

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.281

引用格式: 李珂, 王积硕, 袁卫锋. 超疏水表面上液滴碰撞的分融判据[J]. 重庆大学学报, 2025, 48(12): 49-59.



# 超疏水表面上液滴碰撞的分融判据

李 珂, 王积硕, 袁卫锋

(西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室, 绵阳 621010)

**摘要:** 探究液滴速度对二元同尺寸液滴在超疏水表面上正面碰撞的行为变化, 以纯水滴为研究对象, 用高速摄影机观察液滴的碰撞过程, 并建立碰撞后融合或弹开临界条件的理论模型, 能够预测液滴碰撞后融合与弹开的临界速度。研究结果表明, 随着液滴速度的提高, 液滴碰撞后合并的可能性增大; 液滴尺寸越大, 液滴碰撞后融合或弹开的临界速度越低; 液滴碰撞变形过程中内部压强增大超过表面张力承受极限, 液滴就会发生融合。所建立的理论方法与实验结果吻合的较好。提出的理论模型可用于预测液滴在一定速度下的行为变化, 达到控制液滴碰撞行为的目的, 可应用于液滴操控、液滴传感、微反应器等领域。

**关键词:** 液滴碰撞; 超疏水; 临界条件

中图分类号: O313.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)12-049-11

## Coalescence or bounce criterion for droplet collision on a superhydrophobic surface

LI Ke, WANG Jishuo, YUAN Weifeng

(Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, P. R. China)

**Abstract:** This study investigates the influence of droplet velocity on the collision behavior of equal-sized binary water droplets impacting head-on on a superhydrophobic surface. Using a high-speed camera, the dynamic process of droplet collision process was recorded, and a theoretical model was developed to describe the critical conditions governing post-collision coalescence or bouncing. The model accurately predicts the critical velocity that determines whether droplets coalesce or rebound after collision. Experimental results show that as droplet velocity increases, the probability of coalescence also increases, while larger droplet diameters correspond to lower critical velocities for the coalescence-bouncing transition. During the deformation stage of collision, internal pressure within the droplets may exceed the surface tension threshold, resulting in coalescence. The proposed theoretical model demonstrates strong agreement with experimental observations and can effectively predict droplet behavior at various velocities. This provides a theoretical basis for controlling droplet collision dynamics,

收稿日期: 2024-07-01 网络出版日期: 2024-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12072300)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (12072300).

作者简介: 李珂(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事液滴碰撞动力学方向的研究, (E-mail)992806990@qq.com。

通信作者: 袁卫锋(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事小能量采集、复合材料、计算力学和集群算法等方向的研究, (E-mail)yuanweifeng@swust.edu.cn。

with potential applications in droplet manipulation, sensing, and microreactor technologies.

**Keywords:** droplet collision; superhydrophobic; critical condition

液滴碰撞行为是日常生活和工业生产中的常见现象,在液滴动力学和表面科学领域引起了诸多学者的关注。厘清液滴的碰撞机理,改变液滴的碰撞行为,对液滴碰撞动力学研究<sup>[1-2]</sup>、生物技术<sup>[3]</sup>、工业应用<sup>[4-5]</sup>具有极其重要的作用。

目前,许多学者从液滴的尺寸比、碰撞参数和韦伯数等角度,使用理论分析<sup>[6-8]</sup>、数值模拟<sup>[9-10]</sup>和实验方法<sup>[11-14]</sup>研究了液滴碰撞行为。Amani等<sup>[9]</sup>通过自由移动液滴碰撞现象的数值模拟,提出了5种不同的碰撞结果,并研究了液滴碰撞过程中的能量分配。Al-Dirawi等<sup>[6]</sup>研究了同等尺寸、黏度不同的液滴碰撞行为的演变,并提出了预测不同黏度液滴碰撞状态边界的理论模型。Pan等<sup>[8]</sup>使用数值模拟的方法研究了2个相同液滴的碰撞动力学,提出了软碰撞和硬碰撞的概念,并分析了范德华力对液滴合并的影响。Pal等<sup>[7]</sup>使用数值模拟分析了处于蒸发状态的2个液滴之间的正面碰撞,并建立了1个能够预测液体气态相变的蒸发模型。Fang等<sup>[10]</sup>结合实验、理论和模拟方法,揭示了冲击液滴与悬臂梁之间的相互作用,还建立了能够准确预测液滴撞击悬臂梁后运动轨迹的理论模型,为利用悬臂梁控制液滴运动开辟了新方法。Okumura等<sup>[15]</sup>提出了“液体弹簧”的概念,建立了预测液滴撞击超疏水表面时最大变形与接触时间的理论模型。Islamov等<sup>[16]</sup>报告了液滴与颗粒撞击后的状态:团聚与拉伸分离,并构建了2种碰撞状态(团聚和拉伸分离)的图,显示了在韦伯数与无量纲冲击参数对液滴碰撞后不同状态的统计。Xu等<sup>[11]</sup>通过对单个液滴撞击水面的实验数据进行分析,并从能量的角度,计算冲击过程中腔体的能量转换,并建立撞击腔体的能量模型。Wang等<sup>[12]</sup>报道了液滴与固体基体的碰撞实验和理论研究,提出了正面碰撞的4种不同反应:完全反弹、合并、部分反弹黏连和聚并黏连,对于完全反弹的现象引入了赫兹接触理论的概念。

研究液滴碰撞的重要性在日常生活和工业生产中日益凸显。仿生学的兴起进一步推动超疏水表面的发展,研究液滴在超疏水表面上的碰撞行为有助于加深对液滴在更多复杂表面上的运动模式和相互作用机制的理解。微流控技术能够精确操控液滴,实现液滴的合并、分裂和混合等复杂流体操作。Zhang等<sup>[17]</sup>通过实验研究了聚乙二醇-甘油溶液的弹性对微流控T型结构的影响,结果表明,相较于液滴尺寸,液滴的弹性对液滴形成有更显著的影响。Yi等<sup>[13]</sup>从温度层面考虑,通过改变液滴的温度分析二元液滴碰撞过程。液滴温度对双液滴在超疏水表面碰撞后的聚并起关键作用。随着液滴温度的升高,两液滴碰撞后更倾向于合并。Nilsson等<sup>[18]</sup>研究了接触角滞后对液滴聚结和混合的影响,确定了关于韦伯数和撞击角度的3种不同聚结机制。Mertaniemi等<sup>[14]</sup>通过实验方法,展示了在超疏水表面上碰撞后的不同状态分布,并利用液滴碰撞后的反弹特性建立了液体逻辑门。Menchaca-Rocha等<sup>[19]</sup>通过实验和数值模拟方法观察到,在表面张力的驱动下,2个低动能的汞滴合并过程,并阐明了毛细波在液滴合并形态演变中的重要性。

先前许多关于二元液滴相互作用的研究仅依赖实验和模拟的方法,尚未有可靠理论对液滴碰撞后弹开或分离的临界条件进行梳理,且未有研究对液滴碰撞过程中每一瞬时的速度及位移变化进行描述。据此,利用高速摄影机观察不同尺寸液滴的碰撞行为,分析液滴碰撞过程中速度与位移的变化关系,基于赫兹接触理论,建立了液滴碰撞后融合与分离临界条件的理论模型。通过调整液滴尺寸和碰撞前的相对速度,达到控制液滴碰撞行为的目的。

## 1 理论模型

将液滴看作1个由弹性薄膜围成的内部充满液体的球体,把液滴的表面张力等同于弹性薄膜内的张紧力,如图1所示。

液滴未发生碰撞时,考虑内外压强与弹性膜张力作用下的力平衡条件,可得

$$2\pi R_0 \gamma + \pi R_0^2 p_a = \pi R_0^2 p_0, \quad (1)$$

式中: $R_0$ 为液滴的半径; $\gamma$ 为弹性薄膜内张力,即液滴的表面张力; $p_0$ 为液滴内的静压; $p_a$ 为大气压强。

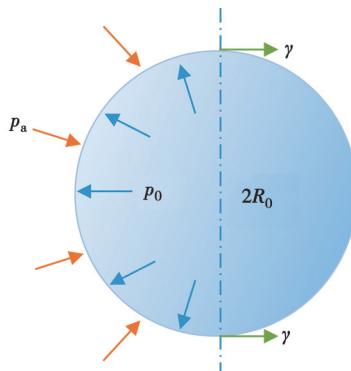


图 1 液滴力平衡示意图

Fig. 1 Schematic diagram of droplet force balance

液滴在碰撞过程中,会存在因内部液体流动导致的“弹性薄膜”内外压差的改变。由于碰撞,“弹性薄膜”内的液体前行速度降低,从而沿着液滴接触面径向运动。如图 2 所示,通过动力学力平衡条件可知,

$$2\pi R_t \gamma_t + \pi R_t^2 p_a = \frac{m}{2} a_t + \pi R_t^2 p_t, \quad (2)$$

式中:  $R_t$  为液滴碰撞过程中液滴半径;  $\gamma_t$  为液滴在  $t$  时刻的表面张力;  $m$  为液滴的质量;  $a_t$  为  $t$  时刻“弹性薄膜”内液体的垂直于碰撞方向的等效加速度;  $p_t$  为液滴内部  $t$  时刻的压力。

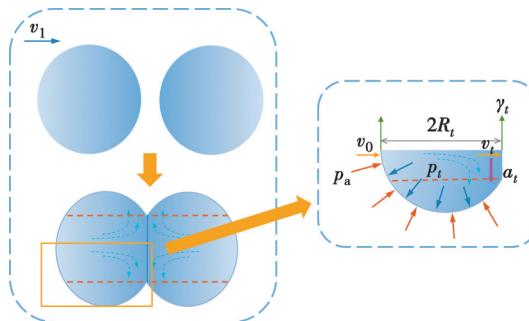


图 2 液滴碰撞过程中力平衡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of force balance during droplet collision

由伯努利方程可知,液滴在碰撞过程中动能、势能和压力势能之和始终是常值,故可通过式(3)估算“弹性薄膜”内部的压力。

$$\frac{1}{2} \rho v_0^2 + p_0 + \rho g h_0 = \frac{1}{2} \rho v_t^2 + p_t + \rho g h_t, \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为液滴的密度;  $v_0$  为液滴的初始速度;  $p_0$  为液滴的静压;  $v_t$  为液滴在  $t$  时刻的运动速度;  $p_t$  为液滴在  $t$  时刻的静压;  $g$  为重力加速度;  $h_0$  和  $h_t$  分别为液滴内部运动液体碰撞前和碰撞中的高度。

由式(1)~(3)可知:

$$\gamma_t = \frac{1}{4} \rho R_t (v_0^2 - v_t^2) + \frac{1}{2} \rho g R_t (h_0 - h_t) + \frac{\gamma R_t}{R_0} + \frac{m a_t}{4 \pi R_t}. \quad (4)$$

如图 3 所示,根据几何关系,液滴在碰撞过程中其中心距的变化量  $\alpha$  可以用式(5)表示。另一方面,由于液滴碰撞过程中,接触表面上的局部压力和变形行为与弹性球的接触情况类似,将液滴假设为弹性球体引入固体力学中的赫兹接触理论<sup>[21-23]</sup>,2 个弹性球体中心距的变化量可通过式(6)表示。

$$\alpha = R_1 + R_2 - (x_2 - x_1), \quad (5)$$

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2 P^2 (K_1 + K_2)^2 (R_1 + R_2)}{16 R_1 R_2}}, \quad (6)$$

式中:  $R_1, R_2$  为液滴的半径;  $x_1, x_2$  为液滴 1 与液滴 2 的圆心坐标;  $K_1, K_2$  为液滴 1 与液滴 2 的弹性常数;  $P$  为 2 个弹性球体之间的相互作用力。

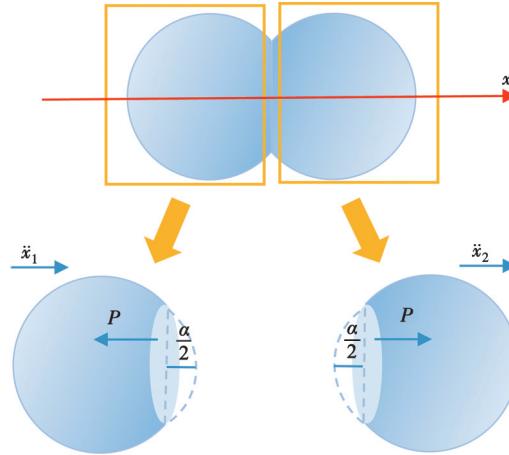


图 3 液滴碰撞变形示意图

Fig.3 Schematic diagram of droplet deformation during collision

忽略重力与摩擦力的作用下, 可建立液滴碰撞的动力学模型为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 - P(x_1, x_2) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + P(x_1, x_2) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $m_1, m_2$  为液滴 1 和液滴 2 的质量;  $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2$  分别为液滴 1 和液滴 2 在  $x$  方向的加速度;  $P(x_1, x_2)$  为两液滴之间的相互作用力。将式(6)中  $\alpha$  和  $P$  的关系代入式(7), 得

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + \frac{4}{3\pi(K_1+K_2)} \frac{[R_1+R_2-(x_2-x_1)]^{\frac{3}{2}}}{(R_1+R_2)^{\frac{1}{2}}} = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 - \frac{4}{3\pi(K_1+K_2)} \frac{[R_1+R_2-(x_2-x_1)]^{\frac{3}{2}}}{(R_1+R_2)^{\frac{1}{2}}} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$K = \frac{(1-v)(1+v)}{E}, \quad (9)$$

$$E = \frac{\lambda\gamma}{R}. \quad (10)$$

式中:  $v$  和  $E$  分别为液滴的等效泊松比和杨氏模量。  $E$  可以用式(10)来表示,  $\lambda$  为修正系数, 取  $\lambda=2$ , Molotski 等<sup>[22]</sup>研究中也做了此类的假设。给定 2 个液滴碰撞前的初速度和坐标位置, 利用动力学方程可以计算液滴在碰撞过程中每个时刻的速度和位移。

根据式(6), 将  $P$  表示为

$$P = \frac{4E}{3\pi(K_1+K_2)} \left( \frac{R_1 R_2 \alpha^3}{R_1 + R_2} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

对动力学方程进行分析, 当  $x_2 - x_1$  最小时,  $\alpha$  最大, 即 2 个液滴之间的距离最近的时刻, 相互作用力  $P$  达到最大值, 在该时刻 2 个液滴的速度相等, 根据动量守恒定律有

$$v_t = v_{t1} = v_{t2} = \frac{1}{2} v_0. \quad (12)$$

将式(12)中液滴最大变形时的速度代入式(4), 得

$$\gamma_t = \frac{3}{16} \rho R_t v_0^2 + \frac{1}{2} \rho g R_t (h_0 - h_t) + \frac{\gamma R_t}{R_0} + \frac{m a_t}{4\pi R_t}. \quad (13)$$

液滴碰撞过程中其内部液体高度不变, 即  $h_0=h$ 。当忽略液体横向加速度时, 式(13)简化为

$$\gamma_t \approx \frac{3}{16} \rho R_t v_0^2 + \frac{\gamma R_t}{R_0}。 \quad (14)$$

假设液滴表面“弹性薄膜”内的张力达到阈值, 即  $\gamma_t \geq \lambda \gamma$  时, “薄膜”破裂导致液滴融合, 则可得到液滴融合的判据, 为

$$\frac{3}{16} \frac{\rho R_t v_0^2}{\gamma} + \frac{\gamma R_t}{R_0} \geq \lambda \gamma。 \quad (15)$$

当  $R_t \approx R_0$  时,

$$\frac{\rho R_t v_0^2}{\gamma} \geq \frac{16(\lambda-1)}{3}。 \quad (16)$$

可以看出, 式(16)左侧是无量纲韦伯数。因此, 通过定性推导, 给出了采用韦伯数定义的液滴碰撞时发生融合的条件。通过试验验证式(16)的合理性, 并确定  $\lambda$  的具体数值, 以期实现对液滴碰撞行为的精确预测, 为后续的研究和应用提供可靠的理论基础。

## 2 实验准备

### 2.1 超疏水结构的制备

平面上的液滴碰撞有助于控制其运动路径。超疏水表面具有极低的黏附力, 能够减少摩擦力对液滴运动的干扰, 使液滴以球形形态在平面上运动。因此, 采用 3D 打印与化学修饰相结合的方法制备了具有超疏水性能的基底结构。

步骤 1: 将刚性光敏树脂和 CNT 以 1 000:1 的质量比混合, 利用行星搅拌仪搅拌 2 min, 除泡 1 min, 使其均匀混合制成复合光敏树脂。使用复合光敏树脂进行 3D 打印, 打印成轨道为上窄下宽的“滑梯”结构。

步骤 2: 如图 4 所示, 将 CNT、丙酮、聚二甲基硅氧烷(PDMS)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)固化剂以 1:110:0.5:0.1 的质量比混合, 再置于超声分散仪中分散。将搅拌子放入混合液中, 置于磁力搅拌器上, 以 450 r/min 的转速搅拌。用支架固定“滑梯”状结构, 使其完全浸入混合溶液中, 搅拌 2 min, 对其进行化学改性。搅拌结束后置于通风处, 使用机械工具提高结构表面液体的蒸发速度。

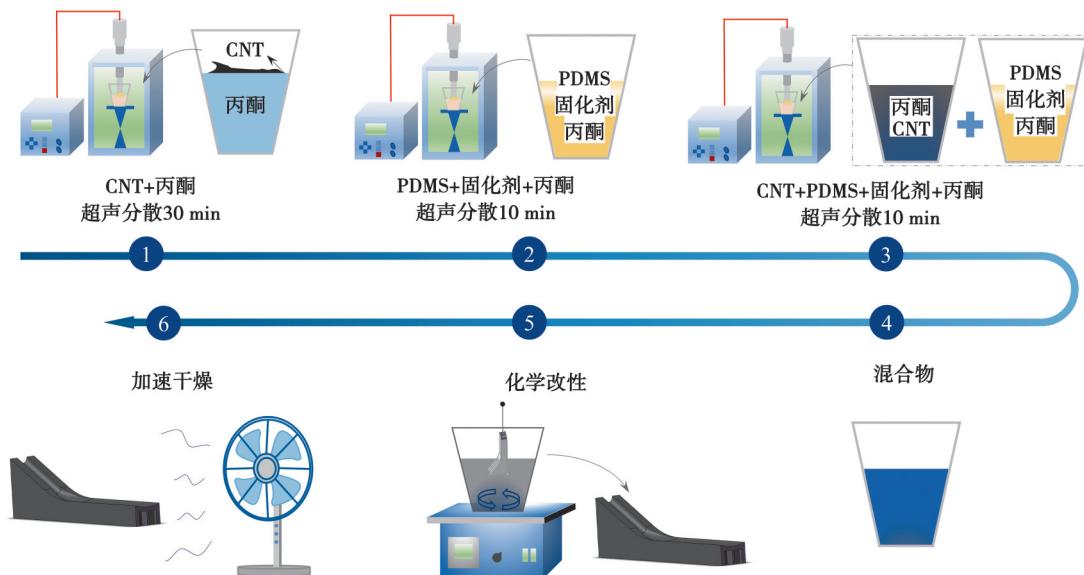


图 4 超疏水表面制备流程图<sup>[24]</sup>

Fig. 4 Flowchart of the fabrication process for the superhydrophobic surface<sup>[24]</sup>

### 2.2 实验平台的搭建

设计了一种能够控制液滴在超疏水表面上碰撞速度的实验平台, 通过调节注射器的高度初步控制液滴

的初速度,将液滴生成在具有超疏水性能的基底结构上,利用光电管可使光信号转换成电信号的原理,实现液滴速度的精确测量。

实验在室温20℃下进行,使用了3种不同直径的针头分别生成直径为2.45 mm、2.85 mm和3.25 mm的液滴,通过改变针头直径来控制液滴的大小,观察液滴碰撞行为。如图5所示,液滴2被放置在超疏水基板9的固定位置,液滴1由注射器10生成在超疏水基板的斜坡处,使其沿着超疏水基底斜面平稳下滑,尽可能地降低液滴反弹和形变对实验的影响。光电管信号发射装置8与接收装置3对应,若无遮挡接收装置8的LED灯保持常亮,通过转动发生驱动装置1顶端螺母即可驱动滑轨面板上下移动,使其按压注射器10的活塞柄,实现稳定出液。液滴1从超疏水基板9的轨道上滑下,液滴遮挡红光,示波器5就会显示出一个方波,通过统计液滴的直径和示波器中波形变化的时间也就是液滴遮挡光线的时间来计算两液滴碰撞前的初始相对速度。

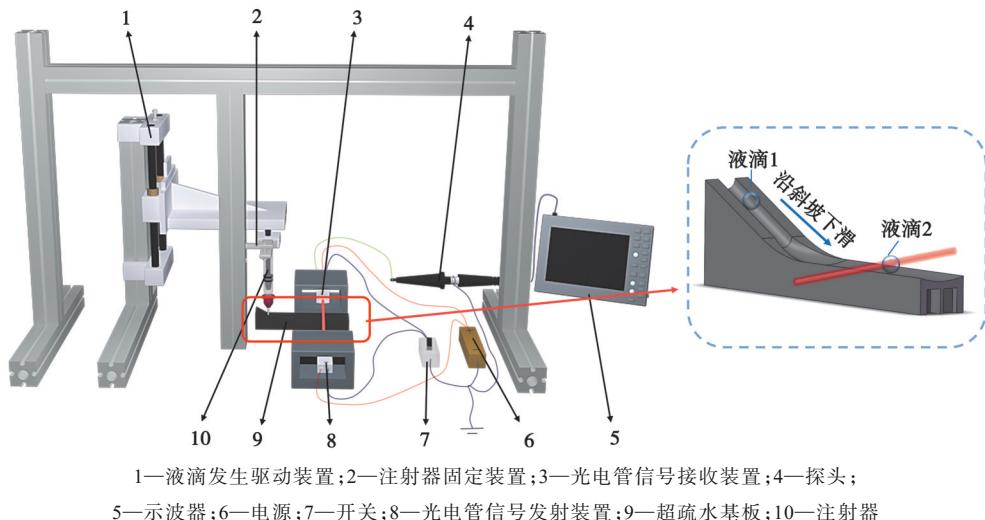


图5 液滴碰撞实验装置图

Fig. 5 Experimental setup for droplet collision

### 3 实验分析

图6展示了直径为2.45 mm的2个液滴以0.25 m/s的相对速度正面碰撞时的变形过程。可以观察到,液滴1以相对稳定的状态与静止的液滴2碰撞。在刚好接触的时刻,2个液滴开始变形,液滴之间产生相互作用力,液滴1推动液滴2前进,液滴2阻碍液滴1向前运动。随着变形的增大,相互作用力逐渐增大,直到2个液滴的变形达到最大值,液滴之间的相互作用力最大,其相对速度变为0。在运动过程中2个液滴之间受力未达到液滴表面张力承受的极限值,且2个液滴之间仍存在力的作用,因此,有恢复变形的趋势,在液滴恢复变

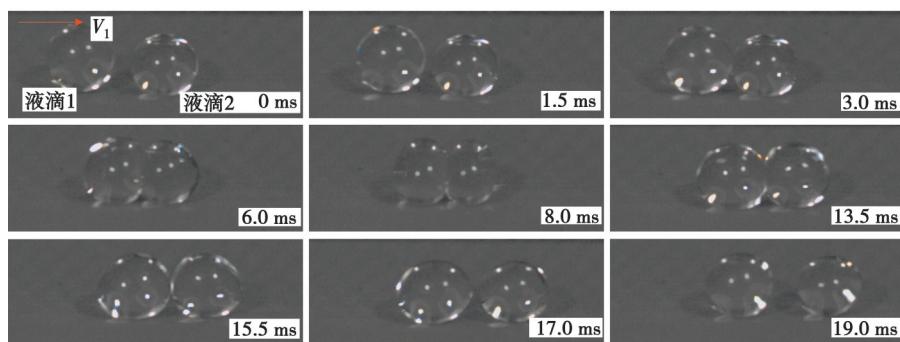


图6 直径为2.45 mm的液滴以0.25 m/s的相对速度碰撞过程图

Fig. 6 Collision process of a droplet with a diameter of 2.45 mm at a relative velocity of 0.25 m/s

形的过程中,液滴 1 的速度小于液滴 2 的速度,2 个液滴逐渐分离,直至恰好分离,液滴之间不再受力,分别以各自的速度运动,碰撞结束。

使用高速摄影机对液滴碰撞过程进行观测,发现液滴在碰撞过程中形变的变化现象,因此,利用模型计算液滴碰撞过程中 2 个液滴之间的受力情况,如图 7 所示。2 个液滴在碰撞接触开始受力逐渐增大,在  $t=14.8 \text{ ms}$  时,2 个液滴之间的压力达到最大,然后逐渐降低,直到 2 个液滴分离。

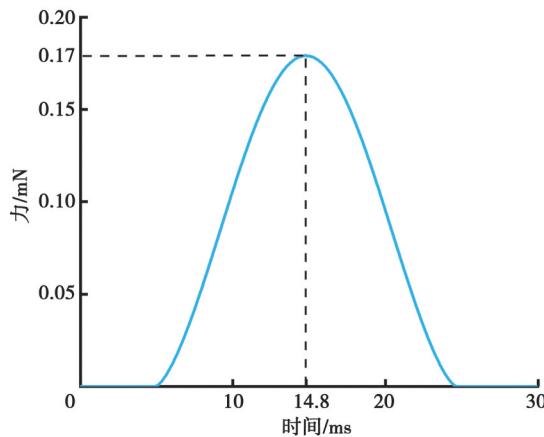


图 7 液滴碰撞过程中 2 个液滴之间的相互作用力

Fig. 7 Interaction forces between two droplets during the collision process

对动力学模型进行求解,可以计算在每一瞬时液滴的速度及运动位移,图 8 和图 9 分别为理论计算直径为 2.45 mm 的液滴 1 以 0.25 m/s 的初速度撞击静止液滴 2 的速度及位移的变化。通过观察可知,2 个液滴在碰撞接触开始时刻,液滴 1 的速度开始降低,液滴 2 的速度增加,直到 2 个液滴之间压力最大的时刻,2 个液滴速度相同,液滴之间存在着力的作用,液滴继续运动,直至液滴分离,液滴碰撞过程结束。该理论模型可以估算液滴的速度及运动位移。

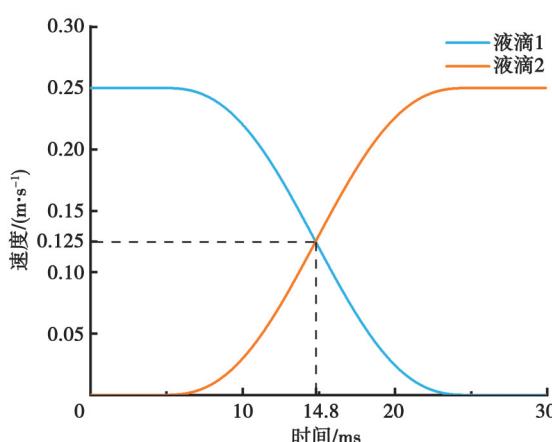


图 8 直径为 2.45 mm 的液滴碰撞过程速度变化

Fig. 8 Velocity variation during the collision process of a droplet with a diameter of 2.45 mm

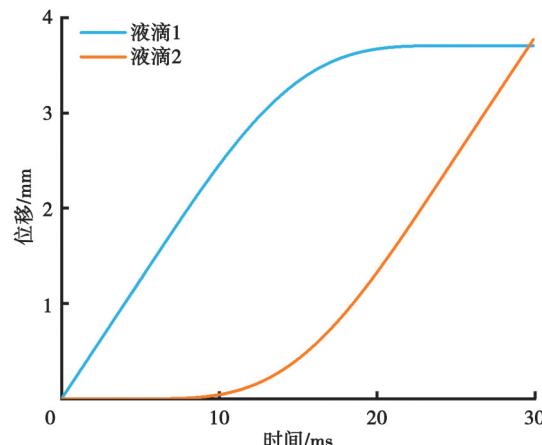


图 9 直径为 2.45 mm 的液滴碰撞过程位移变化

Fig. 9 Displacement variation during the collision process of a droplet with a diameter of 2.45 mm

图 10 和图 11 分别显示直径为 2.85 mm 和 3.25 mm 液滴的碰撞过程,图 10 展示了直径为 2.85 mm 的液滴以 0.2 m/s 的相对速度碰撞时的运动示意图,在该图中观察到与小尺寸液滴碰撞的相同规律:开始接触—接触变形—恢复变形—碰撞结束,图 11 为更大尺寸液滴以更低速度碰撞时的变形过程。通过对不同尺寸液滴碰撞过程的观察分析,均发现了液滴的弹性特性。液滴碰撞过程的基本规律,与理论模型中速度及位移变化

趋势吻合,表明理论模型是合理的,符合弹性碰撞的设想。

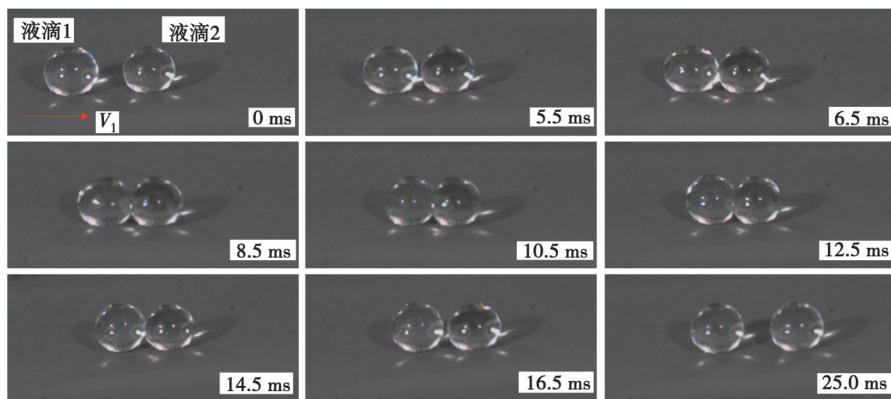


图10 直径为2.85 mm的液滴以0.2 m/s的相对速度碰撞过程图

Fig. 10 Collision process of a droplet with a diameter of 2.85 mm at a relative velocity of 0.2 m/s

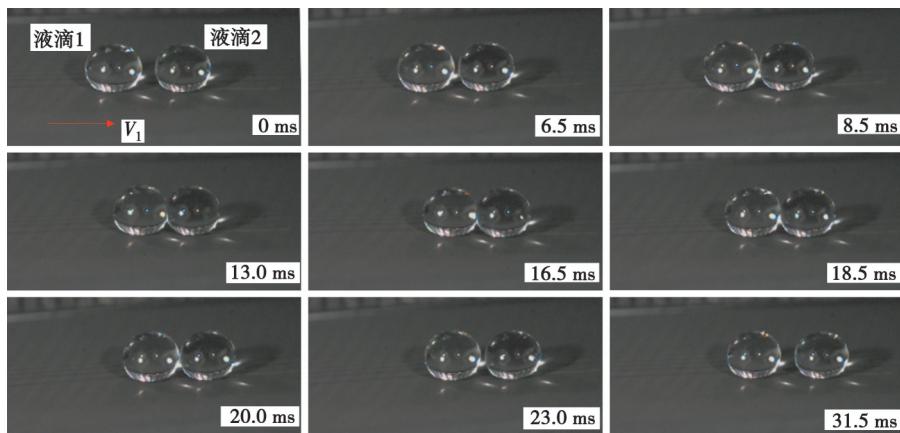


图11 直径为3.25 mm的液滴以0.16 m/s的相对速度碰撞过程图

Fig. 11 Collision process of a droplet with a diameter of 3.25 mm at a relative velocity of 0.16 m/s

图12展示了直径为2.85 mm的液滴以0.32 m/s的相对速度碰撞的融合过程图,液滴1与液滴2接触之前以0.32 m/s的速度匀速运动。在接触的过程中,2个液滴发生了形变,直到形变达到一定程度,液滴的表面张力不足以维持液滴的平衡状态。2个液滴之间的“液膜”破裂,表现为液滴融合的现象。

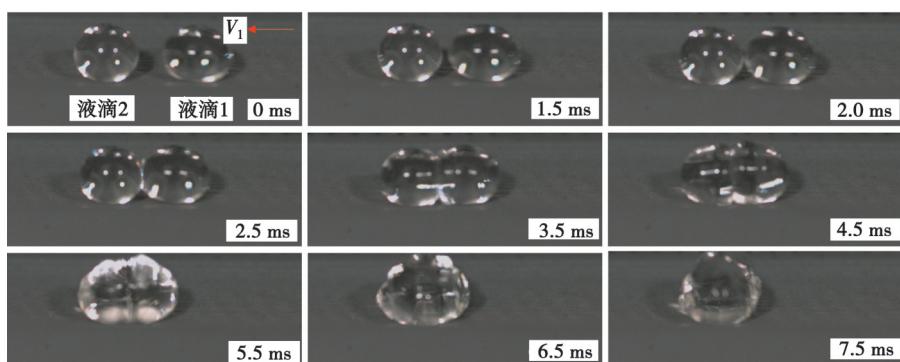


图12 直径为2.85 mm的液滴以0.32 m/s的相对速度碰撞过程图

Fig. 12 Collision process of a droplet with a diameter of 2.85 mm at a relative velocity of 0.32 m/s

表面张力是影响液滴碰撞行为的关键因素。为了验证该模型,通过一系列试验进行分析。通过测量不同尺寸液滴的速度,观察液滴以不同相对速度碰撞后弹开与融合的状况,对其进行统计分析。图13是不同

尺寸液滴以一定速度碰撞后状态的统计图。实验现象表明,在相对速度较低的情况下,2个液滴碰撞多数表现为弹开行为,在相对速度较高的情况下碰撞则多数表现为融合行为。但是在速度较低的情况下依旧出现一些融合现象,这是由于液滴下落时状态不稳定,剧烈抖动增加了液滴融合的可能。在速度较高的情况下也会有部分液滴出现弹开的现象,这种现象的出现可能是由于2个液滴并不是正面碰撞,而是存在一定的夹角,也就是液滴1从液滴2旁边擦过,表现出了分离的特征。

对实验数据统计分析,发现液滴以某一范围的相对速度碰撞时,融合与弹开的2种状态均以较高的概率发生。如图13(a)所示,在该尺寸下液滴相对速度为0.31~0.33 m/s时,融合与分离的现象均能频繁出现,该情况在其他速度范围内并不存在。如图13(b)(c)所示,尺寸为2.85 mm和3.25 mm的液滴,都存在一个融合与弹开概率均等的速度带,分别为0.28~0.31 m/s和0.26~0.28 m/s。2个液滴的运动速度不超过临界速度时,接触面处的张力达不到临界值,碰撞后就会分开;若运动速度超过临界速度时,张力超过“液膜”的承受极限,碰撞过程中发生融合。基于碰撞理论与经验可知,某种状态下的液滴碰撞后,液膜破裂的临界条件必然是确定的。实验统计出现的该种现象,通过分析认为是由以下3点原因造成:1)液滴在碰撞过程中存在温度的细微变化;2)液滴在以不易观察到的较小角度进行偏心碰撞,并不是标准的正面碰撞;3)液滴2在滚动过程中状态不稳定,如液滴的下滑形态,等。

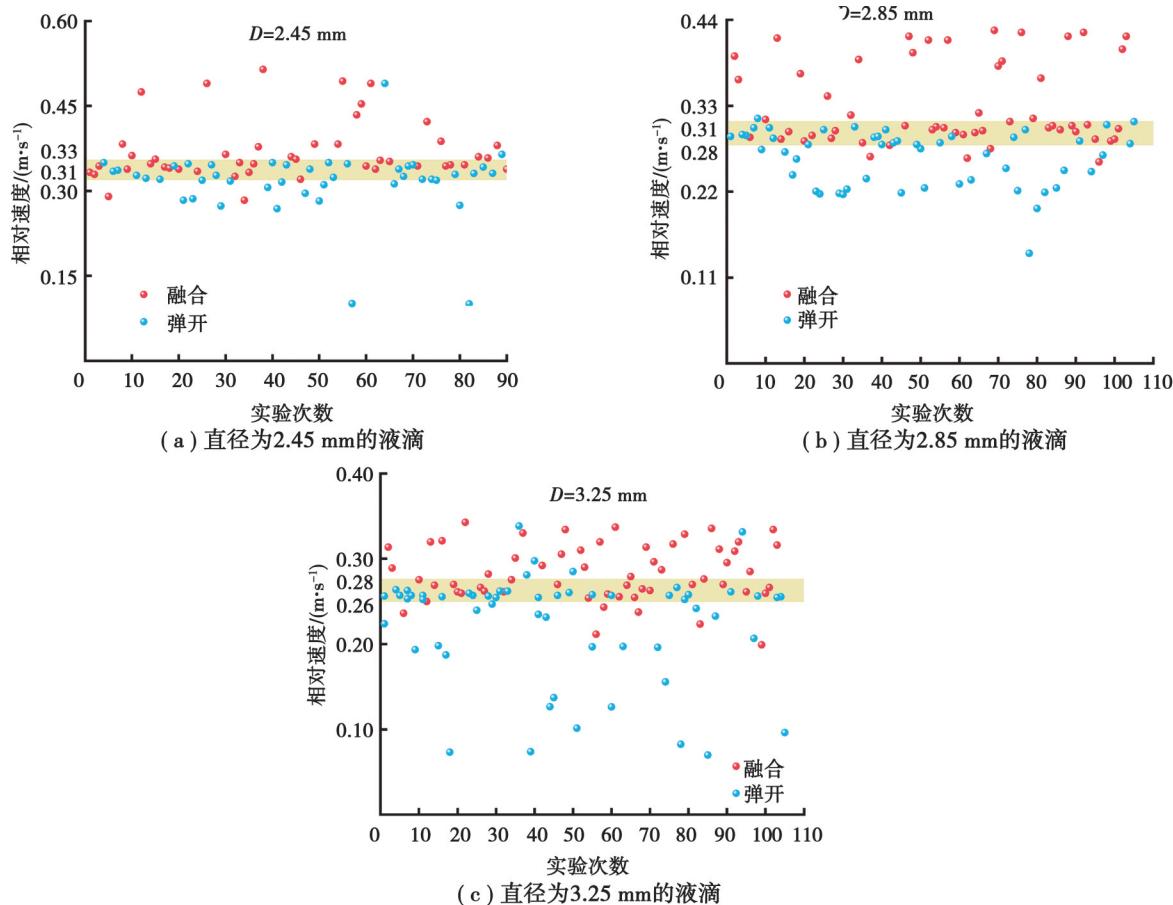


图13 不同尺寸液滴以一定速度碰撞后状态的统计图

Fig. 13 Statistical diagram of the states after collision of droplets with different sizes at a constant velocity

通过比对3种尺寸的液滴碰撞数据统计可知,尺寸越小的液滴,临界速度越高,越易发生弹开现象;尺寸越大的液滴,临界速度越低,越容易融合。

将 $\lambda=1.32$ 代入式(16),当直径 $R_0$ 分别为2.45、2.85、3.25 mm时,计算得出3个尺寸液滴的临界速度分别为0.317、0.293、0.275 m/s。对比图13可知,3个临界速度和实验结果吻合良好。

图14展示了3种不同尺寸液滴碰撞后融合或弹开的实验数据分析。图14中散点的横、纵坐标对应液滴的半径和速度,右侧为液滴速度的对数正态分布图,而图中折线表示理论计算出的临界速度,其上下两侧的阴影区域为临界速度周围 $\pm 0.01$  m/s的误差带。对比实验数据与理论结果可知,式(16)预测的液滴碰撞后状态的准确率大于90%。考虑到液滴直径、碰撞角度和速度的测量均有误差,本研究提出的理论模型的正确性得以验证。

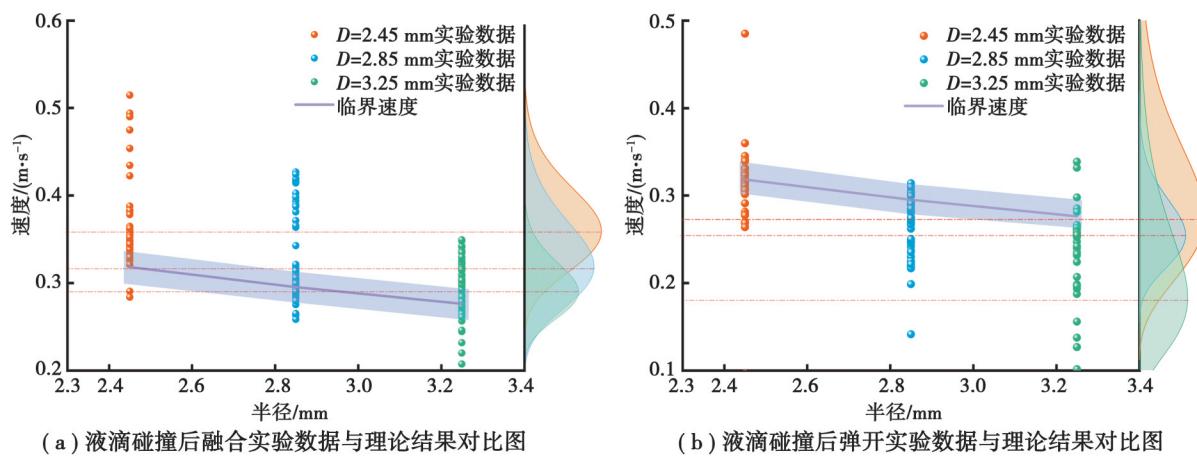


图14 3种不同尺寸液滴碰撞后融合或弹开的实验数据分析

Fig. 14 Experimental data analysis of merging or bouncing of droplets with three different sizes after collision

## 4 结束语

为了能够稳定操控液滴,研究液滴碰撞动力学行为,提出了一种简易的实验平台。将液滴视作弹性球,以纯水滴为研究对象,观察液滴在超疏水表面上的碰撞行为,统计液滴碰撞前的相对速度以及融合情况,分析液滴碰撞后融合与弹开的速度、位移变化。从力的角度,分析液滴碰撞过程中压力的变化,利用赫兹接触理论建立动力学模型,计算液滴碰撞后融合与弹开的临界速度,理论模型计算结果与实验数据较吻合。在本研究中,可以通过该模型预测液滴在碰撞后融合与弹开的2种不同状态,并通过调整液滴尺寸与液滴之间的相对速度来控制液滴弹开与融合的行为,为后续进行微流控、液滴运输和化学反应等提供了保障。

## 参考文献

- [1] Zhang Y R, Jiang X Z, Luo K H. Bounce regime of droplet collisions: a molecular dynamics study[J]. Journal of Computational Science, 2016, 17: 457-462.
- [2] Liu W C, Li N, Sun Z Q, et al. Molecular dynamics study on regimes of head-on droplet collision[J]. Langmuir, 2022, 38(1): 411-421.
- [3] Ghosh A, Zhou H X. Determinants for fusion speed of biomolecular droplets[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59(47): 20837-20840.
- [4] Finotello G, Kooiman R F, Padding J T, et al. The dynamics of milk droplet-droplet collisions[J]. Experiments in Fluids, 2017, 59(1): 17.
- [5] Klimenko A, Shlegel N E, Strizhak P A. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis[J]. Energy, 2023, 283: 128480.
- [6] Al-Dirawi K H, Bayly A E. An experimental study of binary collisions of miscible droplets with non-identical viscosities[J]. Experiments in Fluids, 2020, 61(2): 50.
- [7] Pal A K, Sahu K C, Biswas G. Modeling binary collision of evaporating drops[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 221: 125048.
- [8] Pan K L, Law C K, Zhou B. Experimental and mechanistic description of merging and bouncing in head-on binary droplet collision[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 103(6): 064901.

- [ 9 ] Amani A, Balcázar N, Gutiérrez E, et al. Numerical study of binary droplets collision in the main collision regimes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 370: 477-498.
- [ 10 ] Fang W, Wang S, Duan H, et al. Target slinging of droplets with a flexible cantilever[J]. *Droplet*, 2023, 2(3): e72.
- [ 11 ] Xu W, Yuan D K, Sun H G, et al. Evolution of cavity size and energy conversion due to droplet impact on a water surface[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2023, 62: 261-269.
- [ 12 ] Wang F C, Feng J T, Zhao Y P. The head-on colliding process of binary liquid droplets at low velocity: high-speed photography experiments and modeling[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, 326(1): 196-200.
- [ 13 ] Yi N, Huang B, Dong L N, et al. Temperature-induced coalescence of colliding binary droplets on superhydrophobic surface[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4303.
- [ 14 ] Mertaniemi H, Forchheimer R, Ikkala O, et al. Rebounding droplet-droplet collisions on superhydrophobic surfaces: from the phenomenon to droplet logic[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(42): 5738-5743.
- [ 15 ] Okumura K, Chevy F, Richard D, et al. Water spring: a model for bouncing drops[J]. *Europhysics Letters (EPL)*, 2003, 62(2): 237-243.
- [ 16 ] Islamova A G, Kerimbekova S A, Shlegel N E, et al. Droplet-droplet, droplet-particle, and droplet-substrate collision behavior [J]. *Powder Technology*, 2022, 403: 117371.
- [ 17 ] Zhang J T, Liu H R, Ding H. Head-on collision of two immiscible droplets of different components[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(8): 082106.
- [ 18 ] Nilsson M A, Rothstein J P. The effect of contact angle hysteresis on droplet coalescence and mixing[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 363(2): 646-654.
- [ 19 ] Menchaca-Rocha A, Martínez-Dávalos A, Núñez R, et al. Coalescence of liquid drops by surface tension[J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2001, 63: 046309.
- [ 20 ] Fischer-Cripps A C. The hertzian contact surface[J]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34(1): 129-137.
- [ 21 ] Richard D, Clanet C, Quéré D. Contact time of a bouncing drop[J]. *Nature*, 2002, 417(6891): 811.
- [ 22 ] Molotskii M, Torchinsky I, Rosenman G. Hertz model for contact of water droplet with superhydrophobic surface[J]. *Physics Letters A*, 2009, 373(8/9): 804-806.
- [ 23 ] Clanet C, Béguin C, Richard D, et al. Maximal deformation of an impacting drop[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 517: 199-208.
- [ 24 ] 向露, 黄楷焱, 宁慧铭, 等. 多尺度仿生超疏水结构的制备与性能表征[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(7): 21-31.  
Xiang L, Huang K Y, Ning H M, et al. Fabrication and performance characterization of the multiscaled bionic superhydrophobic structure[J]. *Journal of Chongqing University*, 2024, 47(7): 21-31. (in Chinese)

(编辑 郑 洁)