

超材料前沿研究一周精选



2025 年 10 月 27 日-2025 年 10 月 31 日

索引：

- 1、光子平朗道能级：由反对称非均匀赝磁场诱导产生
- 2、光子偶极 Kagome 晶格中的完全平带
- 3、光子介导相互作用稳定的任意维孤子
- 4、金属中 Tamm 等离子激元的激发
- 5、黏弹性结构阻尼实现宽带低频声吸收
- 6、通过超构转换器从兰姆波有效生成横向剪切波
- 7、无序机械超材料中易断裂区域的预测与增强
- 8、自适应扭转超材料

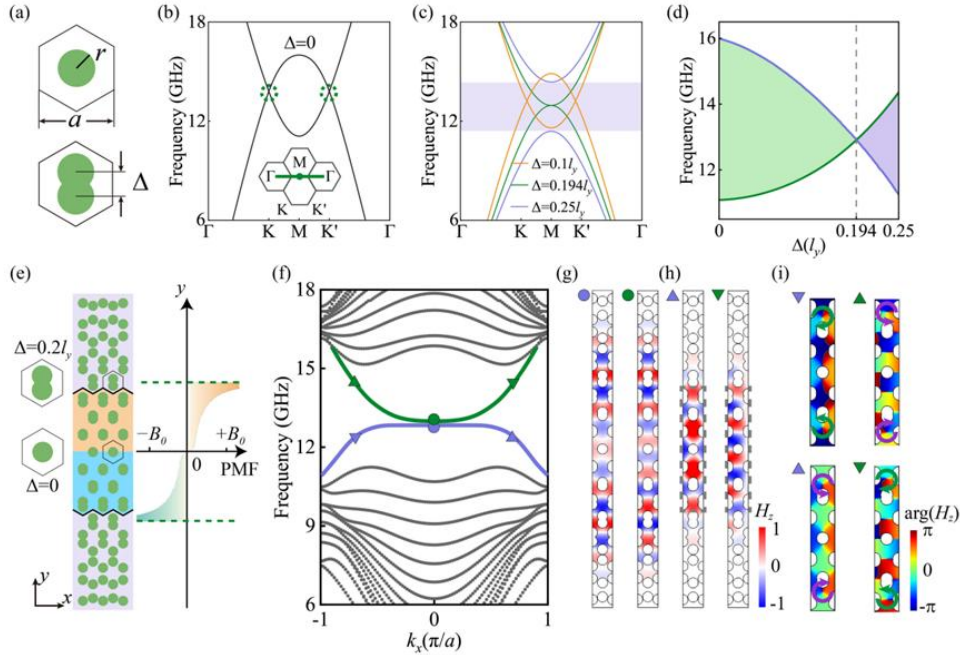
1、光子平朗道能级：由反对称非均匀赝磁场诱导产生

在凝聚态体系中，强外磁场会显著改变电子输运性质，产生 Landau 能级量子化和量子霍尔效应等现象，为电子波的调控提供了新的途径。在光子体系中，外磁场同样能诱导出拓扑效应，但实验上难以实现极强的真实磁场。近年来，赝磁场成为模拟磁响应效应的重要替代方案。与传统磁光效应不同，赝磁场不受频段限制，可作用于全频光场；同时体系仍保持时间反演对称性，使 Dirac 半金属中的两个不等价谷（ K 与 K' ）感受到方向相反的赝磁场，从而导致谷拓扑。受石墨烯应变工程的启发，研究者已在多种二维经典波平台中实现赝磁场：“面外”赝磁场可通过人工应变或单轴梯度形变构造，从而产生平坦 Landau 能级、谷边界态与蛇形态等现象；“面内”赝磁场则可通过破缺空间反演对称性的晶格形变实现，支持手性 Landau 态和 Dirac 波导等独特输运模式。近年结合合成维度与合成规范场耦合的研究，又在三维超晶格中实现了 Landau 彩虹、片上弯曲与分束等新奇效应。

然而，在以往基于单轴形变的研究中，有限的形变量仅能使 Dirac 点在动量空间中稍微偏移至 K/K' 附近，所获得的平坦能带范围狭窄且平坦性有限。尽管理论上可通过空间调制形变场实现任意分布的赝磁场，但此前研究多集中于均匀赝磁场，非均匀赝磁场对平坦 Landau 能级的影响仍缺乏探索。

近日，南京大学金飏兵教授、蒲殷教授、陈伟教授和香港科技大学陈子亭教授联合团队在具有更大形变范围的 Dirac 型光子晶体中，首次于 Γ 点附近实现了由反对称、非均匀赝磁场诱导的平坦 Landau 能级。这些 Landau 能级表现为空间局域、双重简并的体模态，并伴随色散的谷扭结态。非均匀赝磁场为系统提供新的调控自由度，使平坦能带在动量空间中的平坦区更宽、更均匀。通过近场扫描实验，

直接可视化了平坦 Landau 能级的能带色散，并观测到了局域化平坦态与手性谷扭结模态。该成果为利用赝磁场调控电磁波的局域与传输开辟了新的途径。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上。（金梦成）



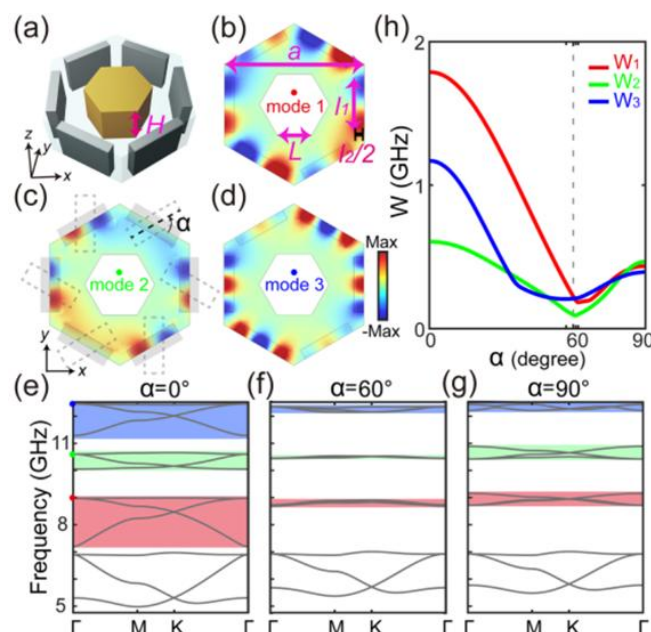
文章链接: <https://doi.org/10.1103/3l3j-tfyn>

2、光子偶极 Kagome 晶格中的完全平带

在现代光学与凝聚态物理学中，平带（Flat Band）因其独特的能量特性和局域化现象，吸引了广泛的研究兴趣。平带是指能带在整个波矢空间中具有零群速度的状态，这种特性可以大大增强物质间的相互作用，并使得系统出现许多非传统的物理现象。在量子 and 经典系统中，平带能够促使摩擦、拓扑效应、超导性等现象的发生，成为新型光子、声学、机械设备的重要研究方向。然而，现有的光子平带系统多限于侵蚀波、特定晶格对称性或复杂超胞调制，其制备方式复杂且效果受限。基于几何挫折的晶格设计为实现平带提供了新思路，但目前，如何设计一种简单、通用且高效的平带工程方案，仍是光学研究中的一大挑战。

近日，武汉大学肖孟教授、南方科技大学副教授高振研究团队，提出了一种新的方法，通过结合光子晶体中的偶极子与旋转自由度，在光子学领域实现了三重简并的平带结构。该方法基于光子偶极子 Kagome 晶格的设计，利用旋转偶极子的方向调整来控制平带的形成。研究表明，当偶极子方向旋转至特定角度时，所有能带会达到完全平坦并简并，且这一现象在整个布里渊区内都能得到维持。这一发现突破了传统 s 轨道 Kagome 晶格仅能形成单一平带的局限，实现了整个带结构的平带化，从而避免了色散模式的干扰，使得该系统对任意激发源均具有兼容性。这一研究成果展示了一个新的平带工程机制，具有极强的可调性和广泛的应用前景。通过调节偶极子方向，研究团队成功地实现了无源激励下的平带结构，这为增强光物质相互作用提供了新的策略，并可能在紧凑型光子器件和节能信息处理等领域得到应用。尤其是在传统的光子学平带实现方式中，通常会受到高阶耦合的影响，而该团队的设计在这方面表现出极高的鲁棒性。此外，这一方法不仅限于特定的晶格几何形态，具有高度的普适性，能够应用于不同的模式或晶格

设计,展示了其在光子、电子以及机械系统中控制波的局域化和相互作用的潜力。相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



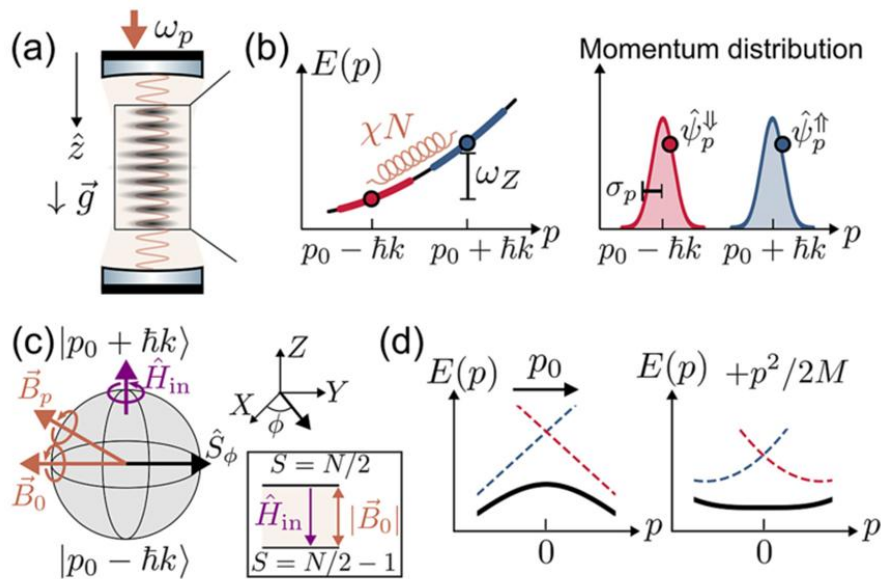
文章链接: <https://doi.org/10.1103/bt9s-qsf>

3、光子介导相互作用稳定的任意维孤子

孤子作为一种在传播过程中不展宽的自增强波,是非线性物理在从水波到光纤光学脉冲等多种体系中的标志性现象。弱相互作用原子气体中玻色-爱因斯坦凝聚的实现,为探索准一维物质波孤子及其他非线性现象开辟了道路。然而,在更高维度中,由于动力学或热力学不稳定性以及相互作用诱导的坍塌,稳定的孤子形成更为复杂,直到最近才实现了稳定的二维亮孤子。原子孤子因其在长时间内无色散的特性及在脉冲序列中空间不均匀性降低的特点,已被认为是惯性传感的潜在候选者。但制备原子玻色-爱因斯坦凝聚的需求限制了其在传感任务中的实际应用。因此,寻求在非简并条件下,尤其是在热原子气体中产生孤子的方案,具有重要的研究动机和应用价值。

近日,美国科罗拉多大学的 Ana Maria Rey 教授和 James K. Thompson 教授研究团队提出了一种在光学腔中通过动量态之间的交换相互作用,于热原子气体中产生任意维度孤子的新方案。此方案通过平衡单粒子色散与工程腔介导的交换相互作用,使得两个波包在特定条件下相互束缚且不发生色散,从而形成孤子。与基于自旋轨道耦合稳定接触相互作用孤子的理论方案相比,该研究产生的孤子具有依赖于不同动量态之间相干性的干涉条纹,无需玻色-爱因斯坦凝聚条件即可在热气体中涌现,并能在在一维、二维及三维体系中实现。此外,产生孤子的相同交换相互作用能够纠缠动量态,有望应用于量子增强干涉测量。研究通过平均场动力学模拟展示了孤子的形成与稳定性,并定量分析了波包宽度随时间的演化,证实了在最优化相互作用强度下色散被有效抑制。对于热气体中探测的挑战,该研究还提出了一种干涉测量探测方案以替代传统的飞行时间成像。该方案为在非简并条件下操控原子运动及生成多维孤子提供了机制,在量子模拟、量子传感等领域展现出应用潜力。

该研究成果发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



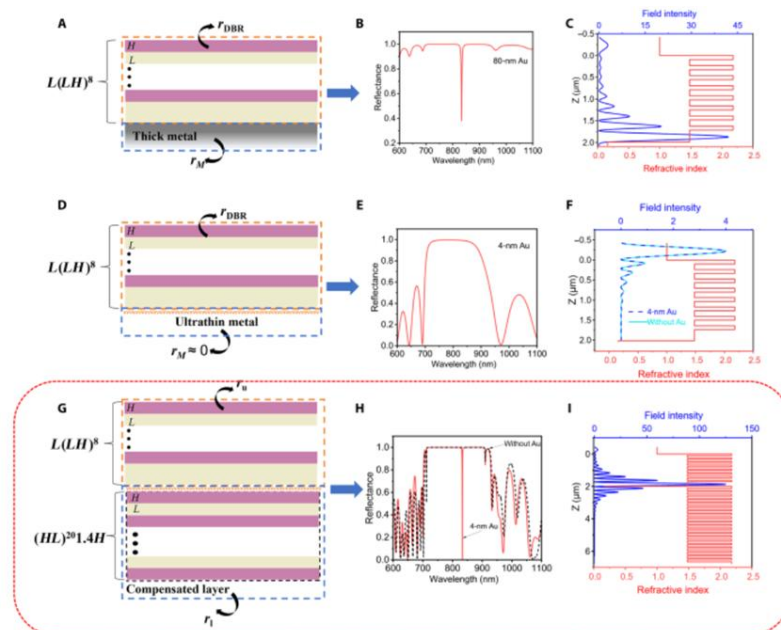
文章链接: <https://doi.org/10.1103/qrk6-phhk>

4、金属中 Tamm 等离子激元的激发

随着纳米技术的发展，光学界的研究不断突破，尤其是在表面等离子激元（Plasmonics）和光学 Tamm 状态（OTS）方面。Tamm 等离子激元极大地增强了光与物质的相互作用，在纳米光子学、激光器、传感器等领域具有重要应用潜力。然而，传统的 Tamm 等离子激元通常需要厚金属膜来实现，且金属与光子晶体的相互作用受限于材料和结构的制约。因此，如何在超薄金属膜中激发 Tamm 等离子激元，一直是学术界面临的挑战。

近期，华东师范大学王少伟教授及芬兰阿尔托大学孙志培教授组成的研究团队通过在超薄金属膜（如 2 纳米厚的金膜）与介质布拉格反射器（DBR）层之间形成“元界面”，有效弥补了金属膜反射系数不足的问题，从而实现了 GTPP 的稳定激发。该结构的创新性在于无需复杂的加工或特殊图案设计，简化了 GTPP 的实现过程。通过 FDTD 仿真和实验验证，研究团队发现，在 532 纳米的共振波长下，GTPP 激发可以达到近乎完美的光吸收（约 99.1%），且吸收性能极大提高。此外，GTPP 在激发过程中表现出卓越的非线性吸收特性，尤其在反向可饱和吸收（RSA）效应方面，GTPP 基器件的 RSA 阈值比传统金属薄膜低两个数量级（约 $7.7 \times 10^{-5} \text{ nJ}/\mu\text{m}^2$ ），展现出显著的增强吸收能力。这一发现不仅为微纳光电子设备的激光干扰消除提供了证据，还为其他高效光学吸收和激光器设计提供了新的方向。在应用方面，基于 GTPP 的窄带吸收器展示了在各种激光强度下，能够有效抑制残余激光信号的能力，显著提高了荧光信号的强度，并在高功率强信号应用中表现出优异的鲁棒性。这一成果将推动超薄金属薄膜在激光消除、光学传感器及其他纳米光电子设备中的应用。

相关内容发表于《Science Advance》上。（张琰炯）

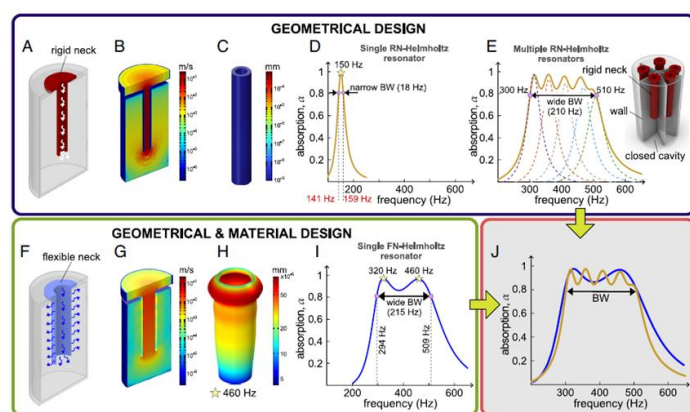


文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adz0106>

5、黏弹性结构阻尼实现宽带低频声吸收

吸收空气传播的声音，尤其是低频噪声，对于控制噪声污染和改善声环境至关重要。传统多孔材料只有在厚度接近声波四分之一波长时才具有高效吸声效果，因此在低频下需要体积庞大的结构。过去十年中，声学超材料因其能够通过设计的共振结构实现亚波长吸收而备受关注。例如，亥姆霍兹共振腔、法布里-珀罗通道以及微穿孔板等设计，主要依赖空气柱共振或空气运动的热黏性损耗来吸收声能。然而，这些基于空气共振的机制通常只在窄频带内有效。为拓宽吸收带宽，研究者尝试组合不同尺寸的多种共振单元，但导致结构复杂且体积庞大。部分研究开始关注柔性结构，如膜式吸声器可增强局域能量密度，但对膜张力极为敏感，易受环境影响。其他方案则利用柔性材料或软壁结构增加阻尼，但多依赖经验和仿真，缺乏系统理论框架。为此，本文提出利用弹性体和凝胶等软材料，其低模量、高阻尼和大变形特性，通过材料本身的形变耗散声能，提供一种全新的低频吸声途径，并强调需建立同时考虑材料耗能、结构动力学与声耦合的理论体系。近日，西湖大学姜汉卿教授团队，提出一种新型复合声学超材料，将传统亥姆霍兹共振腔中高刚度颈部替换为嵌入密闭腔体的柔性黏弹性圆柱壳，从而根本性地改变了能量耗散机制——由空气共振转变为材料本身黏弹性主导的结构阻尼。该设计使单个吸声单元在 227 至 329 Hz 的低频宽带范围内实现超过 97% 的吸收效率，且厚度仅为声波波长的 1/15，展现出深亚波长特性。为揭示其机理并优化性能，研究建立了离散化阻抗模型，将材料参数（弹性模量、损耗因子、密度）与几何结构直接关联，模型不仅准确预测实验结果，还可用于调控吸收频带，实现可设计化声吸收。研究提出一种全新的低频声学设计理念——不再依赖复杂多重共振结构，而是以材料自身作为能量耗散介质。通过将黏弹性阻尼融入结构核心，实现了紧凑、可调且宽带的低频吸声性能，表明材料本征特性与结构设计在声学性能中具有同等的重要作用。

相关工作发表在《PNAS》上。（刘帅）



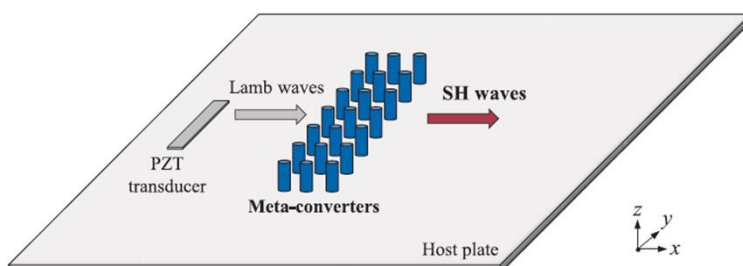
文章链接: <https://doi.org/10.1073/pnas.2520808122>

6、通过超构转换器从兰姆波有效生成横向剪切波

横向剪切波（SH波）具有平面内且垂直于传播方向的振动特征，因其无色散、对裂纹模式转换敏感度低及信号简洁等优势，被广泛应用于薄壁结构的健康监测（SHM）。然而，高效激发SH波仍具挑战。目前主要方法包括电磁声换能器（EMAT）与剪切型压电换能器（PZT）。EMAT虽为非接触式，但体积大、安装复杂；PZT换能器结构紧凑，却产生的SH波强度较弱，限制了其应用。相比之下，兰姆波易于由常规PZT产生，因此通过将兰姆波模式转换为SH波成为一种潜在方案。近年来，超材料因具备可设计的波传播特性，在波过滤、导向及模式转换等领域展现出巨大潜力。部分研究已利用超材料实现纵波向SH波的模式转换，但仍存在转化效率低、结构复杂和频带窄等问题。为此，需发展基于三维结构设计与拓扑优化的超构转换器，实现兰姆波向SH波的高效能量转换，为SHM提供新型、稳定且可表面安装的激励方案。

近日，香港理工大学的成利院士、国防科技大学单胜博助理教授团队提出了一种通过模式转换实现横向剪切波（SH波）激发的新方法。该方法利用由压电换能器（PZT）激发的兰姆波，通过经拓扑优化设计的超材料介导转换器（meta-converter）实现高效的兰姆波向SH波转换。研究首先针对结构健康监测（SHM）中常用的特定工作频带（如调制脉冲信号频段），设计适用于不同模式与频率兰姆波入射的转换器结构。随后，通过频带结构与模态形态分析揭示了在目标频段内兰姆波与SH波之间的能量转换机理。进一步利用有限元数值仿真（FE）评估所设计转换器的波动转换效率。最后，采用选择性激光熔融（3D打印）技术制造典型样品，并通过实验验证其有效性。研究结果证明该方法能够实现高效、可控的SH波生成，为SH波在结构健康监测中的应用提供了新的技术途径。

相关工作发表在《Mechanical Systems and Signal Processing》上。（李治含）

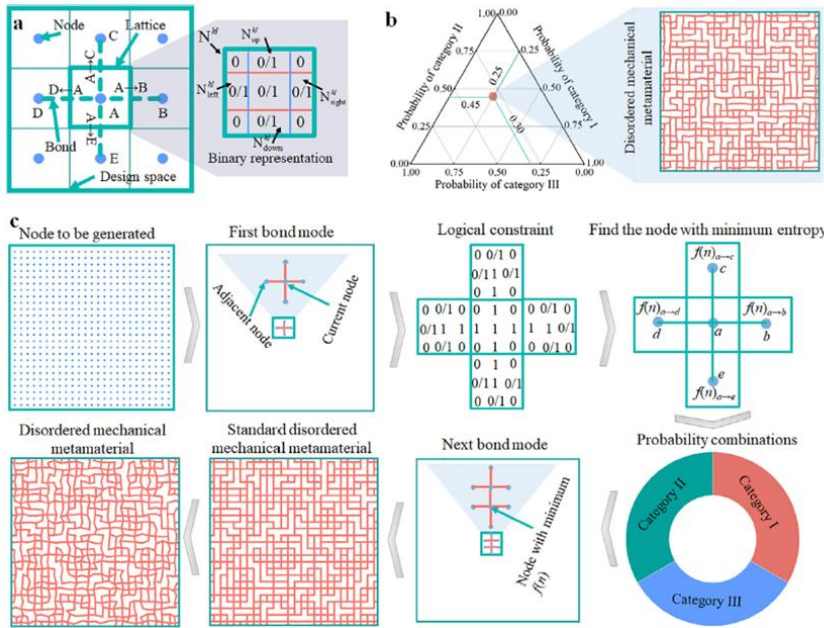


7、无序机械超材料中易断裂区域的预测与增强

机械超材料突破了传统材料的物理极限,展现出诸如负泊松比、负有效模量、负可压缩性及高韧性等优异性能。作为其重要分支,无序机械超材料因轻质高强和可调力学特性而备受关注。其内部键的随机分布虽有助于能量集中、应力缓解与形变重构,却不可避免地产生局部易断裂区域,使材料在受载时易发生突发破坏,显著降低结构可靠性。以往研究主要依赖拓扑优化、刚度调控及无序度调节等方法改善其断裂行为,但由于无序结构的随机性,这些方法在同时兼顾结构异质性与断裂区域控制方面存在困难。基于摩擦填料或 Voronoi 结构的研究揭示了无序与刚度在脆-韧转变中的关键作用。按照 Griffith 理论,脆性材料的应力集中于局部易形成裂纹,而增大无序度或刚度可使应力更均匀分散。然而,无序度或刚度的局部调节过程复杂,且增加无序度会削弱强度,提高刚度又损害轻量特性。为克服局部调控与性能平衡难题,研究逐渐转向“易断裂区域预测”与“定向强化”两方向,但仍面临非均匀键长下预测精度不足及单参数强化破坏性能平衡等核心挑战。

近日,湖南大学夏百战教授团队,为解决研究实践中存在的上述问题,提出了一种分阶段的解决方案。首先,构建了一种自组织生成算法,用于设计具有可控无序特性的机械超材料,从而为后续性能调控提供稳定的结构基础。其次,引入测地边介数中心性 (GEBC) 指标,建立了一种量化的易断裂区域预测方法,以识别材料中可能出现应力集中的关键位置。最后,针对预测得到的易断裂区域,采用双参数调控策略,通过同时提高平均节点连接度 (Z 值) 和短键频率,实现对局部结构的定向增强,避免对非关键区域的无效调节。实验结果表明,该方法不仅显著提升了易断裂区域预测的准确性,还有效增强了无序机械超材料的强度与韧性,实现了轻质结构下的高可靠性与高抗损伤性。这一研究为突破现有无序超材料设计中的性能平衡瓶颈提供了新的可行途径,并为未来可控、抗损伤的无序结构设计建立了理论与计算框架。

相关工作发表在《Advanced Materials》上。(刘帅)



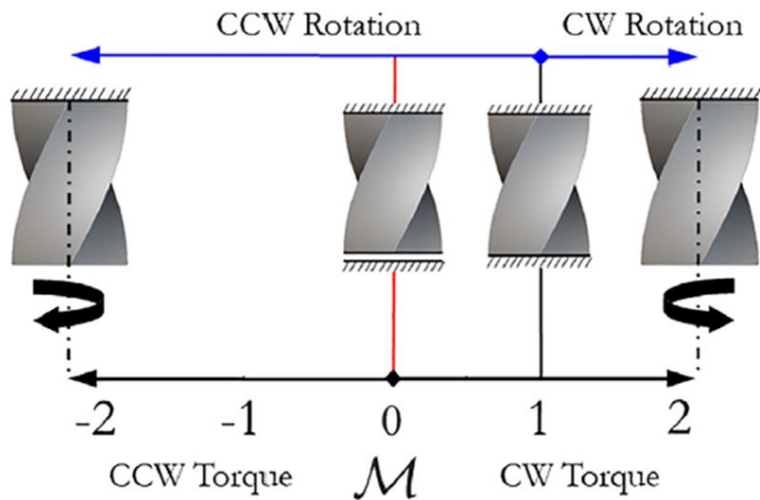
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202508361>

8、自适应扭转超材料

近年来,机械结构设计快速发展,受高性能与多功能需求驱动,现代部件不仅需要满足力学功能,还需兼顾可持续性、安全性与制造效率。未来一代结构正从被动功能转向主动响应,利用自适应材料根据外界刺激(如温度、光、电磁场、颗粒阻塞或互锁网络)动态调节力学性能。以汽车防撞结构为例,传统吸能装置仅具单一力-位移响应,难以应对不同碰撞情景。尽管通过几何优化或多材料组合提高能量吸收,但这些方法仅实现“可调”而非真正“自适应”。自适应结构则可通过外部驱动主动改变响应,实现多种受力路径,从而在不同冲击下优化性能。这一趋势与实时监测和智能决策系统相契合,推动自适应材料在防护系统中的研究。现有研究多基于仿生或理性设计结构,但存在柔软性过高、驱动条件苛刻及缺乏可靠模型等问题。近期研究表明,通过扭转驱动实现压缩-扭转耦合,为调控材料力学行为提供了可行途径,为发展可控、可预测的自适应超材料奠定了基础。

近日,马尔凯理工大学 Mattia Utzeri 与格拉斯哥大学 Shanmugam Kumar 团队,提出一类基于微极弹性理论的扭转超材料,通过对原始晶格施加扭转操作获得几何诱导的扭转驱动和非线性响应,实现自适应吸能与防护功能。研究构建了多尺度预测框架,结合 Cosserat 连续介质力学、有限元模拟和实验验证其可行性。利用增材制造技术,以 FE7131 钢制备相对密度 10% 的旋转双螺旋 (gyroid) 结构样品,在不同扭转约束条件下进行准静态与动态压缩测试。结果显示:当扭转受限时,结构具有高轴向刚度 (4.8 GPa)、塌陷应力 (21 MPa) 和比能量吸收 (15.36 J/g); 而自由或过度扭转时性能分别下降约 25%、24% 和 33%。研究还结合 SEM 和 μ CT 分析制造缺陷,扩展至不同密度的参数化有限元研究。性能映射表明,扭转超材料兼具高强度与自适应特性,在汽车、轨道交通、航空航天和国防防护系统中具有广阔应用前景。

相关工作发表在《Advanced Materials》上。(李治含)



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202513714>

(来源: 两江科技评论)