

## 通过调控液滴蒸发抑制表面产生咖啡环效应实现微粒均匀沉积

避免咖啡环效应

抑制咖啡环效应实现颗粒均匀沉积的新策略

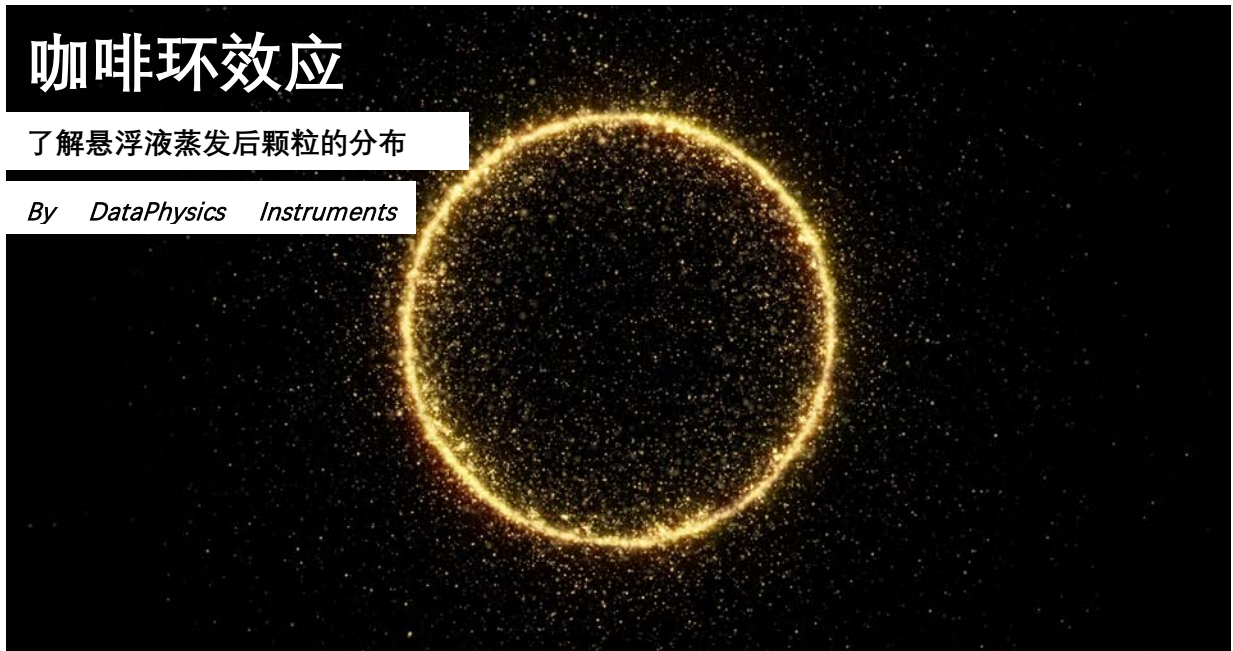
**关键词：**咖啡环效应，均匀沉积，接触角，蒸发模式

**简介：**在悬浮液蒸发过程中，避免咖啡环效应，实现固体颗粒的均匀沉积，是科学技术领域的巨大挑战。Butt 等人提出了通过调控液滴蒸发，抑制表面产生咖啡环效应，实现微粒均匀沉积的新策略。该研究对很多领域有重要的潜在应用价值。

### 咖啡环效应

了解悬浮液蒸发后颗粒的分布

By *DataPhysics Instruments*



含有固体颗粒的液滴如何从固体表面蒸发是一个复杂的过程，研究该蒸发过程有利于揭示科学本质和规律。在质量和传热的共同作用下，导致产生了一些有趣的现象如“咖啡环效应”——它描述了固体表面上液滴蒸发后胶体粒子产生的不均匀环状沉积（图 1）。避免“咖啡环效应”实现胶体粒子的均匀沉积在很多领域都是关键，如生物传感器、喷墨打印、喷洒农药、水性涂料应用、光子学等。最近，Butt 等人研究了通过在固体表面进行油膜包覆，调控水滴蒸发过程，抑制“咖啡环效应”产生，实现了不对称超微粒的制备。

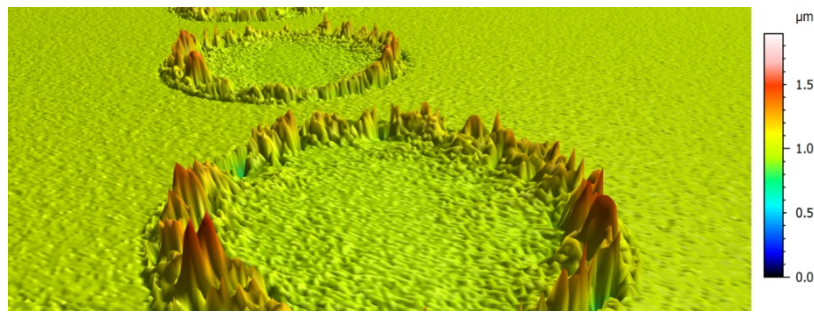


图 1: 由表面轮廓仪记录墨水中的颗粒的环状沉积, 即“咖啡环效应”

### 如何抑制“咖啡环效应”产生, 实现胶体粒子的均匀沉积?

为了清楚理解液滴蒸发过程, Butt 等人研究了在表面有油膜和无油膜时液滴的蒸发。如图 2 所示, 在表面涂有油膜的液滴蒸发得更慢, 形成更均匀的图案。蒸发过程中, 液滴表面 (a) 上有两条明显的接触线 (界面): 液体-液体-空气接触线 (CLLA) 和液体-液体-固体接触线 (CLLS)。相比之下, 由于液滴内部向外产生的毛细流动, 在没有修饰的玻璃表面 (b) 上的液滴蒸发速度明显加快, 而且只有一条接触线, 即液-气-固接触线 (CLAS), 并产生了典型的咖啡环。

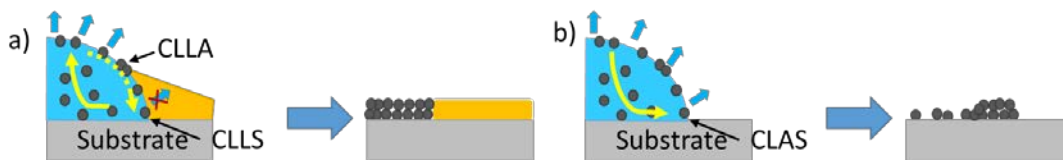


图 2: (a) 有油膜表面的蒸发过程。(b) 无油膜表面的蒸发过程。

黄色-油相; 蓝色-水滴; 蓝色箭头-蒸发。

此外, 图 2 (a) 说明胶体颗粒有从体相向界面 (CLLA) 上迁移并在那里聚集的趋势。这种现象是由于在油膜的水滴表面在底边 CLLS 位置的蒸发受阻造成的 (黄色区域)。只有在液滴中没有被油膜覆盖的区域才会发生蒸发, 这种局部蒸发导致液滴内颗粒物质的向上流动。这些集中到液滴上表面的粒子, 在蒸发过程中更容易在基底上发生均匀沉积。油的粘度、油膜厚度、液滴尺寸和胶体粒子的浓度都对沉积模式有影响。

为了更深入地理解蒸发过程中的颗粒流动模式, 他们使用荧光聚苯乙烯颗粒作为示踪剂, 并通过激光共焦显微镜跟踪这一过程。结果表明, 在表面有油膜的液滴其沉积半径随时间而减小, 但是其在油滴边缘的接触角变化不大 (CCA 模式, 接触角不变)。这一现象表明在随着液滴边缘不断后退, 胶体颗粒被钉在基底表面并不是立即产生的。

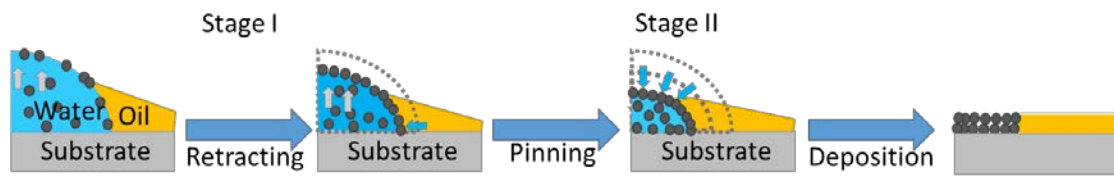


图 3: 油膜表面水滴蒸发机理研究

相比之下，在无油膜液滴的表面，沉积半径基本没有变化，并且接触角比有油膜液滴的表面小得多，并且在整个蒸发过程中接触角逐渐减小（CCR 模式，底圆半径不变）。这是因为对于无油膜液滴表面，颗粒在蒸发开始时已经被固定在表面上。

这项研究证明了一种新的策略，通过在固体表面进行油膜包覆，调控水滴蒸发速率、机理和过程，使液滴在有油膜的表面发生蒸发来避免“咖啡环效应”（非均匀沉积）的产生，从而在液滴蒸发过程中保证悬浮胶体颗粒的均匀沉积。Butt 等指出在有油膜的表面上的液滴蒸发分两个阶段进行（如图 3 所示）：首先，由于水蒸发仅发生在未覆盖油膜的液滴区域，液滴中产生向上流动，将颗粒带到上表面层并形成粒子单层，一段时间后液滴表面被颗粒完全占据（第一阶段）。在水滴进一步蒸发失水后，上表面的颗粒层将沉积在基底上，导致颗粒分布非常均匀，实现均匀沉积和分布（第二阶段）。

使用仪器：dataphysics OCA 35 接触角测量仪，DCAT 11 表/界面张力仪  
(厂家：Dataphysics Instruments GmbH, 德国)

详阅文献: **Control of Droplet Evaporation on Oil-Coated Surfaces for the Synthesis of Asymmetric Supraparticles**; Aiting Gao, Jie Liu, Lijun Ye, Clarissa Schönecker, Michael Kappl, Hans-Jürgen Butt and Werner Steffen; *Langmuir* **2019** 35, 14042–14048; DOI: 10.1021/acs.langmuir.9b02464

德国 **dataphysics**

表面科学领域测量专家