聚结的液滴是如何弹跳的

摘要：纳米尺度的表面工程是一个快速发展的领域，该领域有望影响包括生产能源，海水淡化，自洁且抗结冰的表面，电器热能管理，微流体平台和环境污染控制等领域。随着该领域的发展，需要对于液体与这些表面的润湿效应更加具体的认识，特别是对于两个以上液滴在超疏水表面上聚结时弹跳的效应。我们将会通过结合测量液滴在水蒸气凝结时的弹跳过程和对于双液滴聚结的数值模拟说明，在这个过程中只有小部分的表面能转化为了动能。这项发现说明了流体内部动能在液滴弹跳过程中扮演的角色和并且支撑控制着整个过程。

关键词：表面纳米结构设计，聚结，液滴弹跳，微流体，凝聚，润湿，超疏水

当两个以上液滴在超疏水表面上聚结时，新生成的液体从表面跳起的现象被称为“聚结引起的弹跳”。液滴弹跳现象由于它与液滴动力学的关联最近受到广泛关注。液体弹跳现象曾在自然界中被发现。此现象也被应用在包括热交换，自清洁表面等广泛的领域中。除了以上领域，液滴弹跳效应还在热能方法的海水淡化系统中表现出了潜力。

在基本的层面上说，多个液滴聚合时弹跳的现象被表面能转化为动能的过程主导，并且引入了破坏对称性的表面。对于最简单的情形，两个相同大小的球形液滴在一个无黏附效应的表面上聚合的过程，通过能量守恒能够得到一个符合内能的特征跳跃速度。

（1）

其中R，Gamma和rho分别是半径，表面张力和液滴的密度。之前的在级联超疏水表面上做的水凝结实验表明了对于上式近似的系数大约为0.2对于直径大于100微米的液滴。对于更小的直接，跳跃速度随着半径的减小迅速的下降，到大约20微米时就观察不到弹跳的现象了。有若干相关的研究试图通过关于粘性耗散，表面黏附效应的能量守恒的理论解释这些实验现象。但是这样研究的成功优先。最近的一个数值模拟复现出了实验现象，这项研究只研究了单个半径。除了这项研究付出的显著努力以，还缺少定量化的实验数据去表征弹跳现象已经准确的控制机理仍然未知。

在这篇文章中，我们研究了在广泛的参数空间中液滴的弹跳现象，将数值模拟和超疏水表面上的水蒸气凝结实验相结合。为了从实验上展示液滴弹跳过程中的能量转化过程。我们纤维化了表面使其的接触角接近180，减小了表面黏附的影响。利用高速照相机，我们测量了液滴跳跃的竖直速度。对于10微米左右的液滴，速度大约是1.4m/s。然而，即使我们的实验结果是之前报告过的最高值的六倍以上，却还是只有理论值的五分之一。

通过使用2D轴对称数值模拟，我们得到了液滴合并时内部的流的动量。我们可以意识到只有不平衡的动量才会对液滴的位移有所贡献。我们发现液滴合并导致的弹跳是一个动力学非常低效的过程，只有一小部分的表面能被转化为了动能，效率小于6%。与之前的理论结果相反，我们发现内部黏性耗散效应在低Oh数的跳跃过程中只起非常有限的作用。随着我们的深入理解，我们确定了一个对于公式1的无因次关联式，该式对于实验数据比较吻合。另外我们的关于机理的框架为更深入的分析提供了一个起点。

结果与讨论

实验：为了减小底板对于实验结果的影响，我们制备了氟聚合物覆盖的超疏水碳纳米管。

碳纳米管的长度大约为100纳米，远小于液滴的半径。碳纳米管的直接为40纳米，原子力扫描显微镜得到的表面最大高度差约为820纳米。通过实验测得接触角约为170°。冷凝的液滴表现出了高度不润湿的行为（图1c），冷凝的2微米直径的液滴表现出了非常大的接触角（图1d）。一个保守估计的液滴润湿前进角表示所有测量的液滴跳跃现象都是由同样接触角的生长模式产生的。我们还纤维化并测试了之前表现出良好液滴跳跃现象的氟聚合物覆盖的纳米CuO。