

制作美味的膨化食品

康奈尔大学的一支研究团队使用数学模型对大米的膨化过程展开了研究, 推动了食品工业的发展。

作者 **LEXI CARVER**

膨化谷物是一种在亚洲的部分地区流行了数个世纪的零食, 这种食品近年来风靡全球, 占据了各大超市货架。相信您一定不会对咀嚼米饼、各种膨化玉米、巧克力威化时发出的那种美妙而清脆的声音感到陌生。

然而另一些不悦的感觉您一定也十分熟悉: 咬一口膨化零食, 却发现它过于柔软、难嚼、干燥, 或者从包装袋中取出时就已经受潮了。那么, 是什么原因导致了这些问题呢?

米粒在膨化时, 其内部究竟发生了什么? 如果您曾观察过这一过程, 就会发现, 米粒升温到一定程度后会突然发生膨爆, 导致形状发生变化, 就像爆米花(图 1)。

米粒的膨化过程涉及了许多物理现象, 包括质量、动量和能量传递间极为复杂的相互作用, 水分快速蒸发, 材料相变, 以及压力积累和塑性变形等。

为了让膨化食品具有令顾客满意的口感, 食品公司花费了大量的时间用于研究如何在膨化食品中保持适当的水分含量,

并最终找到了可靠的加工条件, 能够确保食品受潮只是一个偶然事件。然而, 若要将膨化方法应用于大规模生产, 食品公司还需要对加工工艺进行优化, 使食物在加工后的口感、风味和水分含量保持一致, 在某些情况下, 还需要特别注意食品安全问题。

⇒ 探索最佳的加工条件

在获得了美国农业部 (United States Department of Agriculture, 简称 USDA) 农业与粮食研究计划 (Agriculture and Food Research Initiative, 简称 AFRI) 项目的研究资助后, 康奈尔大学针对食品加工过程中, 具有相依赖性的可变形多孔介质的传递过程展开了研究。一支由生物与环境工程学院的 Ashim Datta 教授领导的研究小组, 对蒸谷米 (又称半熟米) 膨化过程中的动力学和材料特性进行了模拟¹。

想要得到最佳的食物口感, 除了需要分析谷物膨化过程中伴随着的复杂相变、能量传递和力学行为外, 研究人员还需要



图 1. 普通蒸谷米 (上图) 和膨化后的蒸谷米 (下图)。

对盐的预处理、温度和初始水分含量等一系列因素进行全面的研究所。

此项研究工作的核心是建立一种能够适用于多种场景的建模方法。“我们建立了一个框架, 可用于分析食品加工过程中涉及的物理场, 同时这一框架还具有广泛的适用性。例如, 油炸过程中发生的物理现象与烘焙过程不同, 但这些物理现象都能被涵盖在同一个框架内。” Datta 教授解释道。接着, 他又阐述了一个食品行业广为关注的问题, “消费者喜欢油炸食品的口感, 却又不想因此影响健康。也就是说, 需要用其他的方法烹饪出油炸食品所具有的口感。”

“为此, 食品公司正在尝试以烘焙和‘膨爆’代替油炸。他们不断对产品和工艺进行改进。在做出任何改动后, 都必须重新找出新的最佳工艺条件。而我们可以自己开发的框架中自由地更换条件参数, 进而测试不同的工艺流程对食品成品的影响。”

“只要能确定某种加工方法中不同的温度和湿度组合对力学性质的影响, 便能预测是否可以通过其他加工方法制造



图 2. 将米粒描绘为多孔的弹塑性固体, 其中液态水 (深蓝色) 会发生毛细扩散、对流和相变; 由水蒸气和空气组成的气体 (浅蓝色) 会发生主体流动、二元组分扩散和相变; 由固体淀粉组成的结构骨架 (浅棕色) 会发生大形变。

出具有相同品质的食品。我们想要确定的是，不同的工艺究竟会对食品的口感、含水量、含油量，甚至对人体的健康产生怎样的影响。”

研究团队面临的巨大挑战在于影响食品最终状态的因素实在是太多了。将蒸谷米加热到 200°C 时，液态水将会迅速蒸发，从而导致米粒内的气压升高，并发生相变。米粒从一开始刚性的玻璃态迅速转变成了柔软的、具有一定弹性的橡胶态，进而膨胀成最终形状。在此过程中，加热时间、初始含水量和含盐量也起着决定性的作用。

⇒ 模拟相互影响的物理现象

为了解这些因素协同作用的过程，从而找到理想的加工条件，Tushar Gulati (Datta 教授当时的学生) 开展了一项旨在揭开谷物膨胀之谜的研究工作。

他使用 COMSOL Multiphysics® 软件对膨化蒸谷米粒内部的力学、热力学、材料和流体性质进行了分析。

“从数值分析的角度来看，这个问题极具挑战性。” Datta 教授评论道，“为此，我们的团队对多孔介质中的流动、多相输送、固体力学、传热，以及其他涉及电磁特性的情况（例如微波加热）进行了研究。”

Gulati 建立了一个多相的多孔介质模型，用于研究质量和动量的变化、能量的传递以及体积的大幅膨胀。模型分析了固体大米的不同形态，液态水和气态水，以及毛细流动、二元组分扩散和压力驱动流等水分输送方式。他将米粒假设为一种弹塑性材料，并获取了米粒的机械位移和膨

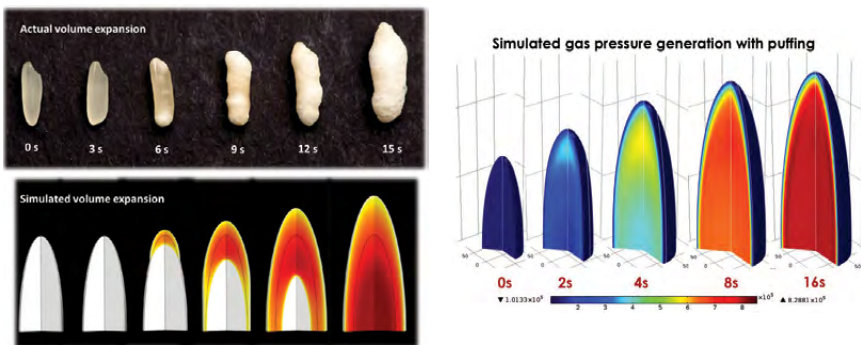


图 3. 左图：时长为 15 秒的膨胀过程中，米粒的真实的体积膨胀和模拟体积膨胀的对比；右图：仿真结果显示了气体压力的产生过程。

胀这两项数据。

仿真分析的结果显示了米粒膨胀过程中不同阶段的温度、湿度、压力、蒸发率、体积应变、孔隙率和应力水平等参数随空间和时间分布的情况（图 3 和图 4）。

研究团队使用显微 CT 图像重建技术测定了大米的膨胀比，并对大米微观结构的演化过程进行了可视化处理，从而验证了计算模型的准确性。在测定工作中，Gulati 还发现膨胀比容易受到蒸发率和固体基质渗透性的影响。

基于上述工作，研究团队获得了一个全耦合模型，它涵盖了膨胀过程中包括相变在内的多种不同行为。Gulati 将传递模型与大形变耦合在一起，测试了不同的盐含量对体积膨胀、蒸发和材料属性的影响。盐会降低玻璃-橡胶态的转变温度，这意味着加入盐后，米粒会在较低的温度下更加快地发生膨胀。

Datta 教授补充道：“仿真结果显示了米粒内部各类初始性质，以及这些性质在加热过程中随时间的变化。这些结

果是无法通过实验测量得到的。模型向我们展示了米粒膨胀、干燥和收缩的完整过程。”

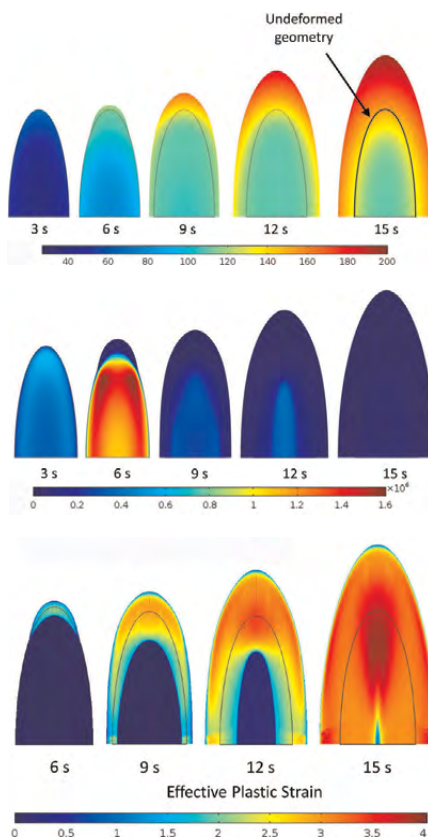


图 4. 膨化过程中的温度（上图，单位为 °C）、第一主拉伸应力（中图，单位为 Pa），以及有效塑性应变（下图）。图注：Undeformed geometry - 变形前的形状；Effective Plastic Strain - 有效塑性应变

“仿真 App 为我们呈现了一种全新的教学方式。在食品安全课程中，App 成为了强大的跨学科学习工具。它让学生可以实际地模拟出许多假想的场景。”

— ASHIM K. DATTA, 教授
康奈尔大学

另外，模型还帮助我们理解了孔隙的形成过程。如图 5 所示，孔隙最初在米粒两端形成，并逐渐向内部扩展。

研究团队基于仿真结果确定了最佳的使用盐量、水分含量、温度和加热时间，保证每一粒爆米花都拥有最佳的口感。仿真结果同时还表明了达到最大膨胀比所需的条件。

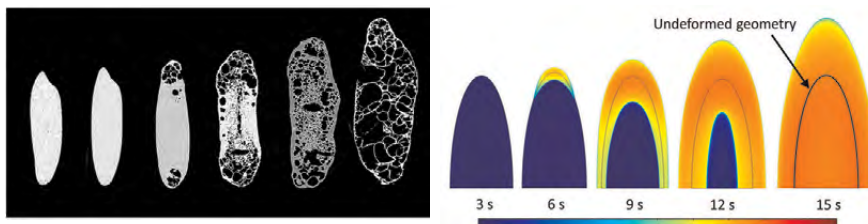


图 5. 左图：稻米膨化过程中不同阶段的 CT 扫描图。右图：仿真分析显示了孔隙率的预测结果。

⇒ 展望食品工程的未来

除了上文提及的模型框架外，Datta 教授的研究团队还将仿真分析扩展到了食品安全的研究领域。这对于食品公司来说意义深远，因为这些研究可以帮助他们预测食品的健康价值和保质期，并且确保食品加工过程安全卫生。

目前，Datta 教授正在负责另一项由国家食品与农业研究院（隶属于美国农业部）资助的项目。在该项目研究中，他的学生使用 COMSOL 软件建立了仿真模型，并基于模型开发了计算 App，成功地将仿真分析扩展到非工程师群体。康奈尔大学通过 COMSOL Server™ 对 App 进行了大规模部署，学生和教师无需直接购买软件和硬件便能受益于仿真分析带来的优势。

“仿真 App 为我们呈现了一种全新的教学方式。”他评论道，“在食品安全课程中，App 成为了强大的跨学科学习工具。它让学生可以实际地模拟出许多假想的场景。”康奈尔大学开发的仿真 App 目前已被美国的多所大学采用。

Datta 教授的团队还为食品科学家开发了用于研究罐装食品的仿真 App，它能够分析杀菌需要的加热时间与容器尺寸之间的关系（图 6）。使用者可以对温度进行调整，然后计算罐装食物加热到安全温度所需的时间。此外，仿真 App 还能对细菌死亡率进行调整，从而确定最终的产品是否可以让消费者放心食用。

Datta 教授表示，对爆米花的研究仅仅是一个起点。他们可以轻松地将在现有研究拓展到其他生物材料（例如玉米等），甚至可以是其他全新的应用领域。他补充

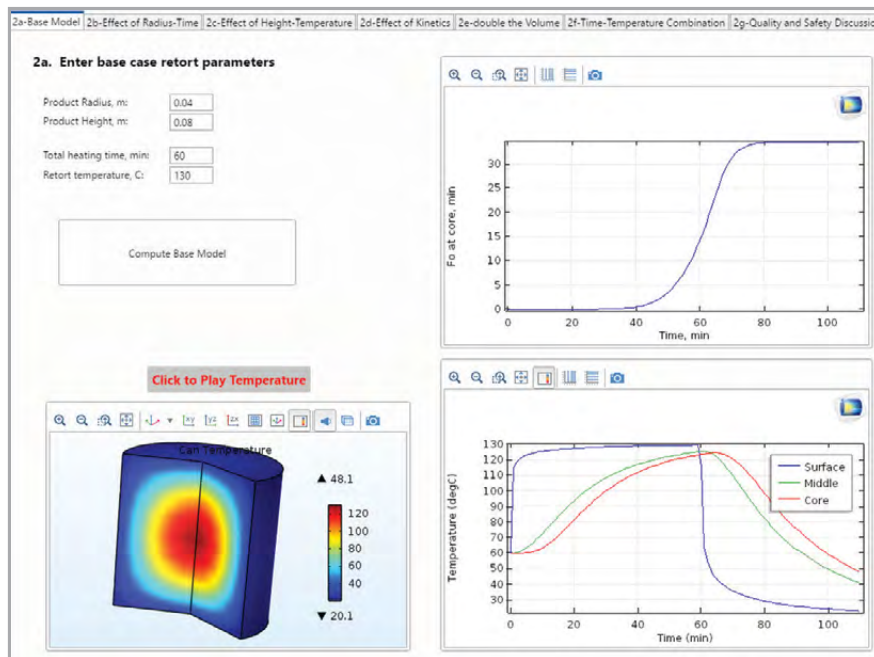


图 6. Datta 教授的学生开发的用于研究罐装食品的计算 App。使用者可以更改罐头尺寸和加热时间等参数。

道：“物理和建模知识对于各行各业都十分有用。我的一个学生后来从事着微波干燥方面的技术研究，而该技术的应用对象是汽车催化转化器。他在研究中采用的仿真技术与本文提到的技术相似。”Datta 教授正在为下一代的工程师们传授基础的物理建模知识，他期待着食品工业能在不久的将来实现重大突破。❖

参考文献

1. Gulati, Tushar and Datta, Ashim K. "Coupled multiphase transport, large deformation and phase transition during rice puffing," *Chemical Engineering Science* 139 (2016) 75–98.



Datta 教授最喜欢的一项工作便是在康奈尔大学教授课程，他会引导学生们使用 COMSOL 对生物医学过程进行模拟。正如文中的爆米花案例所示，COMSOL 软件能够全面地耦合多物理场现象，因此他将 COMSOL 视为一件强大的教学工具，帮助学生通过仿真深入学习各类生物医学应用中的底层物理原理。

今年，Datta 将在国际建模与仿真学校举办一场研讨会，这是一所短期的国际学校，其前身是一个从事食品工程虚拟仿真研究的兴趣小组。

今年，Datta 将在国际建模与仿真学校举办一场研讨会，这是一所短期的国际学校，其前身是一个从事食品工程虚拟仿真研究的兴趣小组。