
不用制冷剂的“冰柜”来了！

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37861.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

不用制冷剂的“冰柜”来了！。在全球气候变暖危机日益严峻、制冷需求持续攀升的当下，传统冷冻技术因其高能耗与高排放问题，成为可持续发展道路上的绊脚石。日前，《自然》在线发表了香港科技大学机械及航空航天工程学系讲座教授孙庆平团队最新成果：他们成功研发出全球首台能够达到零下摄氏度的绿色弹卡冷冻装置，实现了低至-12 的制冷效果。

这一突破标志着绿色弹卡冷冻技术的应用范围，成功从室内空调制冷扩展至要求更严苛的全球冷冻业。论文通讯作者孙庆平对《中国科学报》表示，该冰柜完全无需传统制冷剂的零排放创新技术，为冷冻业的绿色低碳转型提供了切实可行的中国方案，为全球应对气候变化贡献了关键科技力量。

直面冷冻业脱碳难题

全球变暖的紧迫性与制冷需求的快速增长形成了尖锐矛盾。目前主流的蒸气压缩制冷技术，在为我们带来清凉与保鲜的同时，也因其普遍使用氢氟烃等强效温室气体作为制冷剂，成为了重要的碳排放源。

据统计，全球氢氟烃类制冷剂的年排放量预计在2025年将超过12亿吨二氧化碳当量，其中约27%（约3.3亿吨）来自于零度以下的冷冻应用，如食品冷链、医疗冷藏等。冷冻业市场规模与空调业相当，其脱碳需求迫在眉睫。

弹卡冷冻技术作为一种革命性的环保替代方案，早已进入科学家视野。它摒弃了传统气体制冷剂，利用镍钛形状记忆合金在受到循环应力时发生固态相变，并吸收或释放大量潜热的特性来制冷。该技术天生具备零直接排放与高能效潜力两大优势。然而，长期以来，该技术仅能应用于高于0 的空调温区，如何让其进入零下冷冻市场，成为学术界与产业界亟待攻克的核心难题。



孙庆平（右二）、姚舒怀（左二）、周国安（右一）、李泽希（左一）合影。研究团队供图，下同

论文第一作者、香港科技大学机械及航空航天工程学系研究助理教授周国安介绍，团队的此次破冰，体现在材料、传热流体及制冷结构的精心设计上。在材料选择方面，团队选用高镍含量（51.2 at%）的二元镍钛合金，并通过成分调控将奥氏体结束温度降至 -20.8 。这种合金在低至 -20 的环境下，依然能够展现出优异的超弹性和显著的相变潜热，其绝热温变峰值在 0 时可达 16.3 ，有效工作温窗宽达 48.5 ，为制冷提供了强大的材料基础。

传热流体的选择同样至关重要。团队采用30 wt%的氯化钙水溶液作为传热物质，该溶液凝固点低，在低温运行时仍能保持良好的流动性，有效避免了冰晶堵塞的问题。同时，它与镍钛合金表面具有良好的湿润性，能够降低接触热阻，显著提升传热效率。

在制冷结构设计上，设备采用了压缩式主动回热布雷顿循环，回热器由八个管状镍钛合金单元级联构成，每个单元包含三个薄壁管结构。这种独特的设计扩大了传热面积与体积比（达 8.68 mm^{-1} ），并且经过X光计算机断层扫描证实，能在 900 MPa 压应力下实现均匀压缩而不屈曲，确保了制冷过程的稳定性和高效性。

基于这些创新，一台体积为 $1.0 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$ （0.25立方米）的桌面型原理样机诞生了。测试结果令人振奋：在1赫兹运行频率下，绿色弹卡冷冻装置成功实现了从约 24 室温到 -12 冷源的跨越，温差高达 36 ，这是该领域首次突破零下大关。

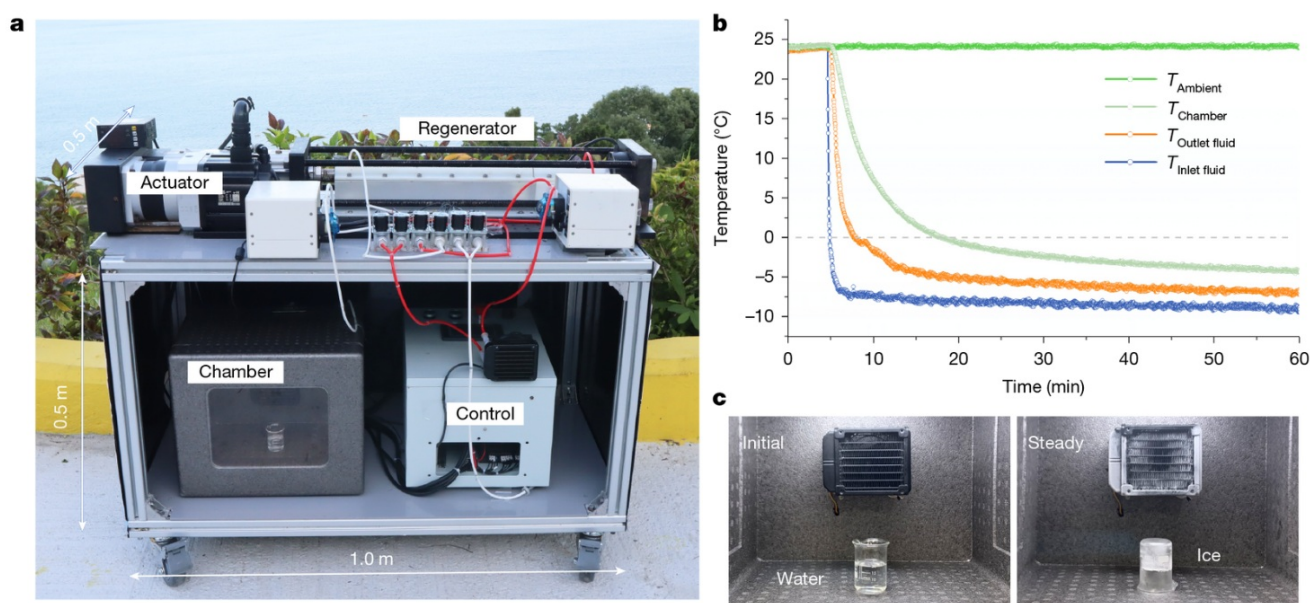
跨越三重挑战

将弹卡冷冻技术推入零下领域，绝非易事。这是一次对材料科学、热力学与机械工程极限的挑战。

首当其冲的是材料关。传统形状记忆合金的相变温度较高，在零下环境会失活，丧失超弹性与潜热释放能力。如何在保证材料机械强度、抗疲劳寿命的前提下，通过原子尺度的成分设计，将其相变温度窗口大幅下移，是第一个需要翻越的雪山。孙庆平团队对镍钛合金配比的精准把握，成功找到了那个能在零下起舞的合金配方。

其次是热管理关。在零下低温区，传热流体的选择变得异常苛刻。它必须兼具低凝固点、高流动性、高热容和高导热性，同时还要与合金材料相处融洽，不能腐蚀或产生过高热阻。普通水或乙二醇溶液已无法满足要求。采用氯化钙水溶液这一选择，体现了团队在传热介质领域的深厚积累与巧妙构思。

最后是结构与系统集成关。弹卡制冷依赖于对合金材料施加循环的机械应力（压缩/释放）。在低温、高频的严苛工况下，如何设计一种机械结构，既能将应力均匀、高效地传递给每一个合金单元，最大化其相变潜热利用，又要确保结构自身在长期循环载荷下不变形、不疲劳，这对机械设计与制造工艺提出了极高要求。级联式薄壁管结构以及高达900 MPa的均匀承压能力，正是攻克此关的钥匙。



全球首台能达至零下温度的绿色弹卡冷冻装置。

据介绍，在户外实测中，绿色弹卡冷冻装置产生的低温流体成功将一个小隔室腔室的空气温度在60分钟内稳定在-4℃，并在两小时内将20毫升水完全冻结成冰，充分证明了其高效冷冻能力。

性能指标显示，其系统能效最高可达3.4，单位质量制冷功率达每克1.43瓦，展现出卓越的节能与制冷潜力。

有望重塑冷冻业格局

我们正与业界紧密合作，积极推动技术的商业化。面对这一重磅成果，孙庆平团队的目光已投向更远的未来。孙庆平表示，该研究成果充分展示了弹卡冷冻技术大规模应用的潜力，目前团队正与业界紧密合作，积极推动技术的商业化进程。

为实现这一目标，团队将借助形状记忆合金材料、制造工艺、热力学设计及系统工程技术的不断进步，致力于优化弹卡冷冻系统的效率、功率密度和成本竞争力。通过持续研发和创新，团队希望能够实现更大的冷冻功率、更高的效能，使这项技术更好地满足市场需求，在更广泛领域得到应用。

香港科技大学潘乐陶气候变化与可持续发展研究中心主任陆荫茜评价道，团队在弹卡冷冻技术领域取得的新突破，标志着中心在应对气候变化方面取得了重大进展。孙庆平及周国安作为中心成员，充分展示了团队在科研领域的强大实力和持续创新能力。

记者了解到，弹卡制冷技术是一种基于弹卡效应的固态制冷方法，通过施加机械应力诱导材料发生可逆相变，从而实现制冷或制热，该技术作为绿色低碳制冷的新兴方案，有望替代传统蒸气压缩技术。

绿色弹卡冷冻装置的成功研制，其意义远不止于一台原型机。它从原理上验证了零排放冷冻技术的可行性，为全球淘汰高GWP（全球变暖潜能值）制冷剂提供了极具竞争力的技术备选方案。据团队估算，若该技术在全球冷冻领域获得广泛应用，每年有望减少约3.3亿吨二氧化碳当量的温室气体排放，成为实现全球气候目标的重要力量。

随着全球对氢氟碳化物的管控日趋严格，这项零排放、低耗能的弹卡冷冻技术，有望从根本上重塑冷冻业的格局。孙庆平认为，该研究成果不仅仅是一项顶尖的学术成果，更是一份面向未来的绿色宣言，预示着人类在获取低温的征途上，找到了一条与地球生态和谐共生的新路。（来源：中国科学报 朱汉斌）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09946-4>

作者：孙庆平等 来源：《自然》

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发