

COMSOL NEWS

食品行业特辑

提升食品的 风味和品质

雀巢使用多物理场仿真
优化巧克力的生产工艺

P 8



仿真 App 帮助农民 预测冷藏农产品的保鲜期

P 4

仿真推动食品行业创新

加快食品生产速度、提升产品风味、降低能耗，是食品行业追求的目标。为此，食品行业的工程师致力于不断创新，优化产品，开发更先进的食品制造方法、保鲜技术和厨用设备，多物理场仿真在其中发挥了至关重要的作用。

在食品供应链的终端，消费者期待食品能够保持始终如一的新鲜度、安全性和口感。以巧克力威化为例，消费者期待的是一口咬下去时令人愉悦的酥脆感。在雀巢公司产品技术中心，研究团队的主要工作之一就是优化糖果类产品的制造工艺，以确保这种酥脆感。对于烤箱和炉灶，消费者可能希望获得更均匀的加热效果以及更高的能效。惠而浦公司通过仿真技术提升了烤箱的能效。ITW 公司借助仿真开发了一种能够更均匀地加热食物的新型微波炉。

农产品从收获后直到被加工和烹饪，大多数时间都处于储存状态。然而农产品的内部不但会持续发生化学变化，而且对储存环境非常敏感，温度骤降或骤升都有可能大幅缩短农产品的保质期。瑞士研究机构 Empa 正在研究如何通过仿真 App 提升冷藏室的使用效率，以减少农产品收获后的损失，帮助农民增加收入。

消费者对最终加工制作成的食品或饮料有一系列的要求和期待，这其中最重要的就是食品的安全性和食品品质的稳定性。本期食品行业特辑，将向您展示仿真技术如何能够帮助食品工程师更快、更有效地开发出优质产品。

祝您阅读愉快！

Fanny Griesmer

COMSOL, Inc.



COMSOL 微信公众号

参与 COMSOL 社区互动

COMSOL 博客 www.comsol.com/blogs

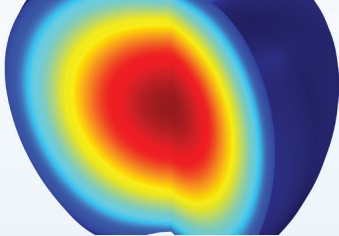
微信 COMSOL-China

微博 COMSOL 中国

我们期待您对本刊的意见和建议，欢迎通过 info.cn@comsol.com 与我们联系。
在线阅读更多用户案例请访问：comsol.com/stories

© 2023 COMSOL. COMSOL、COMSOL Multiphysics、COMSOL Server 和 COMSOL Compiler 是 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产，COMSOL AB 及其子公司和产品与这些商标所有者无关，也未得到这些商标所有者的认可、赞助或支持。有关此类商标所有者的列表，请参阅 www.comsol.com/trademarks

目录



04

借助仿真 App 预测水果保质期

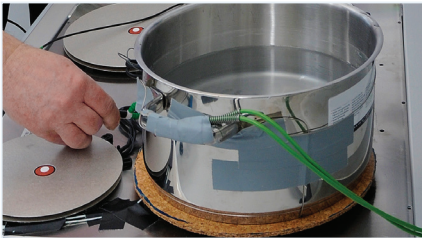
Empa, 瑞士



08

雀巢里的甜蜜仿真

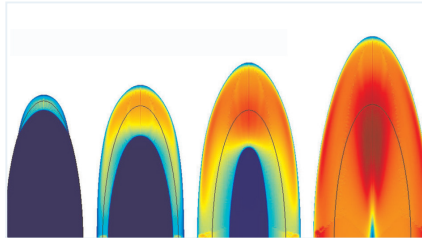
雀巢产品技术中心, 英国



12

**多物理场仿真
帮助 Miele 优化电磁炉设计**

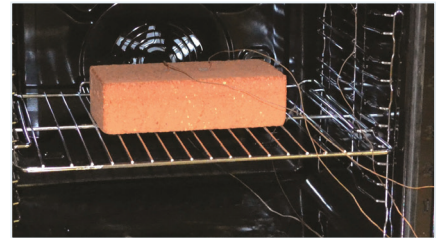
mieletec FH Bielefeld, 德国



16

制作美味的膨化食品

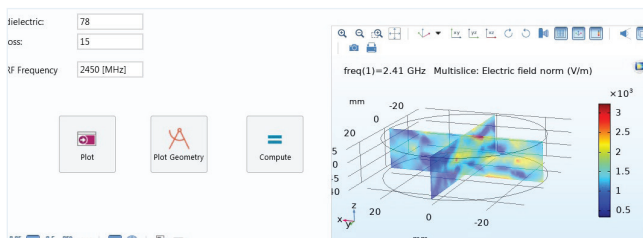
康奈尔大学, 美国



20

**多物理场仿真提高
热量和能量利用效率**

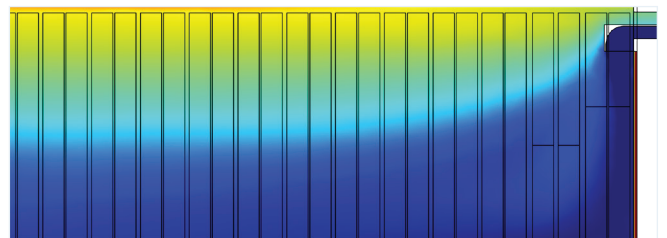
惠而浦研发中心, 意大利



22

多物理场仿真优化智能微波炉设计

ITW 公司, 美国



25

优化用于制冷技术的换热器设计

thermofin 公司, 德国

Empa, 瑞士

借助仿真 App 预测水果保质期

瑞士研究机构 Empa 借助数值仿真开发模型并编译了一个仿真 App, 可以将仿真结果直接反馈到农民和贸易商使用的智能手机应用程序中, 预测新鲜水果和蔬菜的保质期。这项工作由一个致力于改善发展中国家冷藏食品储存现状的国际联盟组织支持。

作者 RACHEL KEATLEY

新鲜农产品在收获后的运输过程是全球食品供应链中一个非常明显的薄弱环节。每年, 全球供人类消费的食品中约有三分之一被损失或浪费。冷藏配送和存储问题是造成这些损失的主要原因, 尤其是在像印度这样的发展中国家, 仅有 6% 的粮食产品进入冷藏“冷链”, 导致大部分食品很容易腐烂变质。目前, 如小型太阳能冷藏室(图 1)之类的稀缺冷藏空间, 可能会被已经过了盛产期的农作物占用, 而其他货物则在等待进入冷藏室的过程中腐烂变质。

作为食品供应链利益相关者的国际联盟的一部分, 瑞士联邦材料科学与技术实验室 (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Empa) 和巴塞尔可持续能源机构 (Basel Agency for Sustainable Energy, BASE) 开发了一款名为 Coldtivate 的移动端应用程序来帮助缓解这些问题。通过该应用程序, 用户可以实时获知不同种类水果的冷却和腐烂过程。Coldtivate 由多物理场仿真技术驱动, 于 2022 年底在印度的 3 个地区推出, 并于 2023

年推广给尼日利亚的冷库经营者使用。在手机上使用这个 App 的果农不会看到底层的多物理场模型, 也不需要直接与仿真 App 进行交互。他们需要做的仅仅是在手机上简单操作 Coldtivate 应用程序即可获得结果。

» 基于仿真预测优化食品储存

基于 Empa 使用 COMSOL Multiphysics® 软件及其内置的 App 开发者创建的仿真 App (图 2) 所获得的数据, Coldtivate 移动应用程序可用于预测冷藏室中农产品的新鲜度。

仿真 App 基于已有的 COMSOL Multiphysics 仿真模型创建, 具有简洁易用的界面, App 设计者可以决定在用户界面上显示哪些信息。虽然仿真 App 也可以直接使用, 但 Empa 和 BASE 仍然希望为终端用户 (主要是农民) 以他们最熟悉的方式显示仿真 App 的数据。由于移动应用程序被广泛用于现代农业实践中, 因此他们开发了 Coldtivate 应用程序供终端用户使用。

Empa 的数据科学家兼 Coldtivate



图 1 用于储存收获农作物的冷藏室。



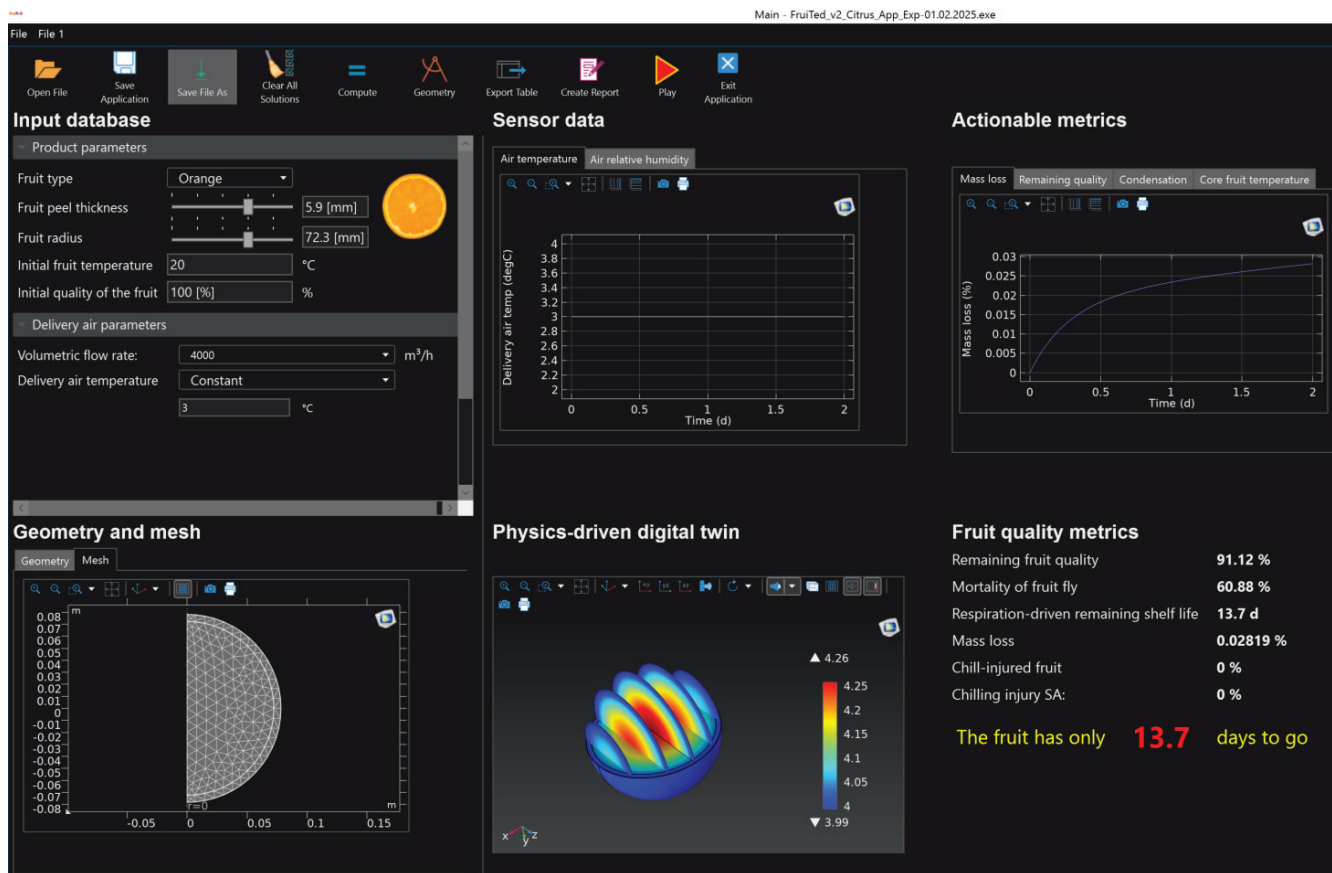


图2 在台式电脑上运行的由 Empa 开发的 COMSOL 仿真 App，可以生成许多与农产品新鲜度相关的指标。

项目的技术负责人 Joaquin Gajardo 解释说：“我们使用 App 开发器开发的 COMSOL 仿真 App 与移动应用程序在同一台无外设服务器上运行，因此它们之间可以相互传递信息。这个仿真 App 能够基于移动应用程序中输入的参数，自动更新模拟结果。”这样，Empa 就将多物理场模型的功能与移动应用程序的便利性结合在了一起。为了能以这种方式使用仿真 App，他们首先使用 COMSOL Compiler™ 将 App 编译成了独立的可执行文件。

“如果没有 App 开发器，我们就不可能将数字孪生推广到移动应用程序中，也无法通过普及多物理场仿真及其结果，使更多像农民这样的人群受益。”Empa 资深科学家、瓦赫宁根大学与研究中心

的 Thijs Defraeye 教授补充道。

» 仿真 App 背后的模型

环境温度会直接影响新鲜农产品的保质期。虽然大多数冷藏室内都有温度计，但它们提供的数据还不足以预测水果和蔬菜的保质期。

Defraeye 介绍说：“我们无法通过冷藏室的单一温度曲线或湿度曲线来确定农产品的保质期。每个储藏箱的 COMSOL 模型都可以接收冷藏室的实际温度和湿度数据，从而可以频繁地重新计算剩余保质期。”Empa 的仿真 App 正是基于这一模型建立的。

此外，冷藏室内的传感器并不能准确反映储藏箱内部的苹果温度，尤其是在储藏箱最近才被搬进冷藏室的情

况下。

为了更全面地了解每批农产品如何受到不同储存条件的影响，Empa 目前正在使用 COMSOL Multiphysics 软件对模型进行扩展（图 3），以模拟各种水果和蔬菜的整批运输。“为此，我们需要使用基于多孔介质的模拟方法，从传感器读数中生成可操作的指标。”Defraeye 提出。

» 运行中的应用程序

“比方说，一批新货物抵达冷库，”Gajardo 对 App 的用法进行介绍，“当操作员打开手机上的 Coldtivate 应用程序，输入产品类型、当前温度、收获天数和其他相关数值后，Coldtivate 会立即生成一个包含这些信息的文本文件。

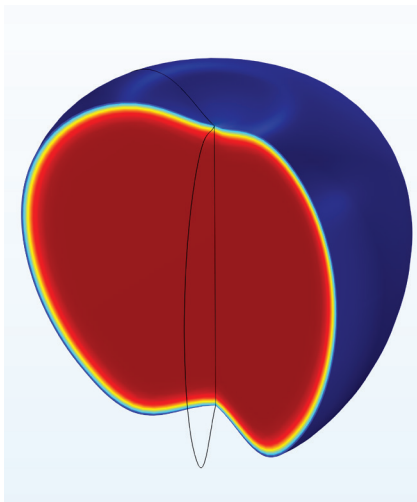


图 3 Empa 使用 COMSOL 创建的苹果模型，模拟结果显示了苹果内部的温度分布如何随时间受到表面温度的影响。

这些数值将作为 COMSOL 仿真 App 的输入参数计算预期保质期。最后，计算结果被写入输出文件，剩余质量和预期保质期天数随后便显示在 Coldtivate 的用户界面上。”

每隔 6 小时，Coldtivate 应用程序就会根据最新的冷藏室温度数据重新进行计算，并更新用户界面上显示的预测数值（图 4）。农民可以直接在手机上查看储藏箱内货物的剩余保质期，如果他们没有智能手机，“仓库经营者可以通知他们农产品在冷库中还能保

鲜多久。”Gajardo 总结道。最终，这些信息将帮助农民避免廉价抛售货物以及对滞销农产品的不必要清理。

团队合作带来可靠的数据

Defraeye 和他在 Empa 的团队花了数年来建立他们的数据收集和仿真流程。他介绍说：“2021 年初，我们就已经在开发用于分析农产品新鲜度的模型了，但尚未在实际供应链中推广。”来自非营利性全球发展组织的问询促进了 Coldtivate 移动应用程序的诞生（图 5）。

“BASE 公司联系了我们，他们开发了创新的商业模式，以帮助农民更好地利用现有资源。”Defraeye 继续说，“我们的想法是，将单次付费使用的商业模式与智能技术相结合来改善冷却系统的使用。要做到这一点，就要将那些有需求的人群与其他合作伙伴紧密联系在一起。”这些合作伙伴包括印度比哈尔邦、喜马偕尔邦和奥迪萨邦的制冷公司和其他利益相关者，他们与 BASE 和 Empa 共同发起了一项名为“您的虚拟冷链助理”的倡议。

“信任是关键因素。”Defraeye 指出，“通过仿真，我们可以获知农产品在一段时间内的变化情况，而智能手机应用程序则可以将这些信息提供给冷藏室经理或农场主等能够使用这些信息的人。我们的目标是增加销售环节的透明度，因为这将带来巨大的变化。如果农户和冷藏室经营者能够相信预测结果，这也将有助于他们相互信任。”

Coldtivate 的实际应用

2022 年 8 月，Empa 及其合作伙伴将 Coldtivate 应用程序向选定的制冷公司发布，并对冷藏室经理进行了培训，教他们如何使用这个应用程序来跟踪他

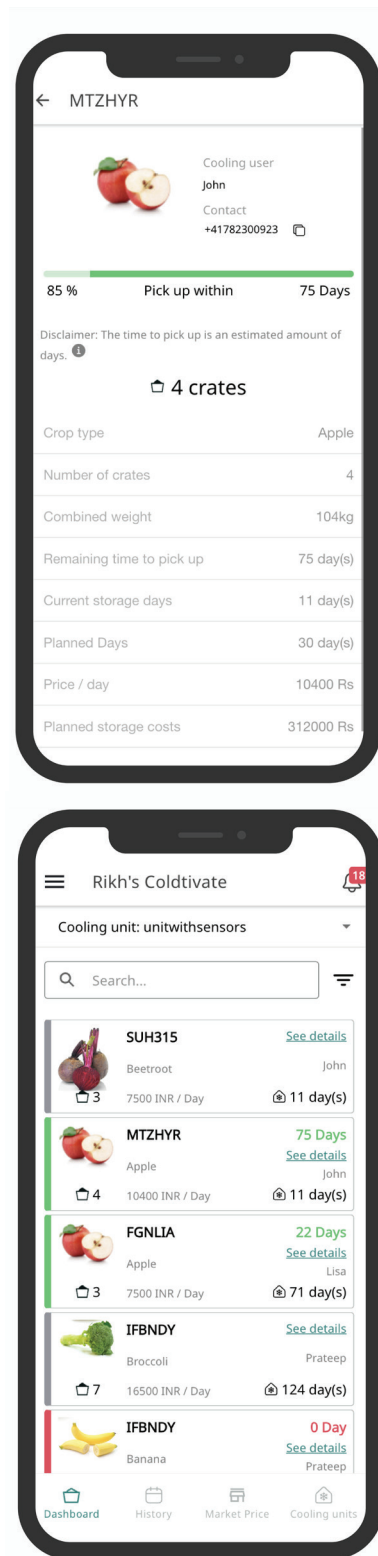


图 4 Coldtivate 应用程序用户界面显示的一个农民的储藏箱中物品的相关信息，包括剩余质量和预期保质期。

们储藏室中的农产品（图 6）。迄今为止，这款由仿真驱动的应用程序已在 17 个冷藏室进行试点，为 300 多名农民提供服务。据报道，这些农民的收入增加了 20%，同时收获后的粮食损失减少了 20%。Empa 及其合作伙伴目前正在努力扩大 Coldtivate 的影响。

Coldtivate 应用程序后续的更新将会提供如市场价格预测等更多相关信息，甚至可以根据农产品的照片预测作物质量。现在，BASE 和 Empa 正在与尼日利亚和菲律宾的组织合作，希望将 Coldtivate 的价值带到全球更多的地方。

全球作物在收获后的损失规模令人生畏，但支持 Coldtivate 项目的国际联盟已经证明，取得进展指日可待。Defraeye 表示：“我们已经看到了基于仿真的预测工具如何改善冷却系统的使用情况。现在我们需要的是不仅仅是循序渐进的小步快跑，更需要大胆的行动来扩大我们的影响。我们要做的就是将技术交到更多的人手中，让他们利用技术来改变现状。”

致谢

Coldtivate 的开发由 data.org 包容性增长和恢复挑战基金 (Inclusive Growth and Recovery Challenge grant) “您的虚拟冷链助理” 提供部分资助，并受到洛克菲勒基金会 (The Rockefeller Foundation) 和 Mastercard 包容性增长中心 (Mastercard Center for Inclusive Growth) 的支持，还获得了德国联邦经济合作与发展部 (BMZ) 委托的“扩大您的虚拟冷链助理”项目的资助，目前由 BASE 和 Empa 代表德国国际合作署 (GIZ) 实施。此外，该项目团队对主要项目合作伙伴 Koel Fresh Private Ltd.、Oorja Development Solutions India Private Ltd. 和 ColdHubs Ltd. 在测试和调试保质期模型方面做出的贡献表示感谢。

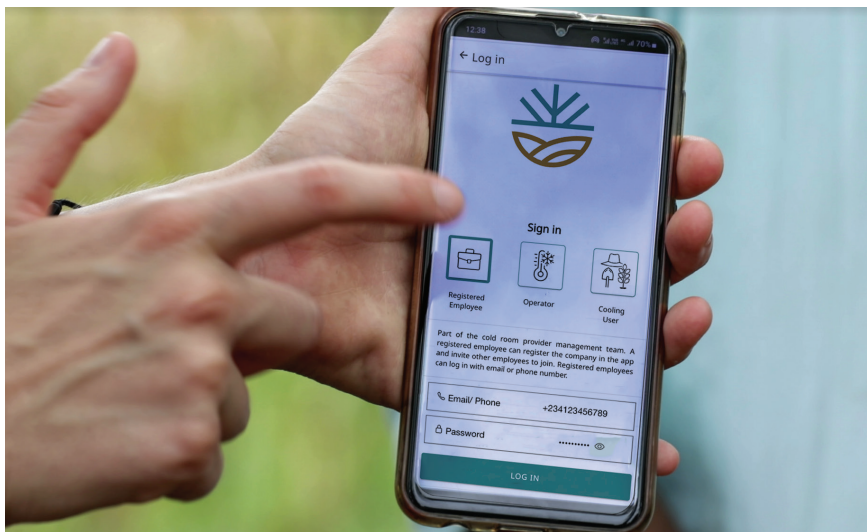


图 5 用户手中的 Coldtivate 智能手机应用程序。



图 6 印度奥迪萨邦的农民和冷藏室经营者正在参加 Coldtivate 应用程序的培训。

“如果没有 App 开发器，我们就不可能将数字孪生推广到移动应用程序中，也无法通过普及多物理场仿真及其结果，使更多像农民这样的人群受益。”

—— THIJS DEFRAEYE, 资深科学家, EMPA

雀巢产品技术中心, 英国

雀巢里的甜蜜仿真

在英国约克郡的雀巢产品技术中心, 研究人员使用仿真来优化巧克力的生产。

作者 ALEXANDRA FOLEY



在雀巢，围绕生产一块完美巧克力糖果所进行的各种研究、设计和制造工作是一个非常令人着迷的过程，甚至有些类似电影《欢乐糖果屋》中的奇幻世界。虽然并没有一位奥帕 - 伦帕人在监督糖果的生产，人们还是进行了大量的思考及仿真工作来优化这一过程。

位于英国约克郡的雀巢产品技术中心是雀巢糖果类产品的研发中心，主要进行三大产品的研发：用于制作糖果棒的巧克力浇注机；威化烤盘；以及用于同时烘焙和分类谷物食品的挤出机。这里的工程师正借助多物理场仿真的“魔力”来优化和简化产品的生产工艺。

» 巧克力的研发

雀巢奇巧(Kit Kat®)、气泡巧克力(Aero®)、甘脆巧克力(Crunch)，以及牛奶巧克力棒等都是利用巧克力浇注机向模具中填满融化的巧克力制作而成。巧克力通过顶部的流道进入浇注机，然后经由一个个喷嘴尖端离开浇注机并进入模具(图 1)。

“要保证每根巧克力棒中的巧克力含量相同，就意味着巧克力要以相同的流速和压力离开喷嘴。”雀巢工艺工程师 William Pickles 介绍，“我们要保证每根巧克力棒都具有相同的质量，这不仅出于成本效率和标准化的目的，也是为了保证外包装上卡路里信息的准确性。这样，我们才能交付包含精确营养成分的产品，以满足客户均衡饮食的需求。”为了实现这一标准化，每个喷嘴尖端的流量和压力都必须一致，误差需要被控制在极小的范围内。

雀巢通过使用仿真技术来实现这种一致性要求。如图 1 所示，雀巢的工程师首先通过 SOLIDWORKS® 设计巧克力浇注机的几何结构，随后将几何文件

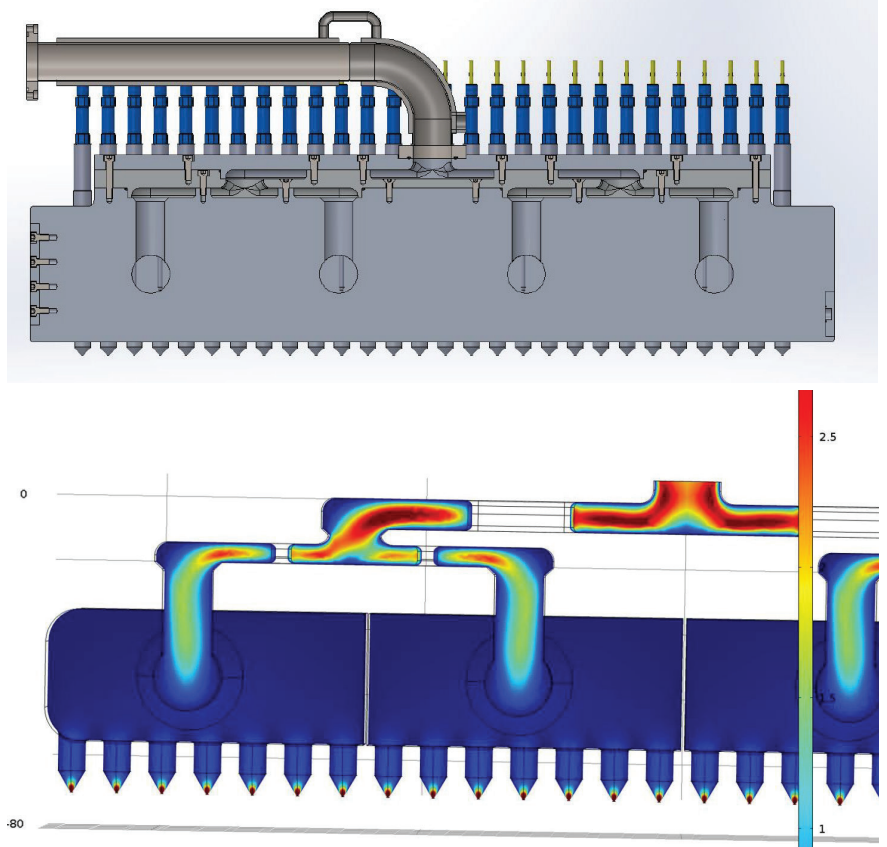


图 1 上图：使用 SOLIDWORKS® 软件绘制的浇注机的几何模型。下图：COMSOL Multiphysics® 仿真结果显示了浇注机喷嘴和流道中的巧克力的流速大小。

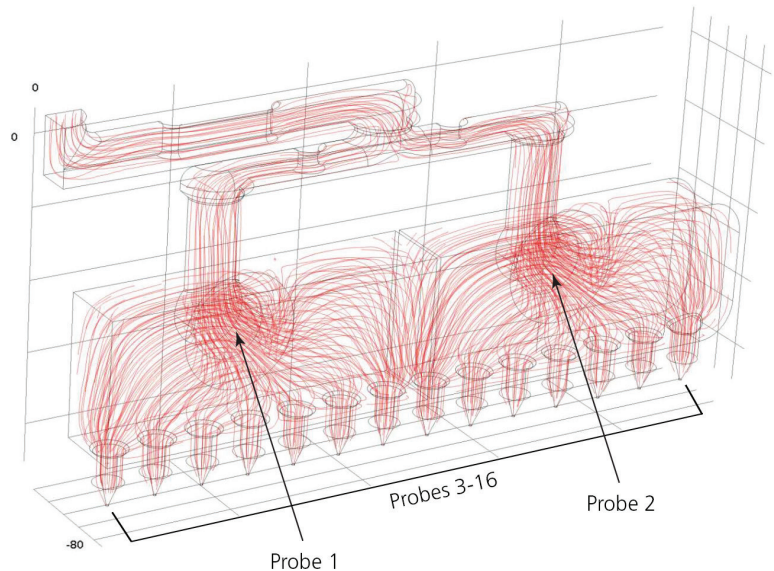


图 2 放置在每个喷嘴尖端和流道内的数值探针显示，巧克力在浇注机和喷嘴内的流速和压力变化符合规格要求。流线显示了巧克力的流动方向。图注：Probe - 探针

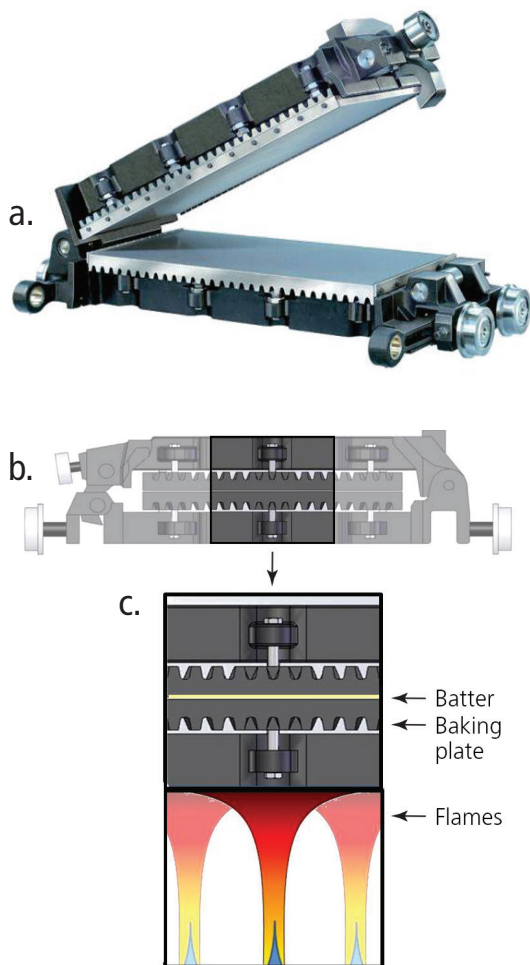


图 3 使用两个威化烤盘 (a) 来烘焙奇巧威化；上部 and 底部的烤盘挤压面糊 (b)；烤盘底部的火焰烘焙威化 (c)。图注：Batter – 糊状物；Baking plate – 烤盘；Flames – 火焰

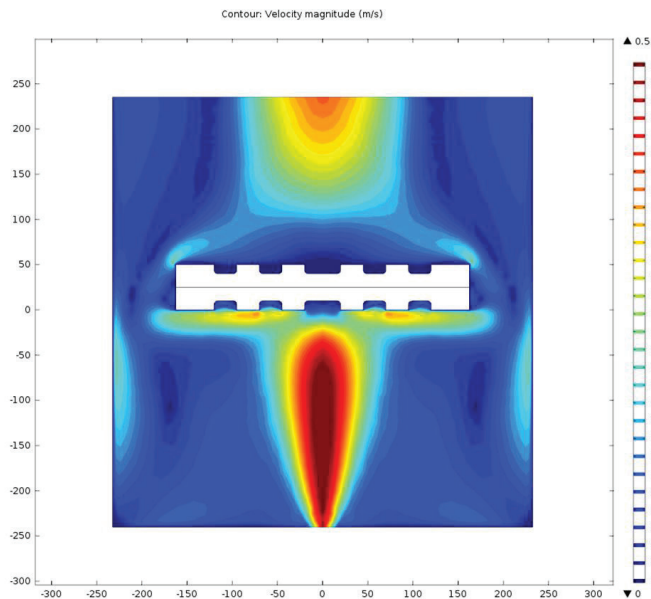


图 4 烤盘周围的气流。

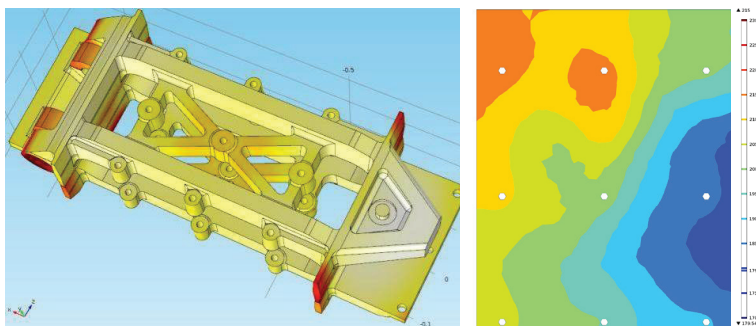


图 5 左图：烤盘支架中的温度分布。右图：上方烤盘表面的温度剖面，可以在螺栓位置处（白圈）看到更热的点。

导入 COMSOL Multiphysics® 仿真软件进行分析。他们使用仿真优化流体流动、测试机械应力，以及分析特定几何结构的热属性。

“每家巧克力制造商都有其独家配方，这样才能生产出独具特色的巧克力。”Pickles 解释说，“通过将流体的剪切速率与剪切应力相关联的实验曲线导入软件进行模拟，我们能够充分了解雀巢经典巧克力中的非牛顿行为，确保我们所模拟的巧克力流体属性与真实产品相同。”团队利用仿真找出了高流速和低

流速区域，并确定了每个浇注机喷嘴之间的流动差异。流道中及喷嘴尖端的数值探针用于分析几何模型中特定位置的情况。

“通过优化浇注机设计，我们能够将误差控制在期望值的 1% 以内，实现每个喷嘴的流速一致。”Pickles 说道。图 2 显示了这些仿真结果。

» 仿真拯救了巧克力中的松脆口感

如果雀巢奇巧里面没有香脆的威化夹心会怎么样呢？制作威化时，如果

加热不均匀，会在威化内部造成不同的水分浓度，破坏松脆的口感，甚至使其断裂。

烘焙威化时，雀巢会使用两个烤盘来挤压中间的糊状物（图 3）。烘焙过程中，烤盘大约会经过 40 簇火焰。

“我们使用仿真分析烤盘下方和周围的热空气流动来优化烤盘设计，以保证我们能在烤盘表面实现均匀的温度剖面。”Pickles 介绍，“我们这项研究的目标是修正燃烧器的功率和方向，希望能在烘焙出最佳威化的同时，减少所消耗

的燃料量。”这也符合雀巢有关持续改进所有生产过程效率的策略。

烤盘下方的火焰被模拟为热空气喷射, 加热过程通过对流实现。图 4 显示了烤盘下方的火焰和周围气流的剖面。“我们借助实验中用到的烤盘来验证模型, 发现它与仿真结果具有很好的一致性。”Pickles 说道。仿真结果还显示, 在连接烤盘的螺栓附近, 出现了更热的点(图 5), 这是由于螺栓增加了热传导所致。

“下一步是优化设计, 以尽可能均匀地加热烤盘顶部, 使温度峰值最小化。”Pickles 介绍。

» 挤压烘焙

在雀巢, 像脆谷乐 (Cheerios®)、果然多 (Trix®)、雀巢巧伴伴 (Nesquik®) 等谷物食品均通过挤出机烘焙而成。“雀巢使用的高温挤出机通过将生面团挤出模具来制作各类谷物食品。这个过程中会产生压力和摩擦, 通过黏性发热来烘焙生面团。”Pickles 对图 6 所示的挤出

机加以说明,“挤出机很常见, 因为它体积小, 制造成本低。”

Pickles 正在设计放置在挤出机内部的黏度计的外壳, 目的是测量面团进入模具时的黏度。这将保证面团质量的一致性, 从而能够按照可预计的方式来烘焙。“在我们的设计中, 需要保证黏度计的外壳能够承受设备内的高压。”Pickles 解释。

在最初的挤出机设计中, 黏度计外壳无法承受其中的高压。

“我们重新设计了可以帮助降低压力的外壳, 保证模具的设计不会超过其屈服应力, 这样黏度计才能被安全地安装在挤出机内部。”Pickles 说道。此外, 团队还通过仿真检查了挤出机的位移是否一致, 因为如果设备位移存在差异, 生产出的谷物食品的外形和尺寸将会不均匀(图 7)。

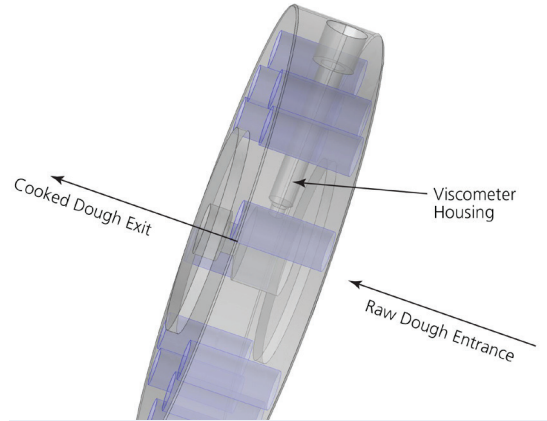


图 6 挤出机的几何构造。图注: Viscometer Housing – 黏度计外壳; Cooked Dough Exit – 熟面团出口; Raw Dough Entrance – 生面团入口

» 多物理场仿真助力更好、更安全地生产

在雀巢, 仿真是设计过程中的一个重要组成部分, 从巧克力到威化, 再到谷物食品的生产, 到处都有仿真的身影。“由于雀巢的产品最终将被消费者作为食物消费, 我们必须保证我们的设计在实际应用中能够经受考验。”Pickles 总结道,“我们对仿真结果非常有信心, 而且相信它可以帮助我们生成最好、最安全的设计, 持续为消费者生产出更美味更健康的产品。”

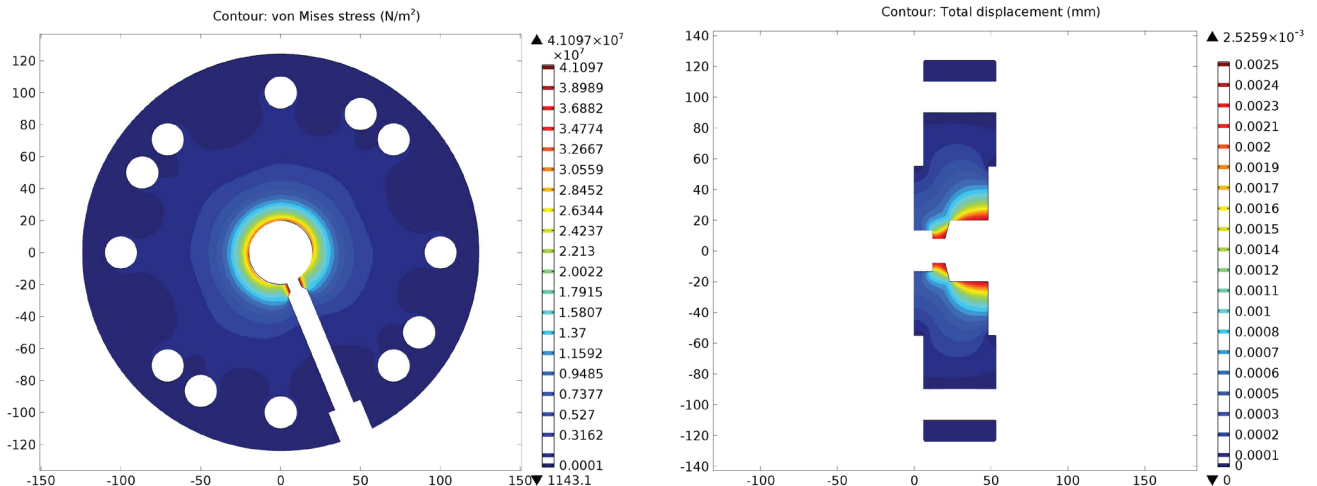


图 7 黏度计外壳和模具的仿真结果。左图: von Mises 应力等值线。右图: 总位移切片图。



mieletec FH Bielefeld, 德国

多物理场仿真 帮助 Miele 优化电磁炉设计

十多年前,如果您问一个主厨他喜欢哪种类型的炉灶,毫无疑问他会回答燃气灶。但是现在, Miele 为专业厨师和家庭烹饪提供了另一种更好的选择:电磁炉。

作者 **ALEXANDRA FOLEY**

电磁炉因其效率高而广为人知,其所用电能中超过 90% 会直接用于加热正在烹饪的食物。与燃气炉或电炉相比,这是一个巨大的提升,后两者的效率仅为 50%。如果电磁炉既可以为厨师提供比传统炉灶更高的精度和速度,同时又能保持最佳的效率,那么这类灶具将是烹饪器具行业的重大突破。

Miele 是家用和商用电器领域的全球领先企业,制造这种电磁炉正是它的

专长。mieletec FH Bielefeld 是 Miele & Cie. KG 公司与德国比勒费尔德应用科学大学联合成立的一个研究实验室,其研究人员使用多物理场仿真来改进、验证和优化电磁炉设计。

借助多物理场仿真, mieletec 联合创始人兼科学主管 Christian Schröder 设计了践行 Miele 座右铭“Immer besser”的电磁炉。Immer besser 为德文,意思是“不断超越”,它推动着该公司



图1 炉灶表面始终保持低温。虽然锅内的水在沸腾，炉面上的冰块却几乎不融化。

创造出经久不衰的、实用伟大的设计。“我们对 mieletec 所开发的产品感到非常满意，”mieletec 联合创始人兼科学主管、Miele 创新开发主管 Holger Ernst 说，“mieletec 能够创造比燃气炉更精确，同时提供更高能效的电磁炉。”

» 心急水不沸——除非使用电磁炉

“心急水不沸”。不管是谁创造了这个短语，他大概从未用过电磁炉。燃气炉或电炉可能需要十到十五分钟才能烧开一锅水，而电磁炉可以在短短几分钟内使一锅冷水沸腾。这是一种与传统炉灶完全不同的加热技术：感应加热。

电磁炉可以加热放在炉灶上方的锅具。虽然这看起来与燃气灶或电炉的工作方式类似，但它实际上是一个完全不同的过程。电磁炉加热的是金属锅具，而不是炉面（图1）。“加热不是在炉灶中发生的，”Schröder 解释，“加热实际上是发生在锅具自身内部，这使炉灶摸上去感觉很凉。”传统炉灶加热的是炉灶表面，然后通过传导加热上方的锅具。

电磁炉的工作原理基于感应加热

效应。首先，将锅具放在位于炉面下的铜线圈上方。当交流电流通过铜线圈时，会产生一个磁场，从而在锅具的金属内部产生感应电流。这些感应电流（称为涡流）通过焦耳热效应加热锅具。然后，锅具先通过热传导，再通过热对流加热锅内的物质。

最初，研究人员通过反复试验来设计电磁炉，他们依靠经验初步估算所需的频率、线圈大小和功率输出。然后，不断修改结果，直到实现最优性能，从而获得最终的设计。但是，这一过程成本高昂且耗时，并且工程师缺乏足够的信息来了解系统中发生的情况，以及该过程是否真正被优化。

“仿真可以使你获得永远无法从实验中获取的数据”，Schröder 解释，“通过仿真，我们可以更好地了解线圈或锅具内部发生的变化，从而知道哪些方面需要优化。”

通过使用 COMSOL Multiphysics

和 Miele 提供的 CAD 几何模型，Schröder 及其 mieletec 的研究团队为炉灶设计找到了一组最优设计条件。“实际上，我们能够仿真整个系统，这使我们能够改进炉灶的整体能效”，Schröder 说道。COMSOL Multiphysics 的仿真精度使他们可以在软件内对结果进行优化，这样，当制造第一批原型时，他们已经对其性能有了清楚地了解。

» 设计面临的挑战：锅具在炉灶上会产生噪声和移动

线圈感应产生的磁场会为设计带来一些有趣的挑战。“我们面临的最大的问题之一是涡流流过锅具时锅子发出的噪声”，Schröder 介绍，“这种电流会产生非常难以消除的尖锐噪声。消除噪声的唯一途径是调节交流电流的频率和线圈的几何形状，使噪声的音频高于人耳的听觉范围。”

例如，在德国，家用电源插座输出

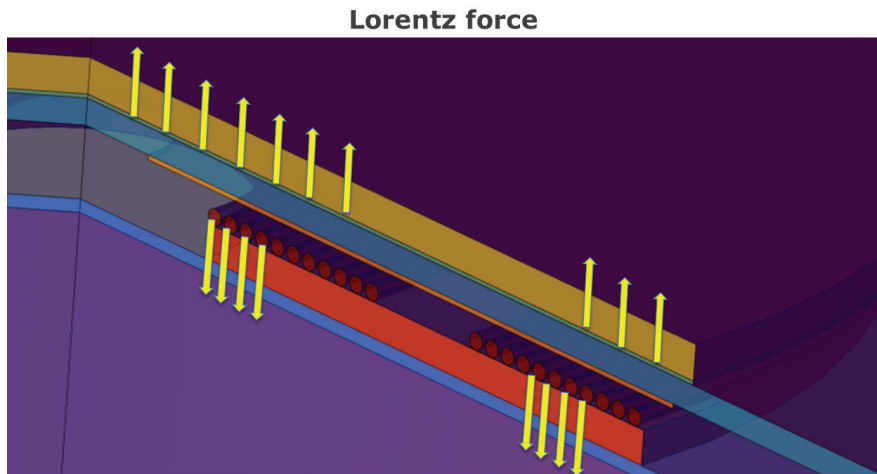


图2 模型的几何结构包含电磁炉和锅具，并考虑了几种材料（从下到上）：铝（蓝色）、铁氧体（红色）、铜线圈的绕组（棕色）、云母（橙色）、玻璃陶瓷（天蓝色）、金属锅（绿色和深黄色）。此外，图中还显示了作用于电磁炉锅具系统的洛伦兹力分布（淡黄色箭头）。

图注：Lorentz force – 洛伦兹力

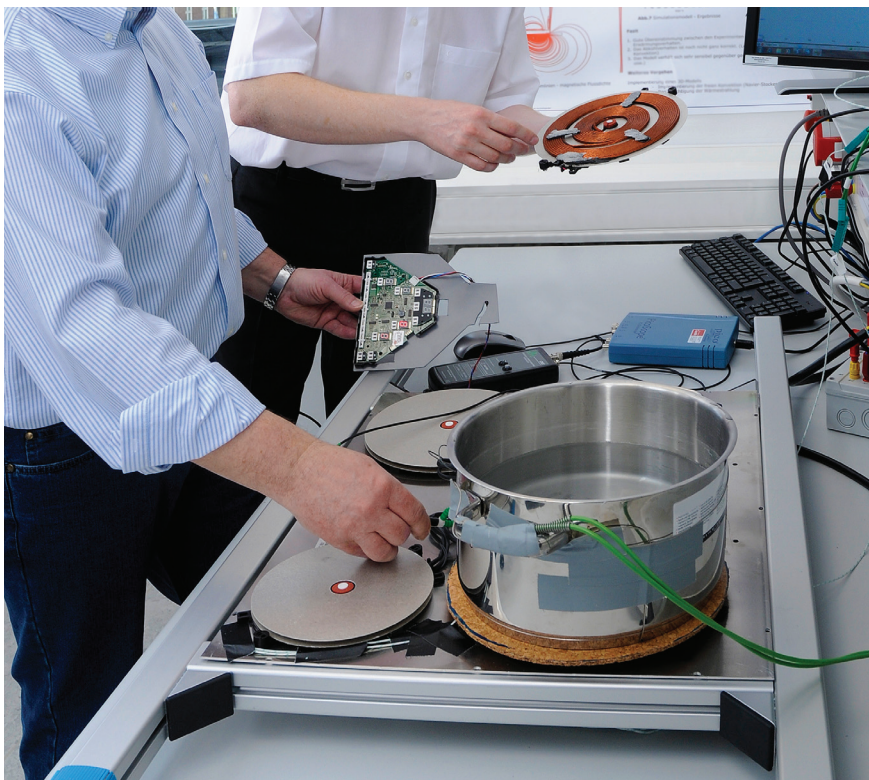


图3 科研人员 Werner Klose (左) 和 Mikhail Tolstykh (右) 在进行样品测试。由于炉面已被移除, 可以看到炉灶的内部构造。

的电源标准值为 220 V 和 50 Hz。利用 AC/AC 转换器, 可以升高线圈中电流的频率, 直到听不到锅具产生的噪声为止。“借助仿真, 我们找到了产生噪声最小的

电流频率和线圈设计方案。” Schröder 说。通过将频率升高到 30 kHz 并优化线圈, mieletec 设计出了对于人耳近乎静音的电磁炉。为什么说是近乎静音呢?

因为, 即使工作频率不在听觉范围内, 仍然会发生如磁致伸缩(图 2) 等其他低频噪音。

Mieletec 团队使用 COMSOL 的 AC/DC 模块和传热模块对感应加热过程进行了仿真。为了准确了解炉灶和锅具内发生的情况, 他们同时对热量传递和电磁性能进行了计算和优化, 以确定最佳运行条件。“目前, 这是每家制造商都要面临的问题”, Schröder 继续说, “不过在将来, 我们希望可以制造出真正无声的电磁炉。”

团队遇到的另一个挑战是系统产生的电磁力带来的影响。感应炊具是由顺磁金属制成的, 它与磁场之间会产生相互作用的电磁力, 因此可能会导致放在炉面上的锅具四处移动。发生这种情况是因为锅具上的涡电流会产生磁场, 并与线圈产生的磁场相互作用。如果这些磁场力未互相抵消, 由此产生的净力将导致锅具在炉灶上移动。

“我们需要知道制造线圈的尺寸、形状和使用的材料”, Schröder 指出, “这都属于材料科学。”通过仿真, Schröder 和

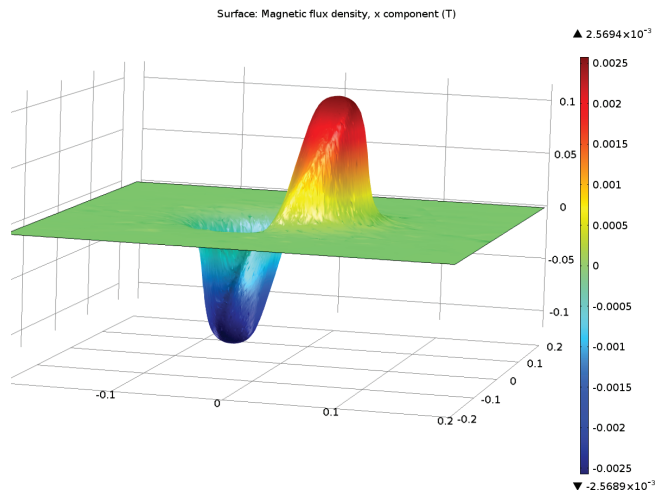
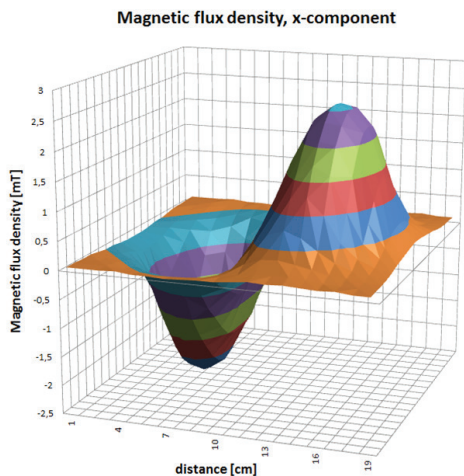


图4 特别设计的线圈产生的磁通密度 x 分量。测量结果(左)和仿真结果(右)高度一致。

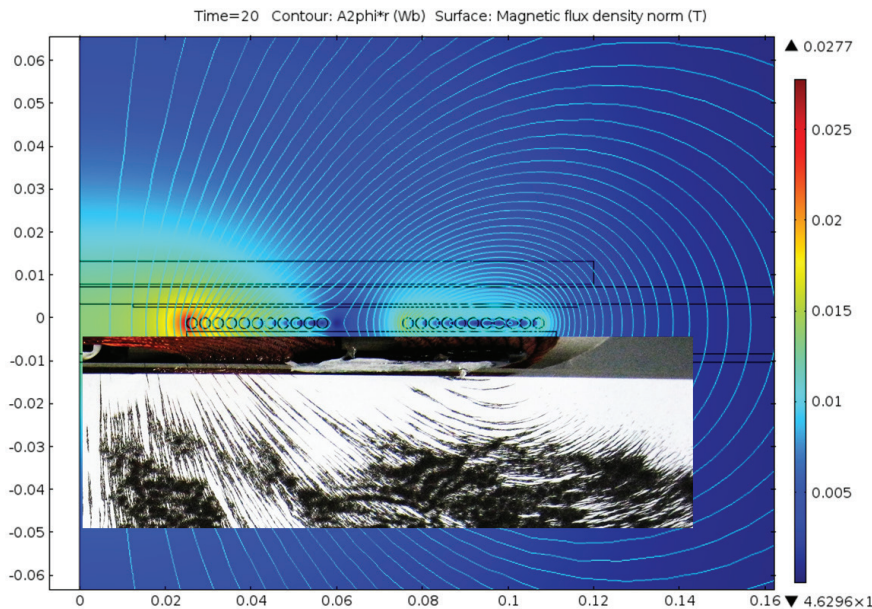


图 5 COMSOL Multiphysics 模拟结果（磁通密度模）和实验得到的磁场线之间的比较显示，仿真结果非常精确，可用于在设计原型之前测试其他线圈设计。

他的团队（图 3）能够了解不同材料属性如何影响他们针对热性能和电磁性能的设计，从而能够设计出确保锅具保持不动的线圈，同时仍能提供适当的功率进行烹饪。

» 仿真与原型的对比

在测试他们的原型时，mieletec 对于他们发现的结果印象深刻。“真是令人惊叹，”Schröder 感叹道，“我们发现 COMSOL 仿真预测的结果与原型测试所显示的结果极其一致，其他软件很少会发生这种情况。”在图 4 和图 5 中可以看到这些结果的示例。

由于他们的仿真精确地描述了原型的性能，因此 mieletec 能够节省大量的开发时间，将完成设计所需的实验数量减少了 80%。

为了测试他们设计的电磁炉是否能均匀地加热食物，mieletec 使用煎饼来评估平底锅表面的热分布。“如果煎饼的一些地方烧焦，而其他一些地方没烤熟，则说明炉灶的加热效果不够好，”Schröder 描述道，“您一定希望做出的煎饼颜色自然，并被均匀地烤熟”。在德国被广泛认可的日用消费品权威机构，德国商品检测基金会（Stiftung Warentest）将 Miele 炉灶评级为能效最高，更重要的是，它能够煎出美味可口又色泽均匀的焦黄煎饼。

» 传统厨用设备的仿真

Mieletec 也在研究其他厨用设备，例如对流烤炉。为此，全面了解材料和所发生的多物理场相互作用在开发优化型烤炉时同样非常重要。为了验证优化后

的设计，他们进行了一项测试，在烤炉内放入了一块水饱和的多孔石头。在几天内，这块石头通过了各种加热循环，以评估烤炉的加热速率和能效。

“我们必须模拟自然对流传热，其中还涉及到多孔介质流动，这是一个真正的多物理场应用。”Schröder 评论道。“仿真使我们能够测量到一些位置点的石头的温度，而这些位置是无法通过实验传感器测量的。仿真使我们可以更深入地了解设计，”他继续说，“实践中需要持续几天的测试在仿真时只需几个小时就可完以成，这可以节约宝贵的时间和资源。更不用说，我们的对流烤炉达到了最高的能效等级。”

» 厨用设备的未来

借助多物理场仿真，mieletec 为消费者提供了能效更高和烹调体验更好的设计。团队下一步要做的是，通过分析复杂的多物理场效应，例如磁致伸缩和材料老化，更深入地认识整个感应加热系统。

此外，mieletec 正在研究下一代电磁炉（多线圈电磁炉），它将允许消费者将炊具放在炉面上的任意位置，而不是预置的范围内。炉灶将能够自动感应锅具所处的位置，并自动开启某一组线圈来作出相应的调整，实现最佳的烹饪条件。厨用设备中这些热门的新设计给烹饪行业带来了新的革命，为家庭和专业厨师带来了更安全和更节能的炉具。“我们期待看到 mieletec 使用 COMSOL Multiphysics 推进设计过程，开发出更为尖端的技术。”Ernst 总结道。◎

康奈尔大学, 美国

制作美味的膨化食品

康奈尔大学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。相信您也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它就已经受潮了。那么, 是什么原因导致了这些问题呢?



图1 普通米粒(左)和膨化后的米粒(上)。

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农业与粮食研究计划项目的研究资助后, 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。

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。

这项研究工作的核心是

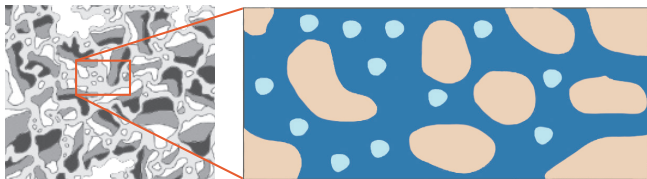


图 2 将米粒描绘为多孔的弹性固体，其中液态水（深蓝色）会发生毛细扩散、对流和相变；由水蒸气和空气组成的气体（浅蓝色）会发生主体流动、二元组分扩散和相变；由固体淀粉组成的结构骨架（浅棕色）会发生大形变。

建立一种能够适用于多种场景的仿真方法。“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，而我们可以在自己开发的框架中自由地更换条件参数，轻松地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。”

研究团队面临的最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℃ 时，液态水将会迅速蒸发，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

为了理解这些因素协同作用的过程，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® 软件对膨化的蒸

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。他使用模型分析了固体米粒的不同形态，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。他将米粒假设成一种弹塑性材料，并获取了米粒的机械位移和膨胀这两项数据。

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

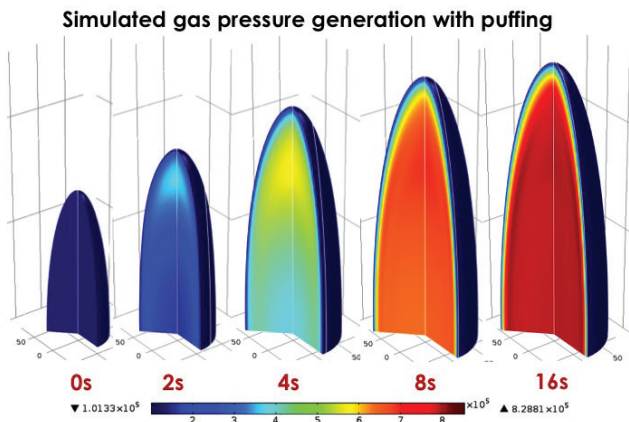
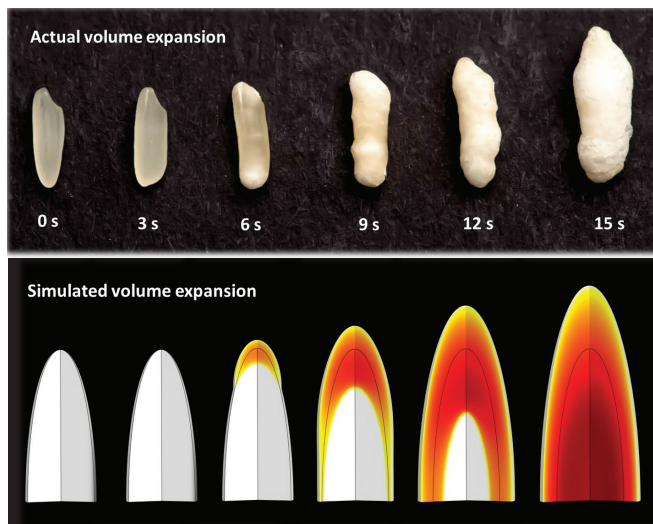


图 3 左图：时长为 15 s 的膨胀过程中，米粒真实的体积膨胀和模拟体积膨胀的对比；右图：仿真结果显示了气体压力的产生过程。

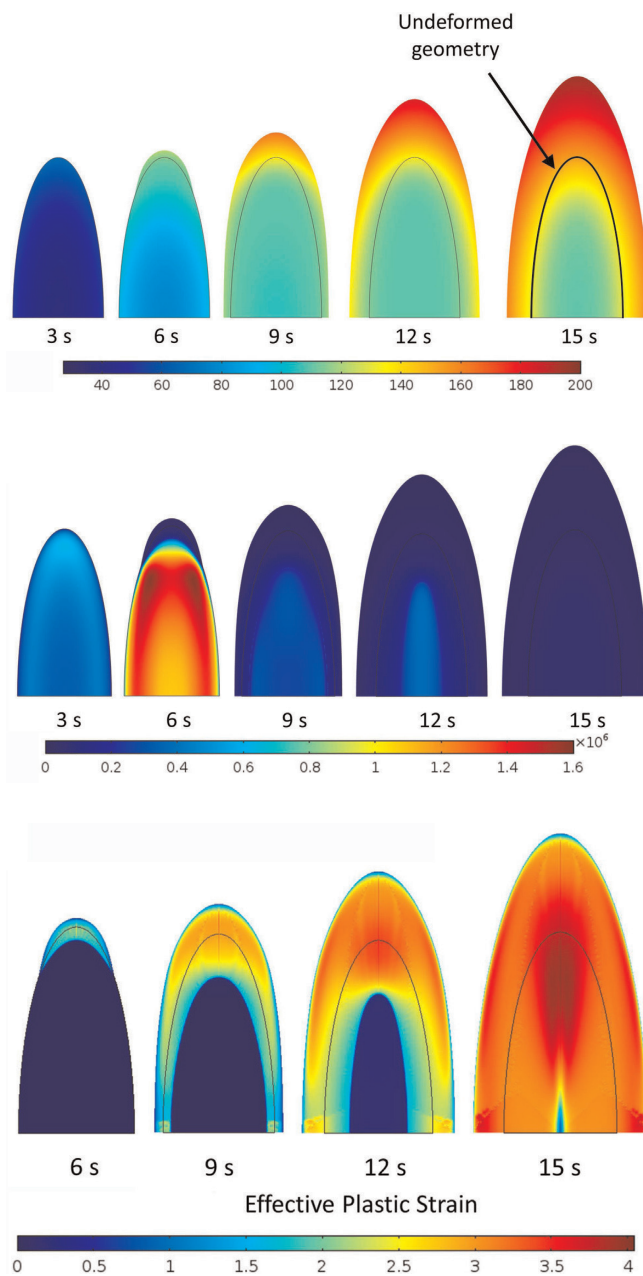


图 4 上图:膨化过程中的温度(单位为 $^{\circ}\text{C}$); 中图:第一主拉伸应力(单位为 Pa); 下图:有效塑性应变。图注: Undeformed geometry – 变形前的形状; Effective Plastic Strain – 有效塑性应变

积应变、孔隙率和应力水平等参数随空间和时间的分布情况(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,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水分蒸发率和固体基质渗透性的影响。

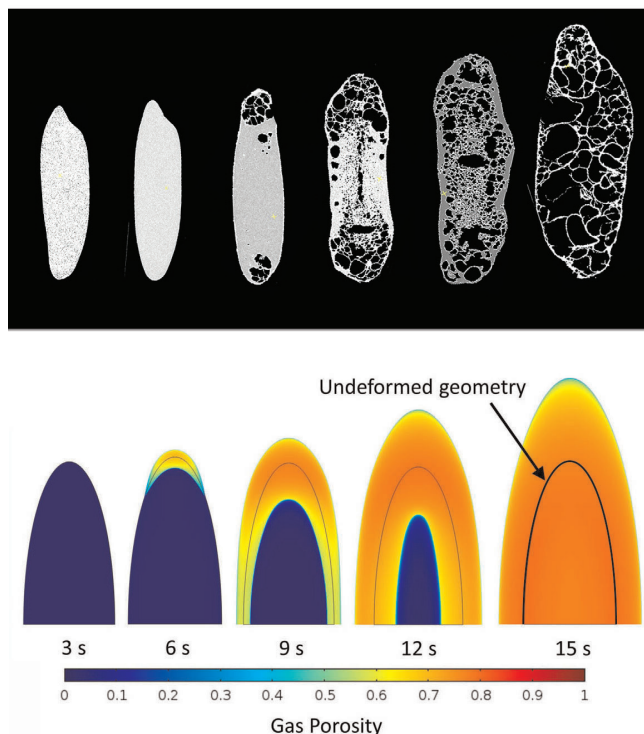


图 5 上图:米粒膨化过程中不同阶段的 CT 扫描图; 下图:仿真分析显示了孔隙率的预测结果。

基于上述工作,研究团队获得了一个全耦合模型,其中包含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,意味着加入盐后,米粒会在较低的温度下更加快速地发生膨胀。

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。”

另外,模型还帮助团队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。

» 展望食品工程的未来

除了上述的模型框架外, 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 软件建立仿真模型, 并基于模型开发了仿真 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, 使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, 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, 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, 推测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。他们可以轻松地将现有研究拓展到例如玉米等其他生物

材料, 甚至可以是其他全新的应用领域。他补充道: “物理和仿真知识对于各行各业都十分有用。我的一个学生后来从事微波干燥方面的技术研究, 其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 教授正在为下一代工程师们传授基础的物理建模和仿真知识, 他期待食品工业能在不久的将来实现重大突破。🔗

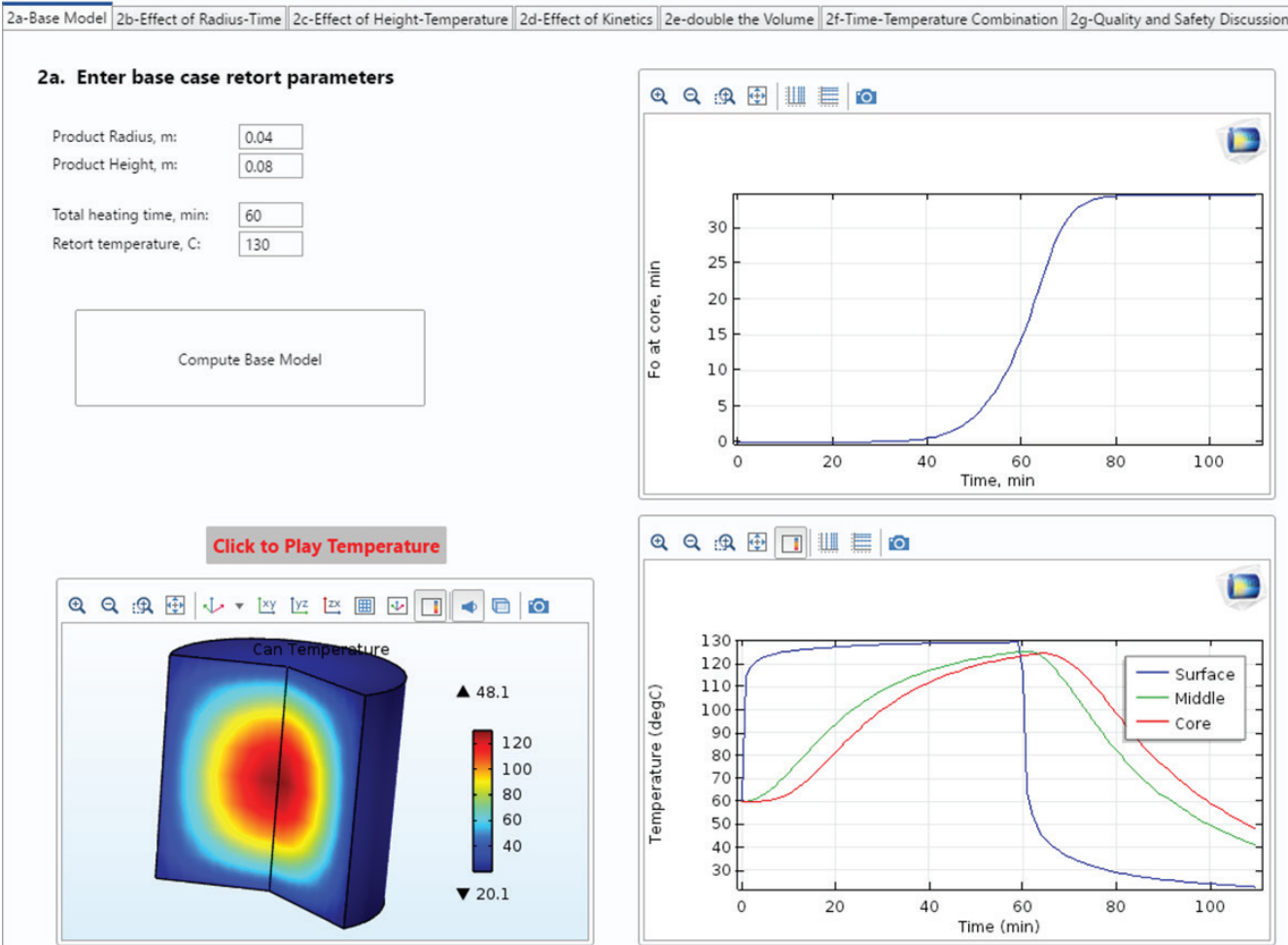


图 6 Datta 教授的学生开发的用于研究罐装食品的仿真 App。使用者可以更改罐头尺寸和加热时间等参数。

惠而浦研发中心，意大利

多物理场仿真提高 热量和能量利用效率

惠而浦公司的研究人员使用仿真技术评估新型烤箱设计的创新性和可持续性。

作者 ALEXANDRA FOLEY

对于降低能耗而言，烤箱是厨房设备中最具改进空间的电器，其总能耗中仅有 10% ~ 12% 用于加热被烹制的食物。这正是全球最大的家用电器制造商惠而浦 (Whirlpool) 公司对提高家用烤箱的能效进行创新研究的原因之一，他们的工程师将实验测试与有限元分析相结合，探索新材料、制造条件和热元件的

设计方案，目标是尽可能地提高能效。

GREENKITCHEN® 是一个支持开发对环境影响更小的高能效家用电器的欧洲倡议项目，意大利惠而浦研发中心的研究人员与该项目合作，通过探索对流、传导和辐射等热量传递过程来研究烤箱的能耗。“多物理场仿真分析使我们能够更深入地理解家用烤箱内的传热

过程，以及对提高能效的创新策略进行测试。”从事 GREENKITCHEN® 项目研究的惠而浦研发中心的热能工程师 Nelson Garcia Polanco 介绍说，“我们的目标是将惠而浦烤箱的能耗降低 20%。在欧洲，即使每三户家庭只安装一个电烤箱，由此带来的效率提升也将使欧洲居民家庭的年用电量减少约 850 太瓦时，这将使二氧化碳排放量每年减少约 5000 万吨。”

» 轻如羽毛，而不是厚重如砖块

一片面包应该像羽毛一样轻，而不是像砖块那样厚重。令人啼笑皆非的是，被称为“砖块测试”的欧盟能耗标准测试通过加热一块浸过水的砖块来测量加热过程中的温度分布和蒸发量。“之所以使用砖块，是因为它为所有烤箱提供了一个标准测试。这种砖块的热性能和孔隙率与许多食物相似，因此是一种很好



图 1 正在进行“砖块测试”的惠而浦 Minerva 烤箱。

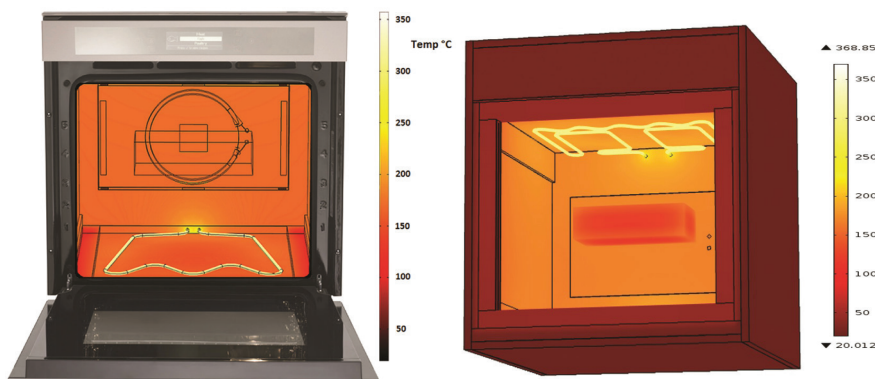


图 2 烘烤循环(左)和炙烤循环(右) 50 分钟后,烤箱表面的预测温度(单位为°C)。这些模拟使用 COMSOL Multiphysics 的传热模块进行建模和计算。

的替代品”。Garcia-Polanco 评论道。

在实验过程中,将一块初始温度为 5°C 的湿砖块放入烤箱中心,加热至砖块达到预先设定的 delta 温度(本例中为 55°C),然后记录整个实验过程中砖块的温度和水分蒸发量。借助多物理场仿真,Garcia-Polanco 研究团队创建了惠而浦 Minerva 烤箱的模型,用于探索烤箱在该测试中的热性能(图 1)。

» 精确的仿真能在更短的时间内获得正确的解

高效烹饪的秘诀在于传热速率,即描述热量从一点移动到另一点的速度。在烤箱内,食物通过传导、对流和辐射相结合的方式被加热。“静态循环使用相应的加热元件从烤箱底部(烘烤)和顶部(炙烤)加热,而强制对流循环则在这些元件的基础上增加了内部风扇进行对流。”GarciaPolanco 介绍,“因此,辐射在静态循环中最为重要,而对流在强制对流循环中占主导地位。”仿真考虑了各种加热方法的不同传热速率(图 2),以及不同影响因素的组合,包括材料特性、烤箱形状和食物的类型。

在考虑烤箱模型的瞬态行为时,有

几个因素被证明尤为重要。“我们考虑了玻璃门的发射率、壁的厚度以及壁的材料属性,”Garcia-Polanco 解释道,“在整个加热周期中,我们对模拟结果和实验结果进行了详细比较,验证了我们的模拟是准确的”。

仿真除了预测烤箱表面的温度,还可以获得砖块内部的温度曲线和水分浓度的详细信息。“我们研究了砖块内部的温度行为(图 3),”Garcia Polanco 进一步说明道,“当我们将模拟数据与实验数据进行比较后,发现对砖块内部温度的预测与实验数据高度一致”。验证了仿真结果的准确性后,惠而浦团队就可以在任意空间和时间对烤箱和砖块进行探索,并对得到的结果充满信心。“这些结果还可用于未来的实验,帮助我们减少在确定最终烤箱设计之前所需要的原型制造和设计的迭代次数,节省时间和金钱。”

研究团队还在整个实验过程中观察了砖块中的水的浓度。实验结果与模拟结果非常接近,50 分钟后蒸发的水的平均预测值为 166 克,实际为 171 克。“了解砖块中水分的蒸发速度将有助于我们进一步研究在不降低产品最终质量的前

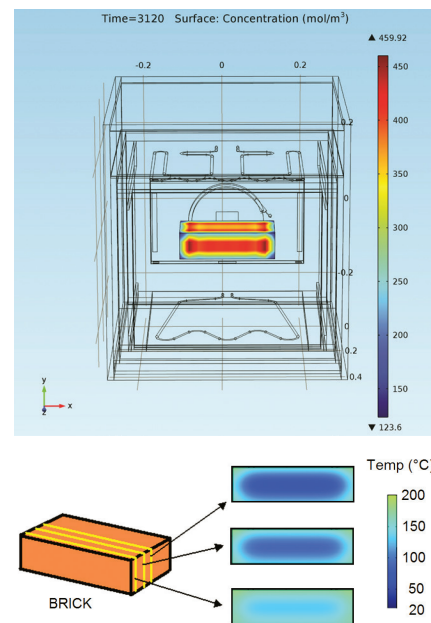


图 3 上图: 模拟结束时砖块表面的水分浓度(单位为 mol/m^3)。下图: 在 200°C 运行 50 分钟后,砖块不同切片的预测温度分布。

提下降低能耗的不同策略。”Garcia-Polanco 说道。

» 准确的模型帮助实现优质、高效的烹饪

这项验证研究的结果将帮助 GREENKITCHEN® 项目进一步完成它的使命:增强创新型家庭的能力,减少国家能源消耗并提高欧洲的能源效率。经过验证的、可靠的模型简化了新的设计理念和产品改动的验证工作,帮助设计师在更短的时间内找到正确的方案。“这项研究证实了我们的模型是准确的,这让我们在测试未来的设计理念时对结果充满信心。”Garcia-Polanco 总结说,“下一步,我们将利用这个模型来优化烤箱中能源的使用,向欧洲市场交付一个稳健的节能设计。”

ITW 公司, 美国

多物理场仿真 优化智能微波炉设计

ITW 的工程师使用多物理场仿真及仿真 App 来优化智能微波炉设计, 他们开发的固态微波/对流加热技术使厨师能够更快、更均匀地烹饪食物。

作者 THOMAS FORRISTER

连接性是实现电子设备“智能化”的关键因素。目前, 用户可以轻松地通过蓝牙 (Bluetooth®)、无线网络、4G LTE 或 5G 技术, 将手机或平板与电脑无缝连接。此外, 电子设备的计算能力也是加速其智能化的另一个重要因素。人工智能设备可以使人们的日常生活实现自动化, 并且节约能源。大多数智能家居产品已具有多种功能, 如机器人吸尘器还可以定时调节照明和采暖。

目前, 冰箱、洗碗机和微波炉等智能厨用电器已成为人们日常生活的一部分, 并在专业厨房中占有一席之地。美国 ITW 公司(Illinois Tool Works) 食品设备部是世界上最大的商业食品设备制

造商, 他们设计的专业智能厨用设备, 改变了厨师的烹饪方式, 并帮助他们管理服务时间和定制菜单。

» 利用固态技术控制微波

从制冷机到保温设备, ITW 制造各种工业电器产品, 它通过使用 COMSOL Multiphysics® 软件创建和分发仿真 App 来优化其产品制造工艺和设计。IBEX (图 1) 是 ITW 生产的一款为专业厨房设计的固态微波/对流微波炉。与其他组合型微波炉不同, IBEX 具有多种智能化功能, 改变了食物的加热方式。

射频技术可以保障在不同负载条件下烹饪所需的稳定性。ITW 的工程师正在研究使用固态射频功率放大器和接收

器来控制射频能量。与传统的磁控管相比, 这种固态射频功率放大器和接收器能根据食物的类型或数量, 以一种更智能、更均匀且更高效的方式引导能量。这



图 1 ITW 生产的 IBEX 固态微波/对流微波炉。

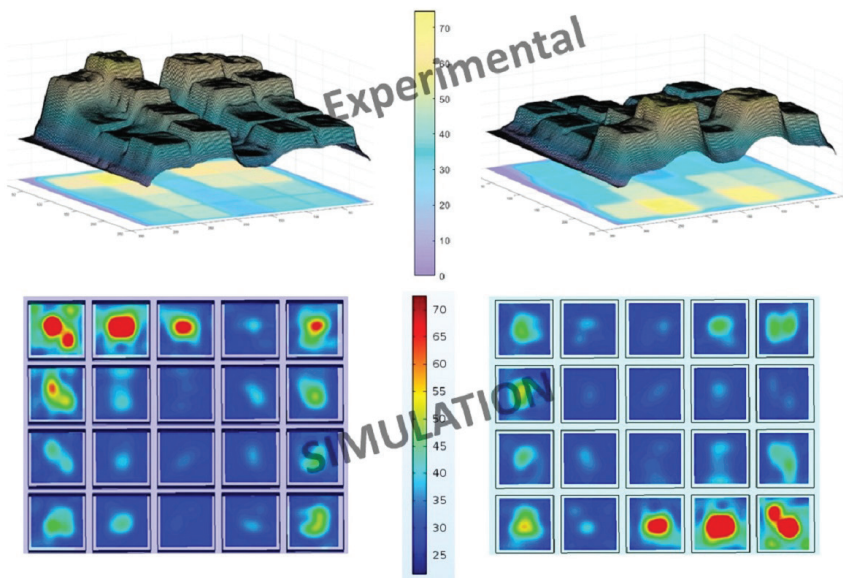


图2 设计不同的烹饪配置组合，以改善食物加热的均匀性。

项技术使 IBEX 不仅可以达到组合型微波炉的质量要求，而且烹饪速度更快。

IBEX 的靶向加热功能可以自动执行厨师和其他厨房工作人员设置的任务。除具备高效的固态微波加热功能外，IBEX 还具有算法编程功能，并支持专业人员编写食谱程序和定制菜单，以及执行各种常见功能。此外，IBEX 还具有一个 USB 接口，可与其他设备连接并传输菜单。

智能厨用设备使专业厨师的工作更加轻松。那么，使用什么技术来设计这些设备呢？“在尝试利用微波或射频能量优化食物的加热方式时，我们可以使用仿真技术来准确预测结果。”ITW 的资深射频系统工程师 Christopher Hopper 介绍说，“通过仿真了解固态微波炉中可能存在的加热模式，可以进行更精准的实验设置。”此外，由于几乎不需要进行反复实验，仿真还为团队节省

了实验成本，并提前完成厨用设备和相关实验的最优设计。

» 仿真与实验的完美结合

Hopper 和他的团队首先使用了 COMSOL® 软件及其附加产品射频模块来设计仿真实验，研究不同的负载、加热均匀性以及食物的受热点等。之后，他们利用软件的 LiveLink™ for MATLAB® 接口功能，将参数化扫描与复杂的后处理相结合以减少计算时间。Hopper 发现该接口非常有用，因为他经常使用 MATLAB® 软件。

在一个关于固态射频效率的 IBEX 实验设计中，对于不同容量的食物容器和不同的负载，为了研究如何让微波炉保持高效运转，Hopper 和他的团队通过仿真对容器进行了测试，并研究了如何改善负载加热的均匀性。通过比较两种不同的食物排列方式：薄层组成的立方排列和柱状排列，他们发现对于每种

类型的组合，固态射频微波炉都可以持续地将能量高效输送至负载。

目前，市场上出售的快速烹饪微波炉无法调整相位、频率和输出功率等参数，因此当负载的体积、分布，以及数量发生变化时，加热效率会发生大幅波动。此外，对流微波炉或组合微波炉的效率还取决于负载的表面积，因此负载的数量增加并不一定需要增加烹饪或加热时间。相比之下，对于不同组合的负载，IBEX 微波炉都能保持较高的加热效率，即同时拥有对流微波炉的质量特性与快速烹饪微波炉的速度特性。

然而，仅通过控制频率、相位和输出功率还不足以维持固态微波炉高效的能量输送。因此，他们采用了闭环反馈系统来改善烹饪配置。与开环式控制微波炉不同，闭环式控制微波炉允许设置初始加热条件，应用特殊的加热配置，并能适应烹饪过程中负载性能的不断变化。

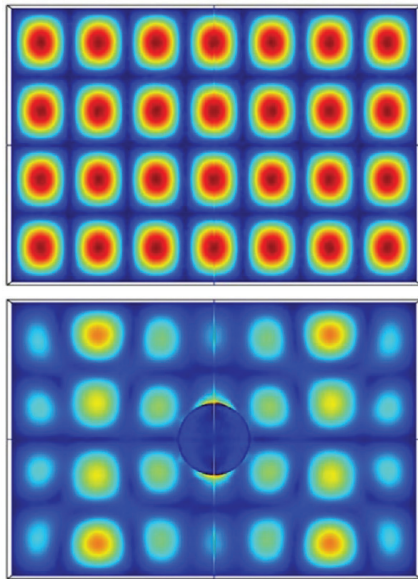


图3 有负载和无负载情况下，微波炉内的电场模式比较。

通过闭环控制, 工程师可以将输出结果反馈回系统; 通过比较实际输出与期望输出结果, 他们可以设计出一个利用误差信号自动检测和监视输出差异的系统, 通过改变负载、食物特性和其他条件来改进烹饪过程。

借助从腔体/负载系统获得的反馈, 工程师们可以通过测试找出最佳的烹饪组合, 并使用更小的标称功率来提高加热的均匀性和能量传递的持续性(图 2)。

在此基础上, 团队还可以继续完善测试和验证模拟结果。“COMSOL 多物理场仿真软件可以准确地对不同食材或负载进行电磁-热耦合模拟。通常, 负载的特性随温度和频率的变化而变化。”Hopper 介绍, “软件不仅可以模拟这些变化, 还可以精确地模拟加热模式、电磁场强度和功率损耗密度。”

例如, 通过模拟结果, 在有负载和没

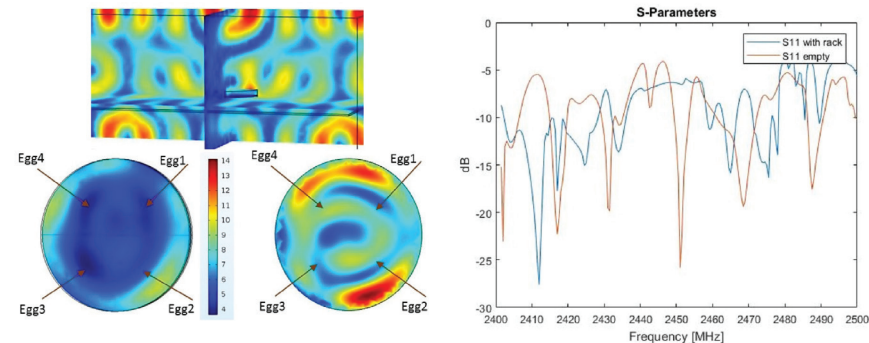


图 4 使用探针收集微波炉内鸡蛋中的热和电磁数据 (左); 含支架和不含支架的微波炉 S 参数 (右)。

有负载两种情况下, 团队可以找到受热点最有可能存在的位置(图 3)。通过模拟结果来评估可能的加热模式、腔体和厨具的吸收等, 可以帮助工程师设计实验, 并在实验过程中收集不同频率下的热和电磁数据(图 4)。此外, 他们还可以通过比较不同食物(如面包和鸡蛋)中产生的温差来验证仿真结果的准确性。

» 智能厨用设备使生活更美好

除了进行更复杂的仿真之外, Hopper 还使用 COMSOL Multiphysics® 创建了仿真 App, 以便于其他同事参与设计, 如更改频率或相位响应、温度和创建食谱的时间、食材大小和摆放位置, 以及介电性能等。

在组织内部署仿真 App 有诸多优点。Hopper 总结说: “在一个具有不同技能水平和背景的多元化团队中, 根据个人兴趣和工作职责量身定制仿真 App, 可以减轻仿真专家的工作负担。”此外, 仿真 App 还可以帮助他人学习。Hopper 创建了一个 IBEX 微波炉的仿真 App (图 5), 用于向团队新成员和实习生介绍波干扰、介电和损耗因子依赖性, 以及射频加热等基础知识。

固态微波厨用设备推动了烹饪艺术的进步, 靶向食物加热只是其中的一项功能。通过持续使用 COMSOL 软件的计算模拟、仿真 App 及结果可视化等功能, 食品设备制造行业的工程师和制造商可以为专业和家用厨房设计出更高效、更可靠的智能电器。🔗

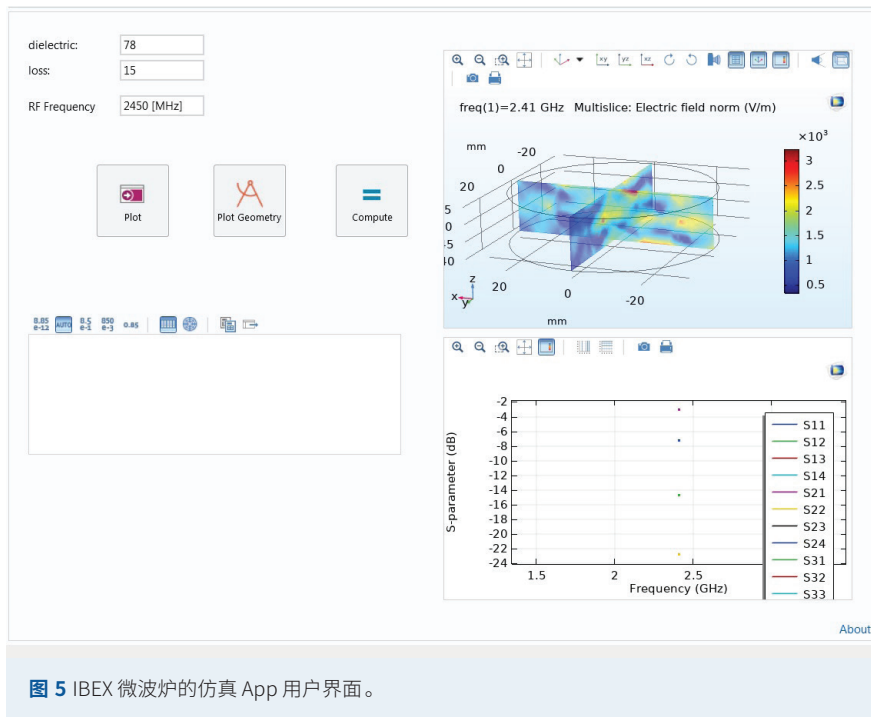


图 5 IBEX 微波炉的仿真 App 用户界面。

thermofin 公司, 德国

优化用于制冷技术的 换热器设计

热交换技术被广泛应用于各种场景, 包括为室内滑雪场降温, 为著名的古堡提供空调系统, 以及冷却和冷冻生活用品。为了确保产品设计能满足客户的各种需求, thermofin 公司通过多物理场仿真对换热器设计进行了优化, 并提升了其性能。

作者 RACHEL KEATLEY



图 1 thermofin® 换热器被用于各种设备中, 如速冻柜、混合冷凝器以及图中所示的气体冷却器。

据估计, 2018 年仅在美国就有超过 1 亿吨食物被浪费, 这个数字超过了 60 万头普通蓝鲸的重量。绝大多数食物垃圾最终将进入垃圾填埋场, 分解并产生甲烷。据美国食品和药物管理局(FDA)报道, 垃圾填埋场中食物垃圾的占比最大。食物在其使用过程中的任何阶段都可能被浪费, 因此对于消费者和食品行业而言, 了解如何减少食物浪费非常重要。在工业层面, 确保消费品在被消耗前得到妥善的储存是减少食物浪费的一种解决方案。

thermofin 公司是世界领先的换热器制造商, 它通过优化换热器设计, 帮助解决了上述问题。thermofin 公司的换热器被应用在世界各地的商业和工业建筑的空调和制冷系统中, 如在超市、冷藏室、冰场和发电厂等场所

均能看到他们的设备。为了确保他们的设计能够满足一些特殊的用途和客户需求, thermofin 公司的热力学开发工程师 Julius Heik 对换热器设计进行了仿真优化。

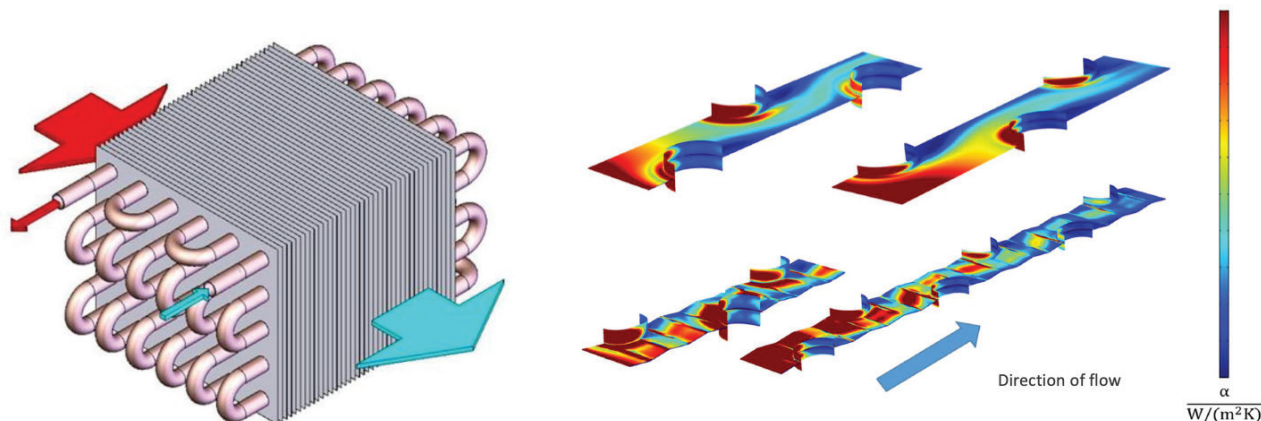


图 2 左图：thermofin® 换热器的几何结构。大箭头表示气流方向，小箭头表示制冷剂流动方向。此外，红色和蓝色表示温度的变化。例如，气流在入口处是热的（红色），在出口处是冷的（蓝色）。右图：thermofin® 换热器包含具有不同材料性能和间距要求的板条或翅片。为了更好地理解这些板条是如何工作的，thermofin 公司使用仿真对气流方向进行分析。图注：Direction of flow – 流动方向

在进行仿真工作的过程中，Heik 最喜欢的部分是在进行实际测量之前，他就可以提前了解产品的相关性能。

» 换热器的优化设计

自 2002 年成立以来，thermofin 公司从最初的 6 名员工已经发展到 500 多人，并在全球几个大洲建立了多个生产基地。他们生产的热交换器性能可靠，在制冷和空调行业中备受欢迎。

换热器的设计原理看似简单，实际上相当具有挑战性。在冷却产品的过程中，关键的任务是利用制冷剂的循环制冷除去多余的热量，从而将热能从易腐产品中提取出来。通过将制冷剂从液相转变为气相，换热器从周围环境中吸取热量。接着，这些热量被传递到另一个换热器

中，最终被释放到外部环境。

在二氧化碳的跨临界制冷循环中，换热器内的制冷剂通过所谓的“气体冷却器”被冷却。通常，人们会被气体冷却器这个名字迷惑，认为它是通过气体冷却周围的环境。Heik 表示，设计普通的换热器，特别是气体冷却器，存在很多困难。在追求更好、

更节能的制冷循环过程中，精心设计过的换热器发挥着重要作用。

和许多冷却系统一样，气体冷却器使用对环境产生的直接影响最小的天然制冷剂二氧化碳。超市制冷系统现在几乎全部使用二氧化碳，因为它已被归类为无害气体（安全组 A1）。然而，由于二氧化

碳的特性，当空气温度超过 20 ~ 25° C 时，它必须散热。这个温度范围也被称作跨临界温度范围。这也导致了这些系统由许多不同的电路和各种各样的材料组成，并且存在很大的温差。通过多物理场仿真，Heik 能够高效地分析空气流动和这些设备的材料特性。

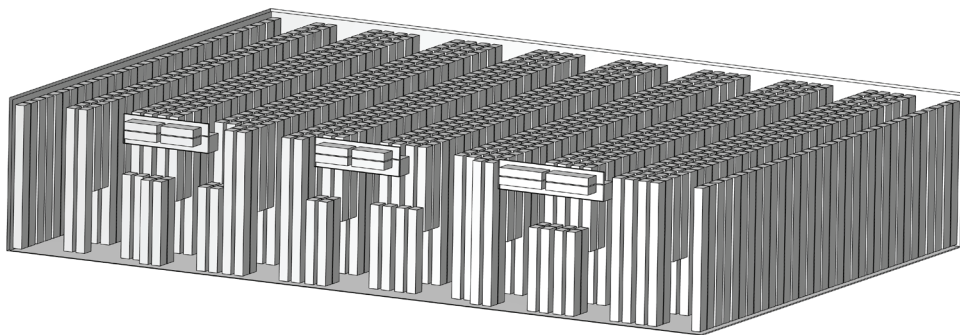


图 3 冷藏室的几何模型。由于冷湖效应，冷空气被引向地板后因密度差异发生扩散，在房间的另一端上升后，在屋顶被回收。该模型考虑了含叉车通道的高密度储物架。

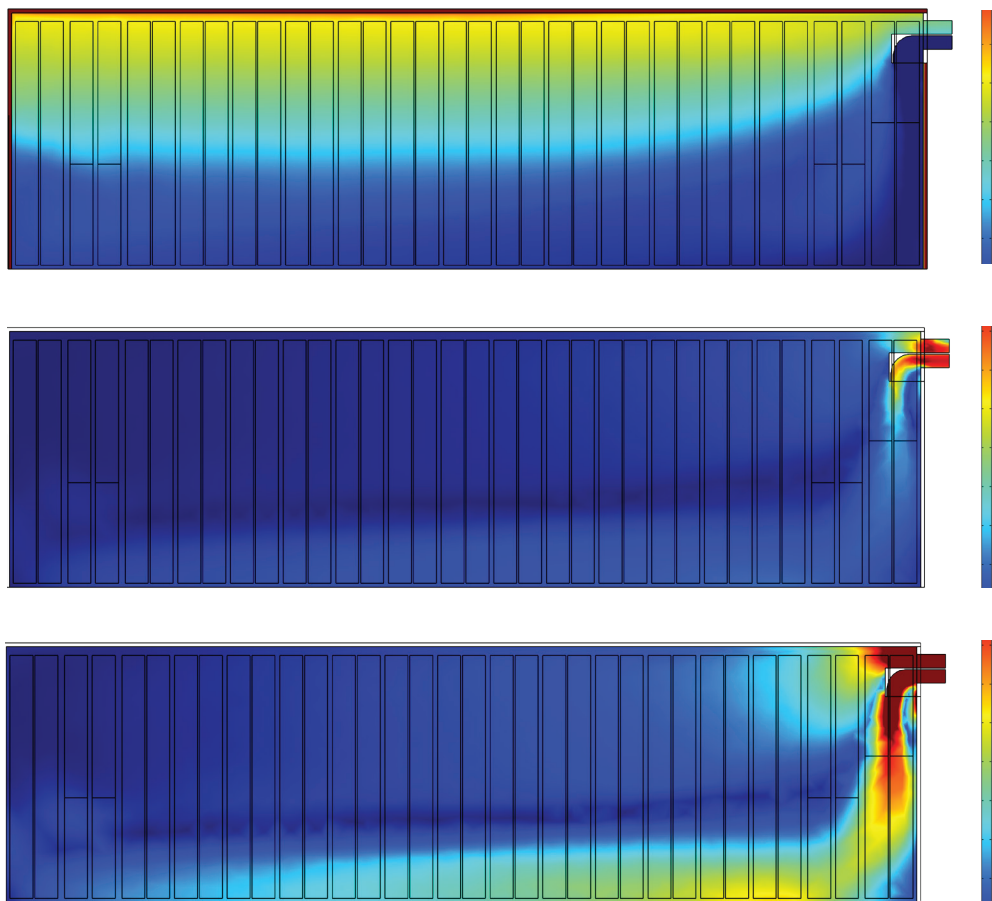


图 4 冷藏室的温度分布（上部）和气流速度分布（中部和下部）仿真结果。

在开发换热器时, 设计内翅片管是另一个巨大的挑战。这些翅片管用于将热流体转化为冷流体, 或者将冷流体转化为热流体。翅片管的排列、直径、材料(如果使用氨气则需要不锈钢)和翅片间距均取决于它们所应用的换热器类型。“关于这些翅片管是如何工作的, 我们缺乏足够的测量数据。” Heik 指出。借助仿真, 他可以模拟多个翅片管的几何结构, 研究它们的内外

传热能力, 从而更好地理解翅片管如何影响换热器的设计。他们在内部实验室对通过仿真分析得到的高性能翅片管进行了原型制作和测试。Heik 说: “我们查看计算结果和实验结果是否一致或近似, 然后选择性能最优的翅片管用于我们的工业生产线。”

» 冷藏室模拟

除了模拟换热器, thermofin 公司还通过多物理场

仿真的方法模拟客户的冷藏室。在一个特定项目中, 一位客户需要一个包括多台存储设备的肉类冷藏室。肉类在室温下被送进冷藏室, 经冷却后才能进入另一个冷藏室。Heik 解释: “房间内的空气流速不能太高, 否则肉就会从机器上被吹下来, 这一点很重要。另外, 房间里每个区域空气的均匀分布也非常重要。”

对类似的冷藏室进行模拟时, 需要考虑几个标准, 包

括温度分布、气流分布、相对湿度, 相邻热负荷以及自然对流。起初, thermofin 公司认为他们的客户需要 5 台换热器, 才能保证冷藏室内的空气均匀分布。

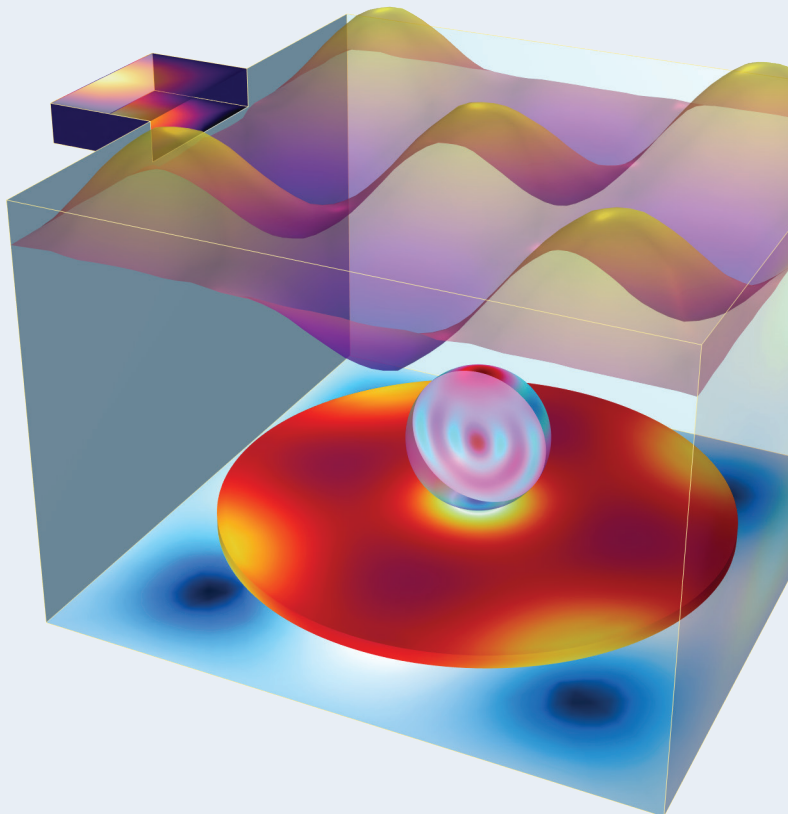
在模拟了一个包含 5 台换热器的冷藏室后, Heik 发现回流的部分空气会绕过中间的天花板。为了解决这个问题, 他在室内添加了一些空气导流管。这些导流管有助于确保平稳的回流, 最终减少室内的漩涡数量。根据 thermofin 公司的建议, 客户最终采用了 5 台 thermofin® 设备, 并建造了带有空气导流管的冷藏室。客户对最终的设计效果非常满意, 肉也没有从机器上掉下来过。

» 未来计划

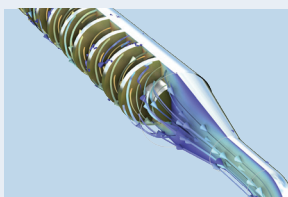
随着 thermofin 公司在全球市场的持续增长, 他们的创新性仿真工作计划也在不断发展。Heik 说: “在未来的研究计划中, 我们希望设计一种含新的翅片形状的换热器, 这需要增大换热器管的直径。”为了成功实现这个计划, thermofin 公司首先需要找到最优的方法来分隔这些管子。“对于新的翅片结构, 我们必须先进行模拟, 然后再制作原型。”Heik 强调。这样的改进有助于提升他们所设计的换热器的传热能力。◎

多物理场仿真在食品行业中的应用

在食品行业中，COMSOL Multiphysics 多物理场仿真可用于模拟和分析难以通过物理测试进行分析的产品，优化生产工艺及食品加工设备，推动食品行业创新发展。



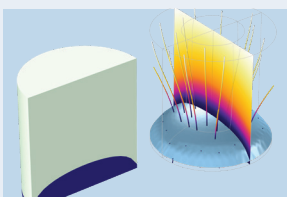
COMSOL 案例模型



意大利面挤出机

Application ID: 100121

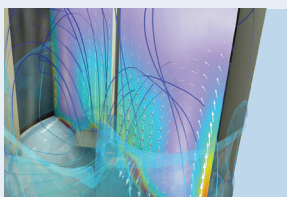
模拟面团在意大利面挤出机的非等温流动，预测最终成品质量。



冷冻干燥

Application ID: 3924

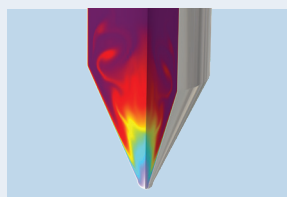
模拟冷冻干燥的相变过程。



模块化搅拌器

Application ID: 16903

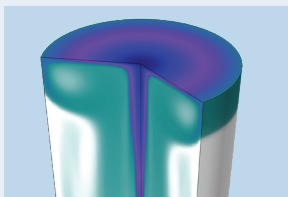
研究不同类型的容器和叶轮设计如何影响混合效果。



酿酒中的发酵

Application ID: 27281

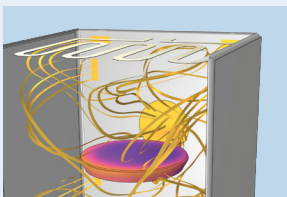
模拟啤酒发酵过程，评估影响最终酒精含量和口味的多个参数。



水中的碳酸化作用

Application ID: 67701

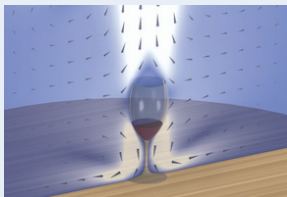
通过求解二氧化碳在水中的溶解模拟碳酸化过程。



家用烤箱

Application ID: 103081

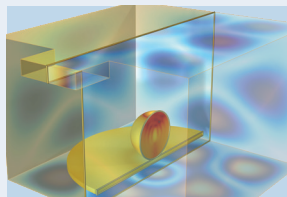
模拟家用烤箱内的热对流、热传导和热辐射对食物的影响。



酒杯

Application ID: 108751

模拟乙醇和水在酒杯中的蒸发过程。



微波炉

Application ID: 1424

仿真分析微波炉中的加热过程，揭示热量如何在食物中重新分配。