

# 为建筑物提供更好的制冷与制热

在多物理场仿真的帮助下，德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的研究人员开发出了一种由太阳能、天然气及废热驱动的新型吸附式制冷机、热泵与储热单元。

作者：GARY DAGASTINE

在欧洲，因建筑的制冷制热而消耗的能源大约占了总能耗的 50%，这促使研究人员开始积极寻找其他可代替常规方法的技术。

一个颇具吸引力的可能解决方案是使用由热而非电驱动的吸附式制冷制热系统。由于热可以来自太阳能集热器、工业设施产生的废热，以及热电联产单元，这种吸附技术有望显著减少耗电量及相关的 CO<sub>2</sub> 排放量。这种技术不仅可以用作一个高效加热系统，使用燃气热泵来放大对建筑的供暖，还可以提供对能源的长期压缩储存。

简而言之，基于本原理的制冷制热系统会循环对工作流体进行吸附/解吸，期间，流体将无数次地从液态变为气态，或从气态变为液态（请阅读第 37 页的侧边栏获取更多信息）。利用本技术可以开发一种特殊的换热器来作为热压缩机使用，它可以在不同温度和压力下周期性加热和冷却吸附剂材料。这些系统可以代替热泵及制冷机中由电驱动的机械

式压缩机，并能提供额外的储热能力，它所储存的热量最多可以达到传统热水系统的三倍。

## → 优化热传递与储存

吸附式制热系统及制冷机的开发非常复杂。它们的工作周期不连续、峰值能量通量会发生变化，且其动态行为将由耦合的复杂传热和传质现象来确定。

目前虽然有一些吸附式系统已开始商用（见图 1），但要在更大规模上充分发掘其潜能，还应进一步提升该技术的效率及紧凑性，生产成本也应更低。

位于德国弗莱堡的弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 简称 ISE) 是该领域的世界顶尖研究机构之一。该研究所现在约有 1,300 名员工，主要研究太阳能转换、储存及使用的各个方面。它隶属于弗劳恩霍夫研究中心，该中心在德国拥有超过 65 个分支机构，分别专注于研究应用科学的各个不同方面。

Eric Laurenz 和 Hannes Fugmann 是弗劳恩霍夫 ISE 的研



图 1. 商用吸附式制冷机示例。

究人员，他们所在的 20 人团队正在 Lena Schnabel 的带领下为吸附系统开发高效换热器。Laurenz 主要负责研究水蒸气和热如何流过多孔结构，希望能优化系统尺寸及效率，Fugmann 则负责与非等温流体流动和固体中热传导有关的设计研究，以开发出更好的换热器架构。

“由于所涉及的传热和传质之间存在高度非线性耦合，解析方法并不适合我们的工作。” Laurenz 说道：“我们需要使用

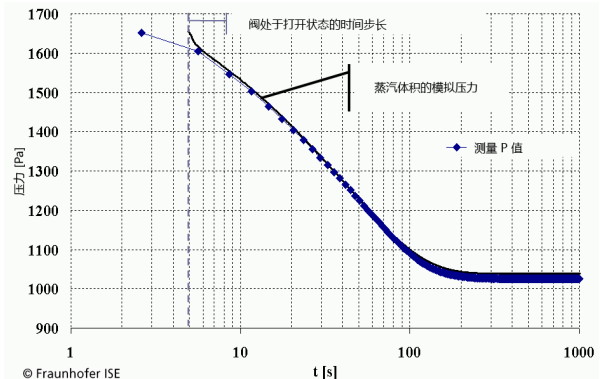
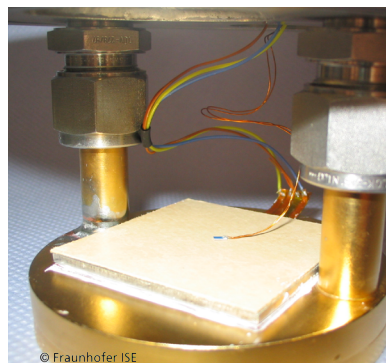


图 2. 左：用于验证 COMSOL® 软件吸附动力学模型的实验装置，包括置于 50x50 mm<sup>2</sup> 铝载体上的一层很薄的沸石吸附剂，铝载体置于量斗内的散热板上，并通过温度和热通量传感器进行监控。右：图形显示了在弗劳恩霍夫 ISE 的沸石吸附剂测试装置中测得的水蒸汽压力，它与仿真结果相当一致。

COMSOL Multiphysics® 之类的数值工具来模拟吸附剂的循环装载和卸载，同时还要考虑温度和质量的时空分布。在这些工具的帮助下，我们能够确保仿真捕捉到的吸附和解吸动力学是正确的。”

团队使用了一种通用方法，即结合仿真与经过充分定义的小型实验来开发一个大型模型，以精确预测所研究物理场在复杂真实世界中的行为。团队利用小型模型充分而详细地模拟了其中的物理机制，这能够降低更大模型的复杂度，从而节省计算时间。这种方法极大地降低了对构建全尺寸物理样机的需求，同时节省了时间和资金。

### → 验证吸附过程

对改进吸附式换热器的关键目标而言，其中之一是要优化系统中所用薄吸收剂层的吸收速率和容量。在他们的一次分析中，Lena Schnabel 和 Gerrit Fuldner 利用仿真开发了一个模型来捕捉吸附剂层中传热和传质之间的相互作用动力学。在模型的帮助下，小组能够充分理解从图 2 左侧实验装置中获取的测量数据。

“我们利用参数估计方法对比了实验和仿真结果，只有这样，我们才能确定那些无法直接测量的传递系数。” Laurenz 说道：“我们随即在对系统的更复杂仿真中使用了该数据。”

Schnabel 的团队大约在 10 年前开始第一次使用 COMSOL Multiphysics 仿真软件，不过直到近期，团队才开始使用带有不同细节程度的模型来评估传递参数，以及模拟完整系统在动态变化工作环境下的循环行为。弗劳恩霍夫 ISE 的大部分研究工作都已证明，对于复杂动态系统，能够轻松进行多物理场耦合模拟的能力必不可少。

### → 改进的换热器设计

Fugmann 进行了一些换热器设计相关的基础研究来优化换热器架构，包括制冷机和热泵。相对传统的翅片管式换热器设计，他设计了一些新的几何系统，希望能通过使用网状结构来增加传热表面的面积，如图 3 所示。在这种新型架构中，会在一连串的管周围编织或粘合网状结构，以分隔换热器中的两种流体。在气液网状换热器的实验装置中，热水会在管道内流动，而冷空气则会在管道间以及穿过网状结构流动。

“我们发现如果使用网状结构，就可以由更大的表面得到更高的传热系数，并能显著降低材料的使用。” Fugmann 说道：“我们可以实现这一点，同时不会造成压降的明显增加，网状结构的灵活性也使我们可以根据设计的工作参数轻松调整几何。”

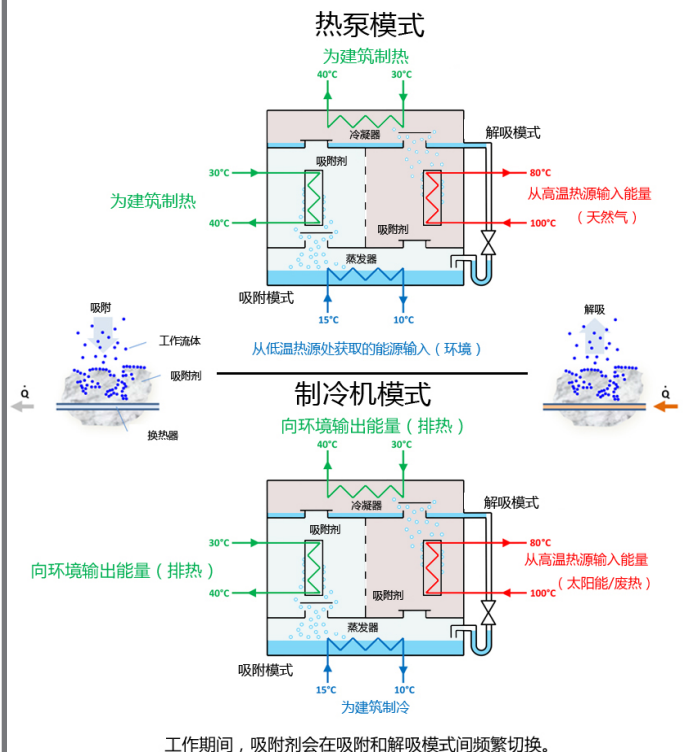
Fugmann 使用 COMSOL® 软件执行了参数化扫描以研究

## 吸附在制冷制热系统中的使用

下图显示了用于设计吸附式制冷机和热泵的两步循环示意图。为便于解释，让我们先来看看热泵模式下都发生了些什么。本循环包括一个吸附和一个解吸步骤。在吸附步骤中，工作流体在低温下发生蒸发；并在中温下被吸附剂吸收掉，其间释放的热可用于为建筑供暖。

吸附剂达到饱和后，过程反转并开始解吸步骤。吸附剂被加热到高温，以解吸工作流体。接下来，工作流体会在中温下发生冷凝，冷凝释放的热可用于为建筑供暖。

总结一下，在制热应用如（热泵）中，当环境中的能量被移走的同时，建筑得到了制热。与之相反，在制冷应用如（制冷器）中，当建筑得到了制冷时热量被释放到了环境中。循环中断时，吸附的潜热可以无耗散地储存起来。基于所期望的应用，吸附可以实现建筑的制热或制冷，同时环境可作为热源或冷源。



© Fraunhofer ISE

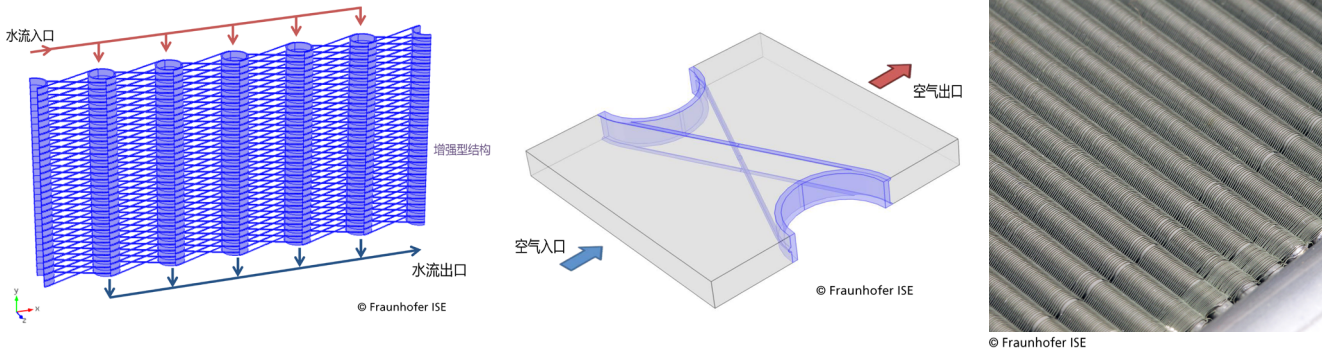


图 3. 左：设备几何显示温水流入管中。冷空气从管间吹过，对管内流过的水进行冷却。中：仿真几何显示了冷空气进入，暖空气离开。网状结构和管以紫色显示。右：实验测试中所用的设备几何。

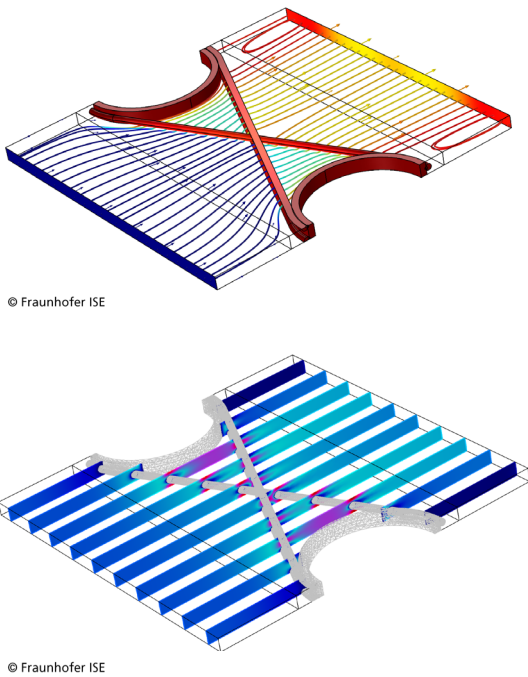


图 4. 左：仿真显示了空气、管壁，以及连接两个管的线上的速度流线图 and 温度分布（红色：暖；蓝色：冷）。右：仿真显示了空气的速度大小（红色：高；蓝色：低）。

具体的压降、传热系数、材料使用，以及设计几何的其他方面。图 4 显示了优化后网状结构及管几何中的温度分布和速度大小。

Fugmann 这样描述该设备：“我们从测量中发现线与管之间的粘合连接会产生一个很高的主要热阻。理解了网状结构中传热的局限之后，我们可以进一步优化该设计。”

由于单位体积上的换热表面变大了，弗劳恩霍夫 ISE 还同时对网状结构进行了实验和数值分析，以便能将其用

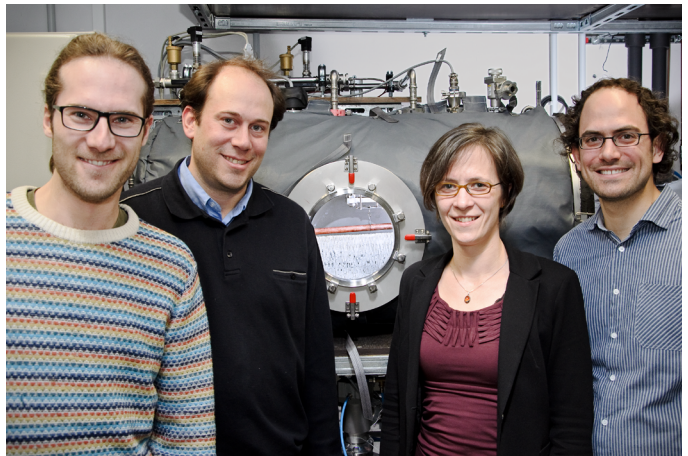
于吸附剂涂层结构，以及用来扩大储热中换热器的表面。

### → 未来展望

“我们的近期目标是增加自己在这些领域的知识及能力，以便更好地帮助我们的客户，以及那些在弗劳恩霍夫 ISE 致力于开发吸附式气候控制系统不同方面的同事。” Laurenz 说道：“至于长期目标，我们非常期待有一天，这类技术能在社会中得到广泛的应用，帮助降低电网负荷并保护地球资源。” ❖

### 参考文献

<sup>1</sup> Földner, G. & Schnabel, L., 2008. Non-Isothermal Kinetics of Water Adsorption in Compact Adsorbent Layers on a Metal Support. In Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover. COMSOL Conference. Hannover.



弗劳恩霍夫 ISE 团队的成员包括（从左至右）：Hannes Fugmann、Gerrit Földner、Lena Schnabel 和 Eric Laurenz。他们的身后就是针对吸附式换热器的动力学特征而建立的实验装置。该装置生成的实验数据可用于基于仿真的参数估计。