

哦，折断了！麻省理工学院团队使用 Phantom 摄像机来“破解”意大利面条之谜

高速镜头揭示了意大利面如何被折断成两段而不是多段——揭示弹性棒的断裂力学。

您有没有想过您为什么不能将一根干意大利面条折断成两段呢？理查德·费曼也有同样的疑问。这位物理学家和诺贝尔奖获得者指出，握住一根意大利面条的两端，将它弯曲并折断时，总是能产生至少三节面条。但几十年来，他和其他几十位科学家都没有找到原因。

事实证明，这不是一件小事，其影响远远超出了厨房范围。意大利面是理解弹性棒（ER）断裂力学的关键，因此，麻省理工学院（MIT）的一组研究人员正在研究费曼观察到的意大利面谜题。在 Phantom 高速摄像机的帮助下，研究小组测试了一个用于解释意大利面条如何断成两段的数学模型，解开了古老的意大利面之谜。

意大利面条和 ER 断裂行为

意大利面条的断裂行为揭示了包括建筑支柱、树木、骨骼甚至纳米管在内的 ER 是如何应对极端应力的，因此，研究面条断裂和碎裂对包括材料科学在内的广泛应用至关重要。“费曼观察到，意大利面在弯曲时会至少断成三节，” 数学研究生 Vishal Patil 说。“我们对扭转的作用很感兴趣，想要研究扭转是否可以将意大利面分成两节。”

Patil 还想研究非绝热淬火的作用，这个过程涉及将一根意大利面条的两端彼此靠近。他开发了一个用于解释受控扭转和非绝热淬火如何导致面条断裂成两段而不是多段的预测模型。根据这个模型，扭转的意大利面条在断裂后伸直有助于抑制那些会导致额外断裂的力。

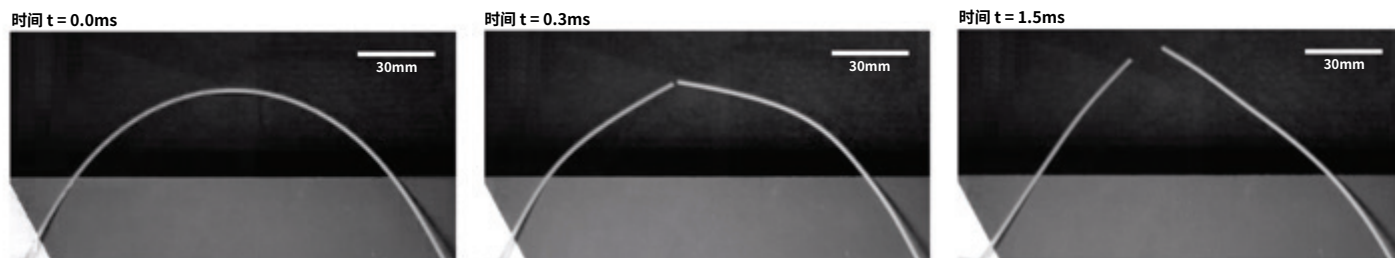
非绝热淬火

淬火通常指的是系统的快速冷却，但在统计物理学中，它指的是推动系统经历相变的控制参数的变化。在这种情况下，参数是意大利面条折断装置让意大利面条的两端彼此靠近的速度。非绝热指的是淬火向系统增加能量的过程。

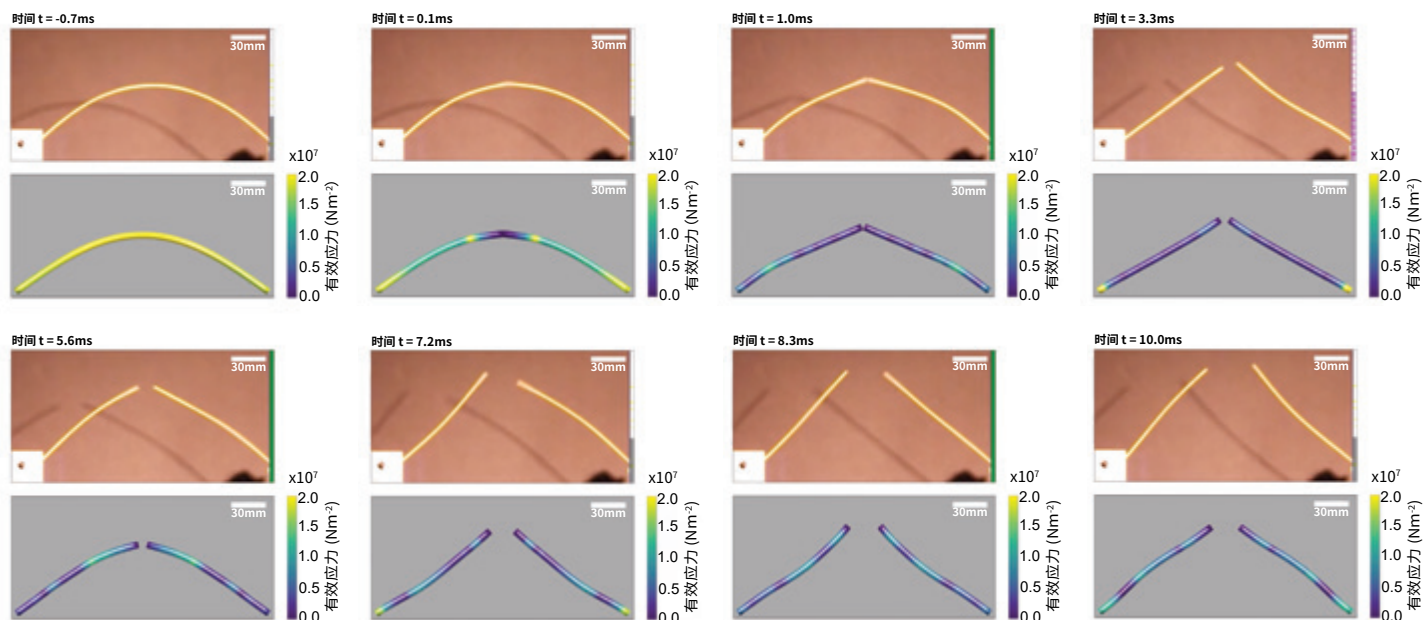
模型本身基于基尔霍夫方程，描述了细棒的动力学。Patil 和他的团队采用离散微分几何算法来对方程进行了求解，其中每个棒被离散成 50 个单元，一步模拟时间对应于 $1 \mu\text{s}$ 的实时时间。

费曼理论

2005 年，一群法国物理学家最终提出了一个理论，解释了费曼的观察结果：干意大利面总是断裂成三段或以上的现象。研究小组发现，当一根长而细的棒从两端均匀弯曲时，它会在棒最弯曲的中心附近断裂。这种初始断裂会导致“回弹”效应或弯曲波，进一步使棒断裂。但是，尽管他们的理论获得了搞笑诺贝尔奖，但问题仍然存在：意大利面到底能不能被强行折成两段呢？



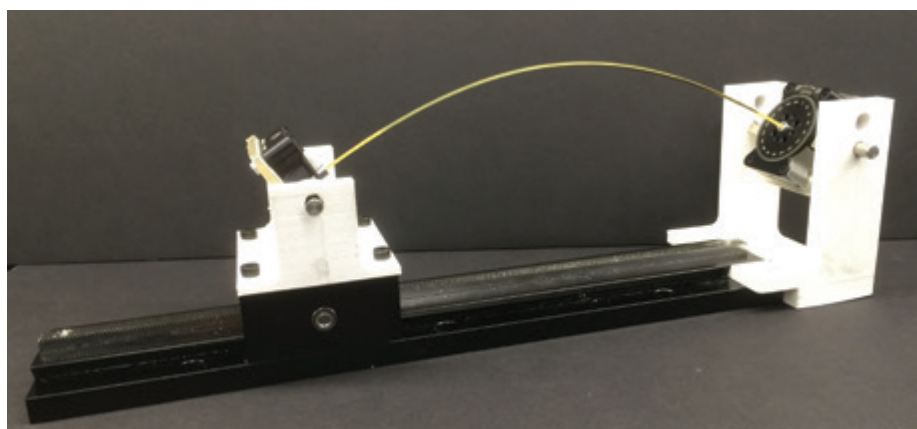
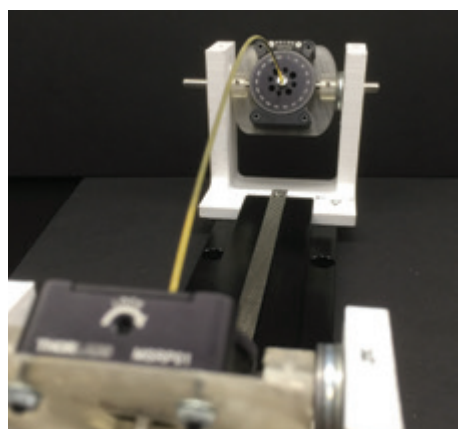
在低淬火速度 (2mm/s) 下，意大利面条可以发生二段式断裂。帧速率 = 75,000 fps。



在高扭转角 (330°) 的试验和模拟中观察到了意大利面条的二段断裂。帧速率 = 1,972 fps。

意大利面条折断装置

为了测试 Patil 的受控二段断裂模型，研究小组自制了一个装置，它可以在受控扭转力和非绝热淬火的条件下折断数百根 24 cm 长的意大利面。该装置在每一侧都有一个手动线性平台和两个可自由旋转的旋转平台。每个旋转平台都有铝夹，用于将意大利面条样品保持在靠近扭转和弯曲旋转轴的位置。在扭转实验中，研究小组以不同扭转角进行了 73 次试验，扭转角最高达到 360° 。在动力学淬火实验中，他们共进行了 20 次试验，在实验过程中，装置以 0.1 到 50 cm/s 的不同速度使每根意大利面条的两端彼此靠近。研究小组发现将意大利面条扭转近 360° ，然后慢慢地将它们的两端靠近，使面条弯曲，就可以将面条折成两段。



对于他们的实验，麻省理工学院的研究小组自制了一个装置，它可以在受控扭转力和非绝热淬火的条件下折断数百根 24 厘米长的意大利面。

高速镜头下的断裂力学

除了实现受控的两段断裂外，研究人员还想要捕捉断裂过程，以探索为什么在高速动力淬火试验中意大利面条会断裂成六段或六段以上。“有很多问题我们只能通过以非常高的帧速率拍摄意大利面来解决，” Patil 说。“当意大利面条断裂成多段时，我们想要放慢这种断裂的速度。”

由于裂纹传播发生得非常快，研究小组使用 Vision Research Phantom v2511 高速摄像机记录了他们的扭转和淬火试验，这款摄像机的速度高达 1,000,000 帧/秒 (fps)。为了观察断裂过程，研究小组以 75,000 fps 的速度拍摄了他们的淬火试验。通过进一步提高帧速率，摄像机还可捕捉微秒级别的意大利面断裂力学。“在 1,000,000 fps 的帧速率下，我们看到了裂纹是如何在材料中传播以及面条是如何在断裂后立即伸直的，” Patil 说。

高速镜头证实了 Patil 的大多数理论预测，这些理论可以应用于其他棒状结构，例如细胞微管、高级复合材料等。视频还提出了一些其他问题。“通过摄像机，我们观察到意大利面条中的裂纹形成和传播本身就是一个多阶段过程，” Patil 说。“似乎最先有一个小裂纹形成，然后这个裂纹会存在相对较长的一段时间，最后导致意大利面断裂。这个过程本身非常有趣，可以帮助我们理解断裂中固有的一些随机性。”

除了揭示 ER 断裂力学之外，高速视频还可用于事件在短时间内发生的弹性研究。“我期待我们在下一个问题中再次使用摄像机，” Patil 说。Patil 和他的数学家同事在《美国国家科学院院刊》上发表了他们的研究成果。

PHANTOM v2511: 平衡高帧率和低曝光时间

在其全 100 万像素分辨率 (1,280 x 800) 下，Vision Research Phantom v2511 高速数字摄像机可以高达 25,000 fps 的速度进行录制，非常适合想要以极高速度和全分辨率或接近全分辨率捕捉图像的科学家。在较低的分辨率下，它可以高达 1,000,000 fps 的超高帧速率进行录制，使麻省理工学院的数学家能够分析微秒级的意大利面裂纹传播，从而进一步推进他们的研究。

由于扭转和淬火实验的性质需要较短的曝光时间，因此研究团队需要一种能够在不牺牲速度或图像质量的情况下最大化曝光量的高速摄像机。这就是 Phantom v2511 的用武之地。该摄像机采用 28 微米像素的特制 CMOS 传感器，具有高光敏度。每个像素的位深度为 12 位，可产生 4,096 个灰度级。此外，这款摄像机还有一个全局电子快门，能够以 500 ns 的速度曝光。即使在 100 万的帧速率下，曝光时间也可降至 265 ns。此功能可以充分冻结运动，同时消除超快应用中典型的运动模糊。



某些 Phantom 摄像机符合出口许可标准。有关更多信息，请访问 www.phantomcameras.cn/export。