中国科大提出纳米纤维桥接策略构筑新型仿生止血材料

本报讯 近日，中国科学技术大学俞书宏院士团队与中国科学院杭州医学研究所董良研究员合作，受鱼鳞与皮肤之间纤维连接结构的启发，提出一种“纳米纤维桥接”界面设计策略，研制出兼具高稳定性、高促凝活性和高应用安全性的高岭土-棉基仿生止血敷料（AKOC）。相关研究成果发表在《先进材料》上。

自然界中，鱼鳞通过大量胶原纤维与皮肤形成稳定连接。受此启发，研究团队对棉纤维表面进行纳米纤维化处理，随后利用高密度纳米纤维网络锚定高岭土纳米片（图）。这一仿生设计通过多点共价和非共价相互作用提高高岭土与棉纤维之间的界面结合，避免了连续聚合物包覆，使高岭土活性表面能够充分暴露，所制备材料可进一步加工为不同形态的棉基止血产品。此外，在面对高速血流等剪切作用时，纳米纤维桥接网络可通过形变和相对滑移促进应力传递与重新分配，降低局部应力集中，从而防止高岭土纳米片从纤维表面脱离。

研究结果表明，这一仿生结构设计实现了高岭土的高负载与稳定固定，并进一步提升了材料的应用安全性。AKOC中高岭土负载量达到15.3wt%，约为商业止血材料（Quik-clot）的3倍；在高速流体冲击后仍可保持约99%的高岭土负载，相比之下，商业Quik-clot的高岭土保留率不足22%。长期皮下植入实验表明，35天后AKOC周围的纤维包膜厚度仅为35.1±7.9 μm，而Quik-clot组达到112.5±22.4 μm，且AKOC组炎症反应明显消退，表明稳健固定高岭土可有效降低持续性组织刺激，提高材料的应用安全性。

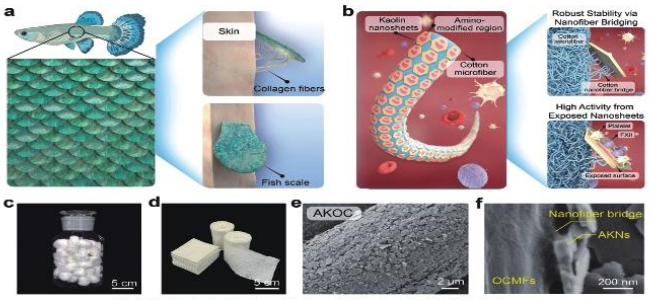


图. 胶原纤维连接启发的纳米纤维桥接仿生止血材料设计与结构表征

进一步的动物实验验证了该材料在不同出血场景下的止血效果。在六种不同类型的动物出血模型中，AKOC相较商业材料的止血效率均显著提升，提升幅度达35%–66%。例如，在兔股动脉出血模型中，该材料可在102±16s内实现止血，失血量仅为6.8±1.6g；相比商业Quik-clot，止血时间缩短约58%，失血量降低约55%。在血流量更大且更具挑战性的猪股动脉出血模型中，AKOC的止血时间和失血量分别为152±25s和16.0±3.9g，相比Quik-clot分别降低43%和53%，表明AKOC在严重动脉出血条件下具有稳定、高效的止血能力。

进一步地，研究团队实现了该材料的公斤级实验室制备，表明这一界面设计策略具有进一步放大的潜力。该研究通过模拟天然生物界面的纤维连接方式，在不牺牲活性表面的前提下实现功能纳米颗粒的稳定固定，为解决动态生理环境中功能组分的界面失稳问题提供了新的仿生设计思路，并为高效、安全止血材料的规模化制备和转化应用打下了坚实的基础。

中国科学技术大学王广振博士和上海市第六人民医院张尧博士为论文共同第一作者。中国科学技术大学俞书宏院士、陈家富教授和中国科学院杭州医学所董良研究员为论文共同通讯作者。（化学与材料科学学院 科研部）

中国科大通过空间编程打印实现仿生肌肉拮抗驱动与变形模态调控

本报讯 中国科学技术大学工程科学学院、人形机器人研究院李木军副教授联合张世武教授以及澳大利亚伍伦贡大学李卫华教授等，在液晶弹性体可编程制造与变形调控方面取得进展。研究团队提出一种旋转多材料打印策略，通过动态调控单根纤维内部两种活性材料的空间分布，实现多种形变模式，并将其拓展至网格、曲面及软体器件。这一方法为结构形态与功能的编程提供了新的途径，有望推动可变形材料、软体机器人和自适应结构的发展。相关研究成果发表在《先进材料》上。

液晶弹性体受热时能够产生可逆形变，是构建软体驱动器和可变形结构的重要材料。但现有打印方法的变形调控通常受打印路径、层间结构或固定界面的限制，难以在连续纤维中灵活实现多种变形。针对这一挑战，研究团队设计了可旋转双通道喷头，将受热收缩的向列相和受热伸长的近晶相液晶弹性体共同挤出、同步固化。两种活性材料的相反热应变在纤维内部产生失配，进而驱动结构变形。通过调节喷头角度、旋转速度和材料流量比例，研究人员可编程纤维内部的材料分布，在不改变纤维中心线打印路径的情况下实现伸长、收缩、弯曲、卷曲和螺旋变形。在相同条件下，双活性纤维的曲率约为主动—被动对照纤维的1.6倍；同步固化试样的界面剥离强度约为顺序固化试样的30倍。

研究团队进一步将纤维内部的空间编程拓展至不同尺度的可变形结构，并探索由形态变化产生实用功能的可能。研究人员通过设计纤维各区域的材料组成和排列方向，使局部变形按照预设方式协同：单根纤维受热后可显现字母，二维网格则可形成拱起、波浪和涟漪。进一步，团队将编程从网格拓展至连续薄膜，通过调控局部应变和弯曲方向，构建不同高斯曲率的曲面，并组合形成类似山峰与河谷的三维形貌。基于对变形方式的调控，研究人员进一步开发了多种功能器件：利用受热卷曲和阻燃涂层实现暂时的火焰遮挡；结合表面石墨烯导电网络，将结构变形转化为电信号，实现自感知；利用连续旋转编程获得的螺旋结构，实现对不同锥角物体的自适应抓取与释放。这些结果展示了该方法从局部材料设计到复杂形态与器件功能的可扩展性，为软体驱动与自适应操作提供了新的设计思路。

中国科学技术大学精密机械与精密仪器系博士生孙博熙、杜正超以及香港科技大学机械与航空航天工程系博士后孙宇轩为论文共同第一作者。李木军副教授、张世武教授为共同通讯作者。澳大利亚伍伦贡大学李卫华教授、西南科技大学臧红彬教授等为论文共同作者。（工程科学学院 人形机器人研究院 科研部）

中国科大利用人工智能加速新型冷冻保护剂研发

本报讯 近日，中国科学技术大学信息科学技术学院赵刚教授课题组在冷冻保护剂研发方面取得新进展。研究团队借助人工智能方法，从数万种化合物中快速锁定有潜力的候选分子，并在冰晶、细胞和组织三个层面完成实验验证，为低毒性、低用量的新型冷冻保存配方提供了可行方案。相关研究成果发表在《先进材料》上。

细胞、血液与组织样本的长期保存，离不开冷冻保护剂。但长期以来可选试剂屈指可数：红细胞保存主要用甘油，有核细胞多用二甲基亚砜（DMSO）。这类试剂浓度高时存在毒性，使用前后的添加与去除步骤繁琐，保护效果也并不总能令人满意。寻找更安全、更高效的替代分子，是低温生物医学领域长期未解的难题。难点在于分子结构与保护效果之间的关系难以凭经验判断，只能依靠大量试错实验逐一验证，耗时费力。

针对这一瓶颈，研究团队把已在语言处理领域成熟应用的预训练模型“迁移”到化学分子上：让模型读取分子的序列式表达，学会把结构特征与已有实验数据对应起来，再对候选化合物按潜力排序，优先挑选最值得做实验的一小部分。团队从7.5万余种化合物中分级选出十余个候选分子进入实测，大幅压缩了筛选规模。模型在已有实验数据上表现稳定，据此给出的排序成为确定实验优先级的依据。



图. 从细胞到组织：候选冷冻保护剂的多维度验证

实验结果显示，这批候选分子中已有多个分子表现出抑制冰晶长大的能力。在低甘油配方中加入筛选出的候选分子后，红细胞冻融回收率超过91%；在常规慢速冷冻体系中，加入该分子也将回收率由约95%提升至97%以上。在人脐带来源间充质干细胞的冻存实验中，配合优化后的基础配方，复温存活率达到93.6%。在大鼠腹主动脉的组织冻存模型中，加入候选分子后的血管力学性能与组织结构也更接近新鲜组织。

据介绍，这项工作把人工智能的分子筛选能力与低温保存的实验验证贯通起来，形成了一条可复用的新型保护剂研发路径，有望减少细胞治疗、输血医学和组织样本库对传统高浓度保护剂的依赖，并为后续面向临床与转化场景的配方优化提供基础。

中国科大信息科学技术学院博士研究生李斯彩、石玲玉为论文共同第一作者，赵刚教授为通讯作者。（信息科学技术学院 科研部）

中国科大仿生设计新策略 让仿珍珠层材料强韧不再“挑方向”

本报讯 近日，中国科学技术大学高怀岭教授、孙晓昊教授与上海交通大学邹多宏教授等合作，在仿珍珠层复合材料多向强韧化设计方面取得进展。研究团队提出同心砖泥结构（CBM）设计策略，通过重组微片的排列方式，改善材料在压缩、弯曲和扭转条件下的力学表现，并显著提升抗疲劳性能。相关成果发表在《国家科学评论》上。

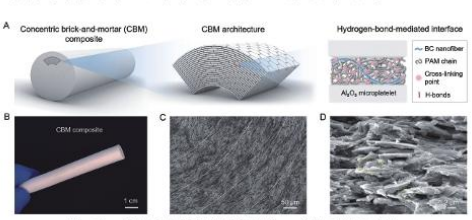


图. 同心砖泥复合材料的结构设计、实物及微观形貌

天然珍珠层由坚硬的矿物微片与柔软的有机相交错排列，形成兼具强度与韧性的“砖泥”结构。然而，传统平板砖泥结构（PBM）具有明显的力学方向依赖性，方向一致的层间界面容易成为损伤扩展的通道，限制了材料在复杂、多向载荷条件下的可靠性。

针对这一问题，研究团队通过自组装成膜、薄膜卷绕及前驱液灌注与原位聚合，构筑了同心砖泥结构复合材料。该设计将氧化铝微片组织为围绕轴心排列的同心层状结构，使得层间的薄弱方向不再统一指向一处，而是绕轴心呈轴对称散开，不再形成贯穿整个材料的弱面，为改善棒状材料在多种加载方式下的力学响应提供了新的思路。

研究团队以组成和密度接近的平板砖泥复合材料作为对照，系统开展力学测试。结果表明，在所测试的压缩、弯曲和扭转载荷下，同心结构均表现出更高的强度和耗能能力。断口形貌观察发现，同心结构中的裂纹沿轴向、径向及环向曲折扩展，与平板对照中较为集中的层间分层和阶梯状断裂形成对比。

有限元模拟进一步显示，同心排列有助于改善载荷传递、分散应力并减轻局部应力集中，与实验观察相互印证，为理解结构重组带来的力学性能提升提供了依据。

在循环弯曲测试中，同心结构展现出突出的抗疲劳优势。在所比较的相同最大应力条件下，其疲劳寿命超过平板对照的1000倍；按各自静态弯曲强度归一化后，在相应比较区间仍具有超过100倍的寿命优势。循环力学响应与三维X射线显微成像结果共同提示，同心结构有助于延缓不可逆损伤累积，抑制局部损伤连接成连续破坏通道的趋势。

研究团队还将材料加工成传动轴原型和精密机械结构件，展示了其加工与工程应用潜力。总之，该研究通过空间重组层间薄弱方向，为面向多向载荷服役环境且兼顾承载能力、耗能与抗疲劳性能的仿生结构材料提供了新的设计思路。

论文第一完成单位为中国科学技术大学，曾庆胜、苏佳昊、张诗屿为共同第一作者，高怀岭、孙晓昊、邹多宏为共同通讯作者。

（工程科学学院 科研部）

中国科大利用针尖增强拉曼光谱揭示 表面吸附CO_2分子费米共振的同位素调控机制

本报讯 近日，中国科学技术大学单分子科学团队的董振超研究小组利用低温超高真空扫描隧道显微镜结合针尖增强拉曼光谱（TERS）技术，对表面吸附的二氧化碳（CO_2）团簇中的费米共振效应开展了研究，并利用同位素取代揭示了分子非简谐振动与振动态耦合的物理机制。相关研究成果发表在《美国化学会志》上。

研究团队近年来持续发展STM与TERS联用的超高空间分辨单分子拉曼成像技术，于2013年和2019年分别实现了亚纳米尺度的单分子拉曼成像。进而，研究团队将发展多年的低温超高真空TERS技术用于CO_2费米共振研究。金属针尖与样品之间形成的等离激元纳腔能够显著增强拉曼信号；更为重要的是，纳腔内高度不均匀的近场还可放宽常规拉曼选择定则，为探测通常难以观测的振动模式提供了可能。在本工作中，研究团队以吸附于金表面酞菁钴分子层（CoPc/Au（111））上的CO_2团簇为研究对象，借助超高真空环境来制备清晰干净的样品，并通过约7 K的液氦低温条件来抑制CO_2团簇的热运动，在对CO_2团簇进行STM形貌表征和定位的基础上，对$C^{16}O_2$和$C^{18}O_2$两种二氧化碳同位素体开展了系统的TERS测量和分析。

实验清晰分辨了两种二氧化碳同位素体的费米共振双峰（ν_+、ν_-），并直接探测到常规拉曼禁阻的弯曲振动基频ν_2，为定量分析费米共振提供了频域上的关键约束。在简化二能级耦合模型中，未耦合的弯曲振动倍频被取为基频的两倍，体系由ν_1与$2\nu_2$通过费米耦合强度g构成的2×2哈密顿量描述。由此，仅需实验测得的ν_+以及费米双峰位置（ν_+、ν_-），即可在频域内直接确定未耦合对称伸缩频率ν_1、能级失谐$\Delta=\nu_1-2\nu_2$、耦合强度g，以及表征振动态杂化的混合角θ，而不必依赖容易受极化率、干涉和环境扰动影响的强度分析。分析表明，氧同位素取代使ν_1的红移显著大于$2\nu_2$，Δ由$C^{16}O_2$的正值（ν_1高于$2\nu_2$）变为$C^{18}O_2$的负值（能级次序反转），混合角随之增大，两种振动成分在费米共振混合态中的权重随之对调。双峰强度则另行用于讨论两条拉曼跃迁路径之间的量子干涉：弯曲振动倍频对拉曼跃迁的贡献不可忽略，相长干涉增强高频支，相消干涉削弱低频支；由于两种同位素的混合情况不同，干涉在$C^{16}O_2$中进一步扩大双峰强度差异，而在$C^{18}O_2$中使两峰趋于接近。

研究团队进一步将弯曲振动倍频的对角非简谐频移纳入能级分析，这类修正是用以区分立方费米耦合（非对角项）和倍频相对$2\nu_2$的固有非简谐位移（对角项），从而可以更准确地重建未耦合ν_1与“$2\nu_2$”的本征能量及相对次序。修正并不改变同位素取代导致失谐变号、能级次序反转这一核心图像，说明该结论并不依赖于简化模型中“倍频恰为$2\nu_2$”的假设。简化二能级模型已足以描述同位素调控的振动态杂化与干涉，计入非简谐频移后则把未耦合能级的定量位置放得更稳，并为澄清ν_1与“$2\nu_2$”能级排列的长期认识分歧提供了更可靠的定量依据。

这项研究展示了低温超高真空TERS在探测表面吸附分子非简谐振动及振动态耦合方面的潜力。通过直接获取常规拉曼光谱中难以观测的振动模式，并结合振动能级模型提取费米共振参数，该方法为研+究同位素效应、局域吸附环境与分子振动性质之间的联系提供了新的实验途径。

中国科学技术大学博士生张之婧和厦门大学博士生贾文成为论文共同第一作者。中国科学技术大学张超副研究员、张光教授和董振超教授是文章的共同通讯作者。（合肥微尺度物质科学国家研究中心 科研部）