

表面张力导致软物质表面皱痕

(北京大学 朱星 编译自 John Kolinski. *Physics*, August 2, 2021)

软物质存在于我们日常生活中。多数生物组织由软性物质构成，在某个应力下容易发生变形。软物质自由表面在压应力下发生的大变形会导致其形貌的复杂变化，产生如同手风琴风箱的形变。当压应变足够大时，原自由表面会弯折成为褶皱，形成折叠的沟谷，最终成为互相接触的表面。压缩力在生物组织中造成的褶皱，如同大脑的脑沟，或者弯曲手肘的表皮折叠。这类褶皱通常在软物质表面保持一种固定的皱痕。然而，尽管这种特征随处可见，人们仍然不清楚为什么应力移开后，皱痕仍然保留；为什么全同的材料表面受到均匀压缩后，褶皱总会在某些特定位置产生。德国马普所 Michiel van Limbeek 团队发现，反复周期形变的软物质最终形成皱痕的原因是液体浸润过程中折叠与解折叠的不对称性。

先前曾经用对纸张的折叠或者揉搓的机制来解释软物质受力后形成永久褶皱的机理。持续的弱化或者破坏改变了材料的局部力学性

能，导致在某些位置容易形成皱痕。在折叠的两个面之间的黏结力或许造成不同表面黏和在一起，从而即使应力移去，构型仍保持原样。然而，不管是塑性变形，或者是黏结力都不能解释如此敏感的液体—固体表面张力。

van Limbeek 将一层软聚合物胶质铺在预拉伸的橡胶片上，并浸没在表面张力不同的液体中。当橡胶片上的应力逐渐释放时，它们均匀地挤压胶质层，每次 $1\ \mu\text{m}$ 。最终，胶质层表面开始弯曲，直到弯曲两侧相互接触形成一个褶皱。逐渐减小压力，观察到浸没在不同液体中的胶质层表面，有些平整，有些则不然。

使用共聚焦显微镜观察胶质表面形貌，直接测量胶质在褶皱上的延展程度和角度。用荧光标记的纳米颗粒附着到胶质表面，能够连续监测褶皱两侧互相接触的过程。实验显示褶皱对于压缩与松弛的反应存在滞后。特别是，在给定的压力下，褶皱的深度取决于胶质是处于

循环中的压缩或者恢复过程。如果整个体系的动力学状态是由褶皱两侧的黏结力控制，或许结果可以预期。然而，仅黏结力不能解释当胶质浸没在不同液体中时，加压和减压全过程中表面形貌的变化。在压应力状态下，褶皱的截面呈现字母 Y 的形状，Y 的柄部代表胶质的自主

接触区域，Y 的两臂则表示折叠的表面。当压力释放时，褶皱的形状类似于字母 T，表面的弯曲迅速变为自接触区域。这两种形状的不同表明，当表面张力增加时，去折叠过程需要的能量比形成褶皱多。这一能量差或许是除了用于两侧之间的黏结力以外，还用来克服表面张力。

在这种体系中，表面张力的作用与常见的界面液体中接触线钉扎 (contact-line pinning) 机制类似，当液—气界面与固体表面接触时(如桌面上的液滴)，固液气三相连接处形成了所谓的接触线。桌面与液—气界面切线的夹角可以用来表征表面张力。如果尚未达到平衡态，应力会驱动接触线运动。然而，由于表面的非均匀性，接触线的运动常常不平滑，接触线受到表面局部的阻碍或者钉扎从而断续地移动。结果表明，这种接触线的钉扎也是软物质表面产生褶皱的原因。

作为表现出强烈非线性特征与大变形的体系，褶皱及界面的折叠成为有用的工具，可以用来解释一些常见的问题，如为什么干燥的水果会褶皱？

发现表面褶皱形成的新机制具有实际应用，比如可折叠的软机器人装置中或表面工程中的液体输送。确实，人们可以展望操纵软物质的表面张力来“编程”褶皱的模式，以控制液体在这些表面上的传输；还可以控制表面形貌演变，将隆起表面引导到所需要的形状。



在不均匀表面的液体浸润机制可以解释软物质形成的褶皱，包括水果、皮肤、甚至大脑等生物组织