

超材料前沿研究一周精选

2025 年 9 月 8 日-2025 年 9 月 14 日

索引：

- 1、耦合光子-磁振子混合系统中反 PT 对称性诱导的微波负折射率
- 2、光诱导手性电荷密度波在 1T-TiSe₂ 中的动力学与动量分布
- 3、投影非厄米超表面中混合简并点的观测
- 4、结构光直写铁电斯格明子：利用“庞加莱球”动态调控材料拓扑结构
- 5、折纸中的阻挫及其对折纸集成体能量景观的影响
- 6、非色散梯度阻抗声学透镜
- 7、基于超表面力和力矩同时控制的可编程声镊端到端逆设计
- 8、喷射增强型多通道微流道为电子设备提供高达 3,000 Wcm² 的热冷却
- 9、小尺度连续 GFRP 超材料的高鲁棒性和多稳定性：新型莫比乌斯带结构

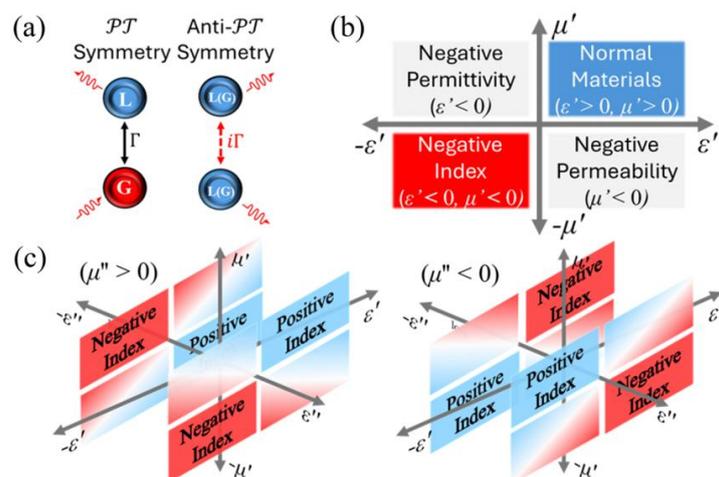
1、耦合光子-磁振子混合系统中反 PT 对称性诱导的微波负折射率

耦合量子系统与光-物质相互作用为探索奇异量子现象提供了重要平台。近年来，非厄米物理不断拓展对量子力学的理解，揭示了开放系统中超越传统厄米框架的新奇行为。其中的核心概念是 PT 对称性，即系统在空间反演 (P) 与时间反演 (T) 的联合操作下保持不变。其增益与损耗的平衡可在特定参数区间内导致实数本征值，并引发了光子学、原子物理、电子学、声学、热力学和磁振子学等领域对非厄米动力学的广泛研究。在此基础上，anti-PT 对称性作为互补概念被提出。其哈密顿量在 PT 操作下呈反对称性，可通过将 PT 对称哈密顿量整体乘以因子 i 实现。典型特征是两个同时具有损耗（或增益）的子系统通过耗散耦合相连。已有多项实验平台展示了 anti-PT 对称性的独特意义，包括例外点、热管理、增强传感以及连续谱中的束缚态等现象。

另一方面，人造超材料与超构材料因其奇异的光学效应而备受关注，如负折射、超透镜成像以及高灵敏传感等。传统上，负折射率 (NRI) 的实现依赖于同时使介电常数和磁导率的实部为负。而引入非厄米动力学，通过操控其复数形式，则为实现 NRI 提供了新的路径。然而，在 anti-PT 对称系统中实现 NRI 的问题此前尚未被探索。

近日，首尔国立大学 Sang-Koog Kim 教授团队首次实验证明：在光子-磁振子混合 (PMH) 系统中，anti-PT 对称性可诱导微波负折射率。结合实验与解析电路模型，团队揭示：当耗散耦合强度超过系统本征损耗时，系统进入反相传播区，波的传播方向与相速度反转，从而实现 NRI。该反相传播会选择性翻转介电常数与

磁导率的虚部，满足广义负折射率判据，并可通过外磁场实现精确调控。此外，研究还确定合作因子是 NRI 出现的关键门槛参数。该成果为非厄米混合量子系统中波动传播与折射特性的操控提供了新框架，并为磁性材料驱动的可调超材料开辟了新途径。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》。（金梦成）



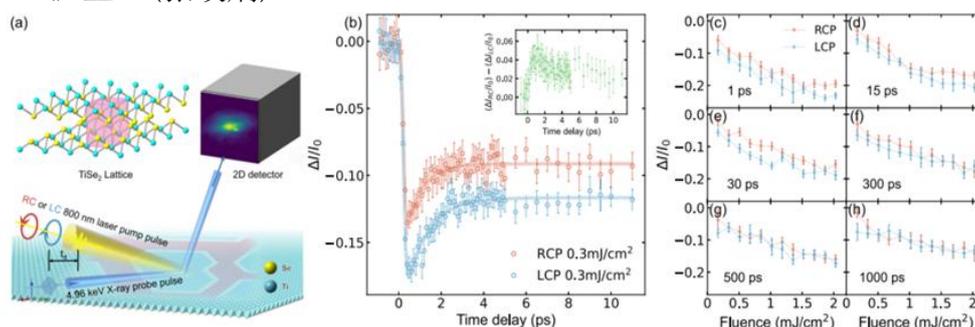
文章链接: <https://doi.org/10.1103/gz3k-7hpp>

2、光诱导手性电荷密度波在 1T-TiSe₂ 中的动力学与动量分布

在凝聚态物理研究中，电荷密度波（Charge Density Wave, CDW）作为一种电子有序相，长期以来都是理解电子关联效应与晶格相互作用的重要窗口。近年来，随着超快光学和自由电子激光等实验手段的迅速发展，光诱导现象逐渐成为调控和操控量子材料电子态的前沿方向。特别是光诱导手性态（photoinduced chirality）的探索，为人们提供了一条全新的研究路径：通过圆偏振光激发材料中潜在的手性序，进而实现对非平衡态电子动力学的调控。然而，对于非手性晶体中由轨道不稳定性自发涌现出的手性序，其形成机理与动力学行为仍存在诸多悬而未决的问题。在这些体系中，过渡金属二硫族化合物 1T-TiSe₂ 因其在约 200 K 发生的 $2 \times 2 \times 2$ 超晶格电荷密度波转变而备受关注。然而，这一现象背后的微观机制仍然不清楚，尤其是缺乏动量空间分辨率的观测手段，使得难以直接建立光致手性信号与长程 CDW 有序之间的联系。如何在时域和动量空间同时追踪手性 CDW 的动力学演化，成为理解这一前沿问题的核心挑战。

针对上述科学难题，北京大学助理教授彭莹莹、阿姆斯特丹大学 Jasper van Wezel 教授、德国德累斯顿 IFW 研究所 Jeroen van den Brink 教授利用时间分辨 X 射线衍射（time-resolved XRD, trXRD）结合圆偏振激光泵浦，首次直接揭示了 1T-TiSe₂ 中手性电荷密度波的光诱导动力学行为。研究发现，在左、右圆偏振光激发下，CDW 衍射峰强度的抑制程度存在约 20% 的差异，这一显著的圆二色性效应直接证明了手性 CDW 与入射光偏振态之间的强耦合关系。更为关键的是，团队通过动量分辨的圆二色性分布测量，揭示了不同手性畴对光场的差异化响应，首次建立了 CDW 长程有序与手性畴结构之间的直接联系。实验结果表明，光激发不仅瞬时改变了 CDW 的强度，还伴随着相关长度的增加，这意味着激光脉冲促进了手性畴的扩展甚至缺陷的湮灭。这一发现为“光控手性”的实现提供了坚实的实验基础，也为解释此前光电流实验中的手性训练效应提供了重要物理机制。研究不仅展示了 trXRD 作为探测凝聚态手性序的强大能力，更为未来基于手性电子

态的光学调控与器件应用开辟了新思路。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



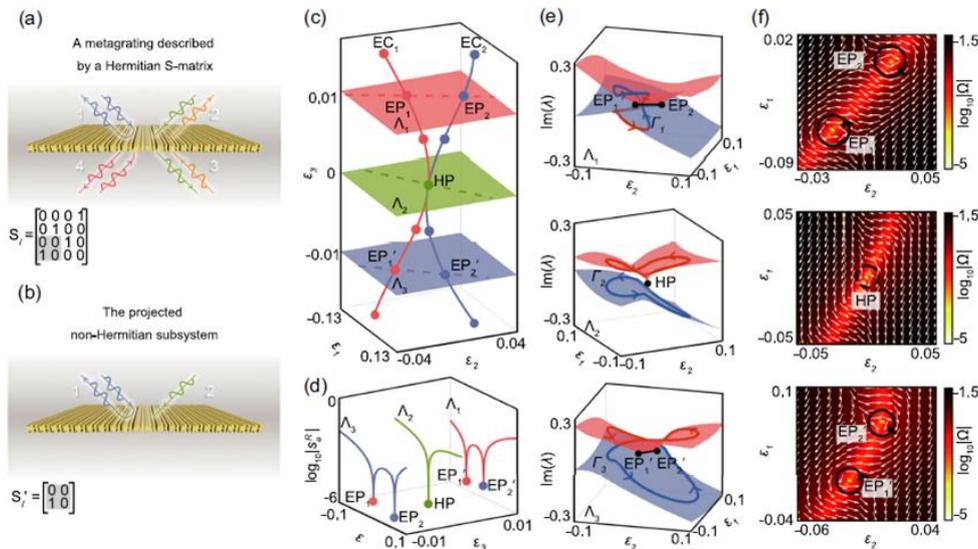
文章链接: <https://doi.org/10.1103/7ctk-h28x>

3、投影非厄米超表面中混合简并点的观测

物理系统中的简并态源于对称性。在厄米系统中，简并表现为二重点(DP)，本征值简并而矢量正交；非厄米系统则存在奇异点(EP)，本征值与本征矢量同时塌缩，带来远超DP的灵敏度，具有重要传感潜力。但这种超高灵敏度依赖于增益、损耗等非厄米参数的精细调控，实验实现困难。进一步研究表明，不同手性的EP可演化为DP或混合简并点(HP)，HP以各向异性响应拓展了对非厄米简并的理解。然而，DP、EP与HP间的演化观测极具挑战，限制了相关应用。值得注意的是，厄米系统的局域子系统可能呈现投影非厄米特征，从而引发EP相关现象，这提出了一个关键问题：整体厄米系统是否也能表现非厄米简并效应？

近日，同济大学的王旭教授和李勇教授团队，在一个投影非厄米系统中观测到了一种混合简并点(HP)，该系统本质上是由一个具有厄米散射矩阵的超表面经投影得到的子系统。在投影空间中，该超表面天然锚定于两条携带相反手性的奇异曲线(exceptional curves)的汇合点处。该HP展现出一种独特的拓扑性质，兼具厄米与非厄米简并的特征，因此同时表现出线性和平方根型的灵敏度。作者利用一种无源且无损的声学超格栅，从概念验证和实验确认两个层面证实了该投影HP，并揭示了其独特的奇异行为：对扰动表现出显著的各向异性灵敏度。该研究结果凸显了通过投影希尔伯特空间探索简并态的潜力，并为在开放空间中实现极端波操控开辟了新途径。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。

(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1103/9tdx-lcm5>

4、结构光直写铁电斯格明子：利用“庞加莱球”动态调控材料拓扑

结构

近日，美国阿肯色大学 Laurent Bellaïche 教授与新加坡南洋理工大学申艺杰教授的联合团队，在铁电拓扑结构的动态光控研究方面取得重大突破。研究成果以《Poincaré sphere engineering of dynamical ferroelectric topological solitons》为题，发表于物理领域经典期刊《Physical Review B》，并被选为快报论文（Letter）。

拓扑结构（如斯格明子、反斯格明子）因其稳定性与潜在的信息存储应用前景，近年来在凝聚态物理与材料科学中备受关注。然而，如何精准、动态地操控这些拓扑态，尤其是在铁电材料中实现反斯格明子的生成与转换，一直是一个巨大挑战。庞加莱球（Poincaré Sphere）原本是光学中用于描述光偏振态和轨道角动量（OAM）的几何工具。本研究创新性地将其引入铁电材料与结构光的相互作用中，通过调控光的空间结构，实现了对铁电极化拓扑态的连续、可逆、动态控制。研究亮点：1. 首次在铁电材料中光控生成动态反斯格明子：通过调节结构光在庞加莱球上的位置，成功诱导出具有双曲型极化纹理的反斯格明子，这是一种在铁电体中极少被观测到的拓扑态。2. 实现拓扑态之间的连续转变：通过调节光的轨道角动量成分，可连续调控斯格明子与反斯格明子之间的转变过程，仿佛旋转一个“拓扑旋钮”。3. 超快手性切换：利用矢量光束，可在飞秒时间尺度内切换极化涡旋的手性，为超快光控拓扑器件提供新思路。

该研究不仅为光控拓扑材料提供了新范式，也为未来低能耗、高密度拓扑电子学器件的设计奠定了理论基础。通过“光结构工程”调控物质拓扑态，有望在下一代信息存储、逻辑运算和量子计算中发挥重要作用。（申艺杰）

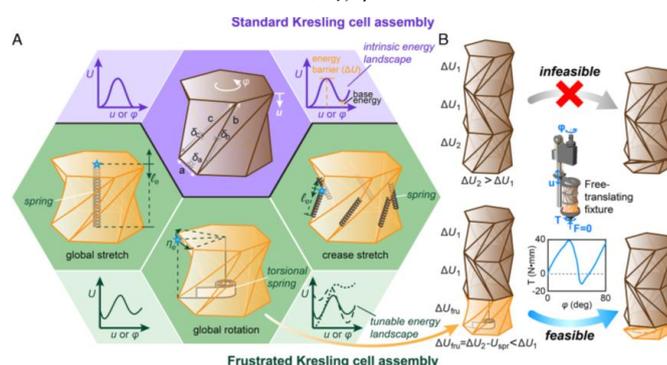
文章链接: <https://doi.org/10.1103/xr8r-h3x9>

5、折纸中的阻挫及其对折纸集成体能量景观的影响

可重构组装体由设计的宏观非线性结构组成，能够在在大变形下展现丰富行为，其特性取决于局部单元的材料属性与几何非线性。传统单元如翻转梁、屈曲驱动构件已广泛应用于能量吸收、软体机器人、非对易响应、波传播、声学超材料及软物质变形等领域。近年来，折纸启发的几何设计进一步拓展了非线性单元的设计空间，包括 Kresling、方扭折纸、水弹式折纸、Miura-Ori 变体及曲折折纸等结构，并推动了形状变换与能量景观调控的应用。然而，这类组装体通常依赖预设变形路径，制造完成后难以调节其非线性特性。相比之下，可重编程结构通过改变局部单元的构型状态，可实现弹性模量的连续调节，如调整壳体高度、齿轮转角或凸轮运动，从而在单稳态与双稳态响应间切换。但受限的局部状态限制了整体变形路径数量，难以实现能垒的连续重编程。

近日，特伦托大学的 Diego Misseroni 和普林斯顿大学的 Glaucio H. Paulino 团队合作，将几何阻挫引入到折纸启发的组装体系中，并结合专门设计的实验装置（如自由旋转与自由平移夹具），以实现能量景观的连续可重编程。几何阻挫通过三种机制嵌入到折纸单元中：整体拉伸、整体旋转以及褶皱（局部）拉伸。每一种机制都将壳体式折纸与特殊弹簧元件相结合，从而在折纸单元中引入预应力。通过调节弹簧的性质（如拉伸/旋转方向与幅度），可以连续控制模型的预应力水平。具有可调预应力的挫折组装体使我们能够在运行过程中灵活设计多稳态的能量景观，从而开启在传统情况下不可实现的折叠路径。这一发现为可重构机械超材料和非对易态转变等潜在应用奠定了基础。相关工作发表在《PNAS》上。

(刘帅)

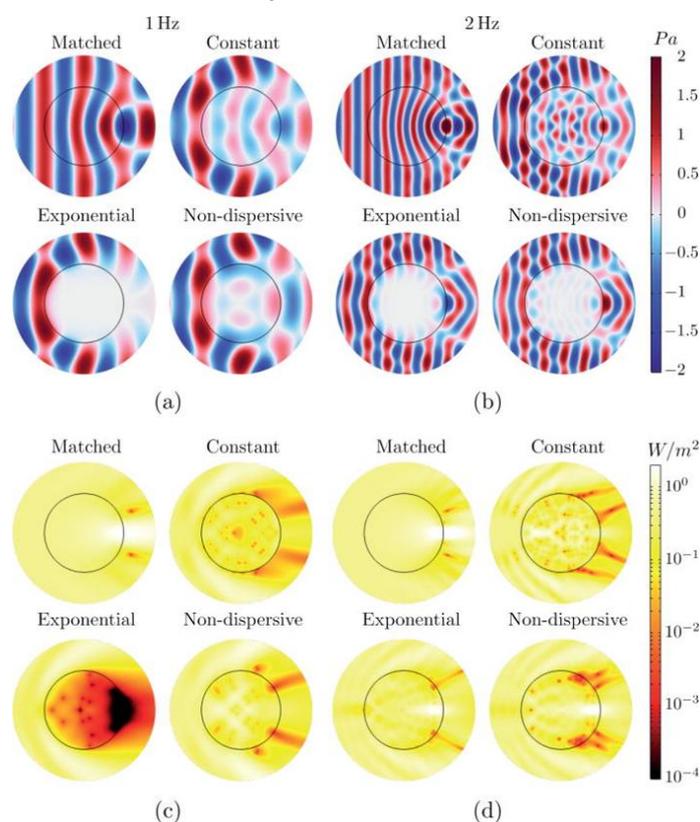


文章链接: <https://doi.org/10.1073/pnas.2426790122>

6、非色散梯度阻抗声学透镜

声学透镜通常基于由高频波的几何（射线）近似推导的折射率分布，但关键的阻抗失配问题往往被忽视。失配的器件会产生非期望的反射与色散，从而在实际应用中显著降低性能。因此将阻抗作为一个设计变量纳入考虑可以导致显著的性能提升。近日，来自法国的艾克斯-马赛大学的 Sebastiano Cominelli 团队合作，提出一种对透镜阻抗进行梯度化（分级）设计的方法，为透镜设计提供额外的自由度，使其在保持所需折射率并尽量减小色散效应的同时，实现高效的声传输。这一方法在阻抗失配的情况下尤为有效。研究人员解释了在一维情形下色散是如何在透镜内部及其界面处产生；随后将该方法推广至二维轴对称构型，使其阻抗失配沿径向重新分配，并在卢内堡透镜的声学场景中进行了验证。这一设计方法还可进一步推广到更一般的情形，如空气或水中的成像与隐身等场合，并广泛适用于具有类似数学结构的其他物理系统中。相关工作发表在《The Journal of the

Acoustical Society of America》上。(李治含)



文章链接: <https://doi.org/10.1121/10.0039107>

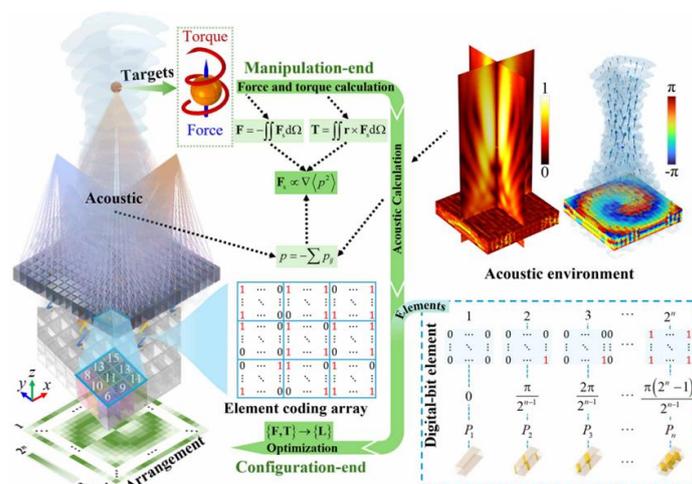
Sebastiano Cominelli; Non-dispersive graded impedance acoustic lenses. J. Acoust. Soc. Am. 1 September 2025; 158 (3): 1700 - 1710

7、基于超表面力和力矩同时控制的可编程声镊端到端逆设计

声学镊子技术凭借其非接触、适用于多种材料、尺寸适用范围广以及作用温和等优势,在生物医学、材料组装、微流控和细胞操纵等领域展现出广泛应用前景。传统声学操控多依赖于超声换能器阵列产生的驻波场或全息声场,尽管实现了对微粒的捕获与移动,仍存在硬件复杂、成本高昂、热漂移显著以及难以协同调控多自由度力学行为等问题。尤其在应用中,往往需同时实现粒子的稳定悬浮与可控旋转,而现有方法大多聚焦于声辐射力的调控,忽视了声辐射扭矩的作用,导致复杂环境下的精准操控仍面临挑战。此外,当前研究多采用“正向设计”策略,即通过预设声场结构间接影响粒子行为,缺乏从目标力学响应直接反推声场与结构设计的系统方法,限制了声学镊子在高维操控中的灵活性与精度。

近日,天津大学的汪越胜教授、北京理工大学的董浩文副教授研究团队,提出一种基于编码超表面的端到端逆向设计方法,实现了对声辐射力与扭矩的协同控制。通过建立从目标力学参数(三维力与扭矩)到超表面编码配置的直接映射模型,研究构建了一套双目标(悬浮与旋转)、双尺度(微结构响应与宏观声场)的优化框架。在微尺度层面,设计了一组高透射、低相位误差的迷宫型双各向异性单元结构,并通过遗传算法与有限元仿真相结合进行参数优化;在宏尺度层面,则以粒子所受目标力与扭矩为优化目标,利用编码超表面实现声场的重构与调控。该方法成功实现了对单个微粒的非接触、多自由度定制化操纵,包括垂直方向的

稳定悬浮与平面内的高频旋转，并在实验中验证了其有效性。该逆向设计策略不仅显著提高了声场器件的设计效率与精度，还有望应用于微纳组装、生物细胞操作、微机器人驱动等需复杂力学控制的场景。相关研究成果发表于《Science Advances》。（刘梦洋）



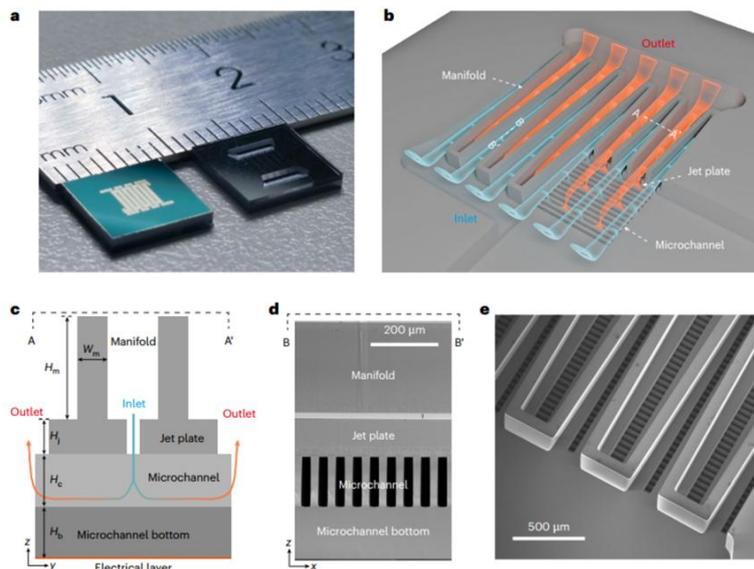
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.ady1855>

8、喷射增强型多通道微流道为电子设备提供高达 3,000 W/cm² 的热冷却

随着器件的体积不断缩小、输出功率不断提升，芯片内部的热流密度已达到每平方厘米数千瓦的量级。高热流所带来的散热瓶颈，正成为制约器件性能、可靠性和寿命的关键挑战。以商用氮化镓功率晶体管为例，其功率密度往往难以突破理论上限的十分之一，主要受限于散热能力不足。近年来，直接在芯片基底中嵌入微流控冷却结构成为前沿方向，可将冷却液带至靠近发热结点的区域，极大缩短导热路径，降低热阻。例如，单层直通微通道已实现近 800 W/cm² 的散热，但往往需要较高的泵浦功率。为进一步提升性能，研究者引入了歧管微通道(manifold microchannels, MMCs)、高导热材料、甚至两相冷却等方案，但整体散热能力仍普遍停留在 2000 W/cm² 以下。与此同时，局部强化换热的喷射冷却被认为是潜在解决途径，但其往往伴随较高能耗。因此，在高功率密度电子器件快速发展的背景下，如何实现兼具高效散热与低能耗的冷却方案，已成为全球学术界和产业界共同关注的重大难题。

针对这一挑战，北京大学宋柏研究员团队提出了一种全新的喷射增强歧管微通道(jet-enhanced manifold microchannels, JMC)冷却策略。团队在硅基底背面直接采用标准微机电系统(MEMS)工艺，构建了由三层结构组成的冷却单元：顶部为渐缩歧管层，中部为喷射层，底部为带有锯齿侧壁的微通道层。该设计将喷射冲击与微通道流动有机结合，在显著提升换热系数的同时，有效控制了压力损失。实验结果显示，该器件在仅需 0.9 W/cm² 泵浦功率的条件下，即可实现高达 3000 W/cm² 的极限散热能力，远超现有微流控散热方案；其性能系数(COP)最高可达 13000，在 1000 W/cm² 热流下芯片温升仅 65 K。这一结果不仅首次突破了嵌入式单相微流控冷却的 2000 W/cm² 极限，也展现了在保证能效的同时支撑高功率宽禁带器件长期稳定运行的潜力。值得强调的是，该方法采用标准硅工艺，

具备与现有集成电路制造工艺兼容的优势，为未来高功率电子芯片提供了一条兼具高效、低耗、可集成的散热新路径。这一工作为推动新一代高性能电子器件的散热技术跨越式发展提供了重要方向，也进一步彰显了北京大学在先进热管理与微纳制造领域的国际引领地位。研究成果发表在《Nature Electronics》上，(张琰炯)。



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41928-025-01449-4>

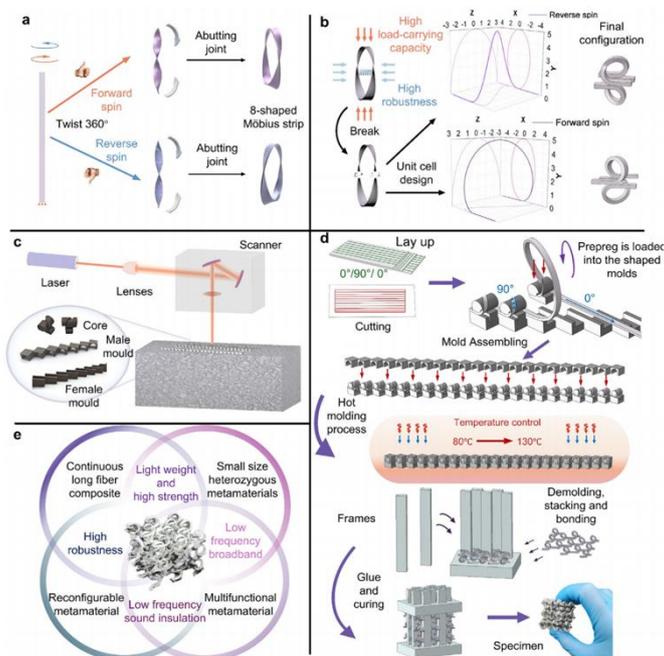
9、小尺度连续 GFRP 超材料的高鲁棒性和多稳定性：新型莫比乌斯带

结构

近年来，纤维增强聚合物复合材料因其优异的强度重量比而在多功能结构应用中显示出巨大潜力，尤其是在航空航天、汽车工程和生物医疗设备等领域。然而，传统超材料在实现高刚度、高强度与大可恢复应变之间的协同提升方面仍面临显著挑战，主要受限于材料本身的性能权衡与制造工艺的制约。特别是在小介观尺度下，连续纤维增强聚合物（FRP）异形结构的制备与功能集成更为复杂。尽管该尺度结构在梯度设计和能量吸收方面表现出优势，且更易于实现规模化生产，但其在实际应用中仍受制于单元尺寸限制、模具设计的灵活性不足以及制造过程中纤维含量的控制问题。此外，现有 FRP 结构通常缺乏可重构性和多稳态行为，限制了其在自适应系统和机械逻辑元件中的应用。因此，开发一种兼具轻量化、高强韧性、可重构性与多功能集成的小介观尺度超材料，已成为当前复合材料与超材料研究的重要方向。

近日，香港理工大学的胡红教授研究团队通过受莫比乌斯带拓扑结构启发，结合连续玻璃纤维增强聚合物（GFRP）与优化铺层设计，成功开发出一种新型超材料单元结构。该结构采用对称铺层配置，有效增强了弯曲强度与压缩应变极限，同时避免了传统复合材料在大应变下出现的应力骤降问题。通过融合选择性激光熔化（SLM）模具制造技术与传统热成型工艺，实现了小介观尺度下高精度、复杂几何结构的高效制备。该莫比乌斯结构展现出多项协同性能：包括可编程泊松比、优异的抗疲劳性能、低频率宽带隔声能力以及多稳态机械行为。在力学方面，该结构在不同压缩方向上表现出截然不同的变形机制与承载能力，实现了高弹性恢

复率与能量吸收能力的提升。在声学方面，作为膜型声学超材料（MAM）的核心组件，该结构实现了 80 - 662 Hz 范围内的宽带隔声，其性能显著超越传统质量定律限制。此外，通过二次堆叠与手性调控，该结构还可实现负泊松比行为，进一步扩展了其在能量吸收系统和自适应机器人中的潜在应用。该研究不仅提供了一种新型超材料设计与制备范式，还为多功能一体化结构在车辆工程、船舶与航空航天等领域的应用提供了理论基础与实验依据。该文章发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202508629>
 (来源: 两江科技评论)