蒸蛋器悖论

S. Flach 复杂系统理论物理中心，基础科学研究院（*IBS*），*Expo-ro 55*，韩国大田广域市儒城区，邮编 *34126*

S. Parnovsky 基辅塔拉斯·舍甫琴科国立大学，*Observatorna* 街 *3* 号，乌克兰基辅，邮编 *02000*

A.A. Varlamov 意大利国家研究委员会（*CNR*）*SPIN* 研究所，*Via del Cavaliere del Fosse*，意大利罗马 *00133*

摘要

为什么用蒸蛋器蒸制更多鸡蛋时，反而需要加入更少的水，才能达到相同的 “熟度”？我们探讨电动蒸蛋器中发生的物理过程，并解开这个看似矛盾的现象。我们证明，蒸汽向鸡蛋传递热量的主要热传递机制是冷凝所释放的潜热。这不仅解释了这一悖论，也让我们能够估算用水量的减少幅度。通过将蒸制时间与传统沸腾烹煮所需的时间进行比较，我们估算了蒸制过程中蛋壳的温度。我们还介绍了设备的设计，并给出了进一步的理论估算和厨房实验测量数据。这项引人入胜的厨房实验很容易在家中完成。

新式小器具正以越来越快的速度进入我们的厨房。电动煮蛋器，也称为煮蛋器，是最早出现的自动化厨房小器具之一。“蒸蛋器”这个名称或许更合适，因为鸡蛋是用蒸汽蒸熟的，而非沸腾煮熟的。不过，最终效果与我们熟悉的水煮蛋完全相同。

设备的设计与操作

典型的煮蛋器如图1所示。它由一个300-400 W的电加热器（实验中我们使用了350 W的煮蛋器）、一个碗状加热板（用于盛放少量水）、带有几个小孔的盖子以及蛋架组成。关键是，蛋架位于加热板上方，而其中的水也位于加热板上方；蛋架最多可放置七枚鸡蛋（分别放在独立的格子中）。其中

烹饪从往量杯中倒入相对少量的水开始。水量取决于鸡蛋的数量，以及希望鸡蛋最终达到的“熟度”：溏心、半熟或全熟。接着将量杯中的水倒在加热板上。请注意，在整个烹饪过程中，鸡蛋始终位于水面上方，不与水直接接触。

过程。将透明盖放在顶部，盖住整个设备。盖子上有几个小孔，用于排出蒸汽。开孔数量因制造商的设计而异，可为一至三个，直径约为 1 厘米。当水全部蒸发且加热板温度超过设定限值时，设备便会自动关闭。 较简单的型号只会发出响亮的蜂鸣声，关闭设备则由厨房操作者负责。



图 *1* 电动蒸蛋器。蒸蛋器套装中附有量水杯。

该设备的工作原理看起来很简单。开启后，水会升温，并在一段时间后开始沸腾，产生蒸汽。热蒸汽上升并加热鸡蛋。部分蒸汽会不断从盖子的开口处逸出，使内部和外部的压力趋于平衡。

按照上述说明操作后，鸡蛋便会煮至所需的熟度。蒸蛋器的大致烹煮时间T_s为：溏心蛋约 7-8 分钟，全熟蛋约 16-20 分钟（见下文讨论）。相比之下，用传统方法在锅中煮蛋时，溏心蛋需要 4-5 分钟，全熟蛋则需要 10-14 分钟。

悖论

图 1 中的量杯显示，要把更多鸡蛋蒸到相同的熟度（例如溏心），所需的水反而更少。这种反比关系（“越多，所需越少”）看起来令人惊讶，甚至可能让人错误地得出结论：鸡蛋数量趋于无穷时，所需的水量为零！不过，尽管这听起来难以置信，这条反比例定律（鸡蛋越多，水越少）确实适用于

n=l,.....7 个鸡蛋。要解释这一现象，就必须回顾已知的热传递机制。

热传递机制

教科书通常会介绍三种最常见的热传递机制。

第一种是热传导，即热量通过分子的热运动，从温度较高的区域传递到温度较低的区域，且不发生质量流动。热传导是热量在固体中传递的主要机制，因为其中的原子或分子无法偏离其平衡位置太远。传统上将鸡蛋放入水中沸腾时，这显然是水分子通过非弹性碰撞将能量传递给蛋壳的机制。

这种机制在鸡蛋蒸制过程中有多大效果？在标准大气压下，设备中的蒸汽温度大致与沸水相同：*100°C*，此处水的密度为*958 kg/m*^{3}。至于蒸汽在这些条件下的密度，则为 0.*6 kg/m*^{3}，几乎小了*1600*倍。因此，蒸制时传递等量能量所需的时间，是沸腾时的*1600*倍。由于鸡蛋在设备中的熟制速度仅比在沸水中慢一倍，水蒸气中的热传导可以排除在热量供给机制的候选项之外。

第二种热传递机制是对流。它由介质中的流动引起。对于蒸蛋器，我们可以排除这种机制。事实上，为了将通过热传导烹制鸡蛋所需的 100 小时缩短至观察到的 10 分钟，我们需要产生强劲的流，其流速预计会把盖子冲开。由于塑料盖很稳固，我们可以排除对流。

第三种机制是热辐射。它造就了许多烹饪奇迹，例如在柴火烤炉中烘焙那不勒斯披萨 [1]。然而，由于蒸蛋器各部分的温度都相对较低，热辐射在这种情况下完全不起作用。

然而，水蒸气凝结过程中也会释放潜热，而水蒸气凝结本质上就是一级相变. 因此，这第四种机制通过蒸汽凝结，将热量从加热器传递到温度较低的表面。水分子在加热和蒸发过程中获得足够的能量，从而断开与液体中相邻分子之间的键。随后，它们进入气态蒸汽相。正是这些能量在它们重新凝结到蛋壳上时释放出来。

一旦接触到较冷的表面，例如蛋壳，蒸汽就会冷凝回液体，并传递多余的能量——潜热。这一复杂过程涉及两种相变——汽化和冷凝——

这使我们能够在合理的准备时间内用煮蛋器煮熟鸡蛋。请注意，盖子和设备的其他内部部件都是以相同的方式加热的。还请注意，在厨房中蒸制其他任何食物（例如蔬菜）时，起作用的也是同一种热传递机制。

加热过程中鸡蛋内部发生了什么?

从本质上说，煮鸡蛋的过程与许多其他烹饪食物的方法（例如煎炸、烘焙等）一样，都基于蛋白质变性这一过程。在高温下，这些复杂的有机分子会改变其形状和空间结构。变性可能由许多因素引起，包括接触化学物质、酶等。[2,3,4] 鸡蛋中含有约100种具有不同热性质的蛋白质混合物。不同于无机物的物理学——在固定压力下，相变的确切温度值（例如熔化或沸腾）是已知的——对于蛋白质这类复杂的有机化合物而言，蛋黄和蛋清中各蛋白质组分的变性温度各不相同（其范围为*60-70 ₀C*）。

鸡蛋在加热过程中内部温度分布的不均匀性，是能够制作溏心蛋的主要原因。热量从蛋壳逐渐向内传播，并在传播过程中加热鸡蛋内容物，使蛋白质发生变性。热流与蛋壳和鸡蛋中心之间的温差成正比。研究表明，温度前沿在鸡蛋内部的传播会随时间遵循平方根定律[1,2]。

悖论的解

为了理解“反比例定律”的由来，我们注意到，重新凝结在蛋壳上的水会滴落并回流到加热板上。随后，蒸发-冷凝循环便会一遍又一遍地重复。鸡蛋越多，冷凝表面越大，重复利用的水量也越多。因此，用相同的初始水量烹煮更多鸡蛋，会加快水循环利用的速度，从而延长总运行时间。这会增加鸡蛋暴露在蒸汽中的时间，因此鸡蛋会煮过头。由此，要同时将**更多**鸡蛋煮到恰到好处，就必须使用**更少**的水。

由于水蒸气也会在盖子的内表面凝结，人们会发现，这条定律并非完全互为倒数。事实上，圆柱形量杯上的刻度并非等距。有些制造商将量杯制成圆锥形，使刻度大致等距。

因此，这个表面悖论的主要原因在于，为了把鸡蛋煮到理想的熟度，无论鸡蛋数量多少，我们都必须保证相同的烹煮时间。

起决定作用的是烹煮时间，而初始水量则是次要因素。

一些估算

我们来考虑将鸡蛋蒸至全熟的情况[1]，并假设鸡蛋质量约为*60 g*。将一个鸡蛋蒸至全熟所需的能量，主要取决于将其从*5 ₀100 ₀C*（如果最初存放在冰箱中）加热至*C*所需的热量。鸡蛋的平均比热容约为*3500 J/(kg K)*。所需能量约为*3500·95·0.06 J ≈ 20kJ*。这部分能量来自蒸汽在蛋壳表面冷凝时传递的潜热。每 1 g 蒸汽/水的潜热为*2264 J/g,* 因此所需的冷凝水质量约为*9 g*。再往锅炉中加入一个鸡蛋时，这部分水会回到加热板上。如果要保持总蒸制时间不变，就必须在一开始少加*9 g*水。这个数值与量杯刻度相当吻合——蒸制全熟鸡蛋时，每多加一个鸡蛋，水量约减少*12g*。

测量

我们进行了多项测量。启动锅炉后，需要一段时间 T_b，才能将初始水量加热至沸点。从那时起，开始测量实际的蒸制时间 T_s。两者相加即为处理时间 $T_p = T_b + T_s$。我们的实验首先加入煮一个全熟鸡蛋所需的水量，但不放鸡蛋，也不盖上盖子，启动设备。蒸发的水随后直接逸出设备，没有发生冷凝。测得的结果为 $T_p = 973\ s$, $T_b = 170\ s$, $T_s = 803\ s$（表 1）。接着，我们盖上盖子，但仍不放鸡蛋，重复实验，并注意到盖子的内表面也起到了冷凝表面的作用。我们预计处理时间和蒸制时间都会增加。实际测得的时间为 $T_p = 1113\ s$，增加了 14%，即 $140\ s$ ($T_s = 943\ s$)。随后，我们再次重复实验，这次盖上盖子并放入一个鸡蛋，测得处理时间为十九分四十八秒，即 $T_p = 1188\ s$。额外增加的 $75\ s$ 是由于一个鸡蛋增加了冷凝表面；鸡蛋的实际蒸制时间为 $T_s = 1018\ s$,，这是使用此前测得的 $T_b = 170\ s$ 测量结果得出的 。

Lid	Eggs	水的用量 鸡蛋编号	T_p (秒)	T_b (秒)	T_s (秒)

[1] 英国科学家 Peter Barham 推导出了将鸡蛋烹煮至所需状态（例如软煮）的时间 T_s。该时间取决于初始温度 T_0、鸡蛋表面的温度T_b、鸡蛋直径 d以及蛋黄的目标最终温度 [5]。

off	*0*	*1*	*973*	*170*	*803*
on	*0*	*1*	*1113*	*170*	*943*
on	*1*	*1*	*1188*	*170*	*1018*
on	*3*	*3*	*1153*	*120*	*1033*
on	*7*	*7*	*1250*	*104*	*1146*

鸡蛋蒸至全熟所需的时间

我们逐渐增加鸡蛋数量，相应的结果见表 1。总体而言，我们观察到，在煮至全熟的条件下，蒸制时间没有显著变化。我们注意到，T_s 约为 17 分钟，明显长于在沸水中将鸡蛋煮至全熟所需的时间（10–14 分钟）。不过，达到全熟状态的确切时间并不明确，因为虽然存在一个最短时间，却没有明确的上限。

为了评估蒸制与沸腾所需时间的差异，我们重复了蒸蛋器实验，测定鸡蛋达到溏心状态所需的时间；这需要更精确、更严格地控制准备时间。结果见表2。

Lid	Eggs	水用于 鸡蛋编号	T_p / 秒	T_b / 秒	T_s / 秒
off	*0*	*1*	*227*	*45*	*182*
on	*0*	*1*	*350*	*45*	*305*
on	*1*	*1*	*470*	*45*	*425*
on	*3*	*3*	*480*	*40*	*440*
on	*7*	*7*	*600*	*35*	*565*

表2. 将鸡蛋蒸至溏心状态所需时间数据。

将一个鸡蛋蒸至溏心状态所需的蒸制时间为$T_s = 425$ 秒。与煮鸡蛋至溏心状态所需的六分钟相比，这增加了18%。鸡蛋中心（约$5\ ^0C$）与沸水中的鸡蛋表面（$100\ ^0C$）之间的温差为$95\ ^0C$。在更长的蒸制时间内传递相同的热量（因此达到相同的熟制状态），意味着蒸制过程中鸡蛋表面的温度更低。

如果鸡蛋表面温度发生变化（从沸腾变为蒸制），那么表面与内部之间的温差也会变化。根据傅里叶定律（热通量与温度梯度成正比，而温度梯度可近似为鸡蛋外部与内部之间的温差），热通量将按这两个温差的比值降低。蒸制与沸腾的时间变化幅度约为.....

1 18 *95 0 1 18* = . . 因此，蒸制时的温差将为 *80 5 0 5 7 0 C*/. . *C*。加入 . *C* 冰箱中最初测得的鸡蛋温度后，我们得出蒸制过程中鸡蛋的表面温度为 *86.2 0C*。



图*2* 使用红外温度计测量的鸡蛋在鸡蛋蒸制前后的表面温度。

我们使用红外温度计测量鸡蛋蒸制过程中的蛋壳温度。我们等待鸡蛋蒸制过程开始后再持续两分钟。然后迅速取下盖子，测量蛋壳温度。整个测量过程不到一秒。图2所示结果为*87.3 0C*，与我们估算的*86.2 0C*相当吻合，也与我们关于鸡蛋蒸制物理学的完整理论[2]相符。

蒸蛋器效率

最后，我们讨论蒸制过程中的能耗效率。将鸡蛋煮成水煮蛋大约需要 20 分钟。此前估算的将一个鸡蛋煮成水煮蛋所需的能量为 20kJ，这相当于一台 *350 W* 加热器运行 1 分钟所消耗的能量。将 6 个鸡蛋蒸制至水煮蛋状态大约需要 20 分钟。因此，该设备的效率约为 25%。

结论

[2] 请注意，除了温度计本身的准确度（±1%）之外，测量环境也会引入相当大的不确定性，即冰箱本身。我们注意到，根据冰箱内食品的填充程度不同，放置在同一位置的鸡蛋，其测得温度可能从*5.5 0C* 变化到 *10 0C*。

我们讨论了蒸鸡蛋的物理学。我们发现，热传递的主要机制是蛋壳表面冷凝时释放潜热，因为在所研究的情形下，通过非弹性分子碰撞实现的热传导效率低得多。增加鸡蛋数量会增大冷凝表面，从而增加回流至加热板的冷凝水量，进而延长蒸制时间。若要保持蒸制时间不变，就需要减少初始加水量。我们计算了每增加一个鸡蛋（约 10 克）所需减少的水量，结果与蒸蛋器设备数据吻合良好。根据蒸制时间的测量结果，我们还估算了蒸制过程中鸡蛋表面达到的温度。红外温度计的直接测量证实了我们的定量估算。若要在家中重复这些实验，需要准备一台蒸蛋器、一只秒表、一支红外温度计和一盒鸡蛋。这些实验可以轻松地在家中完成，无需出门，这在疫情期间尤其有价值。

作者感谢 Charles Downing 博士和 Igor Smolyarenko 博士仔细审阅手稿并提出宝贵意见。

参考文献

[1] Andrey Varlamov、Andreas Glatz、和 Sergio Grasso，《烤制美味披萨的物理学》，《物理教育》53，065011，（2018）。[2] L.G.Aslamazov、A.A. Varlamov，《物理学的奇妙之处》，第四版，世界科学出版公司，纽约、伦敦、新加坡，2018。[3] Hervé This，《分子美食学：探索风味科学》（译者：Malcolm De Bevoise），剑桥大学出版社。ISBN 0-231-13312-X[4] Nicholas Kurti、Hervé This-Benckhard，《厨房中的化学与物理》，《科学美国人》，1994年4月，第66—71页。[5] Peter Barham，《烹饪科学》，施普林格，ISBN 978-3-540-67466- 5。