



2022  
实例探究

## Phantom 观察沸腾

印度理工学院的研究人员使用 Phantom 摄像机来更好地了解沸腾过程, 这一研究领域为许多能源应用领域带来了希望。

常言道, 一个被监视的锅永远不会沸腾(心急水不开)。事实证明, 受高速摄影机镜头监视的液体就不是这样的了。

印度理工学院的副教授 Rishi Raj 博士专攻沸腾领域。沸腾对任何做过意大利面的人来说是一个熟悉的过程, 除此之外, 它还在电子冷却、热电厂和核电厂、低温燃料储存、制冷和空调等能源应用中发挥着关键作用。据 Raj 博士介绍, 为了提高锅炉在这些应用中的效率, 我们首先需要提高对沸腾本身的理解。

“我的研究涉及沸腾和传热”, Raj 博士解释说。“我们每天都可以在厨房里看到沸腾。当我们烧水时, 气泡在表面生长, 离开表面, 破裂, 然后在顶部释放出蒸汽。这种周期被称为冒泡, 每秒钟发生 30 至 40 次。分析气泡可以告诉我们传热是如何发生的。”

更快的冒泡周期, 也就是当气泡以较小的尺寸离开水面时, 可以提高沸腾的传热系数 (HTC)。虽然像在沸水中加



When it's too fast to see, and too important not to.®

入表面活性剂这样的机制可以使气泡更早地离开表面,但由于传热系数增加的幅度太大,以至于它的增加不能仅仅归因于这些机制。出于这个原因,Raj 博士进行了一系列的实验,以调查一种鲜为人知的排斥力在沸腾中的作用。

## 术语解释

**沸腾:**一种液态-气态相变。

**冒泡:**气泡成核、生长、脱离和再润湿的循环过程。它制约着沸腾过程中的传热。

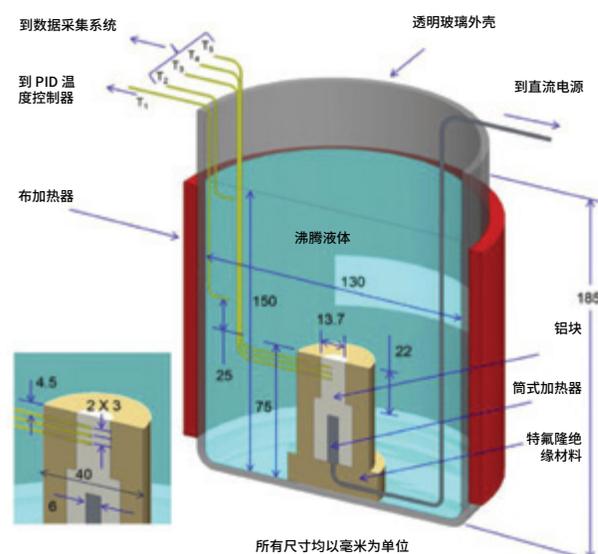
**传热系数 (HTC):**单位面积上每开尔文所传递的热量。

**表面活性剂:**能降低表面张力的化合物。

## 分析表面活性剂引起的气泡脱离

实验装置包括一个装有试验液体和加热器组件的透明圆柱形玻璃, Raj 博士将加热器组件置于不同的方向,包括朝上(与重力方向相同)和朝下(与重力方向相反)。Raj 博士和他的团队将一个筒式加热器嵌入一个铝块内,并将其连接到直流电源。他还布置了一台 Phantom v7.3 高速摄像机,以从正面和侧面观察沸腾过程中的气泡动态。其他实验材料包括:

- 水溶性表面活性剂,具体而言,是十二烷基硫酸钠(SDS)和十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)。
- 一个硅布加热器,它缠绕在外壳周围,用于维持大量液体的温度,同时还有一个热电偶和 PID 温度控制器。
- 一个 40 毫米的特氟隆™衬套,一端有一个套环,用于绝缘铝块。
- 一个热电偶用于监测液体的温度,以及三个嵌入加热器组件内的热电偶,用于估计壁温和通过沸腾表面的热通量。
- 一个数据采集系统,与计算机连接,用于记录电流、电压和温度数据。

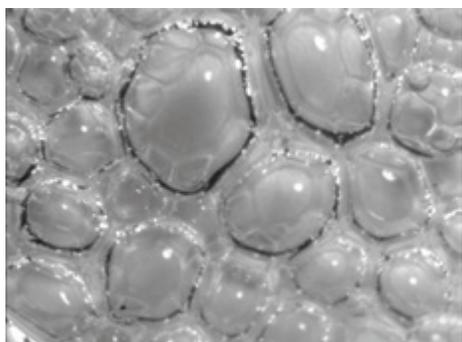


加热器朝上时的实验装置模型的剖面图。

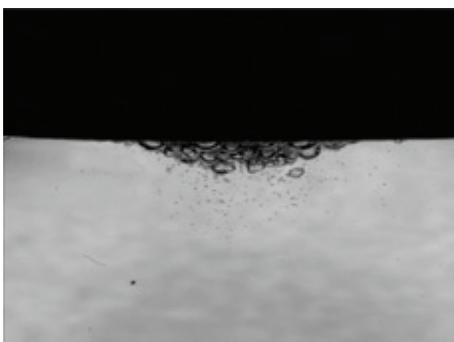
Raj 博士说：“Phantom 摄像机对我们的研究至关重要，因为冒泡周期非常快，每秒可达 40 次。”“一般来说，我们以每秒 5000 帧的速度拍摄沸腾过程，但如果我们必须更仔细地分析气泡，我们通常会将拍摄速度提高到每秒 10,000 帧左右。”

利用这些高速图像，Raj 博士和他的团队进行了力平衡分析，以证明起增强作用的“鲜为人知的力”是来自于吸附在液体-蒸汽界面上的表面活性剂之间的排斥力。研究还表明，这种力足以使尽管还非常小的气泡提前离开朝上的加热器。研究小组测量了这种排斥力的大小，并估算出气泡在朝上的加热器上的离开频率为 25 赫兹，在朝下的加热器上的离开频率为 15 赫兹。与纯水沸腾相比，这样的高频率使 HTC 明显增加，增加幅度约为 30%。

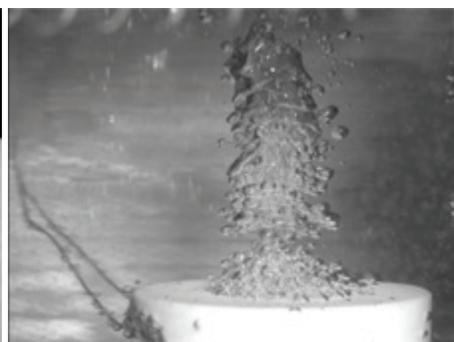
Raj 博士说：“获得的这些气泡动力学信息是至关重要的，因为它们告诉我们可以如何在沸腾期间使用表面活性剂水溶液来加强传热过程。”



高速摄像机从正面拍摄起泡水溶液，其中加热器方向朝下。9,900 fps。



高速摄像机从侧面拍摄起泡水溶液，其中加热器方向朝下。5,000 fps。



高速摄像机从侧面拍摄起泡水溶液，其中加热器方向朝上。5,000 fps。

## 减少实验室停机时间

Raj 博士对 Phantom 摄像机并不陌生。事实上，在他的博士生涯中，他曾多次使用这些摄像机。虽然本案例研究中所描述的实验使用了一个较早的摄像机型号 (Phantom v7.3)，但 Raj 博士的实验室最近购买了 Phantom VE0 410。这台 100 万像素的摄像机的拍摄速度超过每秒 5000 帧，最大分辨率为 1280 x 800，足以在冒泡过程中捕捉气泡。

自从使用 VE0 410 以来，Raj 博士注意到最大的不同是，由于其快速的数据管理能力，它大大减少了他在两次实验之间的停机时间。“我们的许多沸腾实验只需要三到七秒的录像，”Raj 博士解释说。“为了将这几秒钟的数据下载到电脑上，过去我们需要花费 20 分钟，这在我们的实验室里造成了大量的停机时间。VE0 从 RAM 中下载数据的速度更快，使我们的实验过程更快，最大限度地利用了我们的实验时间。”



Phantom VEO 摄像机有 140 万和 900 万像素两种分辨率, 图像吞吐量高达 13 Gpx/sec。

Phantom VEO 摄像机拥有千兆以太网, 并可选择万兆以太网, 这是一种可实现极快的下载速度的专用网络连接。这个功能很好, 可以在这个应用中从摄像机中快速保存大文件。与 v7.3 相比, VEO 摄像机在工作流程上做了许多改进, 包括更高的帧速率、更大的 RAM 容量、用于远程黑色参考的内部遮光快门, 除此之外, 它还可以直接从摄像机访问所有 I/O 信号。

## 不仅仅是一台摄像机

Raj 博士说:“Phantom 的技术团队非常乐于助人, 热心地根据我们的研究向我们推荐了合适的摄像机。”“他们的专业知识和乐于助人的精神是我们更愿意与他们合作的一大原因。特别是当您还是一名学生时, 如果有一个人能够及时回答您提出的与高速摄像机有关的问题, 这对学习是非常有帮助的。技术人员总是以通俗易懂的方式解释事情。我喜欢和他们一起工作。”

得益于 Phantom VEO 摄像机, Raj 博士和他的团队提高了实验的速度和效率, 同时获得了气泡在冒泡过程中的高清图像。“这台摄像机给了我们许多关于气泡动力学的信息, 我们将继续研究气泡动力学, 以提高关键能源应用中的沸腾效率。”

要了解更多信息, 请访问 [www.phantomhighspeed.com](http://www.phantomhighspeed.com)。



VISION / AMETEK®  
RESEARCH

某些 Phantom 摄像机需要出口许可证。有关更多信息, 请访问 [www.phantomhighspeed.com/export](http://www.phantomhighspeed.com/export)。