

# 超材料前沿研究一周精选



2025 年 12 月 8 日-2025 年 12 月 14 日

## 索引：

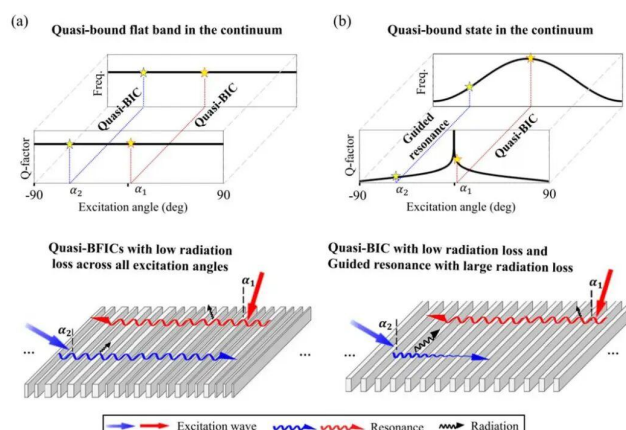
- 1、连续介质中的准束缚平带
- 2、由局部耗散与长程相互作用诱导的边界时间晶体
- 3、从大型超材料数据库中挖掘极端特性
- 4、用于太赫兹介电波导的超薄单壁碳纳米管表面波吸收器
- 5、通过体心立方框架对密集堆积聚合物复合材料进行超稀释极限的热导率建模
- 6、强迫键电离驱动设计的超低晶格热导率的柔性热电器件
- 7、具有多模态运动能力的超柔水凝胶免疫微毫米机器人

## 1、连续介质中的准束缚平带

在微纳光子结构中高效局域电磁波以实现高品质因数共振，对于增强光与物质相互作用、推动新型光子器件发展至关重要。连续介质中的束缚态作为一种能量位于辐射模式连续域内的独特局域态，为实现极高品质因数提供了重要途径，并已应用于激光器与传感器等领域。然而，传统准连续介质中束缚态的高品质因数共振通常被限制在动量空间内极其狭窄的范围内，对激发角度极为敏感，轻微的偏离即可导致品质因数急剧下降，且其性能易受制备过程中结构无序引入的散射损耗影响。尽管通过合并多个束缚态或构建莫尔束缚态等策略能在局部拓宽高品质因数范围并改善能带平坦度，但其高性能依然难以在整个动量空间得以维持。因此，探索一种能在全动量空间、宽角度范围内维持高品质因数共振的新型光学态，成为该领域一个亟待解决的关键科学问题。

近日，北京理工大学的张向东教授、张蔚暄教授和复旦大学的石磊教授联合研究团队，创新性地提出并实验证实了一类新型光学态——连续介质中的准束缚平带。与依赖结构有序性的传统思路相反，该研究通过在一维光子晶体平板每个超晶胞内引入镜面对称的结构无序，成功诱导出了随机生成的准束缚平带。理论分析与数值模拟表明，此类平带源于无序诱导的能带折叠、模式局域化以及在动量空间产生的多个拓扑电荷的共同作用。研究进一步确定了最大化准束缚平带生成概率的最优无序强度，这源于模式局域化程度、能带平坦度与局域本征模远场辐射傅里叶系数幅值之间的平衡。实验上，通过角分辨透射光谱测量，观测到高品质因数平带在整个探测角度范围内的“消失”现象，这间接证实了其准束缚平带的特性。更为直接的证据来自等频轮廓成像及散射谱线宽测量，展现出与传统准连续介质中束缚态截然不同的角度不敏感性。该工作不仅揭示了利用结构无序而非避免无序来增强光学性能的反直觉新机制，也为设计具有宽角度响应、高耐受性的

高性能光子器件开辟了新途径。该研究成果发表于《Nature Communications》。  
(刘梦洋)

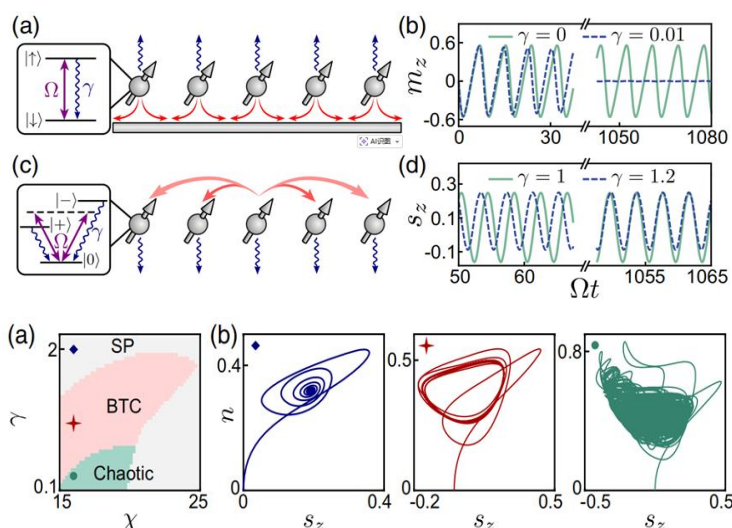


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65860-3>

## 2、由局部耗散与长程相互作用诱导的边界时间晶体

时间晶体作为一种在时间维度中自发破缺对称性的奇特量子相态,自提出以来便引发广泛关注。理论研究曾预言,在连续时间晶体(CTC)中,微小扰动即可将系统从平稳态拉开,并触发局域可观测量的持久、有序振荡。然而,在平衡体系中,连续时间晶体的存在性曾受到一系列工作的质疑。近年来,理论与实验陆续表明:驱动-耗散体系能够规避平衡体系的限制,使连续时间晶体成为可能。包括超冷原子、热 Rydberg 气体以及固态平台在内的多个实验系统均观测到自持振荡现象,为这一新型相态的实现奠定了基础。在耗散体系中,连续时间晶体常被称为边界时间晶体(BTC),意指系统可被视作一个与环境接触的“边界”。BTC的经典模型通常依赖集体衰减:一组自旋-1/2 粒子通过共同的 Markovian 浴发生超辐射衰减,从而形成振荡。然而,这类模型在现实平台中极易受到局域衰减通道的破坏,导致时间晶体振荡难以保持稳定。

近日,清华大学尤力教授团队展示了一种由局域耗散本征诱导的稳健 BTC。研究团队构建了一个一维自旋链模型,其中自旋-1 粒子之间具备可调节的长程相互作用,并同时受到严格的局域衰减。令人关注的是,局域耗散与长程作用之间形成了独特而有效的动力学竞争机制,使 BTC 在该体系中得以稳定存在。在平均场分析中,研究者发现系统会产生稳定的极限环,即自发维持的周期性振荡,其根源来自不同激发通道之间的竞争。随着相互作用范围的减小,团队进一步观察到:系统从平均场极限环逐渐过渡到具有显著量子关联特征的关联型 BTC,揭示了一个由长程相互作用调控的非平衡相变过程。该研究显著拓展了人们对非平衡量子相的认识,并为进一步探索时间对称性破缺、耗散机理与长程相互作用的协同效应提供了全新的理论框架。相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》。(金梦成)

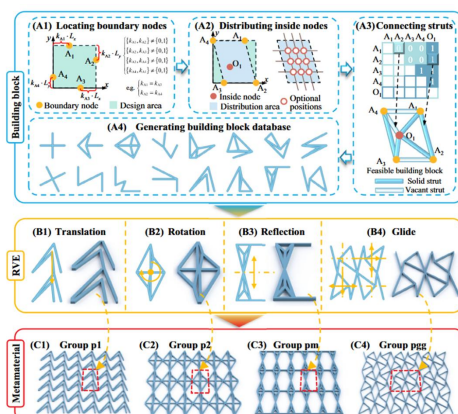


文章链接: <https://doi.org/10.1103/jhd4-1khw>

### 3、从大型超材料数据库中挖掘极端特性

桁架超材料因其独特的节点-支柱架构，展现出超轻质、超刚度、负泊松比、多稳态等传统材料难以企及的优异性能，在航空航天、软体机器人及医疗植入物等领域具有广泛的应用前景。然而，当前桁架超材料的设计往往局限于对晶体结构、分子结构或生物构型的直观模仿，如蜂窝、三角形等。这种基于经验和直觉的设计策略导致了构型的匮乏，进而将其机械性能（如杨氏模量和泊松比）限制在一个狭窄的范围内，难以触及理论极限。此外，现有的超材料数据库往往数据稀疏，且缺乏系统性的编码规则，导致基于数据驱动的材料设计方法泛化性能较差，难以挖掘出具有极端性能的全新构型。因此，构建一个覆盖范围广泛的架构-性能数据库，成为突破当前设计瓶颈、挖掘超材料极致潜力的关键。

近日，湖南大学韦凯教授团队提出了一种基于图形的设计框架，并通过结合平移、旋转、反映等图形变换操作系统地对材料结构进行了编码，成功构建了一个包含超过 180 万种二维桁架超材料的构型-性能数据库。研究发现，通过在主轴附近增强支柱，可以获得接近 Voigt 理论界限的极致杨氏模量；而通过构建低对称性的基本构型，则能实现泊松比从极负（-65.034）到极正（+69.602）的跨越式调控，其范围是现有常见超材料的 30 倍以上。此外，文章首次提出了“机械同分异构体”（Mechanical Isomerism）的概念，即具有相同结构特征描述但内部节点或支柱连接方式存在细微差异的超材料。这种微小的结构变化足以导致宏观机械性能产生几个数量级的剧烈波动，甚至实现泊松比符号的反转。这一发现阐明了低对称性与结构多样性是挖掘极端性能的根本前提。为了验证该大规模数据库及设计方法的有效性，研究团队选取了具有代表性的经典构型及新发现的极端构型进行力学测试。实测结果与数值模拟结果展现了高度的一致性，证实了数据库的准确性与可靠性。该工作不仅提供了一个即时可用的高性能超材料库，弥补了现有研究中构型匮乏的短板，更为未来的数据驱动设计、形状优化及先进制造奠定了坚实的数据基础。这种从海量数据中挖掘极端属性的新范式，有望启发声学、光学、热学及电磁学等跨学科领域的超材料创新设计。相关工作发表于《Nature Communications》上。（潘鑫荣）

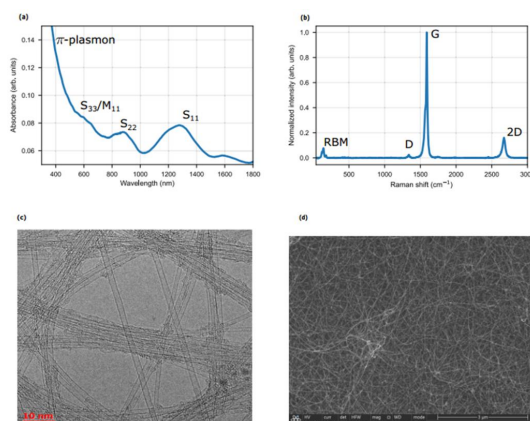


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64745-9>

#### 4、用于太赫兹介电波导的超薄单壁碳纳米管表面波吸收器

介电波导因其固有的低损耗传播、强模式限制以及与 CMOS 制造工艺的兼容性，已成为太赫兹及亚太赫兹波段集成电路的重要平台。高电阻率区熔本征硅在太赫兹范围内几乎无损耗，其高折射率差可实现紧密的模式约束和尖锐弯曲，并能通过成熟的 CMOS 技术进行纳米级图案化，从而实现单片集成。然而，在该平台上构建复杂太赫兹网络面临一个关键挑战：实现匹配良好的终端。传统解决方案通常采用波导截面的绝热或阻抗匹配锥削，将引导模式逐渐扩展至自由空间以引起辐射损耗。这类结构效率依赖于锥削长度，不仅占用宝贵的芯片面积，还可能向不期望的方向辐射功率，导致电磁干扰、集成密度受限及机械脆弱性问题。此外，许多传统微波终端方法因材料热不兼容性或微尺度锥削结构制造复杂等因素，难以直接缩比应用于太赫兹系统。因此，开发一种紧凑、宽带且反射低的终端，对于实现高性能、高密度的太赫兹集成电路至关重要。

近日，瑞典皇家理工学院的 Dmitry V. Lioubtchenko 研究员、Nikolaos Xenidis 和俄罗斯斯科尔科沃科学技术研究院的 Albert G. Nasibulin 教授联合研究团队，提出了一种基于无聚合物单壁碳纳米管薄膜的超紧凑终端策略。薄膜通过气溶胶化学气相沉积法制备，并干法转移至硅介质棒波导表面。通过调控薄膜厚度，可在太赫兹波段实现可调的宽带吸收特性。电磁表征显示，在 140–220 GHz 频段内，负载薄膜的波导其插入损耗随厚度显著增加，而反射信号始终保持极低水平。其中，53 纳米厚的薄膜在 6 毫米长度上实现了高达 47 dB 的衰减，同时保持了优异的阻抗匹配，证实了近乎无反射的高效吸收。分析表明，吸收是其主要屏蔽机制，并获得了创纪录的比屏蔽效能。该方法在不改变波导主体结构或显著增加尺寸的前提下，提供了一个超紧凑、宽带的终端，克服了传统方案的局限性，为高密度太赫兹集成电路的实用化推进了关键技术。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



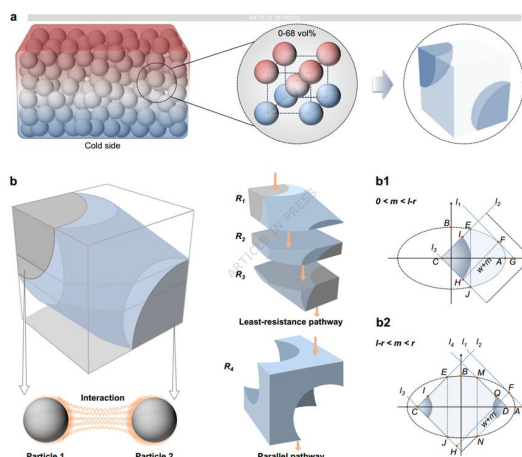
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66559-1>

## 5、通过体心立方框架对密集堆积聚合物复合材料进行超稀释极限的

### 热导率建模

在热传导材料的开发中, 聚合物复合材料因其优异的加工性和电绝缘性而广泛应用, 但如何提高其热导率, 尤其是在高填充比条件下, 始终是材料科学的挑战之一。常规的热导率模型大多适用于低填充比的稀疏系统 ( $\leq 40\%$  体积分数), 而对填料间相互作用强烈、填充密度较高的复合材料的预测能力较弱。在填充物高度密集的聚合物复合材料中, 填料间距的减少导致其热传导路径受到几何约束, 热流沿着最低阻力路径流动, 表现出与稀疏系统截然不同的热传导特性。因此, 如何突破现有的模型, 提出适用于高填充比复合材料的热导率预测方法, 成为热管理材料领域中的一个关键问题。尤其是在聚合物复合材料中, 填料浓度达到或超过 50% 时, 传统的有效介质理论 (EMT) 模型在描述热传导性能时精度降低, 需要新的理论框架来解释这些复杂的物理过程。

为了解决这一挑战, 四川大学吴凯副研究员课题组提出了一种新的基于体心立方 (BCC) 框架的热导率建模方法。该模型通过简化的 BCC 几何框架捕捉了高填充比复合材料中填料间强烈相互作用及其对热流的影响。通过建立热传导的最小阻力路径模型, 该团队的研究揭示了在不同填料体积分数下, 热传导路径如何随填料间距的减小而发生变化, 从而影响热导率的增强。实验结果验证表明, 该模型能够在 0% 到 68% 的填料体积分数范围内提供高精度的热导率预测, 且对不同类型的填料 (如 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 ZnO) 也表现出良好的通用性, 尤其是在高填充比的情况下, 模型能够准确描述热渗流的转变过程。该模型的重要创新在于, 它通过考虑填料之间的几何约束与热阻效应, 提供了一个物理机制的解释框架, 阐明了热渗流转折的机制, 并给出了定量的临界条件。此外, 该研究还提出了一种模块化的计算框架, 能够在短短 10 秒内完成高效的热导率预测, 极大地提高了预测效率, 为聚合物复合材料的优化设计提供了重要工具。通过与现有的几种经典模型 (如 H-J 模型、Bruggeman 模型等) 进行对比, BCC 模型在高填充比条件下表现出了显著的优越性, 尤其在捕捉热导率的非线性增强和渗流转变方面, 提供了更加精确的预测。研究成果发表在《Nature Communications》上。(张琰炯)



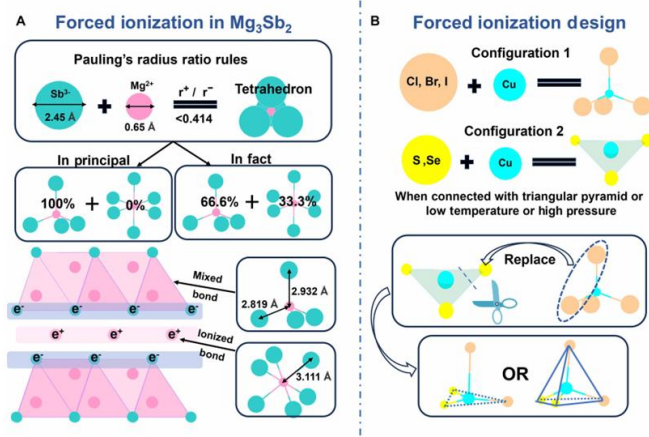
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-67013-y>

## 6、强迫键电离驱动设计的超低晶格热导率的柔性热电器件

热电材料在能量回收和热管理领域具有重要应用,尤其是在可穿戴设备和柔性电子产品中,如何优化其热导率 ( $\kappa_{\text{lat}}$ ) 成为提升其性能的关键因素。热电材料的热导率通常受到三大因素的影响: 散射、声速 ( $v_s$ ) 和非谐性

(anharmonicity)。为了降低热导率,提高热电效率,传统的策略通常通过纳米结构设计、缺陷引入或晶界工程来增加声子散射,优化热导率。然而,在高填充率和结构复杂的热电材料中,仅依赖外部调节并不能满足低热导率的需求。因此,研究如何从材料的内在结构出发,通过优化原子间的结合方式和晶体结构,来实现低热导率,成为材料设计的新方向。

近期,中国科学院福建物质结构研究所功能晶体与器件国家重点实验室罗敏研究员团队提出了一种创新的“强迫键离子化”(forced bond ionization)策略,通过设计结构中的配位环境冲突来有效降低材料的晶格热导率。该策略通过在铜 (Cu) 原子周围引入三配位和四配位的结构冲突,迫使 Cu—I 键部分离子化,成功设计出了  $\text{Cu}_5\text{TeS}_3\text{I}_3$  (CTSI) 这一新型复合材料,获得了  $0.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  的超低晶格热导率,这是迄今为止密集无机多晶材料中最低的值。具体来说,研究团队通过理论分析发现, Cu 原子在三配位和四配位结构中的竞争,不仅促进了键的离子化,还导致了材料中大量的声子散射和强烈的非谐性振动 (Grüneisen 参数  $\gamma = 2.76$ )。这些非谐性振动主要由 Cu 和 I 原子在伪四面体中的分布和振动模式主导,从而大大降低了热导率。此外,团队还通过晶体结构分析、传输电子显微镜 (TEM) 和热学测试等多种手段,进一步验证了这种结构设计的效果。CTSI 材料表现出明显的灵活性,单晶薄片在 300K 至 573K 的温度范围内展现出相对恒定的热导率,且电子导热性几乎可以忽略不计,进一步证实了其在热电应用中的潜力。与传统的材料设计方法相比,该研究提出的强迫键离子化策略为开发低热导率材料提供了新的设计思路,并成功将这一理论应用到实际材料的设计中,为柔性热电材料的开发开辟了新的道路。福建大学的研究团队在此项工作的领导下,创新性地突破了热导率设计的瓶颈,展现出新型热电材料的巨大应用前景。相关内容发表于《Science Advance》上。(张琰炯)

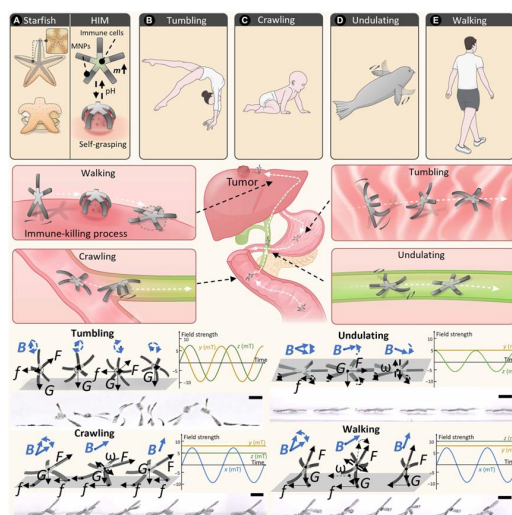


文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adz7487>

## 7、具有多模态运动能力的超柔水凝胶免疫微毫米机器人

再生生物学和免疫学领域的细胞治疗正在快速发展,包括干细胞疗法和免疫疗法,并已在多种退行性疾病和肿瘤的研究中展现出潜力。然而,治疗细胞难以有效迁移至肿瘤部位,显著限制了疗效,因此亟需一种能够安全、高效地实现细胞局部富集和精准递送的载体。近年来,无系绳软体微型机器人(USMRs)因其精密感知、灵活驱动和多任务执行能力而受到关注,可用于组织支架构建、生物传感、微创手术以及靶向细胞或药物递送等领域。但传统 USMR 在复杂体内微环境中存在运动方式单一、灵活性不足、难以兼顾体积、负载效率与可控性等问题。为克服这些局限,机器人材料的超柔特性至关重要。更柔软的结构能更好贴合组织表面,降低损伤、提高生物相容性,并能通过狭窄且动态变化的通道,实现高效、精准的细胞输运。同时,柔软度提升可使机器人更好贴合病灶,提高治疗细胞与病灶接触面积,从而增强免疫治疗效果。尽管磁驱软体机器人已有进展,但仍缺乏可编程多模态运动、适应柔软肿瘤组织力学特性、且兼容免疫细胞生存的系统,这些都是实现高效靶向细胞治疗的关键。

近日,香港城市大学董立新教授团队,为解决细胞治疗中靶向递送不足的问题,开发了一种基于水凝胶的免疫微毫米机器人,具有高效免疫细胞负载能力和精准肿瘤定位能力。该机器人由超柔软水凝胶构成,并嵌入磁性纳米颗粒,可实现步行、滚动、攀爬和波动等多种运动模式,从而在复杂生物环境中灵活导航,并适应不同肿瘤形态。机器人不仅对磁场有响应,还可对离子浓度和 pH 变化作出形变,实现推进、抓取及局部递送等功能。在体外实验中,该机器人在 4 天内成功清除三维肿瘤模型;在体内实验中,携带免疫细胞的机器人在 HepG2-luc 荷瘤小鼠中显著抑制了肿瘤生长,15 天内肿瘤体积明显下降。生物发光成像进一步证实了肿瘤部位的自然杀伤细胞活性增强。实验还表明,该机器人具有优良的生物相容性和可降解性,植入后未引发不良反应。综上,本研究展示了一种具有环境响应能力和多模态运动的超柔软免疫机器人系统,为提升免疫细胞递送效率、研究肿瘤—免疫细胞相互作用以及推动癌症治疗策略发展提供了新途径。相关工作发表在《Science Advances》上。(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adw9133>  
 (来源: 两江科技评论)