

咖啡环和咖啡盘——边缘上的物理

(广西师范大学计算机科学与信息工程学院和中国科学院上海应用物理研究所 闻炳海

编译自 Peter J. Yunker, Douglas J. Durian, and Arjun G. Yodh. *Physics Today*, 2013, (8): 60

喝咖啡的人都知道，一滴咖啡干燥后通常会留下一小片环状的咖啡渍，这个现象被称为“咖啡环效应”。令人惊奇的是，咖啡颗粒形状在其中起着很不寻常的作用。

咖啡环现象虽然很常见，但是它的形成却蕴含着丰富的物理机制。1997年，通过研究液滴蒸发过程中悬浮胶体圆球运动，Robert Deegan 和同事首先阐述了咖啡环的产生机制。由于液滴的三相接触线被锚定在初始位置，咖啡液滴在蒸发过程中保持边缘不变。而液滴边缘的蒸发速度更快，为了补充边缘蒸发掉的水，就会形成由液滴中央到边缘的定向流动。这个毛细流将几乎全部的悬浮颗粒都携带到液滴的边缘，最终堆积而形成了咖啡环。实验和理论研究表明，“咖啡环效应”本质上是一个流体力学的现象，环的形式不依赖于流体成分、颗粒以及基底的材质，溶质颗粒的沉积以自组装的方式进行。这在印刷、液晶、涂层、微阵列等领域都有用武之地。

但是，有时我们希望溶质颗粒能够均匀的沉积，避免出现咖啡环，怎么办呢？美国宾州大学科研小组在颗粒形状影响“咖啡环效应”的实验中使用了椭球颗粒。和圆球类似，椭球也会被幅向的流动推到液滴的边缘。不同的是，当椭球到达边缘时，它们不但不会密集的堆积，反而在液滴表面上形成了松散的网络层。随着更多椭球的到来，网络以十分无序的方式向液滴中部蔓延，阻止了后来的颗粒被推到边缘。如此一来，当液滴干燥

后，椭球颗粒就会覆盖液滴占据的整个区域——咖啡环消失了。

从根本上讲，液滴干燥后遗留的渍迹依赖于颗粒如何改变液滴边缘附近的气液界面。椭球体被拉长的形状在液体表面张力的作用下，造成了气液界面的弯曲，这会增加液滴的表面积以及相应的表面能。当两个椭球颗粒互相靠近时，相邻的变形区域会部分重叠以减小总表面积，从而达到能量最小化。表面上，由于气液界面上的毛细作用，边缘处的椭球颗粒表现出相互吸引的行为，像具有粘性一般，而圆球颗粒彼此无粘性作用。

颗粒间的粘附性深深地影响着液滴边缘附近沉积物的生长。让我们采用一个简化的俄罗斯方块模型来模拟颗粒沉积，其中只考虑单个方块沿幅向朝着液滴边缘下落。如果方块的流动没有空间关联，彼此独立——像圆形颗粒一样，那么边缘各处的颗粒堆积是无关的，堆积边缘会高低不平，且随着生长的进行而增长(图 1(a))。毛细相互作用为椭球的运动引入了侧向关联。在俄罗斯方块模型中，虽然带有粘性的方

块——椭球颗粒——仍然是随机地流向液滴边缘，但是当它靠近附近的堆积区域时，就会被粘住而停止运动。这些粘附行为使得短的条带迅速地生长成为长的条带，从而使沉积的顶部变得相对平齐(图 1(b))。如果椭球被重度拉伸，它们将表现出强烈的吸引，颗粒将离开低颗粒密度区，加入高密度区域的条带。沉积的颗粒边沿非常粗糙，因为颗粒密度区域会邻接根本没有颗粒的区域(图 1(c))。

对“咖啡环效应”的研究为颗粒沉积和边缘生长的复杂非平衡过程提供了新的理解。通过选择适当的形状就可以简单地获得均匀的颗粒沉积，这对实现高质量的印刷和涂层有重要的意义。

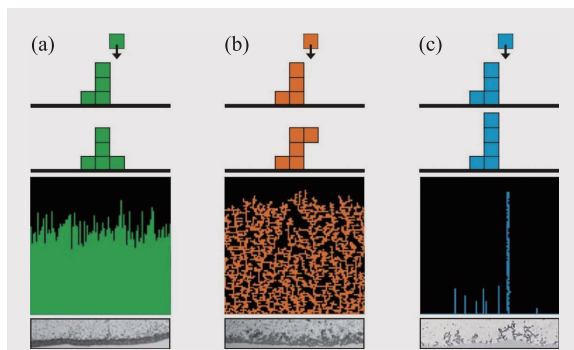


图 1 用俄罗斯方块建模三种不同颗粒的生长过程。从上到下依次是生长规则、模拟结果和实验照片 (a)球形颗粒的各个条带是相互独立的，生长线比较粗糙；(b)椭球表现出粘性行为。轻度拉伸的椭球会连成一片，生长线比较平滑；(c)重度拉伸的椭球之间会强烈吸引，产生非常粗糙的生长线