

液滴撞击锥体的界面模态演化分析

吕明阳, 朱 兵

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 开展自然界和工业应用中广泛存在的液滴撞击尖端凸起结构的界面演化现象研究具有重要意义。采用实验和数值模拟相结合的方法研究了液滴撞击超疏水圆锥体过程中界面的动态演化, 重点研究了韦伯数 We 和锥角 α 对液滴在圆锥体表面的模态演化的影响, 并结合速度场和压力场分析了模态切换的原因。研究发现, 随着 We 的增大, 液滴冲击圆锥体时会依次出现 4 种模态: 未被刺穿且完全反弹; 刺穿形成环状后完全反弹; 刺穿形成环状, 在回缩的过程中发生破碎; 刺穿形成环状, 在铺展过程中发生破碎。此外, 随着 α 的增大, 发现不同模态间切换的临界 We 逐渐增大。本研究工作不仅增强了对液滴在复杂表面上冲击行为的理解, 而且可为指导相关工程应用提供重要参考。

关键词: 液滴撞击; 圆锥体; 界面演化; 模态切换

中图分类号: O 359 **文献标志码:** A

Interfacial modal evolution analysis of a droplet impacting a cone

LÜ Mingyang, ZHU Bing

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

Abstract: It is of great significance to carry out the interfacial evolution phenomenon of droplets impacting tip-raised structures, which is widely existing in nature and industrial applications. The dynamic evolution of the interface during droplet impact on superhydrophobic cone was investigated by combining experiments and numerical simulations, focusing on the effects of Weber number We and cone angle α on the modal evolution of the droplet on the surface of the cone, and the reasons for the mode switching were analyzed in the context of the velocity field and pressure field. The research finds

收稿日期: 2025-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12572278); 上海市白玉兰人才计划浦江项目(23PJD070)

第一作者: 吕明阳(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向: 计算和实验流体力学。E-mail: 2669043155@qq.com

通信作者: 朱 兵(1979—), 男, 副教授。研究方向: 计算和实验流体力学。E-mail: zbing@usst.edu.cn

引文格式: 吕明阳, 朱兵. 液滴撞击锥体的界面模态演化分析[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(2): 129-139.

Citation: LÜ Mingyang, ZHU Bing. Interfacial modal evolution analysis of a droplet impacting a cone[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(2): 129-139.

that as We increases, four modes will occur successively when the droplet impacts the cone: unpunctured and completely rebound; punctured to form a ring and then completely rebound; punctured to form a ring and shattered in the process of retraction; punctured to form a ring and shattered in the process of spreading. Furthermore, as α increases, it is found that the critical We for switching between different modes gradually increases. This research work not only enhances the understanding of the impact behavior of droplets on complex surfaces, but also provides an important reference for guiding related engineering applications.

Keywords: *droplet impact; cone; interface evolution; mode switching*

液滴撞击壁面普遍存在于自然界和工业领域。液滴撞击壁面时会表现出丰富的界面演化行为, 也可能伴随着多种复杂的物理现象, 如冻结、蒸发、沸腾等^[1-6]。在不同的应用场合中, 对液滴的动态演化行为的要求不同^[7-12]。例如: 在防止结冰^[13] 和自清洁^[14] 的过程中, 必须减少液滴与壁面的接触面积和时间^[15]; 但在喷雾冷却^[16-17] 和喷洒农药的过程中, 需要增加接触面积和接触时间^[18-21]; 在喷涂和喷墨打印^[22-23] 时, 就需要控制液滴的接触面积。一方面, 自然界中普遍存在液滴撞击现象以及在多个工业应用中控制液滴撞击的需求; 另一方面, 由于机械损伤、老化缺陷和自然生成的结构等, 壁面会出现凸起、凹腔、脊、柱以及尖锐边缘等多样的宏观结构。因此, 开展液滴撞击不同形式壁面的界面演化研究具有重要意义。

研究者们已经通过实验、理论建模和数值计算的方法对液滴撞击不同形式的固体表面行为开展了较多研究^[6, 17, 24-26]。Dalgamoni 等^[27] 采用格子玻尔兹曼方法 (lattice Boltzmann method, LBM) 和理论分析相结合的方法研究了液滴在不同韦伯数、表面曲率和表面润湿性曲面上的动力学行为, 揭示了液滴撞击曲面的 3 种动力学行为: 液滴不发生反弹、部分反弹和完全反弹。Xia 等^[28] 通过数值模拟的方法研究了柱高和液滴半径对弹跳动力学的影响, 研究结果表明液滴在微柱超疏水表面有两种反弹模式: 传统反弹和饼状反弹。Zhang 等^[29] 对液滴撞击粗糙固体表面的飞溅行为进行了实验研究, 发现飞溅状态可分为冠状飞溅和手指状飞溅两种模式。Jung 等^[30] 采用数值的方法研究了液滴在具有脊状凸出表面的动态特性, 通过对凸起的不同偏心落点的冲击, 将冲击行为表征为环形弹跳和分岔弹跳。Jiang 等^[31-32] 通过对液滴在不同

凸起 (半圆形、等边三角形和正方形) 和空腔结构表面的实验研究, 发现凸起和空腔结构增强了液滴的变形和破碎, 缩短了接触时间, 但空腔结构在高韦伯数下降低了液滴的铺展直径。Liu 等^[33] 研究了具有均匀分布的微型凸起和条纹结构对液滴行为的影响。根据撞击速度的不同, 在液滴的反弹行为中发现了两种特别的模态: 饼状反弹和飞鹰形态反弹^[34]。Chy 等^[35] 研究了液滴在不同形状和大小的柱状阵列结构表面的动力学特性, 发现均匀柱状结构可以降低液滴的扩散速度; 当在柱间空隙添加小柱阵列时, 液滴铺展和破碎也得到减小。Huang 等^[36] 对液滴撞击沟槽的圆柱体超疏水表面进行了实验研究, 其基于韦伯数将液滴在沟槽表面的动力学行为划分为 3 个区域: 完全反弹区、过渡区和飞溅区; 发现沟槽结构阻碍了液滴在竖直方向上的扩散和飞溅, 但促进了液滴在平行方向上的扩散和飞溅。Liu 等^[37-38] 对液滴撞击凸球表面和凹球表面的冲击行为进行了数值和理论分析, 发现随着直径比的减小, 凸球表面和凹球表面的最大扩散弧角增大, 接触线的最大直径减小。此外, 在直径比一定的情况下, 液滴在凹球表面上的铺展比在凸球表面上的铺展要小。

可见, 目前大多数研究集中在液滴对平面、亲疏水微型结构表面的影响上^[39], 也有一些学者开展了液滴撞击规则宏观结构的界面演化工作, 然而对与液滴尺寸相当的尖锐宏观结构表面的研究较少^[40-41]。这些研究也主要专注最大铺展状态的预测和环状形态的演化, 而对液滴在超疏水圆锥壁面的冲击模态以及模态间的切换机制还不清楚。因此, 本文将通过实验和数值相结合的方法来研究液滴对超疏水圆锥体的撞击过程, 并分析在撞击过程中液滴沿圆锥表面的模态演化及其切换机制。

1 实验和数值方法

本节将主要介绍液滴撞击超疏水圆锥结构的实验系统和测试方法, 并简要介绍液滴的数值计算方法。

1.1 实验方法

图1展示了搭建的液滴撞击圆锥结构的实验系统, 主要包括液滴产生、液滴撞击、探测和图像采集系统4个部分。液滴产生系统包括注射泵和注射器针头。液滴撞击系统由垂直升降台和带孔平板组成: 垂直升降台用于固定和调节注射器针头的高度, 然后控制液滴撞击的速度; 孔板用来固定圆锥结构和升降台的位置。液滴探测系统主要由光电探测器和同步器组成, 用于检测下落的液滴, 获取输入信号给同步器, 从而用于触发高速相机拍照。图像采集系统由一台带有微距镜头的高速相机(FASTCAM Mini100)和一个平面光源组成。高速相机的帧率为8000 fps, 分辨率为1280×616 px, 采用阴影成像法从正面拍摄液滴撞击圆锥的过程。

在具体实验时, 首先将圆锥和升降台固定在孔板上, 连接注射泵的针头固定在升降台上, 使

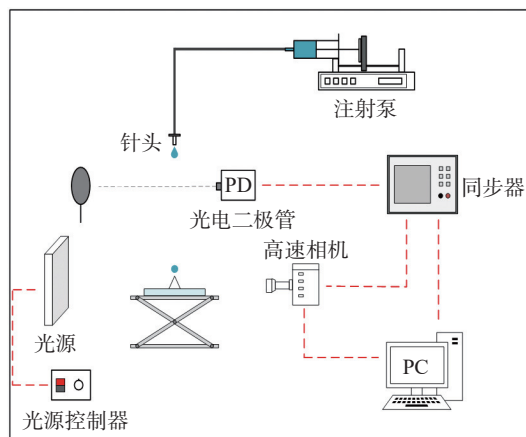


图1 液滴撞击实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the droplet impact experiment setup

其刚好在圆锥的正上方。然后调整升降台, 将针头升高到所需高度, 用高速相机记录液滴撞击圆锥的动态行为。图2展示了液滴撞击超疏水圆锥过程示意图。其中, 假定直径为 D_0 、速度为 U_0 的液滴位于锥角为 2α 的圆锥的正上方, 然后液滴在锥面上铺展, 设定铺展直径为 L 。为了便于后续描述液滴撞击的动态过程, 引入无量纲参数: 定义无量纲时间 $t^* = tU_0/D_0$ 、韦伯数 $We = \rho U_0^2 D_0 / \sigma$ 、奥内佐格数 $Oh = \mu / \sqrt{\rho \sigma D_0}$ 和铺展因子 $\beta = L/D_0$ 。

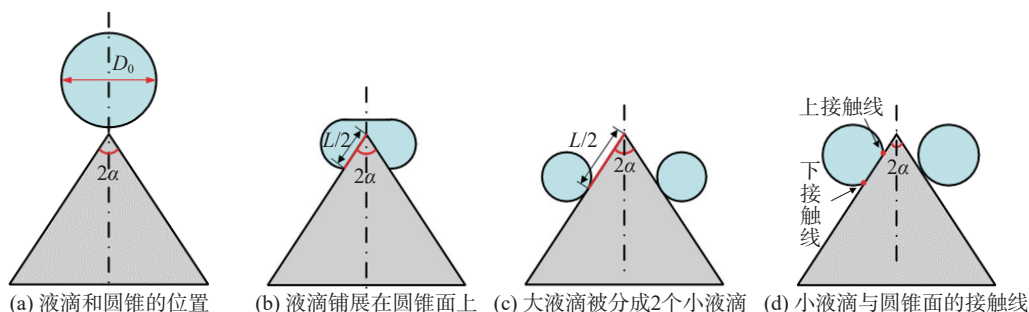


图2 液滴撞击超疏水圆锥结构过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of the process of droplet impact on superhydrophobic cone structure

实验用液体采用去离子水。常温下测定去离子水密度 $\rho=998 \text{ kg/m}^3$ 、动力黏度 $\mu=0.898 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 和表面张力 $\sigma=0.072 \text{ N/m}$ 。保持圆锥高度 $h=15 \text{ mm}$, 锥角 α 的变化范围为: $30^\circ \sim 60^\circ$ 。圆锥表面需要进行超疏水处理, 其过程为: 首先, 使用高目数的砂纸对其打磨抛光, 再用去离子水清洗, 确保圆锥表面清洁; 然后, 用喷枪将超疏水剂均匀地喷涂在圆锥表面, 并等待干燥; 最后, 重复上一步骤2~3次, 以确保表面超疏水涂层的均匀性。由于在圆锥表面测量接触角比较困难, 采用相同的方法制备一个超疏水平板。测量得到其表面静态

接触角 $\theta_e=150^\circ \pm 2^\circ$, 前进接触角 $\theta_f=170^\circ \pm 2^\circ$, 后退接触角 $\theta_b=141^\circ \pm 2^\circ$ 。所有实验均在室温下进行, 测得初始液滴的直径 $D_0=2.5 \text{ mm}$, $We=3.40 \sim 52.30$, 每次实验重复3次以获得平均铺展因子 β 。

1.2 数值计算方法

本文采用多物理场求解器模拟液滴撞击圆锥的过程, 采用相场法结合不可压 Navier-Stokes 方程, 建立三维瞬态数值模拟液滴撞击锥体的分析模型, 如图3所示。选取的计算域为圆柱体, 在圆锥正上方放置直径 $D_0=2.5 \text{ mm}$ 的液滴。图3所示的圆锥锥角 $2\alpha=80^\circ$, 高度为4 mm。圆锥表面和圆柱

下底面设为无滑移壁面条件，接触角采用 Kistler 动态接触角模型^[42]，其中静态接触角 $\theta_e=150^\circ$ ，其他界面设为开放自由进出边界。计算过程中采用自适应网格进行界面捕捉。

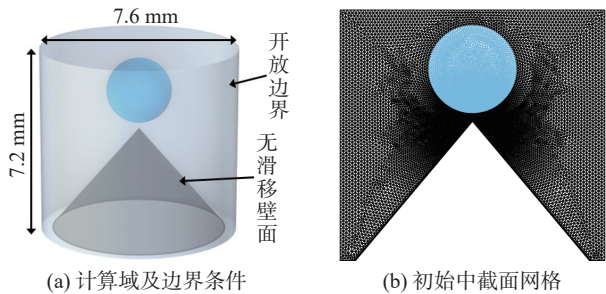


图3 三维仿真模型

Fig.3 Three-dimensional simulation model

2 结果与讨论

本节根据液滴撞击超疏水圆锥体的实验结果，分析 We 和 α 对液滴在圆锥体表面形态演化和铺展的影响，并结合数值计算结果分析液滴形态演化的机制。

2.1 液滴撞击圆锥体的界面演化

图 4~6 展示了液滴撞击圆锥体的实验结果。可见，总体上液滴在圆锥体表面经历铺展和收缩两个阶段。随着 We 和 α 的不同，液滴在圆锥体表面的演化进一步可细分为 4 种模式，即：① 未被刺穿，然后从锥尖完全反弹；② 刺穿成环状、收缩并从锥尖完全反弹；③ 刺穿成环状，收缩时破

碎；④ 刺穿呈环状，铺展时破碎。在第①种模式下，如图 4(a)、图 5(a)和图 6(a)所示，液滴首先在圆锥面上铺展，锥尖刺入液滴内部，当达到最大铺展状态时，液滴没有被锥尖刺穿，然后开始沿着壁面收缩，最后离开圆锥表面。这种液滴没有被刺穿的形态演化与液滴撞击平面未破碎的情形类似。在第②种模式下，如图 4(b)和图 5(b)所示，液滴在铺展的阶段会被刺穿，形成环状。然后收缩到锥尖时液滴聚集在一起，再由环状结构转变为球形，最后从锥尖离开。在第③种模式下，如图 4(c)、图 5(c)、图 6(b)所示，液滴被锥尖刺穿后形成环状，当环状向上回缩时，其在达到锥尖位置前发生破碎离开圆锥表面。在第④种模式下，如图 4(d)、图 5(d)和图 6(d)所示，液滴被锥尖刺穿后形成环状，在环状沿着锥体向下铺展的过程中发生破碎。

在不同的 α 和 We 下，图 7 给出了液滴撞击后沿着圆锥体表面其 β 随 t^* 的演化。可见，当液滴在铺展过程中不发生破碎时， β 随着时间的延长呈现先增大后减小的变化趋势。由图 7(a)~(c)可知，当 α 一定时，随着 We 的增大， β 的最大值不断增加。当 We 一定时，如图 7(d)所示，随着 α 增大，液滴在铺展的初始阶段 β 的增长速率越高，随后逐渐降低。在图 8 中可以明显看出在同一 We 下， β 的最大值随着 α 增大而减小。

在 β 随时间的演化过程中，部分曲线出现了二次上升的现象。例如在图 7(c)中 $We=10.10$ 时，

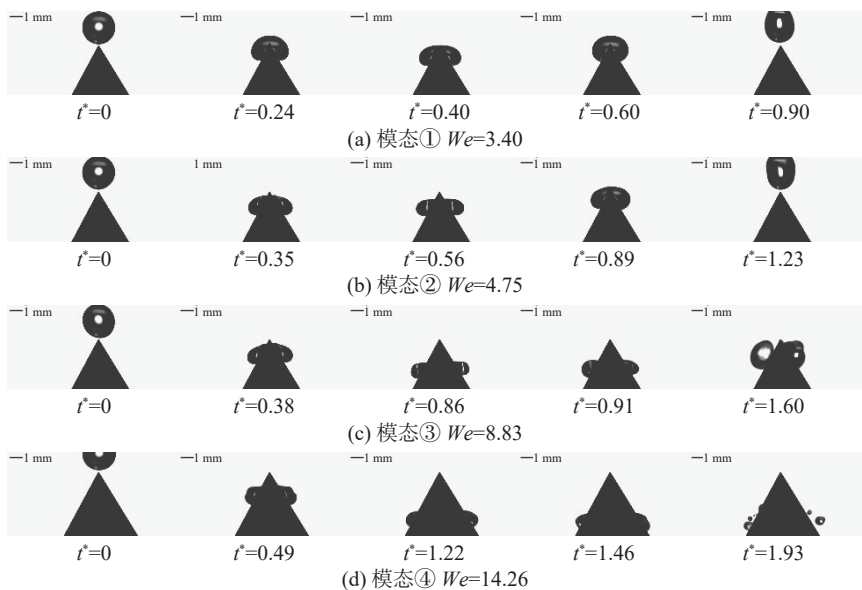


图4 液滴撞击 $2\alpha=60^\circ$ 锥面的演化过程

Fig.4 Evolution of a droplet impacting a cone with $2\alpha = 60^\circ$

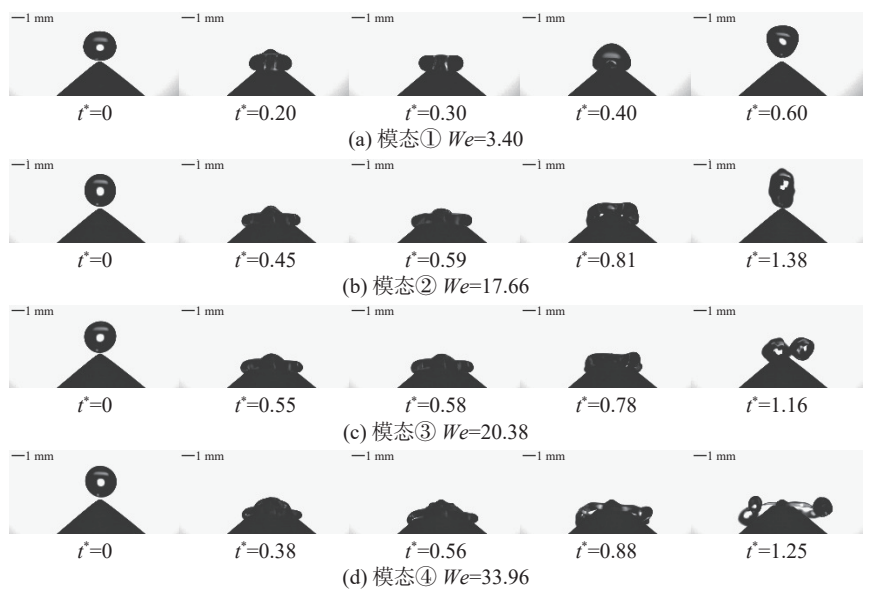


图 5 液滴撞击 $2\alpha=90^\circ$ 锥面的演化过程

Fig.5 Evolution of a droplet impacting a cone with $2\alpha = 90^\circ$

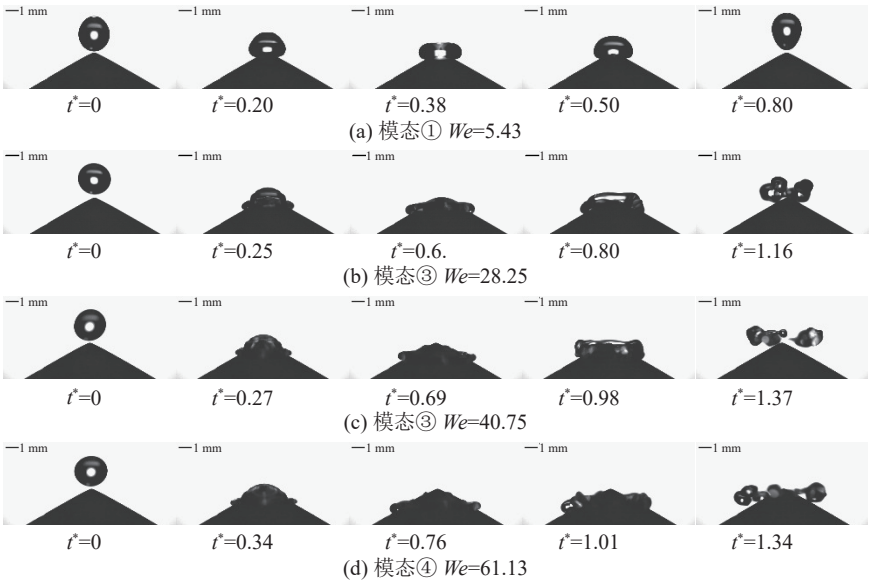


图 6 液滴撞击 $2\alpha=120^\circ$ 锥面的演化过程

Fig.6 Evolution of a droplet impacting a cone with $2\alpha = 120^\circ$

在液滴收缩过程中($t^*\approx 0.70$)， β 明显可见一个波动。这是因为液滴的下接触线位置流体在刚开始沿壁面向上收缩的过程中，液滴的顶部位置由于惯性作用还在下降，如图 9 所示。在 $t^*=0.50$ 时，液滴顶部到达最低点时，此时液滴呈现一个中心未贯穿的伪环形结构；在 $t^*=0.55$ 时，由于液滴中心位置受到周围的挤压而快速上升，从而在液滴表面产生一个扰动；在 $t^*=0.60$ 时，这个扰动在液滴表面向下传递；在 $t^*=0.66$ 时，这个扰动传递到下接触线的位置，导致 β 再次增大；在 $t^*=0.73$ 时，液滴整体回缩并准备离开圆锥表面，导致

β 快速减小。

图 10 总结了 α 和 We 对液滴撞击超疏水圆锥表面的界面模态切换的影响。由图 10 可知，当 α 增加时，总体上液滴撞击过程的各个模态对应的 We 范围随之增大。如当 $2\alpha=60^\circ$ 时，第①种模态 We 范围为 $2.0\sim 4.0$ ；当 $2\alpha=90^\circ$ 时，第①种模态 We 的范围增加到 $2.0\sim 6.8$ 。这是因为液滴在向下铺展时，随着 α 增大，液滴在竖直方向受到的反向作用阻力变大，因此需要增大撞击速度(即 We)才能刺穿液滴。但当 α 增加到一定值时，模态切换就会发生变化。如在图 10 中，当 $2\alpha=120^\circ$ 时，

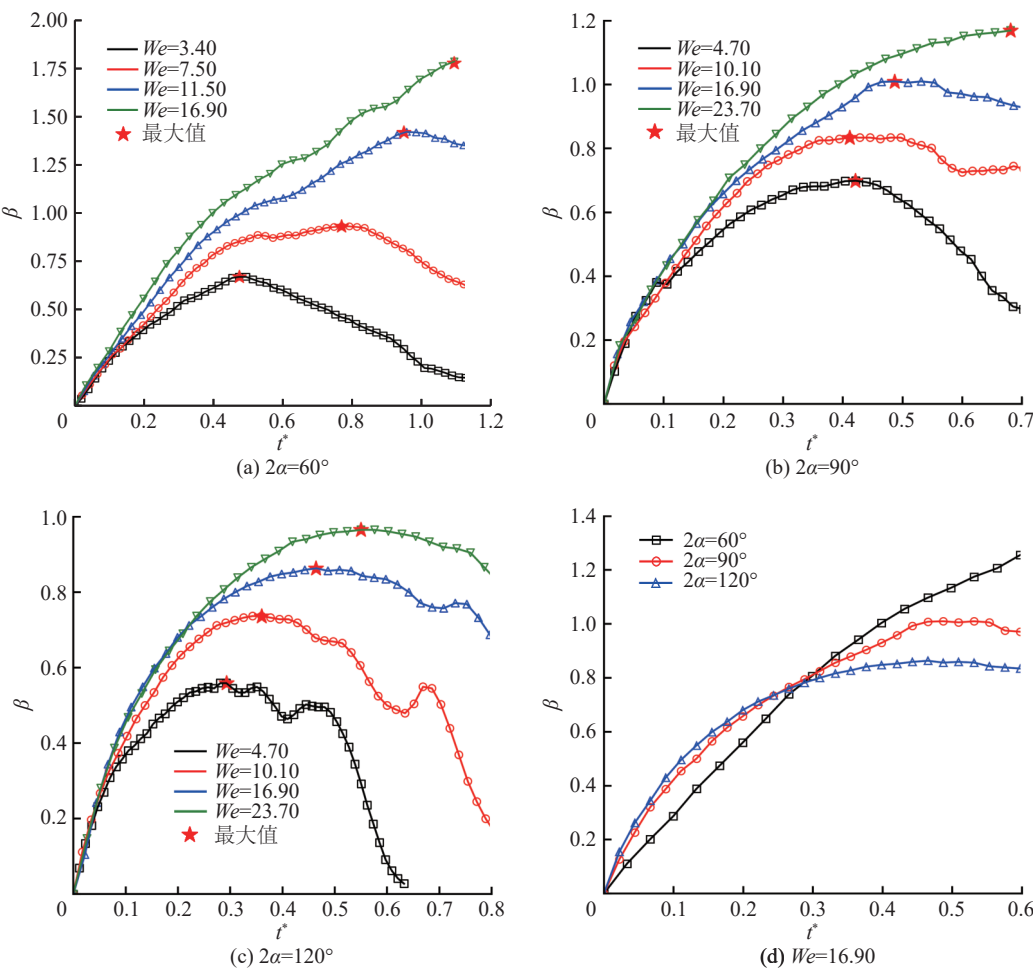


图 7 撞击过程中铺展因子 β 随 t^* 的演化

Fig.7 Evolution of spreading factor β with t^* during impacts

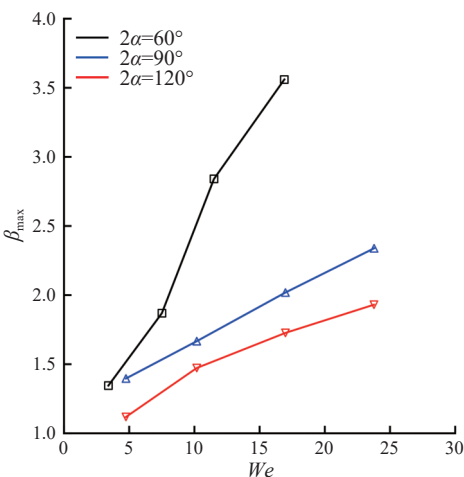


图 8 最大铺展因子 $\beta_{\max}$ 随 We 的演化

Fig.8 Evolution of the maximum spreading factor $\beta_{\max}$ with We

随着 We 的增加,液滴直接由第①种模态切换到第③种模态,时间演化过程如图 6(a)~(d)所示。这是由于当 α 较大时,液滴主要沿着水平方向铺

展。如图 11 所示,当 $t^*=0.50$ 时,液滴中心被刺穿;当 $t^*=0.60$ 时,液滴的上接触线在表面张力的作用下会向下接触线移动,而下接触线沿表面发生收缩;当 $t^*=0.75$ 时,两条接触线发生碰撞时,会产生强烈的扰动,这使得液滴很难以环状继续沿壁面回缩;当 $t^*=1.20$ 时,液环界面失稳直接触发了液环破碎事件。

2.2 模态演化机制分析

下面将以 $2\alpha=80^\circ$ 的圆锥为例,结合数值模拟结果,分析液滴撞击圆锥体的界面演化机制。

2.2.1 模态①: 液滴未被刺穿并从锥尖反弹

如图 12 所示,开始时液滴惯性力大于表面张力,在惯性力的作用下向下运动。在 $t^*=0.10$ 时,由于圆锥面的阻挡,液滴的动能转化为压力能和表面能,在锥尖上方形成一个高压区,液滴的速度方向由竖直向下转变为沿圆锥表面向下,液滴发生变形,其表面能增加的同时表面张力变大,从而阻碍液滴变形。在 $t^*=0.36$ 时,液滴达到最大

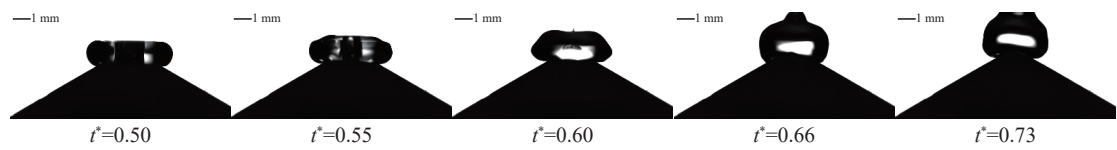


图 9 液滴撞击圆锥界面演化 ($We=10.10, 2\alpha=120^\circ$)

Fig.9 Interface evolution of a droplet impacting a cone ($We=10.10, 2\alpha=120^\circ$)

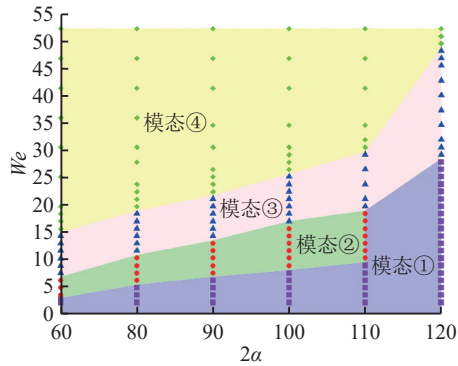


图 10 液滴撞击超疏水表面的模态演化分区

Fig.10 Partitioning of the modal evolution of a droplet impacting a superhydrophobic surface

铺展圆饼状态，液滴内部的速度几乎为 0，液滴的动能几乎全部转化为表面能和内部压力能。由于 $Oh=0.0067$ ，远小于 1，这意味着黏性力远小于表面张力，所以后者在液滴的运动中起主导作用。在 $t^*=0.42$ 时，液滴内部的速度方向沿壁面向上，在表面张力的作用下，液滴沿壁面向上收缩。表面能再次转化为动能。在 $t^*=0.66$ 时，液滴在惯性力的作用下，从锥尖离开圆锥表面。

2.2.2 模态②：液滴被刺穿形成环状并从锥尖反弹

如图 13 所示，液滴在圆锥表面铺展的初始阶段与模态①的类似，不同的是，液滴在达到最大铺展状态前会被刺破。这是由于随着 We 增大，液滴开始时的惯性力增加，在撞击时更容易变形。在 $t^*=0.32$ 时，锥尖上方的液滴在惯性力的作用下继续向下运动，由于受到圆锥的阻挡，速度方向由竖直向下变为沿圆锥表面向下，此时产生的径向向外的分速度使液滴向两侧拉伸，最终被刺破。刺破后液滴会出现上、下两条接触线。上接触线在表面张力下，向下运动形成环状。在 $t^*=0.51$ 时，液滴达到最大铺展状态。此后，在表面张力

的作用下，圆环开始沿壁面向上收缩。在 $t^*=0.89$ 时，由于圆环的速度方向是沿壁面向上的，在锥尖位置合为一个整体时，液滴的速度方向变为竖直向上，并在锥尖处产生一个高压区。在 $t^*=1.21$ 时，液滴在惯性力的作用下从锥尖离开。

2.2.3 模态③：液滴形成环状，在回缩过程中液环破碎

如图 14 所示，液滴在圆锥体表面的铺展、刺穿和形成环状结构的过程与模态②的相似。但在收缩阶段，液滴在到达锥尖前就会发生破碎。在 $t^*=0.54$ 时，液滴被刺破，上部分液体的曲率半径明显小于下部分液体的曲率半径，即上接触线位置的更大表面张力使得上接触线加速向下接触线运动。在 $t^*=0.64$ 时，两接触线上流体发生碰撞后形成环状，并在液环表面产生扰动。在 $t^*=0.90$ 时，扰动波在液环上传播，使得液环形状发生变化。液环在表面张力的作用下沿圆锥表面向上收缩，由于表面张力和扰动的作用，液环形成局部膨胀和收缩的区域。在 $t^*=1.21$ 时，由经典的 R-P (Rayleigh-Plateau) 不稳定性分析可知，圆环结构在扰动波的作用下失稳并发生破碎。

2.2.4 模态④：液滴形成环状，在铺展过程中液环破碎

如图 15 所示，液滴破碎机制与模态③的类似，不同的是液滴在铺展的过程中发生破碎，破碎后的液滴会向径向飞溅。在 $t^*=0.48$ 时，由于 We 比较大，液滴被刺穿时，圆锥表面的液膜较薄，上接触线位置液滴的更小的曲率半径以及更强的表面张力作用，使得上接触线加速向下接触线运动。此时下接触线仍在向下运动。在 $t^*=0.96$ 时，两条接触线发生碰撞，在液环表面产生一个

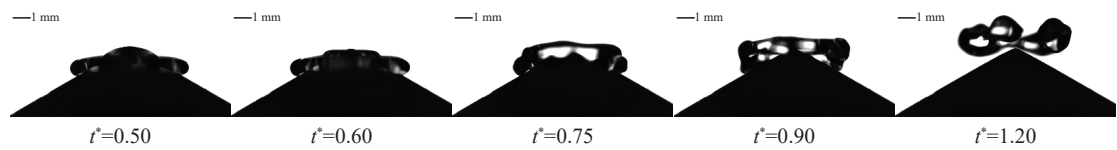


图 11 液滴撞击圆锥界面演化 ($We=29.20, 2\alpha=120^\circ$)

Fig.11 Interface evolution of a droplet impacting a cone ($We=29.20, 2\alpha=120^\circ$)

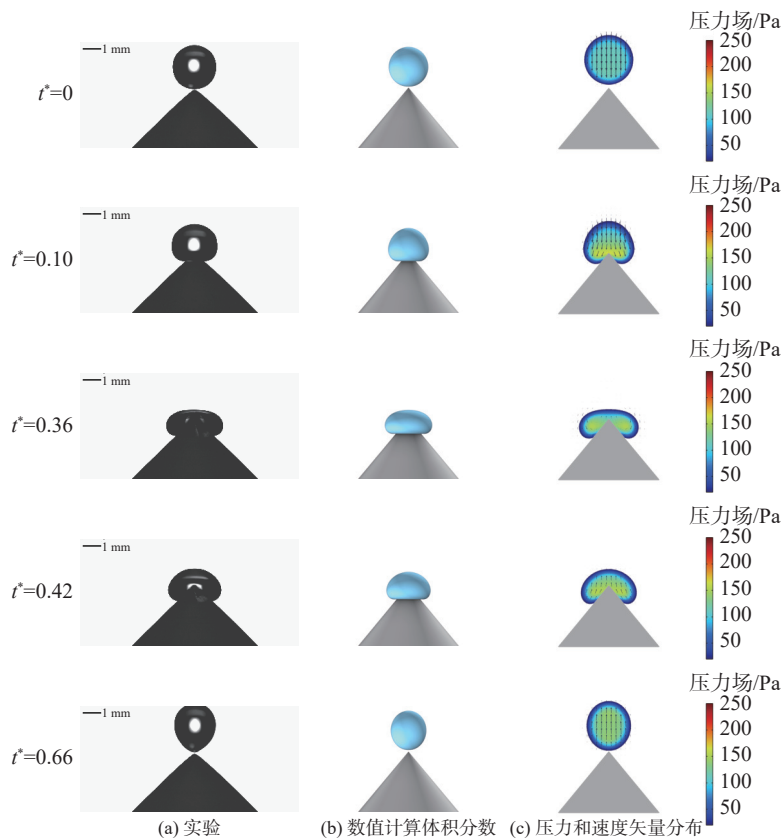


图 12 模态①：液滴撞击圆锥的界面演化和内部流场分布 ($We=3.40$, $2\alpha=80^\circ$)

Fig.12 Mode ①: interfacial evolution and internal flow field distribution of a droplet impacting on a cone ($We=3.40$, $2\alpha=80^\circ$)

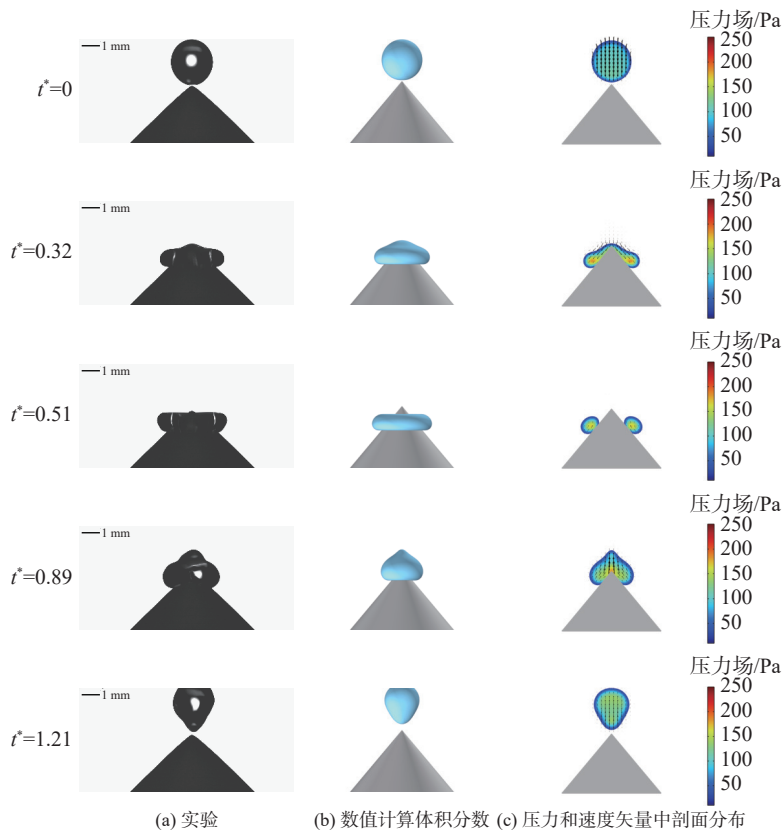


图 13 模态②：液滴撞击圆锥的界面演化和内部流场分布 ($We=8.83$, $2\alpha=80^\circ$)

Fig.13 Mode ②: interfacial evolution and internal flow field distribution of a droplet impacting on a cone ($We=8.83$, $2\alpha=80^\circ$)

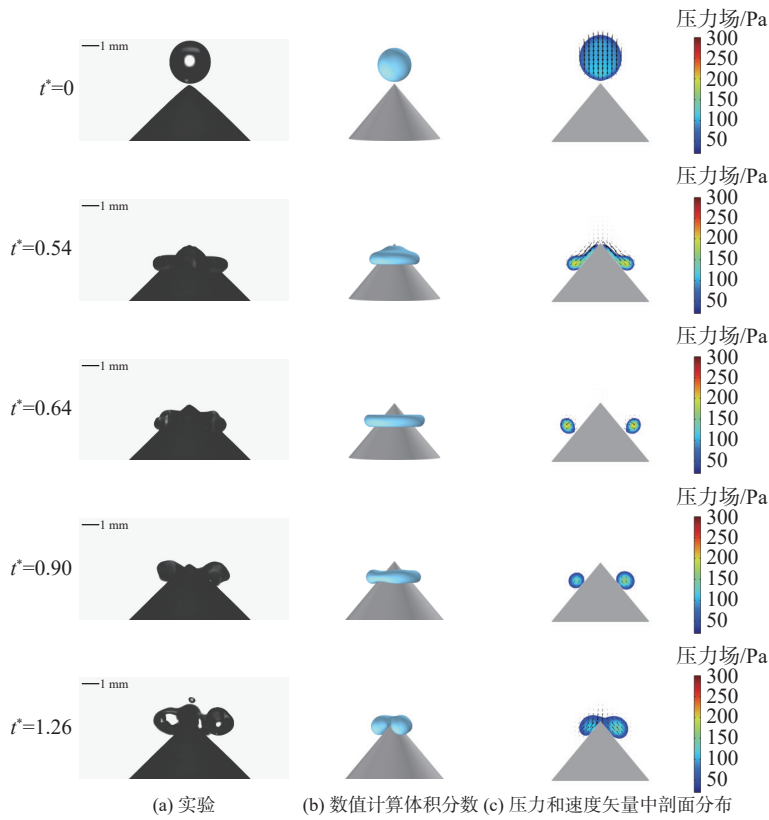


图 14 模态③：液滴撞击圆锥的界面演化和流场分布 ($We=17.66$, $2\alpha=80^\circ$)

Fig.14 Mode ③: interfacial evolution and internal flow field distribution of a droplet impacting on a cone ($We=17.66$, $2\alpha=80^\circ$)

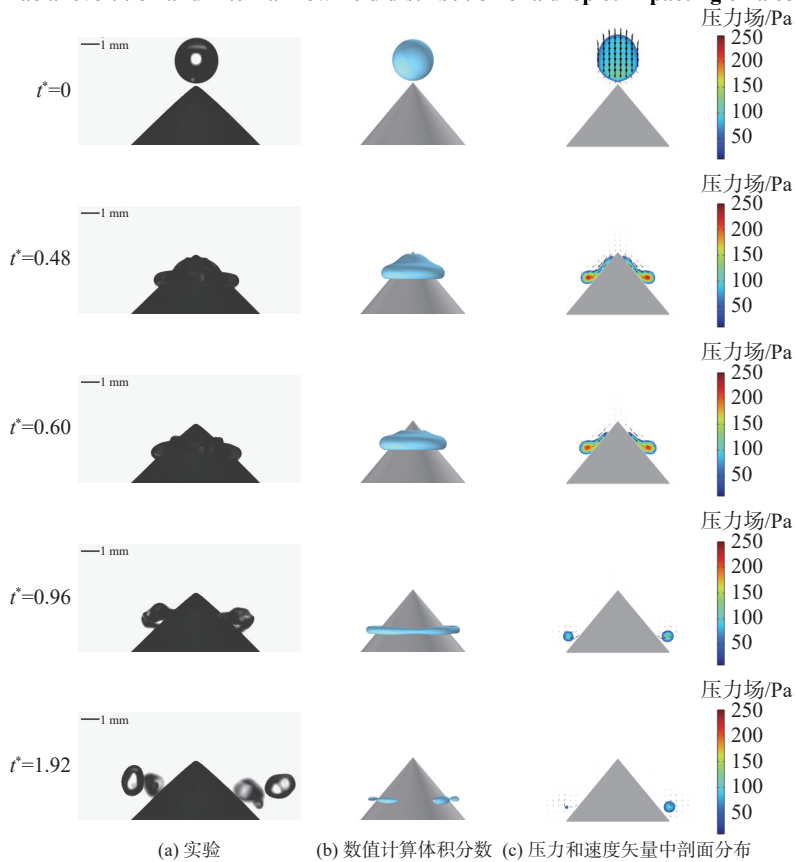


图 15 模态④：液滴撞击圆锥的界面演化和内部流场分布 ($We=31.24$, $2\alpha=80^\circ$)

Fig.15 Mode ④: interfacial evolution and internal flow field distribution of a droplet impacting on a cone ($We=31.24$, $2\alpha=80^\circ$)

强烈的扰动波，而液环内的速度沿径向朝外继续膨胀。在 $t^*=1.92$ 时，在径向惯性力拉伸下，液环更细。由于液环膨胀时，膨胀拉伸导致几何非线性效应占主导，从而导致液环因局部颈缩而发生断裂。

3 结 论

本文采用实验和数值计算的方法研究了液滴撞击超疏水圆锥体的形态演化。结果表明，随着 We 的增大，液滴在圆锥体表面的形态演化先后经历 4 种模态。模态①：液滴没有被锥体刺穿，随后从锥面反弹；模态②：液滴被锥体刺穿形成环状结构，最后环状结构在锥尖重新聚集并离开；模态③：液滴被锥体刺穿，在以环状结构收缩和上升的过程中发生破碎；模态④：液滴被刺穿形成环状结构，在铺展的过程中直接发生破碎。基于 We 和 α 的不同，建立了液滴撞击锥体的模态分区图。随着 α 的增大，不同模态间的临界 We 在不断增大。 We 和 α 对最大 β 的影响截然不同： We 促进液滴铺展，而 α 会抑制液滴铺展。由于液滴被刺破时会产生扰动界面不稳定性，从而导致液滴发生破碎。本研究总结了液滴撞击圆锥体时表现出的 4 种模态以及模态间切换机制，可为相关工程应用提供参考。

参考文献：

- [1] JOSSERAND C, THORODDSEN S T. Drop impact on a solid surface[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2016, 48: 365–391.
- [2] LIANG G T, MUDAWAR I. Review of drop impact on heated walls[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 103–126.
- [3] YU X J, ZHANG Y, HU R, et al. Water droplet bouncing dynamics[J]. *Nano Energy*, 2021, 81: 105647.
- [4] ZHANG L, SONG M J, SHEN J, et al. Impacts of initial cooling rate on local frosting characteristics of horizontal cold plate surface with edge effect considered[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, 143: 106654.
- [5] ZHANG X, LIU X, WU X M, et al. Impacting-freezing dynamics of a supercooled water droplet on a cold surface: rebound and adhesion[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 158: 119997.
- [6] GARCÍA-GEIJO P, QUINTERO E S, RIBOUX G, et al.

- Spreading and splashing of drops impacting rough substrates[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 917: A50.
- [7] LATKA A, BOELEN S A M P, NAGEL S R, et al. Drop splashing is independent of substrate wetting[J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30(2): 022105.
- [8] 李逢超, 付宇, 李超, 等. 铝液滴撞击曲面的流动特性分析[J]. *物理学报*, 2022, 71(18): 184701.
- [9] DENG Q Y, WANG H, XIE Z T, et al. Behaviors of the water droplet impacting on subcooled superhydrophobic surfaces in the electrostatic field[J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 266: 118282.
- [10] HU Z F, CHU F Q, WU X M, et al. Bidirectional transport of split droplets[J]. *Physical Review Applied*, 2022, 18(4): 044057.
- [11] GUO L, CHEN Y L, CAI N N, et al. Dynamic behaviors of fuel droplets impacting on the wall surfaces with different wettability and temperatures[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 212: 118536.
- [12] CAI Y K, LUO X C, TIAN Y K, et al. Dynamic behaviours of water droplets impacting on laser ablated surfaces[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 580: 123743.
- [13] WANG L P, KONG W L, WANG F X, et al. Effect of nucleation time on freezing morphology and type of a water droplet impacting onto cold substrate[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 130: 831–842.
- [14] WISDOM K M, WATSON J A, QU X P, et al. Self-cleaning of superhydrophobic surfaces by self-propelled jumping condensate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States Of America*, 2013, 110(20): 7992–7997.
- [15] HU Z F, CHU F Q, WU X M. Design principle of ridge-textured superhydrophobic surfaces for inducing pancake bouncing[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 136: 106167.
- [16] BAR-COHEN A, ARIK M, OHADI M. Direct liquid cooling of high flux micro and nano electronic components[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2006, 94(8): 1549–1570.
- [17] LUO J, WU S Y, XIAO L, et al. Transient boiling heat transfer mechanism of droplet impacting heated cylinder[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 233: 107675.
- [18] FINOTELLO G, KOOIMAN R F, PADDING J T, et al. The dynamics of milk droplet-droplet collisions[J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(1): 17.
- [19] WILDEMAN S, VISSER C W, SUN C, et al. On the spreading of impacting drops[J]. *Journal of Fluid*

- Mechanics*, 2016, 805: 636–655.
- [20] AKIN S, WU P Y, TSAI J T, et al. A study on droplets dispersion and deposition characteristics under supersonic spray flow for nanomaterial coating applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 426: 127788.
- [21] PASANDIDEH-FARD M, QIAO Y M, CHANDRA S, et al. Capillary effects during droplet impact on a solid surface[J]. *Physics of Fluids*, 1996, 8(3): 650–659.
- [22] RAMÍREZ-SOTO O, SANJAY V, LOHSE D, et al. Lifting a sessile oil drop from a superamphiphobic surface with an impacting one[J]. *Science Advances*, 2020, 6(34): eaba4330.
- [23] SIRRINGHAUS H, KAWASE T, FRIEND R H, et al. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits[J]. *Science*, 2000, 290(5499): 2123–2126.
- [24] DONG Q X, LIU C, WANG X D, et al. Experimental study on the dynamic characteristics of biodiesel/ethanol droplets impacting upon the inclined heated wall[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(6): 062002.
- [25] LEE J B, LAAN N, DE BRUIN K G, et al. Universal rescaling of drop impact on smooth and rough surfaces[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 786: R4.
- [26] MEHRIZI A A, LIN S J, SUN L J, et al. Penetration and ligament formation of viscoelastic droplets impacting on the superhydrophobic mesh[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 11920.
- [27] DALGAMONI H N, YONG X. Numerical and theoretical modeling of droplet impact on spherical surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(5): 052112.
- [28] XIA L, YU H X, CHEN F Z, et al. Pillar height regulated droplet impact dynamics on pillared superhydrophobic surfaces[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 276: 109386.
- [29] ZHANG H X, ZHANG X W, YI X, et al. How surface roughness promotes or suppresses drop splash[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(2): 022111.
- [30] JUNG H J, YUN S. Splitting behavior of Janus drop impact on protrusion structure[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(6): 062105.
- [31] JIANG X F, XU E L, WU G G, et al. Drop impact on superhydrophobic surface with protrusions[J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 212: 115351.
- [32] JIANG X F, ZHOU Y, XU E L, et al. Dynamical behaviors of water drop impact on superhydrophobic surfaces with the macro-textured cavity[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 657: 130583.
- [33] LIU C B, LIU Q, LIN Z H. Dynamical behavior of droplets transiently impacting on superhydrophobic microstructures[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(10): 103304.
- [34] AGARWAL R, MOHAMAD A. Liquid metal droplets impacting superhydrophobic surface in a viscous (non-oxidizing) environment[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(8): 087144.
- [35] CHY H I, BISWAS R, KADER F, et al. Design optimization of anti-splashing targets and simulation of droplet impact on it[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(1): 013323.
- [36] HUANG C, QIAN L J, LV L, et al. Effect of the grooved structure on dynamic behavior of droplets impinging on the cylindrical superhydrophobic surface[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 144: 110867.
- [37] LIU X, MIN J C, ZHANG X. Dynamic behavior and maximum spreading of droplets impacting concave spheres[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(9): 092109.
- [38] LIU X, ZHANG X, MIN J C. Maximum spreading of droplets impacting spherical surfaces[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(9): 092102.
- [39] MOHAMMAD KARIM A. Physics of droplet impact on various substrates and its current advancements in interfacial science: a review[J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(3): 030701.
- [40] ZHANG X, LI K L, LIU X, et al. Maximum spreading of an impact droplet on a conical tip[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(6): 062110.
- [41] SHEN Y Z, LIU S Y, ZHU C L, et al. Bouncing dynamics of impact droplets on the convex superhydrophobic surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(22): 221601.
- [42] VOINOV O V. Hydrodynamics of wetting[J]. *Fluid Dynamics*, 1976, 11(5): 714–721.

(编辑: 何代华)