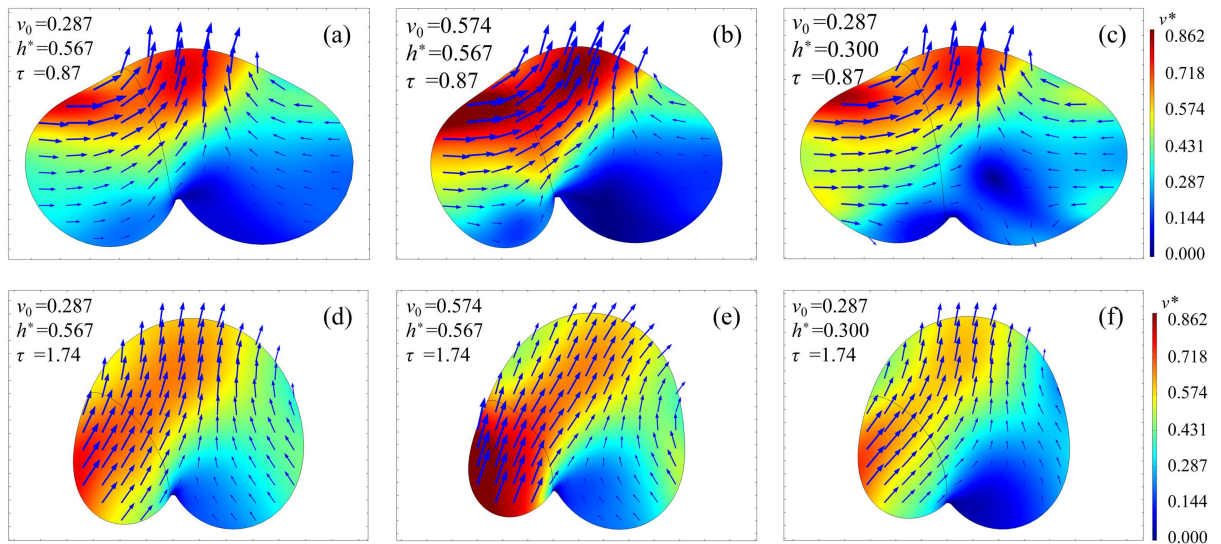
如图所示, 由于移动液滴的惯性效应引起的挤压, 同一时刻, 合并液滴水平长度随着  $u_0$  的增加而减小得更快。同时, 惯性效应也将流体推向液桥膨胀的方向, 导致液滴宽度更快增加。随着  $u_0$  的增加, 惯性效应会变强, 导致液滴变形加剧。

左下方液滴形成高压区, 随着  $u_0$  增大, 高压区压力明显增大。而  $h^*$  增大时, 高压区压力无明显变化, 但有微小增大的趋势。流体从高压区流向低压区, 从流场速度矢量图和压强图可以看出, 随着运动液滴初始速度  $u_0$  的减小和约束点相对高度  $h^*$  的增加, 液滴聚结引起的跳跃现象可以大大增强。



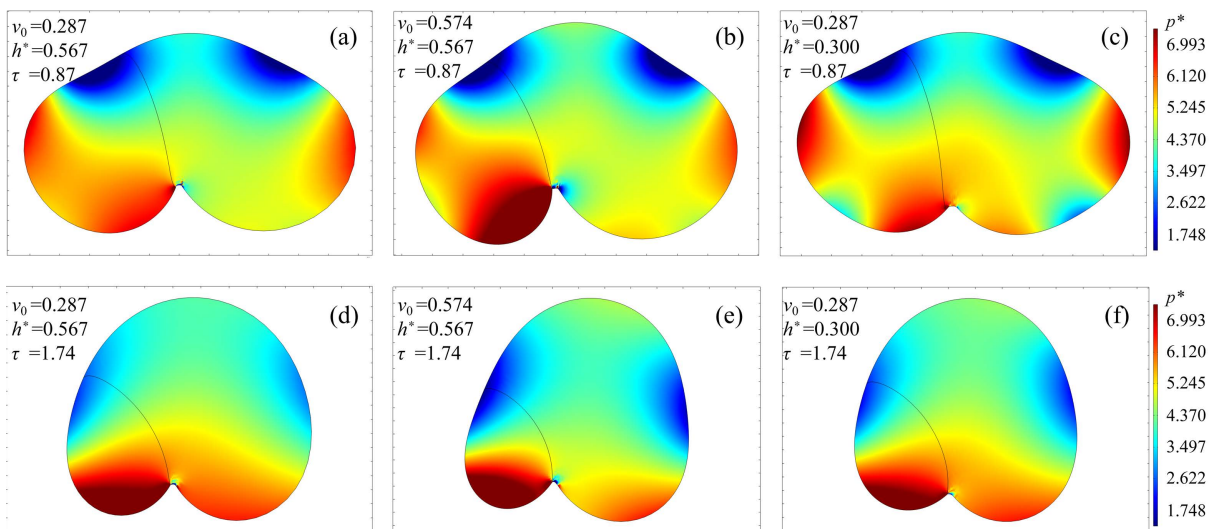
**Figure 8.** Morphological changes of droplets with different initial velocity  $u_0$  and height  $h^*$  at different constraint points. (a)  $u_0 = 0.278$ ,  $h^* = 0.300$ ; (b)  $u_0 = 0.278$ ,  $h^* = 0.567$ ; (c)  $u_0 = 0.574$ ,  $h^* = 0.567$

**图 8.** 不同初始速度  $u_0$  和不同约束点高度  $h^*$  液滴形态变化。(a)  $u_0 = 0.278$ ,  $h^* = 0.300$ ; (b)  $u_0 = 0.278$ ,  $h^* = 0.567$ ; (c)  $u_0 = 0.574$ ,  $h^* = 0.567$



**Figure 9.** Velocity field and velocity cloud of droplets at different times under different initial velocity  $u_0$  and different constraint point heights  $h^*$

**图 9.** 在不同初始速度  $u_0$  和不同约束点高度  $h^*$  条件下液滴在不同时刻的速度场和速度云图



**Figure 10.** Pressure clouds of droplets at different times under different initial velocity  $u_0$  and different constraint point heights  $h^*$

**图 10.** 在不同初始速度  $u_0$  和不同约束点高度  $h^*$  条件下液滴在不同时刻的压强云图

Gao [28]提出影响运动液滴聚结跳跃速度的机制有两种：变形强化和液桥冲击加固，前一种机制将抑制跳跃，而后者将增强跳跃。本文机理分析结果表明随着初始速度  $u_0$  和约束点高度  $h^*$  的变化，这两种影响跳跃的机制的强度发生变化， $u_0$  增大和  $h^*$  减小都会使得跳跃速度趋于降低。先前的研究表明，当移动液滴的初始速度较高时，跳跃过程将以惯性为主。本工作的结果进一步解释了运动液滴的惯性效应影响运动液滴聚结诱导跳跃的机理。

### 3.4. 能量分析

为了进一步研究动静液滴的碰撞动力学，本文将进一步讨论整个碰撞过程中的能量演化。当两个液滴聚结时，合并液滴的总表面积减小，从而导致多余的表面能的释放。考虑到能量守恒定律，总能量( $E_0$ )，

初始动能( $E_{k,0}$ )和初始表面能( $E_{s,0}$ )具有以下关系:  $E_0 = E_{k,0} + E_{s,0}$ 。

由于是二维模型,所以初始动能  $E_{k,0}$  和总动能  $E_0$  以及液滴离开时刻垂直方向上的跳跃动能  $E_{k,j}$  的液滴计算公式为:

$$E_{k,0} = \frac{1}{2} \rho A u_0^2 \quad (12)$$

$$E_{k,t} = \frac{1}{2} \int_A \rho (v^2 + u^2) dA \quad (13)$$

$$E_{k,j} = \frac{1}{2} \rho A v_j^2 \quad (14)$$

释放的表面能  $\Delta E_s$  在液滴脱离的时刻计算如下:

$$\Delta E_s = \gamma \Delta l \quad (15)$$

其中,  $\gamma$  是液滴表面张力系数,  $l$  是液滴的边界长度。

为了进行分析和比较,初始动能、释放的表面能、总动能和跳跃动能的非量纲化如下:

$$E_{k,0}^* = E_{k,0} / (E_{k,0} + \Delta E_s) \quad (16)$$

$$\Delta E_s^* = \Delta E_s / (E_{k,0} + \Delta E_s) \quad (17)$$

$$E_{k,t}^* = E_{k,t} / (E_{k,0} + \Delta E_s) \quad (18)$$

$$E_{k,j}^* = E_{k,j} / (E_{k,0} + \Delta E_s) \quad (19)$$

图 11 显示随着初始速度的增加,无量纲初始动能  $E_{k,0}^*$  增加和无量纲释放的表面能  $\Delta E_s^*$  减小,表示初始动能在能量中的比例增加,释放的表面能比例减小。释放的表面能随  $u_0$  减小,这表明运动液滴初始速度引起的强烈变形将抑制液滴跳跃。总动能  $E_{k,t}^*$  随着  $u_0$  的增加而减小,表示聚结液滴总动能的主要来源为释放的表面能。与总动能的趋势不同,跳跃动能  $E_{k,j}^*$  随  $u_0$  数的增加而减小,这意味着运动液滴的初始动能主要转化为其他方向无序流动的动能。 $E_{k,j}^*$  也随着  $u_0$  大而减小,因为惯性效应变得越来越重要,聚结液滴的水平运动占主导地位。

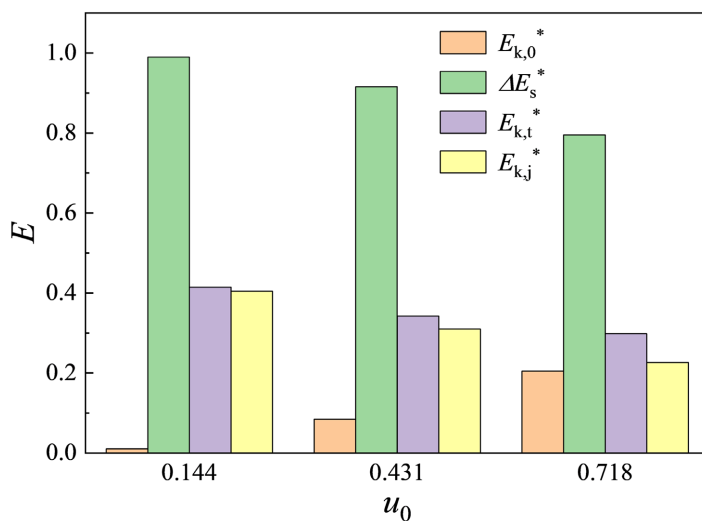


Figure 11. Change of dimensionless energy with initial velocity when droplets ejection conclusion

图 11. 液滴弹离时无量纲能量随初始速度的变化

## 4. 结论

本文通过数值模拟,研究了运动液滴初始速度和液滴之间约束点的高度对弹跳速度、液滴形态和能量转换的影响。通过理论分析研究了跳跃机理。主要结论如下:

1) 运动液滴的初始速度会对聚结液滴产生惯性效应从而抑制融合液滴跳跃。运动液滴的初始速度促进了液桥膨胀,并加速了液滴变形,导致液滴形状不对称。

2) 约束点也会影响液滴聚结引起的跳跃速度和运动轨迹。在高的约束点,液滴更早地接触约束点,防止在早期阶段产生负跳跃速度。跳跃速度随约束点高度的增加而增加,由于更高的跳跃速度,水滴的轨迹高度也随着增加。在水平方向上,弹离速度与初始速度成正比,且比例系数随约束点 $h^*$ 的增大而减小。

3) 运动液滴的初始速度对融合液滴的能量转换影响较大。随液滴初始速度的增加,表面能变化量的占比减小,竖直方向的动能占比减小,水平方向的动能占比增加,因为聚结液滴的水平运动逐渐占主导地位。

## 参考文献

- [1] Wisdom, K.M., Watson, J.A., Qu, X., Liu, F., Watson, G.S. and Chen, C.-H. (2013) Self-Cleaning of Superhydrophobic Surfaces by Self-Propelled Jumping Condensate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 7992-7997. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210770110>
- [2] Dietz, C., Rykaczewski, K., Fedorov, A.G. and Joshi, Y. (2010) Visualization of Droplet Departure on a Superhydrophobic Surface and Implications to Heat Transfer Enhancement during Dropwise Condensation. *Applied Physics Letters*, **97**, Article ID: 033104. <https://doi.org/10.1063/1.3460275>
- [3] Cheng, Y., Xu, J. and Sui, Y. (2016) Numerical Investigation of Coalescence-Induced Droplet Jumping on Superhydrophobic Surfaces for Efficient Dropwise Condensation Heat Transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **95**, 506-516. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.074>
- [4] Foulkes, T., Sett, S., Sokalski, P., Oh, J. and Miljkovic, N. (2020) Fundamental Limits of Jumping Droplet Heat Transfer. *Applied Physics Letters*, **116**, Article ID: 093701. <https://doi.org/10.1063/1.5141744>
- [5] Boreyko, J.B. and Chen, C.-H. (2013) Vapor Chambers with Jumping-Drop Liquid Return from Superhydrophobic Condensers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **61**, 409-418. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.077>
- [6] Timonen, J.V.I., Latikka, M., Leibler, L., Ras, R.H.A. and Ikkala, O. (2013) Switchable Static and Dynamic Self-Assembly of Magnetic Droplets on Superhydrophobic Surfaces. *Science*, **341**, 253-257. <https://doi.org/10.1126/science.1233775>
- [7] Kelleher, S.M., Habimana, O., Lawler, J., O'Reilly, B., Daniels, S., Casey, E. and Cowley, A. (2016) Cicada Wing Surface Topography: An Investigation into the Bactericidal Properties of Nanostructural Features. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 14966-14974. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b08309>
- [8] Watson, G.S., Gellender, M. and Watson, J.A. (2014) Self-Propulsion of Dew Drops on Lotus Leaves: A Potential Mechanism for Self Cleaning. *Biofouling*, **30**, 427-434. <https://doi.org/10.1080/08927014.2014.880885>
- [9] Xu, W., Zheng, H., Liu, Y., Zhou, X., Zhang, C., Song, Y., et al. (2020) A Droplet-Based Electricity Generator with High Instantaneous Power Density. *Nature*, **578**, 392-396. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1985-6>
- [10] Zhong, H., Zhang, P., Li, Y., Yang, X., Zhao, Y. and Wang, Z. (2020) Highly Solar-Reflective Structures for Daytime Radiative Cooling under High Humidity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 51409-51417. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c14075>
- [11] Zhang, Q., He, M., Chen, J., Wang, J., Song, Y. and Jiang, L. (2013) Anti-Icing Surfaces Based on Enhanced Self-Propelled Jumping of Condensed Water Microdroplets. *Chemical Communications*, **49**, 4516-4518. <https://doi.org/10.1039/c3cc40592c>
- [12] Boreyko, J.B. and Collier, C.P. (2013) Delayed Frost Growth on Jumping-Drop Superhydrophobic Surfaces. *ACS Nano*, **7**, 1618-1627. <https://doi.org/10.1021/nn3055048>
- [13] Li, N., Pan, L.M., Wang, L., Huang, Y.P. and Yuan, D.W. (2022) Molecular Dynamics Study on the Wettability of the Lithium Droplet and Tungsten Surface. *Langmuir*, **38**, 2502-2514. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02964>
- [14] Boreyko, J.B. and Chen, C.H. (2009) Self-Propelled Dropwise Condensate on Superhydrophobic Surfaces. *Physical Review Letters*, **103**, Article ID: 184501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.184501>

- [15] Chen, Y. and Lian, Y. (2018) Numerical Investigation of Coalescence-Induced Self-Propelled Behavior of Droplets on Non-Wetting Surfaces. *Physics of Fluids*, **30**, Article ID: 112102. <https://doi.org/10.1063/1.5046056>
- [16] Li, S., Chu, F., Zhang, J., Brutin, D. and Wen, D. (2020) Droplet Jumping Induced by Coalescence of a Moving Droplet and a Static One: Effect of Initial Velocity. *Chemical Engineering Science*, **211**, Article ID: 115252. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115252>
- [17] Liu, X. and Cheng, P. (2015) 3D Multiphase Lattice Boltzmann Simulations for Morphological Effects on Self-Propelled Jumping of Droplets on Textured Superhydrophobic Surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **64**, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.03.002>
- [18] Attarzadeh, R. and Dolatabadi, A. (2017) Coalescence-Induced Jumping of Micro-Droplets on Heterogeneous Superhydrophobic Surfaces. *Physics of Fluids*, **29**, Article ID: 012104. <https://doi.org/10.1063/1.4973823>
- [19] Wang, K., Liang, Q., Jiang, R., Zheng, Y., Lan, Z. and Ma, X. (2016) Self-Enhancement of Droplet Jumping Velocity: The Interaction of Liquid Bridge and Surface Texture. *RSC Advances*, **6**, 99314-99321. <https://doi.org/10.1039/C6RA22421K>
- [20] Vahabi, H., Wang, W., Mabry, J.M. and Kota, A.K. (2018) Coalescence-Induced Jumping of Droplets on Superomniphobic Surfaces with Macrotecture. *Science Advances*, **4**, eaau3488. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau3488>
- [21] Zhao, C.Y., Yan, X., Wang, Z.K., Huang, Z.Y., Bo, H.L. and Chen, F. (2023) When Coalescing Droplets Jump: A Unified Energy Conversion Model Incorporating Droplet Size and Surface Adhesion. *Physics of Fluids*, **35**, Article ID: 052001. <https://doi.org/10.1063/5.0146262>
- [22] Li, J., Yang, K.H., Liang, Y.H. and Liu, C.B. (2022) Hydrodynamic Analysis of the Energy Dissipation of Droplets on Vibrating Superhydrophobic Surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **137**, Article ID: 106264. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106264>
- [23] Abubakar, A.A., Yilbas, B.S., A-Qahtani, M.H., Hassan, G., Yakubu, M., Bahatab, S. and Adukwu, J.A.E. (2021) Experimental and Model Studies of Various Size Water Droplet Impacting on a Hydrophobic Surface. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, **143**, Article ID: 061402. <https://doi.org/10.1115/1.4049930>
- [24] Sun, K., Shu, L.Y., Jia, F.F., Li, Z. and Wang, T.Y. (2022) Vibration-Induced Detachment of Droplets on Superhydrophobic Surfaces. *Physics of Fluids*, **34**, Article ID: 053319. <https://doi.org/10.1063/5.0089087>
- [25] Cha, H., Chun, J.M., Sotelo, J. and Miljkovic, N. (2016) Focal Plane Shift Imaging for the Analysis of Dynamic Wetting Processes. *ACS Nano*, **10**, 8223-8232. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b03859>
- [26] Enright, R., Miljkovic, N., Dou, N., Nam, Y. and Wang, E.N. (2013) Condensation on Superhydrophobic Copper Oxide Nanostructures. *Journal of Heat Transfer*, **135**, Article ID: 091304. <https://doi.org/10.1115/1.4024424>
- [27] Yan, X., Zhang, L., Sett, S., Feng, L., Zhao, C., Huang, Z., Vahabi, H., Kota, A.K., Chen, F. and Miljkovic, N. (2019) Droplet Jumping: Effects of Droplet Size, Surface Structure, Pinning, and Liquid Properties. *ACS Nano*, **13**, 1309-1323. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.8b06677>
- [28] Gao, S. and Wu, X. (2022) Numerical Investigation on Coalescence-Induced Jumping of Centripetal Moving Droplets. *Langmuir*, **38**, 12674-12681. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02160>