超材料前沿研究一周精选

2026 年 11 月 9 日-2026 年 11 月 15 日

索引：

1、可见光波段三维光子晶体的可控制备

2、基于尺度丰富网络的超材料

3、位错介导热输运的纳米尺度热成像

4、探测分子合成维度中的拓扑边界态

5、来自体镜振动的腔内光强光机学极限

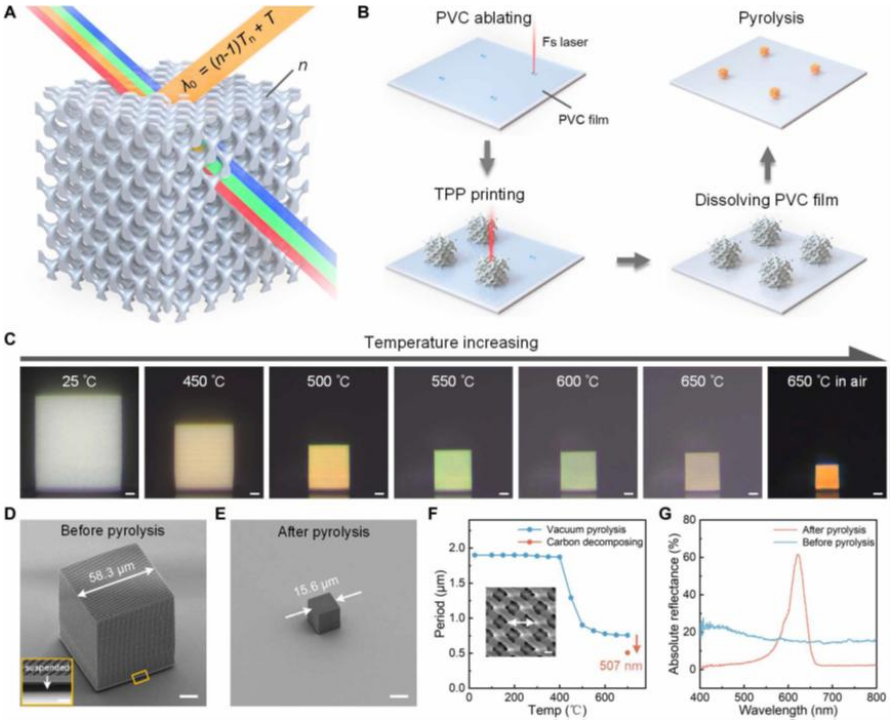
6、应变诱导 1T-TaS2 中的强关联金属相

1、可见光波段三维光子晶体的可控制备

光子晶体通过周期性折射率调制控制光的传播与光子态密度，在光通信、激光器、量子光学及结构色显示等领域具有广泛应用。相比一维和二维结构，三维光子晶体能够在不同空间方向上调控光传播，为复杂光子带隙设计提供更多自由度。尤其在可见光波段，三维光子晶体有望直接应用于成像、显示和传感等光学系统，但相应的亚波长晶格对加工精度与结构一致性提出了严苛要求。目前，胶体自组装和生物模板方法缺乏结构可编程性，逐层光刻易受到套刻误差和复杂工艺的限制，而双光子聚合三维打印虽然具有较高的几何自由度，却难以直接实现足够小的晶格周期。结合高温热解能够进一步缩小结构尺寸，但收缩过程中的应力与晶格畸变容易破坏光子带隙，导致光谱漂移与模式泄漏。因此，如何兼顾高加工精度、复杂三维结构制造能力与稳定光学响应，仍是可见光三维光子晶体制备面临的重要挑战。

近日，**华中科技大学熊伟教授团队**，提出了一种悬浮热解辅助双光子聚合（SP-TPP）打印策略。研究团队首先利用双光子聚合技术在牺牲层上打印三维金刚石晶格，随后移除牺牲层，并通过先真空、后空气的两步热解工艺实现结构近乎各向同性的均匀收缩，将晶格周期由 1900 nm 缩小至 507 nm，使光子带隙由红外波段转移至可见光波段。制备的三维光子晶体晶格周期标准差仅为 5.75 nm，约为非悬浮热解条件下的 1/45，在不同空间位置、入射方向和偏振条件下表现出高度一致的光学响应。通过调节晶格周期和结构填充比，研究团队进一步实现了覆盖多种可见光颜色的三维光子晶体，并展示了多色阵列、光子微腔、三维光波导及 1×4 光分束器等原型结构，为可见光微纳光子器件的定制化制造与三维光学集成提供了新的技术路径。（刘帅）

相关工作发表在《Science Advances》上。



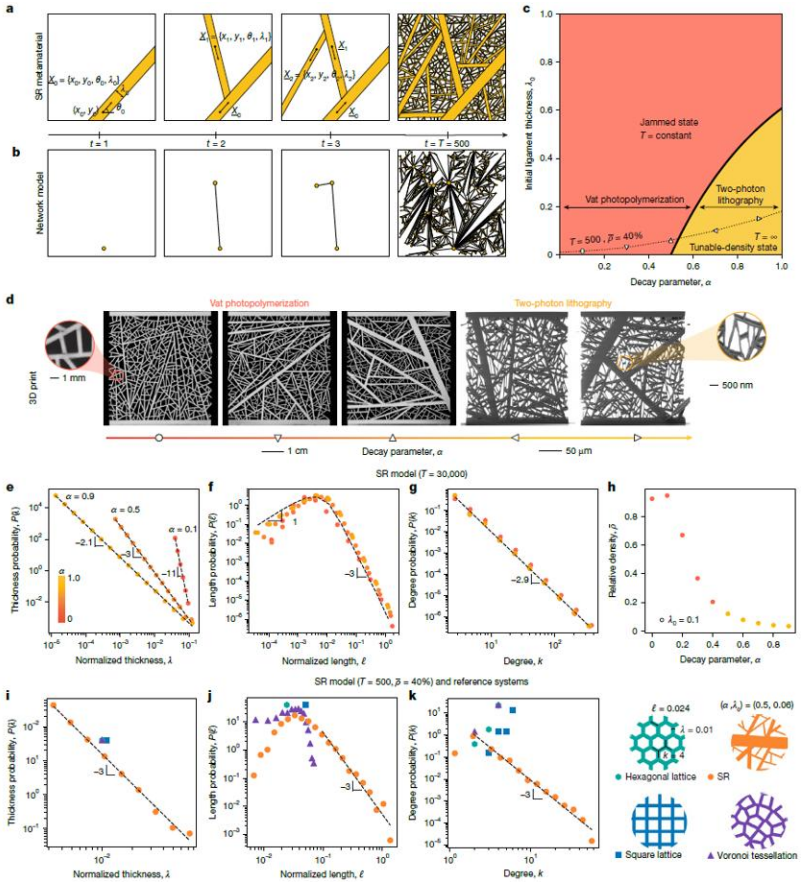
文章链接：https://doi.org/10.1126/sciadv.aej0287

2、基于尺度丰富网络的超材料

从本质上看，材料可以视为由结构单元及其相互作用构成的网络。传统晶体材料具有规则的原子排列，而机械超材料尽管结构形式多样，通常仍依赖单一或少数几个特征尺度，其连接关系、结构尺寸和相互作用表现出较高的均匀性。然而，自然界和现实世界中的复杂网络普遍具有显著的结构异质性。例如，神经网络、血管网络以及蛋白质相互作用网络的连接度、连接长度和相互作用强度往往跨越多个数量级，这种异质性赋予了系统较强的鲁棒性和适应能力。类似的尺度丰富特征也广泛存在于蜻蜓翅膀、植物叶脉、蜘蛛网和骨骼等生物结构中，并对其力学与输运性能发挥重要作用。近年来，网络科学的发展为理解复杂结构与材料力学性能之间的关系提供了新思路，但如何构建长度、厚度及连接度同时跨越多个数量级的人工超材料，并揭示结构异质性对宏观力学性能的影响，仍然是亟待解决的关键问题。

近日，**美国东北大学的 Albert-László Barabási 和麻省理工学院 Carlos M. Portela 团队**，针对上述挑战，研究团队提出了一种基于网络科学的机械超材料设计新范式，通过调控网络的连接关系、结构尺度及相互作用强度，构建具有高度结构异质性的尺度丰富（Scale-rich，SR）网络超材料。该材料突破了传统超材料对单一或少数特征尺度的依赖，使杆件长度、厚度及连接度能够在同一结构中跨越多个数量级。结合数值模拟与实验验证，研究团队发现，仅通过两个设计参数，即可实现跨越 190 倍调节范围的弹性各向异性，并赋予材料稳定且非局域化的非线性变形、高效能量吸收、动态载荷下增强的能量耗散以及可编程弹性波调控等特性。此外，研究团队建立了解析模型，揭示了杆件长度、厚度和连接度与材料总储能之间的关系，为多功能机械超材料的性能调控与逆向设计提供了新的理论框架。

相关工作发表在《Nature》上。（刘帅）



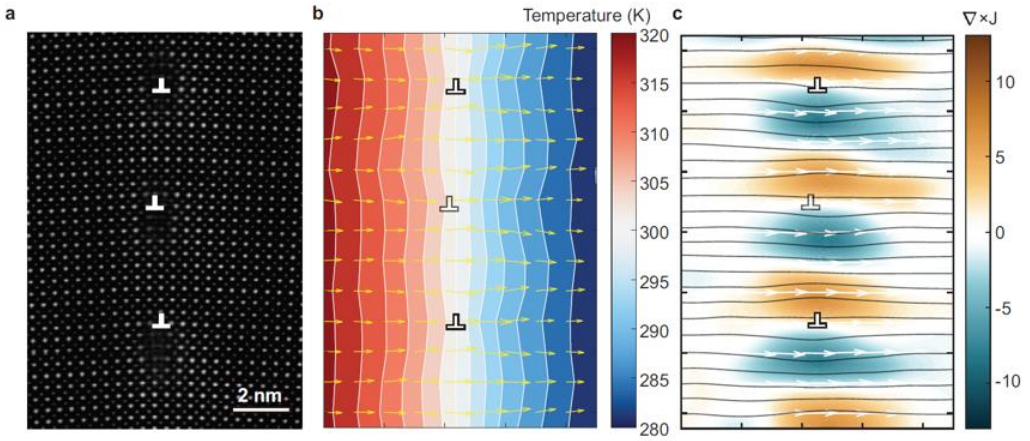
文章链接：https://doi.org/10.1038/s41586-026-11191-2

3、位错介导热输运的纳米尺度热成像

晶体缺陷工程是调控半导体和热电材料晶格热导率的重要策略，其中位错作为常见的线缺陷，能够通过局部晶格畸变和声子散射改变材料的热输运行为。传统理论通常将位错视为具有长程应变场的声子散射中心，通过引入散射强度和特征截断半径描述其对宏观热导率的影响。然而，位错的真实原子结构往往十分复杂，其核心区域可能发生局部键长变化、配位重构及振动模式改变，使热阻呈现高度非均匀的空间分布。现有时域或频域热反射技术主要测量微米尺度的平均热输运性质，难以直接区分单个位错核心与周围应变场的贡献；扫描热显微镜等表面敏感技术也难以解析材料内部的埋藏位错。因此，如何在纳米尺度直接测量位错附近的温度场，确定局部热阻的空间范围，并建立原子结构、声子振动与热输运之间的关联，是实现缺陷热输运定量设计的重要科学问题。

近日，**北京大学高鹏教授、杜进隆高级工程师及刘秉尧博士**组成的研究团队以 $SrTiO_3$ 中具有周期性位错阵列的 5° 小角度晶界为研究对象，结合原位扫描透射电子显微镜—电子能量损失谱测温、原子分辨成像、振动光谱及非平衡分子动力学模拟，实现了位错附近热输运行为的纳米尺度解析。实验测得位错阵列两侧存在约 38.38 K 的温度突变，利用块体参考热导率估算得到有效界面热导约 35.4 MW $m^{-2} K^{-1}$，对应约 339 nm 的 Kapitza 长度。进一步的二维温度成像揭示，热阻

并非沿晶界均匀分布，而是主要集中于位错核心：核心区域的热输运过渡长度约为 2.14 – 5.17 nm，而位错核心之间的区域则表现出约 8.34 – 11.57 nm 的较弱、较宽范围的热输运扰动。结合原子结构和振动谱分析，研究发现位错核心附近 Ti—O 键发生明显畸变，Ti 局部价态改变，P4 光学声子特征出现约 10 meV 蓝移，同时局部与块体声子态密度的重叠程度下降至 90%以下。这些结果表明，位错核心的原子重构形成了与周围晶格不同的局域振动环境，增强声子散射并产生显著的局域热阻。该研究实现了从原子结构到纳米温度场的关联表征，为理解位错散射机制及利用晶体缺陷精准调控热输运提供了新的实验依据。
相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）

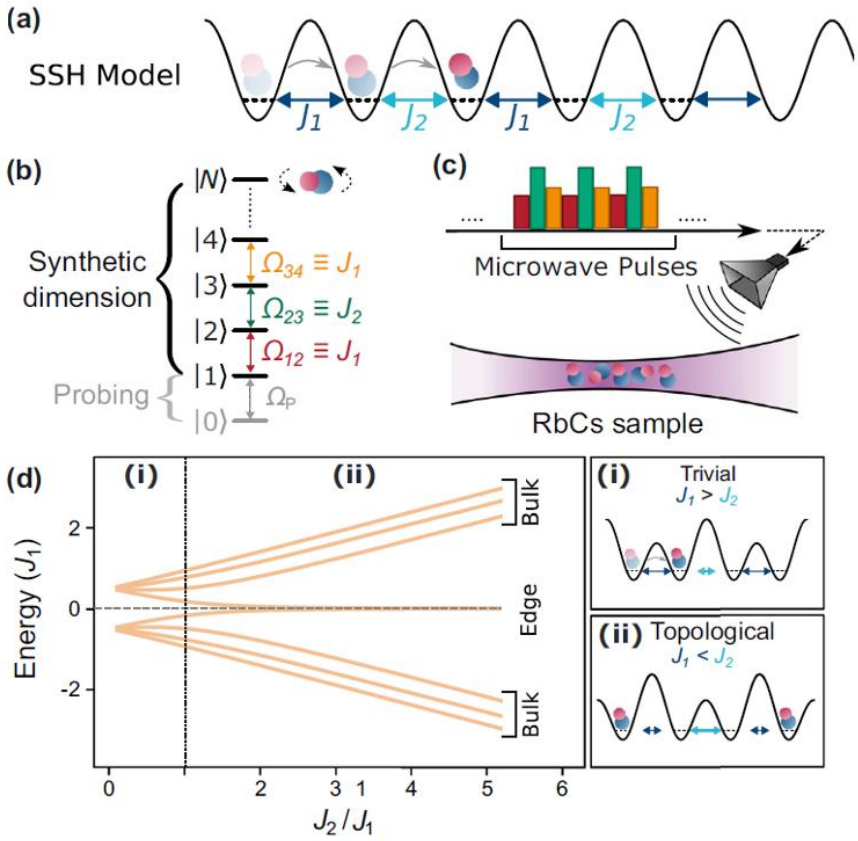


文章链接：https://doi.org/10.1002/adma.75575

4、探测分子合成维度中的拓扑边界态

合成维度通过将量子系统的内部自由度映射为空间晶格的不同格点，使研究者能够在不增加真实空间维数的情况下模拟更高维物理现象，并为探索拓扑物态、合成规范场及量子输运提供灵活平台。与依赖复杂光学晶格的传统方案相比，合成维度中的格点耦合强度、相位和几何结构可通过外部驱动场直接调节，内部态分辨读出也有助于实现逐点探测。超冷极性分子具有丰富且寿命较长的转动与超精细内部态，态间可由微波场相干耦合，同时具备可调偶极相互作用和较低的辐射损耗，因此适合构建合成晶格。然而，如何在分子体系中实现可控的合成维度，并直接观测其中的拓扑特征及动力学稳定性，仍有待实验验证。
近日，**英国杜伦大学的 Simon L. Cornish 教授、Adarsh P. Raghuram 博士研究团队**利用微波脉冲交替驱动相邻转动能级，将内部态间耦合映射为 SSH 链中交替变化的隧穿过程，实现了最多包含八个格点的合成晶格。通过辅助转动态开展光谱测量，并结合确定性态制备后的时间演化和逐格点读出，实验识别出平庸相与拓扑相之间的转变：进入拓扑相后，链两端出现局域边界态，其能量劈裂随链长增加呈指数下降。近魔术波长光阱将相干演化延长至约五百个隧穿周期，使微小边界态能量劈裂也可通过干涉动力学测量。扰动实验进一步表明，保持手征对称性的耦合不均匀不会显著破坏边界态，而非手征的局域能量偏移则会使其失去稳定性。研究还通过平均手征位移提取绕数，区分拓扑相与平庸相，并指出有限尺寸会使测量值偏离理想量子化结果。该工作验证了超冷极性分子构建合成维度、研究拓扑物理的可行性，并为拓展至二维晶格、环形几何以及真实空间与合成维度耦合的多体量子模拟提供实验基础。

该研究发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



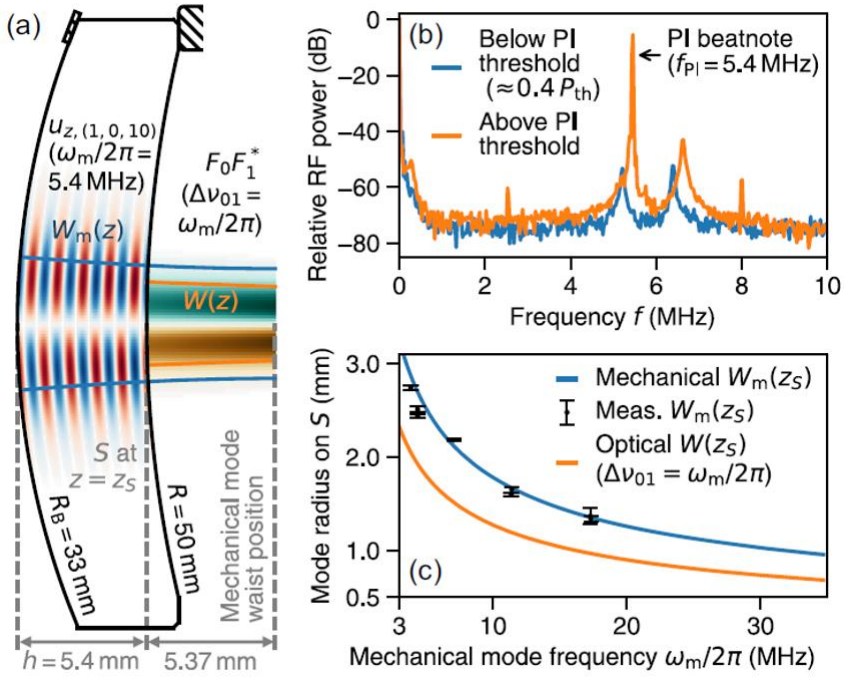
文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-026-79032-4

5、来自体镜振动的腔内光强光机学极限

高数值孔径光学谐振腔能够实现极高的连续波腔内光强，在电子显微镜、相干电子束操控以及分子光学偶极阱等领域具有重要应用价值。然而，随着腔内光强不断提高，除传统的热效应和材料吸收外，镜面机械振动也可能成为限制因素。其中，光机学参数不稳定性是重要的物理机制。当镜面机械振动频率与两个光学模式之间的频率差相匹配时，镜面振动会引起光学模式之间的能量散射，而不同光学模式产生的拍频又会通过辐射压力进一步激发机械振动，形成正反馈，最终限制腔内光功率。尽管这一现象已在引力波探测器等系统中得到研究，但其在高数值孔径桌面型光学谐振腔中的影响尚未得到充分认识。

近日，**美国加州大学伯克利分校的 L. Maisenbacher 博士研究团队**，通过搭建近共心 Fabry-Pérot 光学谐振腔，首次观测到由镜面体声学振动引起的三模参数不稳定性，并系统研究了其产生机制。研究发现，为降低光学像差而设计的镜面几何结构可能同时形成稳定的内部声学谐振腔，使 MHz 频段的体声学模式与光学模式发生耦合，从而引发参数不稳定性。通过测量机械模式的功率阈值、品质因数及空间振动分布，实验结果与理论预测取得了良好的一致性。进一步地，该研究采用机械品质因数较低的 Zerodur 镜面替代传统超低膨胀玻璃镜面，有效抑制了机械振动引起的不稳定性，最终在开放式自由空间谐振腔中实现了超过 500 GW/cm2 的腔内光强。该研究揭示了镜面体声学振动对高强度光学谐振腔的潜在限制，并为通过材料与结构设计突破腔内光强瓶颈提供了新的思路。

该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



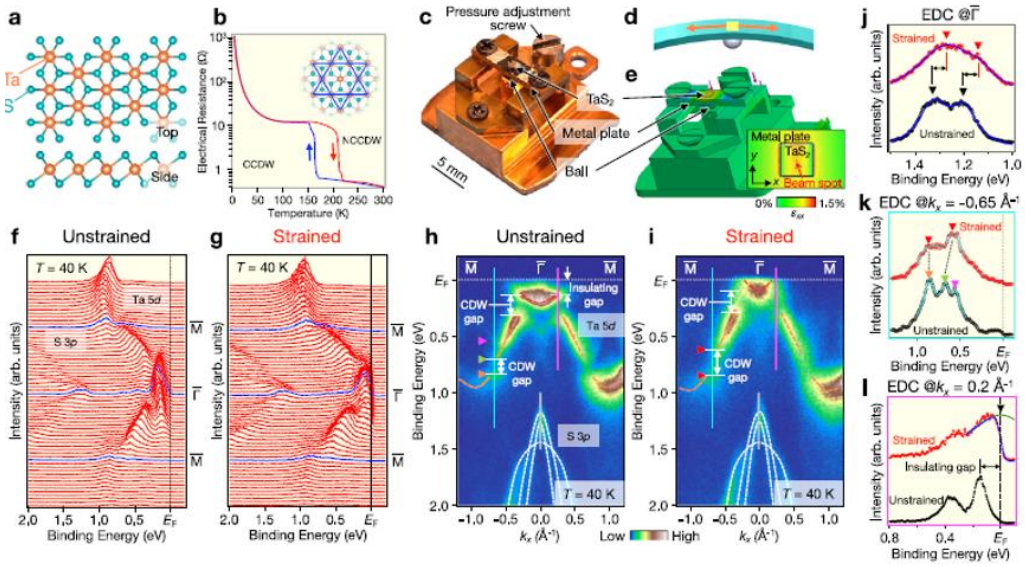
文章链接：https://doi.org/10.1103/y5kw-s33z

6、应变诱导 1T-TaS2 中的强关联金属相

层状过渡金属硫族化合物因其丰富的电荷密度波、强电子关联及低维量子态，成为研究结构与电子相互作用的重要材料体系。其中，1T-TaS_2 是典型的电荷密度波材料，在低温下形成由 13 个 Ta 原子组成的“大卫之星”周期性团簇，并表现出绝缘特性。长期以来，这一绝缘态被认为源于强电子关联引起的莫特局域化，但近年来的理论和实验研究表明，相邻层间的电子二聚化也可能打开能隙，形成能带绝缘态。这一争议说明，层间堆叠不仅影响晶体结构，还可能决定材料的电子基态。尽管高压、电场和光激发等手段能够诱导 1T-TaS_2 发生绝缘体—金属转变，但部分金属态依赖极端条件或非平衡激发，难以实现稳定、可逆的调控。因此，如何通过外部应变直接改变层间耦合，在保留面内电荷有序结构的同时实现电子相变，并揭示新金属态中的电子关联特征，是理解低维量子材料结构与电子自由度耦合的重要科学问题。

近日，日本东北大学 Kosuke Nakayama 助理教授、Takafumi Sato 教授团队将自主设计的单轴拉伸装置与微区角分辨光电子能谱相结合，并辅以第一性原理计算，研究了应变作用下 1T-TaS_2 的能带结构演化。实验发现，在约 1%的单轴应变作用下，材料低温绝缘态的费米能级附近能隙完全闭合，形成清晰的金属费米面；卸载应变后，绝缘态能够恢复，表明该转变具有可逆性。值得注意的是，金属相形成后，面内“大卫之星”电荷有序结构仍然保留，说明绝缘体—金属转变并非源于面内电荷密度波的破坏。结合不同堆叠构型的能带计算，研究人员提出，单轴应变可能使层间堆叠由具有二聚化特征的 AL 构型转变为 L 型构型，从而削弱层间二聚化并关闭绝缘能隙。进一步的能带分析发现，新形成的金属态具有显著的准粒子质量重整化，表明强电子关联仍在其中发挥重要作用。该研究揭示了层间堆叠重构与电子关联之间的紧密联系，为利用应变调控层状量子材料的电子基

态提供了新的实验途径。
研究成果发表在《Nature Communications》上，(张琰炯)。



文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-026-78883-1
（来源：两江科技评论）