柔性超疏水基底上的受控聚并诱导液滴跳跃

Gopal Chandra Pal[†]、Siddharth SS[†]、Manish Agarwal[‡]、Chander Shekhar Sharma[†]*

[†]热流体研究实验室，[‡]机械工程系，印度理工学院罗帕尔分校，鲁普纳加尔，旁遮普邦 140 001，印度 *电子邮箱：chander.sharma@iitrpr.ac.in，电话：+91-1881-232358

摘要

在超疏水基底上聚并的静置液滴会自发地从表面跳起。在这一过程中，聚并开始时可利用的过剩表面能克服最小表面黏附，并转化为足够的动能，将液滴推离基底。本文表明，如果超疏水基底本身具有柔性，聚并诱导的液滴跳跃速度会显著降低。通过详细的实验测量和数值模拟，我们证明，协同调节基底刚度和基底频率，可使液滴跳跃速度和跳跃高度分别降低至多 40 % 和 64%。我们表明，这种迄今尚未探索的液滴聚并跳跃特性，可有效应用于露水和雾水收集。此外，通过以蝴蝶翅膀基底为例，我们证明，由于许多天然超疏水基底具有固有的柔性，这种效应很可能也会在其上显现。

关键词

聚并诱导跳跃、液滴聚并、超疏水、柔性基底、水收集

引言

在超疏水基底上，小尺寸液滴会发生聚并诱导液滴跳跃。在这一聚并过程中，过剩的表面能克服极小的接触线耗散，使聚并后的液滴从表面跳离(1)。这种无需外部能量、且不依赖重力的表面液滴去除方式，对众多应用至关重要，例如提高工业冷凝器的冷凝传热效率 (2, 3)、用于电子设备热管理的相变冷却 (4, 5)、构造防冰表面 (6)、能量采集 (2, 7) 以及水收集 (8–10)。因此，已有大量实验研究(1, 3, 11–20)和数值研究 (11, 13, 15–17, 21–29) 探讨表面宏观纹理和润湿性等参数对跳跃过程整体效率的影响 (11, 12)。

在此，我们研究柔性纳米纹理超疏水基底上的聚并诱导液滴跳跃。聚并液滴会对基底施加瞬态力 (19)，我们证明，通过调节基底刚度和固有频率，可以控制这一作用力，进而控制跳跃速度。我们通过实验分析单个液滴聚并事件，发现通过调节基底刚度 (k) 和固有频率 (w_n)，微升液滴的跳跃速度最多可降低 40%。这意味着液滴跳跃高度近乎降低 64%。这对露水和雾水收集应用尤为重要，因为超疏水基底可通过聚并诱导液滴跳跃实现较高的表面更新速率 (30–32)，但跳跃液滴容易被基底附近的风裹挟而流失 (8)。因此，我们通过实验评估基底柔性对雾水收集的影响，发现使用柔性基底可以减少跳跃液滴的散逸。此外，我们采用流固耦合（VOF-弹簧质量模型）建模框架对这一现象进行了数值分析，该框架成功捕捉了液滴聚并过程与基底变形之间的耦合。我们还提出了一种简化的半经验解析模型，以阐明如何设计柔性基底，从而进一步提高液滴聚并诱导的跳跃速度和高度的可控降幅。此外，由于许多天然超疏水表面本身具有柔性，预计其上也会出现液滴跳跃速度降低的现象。我们以蝴蝶翅膀这一典型天然表面为例，展示了跳跃速度的降低。

结果与讨论：

我们通过喷涂分散在异丙醇中的市售硅烷化二氧化硅纳米颗粒（Soft 99，Glaco）(19, 33)，在聚二甲基硅氧烷（PDMS）、铜和铝制成的柔性薄片上制备了柔性超疏水纳米织构表面。我们还在玻璃载玻片上涂覆相同涂层，将其用作刚性基底进行对比。我们谨慎控制各类基底的润湿性，使其前进接触角和接触角滞后保持一致，从而单独考察基底刚度对聚并诱导液滴跳跃的影响。（参见材料与方法）。我们使用超疏水微量移液器吸头(34)将毫米级液滴滴加到基底上，以进行聚并诱导液滴跳跃实验。每次实验中，基底均以两端固定梁构型安装（见图 2B），随后使用超疏水吸头轻轻推动一滴液滴靠近另一滴，从而触发聚并。我们使用高速摄像机记录聚并过程，并将 马会购彩平台

对所捕获的图像序列进行分析，以研究液滴运动和基底变形。（参见材料与方法和图S1）。

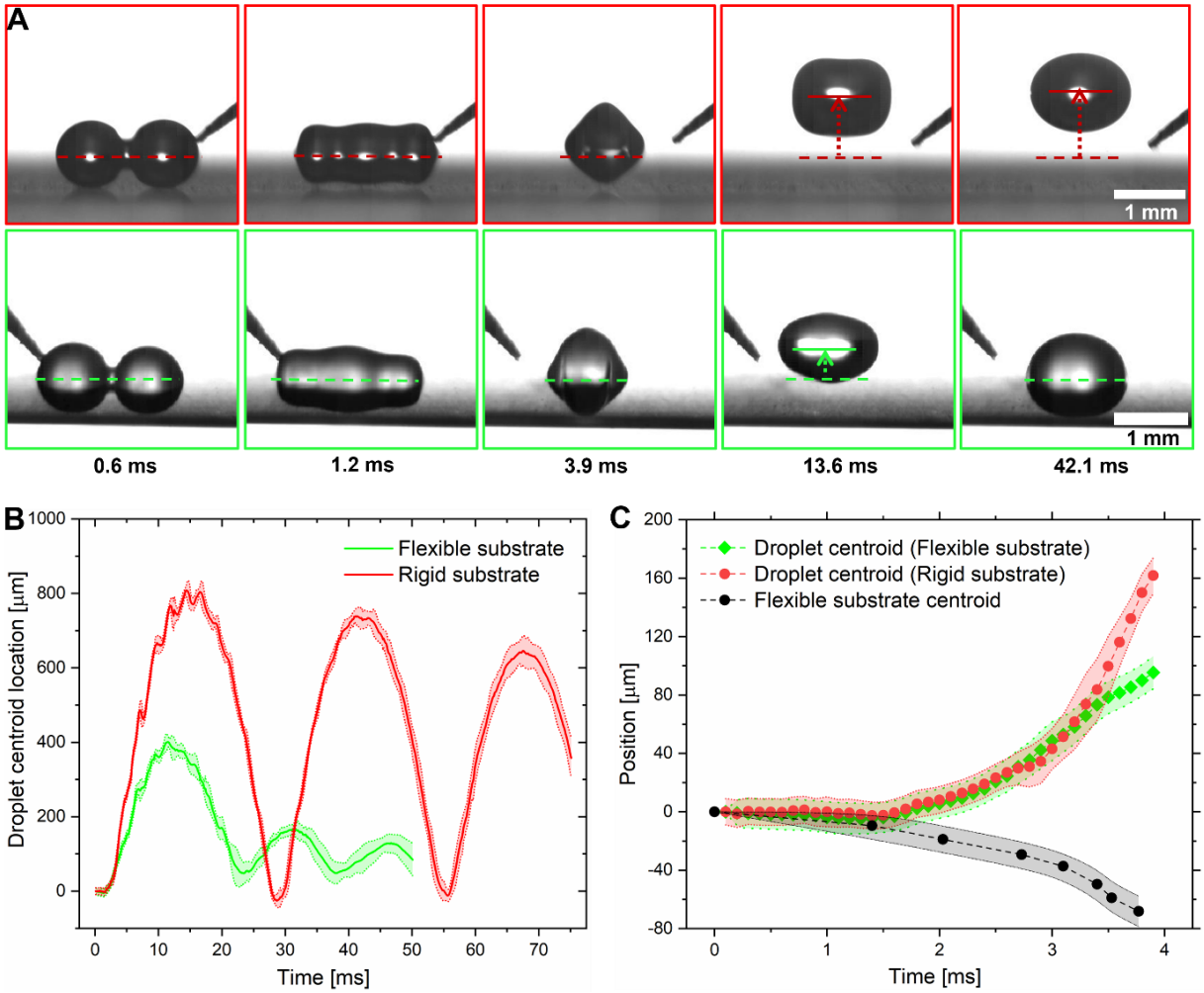


图1A：图像序列比较了直径为~*1* mm的两个液滴在水平超疏水刚性（红色）和柔性（绿色）基底上的聚并。虚线和实心水平线分别标记参考液滴质心位置和当前液滴质心位置。参考质心位置对应于聚并过程的聚并开始。柔性基底是一个PDMS 梁，其厚度、长度和宽度分别为 L_0 和~ *52* μm、15mm和4.2mm。B：与图 A对应的刚性（红色）和柔性（绿色）超疏水基底上跳跃液滴位置的时间演变。第一个峰值表示由于液滴的聚并诱导跳跃而达到的最大高度。后续峰值表示液滴在重力作用下返回基底时的弹跳。C：B的放大视图，从聚并开始到液滴跳跃的时刻。还展示了聚并液滴下方柔性基底（灰色）的变形。三个质心位置均是相对于各自初始位置测量的。B 和 C 中曲线周围的阴影区域表示质心位置的不确定性（有关误差分析的详细信息，请参阅补充信息第S2节）。

在图 1 中，我们比较了柔性超疏水基底（聚二甲基硅氧烷，绿色）上的聚结诱导液滴跳跃与刚性表面（红色）上的情况。图 1A 中的图像序列显示，两种液滴聚并过程最初几乎以相同的方式演变：聚并液滴之间的颈部不断扩展，并在 ~1.2 ms 时与基底接触。随后，随着颈部继续扩展，柔性基底在聚并液滴施加的力作用下发生变形，最终聚并后的液滴从基底上跳起。然而，如 t=13.6 ms 时的图像所示，液滴从柔性表面跳起所达到的最大高度比从刚性基底跳起时低近 50%。图 1B 突出了这一点，展示了液滴从刚性和柔性基底上发生聚并诱导跳跃后，其位置随时间的演变（另请参阅补充视频 1）。液滴从刚性基底上升至最大高度后，在重力作用下返回表面，随后发生一系列液滴撞击和反弹事件。显然，与刚性基底的情况（红色曲线）相比，由于基底变形，柔性基底上的聚并液滴跳跃及后续液滴反弹均受到显著抑制（绿色曲线）。图 1C 展示了从聚并开始到液滴从表面跳起这一时刻，柔性基底的变形和液滴运动情况。从图中可以看出，直到 ~1.2 ms（即颈部撞击基底的时刻；参见图 1A 中的图像序列），基底几乎没有发生位移。此后，聚并液滴的质心开始向上移动，同时柔性基底在聚并液滴施加的力作用下开始变形，表现为其局部向下位移。如图所示，柔性基底的变形最终使相应的跳跃液滴曲线在 ~3 ms 时偏离刚性基底对应的曲线。

我们通过在一系列不同长度 L_0 的PDMS、铜和铝制薄型柔性超疏水片材上进行液滴聚并实验，研究基底柔性对液滴聚并和跳跃动力学的影响；实验针对两种液滴尺寸 D_0~ 1 mm 和 ~ 1.2 mm 的聚并液滴展开。如图2A所示，我们发现，随着柔性基底变形（y_j）的增加，液滴跳跃速度（v_j）显著降低。此处，y_j 是在液滴跳跃瞬间测得的，并且是相对于聚并液滴重量所导致的基底静态变形而言的，如图2B所示（更多细节请参阅补充信息第S2节）。

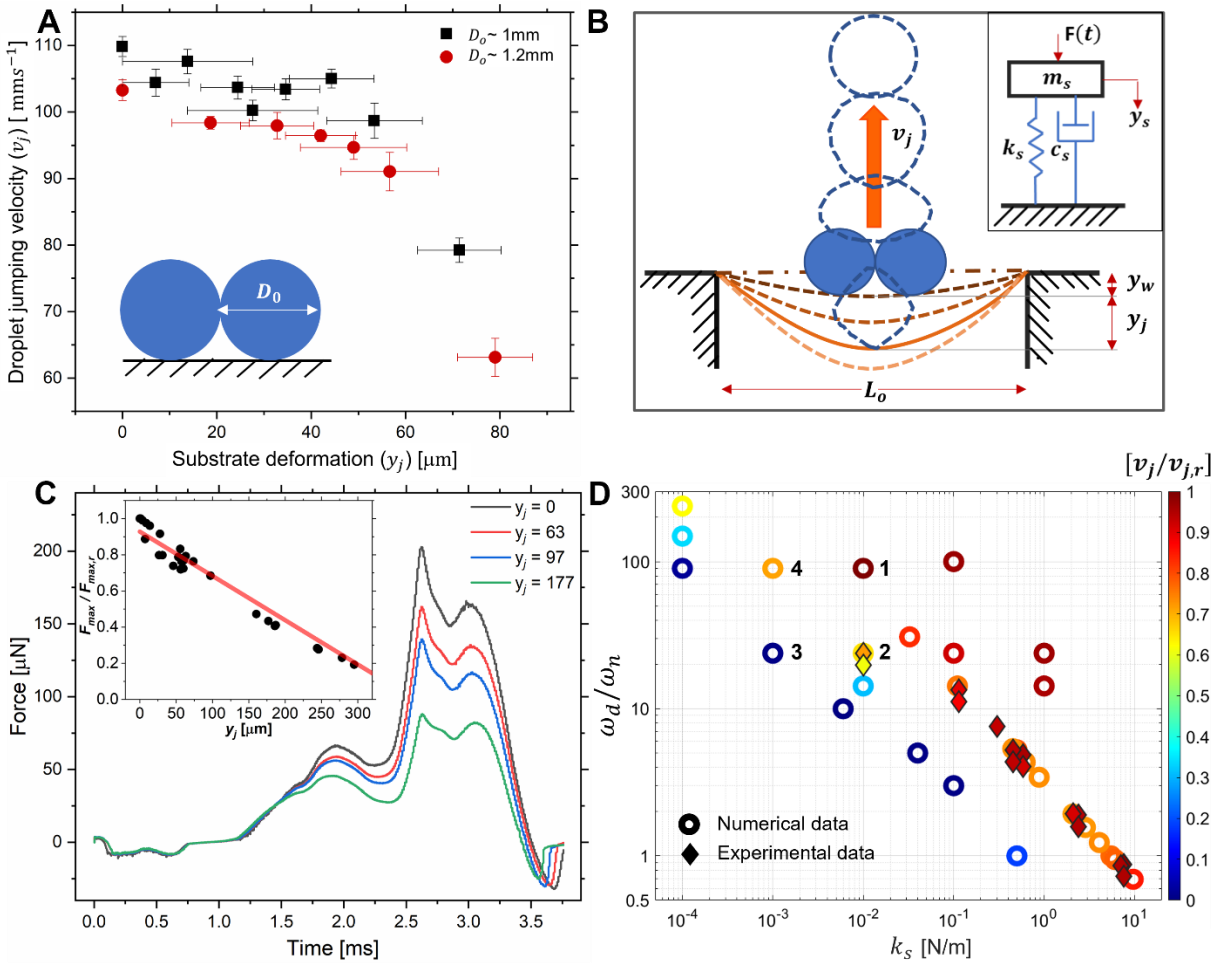


图2A：聚并诱导的液滴跳跃速度(v_j) 作为液滴从表面跳跃瞬间的基底变形(y_j) 的函数。显示了两种液滴尺寸的结果。变形为零表示刚性基底的情况。通过改变基底长度以及基底材料来实现基底变形的变化（有关更多细节，请参见补充信息第 S3 节中的表S1）。B：示意图（未按比例绘制），定义了由液滴重量(y_w) 引起的基底静态变形以及跳跃瞬间的基底变形(y_j)。C：不同 y_j水平下，聚并液滴施加的力 $F(t)$。插图展示了最大聚并力比(F_{max} $F_{max,}$/ $_r$) 与 y_j 之间的关系。此处， F_{max} 和$F_{max,r}$ 分别表示柔性和刚性基底上的最大聚并力。D：柔性和刚性基底上的液滴跳跃速度之比(v_j $v_{j,}$/ $_r$)作为基底刚度(k_s) 和频率比(ω_d/ω_n) 的函数。菱形标记表示两种液滴尺寸的实验结果，对应于图2A所示的结果。圆形标记表示数值结果。

图 2C 比较了从聚并开始到跳跃时刻，刚性基底和三种典型柔性基底所对应的计算力 $F(t)$。显然，基底柔性显著降低了聚并力，而这最终导致了

液滴跳跃速度的降低。这一力 $F(t)$通过一种简化的流固耦合建模框架进行估算，其中液滴聚并过程通过三维流体体积（VoF）方法进行建模，并通过采用单自由度线性弹簧-质量-阻尼器系统模型来捕捉基底柔性对聚并过程的影响（见图 2B 插图）(36)。((有关基于 VoF 的流固耦合框架的更多细节，请参阅材料与方法和补充信息第 S3 节)。弹簧-质量-阻尼器系统模型由以下方程控制 (35)。

$$m_s\ddot{y}(t) + c_s\dot{y}(t) + k_s y(t) = F(t) \qquad [1]$$

其中，$F(t)$是聚并液滴施加在基底上的力，$y(t)$是基底变形，而 m_s、 k_s 和c_s 分别是基底的等效质量、刚度和阻尼系数。研究发现，所考虑的所有柔性基底的阻尼系数均可忽略不计，并通过模态分析估算每个基底的等效质量和刚度（详见补充信息第S3节）。我们利用这一框架，在具有广泛k_s 和固有频率（$\omega_n = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}$）值的多个柔性基底上获得 $F(t)$。对聚并力$F(t)$的分析表明，最大聚并力（$F_{max} = \max_t [F(t)]$）随 y_j 呈线性降低（见图2C中的插图）。此外，如图2C所示，在大多数柔性基底上，$F(t)$的时间变化都十分相似。因此，任意柔性基底上的 $F(t)$均可表示为 $F(t) \approx (1 - \frac{y_j}{y_0}) F_r(t)$，其中$y_0$ 为拟合常数，$F_r(t)$为在刚性表面上计算得到的聚并力。这些观察结果使我们能够建立一个半解析模型，用于预测聚结诱导液滴跳跃的跳跃速度，并分离出控制柔性基底上液滴聚并过程的基本参数。首先，将$F_r(t)$表示为通过快速傅里叶变换（FFT）分析获得的主导频率分量，如下所示：$F_r(t) = \sum A_i \sin(\omega_i t + B_i \omega_i t) \cos(\,)$（详见补充信息第S4节）。随后，方程[1] 的解给出了y_j的以下关系式

$$y_j = \frac{y_0 f_j}{y_0 k_s + f_j}, \text{其中 } f_j = \sum_i \frac{A_i}{1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2} \left[\omega_i t_j - \frac{\omega_i}{\omega_n}\omega_n t_j\right] + B_i\left[\omega_i t_j - \omega_n t_j\right] \qquad [2]$$

$\{\sin(\,)(\,)\sin(\,)\cos(\,)\cos(\,)\}$，而 t_j 表示液滴跳跃的时刻。已知 y_j 后，

可根据液滴的净力平衡计算液滴在任意基底上的跳跃速度，如下所示。

$$v_j = \frac{1}{m_d}\int_0^{t_j}(F(t) - F_\sigma(t) - m_d g)dt$$

$$= \frac{1}{m_d}\left(1 - \frac{y_j}{y_0}\right)\sum_i\left\{\left(\frac{B_i}{\omega_i}\right)\sin(\omega_i t_j) - \left(\frac{A_i}{\omega_i}\right)\left[\cos(\omega_i t_j) - 1\right]\right\} - \left(v_0 - \frac{y_j}{t_0}\right) - g t_j \qquad [3]$$

其中，m_d 是两个聚并液滴的总质量。项 $\frac{1}{m_d}\int F_\sigma(t)\,dt$ 表示由水-空气界面张力引起的液滴与表面之间的毛细黏附贡献。我们发现，它可以与基底变形相关联，表示为 $\frac{1}{m_d}\int F_\sigma(t)\,dt \approx \left(v_0 - \frac{y_j}{t_0}\right)$，其中 v_0 和 t_0 是拟合常数（详情请参阅补充信息第 S5 节）。

方程 [2-3] 给出的跳跃速度半解析解表明，对于任意基底，跳跃速度都是基底刚度 k_s 和基底频率比$\left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)$的函数。我们还发现，主导频率$\min_i[\omega(i)]$，与基于液滴惯性-毛细时间尺度的液滴振荡频率($\omega_d = 2\pi/\tau_d$)相差不超过 ~15%(19, 35, 36)。其中，ρ 和 σ 分别为液体密度和液 - 气界面张力。本质上，该半解析模型表明，跳跃速度可根据频率比（ω_d/ω_n）和基底刚度（k_s）进行分析（详见补充信息第 S5 节）。图 2D 展示了液滴聚并诱导的跳跃速度比（$v_j\ v_{j,r}$）随这些参数变化的实验和数值结果。其中，$v_{j,r}$ 为刚性基底上的跳跃速度。图中显然可见，低（k_s）和低（ω_d/ω_n）值的组合能够降低跳跃速度，且图 2D 中清晰地显示出此类组合的帕累托前沿。这是因为此类基底会产生较大变形 y_j，从而最大限度地减小聚并诱导跳跃过程中基底对液滴的反作用力（见图 S6A）。

基底（k_s）和（ω_d/ω_n）的这种协同效应，可以通过考察图 2D 中标记的四种柔性基底上的液滴聚并来理解。图 3A 展示了这些基底的计算得到的基底变形。尽管在施加的聚并力作用下，k_s较低的基底变形更大（例如比较基底 1 和 4），但仅降低k_s不足以使基底变形最大化。这是因为即使k_s

较低，ω_d/ω_n 相对较高的基底仍具有较大的惯性，因此对聚并液滴施加的力响应较慢（例如比较基底 3 和 4）。这实质上意味着，要使液滴脱离时的基底变形最大化，从而使液滴跳跃速度最小化，基底必须同时具有较低的k_s 和较低的ω_d/ω_n；在这四种基底中，基底 3 符合这一条件。图 3B 所示的液滴向上运动动能对比也反映了这一点。基底 3 的最大变形对应于过剩表面能转化为向上运动动能的比例最小。在此，任意时刻t的归一化向上运动动能（UKE^*）计算为 $UKE^* = 0.25m_d v_c^2$（t）（$\Delta A\sigma$）/，其中 v_c（t）是液滴质心的瞬时速度，ΔA 是两滴聚并液滴在聚并开始时（即时间$t = 0$）与时刻t_j 的总表面积之差（另见图 S6B）。

图 3C 展示了液滴在超疏水刚性基底、柔性基底 3 上聚并，以及在空气中聚并时液滴形状和速度场的演变。在空气中，聚并形成的颈部可自由扩张。因此，大小相同的液滴在空气中聚并时呈对称状态，液滴不会沿垂直于聚并轴的方向移动。相比之下，在刚性基底上，聚并对称性被打破，从而导致液滴跳跃。在 k_s 和 ω_d/ω_n 比值较低的柔性基底 3 上，基底在聚并液滴施加的力作用下发生变形，使这种对称性破缺程度降至最低。因此，速度场和液滴形状的演变更接近液滴在空气中的聚并情形。

通过适当选择基底的几何形状和材料，可以为柔性基底找到 k_s 和 ω_d/ω_n 比值的最佳组合。在我们的实验中，对于在长度、宽度和厚度分别为 15mm、4.2mm 和 52 μm 的 PDMS基底上聚并的 1.2 mm 液滴，我们实现了最高达 ~ 40% 的跳跃速度降低（即 v_j $v_{j,}$ / $_r$~ 0.6）（见图 2D）。这使液滴跳跃高度降低了近 64%。利用我们的半解析模型，我们可以估算，通过适当选择基底材料和几何形状，有可能设计出能进一步提高跳跃速度和跳跃高度降低幅度的柔性基底（详见补充信息第 S7 节）。例如，该模型预测，采用聚合物材料（如低密度聚乙烯（LDPE），密度为 ~918 kg/m^3 (37, 38)）制成的薄型柔性基底，若其厚度、长度和宽度为 $(0.03 \times 15 \times 4)$ mm，则跳跃速度和跳跃高度的降低幅度最高可分别达到 70%（即 v_j $v_{j,}$ / $_r$~ 0.3）和 90%。

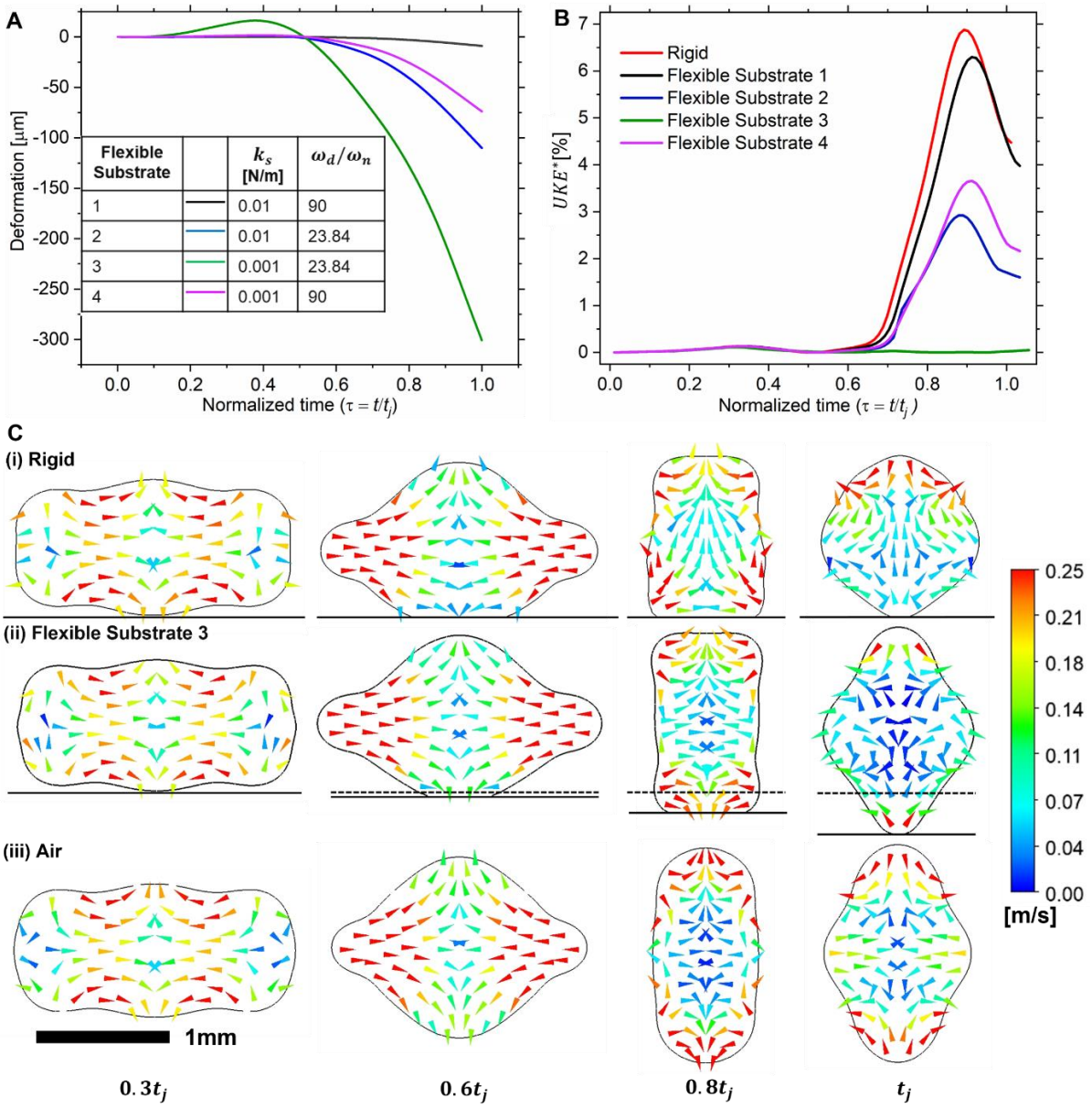


图 3A： 图 2D 中标出的四种基底，其基底变形随归一化时间 $\tau = t/t_j$ 的变化。图中列出了基底刚度(k_s)和频率比(ω_d/ω_n)。B：四种基底上液滴向上运动的归一化动能。在四种基底中，基底 3 的 k_s 和 ω_d/ω_n 比值较低，产生的变形最大，因此液滴向上的动能最低。C：比较直径为 $D_0 = 1$ mm 的液滴在以下情况下聚并时计算得到的液滴形状和速度场：i）刚性超疏水基底；ii）柔性超疏水基底 3；iii）液滴在空气中聚并。所选时刻对应于聚并开始、$0.3t_j$（颈部与基底接触）、$0.6t_j$（液滴达到最大拉长形态）、$0.8t_j$（液滴与基底间的接触面积最大）以及 t_j（液滴跳跃时刻）。对于液滴在空气中的聚并，展示了相同时刻的图像。（i）和（ii）中的黑色实线和虚线分别表示表面的初始位置和瞬时位置。

随后，我们探究了基底柔性对液滴聚并诱导的跳跃的影响；这些液滴的尺寸显著小于上述受控实验中所研究的液滴。这一点对于露水和雾水收集尤其重要，在此过程中，超疏水表面能够诱导液滴跳离，从而实现较高的表面更新速率。然而，这类跳跃液滴容易因被周围气流卷吸而损失。柔性超疏水表面上降低的跳跃速度可用于减少此类损失。在此，我们通过受控的雾水收集实验研究这一方面：雾气被一层薄的超疏水柔性基底截获。正如多项研究所报道的那样（39，40），典型雾滴的尺寸范围为 ~ 3-50 μm。与毫米级液滴相比，这类小液滴在聚并过程中对基底施加的力要小得多。然而，正如图 S8 所示的力的演变所证实的那样，较小液滴的聚并动力学与较大液滴相似。因此，为了影响这类小液滴的跳跃动力学，采用了安装在垂直悬臂梁构型中的薄型柔性超疏水铜箔。这种取向使我们能够实现基底刚度 k_s ，其比水平两端固定梁构型的刚度小近两个数量级。此外，为了降低基底 ω_d/ω_n 比，通过去除多余材料来减小样品质量。实验中使用了一台雾气发生器，其生成液滴的尺寸约为 6 微米（41）；通过记录从基底落到镜面抛光铝收集器片上的液滴位置来表征液滴跳跃速度（实验细节请参见《补充信息》第 S9 节）。图 4A 和 B 显示了在持续超过 2 小时的雾气暴露期间，从刚性基底（红色）和柔性基底（绿色）上落下的所有液滴的叠加图。每张图均由尺寸为 ~ 100 微米的液滴组成，其尺寸几乎比撞击基底的雾滴大两个数量级。因此，被基底截获的雾滴主要是由于聚并诱导跳跃而离开表面的。

图 4C 展示了与图 4A 所示分布图对应的归一化累积液滴分布。可以观察到，对于柔性表面，大部分液滴（~80%）落在距离基底 20 mm 以内；而对于刚性基底，落在相同距离范围内的液滴仅占 ~40%（相应的液滴分布见图 S10）。这些结果表明，在雾水和露水收集过程中，使用柔性基底有望减少跳跃液滴的飞散。

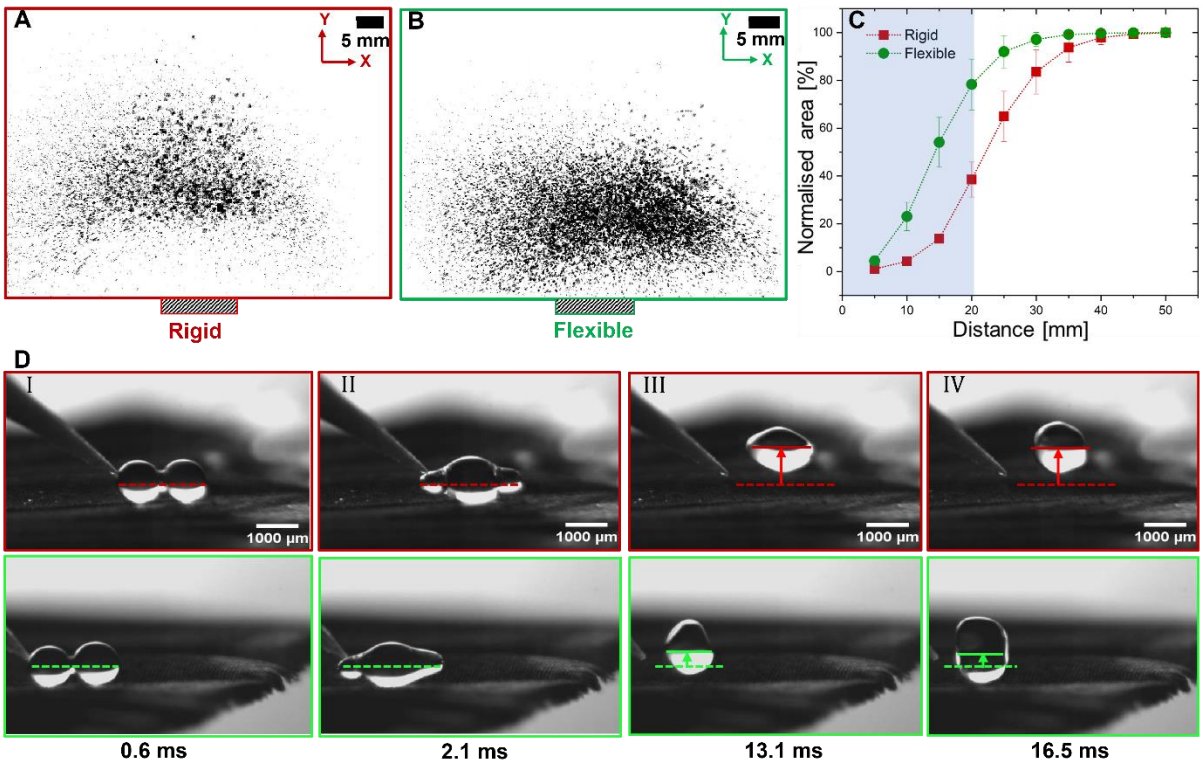


图 4 从刚性（A）和柔性（B）超疏水表面跳跃并沉积在收集板上的雾水液滴分布图，收集板的位置如图 S9 所示。两种情况下，基底宽度均为 13 mm，其位置如阴影框所示。C：刚性（红色）和柔性（绿色）基底的归一化累积液滴分布比较，以收集板上的归一化累积覆盖面积表示，并作为距基底沿 Y 方向距离的函数。阴影区域标示收集板上的一个区域，该区域对柔性基底的总液滴覆盖面积贡献了 ~*80*%。D：支撑状态（红色）与无支撑状态（绿色）蝴蝶翅膀（巴黎凤蝶）上聚并诱导液滴跳跃的图像序列。帧（a）表示聚并事件开始后不久的时刻。后续帧分别表示聚并后液滴达到最大伸长，以及柔性和刚性情况下达到最大跳跃的时刻。两组图像序列中的水平虚线均表示液滴初始位置，竖直实线用于在视觉上区分跳跃高度。

自然界中也常见超疏水表面，许多物种进化出了对其生存至关重要的自清洁能力。在许多情况下，这种由聚结诱导液滴跳跃实现的能力有助于蝉（42）和水黾（43）等昆虫保持翅膀和腿部洁净、避免受潮，从而维持其所需功能。同样，也有一些植物具有超疏水自清洁表面，例如荷叶（44）和小麦叶片（45）。由于许多此类天然超疏水表面也具有柔性，基底柔性可能会影响整体跳跃动力学。为探究这一方面，我们进行了液滴聚并

在我们地区常见的蝴蝶巴黎凤蝶的翅膀上进行的实验 (46)。我们进行了两组实验：一组模拟自然条件，此时蝴蝶翅膀可像悬臂梁一样自由活动；另一组则在翅膀下方加装刚性支撑，以模拟刚性超疏水基底的状态。图 5D 对比了支撑状态（顶排，红色标示）和自然状态（底排，绿色标示）下，蝴蝶翅膀上的聚结诱导液滴跳跃。在这项实验中，与翅膀由刚性基底支撑时相比，翅膀柔性使跳跃高度降低了 ~ 45%。因此，由于翅膀固有的柔性，在自然状态下，翅膀上的聚结诱导液滴跳跃显著减弱。由此我们推测，天然表面的固有刚度会显著影响通过聚并诱导的跳跃去除露水和雾滴的效果，进而影响其自清洁能力。

总之，我们的研究为柔性超疏水基底上的聚结诱导液滴跳跃现象提供了基础性认识。我们的实验和数值研究表明，通过低基底刚度与基底频率的协同组合，可以显著抑制聚并诱导的液滴跳跃速度。此外，数值建模框架和半解析模型可用于设计柔性超疏水基底，以应用于露水和雾水收集等领域。我们展示了一个概念验证，证明了在雾水收集背景下有效利用这一特性的可行性。最后，通过在一个具有代表性的天然表面上开展液滴-液滴聚并实验，我们证明了这种减弱的液滴跳跃效应很可能会出现在天然超疏水基底上，而其中许多基底具有柔性。

材料与方法

超疏水表面制备：我们通过喷涂商业化的二氧化硅纳米颗粒溶液，制备了刚性和柔性超疏水基底；这些二氧化硅纳米颗粒均匀分散在异丙醇溶液中（Glacco Mirrorcoat“Zero”.Soft99 Co.）（19）。刚性超疏水表面制备于玻璃基底上。对于柔性基底，我们使用了厚度为10微米的铜箔（Nanoshel LLC）、厚度为20微米的铝箔（Nanoshel LLC）以及PDMS（Sylgard184 DowCorning）。为制备PDMS基底，将基体与交联剂按10:1的化学计量比混合后，在玻璃基底上进行旋涂。随后，将PDMS置于烘箱（BinderInc.）中，在80^{o} C下固化2小时，并将固化后的PDMS从玻璃基底上剥离，以获得薄PDMS片材。通过改变旋涂速度，制备了不同厚度的PDMS基底。

润湿性表征：我们使用接触角测量仪（Holmarc Opto-Mechatronics Ltd，型号HO-IAD-CAM-01A）测量了所有表面的表观前进接触角（θ_a）和后退接触角（θ_r）。对于超疏水铜和铝基底，表观前进接触角和接触角滞后分别为 163 ± 1.2^0 和 3.8 ± 1.3^0 。对于聚二甲基硅氧烷基底，表观前进接触角和接触角滞后分别为 161 ± 2.1^0 和 4.2 ± 1.2^0 。对于超疏水玻璃基底，表观前进接触角和接触角滞后分别为 163 ± 2.4^0 和 3.4 ± 1.4^0 。

实验步骤：我们在刚性和柔性超疏水基底上进行了液滴-液滴聚并实验。通过选择基底材料（铝、铜和聚二甲基硅氧烷）及尺寸的各种组合，改变基底的刚度（k_s）和固有频率（ω_n）。基底被小心地安装在两端固定梁构型中，其中基底的一端用双面胶带固定在夹持器上，另一端通过施加10 μN的静载荷进行固定。这样做是为了避免对薄基底进行预拉伸，因为由此产生的预应力会导致薄柔性基底的刚度和固有频率发生显著变化。所有实验均在主动隔振光学平台上进行，以消除外部振动对实验的影响。基底进行了接地，以避免静电荷对该过程产生影响（47）（有关实验装置的详细信息，请参见图S1）。我们使用自行开发的超疏水微量移液器吸头将液滴滴加到基底上。超疏水微量移液器吸头通过在颗粒-聚合物溶液中进行多次浸涂循环，随后在80^oC下的烘箱中加热制成。聚合物溶液由Merck的17 ml丙酮、3mlCapstoneST 200和Evonik的一克疏水性气相二氧化硅纳米颗粒混合制备（34）。在每次实验中，首先将两个液滴滴加到基底上，随后使用超疏水木质尖端缓慢移动其中一个液滴，使其与另一个液滴接触，从而触发聚并。我们通过图像分析确保在此过程中传递给液滴的任何动能都很小（< ~5%的液滴表面能）（48）。所有图像均使用Photron Fastcam SA4相机以每秒10000帧的速度记录。实验结束后，使用Fiji ImageJ对图像进行分析，以研究液滴运动和基底变形。（有关更多详细信息，请参见第S2节）。

聚并诱导液滴跳跃的三维数值建模：

液滴聚并过程基于三维流体体积法进行建模。控制方程采用商用软件ANSYSFluent(11, 13)求解。我们在模拟中选择了不可压缩层流模型，并假设表面上的接触角为 180^0。由于制备表面具有较高的前进接触角和非常低的接触角滞后，该假设是有效的 (11,49, 50)。利用聚并过程的对称性来缩减整体计算域，其中对聚并液滴的一半进行建模 (13)。液滴所处的表面被建模为无滑移壁面边界。计算域的其他所有侧面均施加开放边界条件。模拟中选取的计算域尺寸为 4R×4R×4R，其中 R 为液滴半径 (13)（见图 S3）。刚性基底的数值模型通过Liu等人 (50)的结果进行了验证。对于柔性基底，表面被建模为无滑移移动壁面。该壁面根据每个时间步通过用户自定义函数计算得到的基底变形进行移动。该函数根据方程 [S1] (51, 52)，将基底建模为弹簧-质量系统，从而计算基底变形。任意时刻 t 的力 $F(t)$通过对壁面边界上的流体压力进行积分获得。柔性基底上液滴聚并的数值模型通过与实验结果进行对比得到了验证（更多细节请参阅补充信息第 S3 节）。

天然表面：巴黎凤蝶（Papilio Polytes），又称普通莫门蝶，采集于春季印度理工学院罗帕尔分校附近地区。为模拟天然状态，在两种条件下进行了翅膀上的液滴聚并实验：一种是将翅膀安装成水平悬臂梁结构，另一种是用一层薄水膜将翅膀支撑在玻璃片上（35）。测量了翅膀上的前进接触角和后退接触角，分别为 159 ± 4.2^O 和 153 ± 3.3^O，。

作者单位

GopalChandra Pal[†]、SiddharthSS[†]、Chander Shekhar Sharma[†]

[†]热流体研究实验室，[‡]机械工程系，印度理工学院罗帕尔分校，旁遮普邦鲁普纳加尔 140 001，印度 *电子邮箱：chander.sharma@iitrpr.ac.in，电话：+91-1881-232358

Manish Agarwal[‡]

[‡]机械工程系，印度理工学院罗帕尔分校，鲁普纳加尔，旁遮普邦 140 001，印度

作者贡献

C.S.S.构思并监督了该研究。C.S.S. 和G.C.P. 设计了实验。G.C.P. 制备了样品，开展了实验并进行了数值模拟。M.A.、G.C.P 和 S.S.S. 开发了简化的流固耦合建模框架。G.C.P、C.S.S.和 M.A. 分析了结果。M.A. 和 C.S.S. 开发了解析模型。G.C.P、C.S.S. 和 M.A. 撰写了论文，所有作者均已阅读并批准该论文。

致谢

我们感谢 Ravi Kant Upadhyay 和 Anand S. 就样品制备和实验方法提供的宝贵讨论。C.S.S. 感谢印度理工学院罗帕尔分校通过 ISIRD计划为本研究提供资助（资助编号：9- 388/2018/IITRPR/3335）。

参考文献

1. J. B. Boreyko, C.-H. Chen, 超疏水表面上的自驱动滴状冷凝液。《物理评论快报》103, 184501 (2009)。 2. N. Miljkovic, D. J. Preston, R. Enright, E. N. Wang, 超疏水纳米结构表面上的电场增强冷凝。ACS Nano. 7, 11043–11054 (2013)。 3. X. Chen, R. S. Patel, J. A. Weibel, S. V. Garimella, 分级超疏水表面上多个冷凝液滴的聚并诱导跳跃。《科学报告》6, 1–11 (2016)。 4. J. B. Boreyko, Y. Zhao, C. H. Chen, 平面跳跃液滴热二极管。《应用物理快报》99, 234105 (2011)。 5. B. Traipattanakul, C. Y. Tso, C. Y. H. Chao, 一种利用静电诱导聚并跳跃液滴的相变热二极管。《国际传热与传质杂志》135, 294– 304 (2019)。 6. J. B. Boreyko, C. P. Collier, 跳跃液滴超疏水表面上的延迟结霜生长。ACS Nano. 7, 1618–1627 (2013)。 7. N. Miljkovic, D. J. Preston, R. Enright, E. N. Wang, 跳跃液滴静电能量采集。《应用物理快报》105 (2014)。 8. X. Ma, Y. Wang, H. Wu, Y. Wang, Y. Yang, 通过冷却超疏水表面，从空气中获取跳跃水滴，实现高效水分收集。《科学报告》2019 91. 9, 1–7 (2019)。 9. I. Haechler, H. Park, G. Schnoering, T. Gulich, M. Rohner, A. Tripathy, A. Milionis, T. M. Schutzius, D. Poulikakos, 利用辐射冷却实现全天候、连续 24 小时的大气集水。《科学进展》7, 3978–4001 (2021)。 10. X. Liu, J. Trosseille, A. Mongruel, F. Marty, P. Basset, J. Laurent, L. Royon, T. Cui, D. Beysens, T. Bourouina, 为露水收集板量身设计硅材料。《iScience》24, 102814 (2021)。 11. H. Vahabi, W. Wang, J. M. Mabry, A. K. Kota, 超全疏表面宏观纹理上液滴的聚并诱导跳跃。《科学进展》4, eaau3488 (2018)。

12. X. Yan, L. Zhang, S. Sett, L. Feng, C. Zhao, Z. Huang, H. Vahabi, A. K. Kota, F. Chen, N. Miljkovic, 液滴跳跃：液滴尺寸、表面结构、钉扎和液体性质的影响。ACS Nano. 13, 1309–1323 (2019)。 13. H. Vahabi, W. Wang, S. Davies, J. M. Mabry, A. K. Kota, 超全疏表面上液滴聚并诱导的自推进。ACS应用材料与界面. 9, 29328–29336 (2017)。 14. D. Lu, M. Zhao, H. Zhang, Y. Yang, Y. Zheng, 非对称 V 形凹槽超疏水表面上聚并诱导液滴跳跃的自增强 (2020)。 15. K. Wang, X. Ma, F. Chen, Z. Lan, 超疏水表面结构对液滴跳跃速度的影响。Langmuir. 37, 1779–1787 (2021)。 16. F. C. Wang, F. Yang, Y. P. Zhao, 聚并诱导自推进液滴的尺寸效应。《应用物理快报》98 (2011)。 17. T. Q. Liu, W. Sun, X. Y. Sun, H. R. Ai, 超疏水表面上凝结液滴跳跃机制研究。Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 414, 366– 374 (2012)。 18. K. Wang, R. Li, Q. Liang, R. Jiang, Y. Zheng, Z. Lan, X. Ma, 超疏水表面上聚并诱导液滴跳跃的临界尺寸比。《应用物理快报》111 (2017)。 19. T. Mouterde, T. V. Nguyen, H. Takahashi, C. Clanet, I. Shimoyama, D. Quéré, 聚并液滴如何从超疏水表面跳离：测量与模型。Phys. Rev. Fluids. 2, 1–7 (2017)。 20. K. Wang, Q. Liang, R. Jiang, Y. Zheng, Z. Lan, X. Ma, 超疏水表面上液滴聚并的形貌演变与动力学。AIChE J. 64, 2913– 2921 (2018)。 21. B. Li, F. Xin, W. Tan, G. Zhu, 疏水纤维上聚并诱导液滴跳跃的新理论模型 (2018)。 22. Y. Nam, H. Kim, S. Shin, 聚并诱导跳跃液滴的能量与流体动力学分析。《应用物理快报》103 (2013)。 23. F. Liu, G. Ghigliotti, J. J. Feng, C. H. Chen, 莱顿弗罗斯特表面上液滴聚并后自推进跳跃。J. Fluid Mech. 752, 22–38 (2014)。 24. R. Enright, N. Miljkovic, J. Sprittles, K. Nolan, R. Mitchell, E. N. Wang, 聚并液滴如何跳跃。ACS Nano. 8, 10352–10362 (2014)。 25. K. Wang, R. Li, Q. Liang, R. Jiang, Y. Zheng, Z. Lan, X. Ma, 超疏水表面上聚并诱导液滴跳跃的临界尺寸比。《应用物理快报》111, 061603 (2017)。 26. S. Farokhirad, J. F. Morris, T. Lee, 液滴聚并诱导跳跃：惯性与黏度效应。Phys. Fluids. 27 (2015)。 27. Z. Liang, P. Keblinski, 超疏水表面上纳米尺度液滴的聚并诱导跳跃。《应用物理快报》107 (2015)。 28. H. Cha, C. Xu, J. Sotelo, J. M. Chun, Y. Yokoyama, R. Enright, N. Miljkovic, 聚并诱导纳米液滴跳跃。Phys. Rev. Fluids. 1, 064102 (2016)。 29. Y. Chen, Y. Lian, 非润湿表面上液滴聚并诱导自推进行为的数值研究。Phys. Fluids. 30 (2018)。 30. S. Gao, Z. Hu, Z. Yuan, X. Wu, 利用细线灵活高效地调控超疏水表面上的聚并诱导液滴跳跃。《应用物理快报》118 (2021)。 31. K. Song, G. Kim, S. Oh, H. Lim, 滴状冷凝过程中通过微小孔洞周期阵列增强集水。《应用物理快报》112 (2018)。 32. G. Zhao, G. Zou, W. Wang, R. Geng, X. Yan, Z. He, L. Liu, X. Zhou, J. Lv, J. Wang, Soft Matter, 4462–4476 (2020)。 33. C. Lv, P. Hao, X. Zhang, F. He, 纳米织构增强超疏水表面上滴状冷凝的去润湿转变。ACS Nano. 9, 12311–12319

（2015）。34. Z. Dong、J. Ma、L. Jiang，通过超疏水针头喷嘴操控和分配微升/纳升级液滴。ACS Nano。7，10371–10379（2013）。35. W. T. Thomson，《振动理论及其应用》（CRC Press，第 2018 版）。36. T. Vasileiou、J. Gerber、J. Prautzsch、T. M. Schutzius、D. Poulikakos，通过基底柔性增强超疏水性。《美国国家科学院院刊》113，13307–13312（2016）。37. W. M. Barentsen、D. Heikens，聚苯乙烯/低密度聚乙烯共混物的力学性能。《Polymer (Guildf)》14，579–583（1973）。38. J. R. Maurey、C. R. Schultheisz、W. R. Blair、C. M. Guttman，“标准参考物质认证：标准参考物质 1473b，低密度聚乙烯树脂。”39. K.-C. Park、S. S. Chhatre、S. Srinivasan、R. E. Cohen、G. H. McKinley，雾水收集用渗透性纤维网络结构的优化设计。Langmuir。29，13269–13277（2013）。40. J. Fritz、H. Meyer、W. Tseng、N. H. Lin、O. Klemm，雾中液滴尺寸分布与空气湿度的协变：一种方法学研究。《水文学杂志》594，125934（2021）。41. 空气压缩式雾化器 *405A/B* 用户手册（yuwell，中国）。42. K. M. Wisdom、J. A. Watson、X. Qu、F. Liu、G. S. Watson、C. H. Chen，通过自驱动跳跃的凝结液滴实现超疏水表面的自清洁。《美国国家科学院院刊》110，7992–7997（2013）。43. Q. Wang、X. Yao、H. Liu、D. Quéré、L. Jiang，水黾腿部凝结水的自去除。《美国国家科学院院刊》112，9247–9252（2015）。44. C. Lv、P. Hao、Z. Yao、Y. Song、X. Zhang、F. He，荷叶上的液滴凝结与跳跃接力。《应用物理快报》103，021601（2013）。45. R. Mukherjee、H. A. Gruszewski、L. T. Bilyeu、D. G. Schmale、J. B. Boreyko，跳跃液滴凝结与风协同传播植物病原体孢子。《美国国家科学院院刊》118，e2106938118（2021）。46. M. S. Thakur、H. S. Mehta、V. K. Mattu，印度旁遮普邦罗帕尔湿地及其周边地区的蝴蝶（鳞翅目：锤角亚目）名录。《昆虫学研究杂志》34，85–94（2010）。47. Q. Sun、D. Wang、Y. Li、J. Zhang、S. Ye、J. Cui、L. Chen、Z. Wang、H. J. Butt、D. Vollmer、X. Deng，用于程序化液滴输运的表面电荷印刷。《自然·材料》18，936–941（2019）。48. S. Li、F. Chu、J. Zhang、D. Brutin、D. Wen，移动液滴与静止液滴聚并诱导的液滴跳跃：初始速度的影响。《化学工程科学》211，115252（2020）。49. M. Reyssat、D. Richard、C. Clanet、D. Quéré，动态超疏水性。《法拉第讨论》146，19–33（2010）。50. F. Liu、G. Ghigliotti、J. J. Feng、C. H. Chen，非润湿表面上液滴聚并后自驱动跳跃的数值模拟。《流体力学杂志》752，39–65（2014）。51. C. Zhang、Z. Wu、C. Shen、Y. Zheng、L. Yang、Y. Liu、L. Ren，软弹性表面的固有频率和实际频率对液滴从静止柔性羽片回弹的影响。*5020* | Soft Matter。16，5020（2020）。52. J. H. Kim、J. P. Rothstein、J. K. Shang，液滴冲击过程中柔性超疏水表面的动力学。Phys. Fluids。30（2018）。

受控的聚并诱导的液滴跳跃在柔性超疏水基底上
基底

Gopal Chandra Pal[†]、Siddharth SS[†]、Manish Agarwal[‡]、Chander Shekhar Sharma[†]*

[†]热流体研究实验室，[‡]印度理工学院罗帕尔分校机械工程系，印度旁遮普邦鲁普纳加尔 140 001*电子邮箱：chander.sharma@iitrpr.ac.in，电话：+91-1881-232358

目录

S1	用于刚性和柔性基底上液滴-液滴聚并实验的实验装置 基底
S2	用于液滴跳跃高度测量和误差分析的图像处理
S3	聚并诱导液滴跳跃的三维数值建模： 模型验证
S4	聚并液滴施加的力的快速傅里叶变换（快速傅里叶变换）分析 该基底
S5	用于估算跳跃速度的半经验模型
S6	基底变形和能量分析的详细信息
S7	优化基底几何形状和材料性质以最大限度降低 跳跃速度。
S8	液滴尺寸对聚并动力学的影响
S9	雾水收集的实验细节

S1. 用于刚性和柔性基底上的液滴-液滴聚并实验的实验装置

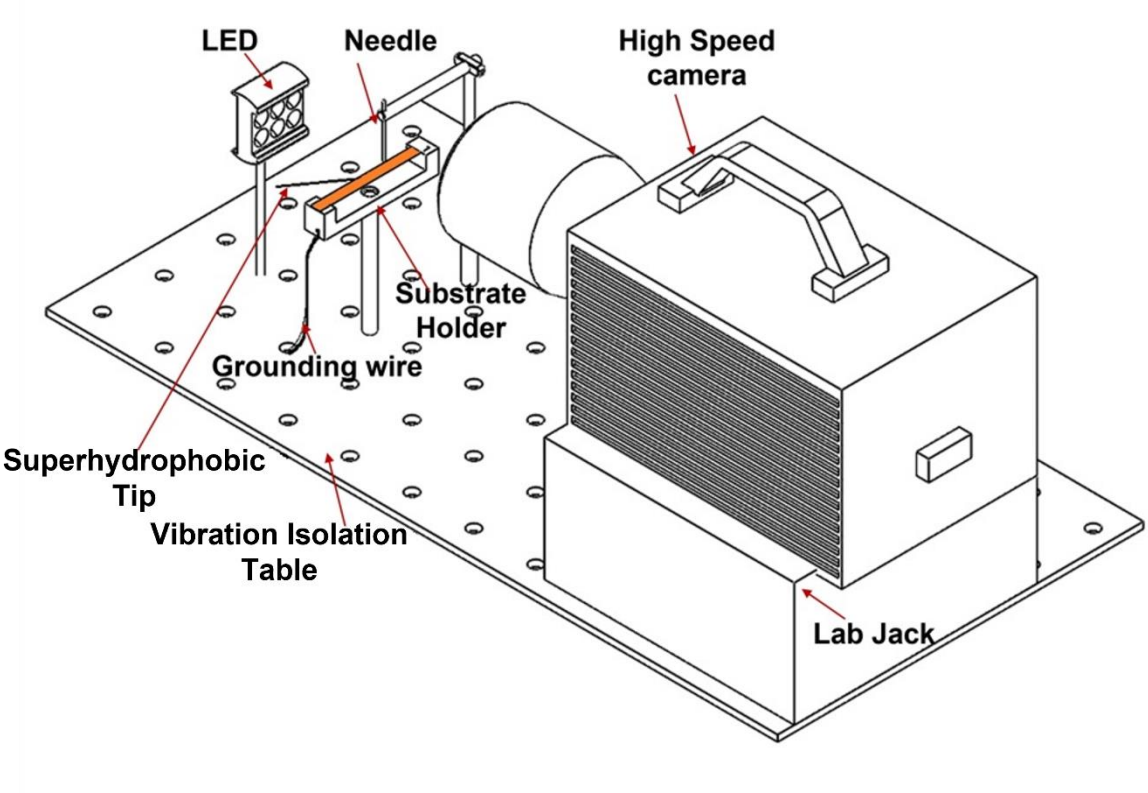


图 S1：聚结诱导液滴跳跃的实验装置

S2：用于液滴跳跃高度测量和误差分析的图像处理

a) 图像处理：对高速摄像机拍摄的图像进行处理，以测量刚性和柔性基底两种情况下的跳跃高度。如图 S2a 所示，由于滴落在柔性基底上的液滴自重，柔性基底会从水平位置（虚线标示）发生一定程度的变形（y_w）。如正文图 2B 所示，聚并过程施加的力所导致的基底变形，是相对于基底的这一静态变形构型进行测量的。

所有实验图像均使用ImageJ软件通过阈值处理转换为二值图像。转换后，通过测量液滴质心随时间的移动来分析液滴运动。所得数据用于估算跳跃速度，计算式为 $v_j \approx \sqrt{2gH_j}$ 其中，H_j 是液滴在跳跃瞬间的位置与从表面算起的最大高度之间的垂直距离，如图S2b所示。我们还通过对上述获得的液滴轨迹进行抛物线拟合来估算 v_j（1）。两者均

估算得出的值相近于 v_j 偏差小于~3%。同样地，我们还处理图像，以测量由聚并事件施加的力所导致的基底变形。

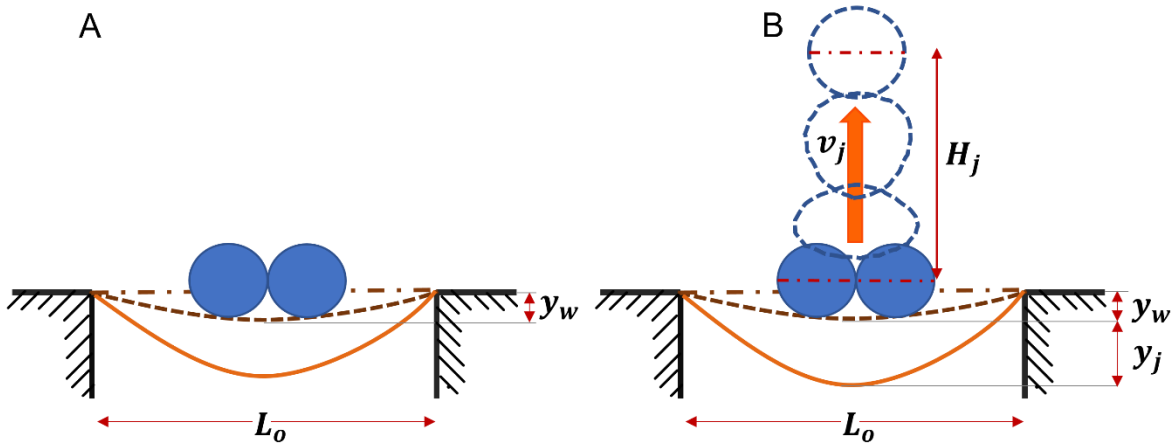


图 S2：(a) 自重和液滴重量导致的基底变形 (b) 对 H_j 的测量，用于估算跳跃速度 v_j

b) 误差分析：

i) 实验图像处理对液滴运动测量的影响：分析从实验图像中获得的液滴轨迹时，会得到正文图 1B 所示的轨迹。该起伏轨迹的产生，是因为每张图像中的液滴质心位置测量，都是基于三维跳跃液滴的二维图像进行的。这一因素会导致液滴轨迹存在实验不确定性，我们通过对每项实验进行多次重复试验来估算这种不确定性。质心位置不确定性的另一个来源，是由于光学成像分辨率有限而对图像进行阈值处理。因此，任一时刻质心位置的净误差通过误差传播得到，即 $\Delta E = \sqrt{\Delta E_s{}^2 + \Delta E_R{}^2}$，其中 ΔE_R 是通过多次重复实验估算的随机误差，ΔE_s 是由图像处理分辨率有限造成的系统误差 (2)。

ii) 通过超疏水微量移液器吸头进行液滴分配的影响：在聚并实验期间，使用超疏水吸头将液滴分配到基底上。我们发现，在柔性/刚性基底上进行的特定聚并情况下，所有重复试验中的液滴直径变化均小于 4%。对于所有情况，我们至少进行了三次试验。

S3：聚并诱导液滴跳跃的三维数值建模：模型验证

a) 柔性基底的固有频率、刚度、等效质量和阻尼系数的计算：

与实验中一样，基底被建模为两端固定的梁。使用 ANSYS Mechanical 软件进行模态分析，获得基底的固有频率（ω_n）和模态刚度（k_s）（3）。模态分析的控制方程由方程（S1）给出。

$$(\boldsymbol{K} - \omega_n^2 \boldsymbol{M})\phi = 0 \quad \text{(S1)}$$

其中，$\boldsymbol{K}$、 $\boldsymbol{M}$ 和ϕ 分别表示刚度矩阵、质量矩阵和振型。通过进行网格无关性分析，确保所得模型解的正确性。铜和铝的材料性质取自基底制造商提供的数据。聚二甲基硅氧烷的材料性质取自文献（4）。表S1列出了不同基底对应于第1阶模态的刚度（k_s）和固有频率（ω_n）。

铝和铜的阻尼比取自文献，其数值约为~ 10^{-3}（5，6）；对于PDMS基底，则使用对数衰减法估算阻尼比为 ~ 10^{-2} ，其中 $\zeta = (ln|\delta_1/\delta_2)|/2\pi$。 $ln|\delta_1/\delta_2)|$表示对数衰减率（7）。因此，我们在分析中忽略了阻尼的影响。

序号	材料	长度, mm	宽度, mm	厚度, 微米	ω_n, 弧度/秒	k_s, N/m
1	铝	25	4	20	1045.64	2.4
2	铝	40	4	20	408.2	0.587
3	铜	25	4	10	376.21	0.45
4	铜	40	4	10	146.95	0.1137
5	PDMS	15	4.4	52	83.05	0.01

表S1：模式1对应的基底固有频率和刚度值

b) 刚性超疏水表面上的液滴聚并：为捕捉聚并诱导液滴跳跃事件，我们使用商业软件 ANSYS Fluent，对静置于光滑超疏水表面上的两个液滴进行了三维 VOF 数值模拟。对于网格

独立性方面，对于液滴直径为 1 mm 的液滴尺寸，我们分别采用每个半径 26 个单元、每个半径 40 个单元和每个半径 53 个单元的三种网格。每个半径 40 个单元与每个半径 53 个单元情况下的力大小偏差，低于每个半径 26 个单元与每个半径 40 个单元情况下的偏差。此外，对于每个半径 40 个单元和每个半径 53 个单元的网格，最大力大小的差异小于 2.5%，液滴脱离时间的差异小于 5%。因此，所有数值模拟均采用每个半径 40 个单元。带边界条件的计算域及计算网格如图 S3A 所示。在网格密度固定的情况下，直径为 1.06 mm 的液滴聚并数值结果与刚性超疏水表面上的相应实验结果进行了验证，如图 S3B 所示。

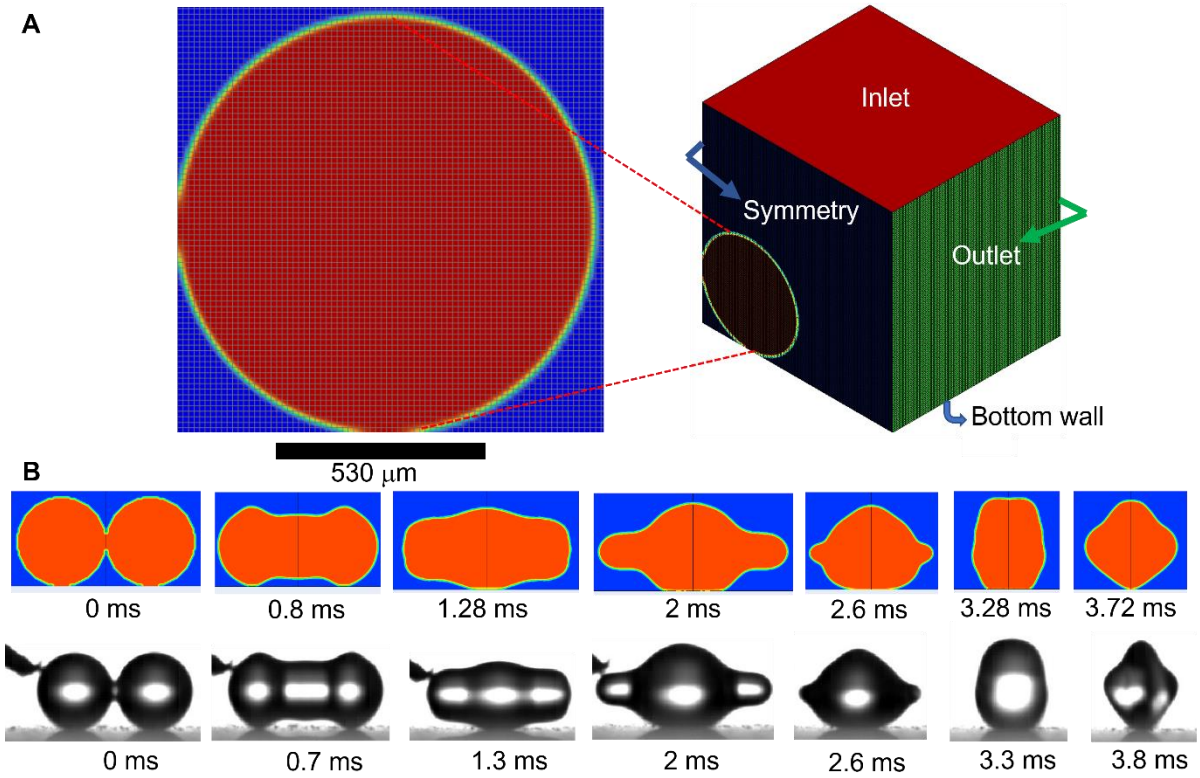


图 S3 A：基于 VoF 的三维 CFD 仿真所用的计算网格和边界条件。B：液滴尺寸为 $D_0 = 1.06$ mm 时，数值结果（下排）与实验结果（上排）的验证

c）柔性超疏水表面上的液滴聚并：

为了对柔性超疏水基底上的液滴聚并进行建模，除了上述所描述的聚并液滴的 VoF建模之外，我们还需要对聚并液滴施加的力作用下的基底变形及其对聚并过程的影响进行建模。为此，我们采用了一种简化的流固耦合

模型化方法，其中基底变形通过动态移动边界策略实现（*7*、*8*）。这里，代表基底的壁面运动是根据集总弹簧-质量系统计算得到的基底变形来定义的，该系统能够考虑基底的多种振动模态（*9*）。在将基底建模为集总系统时，我们采用了线性假设。尽管基底变形较大，因而刚度本质上是非线性的，但我们发现，线性集总弹簧-质量系统模型仍能充分捕捉基底变形。集总质量系统通过用户自定义函数，在每次迭代中使用前向欧拉法求解。计算得到的基底速度被传递给求解器，用于确定壁面运动；与此同时，质量守恒、动量和流体相分数控制方程由压力求解器进行求解（*10*）。

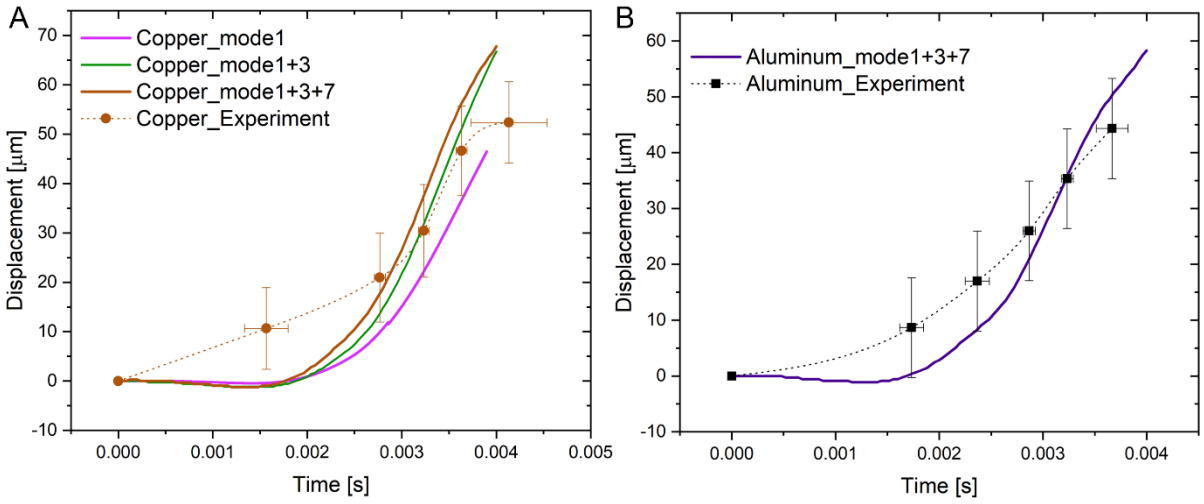


图 S4：基于三维 VoF 方法构建的简化流固耦合建模框架，在纳入不同数量的基底变形模态时，所得基底位移与 1.06 mm 液滴在 A：薄铜基底和 B：长度为 40 mm 的铝基底上聚并的实验测量结果的比较。

如上文（a）小节所述，通过模态分析可获得多个模态的模态刚度和模态质量值。通过将预测的基底变形与实验测量结果进行比较，我们可以确定聚并液滴施加的力作用下，主导基底变形的模态。实验基底变形值通过高速成像获得。例如，图S4A展示了长度为40 mm的薄铜基底（表S1中的基底4）的实验测量结果与CFD模拟得到的基底变形对比。图中显示了三条计算结果曲线，整体计算中纳入的振动模态数量逐渐增加。预测值与测量值的比较结果♀♀♀♀

基底变形表明，考虑第一、第三和第七振动模态，足以预测基底变形。对于一块长40 mm的铝基底（表S1中的基底2），将预测的基底变形与测量值进行比较，也验证了这一点，如图S4b所示。此外，我们注意到，在液滴聚并并从基底跳离的过程中，第一模态分别贡献了铜基底近75%和铝基底90%的变形。因此，为了定性理解基底柔性参数对液滴聚并过程的影响，我们在用户定义函数中计算基底变形时仅考虑第一模态；正文图2D所示的所有计算结果均采用相同的建模方法。

S4：聚并液滴施加于基底上的力的快速傅里叶变换（快速傅里叶变换）分析

我们在 MATLAB 中进行了快速傅里叶变换分析，以确定聚并液滴作用于刚性基底 $F_r(t)$ 上的力中占主导地位的谐波分量。刚性基底所受力的快速傅里叶变换分量见下表。此外，正如正文所述，瞬态力是通过 CFD分析计算得到的。我们发现，主导频率 $[\omega_1]$ 与基于液滴惯性-毛细时间尺度（$\tau_d = \frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{\rho D_O^3}{\sigma}}$）计算的液滴振荡频率（$\omega_d = \frac{2\pi}{\tau_d}$）相差不超过 ~15%（9、11、12）。其中，$\rho$ 和σ 分别为液体密度和液-气界面张力。

频率（Hz）	快速傅里叶变换分量（μm）
0	0.09145
268.8172	$-0.01363 + i\ 0.1318$
537.6344	$-0.0625 + i\ 0.0187$

表S2：由$D_0 = 1\ mm$的液滴聚并施加在刚性基底上的瞬态力的FFT分量

S5. 用于估算跳跃速度的半经验模型

聚并液滴施加的力导致柔性基底发生变形，其遵循正文中的方程 [1]，现重列如下以供参考。

$m_s\ddot{y}(t) + c_s\dot{y}(t) + k_s y(t) = F(t)$ [1]

其中，$F(t)$是聚并液滴施加在基底上的力，而m_s、 k_s 和c_s分别是基底的等效质量、刚度和阻尼系数。我们有

只考虑了一种结构变形模式，因为如S3节所示，这是一个合理的假设。此外，由于基底的阻尼可忽略，方程 [1]可简化为

$$m_s\ddot{y}(t) + k_s y(t) = F(t). \qquad \text{[S2]}$$

此外，如 2C 插图所示，液滴离开时，作用在基底上的力是基底变形的线性函数 y_j。因此，作用在柔性基底上的力可通过以下关系与刚性基底的情况联系起来：

$$F(t) \approx \left(1 - \frac{y_j}{y_0}\right) F_r(t). \qquad \text{[S3]}$$

此外，刚性基底上的力可用其主导频率分量（在 S4 节中获得）表示为：

$$F_r(t) = \sum_i A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t) \qquad \text{[S4]}$$

利用方程 [S3] 和 [S4], , 对方程 [S2] 求解 $y(t)$，初始条件如下：

$$y = 0 \text{ and } \dot{y} = 0 \text{ at } t = 0 \qquad \text{[S5]}$$

因此，得到 $y(t)$ 的解如下：

$$y(t) = \frac{1}{k_s}\left(1 - \frac{y_j}{y_0}\right)\sum_i \frac{1}{\left(1-\left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2\right)}\left\{A_i\left[\sin(\omega_i t) - \left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)\sin(\omega_n t)\right] + B_i[\cos(\omega_i t) - \cos(\omega_n t)]\right\} \qquad \text{[S6]}$$

由于在 $t = t_j$ 时 $y = y_j$， [S6] 给出了 y_j 的解，如正文方程 [2] 所示，现重现如下：

$$y_j = \frac{y_0 f_j}{y_0 k_s + f_j},$$

$$\text{where } f_j = \sum_i \frac{1}{\left(1-\left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2\right)}\left\{A_i\left[\sin(\omega_i t_j) - \left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)\sin(\omega_n t_j)\right] + B_i\left[\cos(\omega_i t_j) - \cos(\omega_n t_j)\right]\right\} \quad \text{[2]}$$

因此，利用 [S3] 和 [S4], , 可得到作用在柔性基底上的力：

$$F(t) \approx \left(\frac{y_0 k_s}{y_0 k_s + f_j}\right)\sum_i A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t) \quad \text{[S7]}$$

通过对液滴进行力平衡分析，可得液滴跳跃速度：

$$v_j = \frac{1}{m_d}\int_0^{t_j} (F(t) - F_\sigma(t) - m_d g)dt$$

利用 [S7] 和近似式 $\frac{1}{m_d}\int_0^{t_j} F_\sigma(t)\,dt \approx (v_0 - \frac{y_j}{t_0})$,

$$v_j = \frac{1}{m_d}\left(1 - \frac{y_j}{y_0}\right)\Sigma_i\left\{\left(\frac{B_i}{\omega_i}\right)\sin(\omega_i t_j) - \left(\frac{A_i}{\omega_i}\right)\left[\cos(\omega_i t_j) - 1\right]\right\} - \left(v_0 - \frac{y_j}{t_0}\right) - g t_j \quad [3]$$

其中 y_j 由方程 [2]给出。

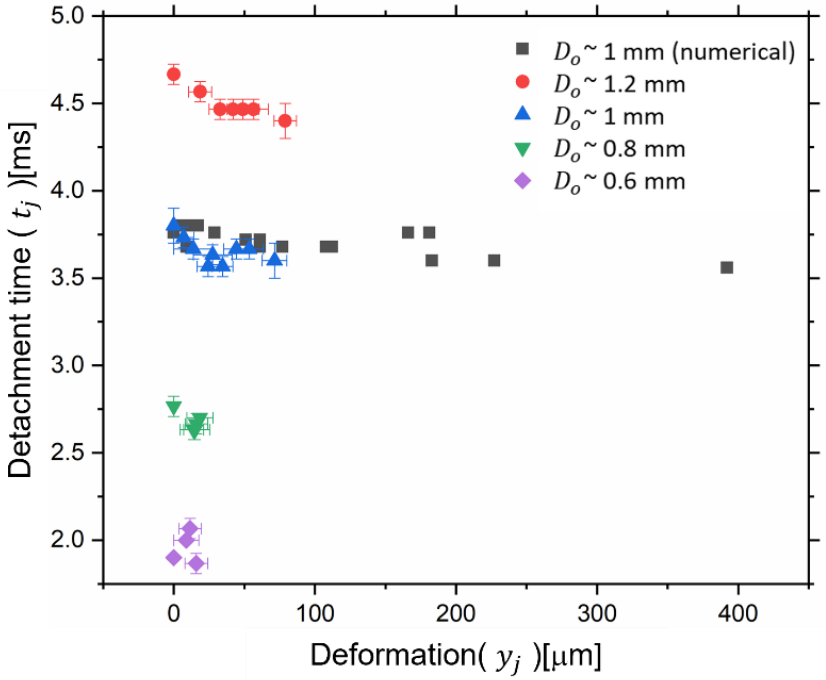


图 S5：液滴跳跃时间 t_j 与液滴尺寸 D_0 和基底变形 y_j的关系

此处，t_j 被假定为与基底刚度k_s 和频率比$\frac{\omega_i}{\omega_n}$无关。这是因为，如图S5所示，$t_j$ 被发现仅取决于聚并液滴的尺寸 D_0，而几乎与基底变形 y_j无关。上述模型通过与三维 CFD 模型的结果进行对比得到了验证，如图S7A所示。半经验模型成功捕捉到了跳跃速度比的总体趋势，这与更为复杂的三维流固耦合建模框架所预测的结果一致。因此，该模型可用于比较不同基底刚度和频率比的柔性基底上的聚并诱导的跳跃速度，如图S7C所示。

S6. 关于基底变形和能量分析的详细信息

图S6A展示了基底变形 y_j 随基底刚度（k_s）和频率比（ω_d/ω_n）的变化。文中展示了实验数据以及数值数据。显然，y_j 在低（k_s）和低（ω_d/ω_n）值的最佳组合下达到最大。图S6B说明了基底变形y_j 如何影响液滴向上的动能（UKE^*），其为可用初始总过剩表面能的一部分。随着y_j 增加，液滴向上的动能降低。

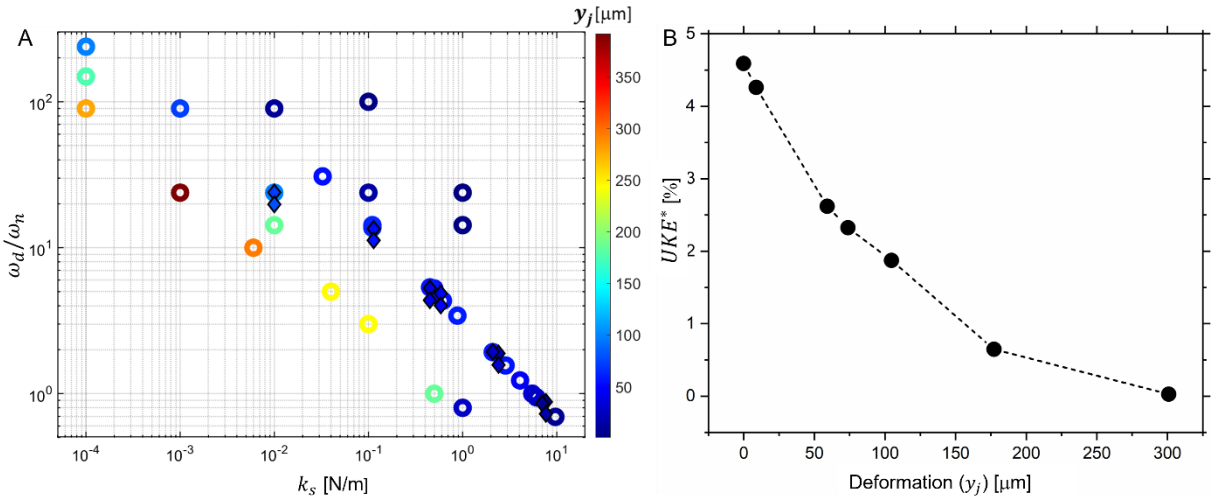


图 S6 A：基底变形 y_j 随k_s 和ω_d/ω_n变化。菱形和圆形标记分别对应实验数据和数值数据。B：从聚并开始到液滴跳跃时刻，液滴向外运动的归一化动能随基底变形y_j的变化

S7. 优化基底几何形状和材料性质以尽量降低跳跃速度。

对于两端固定梁构型，可以针对特定材料优化基底几何形状，以尽量降低跳跃速度，例如在宽度和厚度固定的情况下改变基底长度。图 S7A 展示了三维 CFD 模拟（红点）预测的基底长度对跳跃速度比的影响。显然，存在一个使跳跃速度达到最小值的最佳长度。图 S7B 显示，随着基底刚度降低，基底频率比随基底长度单调增加。因此，在最佳长度 ~ 15 mm 处，两者达到最佳组合，从而使跳跃速度最小。

图 S7A 还展示了 CFD 与半经验模型在跳跃速度比预测方面的比较。半经验模型能够成功地

捕捉跳跃速度随基底长度变化的趋势。随后，我们在图 S7C 中比较了两种建模方法在较宽刚度和频率比范围内的表现。对于较宽的参数空间，两种方法对速度比的预测结果一致。因此，可以利用半经验模型调整基底几何形状和材料，以实现跳跃速度的最小化。

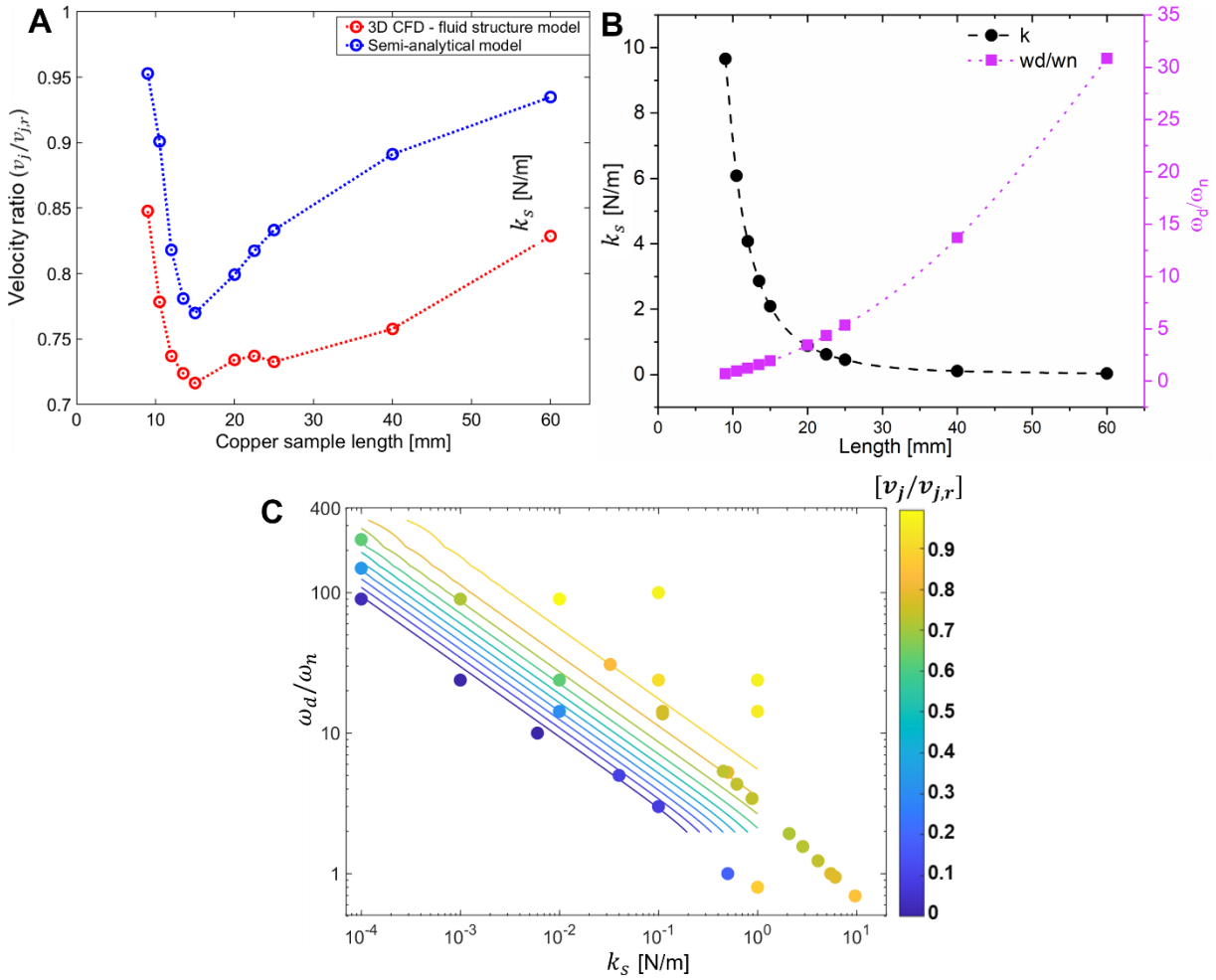
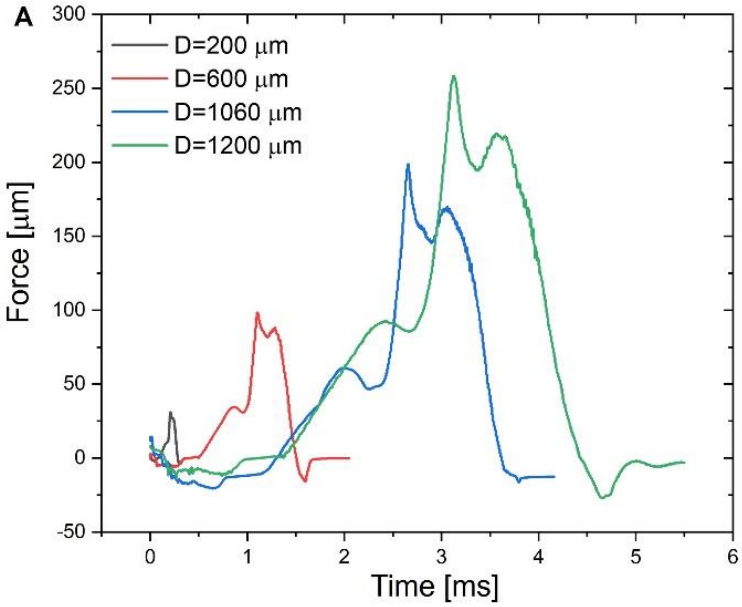


图 S7A：改变一块宽4mm、厚10μm 的薄铜片长度的影响。红点表示在这些柔性基底上进行液滴聚并的三维CFD模拟结果。蓝点表示半经验模型的结果B：基底刚度和频率比随长度的变化 C：在宽范围的基底刚度和频率比下，就速度比预测而言，对三维 CFD 模型（点）和半经验模型（曲线）进行比较

S8. 液滴尺寸对聚并动力学的影响

图 S8 显示了不同尺寸的聚并液滴作用于刚性基底上的力。基底所受力的大小随着聚并液滴

尺寸的减小而减小。然而，不同尺寸聚并液滴所产生的力具有相似特征，这表明不同液滴尺寸下的聚并动力学总体相似。



图S8：不同尺寸液滴聚并所施加的力的比较，显示出随着液滴直径减小，力的幅值也随之减小。

S9：雾水收集的实验详情

在该装置中，我们使用背衬铝板的铜箔作为刚性基底，并使用竖直悬臂梁取向的自支撑铜箔作为柔性基底，如图 S9 所示。对于刚性基底实验，基底长度设为图中标示的 L_2。对于柔性基底，样品总长度设为 L_1+L_2。刚性和柔性基底的样品宽度 w 保持不变。为确保刚性和柔性基底处的雾密度均匀，雾气出口与基底之间的距离保持一致。对于柔性基底，通过去除基底的多余质量来提高其固有频率(ω_n)，从而降低频率比（ω_d/ω_n）。每次实验中，样品均悬挂在收集板上方相同的距离 L_3, 处。收集板放置在如图 S9 和主文图 4c 所示的位置。通过 CMOS 相机（Thorlabs Inc.）捕捉液滴落在基底上的位置，如图所示。所有实验均在室内湿度相近的条件下进行，湿度变化为 5–7%。所有实验中所用柔性基底的估算刚度(k_s)和固有频率(ω_n)分别为 ~ $10^{-4} N/m$ 和 52.2 rad/s。

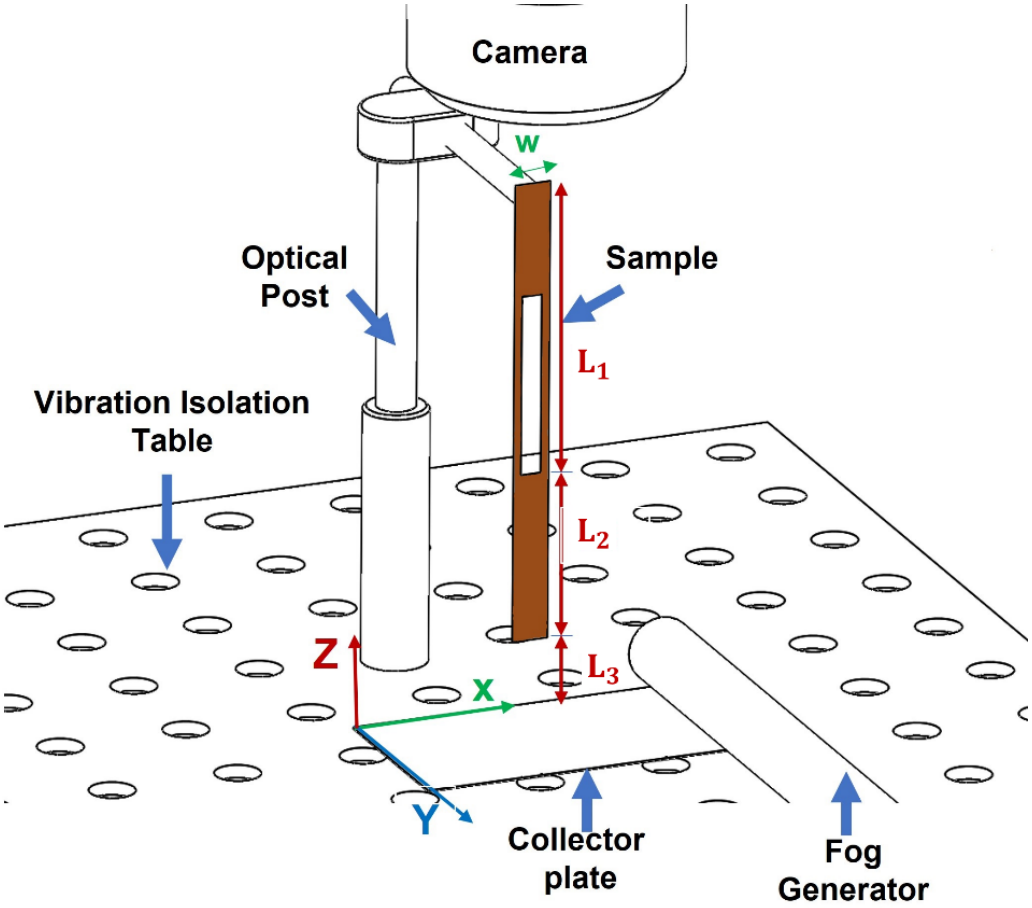


图 S9：超疏水铜箔雾化集水装置

图 S10 显示了刚性和柔性情况下，从距离 $Y = 0$ 开始落在 5 mm条带上的液滴的归一化面积比较。归一化面积通过特定5 mm 条带上液滴的总面积与收集板上所有液滴的总面积之比计算得出。例如，在柔性基底情况下，如果我们取 Y =10 and $Y = 15$ 之间的5 mm 条带，则该条带上液滴的总面积占沉积在收集板上的所有液滴总面积的~33%。通过对图 S10 所示的分布进行累积，我们得到主文中的图 4C。

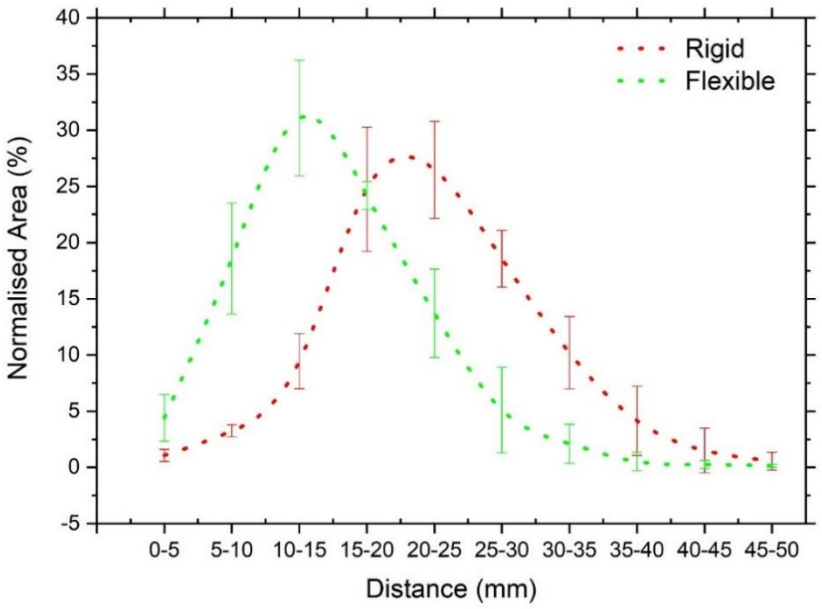


图 S10：液滴在收集器上的分布随其与基底距离的变化情况，分别对应刚性（红色）和柔性（绿色）基底（Y=*0*）。归一化面积表示落在特定距离处（如 x 轴所示）一条 5mm 宽条带上的液滴总面积百分比。

参考文献：

1.X. Yan、L.Zhang、S.Sett、L.Feng、C. Zhao、Z. Huang、H. Vahabi、A.K.Kota、F. Chen、N. Miljkovic，《液滴跳跃：液滴尺寸、表面结构、钉扎和液体性质的影响》。ACSNano。13，1309–1323（2019）。2. J. R. Taylor，《误差分析导论》（UniversityScienceBooks，美国加利福尼亚州萨利纳斯托，第二版，1997）。3. *ANSYS Fluent* 用户指南（卡农斯堡，Technology Drive，2013），第15317卷。4. C.S.Sharma、A.Milionis、A.Naga、C. W. E. Lam、G. Rodriguez、M.F. Del Ponte、V.Negri、H. Raoul、M.D'Acunzi、H. J. Butt、D.Vollmer、D. Poulikakos，《通过体相润滑剂浸渍增强软材料上的冷凝》。Adv. Funct. Mater.（2021）。5.H. Mevada、D. Patel，《不同材料结构阻尼的实验测定》。Procedia Eng.144，110–115（2016）。6. L. Cremer、M. Heckl、B.A.T.Petersson，《结构声、结构振动与音频频率下的声辐射》第3版。7. J. H. Kim、J. P.Rothstein、J. K.Shang，《液滴冲击过程中柔性超疏水表面的动力学》。Phys. Fluids。30（2018）。8.C. Zhang、Z. Wu、C. Shen、Y.Zheng、L. Yang、Y.Liu、L.Ren，《软弹性表面的本征频率和实际频率对液滴从静止柔性羽片回弹的影响》。*5020* | Soft Matter。16，5020（2020）。9. W.T. Thomson，《振动理论及其应用》（CRC Press，2018年版）。10. X.Zhang、M.Hu、J.Cai、A. Babenko、E. Shiju、Z. Xu，《涡旋-

质量比极低的圆柱体的诱导横向振动。 冲击与振动。 **2022**(2022). 11. T. Mouterde, T. V. Nguyen, H. Takahashi, C. Clanet, I. Shimoyama, D. Quéré，液滴如何从超疏水表面上合并并跃起：测量与模型。 物理评论：流体。 **2**, 1–7（2017）。 12. T. Vasileiou, J. Gerber, J. Prautzsch, T. M. Schutzius, D. Poulikakos，通过基底柔性增强超疏水性。 美国国家科学院院刊**113**, 13307–13312（2016）。