

## Janus 颗粒撞击气泡的行为特征\*

赵昶<sup>1)</sup> 纪献兵<sup>1)2)†</sup> 杨聿昊<sup>1)</sup> 孟宇航<sup>1)</sup> 徐进良<sup>1)2)</sup> 彭家略<sup>1)</sup>

1) (华北电力大学, 低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206)

2) (华北电力大学, 电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206)

(2022 年 4 月 6 日收到; 2022 年 6 月 30 日收到修改稿)

为更好地在相变传热中应用双亲性 Janus 颗粒, 用铜球制备了亲水-超疏水 Janus 颗粒, 其粒径为 1.0 mm, 气泡直径为 3.0 mm. 研究了不同高度下带小气泡的 Janus 颗粒撞击气泡的行为特征. 结果表明: Janus 颗粒不同润湿性表面撞击气泡时的行为特征存在明显差异, 当超疏水侧接触气泡时, 会沿着气泡表面无旋转地滑到气泡底部; 当亲水侧接触气泡时, 会先沿着气泡表面滑行一段距离, 随后发生旋转, 对气泡造成强烈扰动; 而亲水-超疏水分界面接触气泡时, 颗粒会在接触的瞬間开始旋转. 当 Janus 颗粒具有一定的高度撞击气泡时, 一般以亲水面首先与气泡接触, 随高度的增加, Janus 颗粒拉扯气泡变形的程度增加. 基于受力分析发现: Janus 颗粒发生旋转的主要原因是不同润湿性表面所受毛细力作用点和方向的不同, 相应地产生旋转力矩.

**关键词:** Janus 颗粒, 气泡, 撞击, 行为特征**PACS:** 47.10.A-, 47.55.Ca, 47.55.D-**DOI:** 10.7498/aps.71.20220632

## 1 引言

沸腾传热作为一种高效稳定的传热方式, 在工业中有着广泛的应用, 例如电子元器件<sup>[1]</sup>、核反应堆<sup>[2]</sup>、航空航天<sup>[3]</sup>等领域. 而在沸腾换热过程中, 气泡脱离和液体补充, 不同润湿性表面与气泡和液体的相互作用等因素对换热效果有着显著影响, 进而造成沸腾传热系数和临界热流密度的差异<sup>[4]</sup>. 一些研究发现, 在沸腾池中添加导热系数好的金属颗粒能有效提高临界热流密度, 且不同润湿性颗粒与气泡之间发生的碰撞、弹跳、滑动等动态行为与沸腾换热息息相关<sup>[5-7]</sup>. 为更深入地了解不同润湿性颗粒与气泡的行为特征, 许多学者通过数学建模、实验测量和理论推导等方法分析了气泡与颗粒的动态行为, 发现气泡-颗粒间的动态行为受颗粒润湿性<sup>[8]</sup>、颗粒与气泡的直径比<sup>[9]</sup>及气泡性质<sup>[10]</sup>等诸多因素影响.

目前, 大部分研究主要针对疏水性和亲水性颗粒与气泡的相互作用. Moreno-Atanasio 等<sup>[11]</sup>模拟了两种疏水性颗粒碰撞气泡时的现象, 发现疏水性强的颗粒更易附着于气泡, 疏水力对气泡黏附起着至关重要的作用. Gao 等<sup>[12]</sup>建立了单个气泡的三维离散模型, 对颗粒所受疏水力进行了单指数衰减定律估算, 发现疏水力存在一个临界值, 当超过该值时颗粒就会脱离气泡, 反之则会黏附于气泡表面. Whelan 和 Brown<sup>[13]</sup>首次设计了单个气泡与单个颗粒相互作用的实验装置. 后来 Nguyen 和 Evans<sup>[14]</sup>在其基础上完善了实验装置, 观察了亲水颗粒与气泡碰撞的动态行为特征, 发现亲水颗粒会在气泡上半球发生滑动, 在越过气泡赤道后会脱离; 而疏水颗粒一直在气泡表面滑动, 直至运动到气泡底部<sup>[15]</sup>. 针对上述现象, Scheludko 等<sup>[16]</sup>提出三相润湿周边的概念并阐述了其形成过程. Paulsen 等<sup>[17]</sup>的诱导时间模型中, 将诱导时间定义为气泡和颗粒之间的液膜变薄直到发生破裂的时间, Wang 等<sup>[18]</sup>

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFC1907002) 和国家自然科学基金 (批准号: 52176154) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jxb@ncepu.edu.cn

指出颗粒是否附着于气泡, 关键在于颗粒和气泡之间的液膜能否破裂并形成稳定的三相接触线. Nguyen<sup>[19]</sup> 和 Gao 等<sup>[20]</sup> 针对液膜破裂和三相接触线形成这一过程, 结合实验和理论推导进行了受力分析 (考虑阻力和表面力的作用), 引入并着重分析了疏水力. 他们发现在疏水力作用下, 颗粒会更容易破坏气泡与颗粒间的液膜从而形成三相接触线, 然后不断扩展, 最后形成稳定的润湿周边.

当颗粒表面同时具有两种润湿性时, 气泡与颗粒之间的相互作用会出现什么不同呢? Janus 颗粒研究的出现给我们很大的启迪, “Janus” (古罗马神话中的双面神) 一词, 在 1991 年由 De Gennes<sup>[21]</sup> 在诺贝尔颁奖大会上首次提出并使用. 后来 Janus 粒子被定义成表面具有不同化学性质或物理性质的不对称粒子, 本文的 Janus 颗粒是指颗粒表面具有部分亲水, 部分超疏水特性. 当一个颗粒表面有两种润湿特性时, 颗粒与气泡相互作用时会发生不同的行为特征<sup>[22]</sup>. 到目前为止, Janus 颗粒与气泡相互作用的形式主要集中在  $H_2O_2$  溶液催化分解产生气泡, 进而驱动颗粒运动. 王雷磊等<sup>[23]</sup> 发现在  $H_2O_2$  溶液催化作用下, 微米级 Pt-SiO<sub>2</sub> 型 Janus 颗粒产生气泡, 进而发生自驱动现象, 认为除了气泡推力, 扩散泳力也是气泡驱动微球运动的主要动力. Yuan 等<sup>[24]</sup> 基于 Janus 上转换纳米粒子胶囊电机的开开发光, 开发了一种基于微电机的三硝基甲苯主动传感器, 发现通过控制  $H_2O_2$  浓度可以调节气泡排出频率, 进而控制电机运动速度. 但人们对 Janus 颗粒与气泡碰撞行为特性的研究和认知还比较少, Dong 等<sup>[25]</sup> 制备了纳米级聚苯乙烯-聚甲基丙烯酸正丁酯 Janus 颗粒, 并应用于 2.7 mm 气泡浮选实验, 发现 Janus 颗粒是一种更为理想的浮选捕收剂, 严格意义上讲, 上述行为不属于碰撞. 为了进一步研究同量级气泡与颗粒碰撞的行为特征, 促进 Janus 颗粒在沸腾相变传热领域的应用, 本文通过对比 Janus 颗粒不同润湿性表面以零速度接触气泡以及在不同下落高度  $h$  碰撞气泡时的动态行为, 研究了附带小气泡的 Janus 颗粒与大气泡之间的相互作用.

## 2 实验材料与方法

### 2.1 表面制备与表征

制备 Janus 颗粒所用的原材料为紫铜球颗粒, 其直径为 1.0 mm, 密度为 8.9 g/cm<sup>3</sup> (中国金鸿铜

球精炼制造). 制备过程分为清洁、去氧化和喷涂三个阶段. 首先用丙酮和乙醇对紫铜球颗粒进行清洁, 以去除表面油污, 得到洁净的铜颗粒, 然后用稀盐酸去除颗粒表面的氧化层, 以上过程均在超声波环境下进行. 紧接着将铜颗粒用去离子水冲洗, 取出后冷风吹干, 最后将处理过的铜颗粒放置于特制丝网上, 颗粒一半位于丝网下方, 一半裸露在上方, 对裸露的上半球喷涂商用超疏水混合物<sup>[26]</sup> (Ultra Tech International, Inc. 美国), 下半球不做处理, 然后在通风口处放置约 12 h 即可得到亲水-超疏水 Janus 颗粒. 本实验环境温度为 20.0 °C, 所用工质为去离子水, 其密度  $\rho_l = 998.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 黏度  $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 表面张力  $\sigma = 7.275 \times 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ . 使用接触角测量仪对相同处理工艺下平板的润湿性进行了测试, 如图 1(a) 所示, 亲水处理的平面接触角为 66.1°, 超疏水处理的平面接触角为 150.2°. 图 1(b) 为液滴滴在直径为 5.0 mm 的 Janus 颗粒不同润湿性表面时的状态图. 滴在超疏水侧时, 液滴呈球形站立在表面上, 接触面积很小; 而滴在亲水侧时, 液滴与颗粒间的接触面积明显增大; 亲水侧和超疏水侧分界面处较为特殊, 把液滴滴到 Janus 颗粒分界面后, 液滴会向亲水侧倾斜.

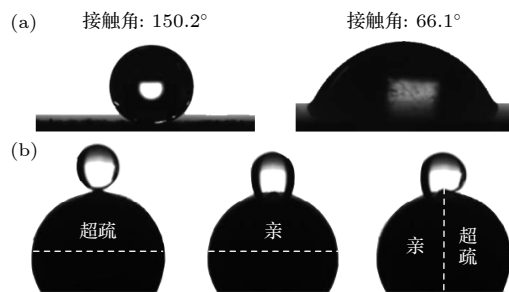


图 1 (a) 与 Janus 颗粒相同处理步骤下的超疏水平板和亲水平板的接触角; (b) 液滴在 Janus 颗粒不同润湿性表面的状态

Fig. 1. (a) Contact angle of superphobic horizontal plate and hydrophilic horizontal plate under the same treatment steps as Janus particles; (b) states of droplets on the surface of Janus particle with different wettability.

图 2 展示了 Janus 颗粒不同润湿性表面的扫描电子显微镜图 (SEM). 在图 2(a) 中, Janus 颗粒亲水侧表面较为光滑, 而图 2(b) 中超疏水侧表面上有大小不一的泡状结构, 尺寸约为 10—40  $\mu\text{m}$ , 这些结构是表面形成超疏水特性的主要原因. 由 Wenzel 模型可知  $\cos \theta^* = r \cdot \cos \theta_e$ , 其中  $\theta^*$  为状态下粗糙表面的接触角,  $r$  为粗糙度,  $\theta_e$  为本征接触

角. 对于疏水性表面而言,  $\theta_c$  本身大于  $90^\circ$ , 因此  $\theta^*$  随着粗糙度的增大而增大, 即表面越粗糙, 接触角越大, 表现为表面更疏水.

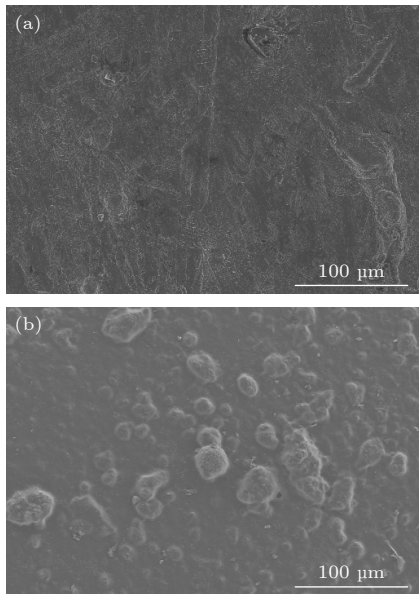


图 2 Janus 颗粒表面 SEM 图 (a) 亲水侧表面; (b) 超疏水侧表面

Fig. 2. SEM images of Janus particle surface: (a) Hydrophilic side surface; (b) superhydrophobic side surface.

## 2.2 实验系统与方法

Janus 颗粒碰撞气泡的实验装置如图 3 所示, 该装置由亚克力玻璃池 (50 mm×50 mm×50 mm)、LED 背光灯、高精度控制注射器、高速摄影仪、*xyz* 三轴微位移平台和数据采集仪等组成. 其中亚克力玻璃池中装有去离子水, 注射器 (容量为 5.0 mL) 与疏水针头 (直径为 0.5 mm) 相连接, 注射器的进给速度由高精度控制器控制, 以确保每次产生相同体积的气泡. 气泡正上方放置一个内径为 2.0 mm

的竖直导管, 作为 Janus 颗粒的下降通道, 防止颗粒在下降过程中出现路线偏移. *xyz* 三轴微位移平台控制导管的高度和位置, 使得颗粒可从不同高度 (0, 10, 20, 30, 40 mm) 无初速度下落. 气泡和颗粒碰撞过程使用高速摄影仪进行可视化拍摄.

在颗粒碰撞气泡的过程中, 气泡会发生形变, 但考虑到实验对象总体尺寸较小, 且气泡体积不变, 因此假设气泡在碰撞过程中保持其原有形态. 颗粒碰撞气泡前, 气泡形状近似为椭球形, 其当量直径 ( $D_b$ ) 可由垂直直径 ( $D_h$ ) 和水平直径 ( $D_v$ ) 确定 [27], 即  $D_b = (D_v^2 D_h)^{1/3}$ .

实验时, 先设定注射器的推进总量和进给速度, 在气泡达到预设体积后注射器自动停止, 气泡会停留在疏水针头上. 等气泡稳定后, 从不同高度无初速度释放 Janus 颗粒, 使其获得不同的碰撞速度. 为确保 Janus 颗粒顺利下落, 本实验采取从空气中自由落体释放目标颗粒的方法, 释放位置与水平面距离无限接近, 对下落高度  $h$  的影响可忽略不计. 碰撞过程由高速摄影仪进行可视化拍摄, 拍摄帧率为 2000 fps, 像素为  $1016 \times 1016$ . 整个实验装置放置在光学平台上, 以减小周围环境振动对实验造成的影响.

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 Janus 颗粒无初速度与气泡接触的行为特征

Janus 颗粒在穿透气-液界面初期, 颗粒运动排开周围液体, 液体会在颗粒超疏水侧某一位置与颗粒分离, 形成开口入水空泡, 此空泡在自由液面下闭合并黏附于 Janus 颗粒超疏水侧, 这与文献 [28]

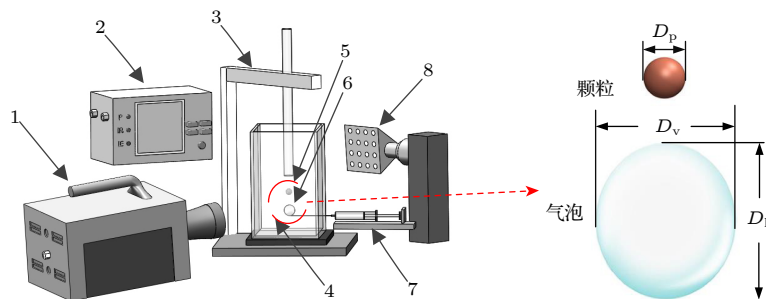


图 3 实验装置图 (1, 高速摄影仪; 2, 数据采集仪; 3, *xyz* 三轴微位移平台; 4, 亚克力玻璃池; 5, 实验样品; 6, 气泡; 7, 高精度注射器; 8, LED 背光灯)

Fig. 3. Diagram of the experimental device. 1, high-speed camera; 2, data collector; 3, *xyz* three-axes micro-displacement platform; 4, acrylic glass cell; 5, experimental sample; 6, bubble; 7, high-precision syringe; 8, LED backlight.



中数值模拟结果一致,即本文所用 Janus 颗粒在透气-液界面时,必然在超疏水表面上附带一个小气泡。

图 4 展示了 Janus 颗粒与气泡相互作用的动态过程。图 4(a) 为 Janus 颗粒亲水侧接触气泡时的动态过程。 $t = 0$  ms 时, Janus 颗粒亲水侧开始接触气泡顶部,前 20.0 ms 内,颗粒保持亲水侧接触气泡,并沿气泡滑行, $t = 18.0$  ms 时, Janus 颗粒的分界面接触到气泡,颗粒开始旋转,对气泡造成强烈扰动,30.0 ms 末旋转完成,之后 Janus 颗粒表现为超疏水侧接触气泡并沿气泡滑行到气泡底部,由于惯性,Janus 颗粒会在到达气泡底部后仍向前做近似圆周运动并拉扯气泡,如此往复直至悬停在气泡底部,整个过程历时 185.0 ms。图 4(b) 展示了 Janus 颗粒以超疏水侧接触气泡后的动态过程,颗粒超疏水侧自带小气泡,小气泡首先与下方气泡接触并融合,图中采用颗粒下边缘与气泡接触时为 0 ms 时刻,因此没有小气泡。 $t = 0$  ms 时, Janus 颗粒超疏水侧接触气泡顶部,之后均为超疏水侧接触气泡并沿气泡滑行,直至 Janus 颗粒最后悬停在气泡底部。从图 4(b) 可看出,颗粒超疏水侧接触气泡时,颗粒对气泡的扰动明显较弱,这是由于颗粒沿气泡表面滑动过程中没有发生旋转。当 Janus 颗粒的分界面接触气泡时,如图 4(c) 所示,在 Janus 颗粒分界面接触到气泡顶部的 5.0 ms

内,颗粒完成旋转,改为超疏水侧朝向气泡,同时 Janus 颗粒超疏水侧所附着的“球帽状”气泡与所撞击的大气泡相融合,滑动过程与上述过程一致。综上可知,当下落高度  $h = 0$  mm 时, Janus 颗粒的不同润湿性表面接触气泡时会表现出不同的行为特征。

### 3.2 Janus 颗粒以不同下落高度碰撞气泡时的行为特征

为了探究下落高度  $h$  对 Janus 颗粒碰撞气泡行为特性的影响,选取下落高度  $h$  分别为 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 mm, 并对下落高度  $h$  进行无量纲化处理,以使研究结果具有普适性。选择 Janus 颗粒直径  $D_p$  为参量,无量纲下落高度  $h^* = h/D_p$ 。根据可视化结果中相同时间内的位移差距可知,下降高度增加,Janus 颗粒与气泡接触时的速度也相应提高,且当无量纲下落高度  $h^* = 10.0, 20.0, 30.0, 40.0$  时,碰撞时颗粒速度分别为 0.0903, 0.1250, 0.1410, 0.1806 m/s。

为进一步分析 Janus 颗粒碰撞气泡后的行为特征,引入了中心距离  $D_{oo}$  和滑移角度  $\theta$ ,来描述上述无量纲下落高度时颗粒的动态行为过程。图 5 为  $D_{oo}$  和  $\theta$  的示意图: $D_{oo}$  为假定碰撞发生后气泡中心点坐标不变时,颗粒中心与气泡中心的距离,描述 Janus 颗粒与气泡距离的变化; $\theta$  为从气泡中



图 4 Janus 颗粒与气泡的相互作用动态过程 (a) 亲水侧接触气泡; (b) 超疏水侧接触气泡; (c) 分界面接触气泡

Fig. 4. Dynamic processes of interaction between Janus particle and bubble: (a) Hydrophilic side contacting bubble; (b) superhydrophobic side contacting bubble; (c) interface contacting bubble.

心引向上的垂线与中心距离所在直线形成的夹角, 描述颗粒与气泡相对位置的变化. 无量纲中心距离  $D^* = D_{oo}/D_p$ .

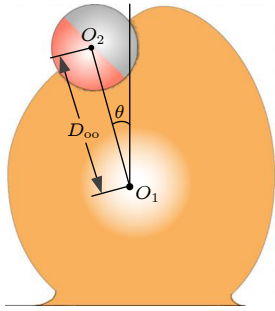


图 5 中心距离  $D_{oo}$  和滑移角度  $\theta$  的示意图  
Fig. 5. Schematic diagram of center distance  $D_{oo}$  and slip angle  $\theta$ .

通过可视化实验发现, 随着时间和滑移角度  $\theta$  的增加, 在不同无量纲下落高度  $h^*$  下,  $D^*$  总表现为先减小再增大、再减小, 最后稳定的总体趋势. 图 6(a) 为无量纲下落高度  $h^* = 10.0$  时 Janus 颗粒撞击气泡的动态过程图, 图 6(b) 和图 6(c) 展示了  $h^*$  分别为 10.0, 20.0, 30.0 和 40.0 时无量纲中心距离  $D^*$  和滑移角度  $\theta$  随时间  $t$  变化的曲线图. 以  $h^* = 10.0$  为例,  $D^*$  的变化过程可分为四个阶段.

第一阶段 (0—25.0 ms):  $t = 0$  ms,  $\theta = 0^\circ$ , 碰撞开始发生,  $D_{oo}$  为气泡当量半径与颗粒半径之和.

随后  $D^*$  逐渐减小,  $\theta$  缓慢增加, Janus 颗粒挤压气泡并沿气泡滑动, 水化膜在此阶段逐渐变薄直至破裂, 形成三相接触线, 并从接触点逐渐扩展, 最后达到一个三相接触的稳定状态. 当  $t = 25.0$  ms 时,  $\theta = 79.7^\circ$ ,  $D^*$  达到最小值 0.83, 即 Janus 颗粒中心与气泡中心相距最近. 第二阶段 (25.0—45.0 ms): Janus 颗粒沿气泡继续向下滑动,  $D^*$  开始增大, 这个阶段颗粒中心会低于气泡中心. 在  $t = 45.0$  ms 时,  $\theta = 160.7^\circ$ ,  $D^*$  达到最大值 1.85, 且此值大于气泡当量半径与颗粒半径之和, 是因为 Janus 颗粒具有惯性, 会在颗粒沿气泡滑落至气泡底部的过程中做离心运动 (非严格的圆周运动), 从而向下拉扯气泡变形. 当 Janus 颗粒速度减至 0 m/s 时, 颗粒中心与气泡中心最远. 第三阶段 (45.0—75.0 ms): 气泡在上一阶段被拉扯至变形程度最大, 由于表面张力的作用, 气泡趋于恢复原状, Janus 颗粒在疏水力和表面张力的共同作用下跟随气泡回弹, 因此  $D^*$  开始减小, 在  $t = 75.0$  ms 时,  $\theta = 175.0^\circ$ ,  $D^*$  达到 0.96. 第四阶段 (75.0—110.0 ms):  $\theta$  继续增大以至超过  $180.0^\circ$ , 在 95.0 ms 时达到最大值  $188.6^\circ$ , 随后反方向运动, 最终减小至  $180.0^\circ$ .  $D^*$  在此阶段存在小幅度振荡, 最终稳定在 1.25. 这个阶段的运动主要是靠惯性维持, 最终在黏性耗散的作用下, Janus 颗粒悬停在气泡下方, 此时超疏水侧接触气泡, 亲水侧裸露在去离子水中.

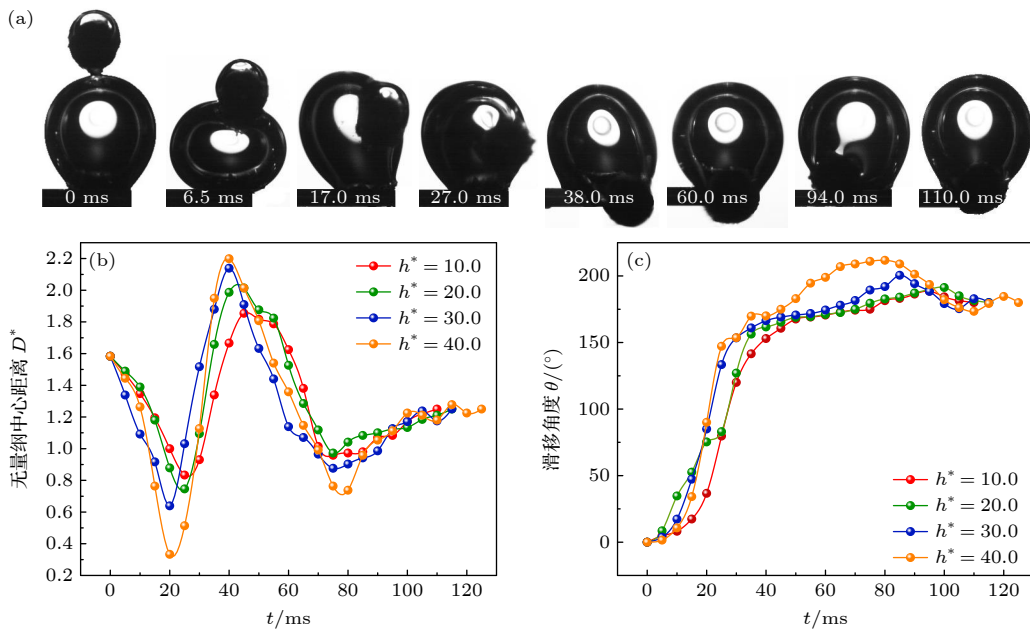


图 6 Janus 颗粒撞击气泡的动态过程及曲线图 (a) 动态过程图 ( $h^* = 10.0$ ); (b)  $D^*$  随时间  $t$  变化的曲线图; (c)  $\theta$  随  $t$  变化的曲线图

Fig. 6. Dynamic process and curve of Janus particle impacting bubble: (a) Dynamic process ( $h^* = 10.0$ ); (b) process curves for  $D^*$  changing with  $t$ ; (c) process curves for  $\theta$  changing with  $t$ .

当无量纲下落高度  $h^*$  不同时,  $D^*$  最小值和最大值不同, 达到最值所用  $t$  和对应的  $\theta$  也有所不同.  $D^*$  和  $\theta$  在不同  $h^*$  的情况下随时间  $t$  的变化规律见图 6(b) 和图 6(c). 当  $h^*$  分别为 10.0, 20.0, 30.0, 40.0 时,  $D^*$  最小值分别为 0.83, 0.74, 0.64, 0.33, 随着  $h^*$  依次增大,  $D^*$  的最小值逐渐变小, 达到最小值时的  $\theta$  变大, 分别为  $79.7^\circ$ ,  $83.0^\circ$ ,  $85.0^\circ$ ,  $90.0^\circ$ . 这是因为  $h^*$  的增加会使 Janus 颗粒的初始动能 ( $t = 0$  ms 时的动能) 增大, 初始动能较大时, 气泡被挤压变形的程度更大; 初始动能较小时, Janus 颗粒会更倾向于沿初始气泡位置滑动.  $D^*$  达到最小值所用时间分别为 25.0, 23.0, 20.0, 17.0 ms, 与  $h^*$  成负相关, 这说明  $h^*$  越大, 在碰撞发生后 Janus 颗粒的下落速度会越大.

随着无量纲下落高度  $h^*$  的提升,  $D^*$  达到的最大值分别为 1.85, 2.01, 2.14, 2.20, 达到最大值时的  $\theta$  依次增大, 分别为  $160.7^\circ$ ,  $165.3^\circ$ ,  $166.4^\circ$ ,  $170.0^\circ$ . 这是因为  $h^*$  越大, 气泡被向下拉扯变形的程度就越大.  $D^*$  达到最大值所需时间分别为 46.0, 44.0, 40.0, 38.0 ms, 原因在于初始动能越大, Janus 颗粒下落速度越大.

### 3.3 Janus 颗粒在旋转过程中的受力分析

由 3.1 节分析可知, 当 Janus 颗粒亲水侧和分界面接触气泡时, 均会发生独特的旋转过程<sup>[29–31]</sup>, 这是由于颗粒亲疏水两侧与气泡的作用方式有所不同, 且在此过程中形成了三相接触线, 下面将对 Janus 颗粒在旋转过程中的受力进行分析, 根据力作用点的不同将受力标注在了图 7 中, 其中图 7(a) 为 Janus 颗粒中心点受力, 图 7(b) 为超疏水侧与亲水侧在三相接触线上的受力.

Janus 颗粒在旋转过程中的受力比较复杂, 起作用的主要有以下 7 个力.

1) 重力: 重力方向竖直向下,

$$F_g = \frac{4}{3}\pi R_p^3 \rho_p g, \quad (1)$$

式中,  $R_p$  为半径,  $\rho_p$  为颗粒的密度,  $g$  为重力加速度.

2) 浮力: 浮力方向竖直向上. Janus 颗粒进入液体时超疏水侧表面会附着气泡, 此时颗粒的部分体积会被气泡包裹;

$$F_b = \rho_l g \left[ \frac{4}{3}\pi R_p^3 - \pi R_p^3 (1 - \cos \alpha)^2 \frac{2 + \cos \alpha}{3} \right], \quad (2)$$

式中,  $\rho_l$  代表液体的密度,  $\alpha$  为颗粒中心与三相接

触线的连线与  $D_{oo}$  所成夹角<sup>[32]</sup>, 如图 7 所示.

3) 接触力: 颗粒在撞击气泡时, 气泡表面会发生凹陷现象, 且颗粒会轻微反弹, 这是由颗粒与气泡之间的接触造成的, 可将此接触和反弹过程看作半弹性接触<sup>[33]</sup>, 方向垂直于三相接触线指向外侧;

$$F_{con} = K\delta + \eta_{ni}u_p, \quad (3)$$

式中,  $K$  为弹性系数,  $\delta$  为颗粒和气泡的重叠距离,  $\eta_{ni}$  为阻尼系数  $\eta_{ni} = 2\sqrt{\frac{m_b m_p K}{m_b + m_p} \frac{1}{\sqrt{\pi^2 + 1}}}$ ,  $m_b$  为气泡的质量,  $u_p$  为颗粒运动速度.

4) 流体阻力<sup>[34]</sup>: 颗粒运动时, 周围流体会产生与颗粒运动方向相反的力, 由于颗粒发生旋转, 亲水侧与超疏水侧均受到流体阻力, 且方向不同.

$$F_d = \frac{1}{2}\rho_l u_p^2 \pi R_p^2 C_D, \quad (4)$$

其中,  $C_D$  为阻力系数, 对于  $2 < Re_p < 1000$ , 存在  $C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687})$ ,  $Re_p = \frac{2\rho_l u_p R_p}{\mu_l}$ , 整理可得

$$F_d = 6\pi \mu_l u_p R_p (1 + 0.15 Re_p^{0.687}). \quad (5)$$

5) 过余力<sup>[32]</sup>: 由气泡内压力和液体静水压力组成. 气泡内压力促使气泡脱离, 而液体静水压力则使得颗粒附着于气泡, 方向垂直于三相接触线;

$$F_e = \pi R_p^2 \sin^2 \alpha (2\sigma/R_b - \rho_l g D_h \sin \varphi), \quad (6)$$

式中,  $\varphi$  为重力与过余力之间的夹角.

6) 疏水力: 当疏水颗粒与气泡表面的距离

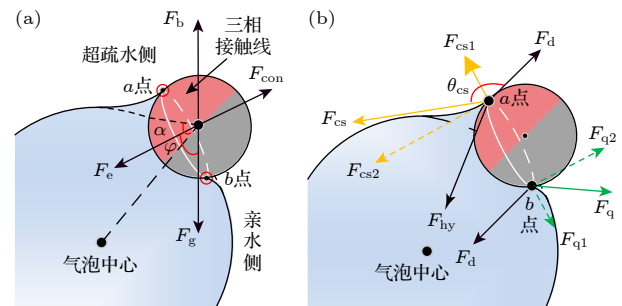


图 7 Janus 颗粒旋转过程中的受力分析 (a) Janus 颗粒中心受力图; (b) 三相接触线上超疏水侧与亲水侧的受力图

(包括重力  $F_g$ , 浮力  $F_b$ , 接触力  $F_{con}$ , 流体阻力  $F_d$ , 过余力  $F_e$ , 疏水力  $F_{hy}$ , 亲水侧毛细力  $F_{q1}$  和超疏水侧毛细力  $F_{cs}$ )

Fig. 7. Force analysis on Janus particle during rotation: (a) Force diagram of Janus particle's central; (b) the force diagram of superhydrophobic side and hydrophilic side on three phase contact line (Including gravity  $F_g$ , buoyancy  $F_b$ , contact force  $F_{con}$ , drag force  $F_d$ , excess force  $F_e$ , hydrophobic force  $F_{hy}$ , hydrophilic side capillary force  $F_{q1}$ , and superhydrophobic side capillary force  $F_{cs}$ ).



$h \rightarrow 0$  时, 经典的 DLVO 理论 (溶胶的经典稳定理论) 并不能描述气泡与颗粒的相互作用 [35], 因此 Ducker 等 [36] 提出疏水力是最重要的非 DLVO 力, 决定了颗粒与气泡是否发生黏附.

$$F_{hy} = K_{hy} R^* e^{(H_d/\lambda)}, \quad (7)$$

式中, 预指数参数  $K_{hy} = 2\pi\sigma(1 - \cos\theta_{cs})$ ,  $\theta_{cs}$  为超疏水侧接触角, 气泡-颗粒聚合体的等效半径  $R^* = R_p R_b / (R_p + R_b)$ ,  $\lambda$  为衰减长度.

7) 毛细力: 在三相界面上, 由于液面弯曲产生力, 固气界面间的液膜破裂形成三相接触线, 因此 Janus 颗粒附着在气泡上, 毛细力作用于三相接触线. 但由于亲疏水性的差异, Janus 颗粒两侧与气泡形成的接触角和毛细力并不相同, 为了方便进行受力分析, 将颗粒两侧所受毛细力分解为垂直于三相接触线和平行于三相接触线两个方向. 平行于三相接触线的亲水侧和超疏水侧毛细力分别为

$$\begin{aligned} F_{q1} &= \pi\sigma R_p \sin\alpha \cos(2\alpha - \pi/2), \\ F_{cs1} &= \pi\sigma R_p \sin\alpha \cos(\theta_{cs} - \alpha); \end{aligned} \quad (8)$$

垂直于三相接触线的亲水侧和超疏水侧毛细力分别为

$$\begin{aligned} F_{q2} &= \pi\sigma R_p \sin\alpha \sin(2\alpha - \pi/2), \\ F_{cs2} &= \pi\sigma R_p \sin\alpha \sin(\theta_{cs} - \alpha). \end{aligned} \quad (9)$$

这里, Janus 颗粒超疏水侧的有效毛细力作用点为超疏水侧与气泡的接触点, 力臂为  $R_p \sin\alpha$ , 方向垂直于三相接触线, 指向气泡一侧; 亲水侧的有效毛细力作用点为亲水侧与气泡的接触点, 力臂大小同样为  $R_p \sin\alpha$ , 方向垂直于三相接触线, 指向远离气泡一侧. 由于这两个力作用点不同, 且方向相反, 使得 Janus 颗粒发生旋转. 将上述 Janus 颗粒所受各力分解为平行于三相接触线和垂直于三相接触线, 具体如下.

平行于三相接触线方向受力:

$$\begin{aligned} F_g \sin\varphi + F_{hy} \cos\alpha + F_{q1} - F_b \sin\varphi \\ - F_{cs1} - 2F_d \cos\alpha = ma_1, \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $a$  为加速度. 垂直于三相接触线方向受力:

$$\begin{aligned} F_g \cos\varphi + F_e + F_{hy} \sin\alpha + F_{cs2} - F_{con} \\ - F_b \cos\varphi - F_{q2} = ma_2. \end{aligned} \quad (11)$$

结合 Janus 颗粒旋转中的受力, 可认为亲水侧和超疏水侧的旋转力矩分别为

$$T_q = F_{q2} R_p \sin\alpha, \quad T_{cs} = F_{cs2} R_p \sin\alpha + F_{hy} R_p \sin^2\alpha. \quad (12)$$

故颗粒所受合力矩为

$$T = T_{cs} + T_q = F_{cs2} R_p \sin\alpha + F_{hy} R_p \sin^2\alpha + F_{q2} R_p \sin\alpha. \quad (13)$$

结合 (7) 式、(9) 式和 (13) 式可知, Janus 颗粒所受合力矩与气泡当量半径、颗粒半径和超疏水侧接触角等因素有关, 这些因素对合力矩的影响集中体现在  $\alpha$  的变化上. 图 8 展示了 Janus 颗粒所受亲水侧力矩、超疏水侧力矩以及合力矩随  $\alpha$  的变化曲线, 可看出亲水侧力矩与超疏水侧力矩方向相反, 合力矩方向与超疏水侧力矩方向保持一致. 这说明, 合力矩方向受超疏水侧力矩影响较大, 亲水侧力矩阻碍 Janus 颗粒旋转运动的发生. 此外, 当  $\alpha < 70^\circ$  时, 合力矩随  $\alpha$  增大缓慢增大; 当  $\alpha > 70^\circ$  时, 合力矩增大速度明显加快, Janus 颗粒在此过程中发生旋转.

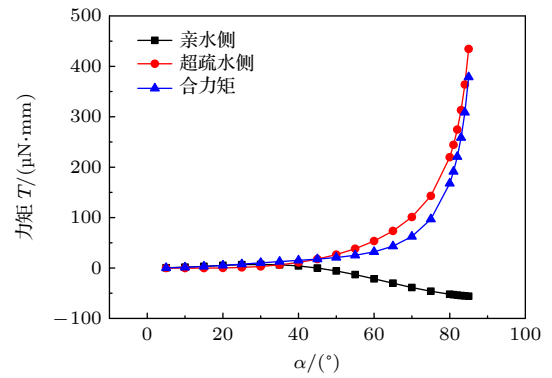


图 8 力矩  $T$  与  $\alpha$  的关系

Fig. 8. Relationship between torque  $T$  and  $\alpha$ .

## 4 结 论

在不同下落高度  $h$  下, 本文探究了带小气泡的 Janus 颗粒亲水侧、超疏水侧和分界面分别撞击气泡时的行为特征, 并对旋转过程中的 Janus 颗粒进行了受力分析, 具体如下.

1) Janus 颗粒无初速度接触气泡时, 颗粒不同润湿性表面与气泡的相互作用存在不同的行为特征, 当颗粒超疏水侧接触气泡时, 颗粒会保持超疏水侧接触并沿气泡滑动; 当亲水侧和分界面接触气泡时, 在沿气泡表面滑动过程中会发生旋转运动, 但旋转所用时间有所不同, 分界面接触气泡时所用时间要小于亲水侧接触气泡.

2) 在不同的下落高度下, 颗粒以不同速度碰撞气泡时总体趋势具有相似性, 但也呈现出一定的差异性. 中心距离  $D_{oo}$  最小值和最大值不同, 达到最值所用时间  $t$  和对应的滑移角度  $\theta$  也有所不同, 随着  $h$  的增大, 最大  $D_{oo}$  值不断增大, 达到最大值时的  $\theta$  依次增大, 所用的时间趋于减小.

3) 通过受力分析发现了 Janus 颗粒亲水侧和分界面接触气泡时会发生旋转的根本原因: 亲水侧和超疏水侧所受毛细力的方向和作用点不同, 因此形成了两个大小不同且方向相反的旋转力矩, 合力矩方向与超疏水侧力矩方向保持一致.

## 参考文献

- [1] Wang Y G, Zhang G J, Cui X J 2018 *ZTE. Tech. J.* **24** 48 (in Chinese) [王永贵, 张国俊, 崔晓俊 2018 中兴通讯技术 **24** 48]
- [2] Wei J J, Zhang Y H 2016 *J. Chem. Ind. Eng.* **67** 97 (in Chinese) [魏进家, 张永海 2016 化工学报 **67** 97]
- [3] Lin S Q, Zhao Y X, Lü Z Y, Lai Z C, Hu H T 2021 *J. Chem. Ind. Eng.* **72** 295 (in Chinese) [林石泉, 赵雅鑫, 吕中原, 赖展程, 胡海涛 2021 化工学报 **72** 295]
- [4] Nam Y, Aktinol E, Dhir V K, Ju Y S 2011 *Int. J. Heat Mass Transfer* **54** 1572
- [5] You S M, Kim J H, Kim K H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3374
- [6] Vassallo P, Kumar R, D'Amico S 2004 *Int. J. Heat Mass Transfer* **47** 407
- [7] Bang I C, Chang S H 2005 *Int. J. Heat Mass Transfer* **48** 2407
- [8] Peng J L, Guo H, You T Y, Ji X B, Xu J L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 044701 (in Chinese) [彭家略, 郭浩, 尤天涯, 纪献兵, 徐进良 2021 物理学报 **70** 044701]
- [9] Sarrot V, Guiraud P, Legendre D 2005 *Chem. Eng. Sci.* **60** 6107
- [10] Legendre D, Sarrot V, Guiraud P 2009 *Int. J. Multiphase Flow* **35** 163
- [11] Moreno-Atanasio R, Gao Y, Neville F, Evans G M, Wanless E J 2016 *Chem. Eng. Res. Des.* **109** 354
- [12] Gao Y, Evans G M, Wanless E J, Moreno-Atanasio R 2014 *Adv. Powder Technol.* **25** 1177
- [13] Whelan P F, Brown D J 1956 *Trans. Inst. Min. Metall.* **65** 181
- [14] Nguyen A V, Evans G M 2004 *J. Colloid Interface Sci.* **273** 271
- [15] Wang W, Zhou Z, Nandakumar K, Xu Z, Masliyah J H 2003 *J. Colloid Interface Sci.* **259** 81
- [16] Scheludko W, Toshev B V, Bojadjev D T 1976 *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* **72** 2815
- [17] Paulsen F G, Pan R, Bousfield D W, Thompson E V 1996 *J. Colloid Interface Sci.* **178** 400
- [18] Wang W, Zhou Z, Nandakumar K, Xu Z, Masliyah J H 2003 *Int. J. Miner. Process.* **68** 47
- [19] Nguyen A V 2007 *Int. J. Environment and Pollution* **30** 231
- [20] Gao Y, Wang G, Evans G M, Wanless E J, Sathe M, Mitra S, Moreno-Atanasio R 2015 *Procedia. Eng.* **102** 1346
- [21] Gennes P 1992 *Angew. Chem. Int. Ed.* **31** 842
- [22] Xiao Y, Meng D, Xu C Y, Zhang R H, Yao Y S, Wu S Z, Yao C L 2020 *Chin. J. Lasers* **47** 133 (in Chinese) [肖轶, 孟东, 徐呈艺, 张瑞华, 姚燕生, 吴思竹, 姚成立 2020 中国激光 **47** 133]
- [23] Wang L L, Cui H H, Zhang J, Zheng X, Wang L, Chen L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 220201 (in Chinese) [王雷磊, 崔海航, 张静, 郑旭, 王磊, 陈力 2016 物理学报 **65** 220201]
- [24] Yuan Y, Gao C Y, Wang D L, Zhou C, Zhu B H, He Q 2019 *J. Nanotechnol.* **10** 1324
- [25] Dong X F, Gustafsson E, Price M, Dai Z F, Xu M Q, Pelton R 2017 *Colloids Surf. A* **533** 159
- [26] Khurana G, Sahoo N, Dhar P 2019 *Phys. Fluids* **31** 072003
- [27] Manica R, Klaseboer E, Chan D Y C 2015 *Langmuir* **31** 6763
- [28] Sun Z 2017 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [孙钊 2017 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [29] Sun Q, Klaseboer E, Khoo B C, Chan D Y C 2013 *Phys. Rev. E* **87** 043009
- [30] Safaei S, Archereau A, Hendy S C, Willmott G R 2019 *Soft Matter* **15** 6742
- [31] Safaei S, Hendy S C, Willmott G R 2020 *Soft Matter* **16** 7116
- [32] Drzymala J 1994 *Int. J. Mine. Process.* **42** 153
- [33] Zhang Y, Liu Q, Li W B, Lian X L, Li J L, Rao X X 2020 *Can. J. Phys.* **98** 981
- [34] Nguyen A V, Evans G M 2004 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **28** 381
- [35] Hu Y H, Qiu G Z, Wang D Z 1994 *J. Cent. South Inst. Min. Metall.* **25** 310 (in Chinese) [胡岳华, 邱冠周, 王淀佐 1994 中南矿冶学院学报 **25** 310]
- [36] Ducker W A, Xu Z, Israelachvili J N 1994 *Langmuir* **10** 3279



# Behavior characteristics of Janus particles impacting bubbles\*

Zhao Chang<sup>1)</sup> Ji Xian-Bing<sup>1)2)†</sup> Yang Yu-Hao<sup>1)</sup> Meng Yu-Hang<sup>1)</sup>  
Xu Jin-Liang<sup>1)2)</sup> Peng Jia-Lue<sup>1)</sup>

1) (*Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*)

2) (*Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System, Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China*)

( Received 6 April 2022; revised manuscript received 30 June 2022 )

## Abstract

In order to better apply amphiphilic Janus particles to phase change heat transfer, the hydrophilic-superhydrophobic Janus particles are prepared with copper balls. The particle size is 1.0 mm and the bubble diameter is 3.0 mm. The behavior of Janus particle with small bubbles impinging on bubbles at different heights is studied. The falling heights are 0, 10.0, 20.0, 30.0 and 40.0 mm. The results show that there are obvious differences in behavior characteristic among Janus particles with different wettability surfaces when they hit the bubble. When the superhydrophobic side contacts the bubble, it will slide to the bottom of the bubble without rotation along the bubble surface; when the hydrophilic side contacts the bubble, it will first slide along the bubble surface for a certain distance, and then rotate, resulting in strong disturbance to the bubble. When the interface between hydrophilic and superhydrophobic contacts the bubble, the particle will start to rotate at the moment of contact. When Janus particle impacts the bubble at a certain height, the hydrophilic surface generally contacts bubble first. With the increase of height, the degree of deformation of Janus particles pulling bubbles increases. The force analysis shows that the main reason for the rotation of Janus particles is that the action points and directions of capillary force acting on different wettable surfaces are different, resulting in corresponding rotation torque.

**Keywords:** Janus particle, bubble, collision, behavioral characteristic

**PACS:** 47.10.A–, 47.55.Ca, 47.55.D–

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220632

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFC1907002) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52176154).

† Corresponding author. E-mail: [jxb@ncepu.edu.cn](mailto:jxb@ncepu.edu.cn)

## Janus颗粒撞击气泡的行为特征

赵昶 纪献兵 杨聿昊 孟宇航 徐进良 彭家略

## Behavior characteristics of Janus particles impacting bubbles

Zhao Chang Ji Xian-Bing Yang Yu-Hao Meng Yu-Hang Xu Jin-Liang Peng Jia-Lue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 214701 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220632

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220632>

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>

#### 弹性介质包围的球形液体腔中气泡和粒子的相互作用

Interaction between bubble and particle in spherical liquid cavity surround by an elastic medium

物理学报. 2020, 69(23): 234301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200764>

#### 声场中球形空化云中气泡的耦合谐振

Coupled resonance of bubbles in spherical cavitation clouds

物理学报. 2019, 68(13): 134301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190360>

#### 稠密颗粒射流倾斜撞击颗粒膜特征

Characteristics of granular sheet of dense granular jet oblique impact

物理学报. 2018, 67(10): 104501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172092>

#### 纳米液滴撞击柱状固体表面动态行为的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation on dynamic behaviors of nanodroplets impinging on solid surfaces decorated with nanopillars

物理学报. 2021, 70(13): 134704 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210094>

#### 激光诱导熔石英表面损伤修复中的气泡形成和控制研究

Formation and control of bubbles during the mitigation of laser-induced damage on fused silica surface

物理学报. 2018, 67(1): 016103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171839>