

液体弹珠碰撞固着液滴的影响因素及动力学分析*

杨建志¹⁾ 何永清²⁾ 焦凤^{1)†} 王进³⁾

1) (昆明理工大学化学工程学院, 昆明 650500)

2) (重庆工商大学, 微纳系统与智能传感重庆市重点实验室, 重庆 400067)

3) (河北工业大学能源与环境工程学院, 天津 300130)

(2023 年 5 月 20 日收到; 2023 年 6 月 7 日收到修改稿)

液体弹珠具有不润湿/不黏附, 以及与外界进行选择物质交换等特性, 可以作为微量液滴载体, 广泛运用于微流控、化学/生物微反应器等新兴领域. 碰撞可作为弹珠进行物质传递的一种操控方法, 区别于液滴-液滴或弹珠-弹珠的碰撞, 弹珠与液滴的碰撞行为更为丰富与复杂, 对其的研究可为以弹珠为媒介的物质的有效传递奠定理论基础. 本文利用高速摄像机拍摄技术, 捕捉了液体弹珠与固着液滴碰撞过程, 探究了不同奥内佐格数 (Oh) 以及壁面亲/疏水性 (接触角: θ 为 35.4° — 124.5°) 下弹珠与液滴之间的碰撞过程. 结果表明: 在亲水壁面时, 以翻越的形式与液滴结束碰撞; 当改用疏水壁面后, 以回弹行为取代翻越; 当壁面疏水性提高接触角达到 $\theta = 124.5^\circ$ 时, 有效碰撞面积增大, 碰撞后在界面产生的波动使弹珠表面的颗粒迁移, 出现裸露区域, 形成液桥后快速完成聚结-合并 (聚并). 弹珠与固着液滴碰撞后, 会出现三种运动行为即翻越、回弹以及聚并.

关键词: 碰撞, 液体弹珠, 固着液滴, 亲/疏水性**PACS:** 47.57.-s, 47.55.df, 47.55.nk**DOI:** 10.7498/aps.72.20230815

1 引言

微量液滴的碰撞现象广泛存在于自然界和工程应用中, 在涂料喷涂^[1]、喷墨打印^[2]、界面自清洁^[3,4]、生物集水^[5]以及微流控操控^[6]等领域较为常见. 而液体弹珠 (liquid marble) 可以作为转换液滴性质的媒介, 是一种由粉末颗粒包裹液滴制备而成的具有不润湿/不黏附的核壳式结构的特殊液滴^[7], 最早由 Aussillous 和 Quéré^[8] 发现并解释其性质. 液体弹珠可将液滴与固体接触界面的液-固接触转换为固-固接触, 增强了液滴在固体壁面上的可操控性, 被广泛用于生物/化学微反应器、生物传感等领域. 由于液体弹珠性质的特殊性, 它与

液滴之间的碰撞是一个复杂的动力学过程, 对这一碰撞过程的研究, 可以为液滴间物质的运输与传递提供一种策略, 丰富了对碰撞动力学的探究.

液滴碰撞的研究, 最早可追溯到 19 世纪后期, 研究对象是液滴与平板或与固/液表面的碰撞^[9–11]. 近年来的研究指出液滴与固体壁面的碰撞, 受到了液滴表面张力^[12,13]、黏度^[14]、接触界面的疏水特性^[15]、碰撞的角度以及碰撞速度^[16]等因素的影响. 此外, 液滴的碰撞过程还受到温度、湿度等外部因素的影响. Mukherjee 和 Abraham^[17] 与 Jin 等^[18] 采用多相晶格-玻尔兹曼模型模拟液滴撞击固体表面的过程, 对液滴在撞击过程中的铺展、反弹以及平衡态进行了研究, 发现液滴从沉积到回弹状态的转变, 可以使用韦伯数 (We)、雷诺数 (Re)、奥内佐

* 国家自然科学基金 (批准号: 11962010, 11502102)、重庆市自然科学基金 (批准号: cstc2021jcyj-msxmX0910) 和云南省教育厅科学研究基金 (批准号: 2023J0139) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiaofeng0526@163.com

格数 (Oh) 以及接触角变化来衡量. Zhan 等^[19] 通过实验与理论探究了水滴撞击旋转的超疏水铝盘, 当碰撞界面运动时, 可以有效地减少液滴与界面的接触时间 (液滴与碰撞目标的第一次表面接触到完全脱离所用的时间), 可表示为 $\tau_0 \sim (\rho\Omega_0/\gamma)^{1/2}$ (其中, ρ , Ω_0 和 γ 分别表示液滴的密度, 体积以及气-液表面张力). 与碰撞静止的表面相比, 当表面旋转速度为 1.4 m/s 左右时, 碰撞接触时间可缩短 40% 以上, 从而提供了一种通过使碰撞界面运动的方式实现界面快速拒水的策略. 此外, 界面结构变化也会影响碰撞时的接触时间, Han 等^[20] 设计了鳍状条纹非润湿表面结构, 缩减了碰撞过程中液滴的接触时间, 并指出该方法可用于液滴的定向输送. Zhang 等^[21] 采用实验以及数值模拟的方法研究了水滴撞击超疏水界面, 量化了液滴碰撞过程中冲击力与韦伯数的关系: $\tilde{F}_1 \approx 0.81 + 1.6We^{-1}$, 当然, 碰撞是一个动态变化过程, 需分阶段讨论冲击力 \tilde{F}_1 与韦伯数 We 的量化关系, 可分区为: 毛细管区, 奇异喷流区、惯性区与飞溅区. Han 等^[22] 研究了水滴对超疏水壁面的碰撞过程, 表明碰撞后液滴聚并或是弹跳, 将由碰撞时液滴的韦伯数与液滴之间的偏移距离控制, 并指出随韦伯数的增加, 液滴会相继表现出聚结-弹跳-聚结的变化状态, 通过控制液滴碰撞后的状态, 可以有效地减少液滴的堆积, 从而实现自清洁功能.

与液滴间的碰撞不同, 液体弹珠的碰撞由于附着颗粒之间的毛细作用而形成致密的保护层具有良好的弹性, 并不会像液滴一样可以轻易聚并, 这个过程会受到阻碍. Bormashenko 等^[23] 研究了涂有石蜡与聚四氟乙烯的弹珠的非凝聚碰撞, 表明碰撞时间 $\tau = \pi/\Omega \cong \pi\sqrt{\rho R^3/(Gh)}$ 与弹珠的速度无关, 主要受到体积的影响, 由于弹珠壳层的特殊性, 可以采用线性振荡器模型来考虑弹珠之间的碰撞. Zang 等^[24] 研究了不同疏水性 SiO_2 纳米颗粒制备的弹珠在碰撞或者挤压时的动力学行为, 表明弹珠的力学承受能力取决于气-液界面颗粒层之间的毛细作用力以及疏水颗粒的有效覆盖面积, 当碰撞产生的作用力超过临界值时, 表面颗粒会脱落或重排, 从而实现弹珠间的合并. Draper 等^[25] 通过考虑弹珠的尺寸、涂层、体积、碰撞速度等影响因素, 探究了用去离子水制备的弹珠合并的最佳条件, 并指出碰撞过程中聚结概率较低的原因是由疏水颗粒的存在造成的, 且粒径越小, 越容易聚结, 这也

是与液滴-液滴之间聚结的区别所在. 而弹珠之间的碰撞类似于“桌球”碰撞, 通过控制抛射弹珠, 可以实现对目标弹珠的移动和运动方向的操控^[26], 甚至完成聚结的操作. 而对弹珠与液滴的碰撞行为的研究目前较少, 对这一过程的探究, 可以为理解并控制弹珠作为微反应器与液滴进行能量或物质交换奠定理论基础.

本文旨在研究不同物性参数的液体弹珠与固着液滴之间的碰撞行为, 从几何形态、运动速度以及接触角变化等方面探究并分析了碰撞体的动态过程. 相较于纯液滴或固体与固着液滴的碰撞, 液体弹珠的碰撞行为更加复杂, 实验中使用高速摄像机记录了弹珠与液滴碰撞的整个过程. 结果表明: 界面亲水/疏水性的变换, 改变了液滴在界面上的固着状态, 直接影响了弹珠与固着液滴的有效接触面积, 以及弹珠体积的改变影响了碰撞瞬间携带的动能的大小, 描述了弹珠与液滴因碰撞而产生翻越、回弹以及聚并的现象的原因, 并进行了对应现象的力学分析.

2 实验系统与方法

如图 1 所示, 本实验研究的装置由可升降的水平面和可调节角度的斜面组成, 随斜面角度的改变可以赋予液体弹珠不同的初始动能, 使其以不同的速度碰撞固着液滴 (超纯水). 采用高速摄像机 (Phantom Miro 320 S, 拍摄最高达 1000 f/s) 捕捉物体的运动, 记录弹珠与固着液滴碰撞瞬间的形态变化, 然后通过图像处理软件 ImageJ, 得到运动过程中的动力学参数. 接触角的大小由 ImageJ 软件中的 Contact Angle 插件测量得到, 并与接触角标准片进行比较得到测量误差约为 $\pm 2.5^\circ$. 其中, 不同体积的液滴使用规格为 2—20 μL 和 10—100 μL 的 Eppendorf 移液器进行采样. 实验中使用的液滴弹珠, 通过使用移液器提取对应体积的超纯水 (与固着液滴相同), 滴落在装有聚四氟乙烯 (颗粒粒径为: 25 μm) 的培养皿中的粉末床上滚动约 30 s 后制备而成 (粉末颗粒与液滴占比: $m_{\text{PTFE}}/m_w \in [0.89\%, 1.27\%]$), 其中液滴质量以及弹珠质量采用日本岛津 ATX 124 电子秤多次测量得出, 精度: $\pm 0.1 \text{ mg}$), 然后用药匙转移到斜面上的指定释放位置. 在实验中, 还对比了不同亲/疏水界面 (普通玻璃载玻片, 贴敷特氟龙胶带以及多次使用乙醇-

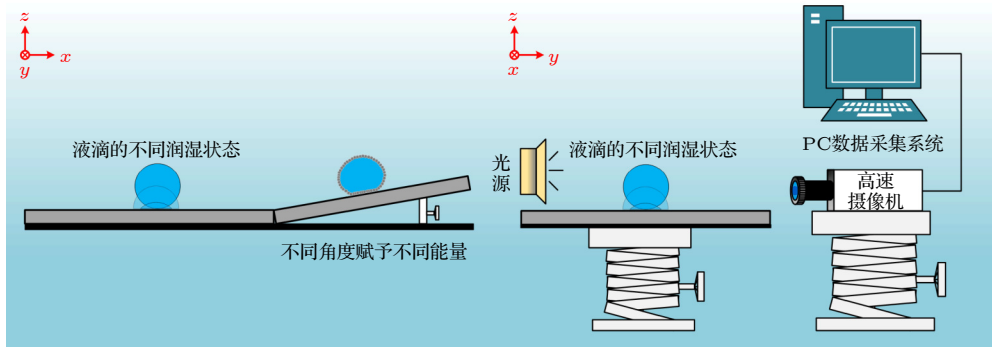


图 1 实验总体装置示意图

Fig. 1. Schematic of the overall experimental setup.

SiO₂ 喷雾烘干覆膜的高疏水界面, 静态接触角测量结果见表 1) 上的碰撞行为, 界面的亲/疏水情况通过测量液滴的接触角的大小进行度量.

表 1 基底材料及对应的静态接触角 θ Table 1. Substrate materials and corresponding static contact angles θ .

基底材料	玻璃界面	特氟龙胶带	乙醇-SiO ₂ 喷雾改性
θ	$35.4^\circ \leq \theta \leq 61.3^\circ$	$\approx 95.2^\circ$	$\approx 124.5^\circ$
特性	亲水	疏水	高疏水

3 结果与分析

如图 2(a) 所示, 界面疏水性质的改变, 不仅影响到了液滴在界面上的固着状态, 在碰撞时因为弹

珠与液滴之间存在狭窄间隙, 基于润滑理论的挤压流动, 在气-液间隙受到挤压时会快速形成空气夹层^[27,28] (如图 2—图 4 中红色虚线圆圈所示), 阻碍弹珠与液滴之间的充分接触, 增大了回弹运动的概率. 在图 2(b) 可以看出, 碰撞产生的波动改变了弹珠界面上疏水颗粒的嵌入程度, 这将影响到颗粒能否脱离颗粒间的相互作用以及液体表面毛细作用的束缚. 在碰撞瞬间, 因弹珠界面受到挤压而形变, 表面附着的颗粒均有朝弹珠两极 (指的是弹珠俯视示意图的上下两端) 移动的趋势, 但由于弹珠具有良好的弹性与机械稳定性^[29], 倘若界面附着的颗粒层未被破坏, 在挤压结束后颗粒层将在毛细力与分子间作用力的驱使下继续包覆弹珠. 当碰撞较为剧烈时, 破坏了表面的颗粒覆盖层, 出现局部裸露

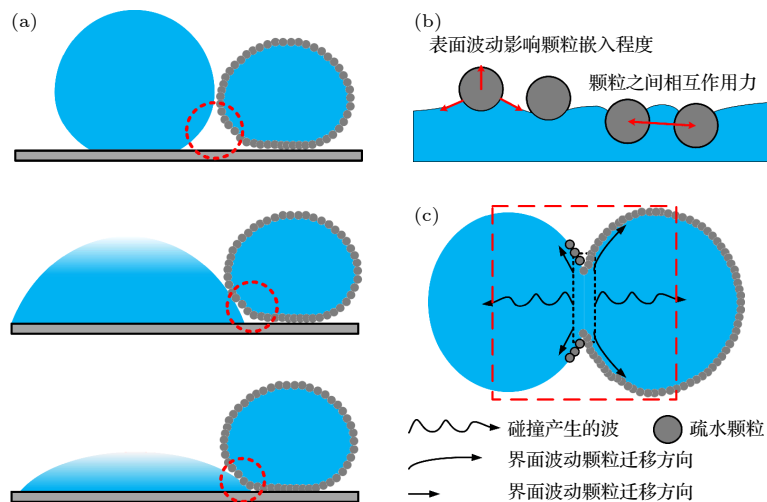


图 2 弹珠与液滴接触界面变化 (a) 界面亲/疏水性影响形成的空气夹层的大小; (b) 弹珠界面波动对颗粒嵌入程度的影响; (c) 弹珠与液滴碰撞接触后波的形以及界面颗粒的迁移

Fig. 2. Schematic representation of interfacial changes in the contact between marbles and liquid droplets: (a) Effect of interfacial hydrophilicity/hydrophobicity on the size of the formed air interlayer; (b) effect of the fluctuation of the marble interface on the degree of particle embedding; (c) formation of waves after collisional contact between the marble and the droplet and the migration of interfacial particles.

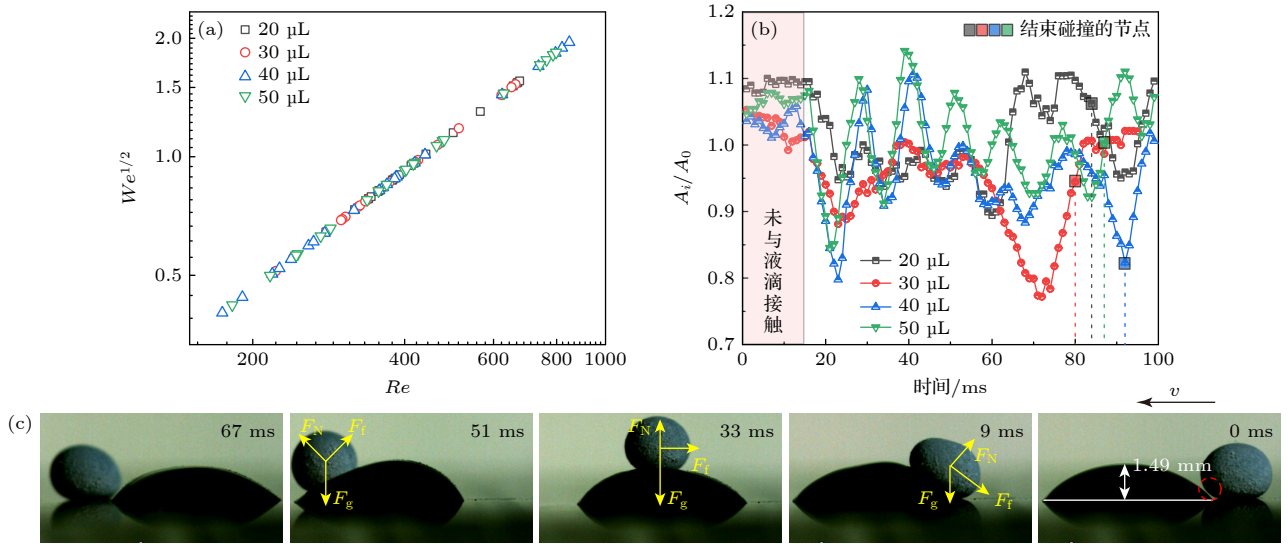


图3 弹珠在翻越液滴的过程中的形态变化(以30 μL 为例) (a) 玻璃基底上弹珠运动过程 Oh 分布; (b) 侧面投影面积变化; (c) 弹珠运动过程中实时拍摄图像

Fig. 3. Morphological changes of marbles during overturning droplets (30 μL for example): (a) Oh distribution during marble motion on glass substrate; (b) change of lateral projection area; (c) real-time image taken during marble motion.

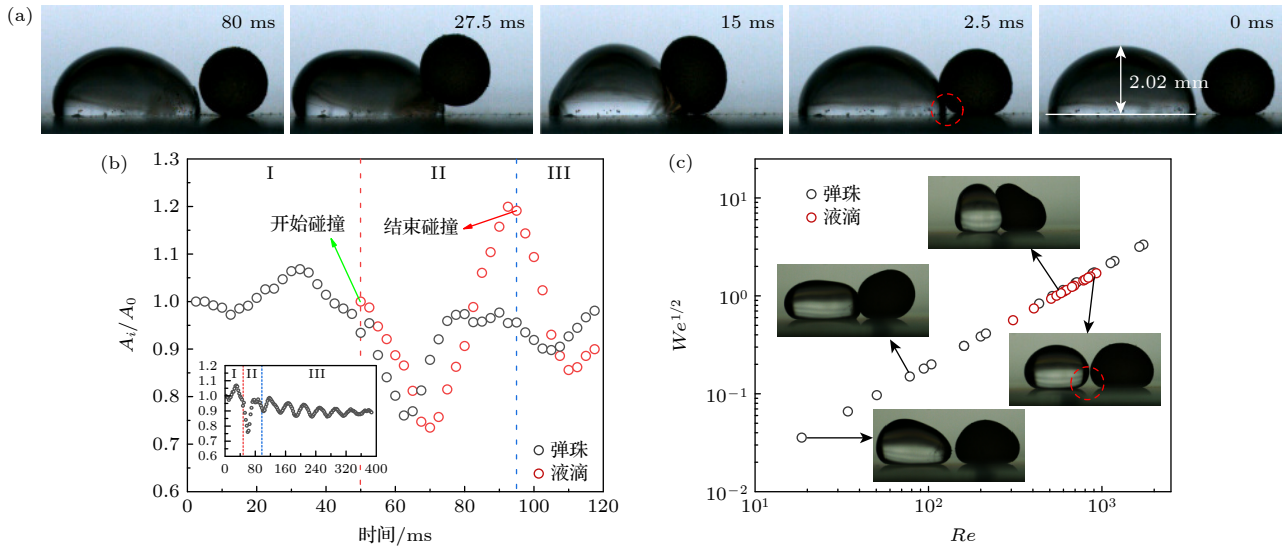


图4 弹珠与液滴碰撞的两种回弹情况 (a) 固着液滴在疏水界面上的回弹碰撞(体积比: 弹珠/液滴为0.164); (b), (c) 固着液滴在高疏水界面上的回弹碰撞(体积比: 弹珠/液滴为0.75), 以及液滴与弹珠在高疏水界面碰撞过程中的变形情况及 Oh 变化曲线

Fig. 4. Two rebound cases of marble-droplet collisions: (a) Rebound collision of a sessile droplet at the hydrophobic interface (Volume ratio: 0.164 for marble/droplet); (b), (c) rebound collision of a sessile droplet at the highly hydrophobic interface (Volume ratio: 0.75 for marble/droplet), as well as deformation of a droplet and marble during the collision with a droplet at a highly hydrophobic interface, and the Oh curve.

区域, 如图2(c)所示, 弹珠裸露区域与液滴的接触后形成的液桥由点到面逐渐扩散, 直至完成聚并. 在这个过程中, 由于碰撞产生的波动分别从碰撞点由液滴内部向未碰撞端传递以及沿弹珠表面边缘向弹珠两极传递, 界面的波动改变了表面颗粒的嵌入程度, 碰撞波推动着颗粒逐渐朝弹珠两极移动. 因波动改变了颗粒嵌入的程度, 无法停留在弹珠表面的颗粒将沿着液桥迁移到固着液滴上. 在实

验中, 碰撞后弹珠的三种状态为: 翻越, 回弹和聚并, 本文用奥内佐格数 ($Oh = \mu/\sqrt{\rho d \gamma} = \sqrt{We}/Re$, μ 为液滴的黏度) 将韦伯数 (We) 与雷诺数 (Re) 衔接作为衡量碰撞的无量纲参数, 描述了碰撞过程中黏性力、表面张力以及惯性力的影响. 此外, 碰撞的结果还受到界面疏水性、碰撞体物性参数的影响. 下文将对这三种碰撞的状态进行详细阐述.

3.1 液体弹珠翻越固着液滴

在玻璃界面上的碰撞可观察到, 固着液滴的静态接触角 $\theta \leq 61.3^\circ$, 如图 2(c) 所示, 0 ms 时刻, 固着液滴与弹珠碰撞的接触面积较小, 并且弹珠的外轮廓与液滴界面契合度较高, 几乎无法形成空气夹层来阻碍弹珠前行, 受到弹珠的挤压后液滴整体朝未接触侧流动, 形成一个有利于弹珠爬升的坡度, 这为弹珠顺利翻越固着液滴提供了有利条件. 在碰撞的过程中, 弹珠运动的韦伯数较小 ($We \in 0.16-4.13$), 但弹珠具备的动能足以克服重力效应以及液滴的阻碍向前运动, 直至完成耗时 67 ms 的翻越过程, 该过程可分为开始碰撞、爬升、登顶、下坡与结束碰撞五个阶段. 对于弹珠而言, 未碰撞前韦伯数 $We > 1$, 雷诺数 $Re \in 170-880$, 表明在整个过程中惯性力主导了弹珠的运动. 如图 3(a) $Oh \ll 1$, 说明在碰撞的过程中, 相比较于黏性力, 表面张力以及惯性力对碰撞后的状态影响更大. 在图 3(b) 中与初始时刻弹珠的侧面积 (A_0) 相比, 运动时刻的侧面积 (A_i) 始终处于变化中, 说明弹珠在翻越的过程中运动是不稳定的, 原因由拉普拉斯方程 ($\Delta P = 2\gamma/R$, γ 为液体的表面张力; R 为球形液滴半径) 可知, 随弹珠体积的增加, 受到的拉普拉斯压力减小, 维持弹珠不形变的束缚力变小, 使得弹珠碰撞后形态呈现出不稳定的振荡式变化, 并且这种不稳定性随着体积的增加而愈发显著. 也可以从能量的角度来分析这种运动的不稳定性: $\Delta E \approx \gamma\sigma^2 - \rho g R^3$, 在碰撞的过程中, 由于碰撞产生的波动影响弹珠表面颗粒的排布情况, 使得弹珠在运动中的每一个时刻的有效表面张力都在变化, 弹珠状态的不稳定性随之增加. 在运动的过程中, 弹珠还经历了短暂固-液基底转换的过程, 在液面基底上摩擦系数变小^[30], 对应的摩擦造成的能量耗散相对较小^[31,32], 当然这个过程极其短暂, 对动能的耗散影响甚微, 动能更多地是转化为液滴的表面能以及液滴的形态振荡的摇摆中. 对于弹珠在运动过程中所受到的摩擦力, 如图 3(c) 所示, 由于弹珠在运动的过程中接触面积时刻变化, 摩擦力的计算不再适用于 Amontons 摩擦定律, 通常由接触角的变化间接计算^[33]: $F_f = \gamma D(\cos \theta_r - \cos \theta_a)$, D 为弹珠底部接触区域长度. 当然, 在翻越的过程中, 从液滴接触开始到结束, 弹珠主要受到重力 (F_g), 界面摩擦力 (F_f) 以及支撑力 (F_N) 的作用, 此外因

为接触的过程中弹珠与液滴均在变形, 受到了表面张力以及黏附力等多个力的综合作用.

3.2 液体弹珠与固着液滴碰撞回弹

弹珠与液滴碰撞的第二种状态是回弹, 当基底换为特氟龙胶带时, 如图 4(a) 所示, 固着液滴的最大高度增加了 0.53 mm, 增加了弹珠与液滴正面碰撞时的有效接触面积, 界面由亲水变为疏水, 但固着液滴仍未脱离钉扎^[34]的束缚, 在碰撞后, 液滴受到来自弹珠的挤压, 整体沿三相接触线向中间隆起, 强化了对弹珠的阻挡, 使得弹珠愈发难以逾越液滴. 在表面张力的作用下, 被压缩的液滴朝着初始状态复原而将弹珠反弹, 以及在相互作用力下增强了回弹效果, 使得弹珠无法翻越液滴, 而以回弹的方式结束碰撞. 当然, 如图 4(c) 所示, 即使界面为乙醇-SiO₂ 喷雾改性的高疏水界面, 当弹珠与液滴的体积 (弹珠:液滴 $\approx 3:4$) 相近时, 碰撞后弹珠同样以回弹的形式结束碰撞, 但此时弹珠与液滴均产生位移, 并伴随着形状的振荡而将碰撞产生的能量消耗. 从图 4(c) 中可知, $Oh \ll 1$, 表明黏性力对碰撞的影响非常小, 并且由于液滴脱钉扎, 三相接触线不再受到钉扎力的束缚, 被弹珠碰撞后发生与“桌球”类似的非弹性碰撞, 有着较大的能量损失. 并根据动量守恒: $m_l v_l = m_l' v_l' + m_w v_w$, 计算出该过程的能量转化率 $\eta \approx 33.86\%$, 有接近 70% 的能量伴随着弹珠与液滴的弹跳与形状的振荡而消散. 如图 4(b) 所示, 碰撞后弹珠的面积变化 (A_i/A_0) 呈现为自由衰减的过程.

3.3 液体弹珠与固着液滴碰撞后聚并

弹珠与液滴碰撞的第三种状态是聚并, 实验中当液滴固着在乙醇-SiO₂ 喷雾改性的高疏水界面上时, 液滴与界面未润湿也未被钉扎, 以类椭球型静置于界面. 实验采用弹珠与液滴体积比为 1:4 进行碰撞, 弹珠与液滴碰撞的瞬时速度为 0.27 m/s, 与体积比为 3:4 的碰撞相比, 弹珠的碰撞状态由回弹转化为聚并. 如图 5(a) 所示, 弹珠与液滴在 22.5 ms 内快速融合成一个整体, 当弹珠与液滴接触时, 由于表面疏水性颗粒的阻隔, 弹珠内部液体与液滴并未直接接触, 相互接近时分子间作用力无法驱使疏水颗粒转移到液滴界面上, 只有对弹珠施加的压力或者与碰撞速度达到临界, 如图 2(b) 和图 2(c) 所示, 因碰撞波动使得颗粒嵌入的液体界面的程度发

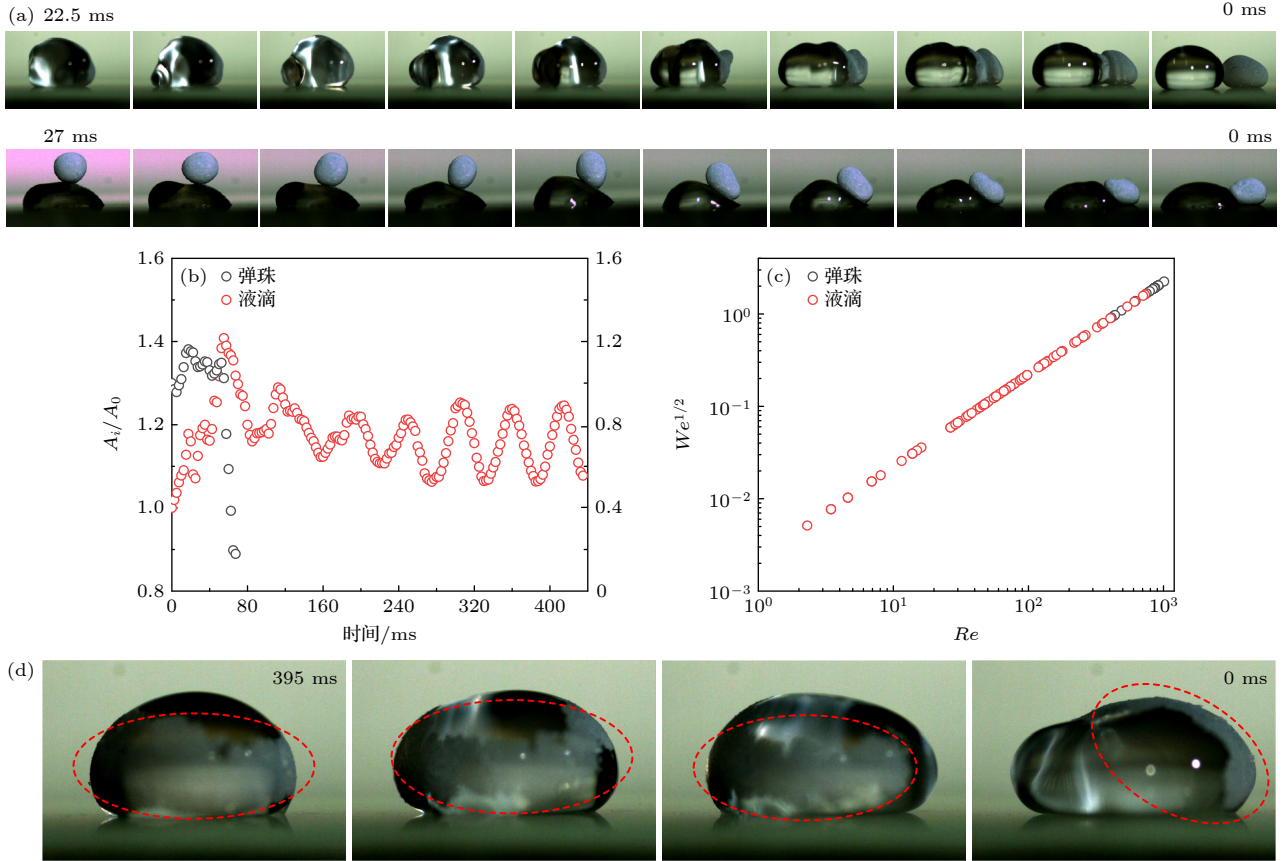


图 5 (a) 同体积弹珠在不同疏水性界面上碰撞液滴形态变化图; (b) 碰撞过程中液滴与弹珠侧面积变化; (c) 碰撞过程中液滴与弹珠 Oh 变化; (d) 聚并发生后表面颗粒的移动情况

Fig. 5. (a) Variation of droplet morphology of the same volume of marbles colliding at different hydrophobic interfaces; (b) variation of droplet and marble side area during the collision; (c) variation of droplet and marble Oh during the collision; (d) movement of surface particles after droplet coalescence occurs.

生改变, 并沿碰撞点快速演变为碰撞面, 迫使颗粒向弹珠的两极扩散, 碰撞产生的波动削弱了颗粒间相互作用力以及颗粒与液体间的毛细作用力, 使得弹珠液面附着的部分颗粒脱离转移到固着液滴上, 弹珠表面的颗粒迁移重排, 颗粒无法完全包裹弹珠表面, 导致弹珠与液滴接触的区域出现裸露区域, 在表面张力以及分子内部吸引力的作用下快速形成液桥, 迫使弹珠与液滴的接触在短时间内由固-液转变为液-液接触, 完成初步聚并. 当然, 在聚并发生后, 形成的新液滴与弹珠相比由于体积增大数倍, 如图 5(d) 所示, 表面颗粒无法将液滴表面完全覆盖, 由于液滴处于一个波动的不稳定状态, 表面波动使得液滴界面产生不同曲率, 使得表面颗粒受到不均匀的毛细力, 颗粒处于随液滴波动而移动, 直至液滴稳定, 表面颗粒在重力以及毛细力的作用下从分散状态逐渐聚拢, 后沉积环绕在液滴的下半部分, 液滴顶部则呈现出裸露状态, 至此完成聚并.

在弹珠与液滴碰撞的初始时期, 在接触位置处存在两个方向相反的碰撞波, 碰撞产生的波在弹珠与液滴的表面以及内部均有传播, 受到液滴表面张力的作用, 使得液滴处于一个往复式摇摆振荡阶段. 如图 5(b) 和图 5(c) 所示, 当弹珠与液滴完全合并后, 在 280 ms 后, 合并后的液滴面积变化近似为自由衰减振荡, 该振荡耗散过程基本符合 $S = 0.085 + 2.584 \sin[(t - t_c)\pi/0.027]$. 之后, 融合的液滴形状的摇摆振荡逐渐衰减, 直至碰撞的动能随液滴的摇摆而消耗殆尽, 且在碰撞的整个过程中依旧是惯性力主导作用. 而在玻璃基底上, 由于玻璃基底上润湿性较好, 液滴在界面上铺展开, 接触角 ($35.4^\circ \leq \theta \leq 61.3^\circ$) 和碰撞时的冲击面积相对较小, 无法让弹珠表面的疏水颗粒迁移, 由于液滴的接触角较小, 剩余的动能足以驱动弹珠克服重力以及表面冲击波的影响顺利翻越液滴, 实现对“障碍物”的跨越. 如图 5(a) 所示, 在碰撞之后, 由于液滴

在界面上的黏附作用以及钉扎效应,液滴无法挣脱界面的束缚,碰撞后液滴通过如图6所示的自由摇摆振荡来不断消耗碰撞过程中产生的能量,虽然不同情况下碰撞剩余的动能不尽相同,但始终以一个自由衰减振荡的形式将其消耗,直至液滴稳定,恢复到初始状态。

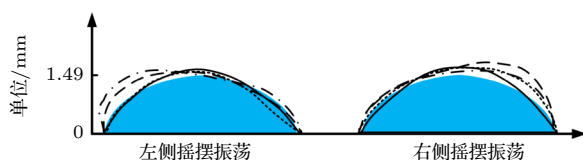


图6 弹珠完成翻越后液滴以摇摆振荡的方式消耗能量
Fig. 6. Droplet consumes energy by swinging and oscillating after the marble completes its overturning.

4 结 论

本文探究了界面亲/疏水性以及液体弹珠体积对碰撞固着液滴的影响以及动力学分析. 结果表明: 界面的亲/疏水性决定了液滴的固着状态以及液滴是否钉扎, 疏水性越强, 液滴脱钉扎效果越显著, 阻碍弹珠前进的空气夹层以及碰撞有效接触面积越大; 而弹珠体积大小与弹珠与液滴碰撞瞬间携带的动能密切相关, 这决定了弹珠是以翻越、回弹还是聚并结束碰撞. 由于弹珠与液滴均具有流变性, 在碰撞瞬间均有着较大形变, 通过计算在整个碰撞过程中的奥内佐格数 $Oh \ll 1$, 表明受重力引导的碰撞过程由表面张力以及惯性力主导. 与微量液体或固体之间的碰撞不同, 弹珠与液滴之间的碰撞具有远程可控以及物质传递等功能, 可按需调控弹珠碰撞后的状态. 以碰撞的方式为液体弹珠在微反应器等领域的运用提供一种操控策略.

参考文献

- [1] Kim J 2007 *Int. J. Heat Fluid Flow* **28** 753
- [2] Kim S Y, Choi B G, Baek W K, Park S H, Park S W, Shin J w, Kang I H 2019 *Smart Mater. Struct.* **28** 035025
- [3] Watson G S, Green D W, Schwarzkopf L, Li X, Cribb B W, Myhra S, Watson J A 2015 *Acta Biomater.* **21** 109
- [4] Kelleher S M, Habimana O, Lawler J E, O' Reilly B, Daniels S, Casey E, Cowley A 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 14966
- [5] Park K C, Chhatre S S, Srinivasan S, Cohen R E, McKinley G H 2013 *Langmuir*. **29** 13269
- [6] Chen H, Li A, Zhang Y, Zhang X, Zang D 2022 *Phys. Fluids*.

- [7] Luo X J, Zhang X, Feng Y J 2020 *Acta Phys. Chim. Sin.* **36** 1910007 (in Chinese) [罗新杰, 张熙, 冯玉军 2020 物理化学学报 **36** 1910007]
- [8] Aussillous P, Quéré D 2001 *Nature* **411** 924
- [9] Thomson J J, Newall H F 1886 *Proceedings of the Royal Society of London* **39** 417
- [10] Worthington A M 1877 *Proceedings of the Royal Society of London* **25** 261
- [11] Worthington A M 1883 *Proceedings of the Royal Society of London* **34** 217
- [12] Menchaca-rocha A, Martínez-Dávalos A, Nuñez R, Popinet S, Zaleski S 2001 *Phys. Rev. E* **63** 046309
- [13] Aarts D G, Lekkerkerker H N, Guo H, Wegdam G H, Bonn D 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 164503
- [14] Bi F F, Guo Y L, Shen S Q, Chen J X, Li Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184702 (in Chinese) [毕菲菲, 郭亚丽, 沈胜强, 陈觉先, 李熠桥 2012 物理学报 **61** 184702]
- [15] Wang K Y, Pang X L, Li X G 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 076801 (in Chinese) [王凯宇, 庞祥龙, 李晓光 2021 物理学报 **70** 076801]
- [16] Liang G T, Guo Y L, Shen S Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184703 (in Chinese) [梁刚涛, 郭亚丽, 沈胜强 2013 物理学报 **62** 184703]
- [17] Mukherjee S, Abraham J 2007 *J Colloid Interface Sci.* **312** 341
- [18] Jin J, Ooi C H, Dao D V, Nguyen N T 2017 *Micromachines-Basel* **8** 336
- [19] Zhan H, Lu C, Liu C, Wang Z, Lü C, Liu Y 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 234503
- [20] Han X, Tang X, Zhao H, Li W, Li J, Wang L 2021 *Mater. Horiz* **8** 3133
- [21] Zhang B, Sanjay V, Shi S, Zhao Y, Lü C, Feng X, Lohse D 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 104501
- [22] Han X, Tang X, Zhao H, Li J, Li W, Wang L 2022 *Adv. Mater. Interfaces* **9** 2101565
- [23] Bormashenko E, Pogreb R, Balter R, Aharoni H, Bormashenko Y, Grynyov R, Mashkevych L, Aurbach D, Gendelman O 2015 *Colloid. Polym. Sci.* **293** 2157
- [24] Zang D, Chen Z, Zhang Y, Lin K, Geng X, Binks B P 2013 *Soft Matter* **9** 5067
- [25] Draper T C, Fullarton C, Mayne R, Phillips N, Canciani G E, de Lacy Costello B P J, Adamatzky A I 2019 *Soft Matter* **15** 3541
- [26] Azizian P, Mohammadrashidi M, Abbas Azimi A, Bijarchi M A, Shafii M B, Nasiri R 2022 *Micromachines-Basel* **14** 49
- [27] Davis R H, Schonberg J A, Rallison J M 1989 *Phys. Fluids A* **1** 77
- [28] Zhang P, Law C K 2011 *Phys. Fluids* **23** 042102
- [29] Chen Y, Liu Z, Zhu D, Handschuh-Wang S, Liang S, Yang J, Kong T, Zhou X, Liu Y, Zhou X 2017 *Mater. Horizons* **4** 591
- [30] Ooi C H, Nguyen A V, Evans G M, Dao D V, Nguyen N T 2016 *Sci. Rep.* **6** 1
- [31] Yan X, Zhang L, Sett S, Feng L, Zhao C, Huang Z, Vahabi H, Kota A K, Chen F, Miljkovic N 2019 *ACS Nano* **13** 1309
- [32] Yang J, He Y, Jiao F, Wang M H 2022 *Langmuir* **38** 16024
- [33] Backholm M, Molpeceres D, Vuckovac M, Nurmi H, Hokkanen M J, Jokinen V, Timonen J V, Ras R H 2020 *Commun. Mater.* **1** 64
- [34] Yang X Y, Li G H, Huang X, Yu Y S 2022 *Langmuir* **38** 11666

Influence factors and kinetic analysis of liquid marbles colliding with sessile droplets^{*}

Yang Jian-Zhi¹⁾ He Yong-Qing²⁾ Jiao Feng^{1)†} Wang Jin³⁾

1) (*School of Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China*)

2) (*Chongqing Key Laboratory of Micro-Nano Systems and Intelligent Sensing,
Chongqing Gongshang University, Chongqing 400067, China*)

3) (*College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

(Received 20 May 2023; revised manuscript received 7 June 2023)

Abstract

Liquid marbles can be used as micro-droplet carriers due to their non-wetting, non-adhesion, and selective material exchange with the outside environment, wide applications in emerging fields like microfluidics and chemical, biological, and chemical microreactors. The collision can be used as a method of manipulating material transfer by marbles, which has significance and research value. Unlike droplet-droplet or marble-marble collisions, the collision behavior between marbles and droplets is more abundant and complex. The study of this process is vital for effectively transferring the material with marble as the medium. In this paper, high-speed camera filming technology is used to capture the collision process between liquid marbles and sessile droplets. The collision process between marbles and droplets is investigated for different Ohnesorge numbers (Oh) and wall hydrophilicity/hydrophobicity (contact angle: $\theta \sim 35.4^\circ$ - 124.5°). This research demonstrates that at the hydrophilic interface, the contact angle formed between the droplet and the interface is small ($\theta \leq 61.3^\circ$), and when the collision occurs, the effective contact area is small, which cannot form a larger obstruction to the forward motion of the marble and ends the collision with the droplet in the form of overturning; when the hydrophobic interface is changed into the hydrophobic interface, the effective collision area increases, which forms a larger obstruction to the forward motion of the marble and replaces overturning with rebound behavior; when the hydrophobicity of the interface increases to $\theta = 124.5^\circ$, the effective collision area becomes larger, and the fluctuations generated at the interface after the collision cause the particles on the surface of the marble to migrate and appear in the exposed area, forming a liquid bridge and then quickly completing the aggregation. When marbles and sessile droplets collide, three distinct motion behaviors emerge: climbing, rebound, and coalescence-merging (coalescence).

Keywords: collision, liquid marble, sessile droplet, hydrophilicity/hydrophobicity

PACS: 47.57.-s, 47.55.df, 47.55.nk

DOI: 10.7498/aps.72.20230815

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11962010, 11502102), the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant No. cstc2021jcyj-msxmX0910), and the Scientific Research Foundation of the Education Department of Yunnan Province, China (Grant No. 2023J0139).

[†] Corresponding author. E-mail: jiaofeng0526@163.com

液体弹珠碰撞固着液滴的影响因素及动力学分析

杨建志 何永清 焦凤 王进

Influence factors and kinetic analysis of liquid marbles colliding with sessile droplets

Yang Jian-Zhi He Yong-Qing Jiao Feng Wang Jin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 164702 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230815

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230815>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

液滴碰撞Janus颗粒球表面的行为特征

Behavioral characteristics of droplet collision on Janus particle spheres

物理学报. 2021, 70(4): 044701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201358>

冷液滴/热液池碰撞混合及温度特性

Temperature characteristics of droplet impacting on static hot pool

物理学报. 2019, 68(23): 234702 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190809>

超疏水表面液滴的振动特性及其与液滴体积的关系

Oscillation properties of water droplets on a superhydrophobic surface and their correlations with droplet volume

物理学报. 2021, 70(7): 076801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201771>

接触角迟滞和气-液界面张力温度敏感性对液滴蒸发动态特性的影响

Effect of contact angle hysteresis and sensitivity of gas-liquid interfacial tension to temperature of a sessile-drop on evaporation dynamics

物理学报. 2021, 70(20): 204701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210294>

液滴撞击超亲水表面的最大铺展直径预测模型

Theoretical model of maximum spreading diameter on superhydrophilic surfaces

物理学报. 2021, 70(10): 106801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201918>

液滴在不同润湿性表面上蒸发时的动力学特性

Dynamics of evaporating drop on heated surfaces with different wettabilities

物理学报. 2018, 67(11): 114702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180159>