

超材料前沿研究一周精选



2025 年 10 月 13 日-2025 年 10 月 18 日

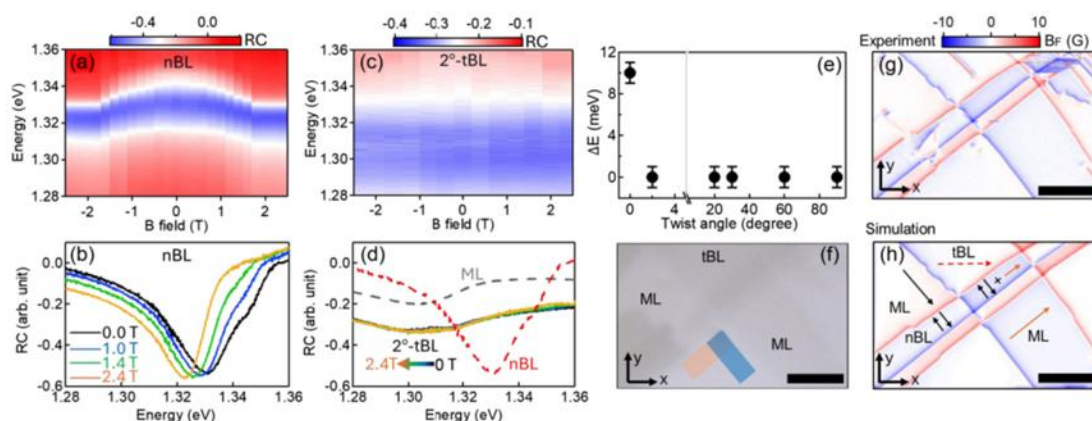
索引:

- 1、二维磁性半导体各向异性激子的扭转工程和光学性质
- 2、非德拜反常相图下固体声子的统一理论
- 3、人工规范场工程激发态拓扑：局域自旋子动力学演化的控制
- 4、色散耗散时变介质的 Floquet 矩阵特征值问题公式化
- 5、源自无序结构的静态力学隐身与伪装
- 6、模拟多域材料的可编程机械超结构
- 7、仿脊柱可重编程刚度磁流变超构材料用于多比特可视化机械信息处理

1、二维磁性半导体各向异性激子的扭转工程和光学性质

近年来兴起的“扭转工程”（twist engineering），即通过人为调节两层二维晶体之间的相对转角来构建莫尔超晶格（moiré superlattice），为调控二维材料的电子、光学和磁学性质开辟了新路径。然而，现有研究主要集中在晶格与光学性质各向同性的材料，对于具有强各向异性结构和自旋-轨道特性的磁性二维半导体，扭转角度如何影响其激子行为与磁光耦合仍几乎是未知领域。在诸多二维磁体中，CrSBr 以其独特的准一维晶格结构、层内铁磁-层间反铁磁序、以及强烈的光学各向异性而备受关注。此前研究表明，CrSBr 中的激子具有极高的束缚能与准一维波函数形态，其能量与磁序之间存在强耦合关系，使其成为研究磁控激子、光学自旋开关以及量子光源的理想候选体系。然而，扭转双层（twisted bilayer, tBL）CrSBr 是否能像石墨烯或过渡金属硫族化物那样形成新的可调相位、并在激子和磁性之间实现连续可调的耦合，是一个尚未被探索的前沿问题。密歇根大学（University of Michigan）物理系 Hui Deng 教授团队实现了通过扭转角度连续调控二维磁性半导体 CrSBr 的磁矩、激子能量与光学各向异性，并建立了适用于各向异性介质的新型激子能量模型。研究表明，CrSBr 双层的性质并非由层间电荷隧穿主导，而是源于其强各向异性晶格及准二维自旋结构。当扭转角从 0° 增至 90° 时，体系的总磁化强度、线性二向色性与激子能量可实现连续可调，其中激子能量蓝移约 32 meV，这一变化甚至超过天然双层与单层之间的能量差。实验上，团队通过反射对比光谱（RC）与扫描 NV 磁力显微成像相结合，揭示了在不同扭转角下 CrSBr 层间隧穿的显著抑制以及磁矩取向的独立保持；理论上，他们提出并验证了考虑介电各向异性的新激子模型，成功解释了激子能量与波函数形态随扭转角度变化的实验观测。结果显示，尽管体系保持强束缚能（约 802 meV）与准一维波函数特征，但其介电各向异性降低会显著减小激子束

缚能并引起蓝移。CrSBr 扭转双层的线性二向色性可在“完全各向异性”与“完全各向同性”之间连续可调，实现了材料光学极化特性的全范围控制。这意味着通过仅仅改变两个原子层的相对角度，就能实现宏观光学响应的精确调谐，为可集成超薄光子器件、可编程偏振调控及新型磁控光电元件提供了全新的物理机制与材料方案。该研究不仅揭示了二维磁性体系中“各向异性扭转物理”的核心规律，也为构筑兼具强激子束缚与可调光学响应的功能异质结构提供了实验与理论基础。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



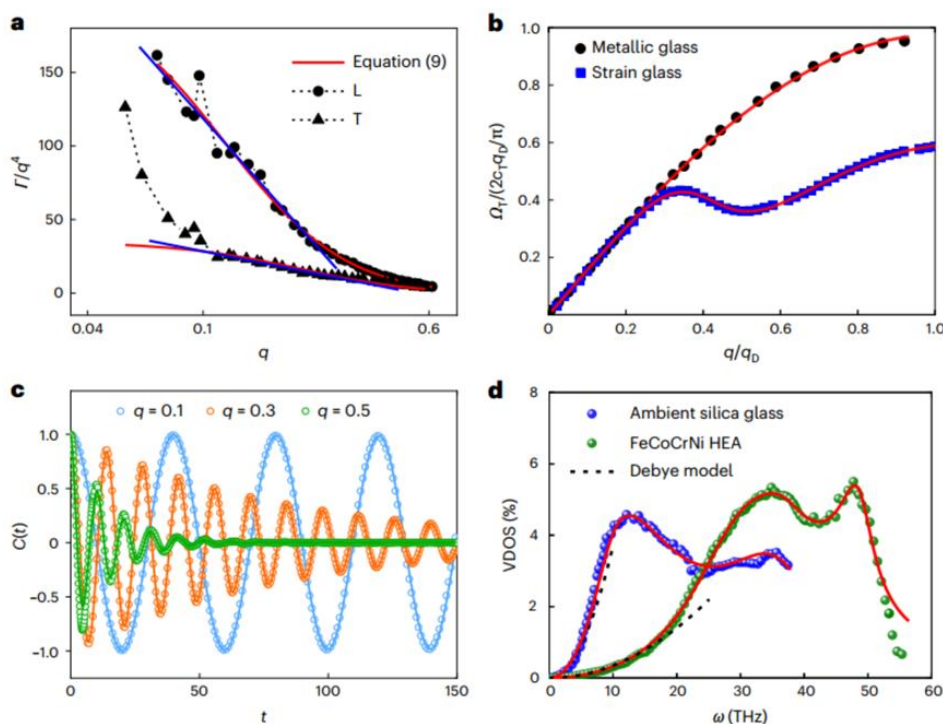
文章链接: <https://doi.org/10.1103/zbbr-5mgv>

2、非德拜反常相图下固体声子的统一理论

一个多世纪前，P. J. W. Debye 提出了著名的德拜模型（Debye model），用来解释晶体在低温下的比热行为。这一理论把固体中的低频振动视为连续介质中的弹性波，成功描述了低温比热随温度的立方关系，奠定了现代固体声子学的基石。然而，随着实验技术的发展，人们发现真实固体的振动态密度在高频区出现了显著偏离：在晶体中表现为“范霍夫奇点”（Van Hove singularity, VHS），而在无序的玻璃态材料中，则出现了被称为“玻色峰”（boson peak, BP）的异常峰值。这两个非德拜型（non-Debye）异常长期困扰着凝聚态物理学界——它们究竟是同一物理机制的不同表现，还是源自完全不同的振动过程？过去几十年中，研究者提出了两种相互竞争的解释。其一认为玻色峰是范霍夫奇点在无序体系中的“模糊化”结果：当晶格结构失去长程有序，原本尖锐的奇点被平滑化并移向低频。其二则认为玻色峰源于局域“软结构”或准局域模（quasi-localized modes）的贡献，例如原子团簇的取向序、局部应力松弛或链状缺陷。这些不同理论各有证据，却始终无法建立统一框架。随着高频中子散射、布里渊散射及第一性原理模拟的推进，人们观察到玻色峰与范霍夫奇点既可能相互转化，也可在某些材料中共存，但缺乏能够同时描述晶体与无序固体振动态密度（VDOS）的普适理论。由此，一个关键科学问题浮出水面：是否存在一套统一的声子模型，可以在同一物理框架下揭示有序与无序固体中非德拜异常的起源与演化？

近日，中国科学院力学研究所蒋敏强研究员团队首次建立了适用于晶体与非晶体的统一声子理论模型，并绘制出“非德拜声子异常相图”，系统揭示了玻色峰与范霍夫奇点之间的内在联系。这项工作由中国科学院力学研究所为第一单位，姜敏强研究员为通讯作者。研究团队从弹性波与局域振动模式的耦合出发，将真实固体抽象为“含散射体的连续介质”，通过引入表征局域结构尺度（ ξ ）与平均

自由程 (ℓ) 的两个参量, 构建了一个描述声子阻尼与软化的解析模型。该模型推导出声子阻尼 $\Gamma(q)$ 从低波矢区的瑞利散射 ($\Gamma \propto q^4$) 过渡到高波矢区的 Mie 阻尼 ($\Gamma \propto q^2$), 并首次在理论上给出这一转变的连续描述。模型进一步揭示, 声子软化与阻尼增强密切相关: 当晶格振动频率逐渐降低时, 体系的振动态密度出现额外堆积, 从而形成玻色峰或范霍夫奇点。通过数值计算与实验比对, 该模型不仅能精确拟合金属玻璃、应变玻璃、高熵合金等多种材料的实验数据, 还能再现实验中观察到的 BP - VHS 共存现象。研究团队基于该模型构建出一个二维“非德拜相图”, 以散射体尺寸和平均自由程为坐标, 清晰划分出三种振动状态区域: 单一范霍夫奇点区、单一玻色峰区及其共存区。相图揭示, 当体系中局域结构尺寸增大且散射路径较长时, 声子出现共振型阻尼, 导致局域与整体软化共存, 从而在振动态密度中同时出现 BP 与 VHS。通过对 143 种晶体与非晶体固体的低温比热测量与文献数据分析, 团队验证了该理论的普适性, 所有实验点几乎完美落在模型预测的主曲线上, 首次揭示出非德拜热容峰的普适规律。它不仅深化了人们对固体连续弹性极限失效机制的认识, 也为理解玻璃态热导率、低温比热异常及非晶材料的力学性能提供了新的理论基础。相关内容发表于《Nature Physics》上。(张琰炯)

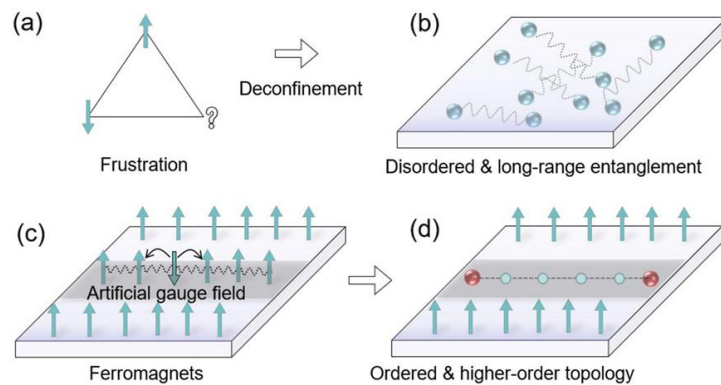


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-03057-7>

3、人工规范场工程激发态拓扑：局域自旋子动力学演化的控制

在凝聚态物理中, 自旋子作为一类分数化的准粒子, 在量子自旋液体和高温度超导体等强关联体系中扮演着关键角色。尽管自旋子通常通过磁振子的解禁闭产生, 并在输运测量和中子散射等实验中显示出间接存在的证据, 但数十年来, 对其单个实体的直接观测与可控操纵一直未能实现。特别是在二维系统中, 由于自旋子处于无序且长程纠缠的基态中, 其高度游移的特性使得空间局域化和动态控制变得极为困难。这一挑战不仅阻碍了对拓扑序和任意子统计等基本物理现象的理解,

也限制了其在量子计算等前沿领域的潜在应用。因此，如何在二维体系中实现单个自旋子的可控局域化，并进一步调控其动力学行为，成为当前研究的重要课题。近日，南京大学王伯根教授、王锐副教授研究团队提出了一种基于人工规范场的激发态拓扑工程机制，通过在量子自旋模型中引入经典 Z2 规范场，成功实现了对单个自旋子的空间局域与动态操控。研究首先在无规范场条件下证实了拓扑磁振子的存在，并进一步展示了规范场在激发态中诱导出的高阶拓扑模式，即局域于边界上的自旋-1/2 激发。利用密度矩阵重整化群等非微扰数值方法，研究首次直接观测到磁振子分数化为一对具有费米统计特性的自旋子，并验证了其空间局域性与拓扑稳定性。此外，通过设计随时间变化的规范场配置，该研究实现了自旋子的绝热编织操作及其从局域态向体态的动态演化，模拟了自旋子的解禁闭-禁闭过程。研究还探讨了在 Rydberg 原子阵列等可编程量子平台中实验实现的可行性，为在真实体系中操控这类激发态提供了可行路径。该工作不仅首次在数值上直观呈现了单个自旋子的局域形态，还为在非平衡条件下研究分数激发物的拓扑动力学开辟了新方向，对理解强关联系统激发态拓扑及其在量子信息中的应用具有重要意义。该文章发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



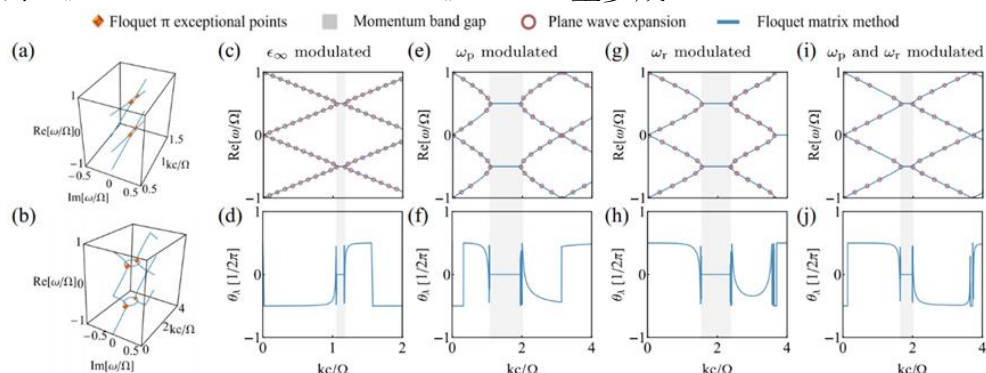
文章链接: <https://doi.org/10.1103/118w-g9q1>

4、色散耗散时变介质的 Floquet 矩阵特征值问题公式化

近年，光子系统中的时变介质引发广泛关注。此类介质展现出许多非常规现象，例如：无磁非互易性、动量带隙中的光-物质相互作用增强、Floquet 谐波生成等。为理解并推动这些现象的实现，理论研究（尤其是能带计算与本征值建模）至关重要。为计算时变介质的能带结构，已有方法包括：平面波展开法、传输矩阵法与时间演化算符法。其中，平面波展开已被拓展为广义本征值问题，可用于时空调制系统的色散计算。然而，这些传统路径存在显著局限：一是难以直接构造有效哈密顿量，二是无法在所得本征模上自然地进行格林函数与共振模展开，从而缺乏清晰统一的“准量子化”描述。鉴于 Floquet 矩阵方法在量子体系中的成功，将其推广至光学时变介质具有重要意义。现有的 Floquet 矩阵研究主要聚焦于无色散的时变介质；但来自时变传输线模型与时变散射体的研究表明，材料色散不可忽略。典型平台如 ϵ 近零材料、LC 电路与极化激元材料均表现出强烈色散；基于无色散假设的 Floquet 框架难以准确描述其物理。

近日，新加坡南洋理工大学胡光维教授团队建立了周期性时变介质的 Floquet 哈密顿量理论框架。通过推导 Floquet 哈密顿量，将色散时变介质的 Maxwell 方程严格表述为 Floquet 矩阵特征问题，从而统一地计算能带结构与本征模。该

框架既适用于强色散与强耗散情形，也可自然退化至无色散极限，为系统化分析时变介质的 Floquet 动力学与拓扑特性提供了统一而严谨的数学基础。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）

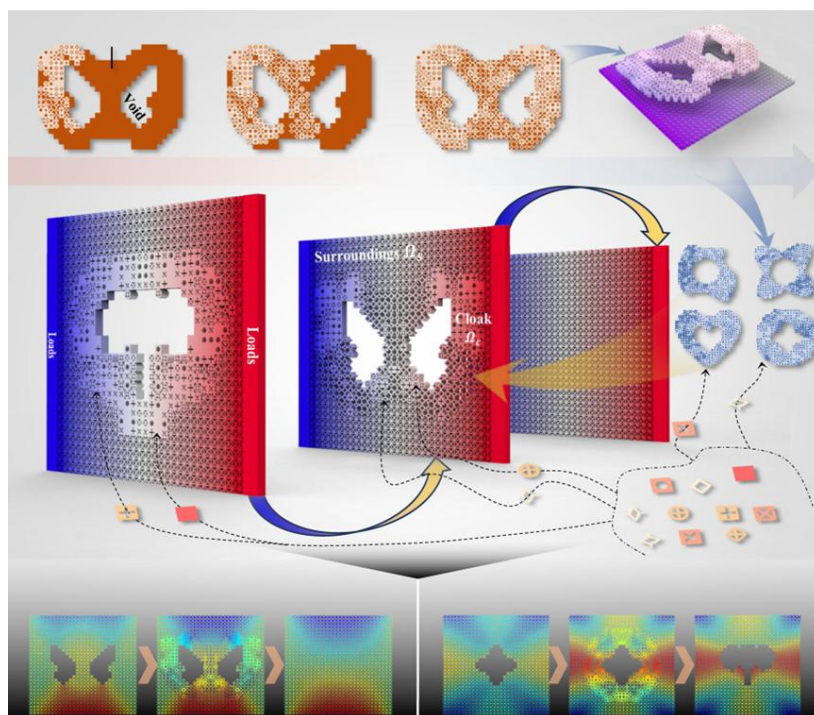


文章链接: <https://doi.org/10.1103/lcmw-qrrp>

5、源自无序结构的静态力学隐身与伪装

微结构的精密设计推动了多种具有卓越性能的结构化材料的发展，并广泛应用于力学、电磁学、声学、与机器人等领域。其特殊性能主要源于几何与拓扑设计而非化学成分。传统上，多采用周期性结构以简化设计，但自然材料如骨骼、巨嘴鸟喙、蜻蜓翅与木材往往呈现无序特征，却具备更优异的功能。受此启发，近年来人们开始探索无序结构材料，其表现出高损伤容限、完美各向同性及缺陷不敏感等特性。生物材料形态的多样性源于其自组织生长过程，这种去中心化、概率性的局域生长机制为结构设计提供了更广阔的空间。相比传统周期结构，无序结构虽具潜力，却伴随强非线性与高复杂度。已有研究提出了多种无序材料设计方法，如随机连接、节点替换及仿生不规则生长等，但其力学性能仍存争议，亟待深入研究。与此同时，力学隐身作为跨物理领域的热点问题，在静态力学中因方程不具变换不变性而难以实现完美隐身。现有方法多依赖晶格变换、双模或五模材料及拓扑优化，但计算复杂且难处理复杂空洞结构。引入无序结构以实现力学隐身与伪装，为突破传统设计提供了全新的研究途径。

近日，西北工业大学的李冰教授和西班牙马德里先进材料研究所 Johan Christensen 教授团队合作，提出了一种基于可变刚度规则的不规则生长策略，用以生成具有独特力学性能的无序结构材料。实验结果表明，结构中固有的无序性即可直接实现优异的静态力学隐身与伪装效应。所谓力学隐身装置能够使含空洞结构在受力下表现如同无缺陷实体，从而具备保护功能；而伪装结构则可使不同形状的空洞在力学响应上相互模仿，展现多样化功能潜力。该方法在虚拟现实与游戏中可用于实现触觉幻觉，在软体机器人中可用于隐藏力学特征，在生物医学中可模拟组织触感反馈，并有助于设计可编程、自适应的力学超材料。与依赖大规模单元库或拓扑优化的传统方法相比，该策略仅需少量、简洁的单元即可实现复杂功能，显著简化了制造与实现过程。同时，该框架可在复杂空洞形状及边界条件下实现静态力学伪装，甚至实现不同空洞间的相互伪装，并在非均匀环境中有效抑制畸变与整体变形，展现出高度稳健性与广泛应用前景。相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）

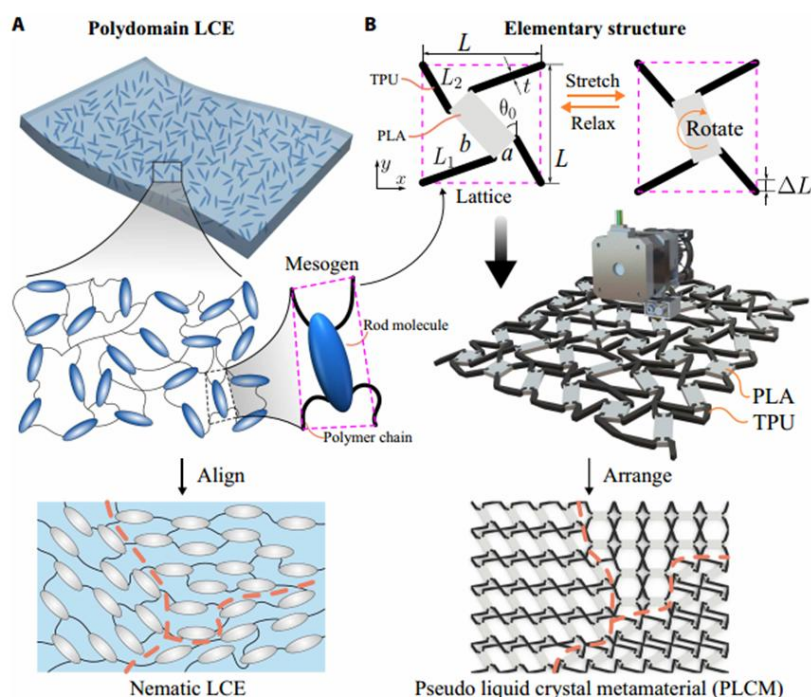


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63939-5>

6、模拟多域材料的可编程机械超结构

多域材料广泛存在于原子晶体、磁性薄膜和液晶弹性体等体系中，其微观单元的取向与分布对材料功能与性能具有决定性影响。然而，传统合成与建模方法难以在整体材料中实现微观单元的灵活精确调控，这限制了对多域材料特性的深入理解与有效利用。液晶弹性体作为典型的软智能材料，在外部刺激下可发生显著的形状与力学响应，但其微观机制——如刚性分子旋转与柔性链拉伸的耦合行为——仍难以直接观测与定量解析。现有理论模型在描述此类多尺度耦合行为时存在局限，无法充分揭示材料宏观异常响应的微观起源。因此，发展一种能够模拟多域材料微观结构及其宏观力学行为的可控模型系统，成为当前软物质力学与材料设计中的重要课题。

近日，复旦大学徐凡教授研究团队提出了一种基于热塑性聚氨酯与聚乳酸复合的伪液晶超材料，通过微观晶格单元的设计与空间排列，实现了对向列相液晶弹性体多尺度力学行为的高度模拟。利用双挤出熔融沉积 3D 打印技术，该超结构系统可精确控制晶格取向与域分布，再现了液晶弹性体在拉伸过程中的非均匀剪切变形、多域-单域转变以及软弹性与半软弹性等特性。通过引入微观极均质化理论，该研究建立了能够预测旋转主导变形行为的理论模型，并与有限元模拟及实验数据高度吻合。研究进一步展示了该超结构在功能设计方面的潜力，包括实现拉伸诱导的锯齿形弯曲变形、基于晶格旋转方向的机械二进制编码、以及应变触发的图像解码与信息隐藏等应用。这些功能不仅拓展了多域材料在信息存储与加密领域的可能性，也为其微观变形机制提供了直观的物理图像。该研究通过跨尺度结构设计，搭建了从分子构型到宏观性能的桥梁，为理解多域材料的拓扑调控机制及开发新型智能材料系统提供了理论与实验基础。该文发表于《Science Advances》。（刘梦洋）



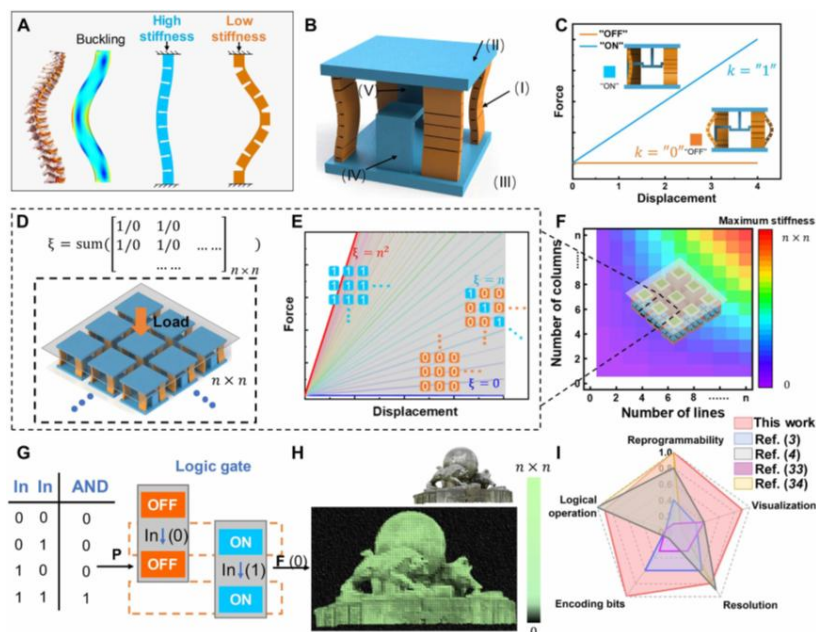
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adz9811>

7、仿脊柱可重编程刚度磁流变超构材料用于多比特可视化机械信息处理

机械超构材料为在极端环境下实现稳健的机械信息传输提供了新途径。近年来，基于可变形多稳态结构的机械信息超构材料（MIMs）成为构建可编程机械信息处理平台的重要方向，能够通过结构耦合实现光学、声学 and 机械特性的多维调控。然而，现有 MIM 多依赖形变编码，单元从高势能态向低势能态的单向转变限制了可逆编程，其信息编码依赖三维形变，读取复杂。相比之下，基于刚度可编程的超构材料在信息处理上具有更高的可重构性与稳定性，其中磁流变材料凭借外场响应刚度调控展现出构建高密度机械记忆的潜力。但其仍面临三大挑战：一是传统磁流变效应仅能连续调节刚度，难以实现离散多稳态切换；二是刚度变化需保持结构几何恒定以确保信息读取准确；三是刚度变化缺乏直观可视化手段。因此，放大双稳态刚度差异并实现便捷识别，是发展基于刚度的机械信息超构材料的关键。

近日，中国科学技术大学的邓华夏研究员和龚兴龙教授团队，提出了一种多比特可编程的仿脊柱结构策略，构建了可重编程刚度的磁流变超构材料（SRMM），实现了高密度、可重编程且可视化读取的机械信息处理。该设计灵感源于脊柱的各向异性生物力学特征，通过在结构中引入特定间隙布置并结合磁场控制，实现了 40 倍的刚度变化和 10 比特的离散刚度切换，使单元可在两种稳定刚度状态间灵活转换，类似脊柱在不同弯曲状态间的切换。通过多单元并联实现高密度信息编码，并利用力致发光材料将刚度信息转化为可视化光信号，从而实现机械信息的直观读取。理论上，多单元并联的位容量可达“ $n \times n+1$ ”。此外，基于单元刚度的可重编程特性，可通过磁耦合实现逻辑运算，展现出机械逻辑计算与信息处理

的潜力，为构建智能机械信息处理平台提供了新的思路与实现路径。相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.ady8430>
 (来源: 两江科技评论)