

# 超材料前沿研究一周精选



2025 年 11 月 17 日-2025 年 11 月 23 日

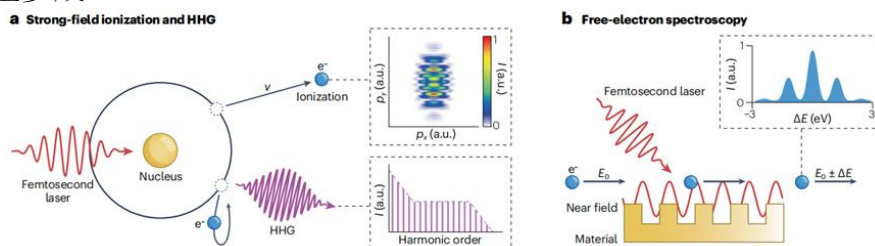
索引:

- 1、超快物理与结构光
- 2、拓扑光子晶体光纤
- 3、PT 对称 Floquet 晶格中动量带拓扑的观测
- 4、非线性与非局域耦合的非厄米弹性超梁：物理实现与拓扑波调控
- 5、多晶  $\text{NaNbO}_3$  中应力调制反铁电-铁电相变的局域变化的拉曼光谱研究
- 6、电子隧穿增强金属-绝缘体-半导体结的热导
- 7、具有刚-柔-软结构的人形手指
- 8、具有可编程力学性能和静态非互易性的自锁多稳态超材料

## 1、超快物理与结构光

激光激发电子的运动使我们能够以前所未有的时间、空间和能量分辨率研究基础物理现象。光与物质相互作用的首要步骤是电子对入射光的超快响应，在这一过程中，电子动力学对驱动光的特征表现出极高的敏感性。通过赋予光特定的强度、偏振或相位结构特征，可以定制光携带的自定义角动量。结构化光的出现为超越传统线偏振或圆偏振光的能力，提供了调控材料光学响应的新机遇。

近日，北京大学刘运全教授团队回顾了超快物理学如何从结构化光的应用中受益。首先，他们探讨了时域和空域中结构化光在控制电子动力学、强场电离、高次谐波生成以及手性传感中的应用。接着，团队介绍了如何利用空间结构化光在强场电离中精确操控电子的行为，并深入研究了自由电子与结构化光的相互作用。最后，他们展望了该领域的未来发展，特别是在时空结构化光与量子控制、超快显微学等前沿应用中的巨大潜力。相关内容发表于《Nature Reviews Physics》上。（金梦成）

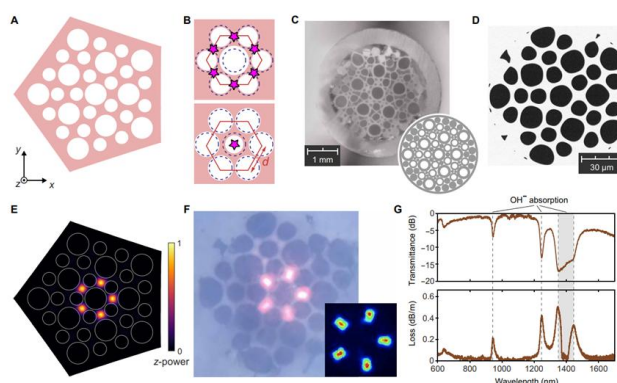


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s42254-025-00887-5>

## 2、拓扑光子晶体光纤

光子晶体光纤（PCFs）是光子晶体的一类，利用波长尺度的调制来操控光。光子晶体已广泛应用于高性能激光器和太阳能电池等领域，但其最重要的应用可能是光纤传输、高功率光源、超连续谱光生成和传感等。近年来，拓扑光子学作为一种新兴设计方法，借鉴了拓扑物态中的光子带结构，通过拓扑特征而非传统的光捕获机制来产生特有的光子模式。这种方法不仅为基础研究提供了新的方向，也因其抗干扰的鲁棒性而在器件应用中展现出潜力。然而，将拓扑光子学引入光子晶体光纤（TPCFs）面临诸多挑战，主要由于现有光纤制造方法的不兼容性和结构稳定性问题。尽管有一些基于多核 PCF 的拓扑设计已提出，但大多依赖于波导核心的排列，而非光子晶体本身的拓扑特性。

近日，南洋理工大学王岐捷教授、Wonkeun Chang 教授和 Yidong Chong 教授团队，设计并实验实现了一种基于拓扑晶体绝缘体（TCIs）缺陷态的拓扑光子晶体光纤（TPCF），该光纤通过稳健的拓扑模式引导光传播。与传统的基于体-边界对应原理的拓扑带结构研究不同，本研究关注由晶格缺陷（如位错）引起的局部拓扑态。TCIs 通过晶格对称性维持非平凡的带拓扑，可以支持与分数化光谱电荷相关的拓扑位错态。该设计的 TPCF 的二维截面是带有中央位错的光子 TCI 结构，采用标准的堆叠拉伸方法制造，与传统光纤兼容。通过引入“光谱定位器”框架，确认了光纤中的 10 个引导拓扑缺陷模式（GTDMs）。这些 GTDMs 的特性在于，它们位于最低体带下方，避免了与体态的交叉干扰，从而实现了宽带稳健的波导性能。实验结果显示，TPCF 在可见至近红外范围内的传输损耗为 10–20 dB/km，且在弯曲时（弯曲半径 1 cm）损耗仅下降不到 5 dB，远优于传统固芯光纤的 25 dB 损耗。此外，GTDMs 还具有可用于空间或偏振复用的有趣结构。该研究为未来拓扑光子学的发展提供了新的平台，具有广泛的应用前景。相关内容发表于《Science Advances》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.ady1476>

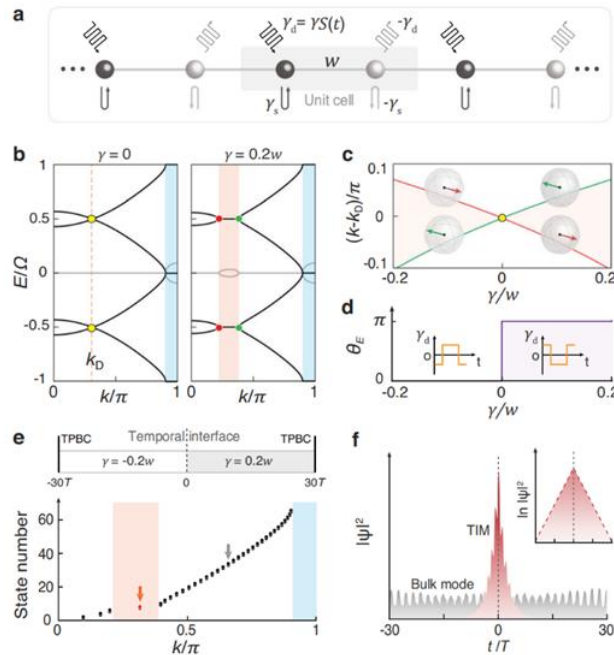
## 3、PT 对称 Floquet 晶格中动量带拓扑的观测

过去十年，拓扑物态在凝聚态物理学以及多种经典波动系统中引发了广泛关注。在这一背景下，体-边界对应关系发挥了关键作用，揭示了能带拓扑与边界态之间的深刻联系。从数学角度看，体的拓扑可以通过几何不变量来表征，这些不变量捕捉了动量布里渊区内体本征态的全局特性，比如一维和二维系统中的 Zak

相和 Chern 数。此外，周期性驱动的引入导致了额外的能量布里渊区和一系列非平衡拓扑相的出现，其中包括 Floquet 拓扑绝缘体和具有时空交织对称性的拓扑时空晶体。

然而，这些研究主要集中在能量带拓扑上，时间调制作为控制空间拓扑界面模式的额外自由度。不同于传统的拓扑研究，动量带拓扑概念首次出现在光子时间晶体的研究中，这种介质的折射率经历超快周期变化，产生了由时间调制引起的动量间隙。此现象展示了许多有趣的性质，例如非共振激光、亚光速切伦科夫辐射和超光速动量间隙孤子。特别地，类似于传统拓扑物态，能量布里渊区中的动量带拓扑会导致动量间隙内的时域局域化界面状态。尽管这一理论框架逐步发展，但其完整的理论阐述仍处于初期阶段。尽管近期在空间离散系统中已有实验突破，但这些探索主要局限于时域局域化界面状态的观察，无法直接证明动量带拓扑的存在。特别是，体拓扑的直接实验证据——动量带拓扑的表征——仍然难以实现，瓶颈在于时变系统的复杂性和提取本征态的技术挑战。

近日，武汉大学邱春印教授团队提出并实验演示了在 PT 对称 Floquet 晶格中的动量带拓扑。该模型具有广泛的实验适用性，通过周期调制的增益和损耗打开动量间隙，并通过量化的 Berry 相位严格表征动量带拓扑。在实验中，团队通过一个声学腔管结构与定制外部电路的耦合模拟该模型。通过创新性地重构 Floquet 算符，并从测量的时域波函数中提取系统本征态，首次提供了动量带拓扑的直接实验证据，包括动量带反转和拓扑不变量的表征。同时，实验中还观察到了时域局域化界面状态，为时域体-边界对应关系提供了全面验证。该研究为动量间隙物理学的进一步实验研究奠定了基础。相关内容发表于《Nature Communications》上。（金梦成）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64915-9>

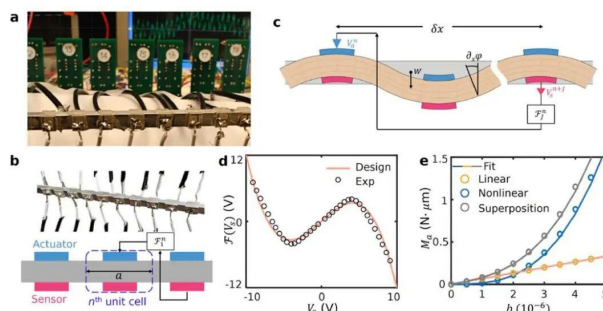
#### 4、非线性与非局域耦合的非厄米弹性超梁：物理实现与拓扑波调控

近年来，非厄米系统在光子与声子平台中展现出独特的拓扑波现象，如非互易传播、异常点和非厄米趋肤效应等。这些现象源于系统中增益与损耗的巧妙平衡，

特别是在满足宇称-时间对称性的条件下，能够实现非常规的波操控机制。随着非线性被引入这类开放系统中，研究者观察到在线性或保守系统中不存在的丰富动力学行为，例如非线性诱导的拓扑相变、自稳定异常点以及振幅依赖的能带重构。然而，尽管非线性在非厄米系统中已展现出巨大潜力，其在弹性波系统中与非线性、非互易耦合相结合对拓扑特性的影响尚处于初步探索阶段，尤其是实验实现方面仍十分缺乏。因此，如何在弹性超材料中实现非线性与非局域耦合的协同调控，并揭示其拓扑特性，成为当前非厄米物理与波动力学交叉领域的重要挑战。

近日，北京大学黄国良教授的美国密苏里大学研究团队提出并实验验证了一种具有非线性与非互易耦合的非厄米弹性超梁结构。该系统通过在宿主梁上布置压电片并连接可编程非线性电路网络，实现了对线性与非线性耦合强度及非局域阶次的独立控制。研究中建立了基于 Timoshenko 梁理论的解析模型，推导了振幅依赖的色散关系和缠绕数，揭示了 Kerr 非线性如何调控非互易传播行为并诱导多环缠绕拓扑。研究进一步表明，仅通过一阶非线性非互易耦合即可实现扭曲缠绕，而高阶非局域耦合则能诱导多环缠绕结构，产生多个振幅依赖的非厄米相变点。实验验证方面，通过测量不同激励振幅和频率下的透射波，直接观测到非互易传播、振幅控制的缠绕拓扑转变以及非线性频率转换现象。该研究不仅为非线性非厄米拓扑波操控提供了理论与实验基础，还展示了在紧凑结构中实现频率转换与拓扑放大的可能性，为下一代弹性系统中的动态波控制、可重构波导、机械计算与智能信号处理开辟了新路径。该文章发表于《Advanced Functional Materials》。

（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202518194>

## 5、多晶 NaNbO<sub>3</sub> 中应力调制反铁电-铁电相变的局域变化的拉曼光谱

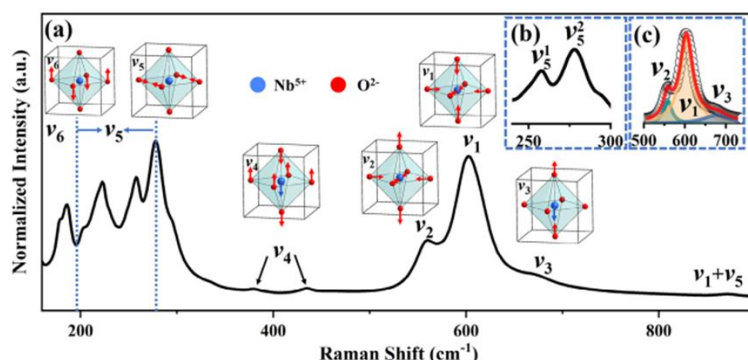
### 研究

随着对高能量密度电容器需求的日益增长，高性能的能量存储材料，尤其是无铅抗铁电材料，成为了研究的热点。抗铁电材料（AFE）由于其较高的能量回收密度和较快的充放电速率，相比传统的铁电材料（FE）展现了更好的性能，尤其在能量存储和脉冲功率设备中具有广阔的应用前景。然而，尽管这些材料具有优异的电学性能，仍然存在着材料性能与其机械特性之间的平衡问题。现有的研究多集中于优化抗铁电材料的电学性能，尤其是在外电场作用下的相变行为，如从抗铁电相（P 相）向铁电相（Q 相）的转变。但鲜有研究关注抗铁电材料在实际应用中承受外部机械应力时的相变机制与其对材料性能的影响，尤其是聚晶 NaNbO<sub>3</sub> 这种材料的机械响应。了解应力对这类材料的影响，将有助于更好地模拟实际



工作条件并优化材料设计。

近日，德国 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg 的 Kyle G. Webber 教授课题组谢立旭博士后及其合作者结合 X 射线衍射 (XRD)、拉曼光谱成像 (Raman mapping)、温度依赖介电常数及弹性模量等技术，揭示了聚晶  $\text{NaNbO}_3$  陶瓷中 P 相与 Q 相的共存现象，并展示了在不同机械应力作用下相变的局部变化。通过拉曼光谱映射，研究团队发现未极化的  $\text{NaNbO}_3$  陶瓷中 P 相和 Q 相的共存区域存在空间异质性，压缩应力施加后，这种相变行为表现出明显的局部应力调制效应。特别是在施加 -400 MPa 的压缩应力后，P 相逐步转变为 Q 相，进一步确认了  $\text{NaNbO}_3$  陶瓷在机械应力作用下的应变响应和相变特征。研究团队还进一步探讨了极化样品和未极化样品在压缩应力作用下的力学响应。通过表征应力-应变滞回曲线，发现极化  $\text{NaNbO}_3$  陶瓷表现出较低的临界应力（约 -173 MPa），而未极化样品的临界应力为 -207 MPa。压缩应力导致非  $180^\circ$  铁电畴的切换，从而产生显著的滞回效应，且应力增强了铁电畴的定向排列。研究团队发现机械应力不仅改变了材料的宏观极化-应力响应，还引发了更深层次的历史效应，特别是在卸载过程中，材料中非  $180^\circ$  畴的重新排列导致了局部电场和机械场的反向效应，进一步加剧了材料的回退应变。结合 XRD 分析结果，研究团队还进一步验证了  $\text{NaNbO}_3$  陶瓷在不同应力条件下的相变温度，发现其从 P 相到 Q 相的转变在高温下表现出复杂的热滞回特性。这些发现通过结合拉曼光谱的频率变化与相应的晶体结构变化，明确了压缩应力对  $\text{NaNbO}_3$  陶瓷相变的影响机制，并为开发高性能无铅抗铁电材料提供了新的思路。相关内容发表于《Advanced Functional Materials》上。（张琰炯）



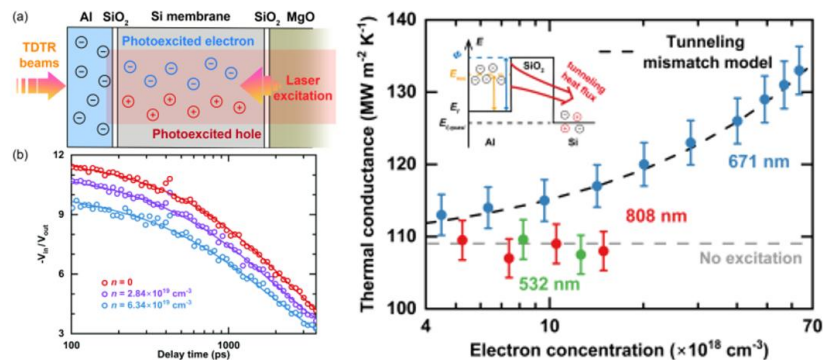
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202512279>

## 6、电子隧穿增强金属-绝缘体-半导体结的热导

在现代集成电路中，热管理已成为一种挑战。随着能量密度的不断增加，特别是在纳米尺度下，界面热阻成为影响热传输效率的主要因素之一。对于金属-绝缘体-半导体 (MIS) 结构，热导率的提高成为亟需解决的技术难题。由于绝缘体材料通常具有较低的热导率，这使得界面热传导的效率受到了严重限制。传统上，增加界面热导的努力主要集中在材料的结构和界面工程方面，如化学键的改性或材料成分的调控。然而，这些方法的应用面临与现有制造工艺兼容性差的挑战。因此，寻找新的热传输机制，尤其是无需改变界面结构的方式，成为了当前研究的热点和难点。

近日，清华大学深圳国际研究生院孙波副教授课题组提出了一种通过电子隧穿增强金属-绝缘体-半导体界面热导的新机制。在该研究中，课题组通过对金属-二

氧化硅-硅 (Al-SiO<sub>2</sub>-Si) 界面进行深入实验, 首次提出并验证了电子隧穿作为一种增强界面热导的新机制。传统的热传输过程主要依赖于声子介导的热传导, 但在金属与半导体的界面中, 由于绝缘体材料 (如 SiO<sub>2</sub>) 的存在, 声子传导效率通常较低, 因此界面热阻成为限制热传输的瓶颈。通过电子隧穿, 课题组揭示了电子作为热载流子能够跨越绝缘层, 直接参与热流的传输, 从而突破了传统材料界面工程的限制。具体而言, 研究者通过施加光激发或外加偏置电压, 使得金属-绝缘体-半导体结构中的电子能够获得足够的能量, 通过量子隧穿效应穿越 SiO<sub>2</sub> 绝缘层, 形成新的热传输通道。实验中, 使用了时域热反射 (TDTR) 技术对界面热导进行测量, 发现随着光激发强度的增加, 界面热导率呈现出显著提高, 最大增幅达到 23.1%。这一现象表明, 电子在金属-绝缘体-半导体界面之间的量子隧穿行为不仅仅是电流的载体, 更能有效促进热能的传递。为了深入理解这一机制, 课题组提出了隧穿不匹配模型, 该模型将电子和声子看作两个独立的热传导通道, 通过量子隧穿贡献来计算总热导。通过该模型, 课题组能够准确拟合实验数据, 并提取出隧穿的概率值 (17.3%), 该值与 SiO<sub>2</sub> 层的有效屏障高度 (1.93 eV) 相关。这一结果表明, 隧穿概率不仅与电子浓度有关, 还受到激发光源波长的影响。在不同激发波长下 (如 532 nm、671 nm 和 808 nm), 热导率的变化趋势不同, 表明特定波长的激发能有效提升电子能量, 并促进电子通过隧穿方式跨越绝缘层, 传递热能。总的来说, 这项研究提供了一个全新的视角, 揭示了电子量子隧穿作为增强界面热导的有效途径, 为进一步探索和优化热管理策略提供了理论依据。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)

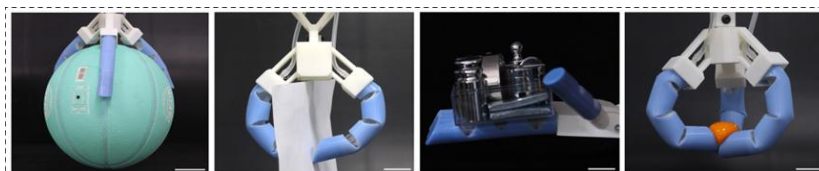


文章链接: <https://doi.org/10.1103/1s31-kv58>

## 7、具有刚-柔-软结构的人形手指

当前, 机器人技术在制造业、物流运输等领域的广泛应用, 凸显了机械夹爪在协助人类操作和搬运物料方面的重要价值。传统刚性夹爪虽具备输出力大、响应快的优势, 但在处理脆弱物体时易导致损坏; 而通过增加自由度或传感器来增强其适应性的方法, 又往往使结构复杂化。另一方面, 采用软体材料构建的夹爪虽具有高柔顺性和安全性, 却存在输出力与稳定性不足的固有缺陷。随着机器人在医疗、农业和服务业等领域的深入应用, 对兼具刚性结构的承载力与软体结构的灵活性、能应对各种复杂任务的高性能夹爪需求日益迫切。为此, 研究人员探索了刚性-软体混合结构或变刚度设计, 例如集成层阻塞结构与肌腱驱动的多模式夹爪, 或在刚性骨架外包裹可变性材料, 这些设计在一定程度上提升了抓取适应性, 但在处理超薄或超脆弱物体时仍存在局限, 且结构仍较复杂。在此背景下, 模仿人类手指“刚性骨骼-柔性关节-软组织”协同工作机制成为重要方向。

近日，中国地质大学的孟庆鑫教授、吴俊东教授团队，设计了一种具有刚-柔-软结构的人形手指，其结构仿生自人类手指，由刚性管状骨骼、具备自动复位及抗外力变形能力的柔性关节弹簧以及软质硅胶皮肤构成，并在骨骼与皮肤之间设置了气动薄膜驱动器。为验证其性能，作者采用该手指构建了多种抓取器，并进行了系列实验，例如抓取豆腐、捏起 0.1 毫米厚的纸张、持握直径 23.2 厘米的篮球以及支撑重达 5.275 公斤的砝码。实验结果表明，该人形手指有效拓展了刚-柔-软机器人的应用范围。相关内容发表于《Nature Communications》上。（刘帅）

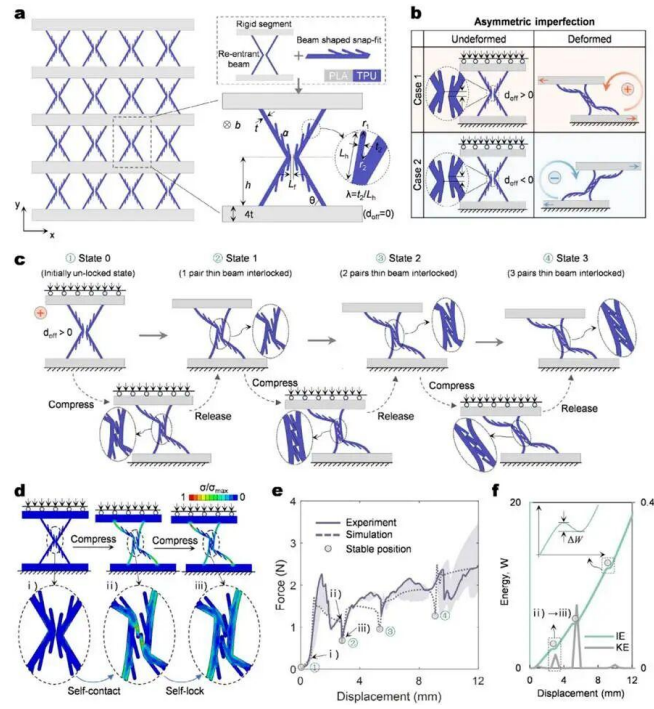


文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41467-025-65367-x>

## 8、具有可编程力学性能和静态非互易性的自锁多稳态超材料

机械超材料因其通过结构设计可获得超越基体材料的非凡力学性能而受到广泛关注。多稳态超材料作为其中一类，能在多个稳定状态间切换，在能量管理、软体机器人和可展开结构等领域展现出潜力。与此同时，静态非互易性——材料在相同静态载荷下因加载方向不同而产生不对称响应的行为，为实现机械能的定向控制提供了可能。然而，现有大多数多稳态结构依赖于复杂的几何构型或苛刻的边界条件，限制了其可调性与应用范围。此外，传统超材料的非互易特性一旦制备即被固定，难以实现动态调控。因此，开发一种结构简单、稳定性高、且力学性能与非互易行为均可编程的多稳态超材料成为亟待解决的问题。

近日，华南理工大学的胡楠教授、新加坡南洋理工大学的王一凡教授、孟志强博士研究团队设计了一种融合再入梁与薄梁形卡扣元件的自锁多稳态超材料。其核心机制在于压缩载荷下卡扣元件依次自锁，形成多个稳定的互锁构型；而拉伸或横向载荷则可解锁使其恢复初始状态。通过系统调节再入梁的角度、厚度以及卡扣元件的几何参数，可实现对其刚度、强度、多稳态数目及变形模式的精确编程。研究进一步揭示了再入梁参数主导结构的承载特性，而卡扣元件则控制其多稳态与恢复行为。通过引入非对称缺陷，可预设超材料的自锁方向与序列。尤为重要的是，初始对称状态下的超材料表现出完全互易的力学响应，而当其通过压缩转入互锁稳态后，因几何对称性破缺而呈现出显著的静态非互易性，表现为左右加载方向上的刚度差异高达数十倍。这种通过稳定状态切换实现互易与非互易行为可控转换的策略，为机械超材料的功能设计开辟了新途径。该材料体系在软机器人、自适应结构、能量吸收系统和机械逻辑器件中具有广阔的应用前景。该文章发表于《Advanced Functional Materials》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202507732>  
 (来源: 两江科技评论)