

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

D13-水凝胶材料

D13-Hydrogel Materials

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D13. 水凝胶材料

分会主席：冯传良、吴子良、付俊、刘吉、陈强

报告

D13-I01

兼具高机械强度与室温可再加工性的聚合物材料

武培怡^{1*}

1. 东华大学

可持续再加工是实现塑料循环再生和回收利用的最有效途径之一，但低能耗再加工特性与高机械鲁棒性间的本征矛盾仍是制约发展的关键瓶颈。一般而言，强链间/内相互作用有助于材料机械性能的提升，但反过来则增加了再加工的难度，往往需要引入高温。因此，构筑兼具优异力学性能和室温可再加工性的聚合物材料仍然存在着较大的挑战。

本论文提出了一种基于水诱导聚合物材料相分离结构演变行为，利用不同水合状态将材料的机械性能与再加工特性进行解耦，开发了兼具优异机械性能与室温可任意加工特性的可持续塑料。具体而言，在低水合态下(例如在空气中吸湿平衡后)，材料呈现“海-岛”相分离结构，处于玻璃态，可作为高强度和高模量的塑料使用。在完全水合状态下(例如在水中浸泡达到平衡后)，水分子诱导“海-岛”结构向双连续相分离结构转变，使塑料转化为粘弹性面团状水凝胶，可方便地进行任意塑形，在空气中干燥后可再次形成玻璃态塑料，从而实现了材料的室温便捷再加工和重塑性。与此同时，基于面团的可拉伸性，通过拉伸成型工艺将使塑料机械性能进一步提高，断裂应力高达 211.2 MPa、杨氏模量高达 5.6 GPa。本工作为高性能可持续塑料的设计和开发提供了有益借鉴。

关键词：水塑性塑料；高强度；相分离；水凝胶；面团

D13-I02

仿生水凝胶促进组织原位再生

边黎明^{1*}

华南理工大学

纳米复合水凝胶由嵌入纳米颗粒的聚合物基质组成，其为水凝胶提供独特的生物活性和机械性质。通过原位沉淀在聚合物基质中掺入 NP 进一步增强了这些所需的水凝胶性质。然而，这种原位沉淀策略通常所需的非细胞相容性 pH，高摩尔渗透压浓度和长成胶时间持续时间限制了在所得水凝胶中进行细胞封装。双磷酸盐 (BP) 表现出多种特定的生物活性和对多价阳离子如镁离子 (Mg^{2+}) 的优异结合亲和力。在本文中，我们描述了通过双磷酸盐- Mg^{2+} 配位驱动的自组装制备纳米复合水凝胶。在混合带有 BPs，BP 单体 (Ac-BP) 和 Mg^{2+} 的聚合物溶液时，这种有效和动态的配位导致 Ac-BP-Mg NPs 的快速自组装，其作为多价交联剂在生理上稳定所得的水凝胶结构。与通过混合预制的 NP 制备的水凝胶相比，所获得的纳米复合水凝胶具有自我修复性并表现出改善的机械性能。重要的是，我们的水凝胶允许细胞封装和随后的注射，而不会影响细胞的活力。此外所得纳米复合水凝胶可以响应破骨细胞产生的酸性微环境释放抑制成熟破骨细胞的双磷酸盐，实现对破骨细胞活动的负反馈调控，从而有效促进骨损伤的原位再生。

关键词：生物材料，组织工程，水凝胶

D13-I03

3D 打印功能软材料和柔性器件

刘吉^{1*}

1. 南方科技大学

3D 打印以其优异的制造精度、灵活度和可设计性，广泛应用于工业、建筑、医疗、航天、工艺品制作、机械制造等行业领域。近年来，随着生物医疗、电子技术和人工智能等技术的发展，3D 打印与这些新兴领域的结合也带来了新的契机。本次报告将涉及功能性墨水的开发、复杂三维结构的设计与打印、以及功能器件的设计与制造等。

D13-I04

手性超分子水凝胶生物材料

冯传良^{1*}

1. 上海交通大学

秉承生命体中手性分子有序组装、再现自然手性结构精细构型、发掘手性结构的生命意义，是揭秘手性科学和手性信息的必由之路，也是材料科学和生物医学发展面临的空前挑战。超分子组装是仿生生命体手性结构最有效的方法之一，然而传统两亲性超分子体系由于非平衡的亲疏水作用导致长程无序聚集，难以实现从分子手性到材料结构手性的跨尺度可控传递，无法支撑构建宏观有序的手性超分子体系，在传承和仿生生命体多层级手性结构和生物性能方面还存在巨大差距，严重阻碍了对生命体手性精细构型的探索和解析，也制约了高性能结构化人工生物材料的设计和应用。针对上述难题，提出了“对称手性传递”的超分子设计新思想，发展了全新的“中心对称”手性超分子骨架体系，实现了超分子组装过程中的亲疏水平衡和手性信息的多层级、跨尺度精准有序传递，创制出系列高效仿生生命物质手性结构的水凝胶生物材料，突破了人工生物材料无法再现生命体精细手性构型的瓶颈，为仿生手性结构构筑提供了新原理和新方法。首次发现了人工手性结构调控细胞命运的现象，揭示了细胞的粘附增殖和干细胞的定向分化对手性结构具有高度选择性，这一新发现为探索与手性结构相关再生组织工程、干细胞治疗提供了理论与实践基础，为新型高性能生物医用材料研究提供了新范式。

D13-I05

Micro-nano Wound Healing Engineering

Jianliang Shen^{1*}

1. Wenzhou Medical University

Organic-inorganic hybrid biomaterials can combine the advantages of both, or make up for the shortcomings of both, and will be more safely and effectively used in biomedicine. A series of barriers compromise bacteria therapeutic effects including poor drug solubility, stability, biocompatibility, bioavailability and pharmacokinetics, distribution to normal tissues, hemorheological flow limitations and multidrug resistance (MDR). Herein, hybrid nanomaterials hold great promises for tremendous potential applications. In bacteria diagnosis and therapy, combinations of unique physical and chemical characteristics of two or more classes of materials were used to create versatile new categories of nanomaterials for theranostics. Such hybrid nanomaterials expand the functionality of single-component systems by operating synergistically to kill target disease tissues and cells. We believe that this class of hybrid nanotechnology could provide new opportunities for the clinical therapy and management of various diseases.

D13-I06

基于软离子导体的类脑计算器件

肖凯^{1*}

1. 南方科技大学

智能生命的语言是“离子”，而人工智能的语言是“电子”。如何调控离子的精确输运行为进而构筑离子基类脑智能器件，最终实现生物智能和人工智能的无障碍沟通是我们未来面向脑-机混合智能的一个重要挑

战。“神经仿生材料与器件”课题组围绕“离子基类脑智能”这一主题开展化学、材料、信息、生物等多学科交叉研究。通过仿生的手段构筑并调控材料/器件的结构和界面，探究可控离子-电子传输和耦合机制；构筑以“离子”为语言的电脉冲类脑计算硬件，搭载新型神经计算软件，实现了低能耗、高通量的感-存-算一体化功能；最后，验证了以“离子”为语言的类脑计算器件用于生物信号/信息调控和“人工智能-生物智能”无障碍沟通。

D13-I07

水凝胶层级有序结构对离子传输的影响及能源转换利用

雷周玥^{1*}

1. 东华大学

水凝胶多级结构有利于精准调控离子传输行为，显著影响水凝胶电解质的能量转换效率。层级有序的纳米通道排布和化学基团协同作用能显著提升离子迁移速率、选择性及界面稳定性，是高性能能源器件的创新方向之一。例如，逐层旋转的螺旋通道通过几何约束调控阴/阳离子迁移路径差异，而取向排列的纳米通道依赖拓扑有序性加速离子定向传输，两类策略分别针对离子筛分与快速迁移需求，展现了水凝胶多级结构在能源转换领域的普适性设计逻辑。

在锌离子电池中，仿生螺旋通道水凝胶（HTHE）通过纤维素纳米纤维（CNF）的 36°逐层旋转堆叠，形成选择性捕获阴离子（ ClO_4^- ）的限域空间，使 Zn^{2+} 转移数提升至 0.9，同时水平取向的羧基（-COOH）引导 Zn^{2+} 沿（002）晶面均匀沉积，结合氢键网络降低去溶剂化能垒，显著抑制枝晶生长和副反应，实现 2.61 V 宽电压下近万次循环的稳定性。而在离子热电池中，模仿肌肉纤维的取向结构通过定向拉伸构建分级排列的纳米通道，使离子电导率提升 5 倍，并通过增强链间氢键设计将疲劳阈值提升至 2500 J m^{-2} ，适应人体动态变形需求。

上述研究表明，水凝胶多级结构的核心优势在于通过空间排布与化学微环境的协同，能有效打破离子传输的固有瓶颈：螺旋通道的几何筛分效应与取向通道的加速效应分别适用于静态储能与动态传感场景，而各向异性力学增强策略可同步提升器件力学稳定性。这类多级结构的加工设计为可穿戴能源器件等前沿领域提供了共性技术支撑，推动水凝胶从单一功能材料向“结构-功能-应用”深度耦合的智能系统跨越。

D13-I08

定向溶剂蒸发诱导聚合物链排列与人工肌肉设计

于游^{1*}

1. 西北大学化学与材料科学学院

仿生材料具有广泛的应用潜力，但如何通过简单通用的方法制备具有各向异性特性的肌肉仿生高性能蛋白材料仍面临重大挑战。本研究提出了一种基于定向气流驱动蛋白质定向排列的通用策略，成功开发出可打印的肌肉仿生各向异性蛋白材料。通过在水凝胶干燥过程中施加定向气流并结合快速光化学交联，实现了蛋白质分子沿单一方向的高效排列。与天然肌肉类似，这些材料可通过机械训练进一步增强力学性能，最终在 600%应变下实现约 8 MPa 的机械强度，各向异性因子达 3.0。该制备工艺兼容常规打印技术，能构建具有可控各向异性和可定制力学性能的复杂结构。值得注意的是，这些各向异性蛋白材料在复杂生理条件下展现出仿生快速驱动（约 6 秒）和自适应特性。进一步展示了其作为人工抓取器和血管扩张器的应用潜力。这些器件可保持数月稳定性，不过在治疗后经酶处理可于数小时内快速降解。这种定向气流驱动方法及其产生的高性能蛋白材料，为从医疗器械到自适应仿生技术等广泛领域提供了新的可能性。

D13-I09

纳米纤维复合凝胶中的拓扑调控和强韧机理

徐立之^{1*}

1. 香港大学

三维微纳纤维网络是天然生物组织中重要的结构单元。它提供了优异的结构柔性、机械强韧性、物质传输通道和保水特性，为生理活动提供重要支持。由此启发，我们开发了基于芳纶的自组装纳米纤维网络材料，以人工合成方法模仿天然软组织的结构和性能。通过对纤维间相互作用和网络拓扑结构的调控，可在不改变固含量的条件下实现对于材料宏观力学行为的大范围调整，以针对不同应用需求。该凝胶材料可制造成柔性生物集成器件，为组织修复、神经界面、可穿戴电子等应用提供关键功能。

D13-I10

基于胶体晶体的结构色粘结剂及其粘附性能可视化监测

张连斌^{1*}

1. 华中科技大学

粘结剂是通过界面的粘附和自身的内聚等作用使两种材料连接在一起的物质，并同时承受这些材料在使用过程中所承受的应力。粘结剂有着悠久的历史，从早期的天然材料到近代的合成高分子。在粘结剂的长期使用过程中，由环境因素（水、氧、热、光和应力等）引起的粘附性能下降在所难免，由此产生的粘附失效可能会造成严重的后果。因此，对粘结剂的粘附状态的实时监测是保障其安全使用的关键。在本工作中，我们发展了基于机械力响应性光子晶体复合物的智能结构色粘结剂（Structurally-colored adhesives），将粘结剂使用、服役过程中的形变过程和结构色传感技术相结合，实现了粘附性能的实时监测和粘附失效的早期预警。

D13-I11

动态交联发光高分子凝胶

路伟^{1*}

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

智能荧光高分子凝胶是材料化学的前沿研究领域之一，在智能显示、变色伪装、仿生驱动等方面具有潜在应用价值。荧光性能（颜色、强度等）的动态精准调控是其功能发挥和应用拓展的关键，但依然存在很多困难。然而，自然界中发光水母可通过 Ca^{2+} 可逆配位等实现绿色荧光蛋白发光强度在有无之间的动态精准调控；在颜色调控方面，发光章鱼进化出多层色素细胞有序排列多层结构，可通过不同层色素细胞的差异化响应呈现出丰富多彩的皮肤颜色。受此启发，近年来聚焦荧光高分子凝胶研究，取得如下成果：(1) 仿水母荧光蛋白的发光强度调控原理，提出了构筑动态交联荧光高分子凝胶的仿生新思路，获得了一系列发光性能动态可调的荧光高分子水凝胶新材料；(2) 仿发光章鱼皮肤多层结构，发展了多层动态交联网络的仿生新结构，实现三原色荧光团的多层独立分布及其荧光强度的正交调控，获得了宽范围荧光变色高分子凝胶。本次报告将具体汇报以上成果。

D13-I12

Self-Regulating Hydrogel with Reversible Superhelix to Single Helix Chirality Inversion in its Gel-to-Gel Transformation

Jingjing Li^{1*}

1. Henan University of Technology

Hierarchical superhelical architectures and dynamic chirality inversion are central to nature's adaptability and functionality yet replicating these features in synthetic systems remains a significant challenge. Previously, we developed a chemical reaction network for the creation of programmable transient supramolecular chiral G-quadruplex hydrogels.¹ Later, we demonstrate the use of chemical fuels for regulating self-assembly pathway, which thereby controls the supramolecular chirality of assembly in non-equilibrium systems.² Herein, we present a supramolecular gel system that achieves autonomous gel-to-gel transformations and reversible chirality

inversion between superhelix and single-helix configurations, all without passing through a sol phase.³ This behavior fundamentally differs from traditional gel-sol-gel systems, which require disassembly to achieve chirality inversion. This system mimics collagen-like hierarchical organization and dynamic chirality adaptation, bridges the gap between static hierarchical assemblies and truly dynamic systems, paving the way for the design of functional soft matter with biomimetic adaptability.

References

- [1] J. Li, C.-S. Liu, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202114471.
- [2] J. Li, C.-S. Liu, et al., *Nat. Commun.* 2023, 14, 5030.
- [3] J. Li, C.-S. Liu, E. W. Meijer, et al., *J. Am. Chem. Soc.* 2025, 147, 17361–17371.

D13-I13

水凝胶润滑涂层的表面可控制造与鲁棒性超润滑行为实现

麻拴红^{1*}

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

人口老龄化对高端医疗器械装备和医用防护材料提出了迫切需求。其间，高效的表面减摩润滑技术是提高植介入器械手术操控精准度、缓解病人痛苦、延长受损组织和器械装备使用寿命的关键途径。近年来，水凝胶润滑材料受到了医疗器械领域的广泛关注，如何实现水凝胶润滑材料在器械表面的可控制造是制约其工程应用的关键难题。随着医疗器械结构的复杂性以及多功能需求日益增加，传统的光、热水凝胶涂层化方法由于可控性较差，已经无法满足市场技术需求。本研究团队自 2016 年以来，长期致力于水凝胶涂层可控制备-方法学探索，发明了铁催化引发自由基聚合方法（SCIRP），解决了通用型工程材料表面可控生长水凝胶润滑涂层的科学难点；发明了紫外辅助-铁表面催化引发自由基聚合方法学（UV-SCIRP），解决了在几乎所有通用材料和医疗器械外表面可控生长水凝胶亲水润滑改性的科学难点；发明了流动辅助连续氧化还原-铁表面催化引发自由基聚合方法学，解决了长窄径非透明医疗器械导管内腔表面亲水润滑改性的科学难点；发明了水合屏蔽加速氧化还原-表面催化引发自由基聚合方法学（HS-A-RP），解决了在通用基材和器械表面可控制造两亲性聚合物水润滑涂层的科学难点。SCIRP 方法学已经被领域内广泛应用。同时，研究团队还致力于高承载-超润滑-长效抗磨损水凝胶润滑材料（涂层）的研制，提出了“强水化+力学梯度”耦合的润滑材料设计理念，发展了具有优异抗溶胀特性的水凝胶润滑材料，突破了宏观粗糙接触工况下的超高承载（11.32 MPa）、超低摩擦（CoF: ~0.003）和长效抗磨损（100,000 cycles）的统一，以及苛刻盐离子环境中长效（460 天）稳定超润滑。

参考文献

- [1] *Advanced Materials*, 2018, 30(50), DOI:10.1002/adma.201803371.
- [2] *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(39), DOI:10.1002/anie.202209741.
- [3] *Advanced Materials*, 2022, 34(11), DOI:10.1002/adma.202108889.
- [4] *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, DOI:10.1002/anie.202424129e202424129
- [5] *Nature Communications*, 2025, 16(398), DOI:10.1038/s41467-024-55715-8.

D13-I14

植酸基离子导电水凝胶传感器

王荣^{1*}

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

柔性可穿戴压力传感器在健康监测与智能医疗领域应用广泛，但传统传感器因均质材料结构限制，难以兼顾高灵敏度和宽压力范围。梯度离子导电水凝胶提供了潜在解决方案，但构建梯度结构仍面临挑战。本研究发现植酸(PA)与不同聚合物之间的相互作用存在显著差异:PA通过增塑作用提高聚丙烯酰胺(PAM)分子链的活动性，降低 PAM/PA 水凝胶模量；另一方面，PA 促进聚丙烯酸(PAA)微相分离，显著提升

PAA/PA 水凝胶的力学性能。基于此机理, 构建了一体化梯度模量离子导电水凝胶压力传感器, 具有高灵敏度 (9.00 kPa^{-1} , $<15 \text{ kPa}$) 和宽压力检测范围 ($3.7 \text{ Pa} \sim 1200 \text{ kPa}$)。其中, PAM/PA 区域提供低压检测能力, PAA/PA 区域增强高压响应性。传感器可灵敏响应不同频率和振幅的声波, 感知低至 0.2 m/s 的气流及脉搏、肌肉振动等信号, 表现出优异响应能力。将传感器组装为无线足底传感阵列, 可检测足底压力分布并提供连续稳定响应。基于 PA 诱导作用的模量梯度离子导电水凝胶在高灵敏、宽范围压力传感器中展现出广阔应用前景。

D13-I15

粘弹性凝胶颗粒的制备及其在三次采油领域的应用

吴锦荣^{1*}, 袁朝阳¹, 徐琼筠¹, 时予¹, 郑静¹

1. 四川大学

水凝胶颗粒作为驱油剂已被用于提高石油采收率。然而, 我国油田经过三次采油后形成严重非均质和高温高盐等地质特性, 常见水凝胶颗粒已不能有效提高石油采收率。为此, 我们原创地设计了兼具支化和交联结构的粘弹性凝胶颗粒驱油剂 (B-PPG), 发现交联网络可以显著提高 B-PPG 的耐温抗盐效果; 同时, 支化链不仅可以增大 B-PPG 的流体力学体积和悬浮液粘度, 使其具有优异的悬浮性能和运移能力, 而且可以形成瞬态缠结网络, 与共价交联网络的协同作用使得 B-PPG 既韧又强, 可承受油藏多孔介质中孔吼的反复剪切。在成功揭示 B-PPG 具有交替调驱和液流转向的渗流机理的基础上, 我们还发明了“助引发—交联剂一体化”技术, 有效地调控 B-PPG 中支化链和交联网络的比例, 成功破解了该分子结构难于采用通用自由基水溶液聚合制备的难题, 建成了年产 1.5 万吨 B-PPG 的工业化生产装置, 已累计生产 3.9 万吨。在胜利孤岛油田、孤东油田等多个区块开展了 B-PPG 先导试验和推广应用, 采收率高达 63.6%, 突破了同类油藏采收率的极限。该驱油技术被列入中国石化示范工程项目。

D13-I16

快速止血水凝胶材料

郭保林^{1*}

1. 西安交通大学

不可控的出血导致了超过 30% 的创伤死亡, 其中超过一半是发生在紧急护理到来之前。虽然目前常用的止血剂在肢体表面创伤止血方面表现出优秀的性能, 但它们通常对深度不可按压创伤出血的止血效果较差。我们提出物理膨胀止血和激活人体凝血系统的双重止血策略, 并制备了基于壳聚糖衍生物的可注射形状记忆纳米复合多孔晶胶止血材料, 实现了对不可压迫性出血的快速止血。进一步的, 我们在水凝胶粘合剂中引入自膨胀和自推进性能特点, 开发了一种可注射可降解的席夫碱水凝胶生物活性粘合剂。这种生物活性粘合剂具有优异的抗菌和促凝血性能、快速自膨胀和自推进性能, 以及良好的湿组织粘附性, 可用于快速控制大出血。该水凝胶在大鼠肝脏和股动脉出血模型、兔肝体积缺损出血模型、兔腹腔盲视野出血模型和致死性猪锁骨下动脉/静脉横断不可按压出血模型中表现出良好的止血能力。这种效果可归因于水凝胶的快速密封和水凝胶组分的有效促凝血功能。在使用和不使用抗凝剂的兔大出血模型中, 由于水凝胶的自膨胀和自推进特性, 失血量和止血时间也显著低于明胶海绵组。此外, 在兔腹腔大出血模型中, 可膨胀水凝胶的止血能力显著优于不可膨胀水凝胶。这归因于水凝胶的协同止血作用, 其有助于实现出血部位的优异堵塞, 包括水凝胶的促凝血性、自膨胀/自推进和湿组织粘附。优化的水凝胶在兔骨盆区锐器损伤出血和猪锁骨下动脉/静脉完全横断出血模型中实现了显著更好的止血效果, 其失血量和止血时间更少。以上结果为不可按压出血的止血提供了新思路。

D13-I17

两性离子聚合物凝胶及其应用

杨建海^{1*}

1. 天津大学

两性离子聚合物是一类在重复单元上具有一对相反电荷的聚合物材料，它可以通过离子溶剂化作用与水分子发生强水合作用，而表现出优异的生物防污性能、抗冻性能和润滑性能。两性离子聚合物在血液接触设备、植入设备、抗菌涂层、伤口敷料、细胞冻存等生物医学应用领域获得广泛关注。本课题组建立了多种具有普适性的两性离子聚合物的构建方法，包括，1) 利用氢键型单体丙烯酰胺甘氨酸（NAGA）与两性离子单体羧酸甜菜碱丙烯酰胺（CBAA）共聚制备了氢键交联的超分子共聚物可注射水凝胶，并应用于人工玻璃体替代研究；2) 将氨基或脲基团与两性离子基团结合构建了强氢键型两性离子单体，通过水相自由基聚合制备了超纯的两性离子聚合物可注射水凝胶/弹性体，并应用于糖尿病皮肤修复和柔性传感器；3) 首次以硫辛酸为起始原料合成了可生物降解的两性离子超分子聚合物，作为免揭除贴片，能够调控感染型糖尿病伤口局部微环境，促进糖尿病伤口愈合。

参考文献

- [1] Wang H, et al. Adv. Sci., 2018, 5, 1800711.
- [2] He B, et al. Bioact. Mater., 2021, 6, 3085-3096.
- [3] Pang Y, et al. Adv. Funct. Mater., 2023, 33, 2303095.
- [4] Wang Z, et al. Adv. Mater., 2024, 36(30):2404297.

D13-I18

分子开关介导的智能高分子凝胶

李闯^{1*}

1. 中国科学技术大学

智能高分子凝胶作为一种能够响应外界刺激并动态调节自身结构的软材料，在仿生变形、柔性传感和软体驱动等领域展现出广阔应用前景。然而，当前智能凝胶材料存在响应模式单一、动态调控精度不足等瓶颈，其核心挑战在于缺乏跨尺度的分子设计策略与精准调控机制。针对这一关键科学问题，申请人近年来围绕“分子光开关介导的跨尺度功能调控”展开研究：在分子工程层面构建了动力学可控-热力学可调的螺吡喃类光响应分子开关体系，实现了物理化学性质精准调控；在介观层面发现了光致双向相变新现象并阐明其分子机制；在宏观材料层面发展出仿生功能精准构建新方法，构筑了一系列自适应凝胶材料，实现了在动态变形变色、仿生软体驱动和传感监测等应用。本研究建立了智能高分子凝胶的“分子-介观-宏观”跨尺度分子设计和功能调控机制。

参考文献

- [1] Zheng Y.; Zhang S.; Li C.* Adv. Mater. 2025, 2503324.
- [2] Yang X.; Du M.; Chu Z.; Li C.* Adv. Mater. 2025, 37, 2500857.
- [3] Du M.; Li C.* Adv. Mater. 2024, 36, 2408484.
- [4] Guo, K.; Yang, X.; Zhou, C.; Li, C.* Nat. Commun. 2024, 15, 1694.
- [5] Li, C.; Iscen, A.; Sai, H.; Sato, K.; Sather, A.N.; Chin, S.M.; Alvarez, Z.; Palmer, L.C.; Schatz, G.C.*; Stupp, S.I.* Nat. Mater. 2020, 19, 900.

D13-I19

智能水凝胶器件用于脑机接口的研究和应用

白硕^{1*}

1. 中国科学院过程工程研究所

人造器件在医疗植入器械、可穿戴医疗设备、智能检测和诊断设备以及脑机接口等新兴领域取得了令人振奋的成果。但是其力学性能的不匹配和固有的非生物性质，导致严重的免疫反应和纤维化，损害人与

器件之间兼容和互动的长期可靠性和有效性。水凝胶由于其与生物组织的高度相似性以及其在生物应用方面的多功能性和灵活性，成为连接人体组织和人工器械的独特桥梁。报告人在充分理解生物分子和生物分子修饰高分子之间的相互作用机制和组装规律的基础上，结合人工器件在生物应用中的关键科学和临床问题，通过调控和优化水凝胶器件的功能特性，设计和构建了一系列功能性水凝胶体系，并为生物体和人工植入体之间的无缝融合提供了新的见解和解决方案。

D13-I20

强韧高分子水凝胶的构建及组织修复研究

成一龙^{1*}

1. 西安交通大学

作为组织修复材料，高分子水凝胶的力学性能对组织修复效率起着重要的作用。我们通过在分子网络中引入疏水保护的多重氢键交联微区域，有效地提升了水凝胶的综合力学性能。在大鼠腹壁缺损模型中，我们发展的水凝胶材料不仅可以预防疝气的形成，同时可以减少术后组织/器官黏连的发生。另一方面，结合可诱导干细胞迁移的单宁酸和可促进其向软骨细胞分化的 KGN，我们也发展了一种无细胞负载的软骨修复支架材料，在大鼠软骨缺损模型上取得了理想的修复效果。

D13-I21

多功能生物质强粘附凝胶止血促愈合贴片

郭双壮^{1*}，王含章，张黎明

1. 中山大学

创面愈合是一个长期而复杂的生物学过程，为了实现全面、系统的创面管理，迫切需要合适的伤口贴片。粘附性凝胶具有优良的性能，在伤口愈合领域显示出独特而显著的优势。生物质材料具有良好的生物相容性、生物可降解性、独特的生物活性、优良的促愈合性能、易改性、以及丰富的来源，是制备伤口贴片的理想原材料。但是目前所制备的天然生物质凝胶的粘附性能较弱，功能相对比较单一。根据不同的应用场景需求，我们开发了具有多种功能的凝胶贴片，包括高黏附气凝胶止血贴片、高反差粘附性水凝胶伤口贴片、动态双交联网络水凝胶、可释放一氧化氮（NO）气体水凝胶等。这些凝胶由基于天然生物基高分子材料如壳聚糖、透明质酸、氧化葡聚糖、大豆蛋白等制备，并在急性出血、手术免缝合、慢性伤口愈合等方面展现出良好的应用前景。

D13-I22

蛋白质凝胶光子晶体生物传感器：从水凝胶到有机凝胶

蔡仲雨^{1*}，赵芳媛¹

1. 北京航空航天大学

蛋白质和多糖等生物大分子是生命体系的重要组成部分，它们之间的分子识别与相互作用在诸多生物化学过程中发挥着基础而关键的作用。得益于良好的生物相容性和生物活性，基于蛋白质构建的凝胶材料近年来被广泛研究，并已在药物控释、组织工程、疾病诊断等生物医学领域展现出重要应用价值。然而，蛋白质凝胶的性能在很大程度上受到其合成策略和所使用溶剂类型的影响，因而需要精细的结构设计与体系调控。

近年来，我们致力于开发多种基于蛋白质的功能凝胶材料，包括水凝胶、有机水凝胶与有机凝胶，作为智能传感系统的核心感应单元，用于构建新型的生物化学传感器。具体而言，我们以刀豆球蛋白为识别分子，通过席夫碱反应将其固定于凝胶网络中，制备了用于白色念珠菌检测的智能传感凝胶。该传感器对白色念珠菌的检测限低至 32 CFU/mL，远低于其在健康人体中的正常浓度（约 400 CFU/mL），实现了高灵敏度与高选择性检测。此外，我们以乙酰胆碱酯酶（AChE）为识别分子，牛血清白蛋白（BSA）为支架

蛋白, 构建了一种有机水凝胶传感器, 实现了对有机磷农药 (如敌百虫) 和有机磷神经毒剂 (如 DMPP) 的高效检测。该系统对敌百虫的检测限为 2.23 nM, 对 DMPP 的检测限更低至 0.07 nM, 展示出优异的灵敏度和选择性。进一步地, 我们通过将具有丙烯酸官能团的辣根过氧化物酶 (Ac-HRP) 与丙烯酰胺单体交联, 实现在水凝胶网络中对 HRP 酶的共价固定。该体系能特异性响应 H_2O_2 的存在, 诱导 HRP 构象变化, 进而引起水凝胶体积膨胀并导致嵌入的二维光子晶体阵列中颗粒间距的可测变化。该传感器表现出良好的稳定性和选择性, H_2O_2 的检测限可达 3.75 μM 。在另一个体系中, 我们以 BSA 为功能探针, 乙二醇为溶剂, 成功构建了 BSA 基有机凝胶传感器, 实现了在极端环境条件下对金属离子的高效检测。

综上所述, 基于蛋白质凝胶构建的光子晶体传感器结合了高信噪比、低成本和简便操作等多重优势。通过针对不同蛋白质结构与性能的合理选择与设计, 可实现凝胶种类的定制化调控, 进而开发出满足多种检测需求的智能传感平台。这类传感器在疾病标志物检测、临床诊断和环境分析化学等领域展现出广阔的应用前景与转化潜力。

D13-I23

仿生各向异性结构水凝胶的构筑及其应用研究

马春新^{1*}, 刘振中^{1,2}, 赵宏亮¹, 刘李渊³

1. 海南大学
2. 浙江大学台州研究院
3. 海南象元实业有限公司

受自然界生物体丰富且精致的各向异性结构的启发, 结合课题组在水凝胶等领域的前期研究基础, 开发了一系列具有仿生各向异性结构的功能及智能水凝胶, 系统研究了其特定功能及相关应用。首先, 采用“冰模板法”和“遗态仿生法”, 构筑了一系列具有仿生定向孔道结构的功能水凝胶, 基于仿生孔道的快速导水性和防结盐性, 可用于高效的海水提铀和海水淡化等海洋资源的开发; 其次, 基于“定向电纺丝技术”、“生物模板法”、“异质互穿网络法”, 结合纤维素/蛋白质/天然橡胶等等生物物质的复合, 构筑了一系列具有仿生各向异性结构的智能水凝胶, 并成功设计了响应速度快、驱动力强的可编程复杂智能驱动器件。这些新型仿生水凝胶的研究, 可望推动仿生高分子材料、海洋资源开发及柔性智能驱动等领域的加速发展。

Inspired by the rich and delicate anisotropic structures of natural organisms and based on the previous research foundation of our research group in hydrogels, we have developed a series of functional and intelligent hydrogels with biomimetic anisotropic structures, which have been systematically studied on their specific functions and related applications. First of all, a series of functional hydrogels with biomimetic oriented porous structures have been constructed via the “ice template method” and the “morph-genetic method”. Based on highly-enhanced water conductivity and anti-salt deposition of biomimetic porous structures, they can be used for efficient uranium extraction from seawater, seawater desalination and other marine resources; Furthermore, based on “directional electrospinning technology”, “biological template method”, “heterogeneous interpenetrating network method” and combined with the composite of biomass such as cellulose/protein/natural rubber, a series of intelligent hydrogels with biomimetic anisotropic structures have been constructed, which can be utilized to design biomimetic actuating devices integrating fast responsive speed, strong force and programmable complex deformation. This study on these biomimetic hydrogels is expected to accelerate the development of biomimetic polymeric materials, utilization of marine resources and soft intelligent actuations.

D13-I24

粘滑可切换的智能凝胶材料

孙胜童^{1*}

1. 东华大学

开发具有可逆粘附-润滑切换功能的智能凝胶材料对软体机器人、抗污涂层和关节保护等领域至关重要,

但实现极端粘性与超润滑状态的可逆转换仍面临巨大挑战。为此，我们通过自适应双连续相分离策略开发了一种热响应含氟共聚物凝胶，可实现粘性与润滑特性的可逆切换。该凝胶由刚性热响应相与柔性润滑相构成双连续结构，在室温时表面形成纳米级润滑层，摩擦系数低至 0.004，升温后氢键解离释放粘性悬垂链，粘附强度达 362 kPa，冷却后粘附界面可固化产生 3.8 MPa 的剪切强度。该凝胶兼具透明、自修复及耐磨性，为表面特性可切换的自适应材料设计提供了设计思路。

参考文献

[1] Xiaoxia Li, Baohu Wu, Shengtong Sun*, Peiyi Wu*. Adv. Mater. 2024, 36, 2411273.

D13-I25

微生物驱动的水凝胶活体材料的设计与构建

余子夷^{1*}

1. 南京工业大学

活体功能材料是材料学与合成生物学交叉融合的新兴前沿研究领域，旨在利用生命元素组装和创造材料，为探索具有颠覆性和革命性的高性能材料制备和器件开发开辟了新的维度。本报告主要阐述如何从微生物的细胞制造角度出发，在构建适合悬浮细胞生长与代谢的微载体基础上，发展微生物驱动的水凝胶功能活体材料设计与构建方法。具体包括采用液滴微流控手段构建面向微生物培养的微载体，揭示控制分子单元与组装方式对微载体理化性能的影响规律；发展以微载体为单元的生物反应支架，通过增材制造构建多孔结构的功能活体材料。这些研究为未来开发具备复杂功能的活体材料奠定了基础，展示了其在高性能水凝胶材料制造开发中的巨大潜力。

D13-I26

煮鸡蛋启发的高强度天然蛋白质水凝胶

陈强^{1*}

1. 国科温州研究院（温州生物材料与工程研究所）

天然蛋白质水凝胶因其优异的生物安全性，已成为生物医学领域中得到广泛关注。然而，纯蛋白质水凝胶的应用受到其固有机机械强度不足的严格限制。受中国煮鸡蛋和茶叶蛋的启发，通过牛血清白蛋白（BSA）-BSA 以及 BSA - 茶多酚（TP）之间包括氢键和疏水相互作用在内的多重相互作用，成功制备了机械性能增强的 BSA@TP 水凝胶。与 BSA 水凝胶相比，BSA@TP 水凝胶的拉伸强度、杨氏模量和拉伸应变分别提高了 3.3 倍、24.9 倍和 1.3 倍。此外，TP 赋予 BSA 水凝胶对金黄色葡萄球菌（*S. aureus*）和大肠杆菌（*E. coli*）出色的抗菌能力。同时，BSA@TP 水凝胶表现出良好的抗氧化活性，在体外对活性氧（ROS）的清除效率（DPPH 法）达到 60%。因此，BSA@TP 水凝胶在促进糖尿病伤口愈合过程中发挥了积极作用。总之，本研究不仅为天然蛋白质水凝胶的研发提出了新策略，也为应对糖尿病伤口治疗的挑战提供了新视角。

D13-I27

面向食品包装的机械坚韧型水凝胶：先进防伪与智能监测双功能集成

徐晓文^{1*}

1. 暨南大学

食品安全与掺假防控是消费者和食品工业面临的核心挑战。虽然色谱法、光谱法及电化学传感器等技术可用于食品欺诈检测，但其普遍存在成本高昂、操作复杂等问题，难以满足快速现场检测的需求。荧光水凝胶因能响应 pH 等刺激源而发生荧光变化，在食品质量监测与防伪领域展现出潜力；然而，其固有的低机械强度严重制约了其在要求高耐久性的实时食品包装场景中的应用。此外，将防伪功能与食品新鲜度实时监测功能集成于单一水凝胶体系的研究仍极为有限。本研究提出一种两相耦合策略，制备具有高机械

性能的水凝胶体系：以海藻酸钠- Ca^{2+} 交联网络为连续相，通过物理耦合碳点或共聚入荧光单体/丙烯酸作为分散相，并利用组分固有的低临界溶解温度(LCST)或高临界溶解温度(UCST)特性，构建了一系列对氨气或温度刺激响应的变色水凝胶。该材料体系能在外部环境刺激下产生显著的颜色变化，适用于多级信息加密防伪；同时，其能够快速响应肉类腐败标志物（如总挥发性盐基氮, TVB-N），产生灵敏的显色响应（ $R^2 > 0.94$ ），从而实时监测肉制品新鲜度，其灵敏度显著优于现有的干态材料基指示器（如薄膜指示器 $R^2 < 0.7$ ）。本研究所开发的兼具高机械强度并能协同响应 pH/氨气变化以实现多重检测功能的稳健水凝胶体系，为同步应对食品掺假与腐败变质问题提供了一种有效策略，在集成化食品安全保障方面具有重要应用前景。

D13-I28

高分子力化学设计高性能软材料

王志健^{1*}

1. 浙江大学高分子科学与工程学系

高分子软材料的宏观性能与其微观破坏行为密切相关。本研究围绕“分子尺度破坏的表征、控制与利用”，在双网络水凝胶体系中引入高分子力化学方法，实现了对微观破坏行为的精准调控，并构建出具有新功能的高性能软材料。首先，针对力致断键难以检测、破坏过程随机等问题，设计了多类具有可定量信号输出的力敏团，成功区分并表征了高分子网络的断裂路径，揭示了力敏团对破坏机制的调控作用。其次，通过构象限制等策略引入低断键力力敏团，显著提升了力致反应位点的浓度。最后，结合材料的宏观变形与力化学反应速率的协同调控，首次实现了材料的实时自增强与力致塑形功能。上述研究突破了传统材料设计中对破坏的单一规避思路，转而将其作为调控与功能实现的手段，拓展了高分子力化学在软材料领域的应用边界。

D13-I29

气固液三态凝胶

张学同^{1*}

1. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

水凝胶是一种含水量高达 90% 以上的柔性聚合物凝聚态，通常由聚合物化学或物理交联而成，具有丰富的液固界面；气凝胶是利用溶胶-凝胶转变和特种干燥工艺得到的多孔、无序和具有纳米量级连续网络的低密度固体材料，具有丰富的气固界面。气凝胶的制备通常需要利用水凝胶为前驱体。在本次报告中，我们将介绍一种新型的凝胶：气固液三态凝胶，即在水凝胶基体中均匀分布气凝胶的网络结构，形成水凝胶和气凝胶紧密结合构筑具有丰富气-固、液-固和气-液界面的软物质材料。

D13-I30

分子桥梁引导的自组装异质水凝胶：通用制备策略与力学性能增强机制

张国高^{1*}

1. 西安交通大学

许多生物组织都是由疏水聚合物、亲水聚合物和水组成的多相复合材料。相比之下，大多数合成水凝胶是仅由亲水性聚合物链和水分子组成的均质材料。这种结构差异源于二者的形成机制：生物组织在水环境中通过疏水/亲水组分的自组装形成，而合成水凝胶通常由水凝胶前体聚合而成。常规水凝胶前体是包含单体、少量交联剂和引发剂的水溶液，这种水性特质使其易于进行注射、涂覆和打印等加工，极大拓展了其在生物医学等领域的应用。然而，由于疏水组分与水不相容，将疏水成分引入水性前驱体始终是根本性挑战，这也导致难以通过常规前驱体实现生物组织的异质结构。现有解决方案（如采用聚合时发生亲疏水转变的特殊单体，或利用相变聚合物）虽能部分规避该限制，但其适用材料体系有限，普适性不足。

针对上述问题，本研究提出了一种通过溶液制备自组装多相水凝胶的通用方法。与传统水凝胶由单体

水溶液聚合而成类似, 该多相水凝胶由疏水聚合物、水凝胶单体和水组成的均质溶液制备。我们发现水凝胶单体具有两亲性, 能在水相与疏水聚合物链之间充当分子桥梁, 形成稳定均相溶液。聚合完成后, 两亲性单体转化为亲水性聚合物链, 并通过交联剂形成网络。此时疏水链段被亲水基团包裹, 使聚合物整体呈亲水性, 桥接效应随之消失, 导致疏水聚合物从溶液中析出并引发相分离。这种相分离过程同时受到聚合物网络弹性能和疏水组分玻璃化转变的抑制, 最终形成自组装多相结构。与传统均质水凝胶相比, 所得多相水凝胶力学性能显著提升, 实现了水凝胶模量、强度、韧性和疲劳阈值的多个数量级的提高, 打破现存水凝胶的强度和滞后性的正相关性。该策略具有广泛适用性, 为通过溶液自组装制备高强度异质结构水凝胶提供了普适化方案。

D13-I31

多尺度界面设计的多功能传感离子凝胶/皮革离子皮肤

陈咏梅^{1*}

1. 陕西科技大学

离子皮肤具有与天然皮肤相似的感知能力, 能够监测人体的生理信号^[1]。皮革拥有致密的胶原纤维和丰富的间隙, 可以负载离子凝胶以构建离子皮肤^[2]。但是, 凝胶的高分子网络与皮革胶原纤维之间的内部结合力弱和导电率不均匀等问题限制了该类离子皮肤的发展。因此, 开发皮革离子皮肤的关键在于将柔软的离子凝胶与坚硬的皮革骨架有效结合, 并将离子凝胶均匀稳定分散在皮革的内部间隙中, 同时赋予离子皮肤优异的机械性能和传感性能。本研究在聚乙烯醇-聚丙烯酰胺/皮革复合材料中引入离子液体, 通过多尺度界面设计, 利用高分子链与胶原纤维之间丰富的氢键和相互缠绕等作用, 实现了离子液体凝胶与皮革之间的紧密界面结合。此外, 在其内部形成连续导电通路, 构建电导率均匀的离子凝胶/皮革离子皮肤。该离子皮肤在可穿戴应变、温度和呼吸传感方面具有应用前景^[3]。

参考文献

- [1] Zhang, Y. X.; He, Y.; Liang, Y.; Tang, J.; Yang, Y.; Song, H. M.; Zr ñyi, M.; Chen, Y. M., Appl. Surf. Sci. 2023, 615, 156328.
- [2] Dong, D.; Yang, Y.; Zhang, H.; He, Y.; Tang, J.; Wang, Z.; Chen, Y. M.; Ito, Y.; Miyatake, H.; Ma, J.; Zhang, K., Chem. Eng. J., 2023, 454, 140269.
- [3] Zhang Y.; Li K.; Tang J.; Bai Y.; Chen* Y. M.; Jian Lv.; Zr ñyi, M., Adv. Funct. Mater. 2025, 250040

D13-I32

聚合物粘性因子设计与水凝胶材料性能调控

袁丛辉^{1*}

1. 厦门大学

“粘附”是一种物质附着在另一种物质表面的过程, 其关键是宏观或微观界面的物理或化学相互作用。聚合物内部或界面处产生粘附主要依靠范德华力或形成化学键, 包括: 静电、氢键、 π - π 堆叠、共价键、配位键、主-客体相互作用等。聚合物网络中粘性因子设计, 已发展成为相态结构、物理机械性能、界面粘附、刺激响应性能调控的重要策略。我们致力于聚合物体系粘性因子控制新方法研究, 解决粘性因子设计与管控的关键科学问题。提出了电化学、力化学程控聚合物粘附性能的新策略, 建立了电控粘/脱粘的概念与方法, 解决了高分子材料快速、可逆、循环粘/脱粘的挑战性难题, 实现了机器人攀爬以及智能机械手臂抓取模式的更新; 阐明了应力控制的水凝胶微观界面粘附机制, 探索出一条无需物质内化的聚合物机械性能“自进化”新途径。提出聚合物动态锚定溶剂分子的策略, 强化凝胶体系中链段运动摩擦力, 制备了宽温度范围对众多表面保持高粘附性的凝胶。探索了一条基于同步溶胀-消溶胀的水凝胶内部结合水含量调控新途径, 强化聚合物链与水分子相互作用, 制备超刚性水凝胶。

D13-I33

多糖凝胶结构设计调控纤维力学性能

杜聪^{1*}

1. 山东省可再生膜材料重点实验室, 材料科学与工程学院

生物质多糖材料来源广泛, 具有可降解、可再生、生物相容性强等优势, 然而由于其独特的分子结构, 多糖材料力学性能较弱, 可加工性较低, 限制了其应用领域。以海藻酸钠、黄原胶等典型生物多糖为原料, 基于对多糖材料加工过程中凝胶状态的结构设计, 通过组分复合、添加小分子塑化剂、多重交联等策略, 制备了不同交联度、固含量、可拉伸性的多糖凝胶。对凝胶线性黏弹性和力学行为进行系统研究, 阐明了凝胶组分对其网络结构的调控机制; 通过对凝胶拉伸流场下流变行为的研究和取向度的原位表征, 揭示了凝胶结构、拉伸条件、取向固定条件等参数对分子链取向度和力学性能的影响, 在此基础上制备了断裂强度高达 600 MPa 的多糖纤维和薄膜材料, 为多糖基材料的高性能化和高值应用奠定基础。

关键词: 多糖; 水凝胶; 纤维; 薄膜; 力学性能

参考文献

- [1] Yan H, Wang J, Du C. et al. Hydrogen bond mediated strong plasticization for high performance alginate plastics[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(25): 2400648.
- [2] Han Z, Hao J, Du C. et al. Superior strong and stiff alginate fibers by entanglement-enhanced stretching[J]. *Macromolecules*, 2023, 56(16): 6305-6315.
- [3] Hao J, Yan S, Yuan H, et al. High-strength alginate fibers wet-spun from pre-crosslinked sodium alginate solutions[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 342:122386.
- [4] Kong D, Li Y, Yang B, et al. 3D Printed hydrogels with high-strength and anisotropy mediated by chain rigidity[J]. *Small*, 2024, 20(44): 2403052.
- [5] Kong D, Yang B, Yuan H, et al. 3D printing of glycerol-mediated alginate hydrogels with high strength and stiffness[J]. *Journal of Materials Science Technology*, 2024, 213: 268-275.

D13-001

3D 打印及生物活性材料在组织再生中的应用研究

郭会龙^{1*}

1. 广东省科学院生物与医学工程研究所

生物组织缺损损伤具有缺损形状各异、易受细菌感染、微环境失衡等特征, 最终加大缺损修复治疗难度。3D 打印及或动态键交联的生物活性材料, 可个性化定制或适配不规则缺损部位, 支撑并促进组织再生。作者通过调控动态化学键实现调控水凝胶中的药物释放显著减少炎症反应, 进而促进牙周组织再生。作者进一步将受贻贝启发的儿茶酚基团引入到上述自愈水凝胶中显著提高了组织粘附性能, 使其可以很好地粘附在组织上并具有良好的形状适应性。此外, 通过引入均匀分散的 PDA NPs, 使其产生有效的光热抗菌活性。最终促进细菌感染创面修复。并且, 作者通过将 ROS 响应性动态苯硼酯键替换上述动态希夫碱化学键, 得到 ROS 响应性水凝胶, TP@Ag NPs 的引入赋予光热及纳米银协同高效抗菌性能, 且水凝胶中的还原性儿茶酚基团和 ROS 响应性动态苯硼酯键可清除活性氧, 促巨噬细胞 M2 极化抗炎, 最终促进感染性糖尿病创面修复。

D13-002

具有潜在肌肉驱动器重构应用的复合水凝胶设计及性能研究

林泽宁¹, 蒋涛^{1*}, 罗自荣¹

1. 国防科技大学

基质胶与纤维蛋白原因高生物活性被广泛应用于组织工程研究, 并由此衍生出基于基质胶/纤维蛋白原/凝血酶复合水凝胶 (简称 MFT 水凝胶) 的肌肉驱动器或类生命机器人。然而, MFT 水凝胶存在力学性能

不足、制备过程复杂、仅能模具浇筑成型等不足，限制了其进一步应用的范围。海藻酸钠/明胶作为一种常见的水凝胶材料，具有良好的可打印性、生物相容性及性能稳定性。因此，引入海藻酸钠/明胶去重新构建一种海藻酸钠/明胶/基质胶/纤维蛋白原复合水凝胶（简称 AGMF 水凝胶）成为一种新的解决方案。

对 AGMF 水凝胶进行制备，并对理化性能进行测试。在力学特性方面，AGMF（10 mg/mL 的海藻酸钠，70 mg/mL 的明胶，4.2 mg/mL 的纤维蛋白原）与 11.1 mg/mL 的氯化钙溶液交联后力学性能得到明显改善。在 70 g 载荷下，AGMF（室温凝胶 30 min，氯化钙交联 1 min）应变率变化仅为 MFT（置于 37 °C 环境中 30 min）的 36.13%。在制备过程方面，凝血酶由前处理变为后处理，避免了多材料混匀时纤维蛋白原与凝血酶发生局部凝胶的情况。在结构重构方面，制备的 AGMF 水凝胶表现出剪切变稀特性，具有良好的流变性能。该材料可在设置的打印参数下打印出多边形中空结构、金字塔结构等，表明其具有良好的三维重构能力。生物相容性方面，AGMF 表现出良好的生物活性。

综上，AGMF 水凝胶克服了 MFT 水凝胶在力学特性、制造过程、三维重构方面的不足，具有较大的肌肉驱动器应用潜力。但是，基质胶批次稳定性较差，后续需对去除基质胶的海藻酸钠/明胶纤维蛋白原复合水凝胶在肌肉驱动器的应用进一步研究。

D13-003

Hydrogel-enabled electronic skins for health monitoring

Yan Wang^{1*}

1. Guangdong Technion-Israel Institute of Technology, China

One limitation of commercial wearables, such as smartwatches and fitness bands, is their inability to establish conformable contact with human skin due to their rigid form factors, which restrict their monitoring capabilities. In contrast, soft bioelectronics offer a promising platform for personalized health care, thanks to their unique attributes, including thinness, lightweight design, excellent biocompatibility, mechanical robustness, and superior skin conformability. Permeable, skin-mountable electronics designed for long-term use have emerged as powerful tools for early disease prevention, screening, diagnosis, and treatment. Dr. Wang's research primarily focuses on the development of unconventional soft materials for advanced electronic skins. In today's presentation, Dr. Wang will discuss high-performance electronic skins created using intrinsically stretchable materials, such as nanomeshes and hydrogels, for continuous health monitoring. These innovations enable precise measurement of various electrophysiological signals without compromising comfort, accuracy, or stability, supporting long-term health monitoring applications.

D13-004

水凝胶粘附性能调控及其生物医用应用探索

刘珍珍^{1*}

1. 广州医科大学

目前，手术缝合仍然是临床上最常用的闭合伤口组织的方法，特别是对于体内伤口。然而，手术缝合存在一定的缺陷，如缝合过程中造成正常组织损伤、伤口二次出血、缝合时间长、组织液易渗漏等。针对上述问题，本文通过机械力诱导乳滴在水凝胶上下表面的分布，调控自由羧基在水凝胶上下表面的暴露，继而导致水凝胶上下表面呈现不对称粘附性能，首次利用一步法构建了不对称粘附的水凝胶。该方法制备的水凝胶其上下表面的粘附强度差值为 20 倍，下表面对湿组织的粘附强度 500 J/m²，同时抗张强度远高于人体最大腹压值；离体组织粘附实验表明，该水凝胶下表面可以对注满水的猪胃、水下肺部创口，甚至麻醉状态下活体兔子的心脏表面，都表现出高强粘接和粘附性能。作者通过光学显微镜、3D 轮廓仪、XPS、SEM、接触角测试等方法，系统表征了该水凝胶的不对称结构。最后，作者将该水凝胶作为兔子胃穿孔组织修复的粘接剂，实验结果表明，相比于手术缝合线组，该水凝胶组不仅能高效修复胃穿孔组织，而且防止了术后粘连。该材料由于其高效简便的制备方法以及优异的粘附及体内组织修复效果，在体内创口组织

修复领域展现出了巨大的应用潜力。

D13-005

用于组织创伤修复的智能感知强粘附水凝胶仿生补片

钱凯^{1*}

1. 山东大学

人体创伤是当今世界各国普遍面临的一个重大卫生问题，随着人口老龄化进程加快、职业病加剧、运动损伤及各种意外事故等，人体各类组织器官损伤发生率明显增加，如跟腱/肩袖撕裂、硬脑膜破损、胃肠道漏、口腔溃疡等。传统手术缝合会造成术区创口处应力集中，致使创口较难愈合。另一方面，创伤组织需密封缝合以避免外界细菌/病原体污染，同时防止出血、组织液、脑脊液等渗漏。针对不同程度破损组织，补片被认为是微张力修复的最佳选择之一，可以为组织提供永久性或临时性力学支撑的作用，然而缺少体内长期强粘附功能。针对上述问题，选择具有优异的生物相容性及安全性水凝胶为补片材料，调节水凝胶力学性能以匹配不同组织模量，并赋予其强粘附功能而避免手术线缝合，由此简化手术步骤，促进组织快速愈合与功能恢复。同时赋予补片对创口处的应力应变感知功能，有助于为康复训练提供实时精准数据，由此建立康复训练“金标准”。

D13-006

水系锌离子电池用凝胶电解质的制备及柔性器件

程建丽^{1*}

1. 电子科技大学

水系锌离子电池由于其成本低、高安全性、环境友好、高能量密度等优点，正有望成为下一代可穿戴的电池。然而，锌离子电池的应用仍面临巨大的挑战，如极端温度下的工作情况、严重的锌枝晶和腐蚀问题、弯曲下的层间滑移等。因此迫切需要开发全面的凝胶电解质来抑制锌枝晶，稳定电解质/锌界面，从而延长其使用寿命和扩大应用范围。团队设计并构筑了多种结构的凝胶聚合物电解质，可以同时实现锌离子的高效选择性传输与高稳定性的电解-电解质界面，减少界面自由水比例，从而有效抑制了电极界面处的枝晶生长与腐蚀，在此基础上构筑了柔性自修复电池、柔性纤维状电池。相关研究结果发表在 *Advanced Functional Materials*、*Energy Environmental Science*、*Energy storage Materials* 等期刊。

D13-007

基于动态网络协同调控构建高韧性导电水凝胶

丁虹耀^{1*}

1. 南京工业大学

在柔性传感技术迅猛发展的当下，水凝胶凭借其独特的三维网络结构与卓越的柔韧性，成为该领域的研究热点。但如何制备同时具备优异力学性能与导电性能的水凝胶，始终是制约其进一步应用的关键瓶颈。羧甲基壳聚糖（CMCs）作为壳聚糖的重要水溶性衍生物，属于两性聚电解质，其分子链上丰富的亲水基团赋予了它独特的理化性质。本报告将 CMCs 引入可拉伸聚合物基体，构建半互穿网络结构。通过精准调控凝胶网络中氢键、离子键、配位作用及结晶等非共价相互作用的协同效应，成功开发出一系列高性能复合水凝胶。这些水凝胶不仅在力学性能上表现突出，同时具备良好的导电性能。基于该类导电水凝胶研制的电阻式应变传感器，展现出高灵敏度和线性响应特性，能够对人体运动进行实时、精准监测，在可穿戴设备、医疗健康监测等领域展现出巨大的应用潜力。

D13-008

海洋多糖纳米复合多功能水凝胶的构建及在创面修复中的应用研究

陈祥艳¹, 李俊瑶¹, 李雁涛^{1*}

1. 青岛科技大学化工学院

创面修复是临床治疗中的关键环节, 广泛应用于慢性创伤、烧伤及术后组织愈合等场景。随着人口老龄化加剧及糖尿病等慢性疾病发病率持续上升, 难愈性创面问题日益严重, 已成为全球公共健康领域亟待解决的重要挑战[1-2]。各类难愈性创面常处于缺氧、慢性炎症、细菌感染及组织收缩力障碍等复杂微环境中, 导致细胞功能受损、血管生成受阻及瘢痕增生, 从而严重影响愈合进程[3-4]。现有治疗手段多聚焦于单一功能调控, 难以同时应对氧化应激、抗菌需求及组织再生, 亟需开发具有多重功能的安全高效创面修复材料。

近年来, 天然高分子材料构建的生物活性水凝胶在组织工程领域受到广泛关注。其中, 海洋多糖因其优异的生物相容性、生物可降解性及活性功能基团, 成为构建新型功能性水凝胶的重要候选原料[5-6]。本研究以临床需求为导向, 基于海藻酸钠、壳聚糖等多种海洋多糖, 复合金属基等多种功能纳米粒子(如: 产 H_2S 的 $MnS@Co$ 基纳米酶、产 O_2 的 $CeO_2@Zr-GA$ 纳米酶), 构建了具备抗菌、抗炎抗氧化与促组织无瘢痕再生等多功能的智能仿生响应型海洋多糖纳米复合水凝胶, 该智能仿生响应型复合水凝胶在体外能有效诱导气体产生, 展现出显著的抗炎和抗氧化活性, 并能有效抑制大肠杆菌和金黄色葡萄球菌等多种病原菌的生长与繁殖, 并有效促进了糖尿病慢性感染等创面的快速无瘢痕修复。上述结果表明, 该复合水凝胶在功能性医用敷料领域具有广阔应用前景。本研究将为新型高性能创面医用敷料材料的开发提供了理论依据与实验基础, 推动海洋多糖及金属离子等在新型医用敷料中的高值化应用。

D13-O09

基于多尺度均匀化调控的高韧性单网络水凝胶

秦海利^{1*}

1. 合肥工业大学

传统合成单网络聚合物水凝胶的制备主要依赖于单体、引发剂和交联剂的原位自由基共聚反应。这一经典合成方法不可避免地导致三维网络结构呈现多维度异质性特征, 具体表现为: (1) 空间维度上的交联点分布非均一性; (2) 拓扑维度上的网络链段排布无序性; (3) 连接维度上的官能团反应不完全性。这种结构缺陷在外力加载时会产生显著的应力集中效应, 致使材料呈现低模量和高脆性的力学特征。针对这一关键科学问题, 研究学者已提出多种新型网络构建策略, 包括互穿网络结构工程、滑移交联界面设计和瓶刷状拓扑调控等。这些基于能量耗散机制优化的方法虽在一定程度上提升了材料韧性, 但尚未从分子反应动力学层面解决网络缺陷的本质问题。本研究提出从聚合反应源头调控网络结构的创新思路, 通过双重维度构建高均匀性单网络水凝胶。首先, 针对交联点多分散性这一空间异质性问题, 设计开发新型纳米复合交联体系。通过精确调控纳米粒子的表面官能化程度, 可实现交联位点的单分散性空间排布, 从而构建具有规整拓扑结构的聚合物网络。其次, 针对悬挂链导致的拓扑缺陷问题, 构建多功能纳米引发系统。该体系可在引发聚合的同时将传统工艺中残留的线性悬挂链原位转化为有效交联结构, 显著提升网络结构的力学效能。该项研究在基础研究层面, 揭示了小分子聚合反应动力学与宏观网络结构的构效关系, 为高分子网络理论模型提供实验依据; 在应用技术层面, 发展出可规模制备的高性能水凝胶合成工艺, 其普适性设计策略可拓展至柔性电子、生物医用材料等新兴领域。同时, 为传统合成聚合物材料的力学性能优化开辟了新维度, 标志着水凝胶材料从"结构仿生"向"分子设计"的重要范式转变。

D13-O10

基于本体共聚实现强韧物理水凝胶的无溶剂制备

崔为^{1*}, 姜力超¹

1. 四川大学

水凝胶的制备通常需要在溶剂(主要为水)中进行, 但往往会增加聚合物链间的自由体积并削弱其相

互作用，导致所得水凝胶在力学性能和粘弹性方面表现较弱。本工作提出了一种无溶剂合成策略，可制备具有优异抗溶胀性和超宽频率粘弹性的强韧型物理水凝胶。该策略通过亲水性与疏水性单体的本体共聚实现。选用具有良好相容性的亲疏水单体具，一步反应生成的无水共聚物在水中平衡后会形成具有相分离结构和致密链缠结的水凝胶。相较于传统胶束共聚法制备的水凝胶，本体共聚所得水凝胶的力学性能显著提升，其模量、强度和断裂韧性分别可提高最多 81 倍、46 倍和 41 倍。由于该强韧水凝胶还具有优异的抗溶胀性及阻尼性能，同时声阻抗与水完全匹配，因此被演示用作水下航行器的吸声涂层，可实现有效声学隐身效果。与传统的溶剂辅助聚合方法相比，本体共聚反应具有超高单体浓度、产物纯净和工艺简便等优势，为开发结构简单但性能优异的水凝胶提供了新思路。

D13-O11

高强韧离子凝胶材料的合成与表征

李维政^{1*}

1. 苏州大学

凝胶是由聚合物和溶剂构成的可拉伸软材料，具有可设计的机械性能、可定制的化学结构、自愈合性、导电性和多重刺激响应性等特点，在离子皮肤、智能穿戴、健康监测和冲击防护等领域展现良好的应用前景。但裂纹扩展敏感、共价交联网络不可逆、可逆交联网络长期循环下机械性能不稳定，限制了凝胶的实际应用。对网络拓扑结构进行合理的设计，引入能量耗散和增强机制以提升凝胶的机械性能是迫切的需要和存在的挑战。本次报告将着重讨论我们在构建新型网络拓扑结构离子凝胶，实现高强度、低滞后、裂纹扩展不敏感、抗疲劳的韧性水（离子）凝胶的制备，及其在冲击防护、健康监测、疲劳损伤监测等领域应用探索方面的一些进展。

D13-O12

低迟滞、高韧超分子聚合物离子凝胶

刘凯^{1*}，武培怡^{1*}

1. 东华大学

聚合物凝胶材料在软体驱动器、电子皮肤等许多新兴领域有重要的应用前景。低迟滞特性有利于聚合物凝胶材料在循环载荷的应用中维持较长的使用寿命。实际上，通过共价交联的方法可以在小应变下赋予聚合物凝胶材料低迟滞性能，但固定交联点的存在也会一定程度上影响应力的转移，从而导致较弱的韧性和抗疲劳性能。为了解决这些问题，在聚合物网络中引入超分子相互作用（包括非共价相互作用和动态共价相互作用）得到了较大的关注。尽管这类超分子策略很大的改善了抗疲劳性能，但也带来了明显的残余应变和迟滞。因此，设计兼具低迟滞和高韧性的聚合物凝胶材料，仍然是一个巨大的挑战。

为了获得低迟滞特性，聚合物凝胶材料一方面要提升储能模量，另一方面也要减少或消除能量耗散。在最近的报道中，通过在聚合物网络中引入高弹或者滑环交联剂、仿织物的缠结或者纳米限域的方法可以很大的提升弹性并有利于应力的转移。再者，通过溶剂充分溶胀凝胶材料，可以很大程度的消除聚合物分子链的摩擦以及随之而来的能量耗散。为了进一步提升韧性和减少应力集中，可以在聚合物拓扑中引入更多的物理缠结。然而，这类策略并不适合于制备低迟滞离子凝胶材料。主要的挑战在于离子液体（IL）通常具有较高的粘度，其会大大增加离子凝胶的链摩擦，并在变形过程中耗散大量的能量，不利于离子凝胶材料实现低迟滞特性。

我们通过在富含 IL 的聚合物软基质中引入四重氢键（2-脲基-4-嘧啶酮，UPy），获得了具有低迟滞特性的高韧离子凝胶材料。这一超分子化学策略的核心是：四重氢键首先在聚合物网络中形成二聚体，二聚体进一步通过 π - π 堆叠自组装形成多级聚集体。基于此，一方面 π - π 堆叠易解离并可迅速重新结合，从而可以实现低能量耗散的应力转移。另一方面，UPy 二聚体可以像化学交联剂一样有效地固定聚合物链，提升聚合物网络的回弹性。得益于这两方面，离子凝胶在响应外部循环机械刺激时可以同时实现低迟滞和高韧性。

D13-O13**Rapid gelation of All-In-One lignocellulosic nanofibrils hydrogel toward flexible sensor for multi-scenario applications**Shi-Neng Li ^{1*}

1. Zhejiang A & F University

Electronic devices based on soft hydrogels have potential uses in real-time physiological monitoring and enable early detection of disease. However, the main challenge is to simultaneously address the two conflicting issues of facile device integration capability and good overall performance, with simplicity of fabrication. Here, we have developed a rapid room-temperature gelation system based on lignocellulosic nanofibrils is developed. By engineering the network structure and integrating functional components, multifunctional integration is realized. The resulting hydrogels simultaneously exhibit robust mechanical strength, high electrical conductivity, broad temperature tolerance, autonomous self-healing, anti-swelling capability, and remarkable sensitivity, demonstrating significant application potential in areas such as smart health monitoring and underwater sensing. Our work thus offers a novel platform for cost-effective, customized, multifunctional hydrogel materials, and thereby broadens the application of conductive polymer hydrogels.

D13-O14**High-Strength, Tough, and Antibacterial MXene-Composite Conductive Hydrogel for Advanced Sensing Applications**Long Chen ^{1*}

1. Hunan University of Technology

Conductive hydrogel-based flexible sensors have demonstrated significant potential in wearable health monitoring systems. Nevertheless, their clinical adoption remains constrained by suboptimal mechanical performance, inadequate electrical conductivity, dermal sensitization reactions during prolonged usage, and reliance on external power sources. To address these limitations, a poly (vinyl alcohol)/N-hydroxyethyl acrylamide (PVA/HEAA) dual-network hydrogel was synthesized through a synergistic strategy involving silane coupling agent KH570-mediated hydrophilic modification of MXene nanofillers and dual-network crosslinking. The hydrogel architecture comprises distinct components: a borate-crosslinked PVA dynamic network, a covalently bonded poly (N-hydroxyethyl acrylamide) framework, hydrophobic binding of C18-SDS/NaCl micelles, and KH570-MXene serving dual roles as both physical crosslinker and conductive filler. The optimized hydrogel exhibited exceptional mechanical properties (tensile strength: 1000 kPa, elongation at break: 720%), environmental stability (water retention >95% over 7 days at 25 °C/60% RH), and antimicrobial efficacy (bacterial inhibition rate >99%). Integration of a biomimetic layered encapsulation structure with a triboelectric nanogenerator (TENG) significantly enhanced energy harvesting performance, achieving an open-circuit voltage of 140 V, short-circuit current of 3.5 μ A, and charge transfer capacity of 51 nC. A machine learning-driven multiscale signal decoupling model was developed to enable high-precision gesture recognition (accuracy $\geq$ 99% across ten distinct gestures). Experimental validation confirmed the system's capability for simultaneous human motion tracking, bioelectric signal acquisition, and gesture interaction analysis. As well as no skin sensitization was found during the wearing process. This work proposes a novel strategy for the development of multifunctional human-machine interfaces with both energy harvesting and intelligent analysis capabilities.

基于导电水凝胶的柔性可穿戴传感器可以将生理活动信号转化为可检测的电子信号，因此在柔性电子皮肤、人机界面、医学诊断领域拥有广阔前景。然而，目前基于导电水凝胶的柔性传感器通常表现出较弱的机械强度、低电导率和有限的传感性能。MXene 具有良好的导电性能，逐渐应用到导电水凝胶中，但 MXene 的疏水性限制了其在水凝胶中的使用。为此，利用硅烷偶联剂 KH570 对 MXene 表面进行改性得

到 K-MXene, 使其易分散于水凝胶前驱液中, 进一步光引发聚合获得高强韧、抗菌的 MXene 复合导电水凝胶 (PHCSK-M)。在多次的拉伸和压缩过程中, 水凝胶仍显示出稳定的传感性能和抗疲劳性。该工作所制备的具有多功能集成的柔性可穿戴传感器, 有望用于可穿戴人机交互和生物电极等领域。

D13-O15

Hofmeister 效应在水凝胶电解质中对导电性的影响与调控

刘利彬^{1*}

1. 齐鲁工业大学

作为一种新型的储能设备, 超级电容器在柔性可穿戴电子技术上有很大的应用潜力。Hofmeister 效应是指不同离子的特异性作用对蛋白质、聚合物等大分子溶解度及聚集行为的差异化调控现象, 其核心是离子的盐析 (salting-out) 和盐溶 (salting-in) 能力差异, Hofmeister 效应对水凝胶的作用主要体现在通过特定离子的调控, 改变分子间作用力及聚合物聚集状态, 从而赋予水凝胶动态响应、力学强化、抗溶胀等多重功能, 因此研究该效应对水凝胶导电性的影响具有重要意义。

本研究首次揭示了 Hofmeister 效应对聚电解质水凝胶在常温及低温下电化学性能的影响。首先对阳离子的影响进行了研究, 通过在两性离子单体存在下与 NH_4Cl 、 NaCl 和 LiCl 随机共聚, 制备了聚 SA 水凝胶电解质 (polySA), NH_4^+ 基电解质 (polySA- NH_4^+): NH_4^+ 与水分子及分子链的弱相互作用使其在室温下具有高导电性; Li^+ 基电解质 (polySA- Li^+): Li^+ 与水分子及分子链的强相互作用赋予其优异的抗冻性能和机械强度[1]。聚电解质水凝胶在低浓度铵盐中表现出抗聚电解质效应 (anti-polyelectrolyte effect), 而在高浓度铵盐中则呈现明显的 Hofmeister 效应。对于亲液离子 (Kosmotropic ions), 与水分子或聚合物链发生强相互作用, 导致聚电解质水凝胶电导率降低; 对于离液离子 (Chaotropic ions), 与水分子或分子链相互作用较弱, 从而提升导电性。Hofmeister 效应对聚两性离子电解质 (polyzwitterion electrolyte) 的影响尤为显著。经离液离子浸泡的聚两性离子水凝胶在 -40°C 下电导率可达 6.2 mS cm^{-1} 。基于该电解质组装的超级电容器在 -40°C 环境中循环 15 000 次后, 仍保持 85% 的电容保持率和接近 100% 的库伦效率[2]。

关键词: Hofmeister 效应, 抗冻电解质, 水凝胶, 聚两性离子, 超级电容器

参考文献

[1] Q. Guo, H. Su, X. Ji, L. Gai, H. Jiang, L. Liu, Small Methods 2024, 2400532.

[2] B. Lv, Q. Guo, X. Ji, L. Gai, L. Liu, Batteries & Supercaps, 2024, 7, e202400245.

D13-O16

水泥缓释纳米粒子对水凝胶的改性及应用

孙国星^{1*}

1. 澳门大学

本工作首先以普通水泥低温水化缓释纳米粒子: 将 0.1% 水泥放入 0°C 冰水中, 经过一定时间, 即可得到三维尺寸均小于 5 纳米的超细氢氧化钙纳米粒子分散体系。接下来, 以该纳米粒子通过原位聚合与各种水凝胶体系复合, 大幅度提升水凝胶材料的机械、吸附、保水等性能。仅用 40-200 ppm 极低浓度的水泥缓释纳米粒子, 应用于聚丙烯酰胺凝胶, 其可回复拉伸倍率提高至 121 倍, 并可在承受 200 兆帕高压后一秒内回复原状。应用于吸水凝胶体系, 可在纯水中达到 13671 倍的溶胀能力, 在土壤中仅需添加 0.012% 该吸水树脂, 即可保持住土壤中 40% 的水分, 并在半年以上的观察期内无明显泌水; 作为混凝土内养护剂, 同等添加量时混凝土强度损失仅为市面吸水树脂的 50%, 抗裂效果则提升 3-4 倍。该工作以水泥为原料生产纳米粒子对水凝胶改性, 在进行理论研究的同时, 实现了部分材料的产业化, 创造了一定的经济价值。

D13-O17

蜗牛粘附启发的可切换和可回收的高强度超分子水凝胶粘合剂

付如民^{1*}

1. 江西农业大学化学与材料学院

具有按需可拆卸性的高强度粘合剂可以在需要时安全地粘合到材料上，并在激活后释放，而不会损坏粘合对象的完整性。虽然基于化学键合的传统粘合剂[1-3]很坚固，但一旦不再需要粘合剂连接，它们往往会面临脱离的挑战。此外，在初始应用程序之后，它们通常不可重用。传统粘合剂的一个内在限制是在强附着力和易剥离之间权衡[4]。在这里，我们介绍了一种高强度超分子粘合剂，其粘附强度超过 1 MPa（高达 4.65 MPa），具有显著的可拆卸性，可切换比高达 1800。这些优异的性能是通过协同调节界面物理键-氢键/偶极-偶极富集聚合物（HyDiP）的体积模量实现的。在脱水状态下，粘合剂表现出高模量（445 MPa），并暴露出丰富的表面键合基团，在各种表面上产生强大的附着力。在其再水合状态下，模量降至 0.11 MPa，表面的物理键密度显著降低，易于分离。此外，HyDiP 粘合剂具有多功能、高粘附强度和优异的粘附可切换性，为广泛的应用开辟了新的潜力，包括但不限于柔性电子设备[5]、弯曲电子表面转移技术[6]、软机器人[7]、低成本运输方法和强大的空间技术。

D13-O18

可注射水凝胶机器在植入式医疗器械中的应用

杨月莹^{1*}

1. 西北工业大学

植入式医疗设备暂时或永久驻留人体，可实现疾病诊断、生理监测或治疗等功能。水凝胶作为一种富含水分的交联聚合物网络，其结构与生物组织高度相似，具有优异的生物相容性，是构建植入式设备（如生物传感器、组织工程支架、医用植入体）的理想材料。基于对临床需求的优化设计及其特有的环境响应性，水凝胶正逐步成为医用设备的核心组成部分：既可作为辅助元件低损伤介入设备部署与取出，也可作为主体构件通过组织修复、药物递送、感染控制及生理因子/生物分子监测等功能驱动设备运行。以水凝胶为核心构建诊疗设备或机械装置，或将替代传统刚性材料驱动的器械系统。这一新兴领域被定义为“水凝胶机器”，正展现出快速发展态势。

微创外科技术因创伤小、痛感轻、恢复快等优势逐渐普及，其对诊疗器械的小型化与精准性提出了更高要求。传统开放式手术可通过机械臂与内窥镜观察操作视野，但狭小腔道环境下受限的视野与空间对水凝胶机器的尺寸与功能集成度形成严峻挑战。我们提出一类与微创手术兼容的可注射水凝胶机器，例如：用于术中止血的功能化水凝胶生物粘合剂、原位生物打印导电水凝胶支架促进组织再生、植入式水凝胶超声传感器无线监测颅内信号等。

此类水凝胶机器可通过微小切口甚至注射方式精准递送至靶向区域，大幅降低开放手术风险。其柔性特质可自适应局部解剖结构，与生物组织相似的力学性能显著降低对周围组织的机械刺激，有效规避瘢痕增生与感染等并发症。同时，多功能集成设计使其兼具诊疗一体功能：生物粘附水凝胶可即时响应术中出血状况，通过组织粘附与促凝血机制实现复杂术式下的止血增效；原位生物打印导电支架通过构建生物相容性微环境促进细胞迁移与组织整合，推动损伤组织再生；植入式水凝胶超声传感器可无线监测颅内压力、温度、pH、血流速度及组织应变等参数，其天然降解特性避免二次手术移除，为长期监测提供革新方案。

可注射水凝胶机器凭借微创特性、精准定位能力、生物相容性与可降解性优势，正引领新一代植入式设备的发展范式。

D13-O19

机器学习辅助的凝胶柔性传感与人机交互

徐文龙^{1*}

1. 鲁东大学

开发柔性人机交互设备越来越受到关注。凝胶作为一种柔性材料在可穿戴传感领域中被广泛使用并且对不同的外界刺激作出响应。本文在机器学习手段的辅助下，聚焦于凝胶柔性传感器的构建，并将其应用

于人机交互。本文主要包含以下内容：1) 基于水凝胶的智能可穿戴传感器，包括：适应皮肤的低模量水凝胶、氧化 PVA 策略制备高性能水凝胶、矿化策略制备抗疲劳水凝胶；2) 抗溶胀水凝胶作为水下传感器，包括：溶剂置换策略的抗溶胀水凝胶、表面活性剂增强的抗溶胀水凝胶；3) 自供电凝胶传感器，包括：基于凝胶的抗冻摩擦纳米发电机、离子迁移策略制备高热电转换深共晶凝胶。

D13-O20

智能自适应水凝胶基气体-湿度双功能可切换的自驱动柔性传感器

吴进^{1*}

1. 中山大学

为了更好地满足柔性可穿戴设备连续工作、舒适穿戴和功能性拓展的要求，开发自驱动的低功耗柔性多模态传感器有重要需求。然而，由于现有传感材料组分和性质缺乏针对感知不同信息时的智能可变性，传统的自驱动多模态传感器依赖于多个单一功能的分立器件和多种不同材料的组合，导致系统成本和复杂度较高。本研究开发了一种智能自适应性水凝胶材料来构建电化学自驱动的可逆切换的氧气-湿度双功能电化学传感器。它是基于金属-空气电池结构的一体化自驱动器件。设计的智能水凝胶含有两种亲水性不同盐，可以很容易地在富水和缺水状态之间切换，分别用于实现了无串扰的氧气和湿度检测，其机理归因于在水凝胶不同含水状态下暴露的氧气或水分子单独作为反应限制物参与到凝胶-电极界面发生的氧还原反应中。因此，基于单一功能材料和器件就可实现双模态的高性能气体和湿度传感，包括高灵敏度、宽检测范围、选择性、低串扰等，并可用于环境氧浓度、经皮氧分压、呼吸状态、手指接近度的实时监测。在与无线通信技术结合后，基于该传感器进一步构建了无线缺氧报警系统、无线呼吸暂停报警系统和非接触式的电梯控制系统，展示了其在安全、健康医疗和人机交互等领域的广阔应用前景。

D13-O21

一种抗冻凝胶作为应变传感器和机器学习辅助的摩擦电纳米发电机在极端环境中的智能运动监测

韩德龙¹，徐文龙^{1*}

1. 鲁东大学

水凝胶因其高含水量和柔性而广受关注，凭借出色的生物相容性和可调节的机械性能，已成为柔性电子产品中的理想材料。然而，传统水凝胶在低温环境下易结冰，限制了其在某些关键环境中的应用。为了解决这个问题，使用甘油/水等二元溶剂系统来防止水结晶并提高耐温性。然而，这些二元溶剂体系往往表现出较低的导电性。为提高电导率，近年来，具有两性离子特性的材料，通过促进盐离子的解离，成为解决这一问题的有效方案。本研究中，我们在含有 NaCl 和明胶的甘油/水二元溶剂体系中，聚合了丙烯酰胺 (AM) 和两性离子 SBMA，合成了一种双网络导电凝胶，命名为 PASG/NaCl/Gly。明胶与 P(AM-co-SBMA) 之间形成氢键，显著提升了凝胶的力学性能和稳定性。NaCl 和 SBMA 的加入进一步提高了凝胶的离子电导率，而甘油的添加则增强了凝胶的防冻性能。该凝胶具有优异的循环稳定性、抗冻性、粘附性和电气性能是低温环境下可穿戴传感器的理想材料。我们展示了该凝胶在传感系统中的应用，并开发了一款便携式智能鞋垫，用于监测脚部压力和滑雪姿势。该系统采用随机森林算法，能够以 97.1% 的准确率对 11 种滑雪动作进行精准分类，为极端环境下的灵活传感器和自供电系统提供了创新的解决方案。

D13-O22

分子限域荧光水凝胶及其多模式响应与应用

赵治^{1*}，宋晓艳¹

1. 北京工业大学

荧光水凝胶兼具优异机械强度、生物相容性、光学指示性和易于定制的结构响应性等，被广泛应用于智能显示、光学传感、生物医药、仿生机器人、信息加密等前沿领域。荧光水凝胶一般通过将荧光染料掺

入凝胶高分子网络获得。其中运用最多的是有机合成的小分子荧光染料，如 fluorescein, Cy5 等，这些分子中的发色团独立作用，根据化学结构不同展示出各异的荧光特性。近年来，AIE 分子也被广泛应用于荧光水凝胶。AIE 分子的荧光特性与聚集态高度相关，聚集时，由于分子构象平面化及分子运动受限由非荧光态转化为荧光态。

尽管上述荧光凝胶制备方法被广泛使用，但仍存在一定局限。传统小分子荧光染料的设计开发需经历复杂有机合成流程，对其改性、优化难度较高。此外，这类荧光染料化学结构固定，难以在应用场景中对其发光特性进行实时调控。相比而言，AIE 可实现更为灵活的荧光调控，但其制备仍高度依赖复杂化学合成。同时，AIE 荧光染料的聚集与解聚通常依靠外界溶剂组成变化，对环境限制较多。由于 AIE 分子一般具有疏水共轭基团，水相溶解性天然较差，影响了其在水凝胶与生化体系中的应用。

近期研究显示，在不含常规共轭发色团的情况下，通过高度限制分子运动，也可制备出具有发光能力的水凝胶。吴子良团队在低温下制备出一种玻璃态水凝胶，通过高密度氢键自组装大幅限制分子运动，观察到磷光发光并成功制备出磷光凝胶。这为利用限制分子运动开发新型荧光水凝胶提供了有力启发。

本课题组前期开发了一种独特序构凝胶体系，其氢键给体和受体间能自发产生多级自组装，有效限制分子运动。同时，该体系自组装与其成分高度关联，序构规律可控。[1-5]据此，我们提出了一种原创分子限域荧光（CIE）水凝胶的设计制备方法，通过耦合的分子间作用力驱动高分子链团聚为致密高级结构，对链段运动产生有效抑制，使得在完全不引入荧光染料情况下线性高分子网络自身产生显著结构性荧光，极大简化了荧光凝胶制备流程，降低了其使用限制。同时，基于体系序构的高度可控性对 CIE 荧光进行了多模式、大范围调控，展示了以温度、pH、应变变化在内的多种模式定量改变凝胶荧光特性的可能，并相应开发了温度指示器、信息加密、动态显示等多种应用。这种新型荧光凝胶必将有力推动发光材料与器件研发。

参考文献

- [1] Zhao Z. et al. Adv. Mater. 2025, 37, 2500104.
- [2] Zhao Z. et al. Adv. Mater. 2024, 36, 2307582.
- [3] Zhao Z. et al. Adv. Funct. Mater. 2024, 34, 2409050.
- [4] Zhao Z. et al. Adv. Sci. 2023, 10, 2303315.
- [5] Zhao Z. et al. Chem. Mater. 2022, 34, 10443-10450.

D13-O23

Cellulose-assisted phase transitions for toughening hydrogels and ionogels

Feng Jiang^{1*}, Wang Siheng¹

1. The University of British Columbia

Soft gel materials with mechanically switchable properties have attracted significant research interest for designing materials with tunable mechanics. These materials can typically exhibit over tenfold changes in mechanical properties in response to external stimuli—a concept inspired by sea cucumbers, which rapidly stiffen as a protective mechanism, increasing their stiffness from approximately 5 to 50 MPa. Phase separation within hydrogels is commonly used as a straightforward method to control the stiffness-to-softness transition; however, this transition often fails to significantly enhance toughness due to compromised strain capacity. In this presentation, I will introduce cellulose-based strategies to mediate phase transitions for designing strong and tough hydrogels and ionogels. We present a cellulose nanocrystals (CNCs)-assisted phase-engineering approach to create stretchable yet tough hydrogels using supersaturated sodium acetate (NaAc). CNCs reduce microphase separation via hydration, maintaining flexibility while boosting mechanical strength. The resulting hydrogel achieves a tensile strength of 1.8 MPa, fracture strain of 4730%, toughness of 43.1 MJ/m³, fracture energy of 75.4 kJ/m², and a fatigue threshold of 3884.7 kJ/m²—71.8 times tougher than PAAm hydrogel and 6.4 times tougher than PAAm/NaAc hydrogel. This strategy is broadly applicable to polymers such as polyacrylic acid, poly(acrylic acid-co-acrylamide), gelatin, and alginate. Additionally, we develop a tough–stiff switchable ionogel via

reversible solvent crystallization, with cellulose acting as a chemical regulator that promotes ionic liquid crystal formation through competitive polymer binding. The ionogel exhibits a bulk toughness of 25.7 MJ/m^3 and fracture toughness of 47.1 MJ/m^2 . Upon crystallization, it stiffens to a tensile modulus of 134.6 MPa and compressive modulus of 48.9 MPa , then rapidly and reversibly recovers its shape upon heating. These findings demonstrate cellulose-mediated phase transitions—both crystallization and microphase separation—as versatile strategies to design reconfigurable, high-performance soft materials with programmable mechanics for next-generation intelligent applications.

D13-O24

Eudragit®-Engineered pH-Responsive Probiotic Microspheres with Enhanced Gastrointestinal Resistance and Prolonged Storage Stability for IBD Therapy

Ming Teng¹, Xiaomin Luo^{1*}, Xinhua Liu¹

1. Shaanxi university of Science and Technology

The escalating global prevalence of inflammatory bowel disease (IBD) has been closely associated with modern lifestyle-induced dysbiosis of gut microbiota, particularly exacerbated by dietary irregularities and antibiotic misuse. While probiotic supplementation represents a promising therapeutic strategy for microbiota modulation, current formulations face dual challenges: poor viability during long-term storage and drastic viability loss in gastric transit. Here we reported a novel hierarchical double-encapsulation “core-shell” platform (AMS@Eud) combining calcium alginate microspheres with Eudragit® resin coating, engineered for pH-responsive release and enhanced probiotic protection. The optimized microspheres demonstrated exceptional storage stability with only 5.28% and 9.09% viability reduction at 4°C and 25°C respectively over 35 days, effectively eliminating cold-chain dependence. In simulated gastric conditions, AMS@Eud maintained $84.60 \pm 2.59\%$ probiotic viability compared to complete inactivation of free probiotics, demonstrating superior gastrointestinal protection. Comprehensive bio-safety assessment revealed excellent biocompatibility and minimal hemolytic activity, supported by in vivo studies showing no adverse effects on major organs. Notably, AMS@Eud administration significantly enriched beneficial gut microbiota populations while reducing pro-inflammatory species, suggesting dual mechanisms of probiotic delivery and microbiota modulation. This multifunctional platform addresses two major bottlenecks in probiotic therapy through its unique combination of ambient-stable preservation and pH-dependent intestinal release, presenting a transformative approach for IBD management via precision microbiota engineering.

D13-O25

水凝胶材料的构建及其用于骨关节炎治疗

杨洋¹, 许华燕^{1*}, 徐世美³, 沈彬²

1. 四川大学华西第二医院
2. 四川大学华西医院
3. 四川大学

骨关节炎 (OA) 是一种常见的慢性关节疾病, 其特征是关节软骨退行性变化和软骨下骨硬化和增殖, 是老龄化人群疼痛和身体残疾的主要原因, 给家庭和社会带来了巨大的经济负担。然而, 该疾病的发病机制尚未完全阐明。目前 OA 的治疗主要是疼痛管理, 尚无有效的疾病修饰疗法, 尤其是在疾病进展的晚期时, 关节置换往往是唯一的选择。早期 OA 治疗主要是注射透明质酸或者药物来缓解 OA 进展, 但药物不仅容易被关节液清除, 而且药物不能精准达到软骨基质, 导致药物利用率降低; 而晚期 OA 会导致大面积软骨缺损, 难以自我修复。针对这一现状, 本研究一方面通过药物与靶向水凝胶微球复合制备可注射的制剂缓解早期 OA, 不仅有效保护药物, 提高药物的生物利用率, 而且靶向微球可以让药物精准在软骨基质

治疗。通过多重 Pickering 乳液制备了 HA 掺杂的聚磺甲基丙烯酸酯 (PSBMA) 的单分散、小尺寸、多孔、润滑微球(HS)。然后,将噬菌体展示技术筛选的软骨靶向肽(SP)修饰 HS 微球表面形成靶向微球(HS-SP)。HS-SP 微球具有多孔、小尺寸 (~20 μm), 溶胀率高达 4000%, 可以高效负载、可控且靶向释放 miR-140, 维持软骨基质的代谢平衡, 抑制 OA 的发展。同时, HS-SP 微球由于 HA 与 PSBMA 的亲水基团周围形成了坚硬的水合层而展现出良好的润滑性能。体内实验显示, 微球协同润滑与持续靶向释放的 miR-140, 可以减轻关节磨损, 减少骨赘形成, 有效缓解 OA 的进展。另一方面设计高强度润滑水凝胶用于晚期 OA 导致的软骨缺损。利用过饱和 N-异丙基丙烯酰胺 (NIPAm) 单体溶液受热疏水化相分离促进卵磷脂 (EYL) 形成脂质体和一步不对称模板法, 构建内部疏水缔合和表面微结构高强度润滑 PNIPAm/EYL 水凝胶。PNIPAm/EYL 水凝胶具有相对较高的压缩强度 (超过 12 MPa)、良好的抗疲劳性、润滑性能和优异的生物相容性。与 PNIPAm 水凝胶相比, PNIPAm/EYL 水凝胶的摩擦系数 (0.046) 降低了 40%, 更重要的是由于 EYL 的存在, 高于 LCST 以上, PNIPAm/EYL 的水凝胶摩擦系数 (0.056) 并没有大幅升高, 具有良好的耐热润滑性能。本研究不仅提供了构建多功能水凝胶材料的新方法, 而且为不同时期的 OA 治疗提供新的策略及临床转化奠定基础。

D13-O26

基于水合屏蔽-加速氧化还原自催化聚合 (HS-A-RP) 的规模化聚两性离子水凝胶制备技术

理仁杰¹, 麻拴红^{1*}, 周峰¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

聚两性离子水凝胶独特的化学网络结构使其具有出色的水合能力, 可实现广泛的功能性应用。然而, 传统合成聚两性离子水凝胶的方法条件苛刻, 需要热或紫外线照射等外部能量的输入, 同时还具有制备时间长, 所需单体浓度极高等限制。基于此, 我们提出了一种新的化学方法, 即水合屏蔽加速自催化聚合 (HS-A-RP), 以解决这些难题, 从而促进聚两性离子水凝胶的制备及规模化制造。HS-A-RP 法通过在合成体系中引入能够在高度水合的两性离子单体周围产生水合屏蔽的聚乙烯醇, 并在银离子 (Ag^+)-过硫酸钾 ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) 氧化还原催化剂的辅助下, 有效促进了单体的聚集和快速交联聚合。从而实现在温和条件下 (-5 $^{\circ}\text{C}$ 至 37 $^{\circ}\text{C}$, 无需额外能量), 宽浓度范围内聚两性离子水凝胶的超快聚合 (<60 秒), 克服了传统合成方法中存在的临界单体聚合浓度限制。与传统的热引发聚合体系或紫外引发聚合体系相比, HS-A-RP 所制备的聚两性离子水凝胶具有更致密的网络和更优越的机械性能, 并表现出了良好的抗溶胀性能、优异的润滑性能以及显著的抗菌和防污特性。同时在制造用于生物医学设备的功能性水凝胶涂层、热敏材料的原位封装以及出色的固沙能力等方面展现出了极具吸引力的应用潜力。此外, HS-A-RP 方法还适用于在极端环境条件下在不同基底上规模化地制造和装饰性涂覆聚两性离子水凝胶, 从而大大拓展了其应用领域。

D13-O27

用于低电压外周神经调控的机械顺应性与阻抗匹配水凝胶生物电子器件

单良杰¹, 刘吉^{1*}

1. 南方科技大学

植入式神经刺激器能够实现靶向电刺激以治疗神经系统疾病, 但传统刚性电极与柔软神经组织在力学与阻抗上的失配, 常导致刺激效率下降及长期可靠性受限 [1-3]。本研究提出了一种具备机械顺应性与阻抗匹配的水凝胶基神经生物电子器件, 其可在接触潮湿外周神经后自发产生自卷曲行为, 从而构建贴合的三维界面结构。通过三维多材料打印技术, 我们精确调控了器件的几何参数, 以实现可编程的形变响应行为。该器件在干燥状态下保持平展, 便于操作; 而在吸水后可转变为卷曲结构, 与神经表面紧密贴合, 无需缝合固定。其粘附力通过干态交联机制实现, 即使在神经弯曲或拉伸等动态状态下, 亦能保持稳定接触。该设计有效降低界面阻抗, 使神经调控可在仅 10 mV 的极低刺激阈值下实现。通过在卒中康复模型中进行迷走神经刺激实验, 进一步验证了该器件的功能, 展现出其在未来植入式神经调控治疗中的潜力。

参考文献

[1] R. Feiner, T. Dvir. Nat. Rev. Mater. 2017, 3, 1–16.

[2] Y. Liu, J. Liu, S. Chen, T. Lei, Y. Kim, S. Niu, H. Wang, X. Wang, A. M. Foudeh, J. B.-H. Tok, et al., Nat. Biomed. Eng. 2019, 3, 58–68.

[3] K.-I. Song, H. Seo, D. Seong, S. Kim, K. J. Yu, Y.-C. Kim, J. Kim, S. J. Kwon, H.-S. Han, I. Youn, et al., Nat. Commun. 2020, 11, 4195.

D13-O28

微生物驱动的功能活性水凝胶材料的设计与构建

袁羚峰^{1,2}, 刘吉^{1*}, 余子夷²

1. 南方科技大学
2. 南京工业大学

活体系统为工程活体材料的设计提供了灵感,然而现有大多数方法依赖静态支架,限制了结构随生长变化的可编程性。本文提出一种通过引导真菌菌丝体结构实现活体材料可编程生长的策略。我们开发了一种由包埋真菌孢子的水凝胶微粒组成的生物墨水,能够通过三维打印实现空间可控的沉积。这些微粒在初期为菌丝生长提供支撑与营养,随后被生长中的菌丝降解,从而形成无支架、自组织的真菌材料。通过调控空间限制、营养梯度与基质刚度,我们实现了对菌丝形态与生长方向的精确控制,建立了一种基于生长过程的材料编程模式。该研究表明,结构控制可直接源于生物生长过程,为构建具有适应性、可持续性与全活性的系统提供了通用的设计框架。

D13-O29

聚合物单体比例调控的凝胶抗冻性能

宋登科¹, 徐文龙^{1*}

1. 鲁东大学材料科学与工程系

水凝胶在寒冷环境下面临严重的冻结问题,这会破坏其机械性能和导电性,从而限制其在柔性电子器件和低温环境中的应用。本研究提出了一种创新策略,通过在二甲亚砜(DMSO)/水二元溶剂体系中精准调控聚合物单体比例,成功制备出具有优异抗冻性能的凝胶。通过固定丙烯酸(AA)和丙烯酰胺(AM)总单体质量不变,改变两者之间的比例,通过自由基共聚制备凝胶。DMSO/水组成的二元溶剂(最佳比例为质量比 7:3)通过破坏水的氢键网络抑制冰晶形成。通过拉曼光谱、低场核磁共振(NMR)和密度泛函理论(DFT)分析定量表征了结合水/自由水含量及氢键相互作用。通过压缩/拉伸测试和流变学测试评估了凝胶的机械性能,并在极端条件(-80 °C)下评估了凝胶的导电性和机械性能。增加 AA 浓度可增强聚合物链与水的氢键作用,提高结合水含量,抑制冰晶的形成,使凝固点降至-80 °C以下。优化后的最佳比例凝胶(AA:AM=3:7, DMSO:H₂O=7:3)表现出优异的压缩响应性(-80 °C下可以达到 80%应变)、对不同基底(木材、金属)具有一定的低温粘附性,以及在-20 °C条件下稳定的导电性。作为应变传感器,其在 1000 次压缩循环中保持稳定的信号输出。将该凝胶集成于机械夹具,通过形变-数字信号转换实现了在冷藏环境中对物体的精准识别,是冷链物流和低温柔性电子器件的理想候选材料。

D13-O30

高灵敏度生物传感器的开发及其用于生殖激素的监测

杨一凡^{1,2}, 施雪涛², 刘吉^{1*}

1. 南方科技大学
2. 华南理工大学

女性生殖激素的实时监测对于辅助生殖、健康评估具有重要意义,但现有检测手段普遍存在灵敏度不足、无法连续监测等问题。为此,本研究开发了一种基于电化学原理的高灵敏度生物传感器,专用于女性

生殖激素（如雌二醇）的动态检测。该传感器采用高特异性酶或适配体作为识别元件，结合纳米材料改性的电极表面和防污涂层技术，有效提升了传感器在复杂生物样本环境中的选择性与稳定性。电化学测试结果显示，该系统在 0–1000 pM 浓度范围内响应灵敏，抗干扰能力强，具备良好的重复性和线性关系。体内动物实验初步验证了其生物相容性与实时监测能力，为实现半植入式持续监测奠定了基础。未来研究将进一步拓展该材料体系在羊水成分监测、胎儿发育评估等领域的应用潜力。本研究展示了功能材料在生物传感器构建中的关键作用，为智能、微型化医疗器械的发展提供了新思路。

D13-O31

Self-assembled nanospheres mediate phototherapy and deliver CpG oligodeoxynucleotides to enhance cancer immunotherapy of breast cancer and melanoma

Guohui Yu^{1*}

1. Southern University of Science and Technology

2. Southern Medical University

In the tumor microenvironment (TME) in certain cancer patients, the lack of tumor-associated antigens (TAAs) and low antigen presentation ability of antigen-presenting cells (APCs) limit the systemic immune effect of immune checkpoint blockade (ICB) therapy, which fails to elicit a persistent immune response. In this study, we used an important immune adjuvant (CpG ODN) and a photosensitizer (ICG) with 808 nm laser irradiation to trigger photodynamic and photothermal responses to synthesize intertwining DNA-photosensitizer nanosphere (iDP-NS) that can resolve the aforementioned shortcomings of current therapies and, together with programmed cell death-ligand 1 (PD-L1) treatment, convert uninflamed “cold” tumors into “hot” tumors. Hybrid nanosphere-mediated dual-modality photothermal/photodynamic therapy can be used to release TAAs and deliver immunostimulatory CpG ODNs to dendritic cells. In this approach, enhanced antigen presentation and immune checkpoint blockade therapy synergistically reinitiate toxic T cell activity and amplify immune effects, which can produce a powerful immune response and eliminate tumors in breast cancer and melanoma animal models. Notably, we proved that iDP-NSs mediated photo-immune response combined with ICB therapy can effectively trigger long immune memory to inhibit tumor recurrence and metastasis in 4T1 postoperative model.

D13-O32

3D 打印植入式水凝胶生物电子及其电生理监测和调控

王福成¹, 吴凯², 刘吉^{1*}

1. 南方科技大学

2. 华南理工大学

导电聚合物具有优异的导电性和生物相容性，已成为构建植入式生物电子设备的重要材料之一。基于导电聚合物水凝胶的电子设备，特别是在电生理监测和多种疾病诊断领域，展现出巨大的应用潜力^[1-2]。然而，目前它们通常通过旋涂、丝网印刷或电化学沉积等传统技术制造，这些方法由于固有的二维制造限制、复杂的加工工艺以及高昂的成本，显著制约了其在先进植入式生物电子学中的创新和应用^[3-5]。为此，本研究开发了基于聚（3,4-乙撑二氧噻吩）：聚苯乙烯磺酸盐（PEDOT:PSS）的 3D 打印导电粘附水凝胶，具有卓越的直接墨水书写（DIW）3D 可打印性，具有生物组织和动态器官相近的机械顺应性以及形成无缝且坚固的生物界面的能力。使用 Langendorff 离体心脏灌注和健康或心律失常条件下的活体大鼠心脏模型进行了电生理学研究，突显了与动态器官建立保形生物界面的能力，从而可以进行长期、高精度的心外膜电生理监测。将多路电极阵列集成到 3D 打印水凝胶生物电子学中，可以绘制心电图信号的时空图，成功定位心脏组织中无法正常工作的部分。这些研究为改善生物电子学接口提供了一种有前景的策略，并为下一代生物电子学在医疗健康监测、诊断和治疗方面奠定基础。

D13-O33**Supramolecular-Polymer Double-Network Gels and Their Applications in Stretchable Energy Storage Devices**Chaonan Gu¹, Chun-Sen Liu^{1*}

1. Zhengzhou University of Light Industry

Despite significant progress in developing self-healing stretchable materials, fabricating autonomously self-healable and intrinsically stretchable energy storage devices is still highly challenging. Based on our previous work on supramolecular gels,¹ we further developed a series of supramolecular-polymer double-network (SP-DN) hydrogels exhibiting excellent stretchability, high conductivity, superior interfacial adhesion and wide temperature-tolerance. All these outstanding properties strongly recommend the application of SP-DN hydrogels as quasi-solid electrolytes for highly stretchable and wearable Zn–air batteries (ZABs).² Herein, an all-component self-bonding strategy is reported to obtain an all-eutectogel soft battery (AESB) that simultaneously achieves full-cell autonomous self-healability and omnidirectional intrinsic stretchability (>1000% areal strain) over a broad temperature range (–20~60 °C).³ Without requiring any external stimulus, the five-layered soft battery can efficiently recover both its mechanical and electrochemical performance at full-cell level. The developed AESB can be easily configured into various 3D architectures, presenting an excellent opportunity for the development of embodied energy technologies.

References

- [1] Li, J., Liu, C.-S., et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2022, 61, e202114471; *Angew. Chem. Int. Ed.* 2020, 59, 18768-18773; *J. Am. Chem. Soc.* 2025, 147, 17361–17371.
- [2] Li, J., Liu, C.-S., et al. *Energy Environ. Sci.* 2021, 14, 4451-4462; *Adv. Sci.* 2022, 9, 2200753.
- [3] Li, J., Liu, C.-S., et al. *Adv. Mater.* 2023, 35, 2208392.

D13--O34**Concentric ice-templating of ultra-compressible tough hydrogels with bioinspired circumferentially aligned architecture**Iek Man Lei^{1*}, Wenxi Gu¹

1. University of Macau

Materials with circumferentially aligned fibres, such as intervertebral discs and arteries, are abundant in nature but challenging to replicate artificially, despite their mechanical advantages. While ice-templating can create bioinspired materials, the achievable structures remain limited to simple forms, such as honeycomb, lamellar and radial structures. Here, we developed a new ice-templating technique that constructs circumferential fibrous structures in hydrogels for the first time through slow freezing^[1]. Enhanced with rotary compression annealing, these hydrogels exhibit record-breaking features that cannot concurrently be achieved in conventional ice-templated and top-performing tough hydrogels, including high tensile properties, ultra-compressibility (8% strain after 500 cycles), and extraordinary burst pressure of 1.6 bar, while maintaining 85 wt.% water content and acoustic transparency. These properties enable new opportunities in robotics, including hydrogel pneumatic grippers and an untethered bioinspired robotic fish that exhibits high-force actuation and long-term robustness. Our approach enriches the diversity of bioinspired structures in artificial materials, establishing novel mechanical properties through structural design. Considering the biomimetic structure-derived mechanical properties achieved with our hydrogels, future research could explore their potential in tissue engineering and bioengineering applications, such as artificial intervertebral discs and vascular grafts.

This work was supported by the Science and Technology Development Fund, Macau SAR (0119/2022/A3, 0009/2023/ITP1 and 0113/2024/RIB2), and the Research Grant from the University of Macau and the University of Macau Development Foundation (SRG2022-00038-FST and MYRG-GRG2023-00225-FST-UMDF).

Reference

[1] Gu, Wenxi, Shuqi Yang, Dazhe Zhao, Yiwei Zou, Chonghao Chen, Peiqi Niu, Xiangyu Liang, Chi Tat Kwok, Bingpu Zhou, Chunming Wang, Yan Yan Shery Huang, Ji Liu and Iek Man Lei. "Concentric ice-templating of ultra-compressible tough hydrogels with bioinspired circumferentially aligned architecture." Science Advances (In press).

D13-O35

促进椎间盘再生的超顺磁响应的细胞健身房：促进炎症微环境中内源性干细胞的募集、增殖和定向分化的远程驱动策略

薛博瑞¹，王朕果¹，黄景辉^{1*}

1. 空军军医大学西京医院

一、目的

髓核细胞的功能障碍是椎间盘退变的主要原因之一，近些年干细胞龛和髓核内源性干细胞（NPSCs）的发现为椎间盘原位修复提供了潜在策略，但是这种策略仍面临三大挑战，首先是如何将内源性干细胞募集至损伤区域，其次是内源性干细胞的数量和生物活性随年龄增长而显著降低，最后，椎间盘是免疫豁免器官，在变性过程中产生局部炎症风暴和氧化应激，严重影响干细胞的存活并限制其修复能力。因此，制定一种综合策略，能够靶向募集内源性干细胞，原位调控细胞命运，促进其增殖及定向分化，同时改善局部炎症微环境，对于促进椎间盘修复具有巨大潜力。

二、材料与方法

本研究将聚乙二醇/聚乙烯亚胺修饰的超顺磁性纳米颗粒（SPIONs）和适配体修饰的钯化氢纳米酶（PdH-Apt）掺入双网络聚丙烯酰胺/透明质酸（PAAm/HA）水凝胶中，设计了一种超顺磁响应的细胞“健身房”。在体外进行动态磁刺激（DMF），通过整合化学和物理信号，以募集内源性 NPSCs 并远程控制其细胞行为，从而促进椎间盘再生。

三、结果

磁性水凝胶中含有适配体 DB67，对髓核干细胞 NPSCs 的特异性膜配体 GD2 具有高亲和力，这使得内源性 NPSCs 从外围区域精确地吸引和募集到中心区域。此外，磁性水凝胶对无线动态磁场（DMF）表现出非凡的灵敏度，对招募的 NPSCs 施加微牛尺度的力，我们观察到磁致机械力促进细胞骨架重塑及 YAP 核易位，此外，NPSCs 响应动态磁机械力，产生独特 Ca^{2+} 震荡，最终激活下游信号通路，促进 NPSCs 增殖和分化。最后，PdH 纳米酶展示出类 CAT 和类 SOD 多酶活性，能够清除 $\text{O}_2^{\bullet-}$ 、 H_2O_2 和 $\bullet\text{OH}$ 等多种氧化应激分子，同时，显著增加了 CD206+/CD86- M2 巨噬细胞比例，从而改善微环境，为内源性椎间盘再生创造有利环境。

四、结论

我们提出了一种远程驱动策略，综合化学和物理线索，对再生过程实现时序性精确调控，有效促进椎间盘修复。这种策略不仅限于椎间盘修复，还能应用于其他退行性疾病，如骨关节炎和半月板损伤。

D13-O36

多尺度动态微结构凝胶促进组织再生修复

李子萌^{1*}

1. 浙江大学医学院附属口腔医院

牙周组织再生能力下降在重度牙周炎治疗中面临重大挑战，其主要原因在于炎症浸润的影响。近期研究证实，通过调控炎症微环境能够显著提升牙周组织再生效果。考虑到口腔环境具有高度流动性和半开放

性的特点，在牙周治疗中，维持凝胶材料的宏观结构稳定性成为构建有效干细胞微环境的关键基础。基于此，本研究创新性地提出采用多尺度动态微结构设计来保障干细胞微环境在牙周袋内的长期稳定。具体方案是：首先合成苯硼酸频那醇酯功能化的聚环糊精纳米颗粒，该材料能够对病理微环境产生响应；其次，这些纳米颗粒可与八臂客体分子通过主客体相互作用快速形成水凝胶。将层黏连蛋白肽和骨髓间充质干细胞负载于此体系中，即可制备出适用于炎症条件下组织修复的可注射水凝胶干细胞微环境。该智能体系能够感知病理环境变化，从最初的纳米交联水凝胶状态，自主转变为具有纳米-分子多级结构的动态主客体协同作用水凝胶系统。

D13-O37

Gels with switchable adhesion properties are used for wound healing

Zhihua Sha¹, Wei Cui^{1*}

1. Sichua University

Adhesive hydrogels exhibit significant potential in wound dressing applications; however, existing technologies face notable challenges: low-adhesion hydrogel dressings are prone to detachment, while high-adhesion counterparts cause secondary tissue injury upon removal, and both lack inherent disinfection capabilities. To address these issues, this study proposes a "dual-solvent-induced phase separation strategy for dual-component gels." Utilizing this strategy, we successfully prepared a self-disinfecting hydrogel with switchable adhesion properties. The hydrogel's adhesion demonstrates significant responsiveness to its internal solvent: it exhibits low adhesion when the solvent is water, effectively preventing secondary injury during removal, and switches to high adhesion when the solvent is 80%Vol ethanol, ensuring stable adherence while concurrently conferring excellent self-disinfection capabilities. Furthermore, the hydrogel material shows promising reusable potential. This work presents an intelligent hydrogel integrating switchable adhesion, autonomous disinfection, and reusability, offering novel insights and an effective solution for designing next-generation high-performance wound dressings.

D13-O38

基于反离子调控差异化金属离子配位策略多功能水凝胶的制备及时间依赖性加密与循环利用

顾相伶^{1*}

1. 德州学院健康医学院

水凝胶在柔性电子和智能传感领域的应用面临功能集成、环境适应性和可持续性等诸多挑战。本研究通过反离子调控的差异化金属离子配位策略，成功制备了多功能水凝胶（SP-Mn⁺ Xy⁻），实现了功能模块自由切换、高效回收和时间依赖性加密。该水凝胶以 SA-PAM 双网络为骨架，通过 Fe³⁺ 和 Ca²⁺（反离子为 Cl⁻ 或 Ac⁻）的差异化配位调控网络结构。研究发现，Fe³⁺ 因其高电荷密度和小离子半径表现出最强的配位能力，而 Ca²⁺ 的配位行为受反离子显著影响：CaCl₂ 中 Cl⁻ 的完全电离使 Ca²⁺ 快速配位形成致密网络，而 CaAc₂ 中 Ac⁻ 的弱电离特性实现了 Ca²⁺ 的受控释放，形成均匀网络。该水凝胶展现出卓越的综合性能：高拉伸强度（0.52 MPa）、宽传感范围（300%）、快速响应时间（114 ms）和优异的抗冻性（-20 °C）。通过 EDTA 螯合实现金属离子的可逆置换，水凝胶可在导电、粘附和传感等功能模块间高效切换，循环 5 次后性能衰减率低于 12.59%。此外，利用 Fe³⁺ 与 Ca²⁺ 的配位动力学差异，实现了时间依赖性颜色变化，为动态信息加密提供了新思路。基于其高电导率（15.1 S/m）和自粘附性（9.5 kPa），水凝胶可直接用作可穿戴传感器，成功应用于人体运动监测、语音识别和心电信号检测。本研究的创新性在于：提出反离子调控的差异化配位策略，实现了水凝胶性能的精准调控；开发了功能模块自由切换和高效循环利用的绿色制备方法；首次利用配位动力学差异实现时间依赖性信息加密。这项工作为多功能水凝胶的设计提供了新思路，推动了其在柔性电子、智能传感和信息加密等领域的应用。

D13-O39

面向海洋柔性传感的高性能离子导电凝胶材料创制

魏俊杰^{1*}

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

海洋战略的实施极大促进了潜水作业、水下无人勘探等海洋活动的发展，也对海洋柔性传感技术提出了迫切需求。离子导电凝胶因其独特的类生物结构与性能在柔性传感领域展现出了巨大潜力，但其本征的亲水特性严重限制了其海洋应用。为此，本人聚焦离子导电凝胶的网络结构设计，重点围绕离子导电凝胶在海洋传感应用中面临的结构失稳、信号衰弱、电源依赖等问题开展研究，并基于全疏水网络结构、Janus网络结构和双梯度异质结构等策略，在海洋长效稳定传感、高灵敏传感、自供电传感等方面取得了一系列成果。

D13-O40

基于疏水粘附弹性体原位封装策略构筑抗干燥、抗溶胀及强粘附水凝胶

朱唐^{1*}，朱才镇¹，徐坚¹

1. 深圳大学

针对传统水凝胶在实际应用中存在的易脱水、易溶胀和界面粘附性差等关键问题，提出一种基于表面受限共聚的疏水粘附弹性体原位封装策略。以丙烯酸正丁酯（BA）为“软”段，2,2,3,4,4,4-六氟丁基甲基丙烯酸酯（HFBMA）为“硬”段，调控共聚单体比例，在聚丙烯酰胺（PAAm）水凝胶表面原位构筑了透明、疏水、粘附的弹性体涂层 $P(B_2F_1)$ 。该弹性体表现出独特的链段自迁移特性，可为水凝胶实现多重功能协同。 $P(B_2F_1)$ 弹性体作为柔性保护屏障，有效减缓甚至阻碍水凝胶中的水分蒸发以及外部液体渗入，显著提高水凝胶的抗干燥及抗溶胀性能：在 25 °C、30 RH%环境中放置 7 天，水凝胶质量保持率高达 71.90%；在多种溶液（pH 3-10、海水等）中浸泡 180 天保持不溶胀。 $P(B_2F_1)$ 弹性体还赋予水凝胶普适性的粘附性：与玻璃的干态粘附强度达 165.25 kPa，与聚四氟乙烯（PTFE）的干态粘附强度达到 96.00 kPa，并且与多种基材保持较高的湿态粘附强度。得益于表面受限共聚策略及弹性体 $P(B_2F_1)$ 独特的自适应特性，水凝胶与弹性体表面出较好的界面强度：界面剥离强度（单位宽度的剥离力）高达 600 N m^{-1} ，在循环拉伸、压缩、弯折及扭曲实验中，弹性体与水凝胶始终保持强界面结合。该策略具有普适性，可应用于导电水凝胶表面封装，显著提升导电水凝胶在复杂环境（干燥及水下）中的稳定性。例如，在在 PAAm/碳纳米管（CNTs）导电水凝胶表面原位封装 $P(B_2F_1)$ 弹性体后，在空气/水下环境中均展现出卓越的传感稳定性；PDMAA/clay-LiCl水凝胶表面原位封装 $P(B_2F_1)$ 弹性体后可以实现长效、稳定的超声-电导响应。本研究为开发复杂环境下具有长效、稳定性能的水凝胶柔性传感器件提供了新思路，在柔性电子、深海探测及军事伪装领域具有重要应用前景。

D13-O41

高分子凝胶的光学性能调控：机理及潜在应用

乐晓霞^{1,2}，孙雨^{1,2}，吴越^{1,2}，沈莹^{1,2}，陈涛^{1,2*}

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 中国科学院大学

由于独特的动态性和环境适应性，刺激响应高分子凝胶可以根据特定的外界刺激（温度、pH 值、光、电场等），改变包括颜色、透明度或形状等的性质，从而在信息显示等前沿领域具有潜在应用价值。为此，我们分别构筑了刺激响应荧光凝胶和智能光子凝胶：从荧光单体的分子设计、微纳结构的可控构筑出发，创新了从离子印染/模块组装到光掩模辅助、喷墨打印的信息编码方式，实现了从单色荧光到多色荧光的动态信息显示，从二维平面到三维时间/空间、从单通道到多光学模式的多级信息显示。具体来说，我们设计了含有脲酶的荧光水凝胶，利用脲酶-尿素的催化反应，通过时间、空间维度的调控，实现多级信息安全的

保护；我们通过两步互穿技术构筑了一种水凝胶网络包含羰酰亚胺类荧光单体（DEAN）、油凝胶网络共聚螺吡喃类荧光单体（SP）的荧光油/水凝胶，结合紫外光刺激和时间维度的调控，我们实现了加密信息基于可控荧光共振能量转移过程（FRET）、荧光颜色从绿色到黄色再到红色的动态解密；我们构筑水刺激响应的荧光微凝胶，借助喷墨打印技术，实现荧光信息的加密-解密-校验；我们通过改变凝胶网络的构象，改变光子带隙，实现结构色的动态调控；我们提出互不干扰、独立可调结构和荧光颜色的双模水凝胶，通过编程设计在不同通道中分别显示双模式信息，并叠加读取最终信息。

D13-O42

X 射线刺激响应型水凝胶体系的研究及在生物医学领域的潜在应用

张海磊^{1*}

1. 河北大学

光交联反应是合成水凝胶的有效途径，其主要是利用高分子链中的光敏基团，或光引发剂，在光照作用下，发生交联，形成三维网络结构。如利用光交联反应高度可控的特点，在动物体内原位合成水凝胶，有望在深部组织修复，肿瘤栓塞治疗等领域取得进一步的应用。需要注意的是，光交联反应通常由紫外/可见光诱发，该区间的光波在生物组织中穿透性较差，这一缺陷严重限制了利用光交联反应，在动物体内等不透明密闭体系中进行水凝胶的原位合成。利用外界刺激诱导原位合成水凝胶，具有重要的意义，属于化学和材料领域的前沿研究课题。近年来，设计具有更高可控性的诱导途径是该领域的重点研究方向之一。X 射线激发长余辉发光材料是近年来引起国内外学者关注的新材料。该类材料可在低剂量 X 射线短暂照射下，终止外源激发后，仍可较长时间持续发光状态。X 射线在生物组织中具有很强的穿透性。我们利用 X 射线的强穿透性和 X 射线激发长余辉发光材料长时间发光的特点，将其与光引发剂混合，以液体状态介入动物体内，经短暂 X 射线照射后，利用余辉光原位引发光交联反应，在大鼠体内原位合成水凝胶。该方法中 X 射线照射时间短，剂量近似于临床诊断用剂量。该项研究通过简单介入方法在动物组织中引入水凝胶前驱体，原位完成液体向半固体的转变，该方式可有效降低手术植入等方式对动物组织的破坏性^[1-3]。

参考文献

[1] Hailei Zhang*, Nature Communications, 2024, 15: 2055.

[2] Hailei Zhang*, Nature Communications, 2024, 15: 3247.

[3] Hailei Zhang*, Journal of the American Chemical Society, 2025, DOI: 10.1021/jacs.4c14477

D13-O43

超分子聚合物凝胶柔性传感器

王宏英¹，杨建海^{1*}，刘文广¹

1. 天津大学材料科学与工程学院

柔性可穿戴传感器在离子皮肤、软体机器人和生理健康监测等领域得到了人们广泛的关注。凝胶材料具有可拉伸性、离子导电性以及多重刺激响应性等优点，在柔性可穿戴传感器领域具有很大的应用潜力。然而，大多数凝胶材料的力学性能和环境稳定性较差，并且灵敏度较低，这大大限制了其应用范围。我们通过改变聚合物侧链上的氢键基团和偶极基团制备了一系列超分子聚合物凝胶，展现出良好的力学性能、环境稳定性、应变传感和温度传感性能，基于此开发了高灵敏度的柔性应变传感器和温度检测传感器。

D13-O44

具有出色力学性能和高离子导电性的高熵离子导电弹性体

樊凯奇¹，刘开元¹，曹露馨¹，张晓静^{1*}

1. 郑州轻工业大学

针对聚低共熔类离子导电弹性体中力学与导电性能“此消彼长”的问题，本文提出了一种高熵离子导电弹性体策略。在我们之前开发的强氢键单体乙烯基磷酸基础上，引入羧基（丙烯酸、甲基丙烯酸、马来酸）、酰胺基（丙烯酰胺）、羟基（丙烯酸羟乙酯）等功能单体，与离子型氢键受体形成可聚合低共熔体系，再将单体引发聚合，制备键能梯度化的高熵离子导电弹性体。通过用高熵氢键网络取代传统的单一有序结构，利用多组分动态氢键的竞争和协同效应，建立了连续的断裂-重组能量耗散路径，同时提高了材料的强度（ $> 20 \text{ MPa}$ ）和韧性（ $> 120 \text{ MJ/m}^3$ ）。高熵网络的无序特性降低了离子迁移能垒，使离子导电性超越了传统材料的极限（ $> 10^{-3} \text{ S/m}$ ）。借助可聚合深共晶溶剂的灵活设计性，实现了对氢键网络构型熵的精确调控，为柔性电子器件提供了兼具高机械稳定性和优异导电性的固态基体材料。

D13-O45

创面微环境响应自适应治疗水凝胶敷料构建及其感染创面修复应用

杨雨桐¹、郭保林^{1*}

1. 西安交通大学

感染创面微环境存在多种复杂特征性生化线索的动态变化，针对细菌感染产生的特征性病理微环境，设计了能够响应创面微环境酸碱度、酶、氧含量等一系列微环境因素的智能自适应治疗水凝胶敷料，分别用于耐药菌感染创面修复、耐药菌感染运动创面修复以及耐药菌感染糖尿病创面修复。具体如下：（1）构建了多重刺激响应纳米酶基冷冻凝胶敷料，通过光热联合光动力级联一氧化氮可控释放，实现高效细菌生物膜清除；通过创面恢复生理微环境激活纳米酶的抗氧化类酶活性缓解氧化应激，促进感染创面自适应治疗^[1]。（2）设计了细菌响应自激活抗菌的自适应治疗水凝胶敷料，通过识别细菌产生的酸性代谢物和脂肪酶实现智能化抗菌，通过创面生理微环境的恢复自适应激活抗氧化活性和促血管再生性能，实现感染运动创面自适应治疗^[2]。（3）提出了感染糖尿病创面微环境响应的具有自切换类酶活性的程序化水凝胶设计新思路，利用创面高血糖水平，在不引入外源抗菌剂条件下催化葡萄糖分解产生反应活性氧抗菌，借助类酶催化加剧的缺氧微环境按需递送胰岛素降低血糖，在生理环境下自切换类酶催化活性，释放氧气缓解创面缺氧，促进感染糖尿病创面修复^[3]。（4）构建了可用于感染糖尿病创面和凝血障碍出血止血的一体化式多功能冷冻凝胶，通过物化联合的止血策略促进凝血障碍出血的出血控制；通过光热、去铁胺智能递送、类酶活性抗氧化和按需释氧的联合治疗策略加速感染糖尿病创面修复^[4]。

参考文献

[1] Yang YT, Guo BL*. *Advanced Functional Materials* 2023, 33 (31): 2214089.

[2] Yang YT, Guo BL*. *National Science Review* 2024, 11 (4): nwae044.

[3] Yang YT, Guo BL*. *Advanced Materials* 2025, 37: 2419158.

[4] Yang YT, Guo BL*. *Nano-Micro Letters* 2025, 17 (1): 171.

D13-O46

不可按压出血止血和促进组织修复水凝胶

李劭¹，郭保林^{1*}

1. 西安交通大学

聚焦于不可按压出血止血及促组织修复，申请人开展了如下工作：（1）基于高分子材料之间的双键自由基聚合、多巴胺在富含氨基高分子溶液中的氧化聚合等方式，利用低温冷冻凝胶化技术，开发了多种无序及内部微结构定制化冷冻凝胶用于不可按压出血止血。主要包括：①设计了兼具形状记忆及粘附性的两用冷冻凝胶止血胶带用于表面及深层次不可按压出血（*ACS Appl. Mater. Interfaces* 2020, 12(32): 35856-35872）；②设计了内部微结构定制化的导电性能增强形状记忆冷冻凝胶鼻塞用于鼻腔出血、出血监测及促黏膜修复（*Nano Today*, 2023, 48: 101720.）；（2）基于不同类型皮肤创面特有微环境（温度、高糖及pH），设计了多种刺激响应性水凝胶敷料用于促进多种类型的伤口修复。主要包括：①设计了形状记忆聚氨酯敷料，通过形状记忆及生物活性双重策略促进皮肤修复（*Chemical Engineering Journal*, 2019, 375, 121999）；②设计了温度诱导相转变收缩敷料，通过生物力学及生物活性双重策略促进皮肤修复（*Chem.*

Mater. 2020, 32(23): 9937-9953.); ③设计了集光热/光动力协同抗菌及 pH/葡萄糖响应药物智能释放一体化的水凝胶敷料用于促进感染糖尿病足愈合 (Adv. Funct. Mater. 2025, 35(9): 2416205.); ④设计了具有多重刺激响应性的纳米酶基冷冻凝胶用于促进感染创面愈合 (Adv. Funct. Mater. 2023, 33(31): 2214089)。基于以上研究工作, 申请人近五年以第一/共一作者身份在 Adv. Funct. Mater. (2 篇)、ACS Nano、Nano Today、Small、Chem. Mater.、Bioact. Mater.、Adv. Healthc. Mater.、Chem. Eng. J.、ACS Appl. Mater. Inter.等国际权威期刊上发表 SCI 论文 13 篇; 其中 6 篇论文为 ESI 高被引论文, 5 篇论文为 ESI 热点论文; SCI 他引 4100 余次, H 指数 17; 授权中国专利 2 项; 参与撰写的论文发表在 Nature Reviews Chemistry 顶级综述上; 发表于 Chemistry of Materials 期刊上的论文曾荣获 2022 年美国化学会 Chemistry of Materials Lectureship Award; 主持国家自然科学基金青年项目、中国博士后科学基金-面上项目, 陕西省自然科学基金青年项目、教育部重点实验室项目等 5 项国家及省部级课题。

D13-O47

原位正交光化学辅助多功能、可打印动态交联水性聚氨酯快速制备及性能研究

魏洪秋^{1*}

1. 西北大学

水性聚氨酯因其优异的环保特性、可调控的机械性能、优异的化学稳定性及耐候性等, 在过去数年中受到广泛研究关注。通过引入动态交联网络, 水性聚氨酯可实现能量耗散, 并对外部刺激产生动态响应, 从而衍生出自修复、形状记忆和可重构拓扑等智能行为。此外, 结合 3D 打印等新兴增材制造技术, 水性聚氨酯的结构设计更加灵活可定制, 这极大地拓展了其在柔性传感器、软机器人和生物电子等先进领域的应用潜力。然而, 如何实现兼具高强度、高韧性、多功能且可打印的动态交联水性聚氨酯 (DCWPU) 的高效快速构筑仍然是该领域所面临的一大挑战。本研究提出了一种基于可见光介导原位金属配位 (VSMC) 的简便通用策略, 用于制备高性能 DCWPU。该光化学反应策略通过可见光诱导乙二胺四乙酸盐 (EDTA 盐) 的光降解, 实现金属离子的快速可控释放, 同时正交引发自由基聚合反应。这种同步过程构建的均匀金属配位网络, 使 DCWPU 的拉伸应变、应力及韧性显著提升。此外, 金属配位网络的热可逆性进一步赋予材料多重智能特性, 包括形状记忆、形状可重构和自修复行为。VSMC 策略的高效性显著缩短了材料制备时间——其凝胶化时间可低至 5 秒, 这一特性极大提升了 DCWPU 的 3D 打印适性。基于上述优势, 本研究成功将 DCWPU 与增材制造技术结合, 展示了其在可定制化智能柔性器件中的应用潜力。

D13-O48

复合载药温敏水凝胶治疗角膜新生血管的疗效研究

王磊¹, 张丹², 黄道凯¹, 王文文³, 李玲俐^{2*}, 郝晓娟¹

1. 国科温州研究院 (温州生物材料与工程研究所)

2. 温州医科大学

3. 温州市中西医结合医院

角膜新生血管 (corneal neovascularization, CNV) 是致盲性眼病的关键病理环节, 临床缺乏兼具长效缓释与靶向治疗的滴眼液体系[1-3]。本研究设计了一种基于透明质酸-甲基纤维素 (HAMC) 的复合载药温敏水凝胶。以 VEGF 药物贝伐单抗 (BEV) 与抗炎药物地塞米松 (DEX) 为功能性药物, 制成复合载药滴眼液。通过温敏水凝胶的眼表黏附特性, 增加眼表滞留时间, 从而提高药物的生物利用度。以人脐静脉内皮细胞 (HUVEC) 为模型, 验证了该载药水凝胶体系对细胞迁移和血管形成的抑制作用。以大鼠碱烧伤构建 CNV 动物模型, 利用裂隙灯观察眼内炎症反应, 及新生血管形成情况, 病理组织学苏木精-伊红 (H&E) 染色观察角膜结构改变, 通过免疫荧光染色炎症因子 IL-1 β 、肌成纤维细胞标志物 α -SMA、血管内皮细胞标志物 CD-31, 分别评估治疗后角膜炎症表达情况。结果表明, 该载药温敏水凝胶成胶性能好, 成胶后机械性能稳定, 无细胞毒性。细胞培养显示载药温敏水凝胶具有抑制血管内皮细胞迁移作用。体内结果显示, 复合载药水凝胶治疗组的新生血管长度最短并且面积最小, 进一步证实了该复合载药水凝胶对 CNV 具

有良好的抑制效果。免疫荧光染色结果显示, 炎症因子 IL-1 β 、肌成纤维细胞标志物 α -SMA、血管内皮细胞标志物 CD-31 的表达显著下降, 验证了该复合载药水凝胶具有抗炎、抗瘢痕、抑制血管形成的效果。综上结果表明, 该载药温敏水凝胶有可能为角膜新生血管的防治提供新的治疗策略。

参考文献

- [1] Ł. Drzyzga, D. Śpiewak, M. Dorecka, D. Wyględowska-Promieńska, Available therapeutic options for corneal neovascularization: a review, *International Journal of Molecular Sciences* 25(10) (2024) 5479.
- [2] H. Xu, B. Mao, S. Ni, X. Xie, S. Tang, Y. Wang, X. Zan, Q. Zheng, W. Huang, Engineering matrix-free drug protein nanoparticles with promising penetration through biobarriers for treating corneal neovascularization, *ACS nano* 18(11) (2024) 8209-8228.
- [3] N. Lyu, Y. Zhao, J. Xiang, X. Fan, C. Huang, X. Sun, J. Xu, Z.P. Xu, J. Sun. Inhibiting corneal neovascularization by sustainably releasing anti-VEGF and anti-inflammation drugs from silica-thermogel nanohybrids, *Materials Science and Engineering: C* 128 (2021) 112274.

D13-O49

单向导液凝胶敷料

时连鑫^{1*}

1. 中国科学院理化技术研究所

伤口表面过量渗出液会导致伤口浸渍、粘连、愈合困难, 传统亲水敷料无法有效移除。以伤口快速愈合为导向, 聚焦敷料-伤口界面的渗出液输运问题, 报告人取得了系列研究进展: (1) 提出了基于非对称浸润性的单向导液自泵模型, 设计了基于点/面粘附、互锁结构、化学共价键结合等亲疏水层结合策略, 实现了高界面稳定性的生物流体单向输运; (2) 设计了系列基于取向孔道、仿生锥孔、分形孔道、多重分形孔道的导液模型, 实现快速、持续、高通量、高单向导液率的粘性生物流体的单向导出; (3) 发展了系列自泵敷料, 在猪、大鼠烧烫伤、糖尿病、感染等伤口模型实现促进毛囊、血管、真皮再生, 加速愈合, 揭示渗出液微环境主导的伤口愈合新机制。

D13-O50

高承载润滑 PVA/CS 纳米晶低熵水凝胶

胡丹丽¹, 刘德胜¹, 王晓龙^{1*}

1. 兰州化学物理研究所

水凝胶因其柔软湿滑特性和优异的生物相容性, 成为了理想的软骨替代材料之一。然而, 传统水凝胶在承受外部机械应力和长时间使用过程中面临着力学强度不足、缺乏润滑性和耐磨性等挑战, 这限制了其在一些高负荷和极端条件下的广泛应用。针对这些问题, 我们通过冻融、盐析、退火和再水化相结合策略, 构筑了一种具有双重物理交联网络的强韧湿滑聚乙烯醇/壳聚糖 (PVA/CS) 水凝胶。通过调节 PVA/CS 的比例和退火温度, 可调节该水凝胶的机械性能和润滑性能。其中在 550%应变时的拉伸强度约为 19 MPa, 拉伸弹性模量 11 MPa; 压缩模量高达 20 MPa, 小压缩应变 (39%) 下压缩强度为 11 MPa。在 30 N、1 Hz 和水作为润滑介质的摩擦工况条件下, PVA/CS 水凝胶的润滑性能接近天然软骨 (摩擦系数约为~0.05), 且具有长期稳定的润滑性能。另外, 我们提出了一种低熵纳米晶域网络调控策略, 即通过提高聚合物网络中 PVA 大分子链的百分比 (相对于 CS 的比例) 来诱导 PVA 链的结晶生长, 获得了具有低熵聚合物链态和高结晶度的 PVA/CS 水凝胶。调控优化的水凝胶在机械强度和润滑性能的双重提升, 压痕硬度为 10.4~21.7 MPa, 具有很好的润滑持久性且摩擦系数低至 0.026。同时, 借助模板浇铸构建了多种具有润滑功能的承重软组织替代物 (半月板、衬垫和关节软骨), 为高性能人工关节润滑材料的研发提供了新思路, 为生物医学工程领域仿生软骨水润滑涂层和生物植入物的研发提供了新的材料选择。

D13-O51

各向异性应力编程磁贴片的制备及其伤口抗纤维化应用研究

倪志鹏¹, 刘吉^{1*}

1. 南方科技大学

皮肤瘢痕以富含致密纤维的纤维化细胞外基质为特征, 且缺乏皮肤附属器, 往往在伤口愈合过程中成为永久性存在, 最终降低皮肤的强度和柔韧性, 导致永久性功能丧失。然而, 在各种皮肤损伤中, 瘢痕仍然不可避免, 几乎所有手术部位都会留下切口瘢痕, 特别是在经常承受高机械张力和皮肤拉伸的特定区域(如前胸、肩胛、腹部等)。越来越多的证据揭示了机械信号(关键因子、神经肽、细胞等)在诱导病理性瘢痕形成中的关键作用。适当的减张策略可显著降低手术切口张力, 从而达到预防瘢痕的目的。

皮肤的机械调控已成为一种有前景的瘢痕预防策略, 目前的标准治疗是使用缝合技术, 该技术能在有限程度上减轻伤口边缘及下方组织的张力。然而, 缝合技术存在点状闭合的局限性和缝合点周围的应力集中, 导致形成“蜈蚣样”瘢痕。近年来, 一系列具有机械调控功能的组织粘合剂已出现, 成为瘢痕管理中潜在优势的缝合辅助或替代方案。作为一种无创的主动干预策略, 它们能够在环境(温度、光等)或体液(水、葡萄糖等)触发下收缩伤口边缘的同时, 将力分散到更大的区域。然而, 这些触发因素处于动态变化状态, 导致收缩应力不稳定。此外, 与垂直于皮肤张力线(Langer 线或松弛皮肤张力线, RSTL)的切口相比, 平行于这些张力线的切口张力显著降低。减张策略必须综合考虑皮肤张力线和解剖位置, 以实现收缩方向的合理设计。然而, 由触发因素诱导的刺激响应材料的结构和体积变化受热力学-动力学耦合控制, 这意味着收缩方向通常是各向同性的且难以精确控制。单一的收缩模式和不稳定的机械应力分布限制了它们在减张治疗中更广泛的应用。

本研究受磁场作为触发源所具有的非接触性、精确可控性、快速响应性以及优异的环境适应性的启发, 提出了一种各向异性应力编程磁力贴片平台(MAP), 作为针对任意形状伤口的瘢痕预防治疗解决方案。该 MAP 由模块化磁驱动组件和组织粘合片段组成。根据伤口形状, 将具有已知磁化方向的模块化磁单元沿伤口边缘进行图案化排布。通过每个磁单元旋转的协同作用, 磁力贴片发生定制化形变。通过图案化设计, 该贴片可实现适应几乎所有形状伤口的个性化收缩需求。结合干交联机制, MAP 在伤口上实现了强韧且稳定的粘附。该方法通过将机械应力均匀分散到更大区域来缓解应力集中, 从而促进伤口边缘的应力均匀分布。这不仅加速了伤口愈合, 还有效预防了瘢痕形成。

D13-O52

仿生层级结构纳米复合水凝胶的设计及其极端抗冲击应用

谭云¹, 刘吉^{2*}

1. 新疆大学

2. 南方科技大学

极端抗冲击材料的开发在工程应用领域具有重要意义, 然而其发展始终受限于机械强度、韧性和能量耗散效率之间的固有矛盾。受自然界独特结构设计, 尤其是螳螂虾掠肢的强化结构和增韧机制启发, 我们通过协同整合聚合物弹性微球与酶诱导生物矿化技术, 开发出一种微球增强纳米复合水凝胶, 其具备良好的强度($> 3 \text{ MPa}$)、优异的断裂韧性(1500 J m^{-2})及突出的抗弹道冲击性能($> 1000 \text{ J m}^{-1}$), 彰显出在防护应用领域的巨大潜力。此外, 非线性数值模拟与理论分析阐明了准静态和高速冲击场景下的动态断裂机制, 揭示了裂纹偏转、微裂纹成核及能量再分布等关键增韧路径。该研究不仅深化了对仿生结构设计原理的基础认知, 更为新一代抗冲击材料建立了普适性的设计蓝图, 同时为聚合物复合材料在机械严苛场景中的应用开辟了新天地。

D13-O53

医用粘附水凝胶的制备及其应用

彭欣^{1*}

1. 中山大学

医用生物粘附材料有望粘附于组织与组织形成牢固粘附并发挥生物医学价值,然而其在临床使用中面临的几个关键问题:组织表面的界面水的干扰、动态的组织机械力、组织不规则表面等因素的限制。基于此,开发了多种具有湿粘附性能的生物粘附材料,并探索了它们在控制急性大出血、促进创面愈合、高效递送活性物质等领域的潜在应用。

[I]开发了通过吸水促进凝胶和组织紧密接触和牢固粘附的体系。基于聚乙烯亚胺(PEI)和聚丙烯酸(PAA)之间强静电/氢键作用和PEI树枝状结构制备了PEI/PAA高分子复合物,再将其冷冻干燥并碾碎,得到PEI/PAA粉剂。将粉剂喷涂到生物组织上,其能迅速吸收组织表面的液体在原位形成粘附水凝胶。基于该粉末衍生水凝胶牢固的粘附性能和优异的机械性能,其能对大鼠的胃穿孔进行密封并促进伤口的愈合(Sci. Adv. 2021, 7, eabe8739)。随后,向粘附粉剂添加季铵化壳聚糖,既能提高粉末吸血速率,又能吸附血细胞和血小板。因此,仅需喷洒该粉末、无需按压,就能对大鼠和猪的内脏急性大出血进行控制(Adv. Funct. Mater. 2021, 31, 2102583)。另外,利用溶剂挥发退火制备了聚乙烯基吡咯烷酮/没食子酸(PVP/GA)薄膜,将该薄膜置于舌下能快速吸收水分在原位形成水凝胶并与组织形成紧密的接触和牢固的粘附,高效地将葡萄糖通过舌下毛细血管递送至血液,利用无创地方式快速治疗新生儿低血糖(J. Control. Release 2024, 370, 643-652)。随后,将PVP/GA和乙基纤维素通过溶剂挥发退火方式整合,得到具有不对称化学成分和粘附性能的Janus薄膜,该薄膜能通过提供物理环境和调控伤口微环境加速大鼠口腔溃疡的愈合过程(Biomaterials 2025, 318, 123131)。另外,载有间充质干细胞的大孔水凝胶既能吸收脑出血部位的血液和积液,干细胞还能通过线粒体转移缓解炎症损伤,从而促进大鼠脑部受损组织的愈合(J. Control. Release 2024, 376, 231-240)。

[II]开发了通过排水促进凝胶和组织紧密接触和牢固粘附的体系。将聚乙烯亚胺(PEI)水溶液和硫辛酸(LA)粉末直接混合,两者在静电作用、氢键和疏水作用的驱动下形成PEI/LA凝聚层。随后,两者间的物理作用进一步增强,凝聚层自发地转化为水凝胶。PEI/LA凝聚层能有效地排开生物组织表面的液体,与其形成紧密的界面粘附;凝聚层转化为水凝胶,与组织通过“机械互锁”进一步增强湿粘附作用。随后,将装载有表皮生长因子的凝聚层涂抹在大鼠皮肤伤口,其能有效地促进伤口的愈合(Adv. Sci., 2022, 9, 2203890; Bioact. Mater. 2023, 30, 62-72)。

[III]开发了通过溶剂交换促进凝胶和组织紧密接触和牢固粘附的体系。将硫辛酸(LA)和没食子酸(GA)单体在乙醇中聚合得到了PLG粘合剂。其能利用溶剂交换策略处理界面水,促进凝胶-组织的界面锚定;同时,凝胶与组织能通过化学键和物理键结合促进两者间强湿粘附。PLG不仅可以通过乙醇消融有效杀死大部分肿瘤组织,还能牢固地粘附在原位向残余肿瘤持续释放化疗药物,实现高效的抗肿瘤效果(Adv. Sci., 2024, 9, 2203890)。

D13-O54

荧光/光敏水凝胶的设计开发和应用探索

黎朝^{1*}

1. 北京理工大学

荧光/光敏水凝胶兼具荧光/光敏(光致活性氧产生)物质和水凝胶的优势,是具有潜力的柔性生物相容性功能材料,在可穿戴信息存储和显示、创面治疗、传感检测等领域具有光明的应用前景。荧光功能的精准调控、光敏性能的提升、以及材料多功能的集成,是材料开发的关键问题。针对此,引入含分子内运动位点的荧光化合物,协同凝胶网络通过超分子作用控制荧光分子内运动,调控荧光强度,引入刺激响应性基团调控荧光颜色,通过给/吸电子结构设计结合纳米聚集受限策略赋予光敏性能;引入具规整网络结构水凝胶,提出单组分多功能策略,实现凝胶高力学性能和多功能集成;开发挤出-分步光交联方法构建大孔凝胶,与光敏纳米颗粒协同,提升光敏性能,并赋予材料免疫调节等多功能;结合信息、组织修复、航天生物医学知识和技术,探索水凝胶在可穿戴信息-传感、创面抗菌促愈合、空间生物医学检测领域的应用。

D13-O55

基于相分离亚稳态调控的智能凝胶材料构筑及应用研究

陈列¹, 刘明杰^{2*}

1. 中国农业大学
2. 北京航空航天大学

智能凝胶材料的功能实现高度依赖于其内部相分离行为的精准控制, 而相分离亚稳态调节是实现动态响应性的关键物理基础。该状态指凝胶体系处于热力学非平衡态但动力学可长期维持的中间相构型(例如微相分离形成的微纳米相区结构), 其介于均匀相与宏观相分离之间, 赋予材料可逆环境响应性、自适应机械性能及物质控释能力。但由于相分离亚稳态处于热力学的非平衡态, 因此对其进行控制向来不易。

上世纪 90 年代, 比利时的雨果伯格曼教授等人首次报道了高分子/溶剂二元混合物体系中, 由高分子玻璃化转变锁定相分离亚稳态的现象。彼时这种微区玻璃化锁定相分离的机制还仅限于高分子材料的微观结构与形貌调控。随后 Keller 教授等人则从高分子物理的角度系统总结了这一机制, 并阐明其在高分子溶液凝胶化中的作用与重要意义, 即相分离微区玻璃化所形成的物理交联凝胶体系。

时至今日, 随着生物科技的进步, 人们发现液-液相分离及其亚稳态在生命体无膜细胞器的形成与功能实现中随处可见, 间接引起了合成材料中相分离研究的浪潮。正是在此背景下, 我们聚焦于具有相分离行为智能高分子凝胶的设计制备与应用探索, (1) 提出了基于疏水与氢键协同作用调控凝胶相分离转变温度的作用机制; (2) 首次将 Berghmans 点拓展到高分子材料的设计中, 建立了基于微区玻璃化转变调控相分离亚稳态的策略, 并探索了所制备智能凝胶材料在可逆黏附、软体机器人、柔性驱动器等领域的应用。

D13-O56

主客体组装与分子滑环弹性体

贾永光^{1*}

1. 北京师范大学

滑环凝胶因其“滑轮效应”呈现出优异的抗疲劳性和韧性等力学性能, 在柔性器件等领域的应用中具有巨大的优势。然而, 目前滑环凝胶不但局限于 α -环糊精/聚乙二醇聚轮烷体系, 同时主体分子引入比例、主客体络合能力无法精准调控、制备繁琐, 严重阻碍了滑环凝胶应用的步伐。天然分子—胆酸分子由于优异的刚性骨架以及合适的亲疏水性可以与环糊精分子在水中组装成稳定的主客体单元^{1,2}, 该主客体组装体是构筑分子滑环水凝胶以及弹性体的优良单元³。本研究中将天然分子胆酸分子首尾两端引入丙烯酸酯基团合成客体分子与丙烯酸酯化的 β -环糊精主体分子组装成具有精准主客体络合比例的可聚合准轮烷。该准轮烷与丙烯酰胺原位光固化交联制备聚丙烯酰胺水凝胶。由于该凝胶网络中原位生成了众多 β -环糊精-石胆酸轮烷单元, 其拓扑结构中的轮烷单元作为交联点具有一定的滑动性, 因此该凝胶表现出了“滑环材料”优异抗疲劳性能和快速回复性能。循环拉伸实验中, 连续拉伸数千次后几乎没有表现出任何滞后和疲劳倾向。该类凝胶同时适合 3D 打印加工工艺制备导电的可穿戴应力传感器。实验结果都已经证明了胆酸类分子滑环在提高抗疲劳等力学性能方面以及在可穿戴柔性器件应用方面的巨大潜力和独特优势。与此同时, 我们还开发了基于此分子滑环的智能监测皮肤敷料、自修复聚氨酯弹性体、以及具有双网络结构的可编制导电纤维等应用器械^{4,5}。

参考文献

- [1] Yong-Guang Jia, et al., *Angewandte Chemie - International Edition* 2016, 55, 11979.
- [2] Yong-Guang Jia*, et al., *Acta Biomaterialia* 2020, 113, 84
- [3] Yong-Guang Jia*, et al., *Nature Communications* 2023, 14, 1331.
- [4] Yong-Guang Jia*, et al., *Materials Today Chemistry* 2023, 27, 101331.
- [5] Yong-Guang Jia*, et al., *Advanced Functional Materials* 2024, 2412565.

D13-O57

智能各向异性水凝胶

范文鑫^{1*}

1. 青岛大学

智能各向异性水凝胶因其局部区域间溶剂、抗衡离子与溶质化学势的差异，可实现对这些可移动物质的定向传输，从而展现出诸多独特的物理化学性质，在软体机器人、柔性可穿戴设备、渗透能收集、生物医学等领域均展现出了巨大的应用前景。近期工作中，在各向异性水凝胶致动器方面，基于聚电解质介导的水凝胶自收缩机制，开发了一种水凝胶基体内空间图案化内应力原位诱导策略，实现了 3D 各向异性水凝胶致动器的简单可控构建；在各向异性水凝胶应用方面，基于离子二极管界面电势损耗原理，构建了一种界面依赖型离子二极管基发电机。其可产生超大电流 ($\sim 5.22 \text{ A m}^{-2}$)，并伴随超长放电时间 ($> 400 \text{ s}$)。其电荷转移密度高达 $\sim 2.15 \times 10^5 \text{ mC m}^{-2}$ ，比传统 TENG 和 PENG 高 3 至 6 个数量级。同时结合其极低的内阻，二极管基纳米发电机可在超低频 (0.01 Hz) 压力刺激下产生高达 500 mW/m^2 的功率密度，为高性能柔性可穿戴发电机的构建提供了全新策略。

D13-O58

数据驱动的水下粘附凝胶设计

范海龙^{1,2*}, 龚剑萍²

1. 深圳大学
2. 北海道大学

人工智能驱动方法已成功应用于硬质材料（如晶体和高熵合金）的发现。然而，由于复杂和多尺度结构-性能关系，将其应用于软质材料仍然具有挑战性。本研究提出了一种数据驱动策略，通过整合生物数据库挖掘、可控合成和机器学习，加速开发高性能水下粘合凝胶。首先，通过挖掘粘附蛋白数据库，我们提取了特征序列特征用于指导水凝胶的设计。采用理想恒比共聚和相对组合策略，我们在合成水凝胶中统计学的复制了这些特征，从而在氨基酸特征序列分布保真度和合成之间取得了平衡。数据挖掘合成出的水凝胶形成高质量小规模数据集。基于此，我们建立了机器学习模型，利用初始数据集训练模型快速预测潜在高性能配方，并通过实验验证后反馈优化模型。最终，我们成功实现了兆帕级水下粘附强度的突破，较传统水下粘附凝胶提高了一个数量级。这些超强粘附水凝胶在生物医学和海洋开发等领域展现出广阔应用前景，标志着人工智能驱动软材料研究的重要突破。

D13-O59

水凝胶基环形反蛋白石结构光子晶体微粒的构筑 及其刺激响应行为研究

胡远渡^{*1}, 杜晓阳

1. 北京交通大学

胶体光子晶体微粒由于其在颜料、传感和防伪等领域的潜在应用背景而受到广泛研究关注。1 一般而言，胶体光子晶体微粒是通过以液滴为模版来制备的，由于球形液滴界面自由能最低化，所得到的光子晶体微粒一般呈现球形。2 近年来，有研究表明：非球形光子晶体微粒在一些方面比球形光子晶体微粒更有优势。3 在所有的非球形光子晶体微粒中，环形光子晶体微粒由于其独特的几何结构受到相当程度的关注。但已报道的环形光子晶体微粒均为胶体颗粒紧密堆积的蛋白石结构，这些胶体颗粒无刺激响应性而使所得环形光子晶体微粒缺乏刺激响应性，限制了这些微粒在传感等领域的应用。4-6 基于此，本研究将以 SiO_2 胶体颗粒为构筑单元，利用“咖啡环效应”在疏水表面上通过液滴挥发组装制备蛋白石结构的环形光子晶体微粒。在此基础上，通过对光子晶体微粒内部胶体颗粒间的间隙填充水凝胶前驱体单体如丙烯酸胺(AAm)、丙烯酸(AAc)和交联剂 $\text{N,N}'$ -亚甲基双丙烯酸胺(BIS)等，进一步光聚合和刻蚀 SiO_2 胶体颗粒模版，得到具有刺激响应性的聚-丙烯酸胺-共聚-丙烯酸水凝胶(pAAm-co-AAc)基反蛋白石结构环状光子晶体微粒。研究表明：所得反蛋白石结构环形光子晶体微粒具有良好的 pH 和醇响应性，且其比球形对应物具有更快的吸水膨胀和乙醇脱水收缩速率。这一研究为设计新型微传感器和药物递送工具提供了新的思路。

参考文献

- [1] Hueckel, T.; Hocky, G. M.; Palacci, J.; Sacanna, S., Ionic solids from common colloids. *Nature* 2020, 580(7804), 487-490.
- [2] Wang, J.; Liu, Y.; Bleyer, G.; Goerlitzer, E. S. A.; Englisch, S.; Przybilla, T.; Mbah, C. F.; Engel, M.; Spiecker, E.; Imaz, I.; Maspoch, D.; Vogel, N., Coloration in supraparticles assembled from polyhedral metal-organic framework particles. *Angew Chem Int Ed* 2022, 61 (16), e202117455.
- [3] Cai, L.; Zhao, C.; Chen, H.; Fan, L.; Zhao, Y.; Qian, X.; Chai, R., Suction-cup-inspired adhesive micromotors for drug delivery. *Adv Sci (Weinh)* 2022, 9 (1), e2103384.
- [4] Kawamura, A.; Kohri, M.; Yoshioka, S.; Taniguchi, T.; Kishikawa, K., Structural color tuning: mixing melanin-like particles with different diameters to create neutral colors. *Langmuir* 2017, 33 (15), 3824-3830.
- [5] Lu, Z.; Rezk, A.; Jativa, F.; Yeo, L.; Zhang, X., Dissolution dynamics of a suspension droplet in a binary solution for controlled nanoparticle assembly. *Nanoscale* 2017, 9 (36), 13441-13448.
- [6] Velev, O. D.; Lenhoff, A. M.; Kaler, E. W., A class of microstructured particles through colloidal crystallization. *Science* 2000, 287 (5461), 2240-3.

D13-O60

水塑性塑料的强韧化

侯磊^{1*}

1. 东华大学

塑料再加工是实现高效循环利用的便捷方式，其中水塑加工作为一种便捷的低能耗再加工方式，为塑料的可持续加工提供了新思路。目前已有研究通过水分子塑化作用成功实现了塑料室温成型，然而考虑到水塑加工过程中聚合物-聚合物、聚合物-水分子相互作用的竞争平衡，现有水塑性体系仍存在优异机械性能和便捷再加工性的制约关系，从而限制了相关材料的进一步发展和应用。

本论文基于抗溶胀超分子水凝胶的结构设计，开展水塑性塑料的强韧化研究：基于氢键调控策略构筑了高强韧甲基纤维素/聚甲基丙烯酸超分子类塑性水凝胶，并以此为基础制得兼具高强高模和水塑成型的“绿色”塑料(*Adv. Mater.* 2022, 34, 2201065)，进一步基于准无溶剂体系构筑了高性能和便捷加工的纤维素醚基可持续塑料(*Adv. Sci.* 2024, 11, 2405301)；基于多级相结构调控开发了一种在复杂水环境和空气中均具有极高强度和韧性的“两栖”聚合物材料(*Adv. Mater.* 2024, 36, 2307290)；基于水介导相分离演化策略，通过不同水合状态下材料机械性能与再加工特性的解耦，成功开发出兼具优异机械性能与室温可任意加工特性的水塑性塑料 (*Matter* 2025, 8, 102099)。相关研究为实际承重场景下高性能可持续塑料的设计提供了新思路。

D13-O61

基于水凝胶材料优化设计的个性化力学调控创面修复

刘灏^{1*}，徐峰¹

1. 西安交通大学

皮肤、口腔等创面的有效修复面临全球挑战。研究表明，力学因素可在创面修复中发挥关键作用，通过诱导细胞增殖、影响炎症反应、胶原沉积和血管生成促进修复。基于此，通过外部力学加载调控创面处的局部力学微环境、进而促进其收缩、愈合的技术，在近年来快速发展，但实际应用场景中，考虑创面具体生物力学特征的个性化力学调控仍未实现。为此，本研究开发一种可贴附于创面并提供可控力学加载的水凝胶力学调控贴片，并通过人工智能辅助其优化设计，以实现个性化的力学调控创面修复。具体地，通过图像分割算法提取创面生物力学特征（如反映力学性质的部位、尺寸），并由神经网络计算可使该创面产生最大程度收缩的水凝胶贴片设计参数（如模量、尺寸），以实现定制设计。按照优化的时间序列周期性更换贴片，并在更换时针对缺损部位实时特征进行贴片再设计。为方便使用，以上功能集成于“创面管

家” APP 中, 实现“缺损图像采集与特征识别-器件设计-使用指导”的闭环管理。该个性化力学调控创面修复技术的出色效果已通过糖尿病小鼠、猪等大小动物模型中得到验证, 展现出用于临床皮肤创面、口腔溃疡修复的转化潜力。

D13-O62

水凝胶水合状态调控及其功能化应用

鲁恒毅^{1*}

1. 中国科学院上海高等研究院

水凝胶材料的分子网化学组成、拓扑结构均可调, 这使得通过对其进行结构组分设计调节其水合状态成为可能。而不同的水合状态, 对应着不同的水分子运动行为, 及与水合行为相关的功能化应用(如水合润滑、选择性渗透、光驱动蒸发、空气吸水等)。通过构筑强水合凝胶微球、致密无孔结构水凝胶膜、超交联网络结构水凝胶膜、高分子/无机盐复合微凝胶等, 我们在分子尺度调控了材料的水合行为, 实现了新的功能和应用, 具体如下: 1) 通过引入两性离子单体增强聚合物水凝胶水合能力, 提升了凝胶微球润滑性能, 实现了关节软骨的磨损减缓; 2) 构筑了三维交联无孔凝胶结构, 利用液体渗透代替蒸汽扩散提升膜蒸馏水运输, 实现了水凝胶基光驱动膜蒸馏净水过程; 3) 构筑了超交联高分子凝胶网络, 通过超交联氢键水合网络截留 VOC 分子, 实现了含 VOC 废水的光驱动蒸馏净化; 4) 利用凝胶网络调控盐基吸附剂捕获水水合状态, 实现了盐基吸附剂的降焓蒸发脱附并阐明了降焓脱附机制, 显著提升了极端环境空气吸水性能。这些成果为水凝胶材料的设计构筑提供了科学与实验研究经验。

D13-O63

多功能强韧水凝胶网络构建及应用探索

陈红^{1*}

1. 四川大学

水凝胶因其高含水量和类组织柔软性, 在生物医学领域具有广阔的应用前景。然而, 传统水凝胶普遍存在力学性能不足、界面结合力弱及功能单一等问题。针对这些关键挑战, 我们从分子设计与网络结构调控出发, 系统构建了兼具力学强度与生物功能的双网络水凝胶体系。首先, 通过物理与化学交联的协同设计, 构建了具有高强度、高韧性和自恢复能力的杂化双网络水凝胶, 并揭示其在溶胀状态下韧性增强的结构机制。进一步地, 我们开发了纯物理交联的双网络体系, 实现了在保持优异力学性能的同时具备良好的自愈合特性。在此基础上, 结合界面相互作用调控我们实现了水凝胶与其他材料的强韧界面结合, 满足人机交互界面的应用需求。此外, 基于双网络结构优势, 我们赋予水凝胶持久的抗生物膜能力, 有效防止由于生物膜引起的设备失效与感染风险。以上研究为构建集强韧性、自适应界面和抗生物膜性能于一体的高性能水凝胶材料, 提供了新路径和理论支撑, 为其在智能医疗与生物界面领域的应用奠定了基础。

D13-O64

手性水凝胶神经导管促进周围神经损伤修复研究

窦晓秋^{1*}

1. 上海交通大学

施万细胞(SC)在外周神经再生中发挥关键作用, 其通过重编程转变为“修复性施万细胞”(rSC)表型。然而, 如何维持 rSC 的干细胞特性仍是极大挑战。手性作为调控细胞命运的基本因素, 其在施万细胞重编程中的潜在作用长期被忽视且认知匮乏。本研究受到施万细胞微环境中天然手性成分的启发, 通过 L/D-苯丙氨酸衍生物(L/D-Phe)在壳聚糖-明胶聚合物导管中的超分子自组装, 构建出手性水凝胶神经导管。研究发现, 水凝胶导管内右旋 L-Phe 纤维能通过胶原 IV-整合素 $\alpha 1 \beta 1$ 、MAPK 和 YAP/TAZ 信号通路增强胶原 IV 与 L-Phe 纤维间的立体选择性相互作用, 从而维持 rSC 的干细胞特性, 并最终激活施万细胞

重编程的关键调控因子 c-Jun 通路。在坐骨神经缺损大鼠模型中, L-Phe 水凝胶神经导管显著促进神经再生, 在组织学、电生理学和功能学评估中均展现出明显改善效果。该研究首次揭示了手性依赖的施万细胞重编程机制, 为开发新型神经再生材料提供了创新策略。

D13-O65

肌原纤维蛋白-离子液体基的水凝胶柔性传感器的构建及应用研究

陆妍妍^{1*}

1. 南京农业大学

近年来, 水凝胶因其优异的柔性、灵活性及生物相容性, 在柔性器件、电子皮肤、生物医学等领域有着广阔的应用前景。但纯的天然蛋白基凝胶机械性能差, 不能满足实际应用的需求。本研究报道了一种用于表皮电子的生物相容性肌原纤维蛋白(MP)基双网络导电水凝胶, 为克服传统传感器存在的生物安全限制和性能约束, 我们通过热诱导肌原纤维蛋白网络与氧化葡聚糖(ODex, 氧化度 90%)席夫碱反应动态交联, 以及海藻酸盐与 Ca^{2+} 离子交联形成稳定的“蛋盒”结构, 构建了层级化的双网络水凝胶。通过合理的分子设计将肌原纤维蛋白(MP)与离子液体(ILs)相结合, 策略性地引入 1-丁基-3-甲基咪唑氯盐([BMIM]Cl), 该水凝胶在保持与皮肤相匹配的力学性能的同时, 实现了卓越的离子电导率(0.23 S/m)。傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析表明 MP 的氨基与 ODex 的醛基形成酰胺键, MP 与 ILs 的咪唑基团之间的氢键相互作用。优化后的水凝胶表现出卓越的机械性能和应变响应特性(1~2 s), 能够直接粘附在皮肤上对细微或大幅度的人体活动进行精准地监测, 包括说话、吞咽等面部微表情, 以及手指不同角度的弯曲、手腕和手肘弯曲等。生物降解性研究表明, 经 11 天降解处理后其质量减少率达 80.84%; 体外细胞毒性评估证实了其优异的生物相容性(94%细胞存活率)。该水凝胶在柔性可穿戴设备、个人健康监测和软机器人等领域具有广泛的应用前景。

D13-O66

Pickering 乳液聚合设计及应用

张帆¹, 徐昆¹, 王丕新^{1*}

1. 中国科学院长春应用化学研究所

Pickering 乳液是以固体粒子代替传统小分子表面活性剂的新型乳液, 具有高乳液稳定性、无毒无害等独特优势。区别于传统小分子乳液聚合, 以 Pickering 乳液作为聚合模板可在聚合过程中天然引入固体粒子, 且引入的固体粒子形貌、粒径均可调节, 这对于制备多形貌聚合物微球、多尺度分布多孔材料均有正面影响。本工作的主要结果如下:

1. 温敏性 SNPs 用于循环 Pickering 乳液聚合: 此乳液在温度低于 SNPs 的低临界溶解温度(LCST)时可以保持乳化状态, 而在温度高于 LCST 时即会破乳, 当温度恢复到 LCST 以下时又可以再次乳化, 其优异的热响应性使此乳液体系具有出色的可循环聚合性能。聚合得到的树莓状的聚合物微球具有选择润湿性、高孔隙率以及分级微纳结构, 可同时实现 O/W 与 W/O 乳液的高效分离。

2. 温敏性开/闭孔可控转变凝胶材料用于智能电容器隔膜材料: 以 O/W 型 Pickering 高内相乳液为模板, 通过光引发聚合 N-丙基丙烯酰胺(NIPAM)制备结构可逆可控的多孔聚合物凝胶材料用于智能电容器隔膜。当温度升高, 材料的润湿性从亲水性变成疏水性; 同时, 其孔结构从开孔变成闭孔, 直接切断了电解液迁移的通道, 从而更快速的实现自我保护。

D13-O67

冲击硬化智能防护材料的合成与研究

黄晓娜¹, 徐昆², 王丕新^{2*}

1. 长春工业大学

2. 中国科学院长春应用化学研究所

智能材料, 如剪切增稠液 (STF) 和冲击硬化聚合物 (IHP), 因其独特的速率依赖性力学行为而被广泛研究为冲击防护材料, 使其动态刚度随着冲击速率的变化而变化。然而, STF 的流体性质和低稳定性限制了它们的长期使用和直接利用。IHP 材料一般具有冷流特性, 且在高速冲击下自身硬化故呈现出硬而脆的状态, 极易发生破碎, 不仅影响材料的使用寿命, 其使用安全性更受到威胁。本工作的主要结果如下:

双网络冲击硬化聚合物材料: 双网络弹性体包含作为牺牲单元的多重氢键、硼氧键以及 π - π 堆积的共价自适应网络 (CANs-M) 和作为稳态化学网络的聚氨酯 (TPU)。对于第一个网络, CANs 被用作可逆动态网络的主要部分, 能量耗散机制源于动态硼氧键可逆解离和重建, 并通过引入三聚氰胺, 引入多重氢键和 π - π 堆积, 以进一步耗散能量。选择坚固的 TPU 作为第二层网络, 赋予材料结构稳定性和优异的机械性能。引入 CANs-M 组分可以通过三聚氰胺形成可逆动态键来调控两相之间的微相分离尺度, 使其与简单的两相共混不同, 有望在防护材料中具有广阔的应用前景。

支化型冲击硬化聚合物复合材料: 通过将 2-氨基-4-羟基-6-甲基嘧啶 (UPy) 化学修饰到 IHP 的侧链, 得到具有支化结构的 UPy-IHP。将其与聚氨酯 (PU) 复合后, 得到支化型冲击硬化复合材料 UPy-IHP-PU。流变学测试结果证明了 UPy-IHP-PU 具有优秀的智能软硬转变能力, 可实现对外力敏感的冲击硬化和应变速率响应。除此之外, 通过改变 UPy 在聚氨酯相和 IHP 相内的含量来调控两相之间的微相分离尺度, 实现调控泊松比比值大小和应变窗口范围的目标, 为负泊松材料性能的调控这一难题提供了可行性思路。

D13-O68

高性能纳米复合导电水凝胶制备及其应变传感性能研究

辛月^{1*}

1. 五邑大学

高性能的纳米复合导电水凝胶应变传感器在可穿戴电子、健康医疗、人机交互和软体机器人等领域发挥重要作用。解决纳米复合导电水凝胶导电性、机械韧性、自愈性、复杂环境稳定性等多目标之间的平衡问题是该领域的关键挑战。我们通过简单的一锅聚合-还原技术制备了一种由聚 (N-丙烯酰基甘氨酸) (PNAGA) 和银纳米粒子 (Ag NPs) 组成的坚韧、高导电和抗溶胀的水凝胶 (PNAGA/Ag NPs)。硝酸银 (Ag NO₃) 在预聚液中的高溶解度促进了 Ag NPs 的有效掺入, 使 PNAGA/Ag NPs 水凝胶同时具有优异机械韧性 (3.32 MJ/m³) 和高电导率 (4.1 mS/cm)。PNAGA/Ag NPs 水凝胶可用于温度、压力和应变传感器并表现出优异的传感性能。此外, PNAGA 聚合物链上的双酰胺基团间强烈的双氢键作用赋予水凝胶良好的抗溶胀性能, 使 Ag NPs 在网络中可稳定存在超过 30 天而不扩散。最终, 该水凝胶应变传感器成功应用于水下通讯。在上述工作的基础上, 我们进一步采用液态金属粒子作为纳米导电填料, 创新性的引入水溶性淀粉作为液态金属粒子的界面修饰剂, 设计合成由 NAGA 和 AAm 在水-甘油二元溶剂内共聚形成的聚合物基质网络, 利用多级氢键相互作用, 制备了一种超韧、可自愈和极端环境耐受的液态金属 (LM) 复合有机水凝胶。由于强双氢键和弱单氢键的协同作用, 该有机水凝胶获得了 2.0±0.13 MPa 的拉伸强度和 16.0±1.0 MJ m⁻³ 的超高韧性, 以及理想的自愈性能力。该有机水凝胶应变传感器具有 15.08 的高应变系数和较大的检测范围 (0-1590%)。它成功应用于恶劣环境中的机械手势检测, 显示出优异的检测分辨率且在宽温度范围 (-20 至 50 °C) 内具有良好稳定性。这项工作为制备多功能 LM 复合凝胶提供了一条新途径, 在下一代可穿戴电子学显示出巨大的前景。

D13-O69

喜树碱手性纳米纤维触发焦亡增强免疫治疗

高凤丽¹, 冯传良^{1*}

1. 上海交通大学

喜树碱 (CPT) 作为一种广泛应用的化疗药物, 在癌症治疗中展现出巨大潜力。然而, CPT 分子本身存在水溶性差、生物利用度低及免疫应答激活不足等缺陷, 严重限制了其临床应用。为此, 本研究通过超分子自组装策略, 构建了具有右手螺旋手性的喜树碱纳米纤维 (CNF), 显著改善了其溶解性障碍, 并提

升了肿瘤免疫治疗效果。所构建的 CNF 具有较高的手性不对称因子 ($g_{\text{abs}} \sim 0.11$), 在弱酸性 (pH 6.5) 微环境中表现出良好的手性结构稳定性。进一步地, 通过将 CNF 与具备线粒体靶向能力的 DSPE-PEG-TPP 修饰后, 可实现其在癌细胞线粒体内的特异性富集, 诱导线粒体功能障碍。与游离 CPT 分子相比, 该体系能够产生 3.42 倍的活性氧 (ROS), 进而显著激活 caspase-1/gasdermin D (GSDMD) 信号通路, 诱导焦亡 (pyroptosis), 并促进 M1 型巨噬细胞极化和 CD8⁺ T 细胞介导的抗肿瘤免疫应答。在动物模型中, CNF 不仅显著抑制了原位肿瘤的生长, 其对远处肿瘤的抑制能力也较 CPT 分子提高了 1.8 倍, 同时有效减少了肿瘤转移。综上所述, 基于 CPT 构建手性纳米纤维的策略, 不仅为克服其临床应用瓶颈提供了新思路, 也为新一代免疫治疗平台的开发奠定了基础。

D13-O70

基于胆汁酸的分子水凝胶制备及形成机理研究

张猛^{1*}, 朱晓夏¹

北京师范大学

分子凝胶由小分子化合物在其过饱和溶液中通过自组装成一维纳米纤维并进一步缠结成三维网络而形成, 具有可逆相转变性能, 在细胞培养和组织工程等领域有良好的应用前景。目前对分子凝胶形成机制的理解尚十分缺乏, 使得分子凝胶的制备方法主要依靠试错法, 无规可循。如何指导分子凝胶剂的设计或预测特定分子化合物的成凝胶能力极具挑战性。针对上述挑战, 我们以天然生物分子胆汁酸及其衍生物为主要研究对象, 深入研究了分子凝胶形成过程中的物理化学相互作用, 揭示了凝胶剂分子结构与其成凝胶性能之间的联系, 进一步提出了临界微溶条件决定的分子凝胶形成机理。研究成果为分子凝胶的设计和制备提供一套理论指导模型, 对于发展新型功能分子凝胶体系以及推动分子凝胶的应用具有重要科学意义。

D13-O71

功能化微球保护器的丝素-透明质酸水凝胶促进糖尿病慢性创面修复

张家耀¹, 胡帆^{1*}

首都医科大学

糖尿病伤口治疗已成为全球医疗保健系统的重大挑战, 伤口的复发和愈合难题尤为突出。在此, 本课题针对糖尿病伤口复杂微环境, 制造了一种由丝素微球保护器、丝素蛋白和透明质酸组成的多功能水凝胶敷料。通过将葡萄糖氧化酶、过氧化氢酶固定在丝素微球中获得的微球保护器, 不管是在酸性、碱性、有机溶剂以及 60°C 高温环境下都可以保持非常高的活性。丝素蛋白独特的二级结构给予了水凝胶优异的力学性能。透明质酸的生物来源保障了水凝胶的生物安全性。这使水凝胶具有良好的可注射性、力学性能和组织黏附性。更重要的是, 该水凝胶能够针对糖尿病伤口高血糖、高 ROS 以及缺氧的微环境特点, 起到降低伤口组织的血糖和 ROS 并且生成氧气, 提供伤口愈合的有利环境, 极大促进了糖尿病伤口的愈合。本课题不仅在细胞水平上充分验证了该水凝胶敷料的功能特性, 并且通过糖尿病伤口动物模型, 验证了该水凝胶促进糖尿病伤口愈合的能力。这项研究不仅为糖尿病伤口的治疗提供了新的思路和策略, 也为未来相关疾病的治疗领域带来了希望和可能。

D13-O72

交联密度调控的 PVA/GA 水凝胶弛豫动力学与变形行为的关联机制

张婧祺¹, 乔吉超^{1*}

西北工业大学

水凝胶作为仿生组织工程、柔性电子及软体机器人的核心材料, 其动态力学行为的精准调控是突破材料功能化瓶颈的关键。然而, 化学与物理交联网络的协同作用如何通过时空尺度耦合机制主导水凝胶的弛豫动力学与变形响应, 仍是材料科学与力学领域的重大挑战。本研究借助于动态力学分析(DMA)系统研究

了不同交联密度（0.5wt%、1.0wt%、1.5wt%）PVA/GA 水凝胶的动态弛豫行为和蠕变力学性能。研究表明：交联密度对水凝胶的激活能与特征弛豫时间有显著影响。高交联度（1.5wt%）通过增强共价网络刚性抑制主链协同运动导致较高激活能，而低温高频下氢键解离主导的物理交联重组贡献较低激活能。基于蠕变实验，交联密度的增加缩短了结构松弛时间，但通过提升网络弹性恢复力促进协同恢复；退火处理则通过分子重排降低无序运动，减少能量耗散。应力增加通过加剧链段摩擦延缓恢复过程，而温度升高加速物理交联解离，增强粘弹性响应。揭示了弛豫动力学（时间依赖性）与变形行为（应力/温度依赖性）的内在关联，提出交联网络拓扑结构通过平衡刚性与自由度调控力学响应的机制。

D13-O73

多功能疏水缔合低共熔凝胶的构筑与传感应用研究

曾光^{1*}

广东海洋大学

近年来，低共熔凝胶材料因其具有高的离子电导率、卓越的环境稳定性以及良好的生物相容性，在柔性应变传感领域展现出重要的应用前景。尽管许多性能优异的低共熔凝胶被合成出来并应用与柔性传感器件，但将高韧性，高拉伸性，良好的自修复性能，优异的抗菌性能以及自粘附性能集中于单一低共熔凝胶仍然是一项挑战。基于此，本研究将具有儿茶酚基团的原儿茶酸引入到低共熔溶剂中，构筑氯化胆碱-原儿茶酸-水三元低共熔溶剂，同时采用十二烷基硫酸钠/甲基丙烯酸月桂酯共胶束为物理交联剂，丙烯酸为基础单体构筑疏水缔合低共熔凝胶。得益于凝胶中可逆的疏水缔合和氢键作用，该低共熔凝胶展现出优异的韧性（17.77 MJ/m³）、超高的断裂应变（4776%）及良好的自修复性能。此外，由于原儿茶酸与氯化胆碱的存在，该凝胶还表现出显著的自粘附性和抗菌性能。同时，归功于三元溶剂中强氢键相互作用，该凝胶具备出色的抗低温和抗干燥性能。基于该低共熔凝胶制备的柔性应变传感器具有高达 62.8 的灵敏系数和宽检测范围（3000%），在常温 and 低温环境下均能用于人体运动监测。本研究将推动多功能低共熔凝胶在柔性应变传感器领域的进一步发展。

D13-O74

光动态蜡凝胶的网络设计及应用探索

陈狄^{1,2*}

1. 浙江大学宁波国际科创中心

2. 浙江大学化学工程与生物工程学院

蜡来源广泛，性质稳定，已在许多领域展现出良好的应用前景。然而，蜡材料普遍呈脆性，力学韧性低，同时其结构成型依赖于模具或手工雕刻，难以实现结构的灵活制造。针对上述挑战，我们通过低极性光动态高分子网络设计，结合不同类型蜡的选择，制备了具有动态特性的蜡凝胶，在多个维度展现了其特性与功能，包括：（1）基于光引发动态键交换所引起的区域网络拓扑结构重排，诱导内部蜡的定点迁移，实现蜡材料微结构的高效制造与灵活调控；（2）基于相分离结构的设计，通过亲水相内的高密度氢键，实现蜡材料力学韧性的大幅度提升，最高达到 27.5 MJ/m³；（3）基于正交光控原理，在红外光引发蜡材料变形时，区域施加紫外光照固定形状，进而阻断区域的变形行为，实现蜡材料形状的按需控制，展现在软驱动器与电子电路控制中的应用潜力。总体上，我们结合蜡的高环境稳定性与相变特性，利用动态网络的光控能力，实现了高强蜡凝胶的制备与材料微观与宏观结构的高效、灵活控制。

D13-O75

基于溶菌酶-甘草酸纳米纤维稳定的 Pickering 乳液凝胶及其在糖尿病伤口愈合中的应用

于惠^{1*}

1. 国科温州研究院（温州生物材料与工程研究所）

开发能够高效清除活性氧(ROS)并促进组织再生的伤口敷料,是改善糖尿病慢性伤口愈合的关键挑战。本研究利用低浓度下天然中药活性分子甘草酸(Glycyrrhizic acid, GA)自组装形成的纳米纤维稳定 Pickering 乳液,通过引入微量天然酶溶菌酶(lysozyme, LZ)诱导油滴界面处的 GA 纳米纤维发生桥接与交联,成功制备了一种负载丹皮酚的 O/W 型中内相 Pickering 乳液凝胶。在该凝胶体系中,油滴被 GA 纳米纤维有效稳定,并进一步通过 LZ 诱导相邻油滴壳层的 GA 纳米纤维交联,形成以油滴为交联节点的三维凝胶网络。体外及细胞内 ROS 清除实验表明,该凝胶具有优异的抗氧化活性(体外 ROS 清除效率达 70%)。在糖尿病大鼠伤口模型中,该凝胶敷料显著加速了伤口闭合过程,并有效促进血管生成、胶原沉积以及调节炎症因子表达。因此,本研究提供了一种利用微量酶诱导低浓度中药分子协同自组装构建具有 ROS 清除和促愈合功能的 Pickering 乳液凝胶新策略,为开发高性能糖尿病伤口敷料开辟了新途径。

D13-O76

可降解水凝胶粘附涂层修饰猪小肠黏膜下层(SIS)补片材料

袁作楹^{1*}, 魏鹏飞², 景伟², 黄一谦²

1. 北京大学第三医院

2. 北京博辉瑞进生物科技有限公司

软组织损伤修复是临床医学的重大挑战。猪小肠黏膜下层(SIS)生物材料经数十年临床验证,其富含的细胞外胶原基质可快速促进组织长入与新生血管化,实现与周围组织的紧密长效整合,为患者提供更安全、高效的治疗选择。然而,当前手术补片的固定仍主要依赖缝线或吻合器,此过程不仅耗时,且易引发应力集中与继发性组织损伤。此外,缝线固定补片难以与组织共形整合,在植入早期为炎性细胞浸润提供冗余空间,可能促进植入物-组织界面纤维囊形成,引发感染、慢性疼痛等术后并发症。基于生物粘合剂的补片固定技术为无缝创面闭合提供可能,但现有商用生物胶(如 TISSEEL、COSEAL)存在基质韧性及粘附强度不足问题,易导致粘附失效。因此,实现外科补片与组织的强效粘附是避免继发损伤、减轻炎症反应、降低并发症及提升手术成功率的迫切需求。

本研究构建了两类突破性自粘合 SIS 补片体系:通过将甲基丙烯酰化明胶(GelMA)水凝胶网络与天然小肠黏膜下层(SIS)网状纤维进行宏观拓扑缠结,继而浸于多功能氢键供体(单宁酸,TA)溶液,构建了水凝胶-补片复合材料(G/SIS-TA)。TA 分子中的多酚基团赋予材料优异的湿态粘附性(剪切强度 60 kPa)、抗氧化及抗菌性能,同时保留 SIS 的生物降解性和促再生功能,G/SIS-TA 显著降低感染腹腔和感染创面细菌负荷,促进巨噬细胞向抗炎 M2 表型极化,并通过激活 PI3K-Akt 通路加速感染大鼠创面愈合。针对软组织缺损修复的临床需求,本研究进一步构建了具有强界面粘附力的可降解 SIS 补片(A-SIS)。通过在 SIS 补片表面原位聚合水凝胶粘附层实现无缝植入(剪切强度 123 kPa),该粘附层由壳聚糖与 N-羟基琥珀酰亚胺酯接枝的聚丙烯酸(PAA-NHS ester)经 N,N'-双(丙烯酰)脲胺(BACA)交联制备。动物实验表明,A-SIS 在大鼠腹壁缺损模型中展现出快速组织整合能力,减少炎症反应,其降解速率与组织再生同步,且无需缝合操作。此外,A-SIS 也显著促进糖尿病大鼠和猪模型的创面愈合。本研究通过整合多重生物活性与力学适配性,为复杂软组织缺损修复提供了兼具即时固定与长效再生的创新解决方案,推动了 SIS 基生物材料在临床中的应用潜力。

D13-O77

先进功能水凝胶及其传感防粘附性能研究

徐秀彬^{1*}

1. 广州大学

水凝胶含有大量的水分,具有重量轻、生物相容性好、杨氏模量低等诸多优点,接近人体皮肤。我们制备了壳聚糖基水凝胶、环糊精基拓扑水凝胶等多种水凝胶,表现出优异的拉伸能力和坚韧的性能。这些水凝胶可用作柔性应变传感器、自修复材料、荧光基材以及防污涂层。针对止血材料可以在取出时快速控制出血而不会造成二次损伤或剧烈疼痛,在急性创伤治疗和急救用品中的需求越来越大的需求,我们进一

步在医用纱布上制备了动态有机硅水凝胶涂层,实现快速止血和抗血液粘附的双重特性。有机硅水凝胶可通过简易的溶液处理方法,在医用纱布纤维上自发形成定向交联的水凝胶网络结构,从而实现宏观超疏水性和微观超滑,显示了优异的伤口低剥离力和抗血粘附力。

D13-O78

水分子诱导超强湿粘附凝胶

于振川^{1*}

1. 青岛大学

基于凝胶材料的柔性传感器在水环境中面临着粘接强度低、界面结合能力弱的问题。近年来,虽然利用仿生策略和疏水聚合物实现了水下粘附,但凝胶在粘附的过程中仍面临界面适应性与力学强度之间的矛盾,限制了其水下粘附性能。我们报道了一种水致硬化水下离子凝胶胶粘剂,能够协调凝胶界面结合能力和内聚强度的矛盾。该胶粘剂含有亲疏水单元,允许其在柔软状态下自适应粘附在粗糙表面。另外,聚合物链之间的强相互作用可以被水分子原位激活,引起相分离,提高粘合剂的机械强度。因此,离子凝胶在水下能够同时实现强界面粘和高内聚强度,克服了水下粘合过程中的“粘合悖论”。在水分子的作用下,凝胶的模量增加了5倍,并且具有 1500 J m^{-2} 的超高水下界面韧性。在此基础上,还开发出了新型水下人机界面,如柔性传感器、生物电极等,具有应用在水下作业和海洋勘探领域的潜力。

D13-O79

多功能水凝胶蒸发材料的设计制备、系统构建与污染物协同处理

李政¹, 卢宝阳^{2*}

1. 东华理工大学

2. 江西科技师范大学

太阳能蒸发技术因其低能耗和可持续性,在海水淡化和废水净化方面具有巨大的前景。然而,水体中存在的有机污染物和毒性重金属离子难以去除,且器件蒸发性能受限难以系统级集成等问题,制约了其进一步发展。在前期研究基础之上^[1-3],研究围绕水凝胶双功能界面蒸发材料、光热增强离子吸附蒸发器及海水淡化-农业种植一体化系统的构建与应用,取得以下成果:

(1) 提出了一种表面功能化双交联策略,将 TiO_2 经多巴胺修饰后构建核壳结构 $\text{TiO}_2@\text{C}$ 双功能纳米材料,开发了兼具光热转换与光催化降解功能的水凝胶太阳能蒸发器。在一个太阳光下有机污染物的光降解效率为84.37%,实现了界面蒸发和有机污染物降解的功能集成(Desalination, 2025, 611, 118920)。

(2) 设计制备了一种粘土基掺杂的离子吸附多孔水凝胶蒸发器(KCAH),实现了一个太阳条件下界面蒸发速率 $2.74\text{ kg m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ 和对重金属离子 94.5 mg g^{-1} 的吸附容量,户外测试进一步验证了其在光热驱动净水与水体中重金属离子去除方面的优异性能(Separation and Purification Technology 2025, 354, 129243)。

(3) 构建了一个模块化的集成蒸发脱盐-作物灌溉双功能系统,实现了高效的海水淡化和净水收集性能,系统淡水收集量达到了 $7.54\text{ L m}^{-2}\text{ day}^{-1}$,显著促进了种子发芽率和植物的生长活性。为沿海和干旱地区基于海水的智能农业系统开发提供了可扩展的途径,以应对水安全和粮食挑战(Chemical Engineering Journal, In revision)。

[1] Qi Zhao, Xinye, Xu, et al., Separation and Purification Technology 300 (2022) 121889.

[2] Qi Zhao, Xinye, Xu, et al., Chemical Engineering Journal 442 (2022) 136284.

[3] Xinye Xu, Qi Zhao, et al., Desalination 577 (2024) 117400.

D13-O80

PEDOT:PSS 基抗汗强粘附表面肌电极的设计及其肌电信号记录

张博¹, 万荣泰¹, 卢宝阳^{1*}

1. 江西科技师范大学

PEDOT:PSS 水凝胶基表面肌电极凭借其组织柔韧性、优异导电性和生物相容性,在康复医学、体育科学等多个领域展现出广泛的应用价值^[1,2]。然而,现有 PEDOT:PSS 水凝胶基肌电极在实际应用中仍面临挑战:汗腺和皮脂分泌导致的生理环境变化会引起电极无法牢固粘附在皮肤表面,严重影响其对人体电生理信号稳定采集^[3]。基于前期在 PEDOT:PSS 水凝胶生物电子领域的工作基础^[4,5],本研究开发了一种抗汗强粘附水凝胶新材料,实现了在水/油介质中稳定粘附,并将其应用于湿润皮肤组织的肌电信号稳定记录。具体内容简述如下:

(1) 水凝胶新材料制备:针对表面肌电极在湿润界面粘附失效的问题,本研究提出了一种亲/疏水聚合物链分布调控策略,通过调控疏水性甲基丙烯酸十八烷基酯(OMA)聚合物链与亲水性丙烯酸(AA)聚合物链在水凝胶表面分布,开发了一种具有抗汗强粘附的水凝胶新材料(PAO)。

(2) 在 PAO 水凝胶网络中引入 PEDOT:PSS 导电颗粒构建导电网络,形成双网络结构水凝胶(PPAO-DN)。PAOP-DN 水凝胶展现了良好的电学性能(电导率 $>2.8 \text{ S/m}$);其在干燥环境下粘附强度 $>147 \text{ kPa}$,并能在水/油介质中保持稳定粘附(湿态粘附强度 $>187 \text{ kPa}$),使其能与湿润、动态的生物组织表面形成稳定的界面粘附。

(3) 基于 PAOP-DN 水凝胶构建的表面肌电极,凭借其亲/疏水聚合物链的界面分布调控,可有效抵御汗液对电极-皮肤界面的干扰,实现高信噪比(SNR)且稳定的肌电信号记录。这种基于亲/疏水聚合物链分布的调控策略,为在湿润皮肤表面实现高质量肌电信号采集提供了解决方案。因此,本工作不仅为高性能生物电子接口的发展提供了新思路,也为健康监测和表皮生物电子等领域开发了具有实际应用潜力的 PEDOT:PSS 水凝胶基导电生物粘附界面材料。

参考文献

- [1] Yuk H#, Lu B#, Zhao X, Chem. Soc. Rev., 2019, 48, 1642.
- [2] Yuk H#, Lu B#, Zhao X, et al., Nat. Commun., 2020, 11, 1604.
- [3] Ma H#, Hou J#, Lu B*, et al., J. Colloid Interface Sci., 2024, 654, 639-648.
- [4] Wan R#, Yu J#, Lu B*, et al., Chem. Eng. J., 2024, 490, 151454.
- [5] Wan R#, Liu S#, Xu J*, et al., J. Colloid Interface Sci., 2025, 677, 198-207.

D13-O81

高性能复合水凝胶基太阳能水蒸发器设计及其含氟废水高值化处理

邱子阳¹, 杨汉珺¹, 卢宝阳^{1*}

1. 江西科技师范大学

太阳能界面蒸发技术有望实现光伏产业中含氟废水处理问题。然而,界面蒸发材料仍然面临着氟离子高效去除的问题,这限制了其在含氟废水中的应用。因此为了实现界面蒸发技术在含氟废水中的高值化应用,本工作^[1]基于前期在水凝胶太阳能界面蒸发领域的研究基础^[2-3],提出了界面蒸发耦合氟离子吸附双功能协同策略,设计并合成了系列高性能复合水凝胶基太阳能蒸发器,探索了其在含氟废水中的应用效果。主要研究内容及结果如下:

(1) 通过化学交联-冻融循环策略,设计合成了一种石墨/聚乙烯醇(PVA)复合水凝胶太阳能蒸发器。该蒸发器在 1 kW m^{-2} 标准光照下,其蒸发速率为 $2.43 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$,能量转换效率为 91.9%,并初步验证了其在模拟含氟废水中的应用潜力。

(2) 基于 La 与 F 的强化学亲和力特性,设计合成了一种兼具贯通孔道与高密度 La 位点的 La- γ -MnO₂/CMCS 复合水凝胶。该蒸发器在 1 kW m^{-2} 标准光照下实现了高效蒸发性能及在实际使用中保持长期稳定性,进一步探索了其在多成分模拟含氟废水中的使用效果。

(3) 对开发的系列高性能复合水凝胶基太阳能蒸发器进行光伏产业含氟废水应用探究,实现了氟离子的高效吸附(F-浓度从 5 mg L^{-1} 显著降至 0.612 mg L^{-1} ,远低于 WHO 限值),并通过脱附再生实现氟资源的高效回收,展现出其在含氟废水中具有高值化处理应用能力。

本工作实现了界面蒸发耦合氟离子吸附双功能协同增强,为含氟废水的处理提供了一种太阳能界面蒸发的绿色处理新思路,同时有望进一步提升其含氟废水净化能力及氟回收效率,并投入实际使用。

References

- [1] Ziyang Qiu, Hanjun Yang, Journal of Polymer Materials 41 (2024) 329-340.
[2] Zheng Li, Junxiao Qiu, et al., Separation and Purification Technology 354 (2024) 129243.
[3] Junxiao Qiu, Xinye Xu, et al., Nano Energy 130 (2024) 110057.

D13-O82

高性能复合水凝胶应变传感器的设计及其多维人体运动监测

林雨¹, 卢宝阳^{1*}

1. 江西科技师范大学

导电聚合物水凝胶因其类皮肤柔软性和生物相容性,使其在可穿戴监测、应变传感、人机交互等领域具有广阔的应用前景^[1,2]。然而,目前导电聚合物水凝胶^[3,4]仍存在力学适配性与电学稳定性难协同的问题,严重限制其实际应用。为了克服以上科学挑战,本研究^[5]通过构建半互穿交联网络结构,开发了一种 PEDOT:PSS-P(HEMA-co-AA)复合水凝胶基高性能应变传感器,实现了力-电性能的协同提升,并将其应用于人体运动监测,具体内容及结果简述如下:

(1) 提出了共价交联网络与导电网络协同构筑策略, HEMA 和 AA 单体经自由基聚合、化学交联形成致密的三维网络结构,同时,HEMA 中的羟基与 AA 中的羧基间的氢键相互作用进一步稳定水凝胶网络。并加入 PEDOT:PSS 分散于 P(HEMA-co-AA)网络中,通过 $\pi-\pi$ 相互作用构建连续导电通路,显著提升水凝胶的电导性能。

(2) 该水凝胶兼具优异的力学性能与电学性能,表现出高拉伸性(195%)和出色的循环稳定性(50%应变下拉伸 1000 圈)。水凝胶在不同应变范围内均保持良好的电学响应与稳定性,展现出快速响应速度(0.20 s)和优异的应变响应灵敏度($GF=1.28$),满足人体运动检测的需要。

(3) 所制备的应变传感器成功实现了大幅度运动和微表情(如关节弯曲、手指弯曲、微笑等)的实时监测,输出信号稳定、可重复、灵敏度高,展示出在可穿戴健康监测设备、人机交互等领域的广泛应用潜力。

综上所述,本工作在导电水凝胶结构优化、力-电学性能平衡及功能集成应用等方面取得了积极进展,为应用于可穿戴电子设备的高性能柔性传感器材料开辟新思路。

参考文献

- [1] Zhang Z, Lu B*, et al., Adv. Funct. Mater., 2023, 33: 2305705.
[2] Wang L, Lu B*, et al., Carbohydr. Polym., 2025, 364: 123753.
[3] Li H, Lu B*, et al., Adv. Funct., 2025, 37: 2415151.
[4] Yu J, Lu B*, et al., Small, 2024, 20: 2308778.
[5] Lin Y, Liu X*, et al., Synth. Met., 2025, 311: 117835.

D13-O83

3D 打印负载羊膜干细胞水凝胶生物支架及感染型骨缺损修复

周思晗¹, 卢宝阳^{1*}

江西科技师范大学

创伤、肿瘤和感染等疾病常常导致不规则的骨缺损,这些缺损对临床治疗提出了巨大挑战^[1]。现有骨组织替代材料植入过程中细菌感染风险极高以致愈合延迟^[2]。本研究开发了一种生物墨水,由甲基丙烯酸酯化明胶/甲基丙烯酸酯化透明质酸/羟基磷灰石(GelMA/HAMA/HAP)组成仿生骨基质成分,以模拟天然骨的性能;同时缓释万古霉素(Van)提供长效抗菌防护,高增殖、强分化及抗炎特性的人羊膜干细胞(hA-MSCs)也负载其中^[3];结合 3D 打印技术,以期构建高效抗菌与促骨再生双重功能的生物支架^[4-5]。具体研究内容如下:

(1) Van@GHP 生物支架的制备及表征。以 GelMA、HAMA、HAP 和 Van 为原料,通过 3D 打印技

术构建了负载 Van 的 GelMA/HAMA/HAP 生物支架（简称 Van@GHP）。对 Van@GHP 进行了全面的理化性能表征，包括支架多孔结构、形貌、元素分布、压缩性能（抗压强度和压缩模量为 1.01 MPa/0.34 MPa）、长期降解性能（42 D 后仍剩余 $42.63 \pm 2.31\%$ ）和药物缓释行为（第 14 天的累积释药量为 $67.59 \pm 1.73\%$ ）。

（2）负载 hA-MSCs 的 Van@GHP 体外生物活性和抗菌性能研究。通过 CCK-8 细胞活性和活/死染色评估其具有良好的生物相容性，促进细胞黏附和增殖。同时以金黄色葡萄球菌和大肠杆菌为细菌模型，通过抑菌圈、活细菌/死细菌染色和细菌计数测定表明 hA-MSCs/Van@GHP 的高效抑菌能力。

综上，本研究通过 3D 打印技术成功制备了在感染环境下发挥成骨和抗菌作用的 hA-MSCs/Van@GHP 水凝胶生物支架，在体外表现出良好的生物相容性和高效抗菌能力，未来可应用在感染型小鼠颅骨缺损模型中验证其骨再生效果，为临床治疗提供新的思路。

参考文献

- [1] Yafei Han, et al. Bioactive Materials 2024, 35, 1-16.
- [2] Huaiyuan Zhang, et al. Journal of Nanobiotechnology 2025, 23, 257.
- [3] Bonomi Arianna, et al. Stem cell research & therapy 2015, 6, 1-10.
- [4] Jiawen Yu, et al. Chemistry of Materials 2023, 35, 5936-5944.
- [5] Jiawen Yu, et al. Small 2024, 20, 2308778.

D13-O84

超支化拓扑交联高强韧导电聚合物水凝胶应变传感器设计及运动监测

滕娟¹, 李海¹, 卢宝阳^{1*}

1. 江西科技师范大学

导电聚合物水凝胶应变传感器在健康监测、软体机器人等领域显示出巨大的潜力^[1-3]。然而，传统的导电聚合物水凝胶存在强度低、韧性差等问题，限制其实际应用^[4]。为此，本研究^[5]以端氨基超支化聚酰胺（HBPN）为动态非共价交联中心，设计并制备了一种高强韧的 HBPN-PVA-PEDOT:PSS 导电聚合物水凝胶应变传感器，系统研究了其性能，并验证了该传感器在人体运动监测中的应用效果。主要内容如下：

（1）将 HBPN 作为物理交联剂引入水凝胶网络中，利用其超支化拓扑结构与多氨基官能团形成丰富的物理交联点，协同构建高密度交联网络，显著增强能量耗散能力，赋予水凝胶优异的力学强度（583 kPa）、断裂韧性（ 991.53 kJ/m^3 ）、高承载能力（0.02 g 水凝胶可承受 1 kg 重量）及抗穿刺性能。

（2）构建了基于端氨基超支化聚酰胺交联导电聚合物水凝胶应变传感器，其具有良好的灵敏度（GF=1.88），快速响应（响应时间 670 ms，恢复时间 330 ms）和长期稳定性（1000 次循环无衰减），实现了对多种人体动作的实时监测。该器件为柔性、高性能可穿戴传感器的开发提供了新的设计思路，也为健康监测、软体机器人等智能生物电子应用提供了可行方案。

综上，本研究为高性能导电水凝胶的设计提供了新思路，推动了柔性应变传感器在健康监测等领域的实用化进程。

参考文献

- [1] Qi Zhao, et al. Chemical Engineering Journal 2023, 442, 136284.
- [2] Hai Li, et al. Advanced Materials 2025, 37, 2415151.
- [3] Zhilin Zhang, et al. Advanced Functional Materials 2023, 33, 2305705.
- [4] Hude Ma, et al. InfoMat 2023, 5, e12419.
- [5] Juan Teng, et al. Nanoscale 2025, 17, 9427-9435.

D13-O85

新型羧基功能化 PEDOT 水凝胶的原位电合成及其高效电提取铀

么沐田^{1*}

1. 江西科技师范大学

电化学技术作为从海水中高效提取铀的方法之一,凭借操作简便性、环境友好性及高提取容量等优势,已成为该领域的研究热点。然而,电极作为电化学技术的核心部件,仍面临制备工艺复杂、导电性与吸附位点难以协同优化等挑战,导致提取效率与循环稳定性不足,严重制约了该技术的实际应用。本研究以导电聚合物聚(3,4-乙撑二氧噻吩)(PEDOT)为核心构筑单元,利用其可调的分子结构,优异的导电性和卓越的稳定性,通过分子结构/制备工艺创新,成功构筑了一种新型的自支撑水凝胶电极^[1-3]。具体内容及结果阐述如下:

提出了一种分子设计/电合成策略,以柔性碳布为基底,采用简易的原位电化学聚合法将羧基功能化的PEDOT衍生物直接生长于导电基底表面,构建了兼具高导电网络与丰富铀吸附位点的自支撑水凝胶电极。在交变电场的作用下,所制备电极对铀表现出优异的选择性($K_d, U \approx 2.05 \times 10^6 \text{ mL g}^{-1}$),经过10次循环后提取效率仍保持91%,且具有 1670 mg g^{-1} 的高提取容量。

在天然海水中连续测试7天,具有 $0.42 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 的提取速率,实现了高选择性、高稳定性电极的简易制备与性能突破。通过系统表征与理论计算,揭示了铀提取的双重机制:①羧基基团通过螯合作用选择性捕获 UO_2^{2+} ,实现铀的快速吸附;②在钠离子协同作用下,吸附的铀酰离子进一步转化为 $\text{Na}_2\text{O}(\text{UO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})_x$ 沉淀,完成铀的固定。该电极有望在电提取铀领域实现性能突破,并有望成为天然海水中实际应用的有效工具。

[1] H. Li, B. Lu et al., *Adv. Mater.* 2025, 37, 2415151.

[2] L. Liang, S. Chen et al. *Prog. Polym. Sci.* 2025, In Revision.

[3] M. Yao, B. Lu et al., *Sep. Purif. Technol.* 2025, 365, 132432.

D13-O86

基于聚合诱导结晶构筑可拉伸圆偏振发光水凝胶

张滋榕¹, 吴子良^{1*}

1. 浙江大学高分子学系

水凝胶是调控晶体形貌的理想平台,但在凝胶基质中构筑复杂的晶体形貌以赋予复合材料多功能性仍面临巨大挑战。我们采用聚合诱导掺杂小分子结晶策略,成功地制备了具有可控球晶形貌的可拉伸水凝胶。通过调控引发剂含量、化学交联剂含量及光聚合辐照强度调节聚丙烯酰胺凝胶网络的模量,从而精确控制二苯并-24-冠醚-8分子(CE)在凝胶中的结晶行为。在高模量凝胶中形成规则球晶;而低模量凝胶中则产生具有消光同心环的环带球晶。偏光显微镜和X射线散射揭示了球晶的微观结构,证实了环带球晶中晶体纤维的扭曲源于结晶压力与凝胶网络阻力之间的动态竞争。此外,该复合凝胶展现出独特的光致发光特性:具有规则球晶的复合凝胶具有更强的荧光和室温磷光发射,而具有环带球晶的复合凝胶则表现出显著的圆偏振发光(CPL)特性,其不对称因子高达 $+1.5 \times 10^{-2}$ 。研究表明,这一发光行为源于晶体挤压聚合物网络形成基于羰基簇的簇发光效应,扭曲的晶体纤维则使非手性团簇发光基团产生手性。该设计原理和手性传递机制为开发具有定制化晶体形貌和光学特性的软材料提供了新思路。

关键词: 复合水凝胶, 环带球晶, 簇发光, 圆偏振发光

参考文献

[1] Ju, H.; Zhang, H.; Hou, L. X.; Zuo, M.; Du, M.; Huang, F.; Zheng, Q.; Wu, Z. L.* *J. Am. Chem. Soc.* 2023, 145, 3763.

D13-O87

水凝胶界面粘附调控与功能化传感研究

李维军^{1*}

1. 厦门理工大学 材料科学与工程学院

生物电子皮肤传感器其作为一种新兴技术,正在医疗健康监测、运动分析以及智能人机交互等领域展现出巨大的应用潜力。然而,大多数皮肤传感器在潮湿的生理环境中会因失效而脱落,这严重限制了其应

用。基于此,我们提出了一种基于水凝胶界面粘附调控对生物电信号和运动检测具有高灵敏度的防汗生物电子皮肤传感器(SRBSS)。这种传感器不仅对干燥、油性和出汗的人体皮肤具有很强的附着力,而且具有稳定、灵敏的电信号响应特性。此外,高拉伸性、即时自愈、防潮和抗冻特性意味着水凝胶界面粘附可应用于可穿戴防汗生物电子传感器在复杂条件下进行人机交互,可监测不同场景下的微小运动或剧烈运动下的电生理信号,并提供疾病风险预警,为可穿戴电子传感器的设计提供了新的可能。与传统生物电子皮肤传感器(在干燥皮肤上的粘附力较弱,在出汗条件下容易脱落相比,SRBSS在干燥条件下保持稳定的粘附力,并且在出汗条件下也保持稳定。优异的性能确保SRBSS可用于身体信号传感和报警过程。这种传感器综合了多种优异性能,不仅为可穿戴电子传感器的设计提供了新的可能性,还通过对其动态特性和结构优势的深入研究,进一步拓展了先进材料的应用范围,有望成为未来人机交互和医疗监测领域的核心技术。

参考文献

- [1] Li, W.; Zhou, Ouyang, R.; Y.; Shen, Y.; Saiz, E.; Li, M.; Hou, X. *Small*, 2024, 20: 2401859.
- [2] Li, W.; Guan, Q.; Ming Li, Saiz, E.; Hou, X. *Prog. Polym. Sci.* 2023,140:101665.
- [3] Li, M.; Li, W.*; Guan, Q.; Lv, J.; Wang, Z.; Ding, L.; Saiz, E.; Hou, X. *Device*, 2023, 1: 100006.
- [4] Li, W.; Liu, H.; Mi, Y.; Zhang, M.; Ramos, M.; Hu, T.; Xu, Q. *Friction*, 2022, 10: 80.
- [5] Li, M.; Li, W.*; Guan, Q.; Ding, X.; Lv, J.; Saiz, E.; Hou, X. *ACS Nano*, 2021, 15: 19194.

D13-O88

肽基凝聚体的智能化相变设计

宋阳^{1*}

1. 上海交通大学

无膜细胞器通过固有无序蛋白(IDPs)的液-液相分离(LLPS)机制调控生物分子的动态组装,并借助超分子相变实现对生理环境信号的自适应应答。深入理解无序蛋白的组装与相变规律,对智能化生物材料的设计至关重要。然而,传统基于“无规线团模型”的无序蛋白仿生体系,往往难以有效模拟无膜细胞器的多级相变能力。针对这一局限,本研究提出一种基于“无序-瞬态有序单元偶联”的短肽模型。实验证实,该模型在生理盐溶液中可实现“单相-无序凝聚体-液晶-凝胶”四相态的可逆转变。通过精准调控短肽的序列组成及组装路径,此类仿生材料可被用于构筑智能微纳生物材料,例如:实现自发层级化组装、形成界面液晶化的微囊泡,或响应特定浓度的生理信号触发逐级相变,从而赋予材料对复杂生理环境的自适应能力。进一步地,我们展示了这类智能相变材料在肿瘤诊疗中的应用潜力:它们既能响应肿瘤微环境中的蛋白酶信号发生相变,也可在近红外光调控下完成主动相变。该研究为开发基于智能化相变机制的液态诊疗探针提供了创新思路。

D13-O89

可成胶益生菌粉末用于靶向清除幽门螺杆菌并促进胃黏膜修复及肠道微生态平衡

王世革^{1*}, 徐立之²

1. 上海理工大学材料与化学学院
2. 香港先进生物医学仪器中心

罗伊氏乳杆菌(*L. reuteri*)疗法是根除幽门螺杆菌(*H. pylori*)的一种潜在有效方法。然而,细菌活力保存的困难和恶劣的胃环境损害了罗伊氏乳杆菌的存活和靶向递送。这项研究提出了一种新的细菌介导的细菌消除策略,使用可食用的罗伊氏乳杆菌@HTP益生菌粉来靶向消除细菌。益生菌粉是通过研磨由罗伊氏乳杆菌、透明质酸(HA)、单宁酸(TA)和聚乙烯醇(PVA)组成的冻干水凝胶获得的。与水接触后,粉末迅速转变为水凝胶,增强罗伊氏乳杆菌在恶劣的胃环境中的存活率并确保在*H. pylori*感染的炎症部位选择性释放。罗伊氏乳杆菌靶向并减少*H. pylori*定植,同时分泌罗伊氏素来消灭细菌。此外,TA的抗氧化特性有助于缓解炎症,而HA则有助于胃黏膜修复。*L. reuteri*@HTP粉剂能够维持肠道菌群的完整性,

促进健康菌群的恢复。值得一提的是,该益生菌粉剂在室温下可保持至少六个月的稳定性,为治疗幽门螺杆菌提供了一种有希望替代传统抗生素的方案。该策略结合了靶向根除、黏膜修复和菌群修复,为治疗胃部感染提供了一种新的方法。

D13-O90

导电可降解天然高分子三维多孔凝胶支架用于骨骼肌再生

史梦婷^{1*}

1 空军军医大学第二附属医院骨科

骨骼肌是承载人体活动和行为的重要组织,但意外事故或创伤往往会造成骨骼肌体积性缺损从而导致其无法通过内源性修复机制实现再生。目前临床上应用的自体肌肉移植的方式存在诸多风险和弊端,而骨骼肌组织工程支架作为细胞生长载体以及作为肌肉缺损处的机械支撑,为骨骼肌缺损修复提供了新策略。透明质酸具有良好的生物相容性和降解性,被广泛用于组织工程支架的制备,基于透明质酸的凝胶类支架具有三维多孔结构且能够很好模拟细胞外基质成分。然而通常报道的凝胶类透明质酸基骨骼肌组织工程支架普遍理化性质较为单一,很少兼具导电性、降解性和生物活性;此外,其内部缺少适宜细胞尺寸数量级的微米、纳米级连通多孔的各向异性结构,无法很好地模拟肌纤维排列取向的结构特性。针对上述问题,本研究通过将透明质酸进行修饰改性以及与其他功能性组分混合,设计了一系列基于透明质酸的导电可降解三维多孔凝胶类支架,用于骨骼肌修复。

首先,针对现有透明质酸凝胶类骨骼肌组织工程支架无法同时兼具导电性、降解性和生物活性的问题,基于动态酰胺反应策略,制备了负载亮氨酸的导电可降解透明质酸水凝胶。该水凝胶基于氧化透明质酸和己二酸二酰肼功能化透明质酸之间的动态酰胺反应交联,具有自愈合性和降解性。接枝的聚苯胺赋予了水凝胶导电性,聚苯胺和亮氨酸的引入显著提高了水凝胶的抗氧化性能。此外,水凝胶具备良好的细胞相容性和显著的促进小鼠成肌细胞增殖作用。其为人脂肪干细胞和小鼠成肌细胞提供了适宜的三维共培养环境且可以持续递送细胞。负载亮氨酸后,水凝胶显著促进了小鼠成肌细胞的肌源性分化和人类脂肪干细胞募集,对于SD大鼠胫骨前肌缺损模型的修复具有显著促进作用。

进一步的,针对现有凝胶类骨骼肌组织工程支架缺乏各向异性的问题,基于磁场诱导纳米杂化物取向和紫外光交联策略,制备了负载色氨酸的原位交联各向异性导电可降解透明质酸水凝胶。水凝胶通过紫外光照引发甲基丙烯酸酯化透明质酸和甲基丙烯酸酯化明胶C=C自由基聚合实现原位交联。包被Fe₃O₄的聚多巴胺整合碳纳米管磁性纳米杂化物可以在磁场诱导下呈纳米线状取向排列赋予水凝胶各向异性的内部结构,同时也提升了水凝胶的电导率。水凝胶具有良好的细胞相容性且在磁性纳米杂化物浓度为0.1%时可以显著促进小鼠成肌细胞增殖。磁场诱导下水凝胶可以成功引导细胞在其中取向排列。负载色氨酸后水凝胶有效促进了小鼠成肌细胞的肌源性分化。其通过引导细胞取向排列和促进其肌源性分化共同促进了骨骼肌缺损的修复。

更进一步,为了增强骨骼肌组织工程支架的力学性能及各向异性结构,且赋予其促血管生成功能,基于单向冷冻和循环冻融策略,制备了负载胰岛素样生长因子-1和血管内皮生长因子的各向异性微孔道结构导电可降解透明质酸冷冻凝胶。冷冻凝胶通过己二酸二酰肼功能化透明质酸、明胶和氧化普鲁兰多糖的动态酰胺和动态席夫碱反应形成互穿网络交联,单向冷冻技术赋予了冷冻凝胶连续的各向异性微孔道内部结构从而可以引导细胞更规则的取向排列,循环冻融提升了其最大压缩应力、压缩模量以及细胞粘附能力。接枝的苯胺四聚体使冷冻凝胶具备导电性且进一步增强了其机械性能,且可显著促进小鼠成肌细胞增殖。冷冻凝胶负载的两种生长因子可分别通过席夫碱动态键交联和物理混合实现时序性缓释,显著促进了小鼠成肌细胞的肌源性分化和人脐静脉内皮细胞的迁移。该凝胶支架通过促进细胞取向排列、肌源性分化以及促进血管生成实现了SD大鼠胫骨前肌缺损模型中骨骼肌修复。

综上所述,本研究以透明质酸为原材料,设计并制备了三种结构和功能递进的三维多孔凝胶类骨骼肌组织工程支架,为设计、探究基于透明质酸的凝胶类支架在骨骼肌修复领域的应用提供了新的研究思路。

关键词:骨骼肌组织工程;透明质酸;水凝胶;冷冻凝胶

墙报

D13-P01

K-Mxene 导电水凝胶具有良好的机械柔韧性、抗菌性等特性及其在传感领域的多种应用陈龙^{1*}

1. 湖南工业大学

基于导电水凝胶的柔性可穿戴传感器可以将生理活动信号转化为可检测的电子信号，因此在柔性电子皮肤、人机界面、医学诊断领域拥有广阔前景。然而，目前基于导电水凝胶的柔性传感器通常表现出较弱的机械强度、低电导率和有限的传感性能。MXene 具有良好的导电性能，逐渐应用到导电水凝胶中，但 MXene 的疏水性限制了其在水凝胶中的使用。为此，利用硅烷偶联剂 KH570 对 MXene 表面进行改性得到 K-MXene，使其易分散于水凝胶前驱液中，进一步光引发聚合获得高强韧、抗菌的 MXene 复合导电水凝胶 (PHCSK-M)。在多次的拉伸和压缩过程中，水凝胶仍显示出稳定的传感性能和抗疲劳性。该工作所制备的具有多功能集成的柔性可穿戴传感器，有望用于可穿戴人机交互和生物电极等领域。

D13-P02

On-demand engineered double-network gelatin/silicate composited hydrogels with enhanced wet adhesion and stable release of bioactive ion for promoting wound healingLufeng Ji¹, Xiaomin Luo^{1*}, Ming Teng¹

1. Shaanxi University of Science and Technology

Silicate bioceramics have demonstrated great potential in hydrogel dressings for wound healing due to their special origins of promoting endothelial cell angiogenesis and inhibiting apoptosis of cardiomyocyte. However, there are still some deficiencies, such as insufficient biological activity, instability of silicate ion release, and lower wet adhesion on wounds with tissue exudate, limiting their further clinical applications. Herein, inspired by mussels, a multifunctional double-network hydrogel (FS/PAM-Gel-PDA) wound dressing composited gelatin with silicate ceramic powder with satisfactory wet adhesion, stable release of bioactive ions, hemostasis, and the ability of promoting vascular regeneration was engineered through specifically grafting dopamine to gelatin and introducing ferrous silicate ceramic powder into the hydrogel. The comprehensive experimental results substantiate that the FS/PAM-Gel-PDA has wet-adhesion strength of up to 21.78 kPa and remains stably adherent to porcine myocardial tissues intuitively after bending, twisting, soaking in water, and stretching. The test results of ion release behavior in vitro show that the oxidation and agglomeration of ferrous silicate ceramic powder can be effectively inhibited by using dopamine to form an antioxidant layer on the surface of ceramic powder, and thus, the stable release of Fe^{2+} and SiO_4^{4-} effective ions can be realized. The animal experiment exhibits that FS/PAM-Gel-PDA can achieve rapid hemostasis in the lethal liver defect model. Meanwhile, the FS/PAM-Gel-PDA reveals the remarkable ability to promote wound healing in a full-thickness skin injury model, which can obviously accelerate skin re-epithelialization. To sum up, the FS/PAM-Gel-PDA has excellent wet adhesion and stable release of active ions to accelerate angiogenesis, which shows great potential in promoting wound healing.

D13-P03

具有多级结构的聚乙二醇凝胶的制备李敏¹, 崔为¹, 冉蓉^{1*}

1. 四川大学高分子科学与工程学院

聚合物凝胶集成了交联网络和溶剂，其结构稳定性和功能严重依赖于溶剂性质。然而，目前大多数溶

剂都面临着局限性,包括传统的小分子溶剂(水溶剂和有机溶剂)和新型溶剂(离子液体和深共晶溶剂)。因此,本研究提出将液态聚乙二醇(PEG)作为溶剂引入聚甲基丙烯酸(PMAA)的聚合物骨架中,以构建多层次结构的凝胶。通过精确的结构工程,凝胶在弹性和黏性之间达到最佳平衡,在保持网络稳定性的同时提供卓越的阻尼性能。此外,该凝胶具有高透明度、强附着力、自修复和热调节能力。利用这些特性,我们设计了一种多功能玻璃,它协同结合了高透明度,吸热,隔音和防冲击,解决了可持续建筑中的关键挑战,并为节能,声学舒适和增强安全性提供了综合解决方案。

D13-P04

壳聚糖基粘附水凝胶的简便构建及其促进糖尿病创面的高效修复

李日旺^{1*}, 王洁燕¹, 李洁¹, 刘大海¹

1. 佛山大学

引言:壳聚糖(CS)需使用强挥发性的冰醋酸或浓盐酸溶解并需改性后才能成胶等问题,在一定程度上制约了其作为凝胶敷料在医疗器械领域的商品化应用。 α -酮戊二酸(α -KA)是一种重要的生物分子,在细胞代谢和多种生理过程中发挥关键作用,是三羧酸循环的重要中间产物,氨基酸合成与分解代谢的核心分子,还可作为膳食补充剂。原儿茶酸(PCA)是一种天然存在的水溶性低分子量酚酸,广泛存在于中药、蔬菜、水果和植物中,具有显著的抗氧化、抗炎、抗菌等多种生物活性。本研究创新使用天然的 α -KA、PCA溶解CS并通过简单的共混温育一步成胶,解决冰醋酸、浓盐酸带来的刺激性、细胞毒性,且无需对CS进行改性,省去了改性需要除去未反应原料等的复杂步骤, α -KA、PCA可将粘附性基团引入凝胶体系中并能发挥其本征生物学特性,摒弃传统抗生素与复杂化学交联方式,实现粘附水凝胶的无毒、绿色、简便构建的技术创新,有利于该水凝胶后期的商品化生产和应用。材料与方法:用 α -KA、PCA溶解CS并温育一步成胶,利用万能材料试验机、扫描电镜、流变学测试等,对水凝胶的粘附性能、自愈合性能、可注射性、形貌、力学强度、溶胀性能、保水性能、降解性能、抗菌性能、抗氧化性、血液相容性等理化性能进行分析,并进行体外细胞实验及体内动物实验,通过细胞毒性、创面愈合率、组织病理学、免疫荧光、免疫组化等分析,验证其促创面高效修复的作用效果及探讨其具体的作用机制。主要结果:该凝胶具有良好的粘附性、自愈性、多孔性、保水性、抗氧化性、抗菌性和生物相容性等,可通过调节伤口微环境,促进抗炎、血管生成和组织重建等,可有效促进糖尿病创面的愈合。主要结论:本研究创新使用 α -KA和PCA作为CS的溶剂,制备得到具有良好的粘附性、自愈性、注射性、抗氧化性、抑菌性能、生物相容性及促糖尿病创面高效愈合的壳聚糖基粘附水凝胶,为糖尿病创面治疗提供了一种很有前景的策略,其在生物医学领域具有很大的应用潜力。

D13-P05

刺激响应型水凝胶生物粘合剂用于构筑生物电子界面

薛羽¹, 刘吉^{1*}

1. 南方科技大学

可穿戴和可植入生物电子技术的发展为实现个性化健康监测和精准医疗带来了前所未有的机会。水凝胶具有与人体组织相似的力学和生理学特性,使其成为理想的人机交互/融合界面材料之一。最新报道的水凝胶干交联机制,可以通过去除界面水的方式实现与组织的即时且牢固粘合,但是这类强韧性粘合层的移除不可避免的会造成组织再创伤、疼痛、发炎以及结疤,甚至局部大出血等,也为高韧性生物粘合剂在上述场合的应用提出了极大的挑战。针对这一问题,本项目开发了一种刺激响应型水凝胶生物粘合剂,其在湿润的组织表面瞬间实现强力黏附,界面韧性超过 400 J m^{-2} ,能够将各种电子器件稳定的固定在组织和器官表面,实现各种重要生理信号的监控。此外,该生物粘合剂可以在特定的外界刺激下实现界面韧性的快速下降,如在葡萄糖溶液的刺激下界面韧性可以在3 min内下降至 30 J m^{-2} 以下,实现电子器件从组织表面上的无损剥离。

D13-P06**混合溶剂诱导相分离固定柔性非晶聚合物基水凝胶的取向并强化**胡龙玉¹, 崔为¹, 冉蓉^{1*}

1. 四川大学

实现水凝胶的各向异性是复制生物组织结构和力学特性的关键。然而, 在仅由柔性非晶聚合物组成的水凝胶体系中诱导各向异性是具有挑战性的, 因为这些聚合物通常表现出热不稳定的各向异性状态, 即容易发生各向异性的改变。在这项研究中, 我们引入了一种混合溶剂诱导的相分离方法来稳定预拉伸后水凝胶网络的取向。以 10^{-1} nm 的柔性聚合物聚丙烯酰胺为模型体系, 我们证明了在混合溶剂中相分离可以形成致密和稀释的聚合物相, 而致密相通过强大的聚合物间和聚合物内部相互作用有效地锁定了各向异性。一系列表征证实, 预拉伸、相分离的凝胶在松弛时可以保留部分取向, 从而在取向方向上产生显著的力学增强, 包括断裂应力、杨氏模量和断裂韧性的提高。我们还验证了该方法的通用性, 显示了它在其他水凝胶体系中的有效性以及对不同溶剂组合的适应性。这项工作提出了一种非常规的策略, 用于制备通常难以保持结构完整性的各向异性水凝胶。

D13-P07**聚丙烯酰胺/羧甲基壳聚糖强韧导电水凝胶的制备及其在柔性传感器和自供能装置中的应用**杨旭¹、丁虹耀^{1*}

1. 南京工业大学

导电水凝胶由于其优越的生物相容性和机械柔韧性, 是制造柔性可穿戴设备的极有前途的候选者。然而, 传统水凝胶的力学性能和导电性差极大地限制了其传感能力。在此, 利用聚丙烯酰胺和羧甲基壳聚糖通过两步工艺开发了一种具有半互穿网络结构的坚韧导电水凝胶, 包括初始干燥, 然后用酸性溶液置换溶剂。在这个过程中, 水凝胶中建立了结晶区、多个氢键和静电相互作用, 显著提高了水凝胶的力学性能。所得水凝胶具有高抗拉强度, 高韧性, 但有像皮肤一样低的模量。独特的网状结构使该凝胶在低应变范围内具有低迟滞性和优异的抗疲劳性能。水凝胶网络中大量自由离子的存在使其具有良好的导电性, 可作为电阻式应变传感器, 具有高灵敏度, 出色的线性响应性, 宽传感窗口和良好的耐久性, 从而显示出监测人体运动的巨大潜力。此外, 水凝胶内部的酸性环境有利于其在具有足够输出电压的自供电设备中使用。通过将多个水凝胶串联, 可以实现足够的输出电压, 并提出了一种自供电传感器, 可以通过输出电压的变化来响应应变信号, 而无需外部电源。这项作为制造强韧的导电水凝胶提供了一种策略, 在柔性电子和自供电设备领域具有广阔的应用前景。

D13-P08**生物启发的离子诱导策略实现不可逆共价交联水凝胶的自修复**何小雨^{1*}

1. 四川大学

近年来, 有关具有良好生物相容性和力学性能的双网络水凝胶的研究得到了蓬勃发展, 研究方向常聚焦于双网络水凝胶力学性能的提升。然而, 共价交联的双网络水凝胶在受力后由于牺牲键的断裂, 其力学性能会发生很大程度的下降, 软化后的水凝胶无法再次使用。有趣的是, 生物体的骨骼/软组织系统也是典型的不可逆共价交联结构, 但生物体在骨折后却能在多价金属离子的刺激下进行自我修复。受此启发, 我们向软化的双网络水凝胶中引入了 Zr^{4+} 等金属离子, 金属离子能与断裂的第一网络中的丙磺酸侧基形成坚固的金属配位键, 从而诱导不可逆共价交联双网络水凝胶在内部发生破坏后再次交联, 达到修复的目的。引入 Zr^{4+} 后, 水凝胶的修复率达到了 105%, 并且由于引入了非共价相互作用, 修复后的双网络水凝胶还具有一定的自修复能力。这种修复策略有望在医用导管涂层领域得到应用。

D13-P09**多功能纳米粒构建机械性能可调的水凝胶用于组织修复**叶宇航¹, 张鸿翔¹, 李子萌¹, 李晓东^{1*}

浙江大学医学院附属口腔医院

感染性创口是一种常见且严重的医疗难题,通常发生于各种原因引起的创口部位受到病原体侵入并引起感染,往往造成创口的迁延愈合,增加医疗负担,甚至危及患者生命。本研究利用姜黄素和聚氨丙基双胍构建了具有生物功能的纳米粒,并将其掺入甲基丙烯酰化明胶-醛基化透明质酸钠水凝胶中。通过光固化交联使该凝胶在数秒内于患处原位形成,并通过包封其中的纳米粒发挥治疗功效,促进伤口愈合。体外实验表明,该纳米粒具有显著的抗炎功效。流变学测试显示,该凝胶具有良好的自愈合能力,并且纳米粒的掺入对凝胶网络的机械性能具有明显改善。溶胀实验和降解实验也表明,纳米粒的加入能够显著提升该凝胶网络的强度。推测该增强作用来源于纳米粒中含有大量氨基的聚氨丙基双胍与醛基化透明质酸的相互作用,并通过等温滴定量热法对两者间相互作用进行表征。体外释放实验显示,姜黄素能够在五天内从凝胶中缓慢释放。创口愈合实验显示,该凝胶对于感染创口的愈合具有明显的促进作用,显著抑制了多种细菌在创口表面的定植。这些结果表明当应用于创口表面时,该凝胶可以发挥屏障作用,阻止外界环境对创面的刺激并阻挡细菌侵入,从而对牙周炎、口腔溃疡等疾病的愈合起到促进作用。

D13-P10**由多功能纳米粒子构建的用于组织再生的机械可调水凝胶平台**张鸿翔¹, 叶宇航¹, 李子萌¹, 李晓东^{1*}

1. 浙江大学医学院口腔医院

牙周炎会破坏牙周软硬组织,最终导致牙齿脱落。现有牙周给药治疗策略多为口服抗生素,药物在牙周袋局部的浓度较低,肠胃负担重、易产生耐药性,且治疗效果不理想。本研究成功地用聚氨丙基双胍与姜黄素通过氢键自组装形成纳米粒,搭载于甲基丙烯酰化明胶与氧化透明质酸钠组装形成的水凝胶中。研究表明该凝胶具有良好的机械性能和粘附性,能够应对口腔复杂治疗环境。持续释放的姜黄素具有优异的抗炎调节性能并可促进巨噬细胞向抗炎的 M2 型极化。凝胶对于牙龈卟啉单胞菌、耐甲氧西林金葡菌等细菌也表现出优异的抗菌性能。在动物实验中,凝胶具有优异的抗菌屏障作用,在皮肤缺损模型中组织愈合效果极佳,在牙周炎模型中也展现了良好的促牙周组织愈合效果。综上所述,治疗体系安全、有效,在未来临床牙周炎治疗中显示出巨大的应用前景。

D13-P11**具有可切换粘附性能的凝胶用于伤口愈合**沙智华¹, 崔为^{1*}

1. 四川大学高分子科学与工程学院

粘附性水凝胶在伤口敷料应用中展现出巨大潜力,然而现有技术面临显著挑战:低粘附性凝胶敷料易脱落,而高粘附性凝胶敷料在移除时易造成组织二次损伤,且二者均缺乏固有的消毒能力。针对上述问题,本研究提出了一种“双组分溶剂诱导双组分凝胶相分离”策略。利用该策略,成功制备了一种粘附性能可控的自消毒凝胶。该凝胶的粘附特性展现出对凝胶内部溶剂的显著响应性:溶剂为水时表现为低粘附态,有效防止移除时的二次损伤;溶剂为 80%体积分数的乙醇时则切换为高粘附状态,确保敷料稳定附着,同时赋予凝胶优异的自消毒性能。此外,该凝胶材料具有良好的循环使用潜力。本研究开发的这种兼具可控粘附、自消毒能力及可循环特性的智能凝胶,为下一代高性能伤口敷料的设计提供了新思路和有效的解决方案。

D13-P12

抗溶胀导电水凝胶结构与性能研究

张荣莉¹, 雒春辉^{1*}

1. 北方民族大学

水凝胶基电子传感器在可穿戴设备和柔性器件领域具有广阔的应用前景,然而,其在水下长期使用时容易出现严重的溶胀以及性能恶化,这极大地限制了其在水下场景的广泛应用。针对这一问题,本研究提出了一种基于配位驱动的策略,通过将甲基丙烯酰胺(MAm)与 L-丝氨酸丙烯酸酯铜配合物(LSA)进行水溶液自由基聚合,成功制备出一种具有优异导电性能的水凝胶。PMAm-L 水凝胶得益于 PMAm 形成的疏水/亲水双重网络结构以及 L-丝氨酸丙烯酸酯与 Cu^{2+} 之间的强相互作用,展现出卓越的稳定性。即使在水中浸泡一个月后,其机械性能和传感性能均未出现显著衰减:溶胀率仅约为 3%,拉伸应力为 113 kPa,拉伸应变为 183%;电导率维持在 0.5 S/m,灵敏度为 2.1。在变形下配位键的可逆断裂/重组赋予水凝胶自愈合性能。此外,基于该凝胶开发的高灵敏度水下可穿戴传感器不仅能精确监测人体细微运动,还可实现莫尔斯电码水下通信,显著拓展了其在水环境中的功能应用。

D13-P13

光固化 3D 打印水凝胶吸盘及其应用研究

汪祎贤¹, 刘德胜¹, 王晓龙^{1*}

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

光固化 3D 打印水凝胶因其具有优异的生物相容性、表界面粘附性、环境刺激响应性、导电性等,在组织工程、药物输送、柔性电子和软体机器人等领域具有巨大应用潜能。目前,生物仿生粘附系统已引起广泛关注,但在实现高精度生物仿生结构的制造以及具有良好环境相容性(尤其是水下环境)的可逆高粘附性方面仍存在根本性挑战。因此,本文基于氢键工程、离子配位等策略,制备了具有高生物力学相容性的湿滑水凝胶材料,结合仿生结构和光固化 3D 打印技术,实现了具有优异粘附性能的仿生粘附器件的设计制造。首先,通过引入水-二甲基亚砜二元溶剂,解决了水凝胶在光固化 3D 打印过程中的失水问题,提高了水凝胶仿生结构的打印精度。其次,通过双网络(DN)和微相分离增韧策略,制备了具有不同结构特征的仿生水凝胶吸盘。所制造的具有良好机械性能和精细结构的水凝胶吸盘可以在不同生态环境下(在空气、水、PBS 和海水)实现对硅、玻璃、S304、尼龙以及各种粗糙表面的高强度的可逆粘附。这归因于通过水凝胶内部水的溢出形成界面水密封效应,能够有效增强机械负压附着和稳定性。最后,集成了仿生吸盘结构的气动水凝胶抓取器,能够有效地抓取水下的超软物体,并实现自主释放。鉴于仿生水凝胶吸盘和抓取器具有良好的水下适应性的可逆粘附,实现了水下自主航行器、水下六足机器人的抓取、停留等功能,在海洋探测、考古等领域具有广阔的应用前景。

D13-P14

采用大能量耗散区和高能量耗散密度策略制备强韧性各向异性模拟韧带水凝胶

杨夏粤¹, 崔为¹, 冉蓉^{1*}

1. 四川大学高分子科学与工程学院

韧带损伤,特别是在老龄化人群中,对韧带修复的仿生替代品产生了巨大的需求。各向异性水凝胶有望成为人工韧带,但与天然组织相比,它们的结构和力学性能往往有所不足。在这里,我们提出了一种各向异性海藻酸盐(Alg)/聚乙烯醇(PVA)水凝胶的发展,以克服这些挑战。利用定向/盐析(O/S)技术,我们改造了各向同性 Alg/PVA 水凝胶,以复制天然韧带的软/刚性混合结构。在 O/S 处理后,Alg 网络保持其定向并形成原纤维,而 PVA 网络由于其不同的持续长度而失去定向并充当基质。这产生了一个模量对比,有利于应力传递,并建立了一个大的能量耗散区。同时,盐析效应导致 PVA 链致密化,有助于获得较高的能量耗散密度。宽能量耗散区和高能量耗散密度的协同作用使水凝胶具有优异的力学性能,包括 24.2

MPa 的断裂应力, 17.8 MPa 的杨氏模量和 33.6 kJ m^{-2} 的断裂能, 可与顶级水凝胶和坚韧的生物组织相媲美。此外, 其生物相容性和各向异性结构促进组织修复, 使其成为韧带重建的有力候选材料。

D13-P15

机器学习辅助 3D 打印可编程动态显示结构色

张培¹, 刘吉^{1*}

南方科技大学

Responsive structural colors have emerged as a transformative platform for next-generation optical technologies, owing to their tunable, pigment-free nature and potential applications in anti-counterfeiting, dynamic displays, and environmental sensing. However, existing fabrication strategies for responsive structure color often suffer from low design flexibility, limited scalability, and lack of programmability, severely restricting the realization of complex, multifunctional systems. To overcome these limitations, we present a machine learning-assisted 3D printing strategy for the fabrication of structurally colored devices with dynamic, multicolor visual outputs. By harnessing machine learning to model and predict the intricate relationships between structural color, printing parameters, and external stimuli (e.g., electromagnetic fields), our approach enables inverse design and on-demand generation of programmable visual patterns. This data-driven framework significantly enhances the precision, adaptability, and efficiency of structural color printing, paving the way for intelligent fabrication workflows. Moreover, the seamless integration of display and sensing functionalities in printed constructs allows for the development of self-adaptive systems capable of real-time environmental interaction and feedback. This study demonstrates the unique advantages of combining machine learning with advanced additive manufacturing to unlock the full potential of dynamic structural colors, offering a scalable route toward intelligent, multifunctional, and interactive photonic devices.

D13-O16 (ID: 4410)

基于本体共聚制备强韧抗溶胀物理水凝胶, 具有超宽频率粘弹性可用于水下声学

姜力超¹, 冉蓉¹, 崔为^{1*}

四川大学 高分子科学与工程学院

传统的水凝胶制备通常会使用溶剂（主要是水），这会增加聚合物链之间的自由体积并削弱它们之间的相互作用，从而导致机械强度较弱且粘弹性受限。在此，我们提出一种无溶剂合成策略，用于制备坚韧、抗溶胀的物理水凝胶，其具有超宽频率粘弹性（损耗因子 $\tan \delta > 0.3$ ，频率范围为 10^{-10} 至 10^5 Hz ）。我们将高度互溶的亲水性和疏水性单体进行本体共聚反应，形成无水共聚物，并将该共聚物在水中溶胀达到平衡后形成具有密集链缠结结构的相分离水凝胶。所得水凝胶相较于通过传统胶束共聚制备的同类水凝胶机械性能显著提升，其刚度、强度和断裂韧性分别提高了 81 倍、46 倍和 41 倍。作为概念验证示例，该水凝胶因其具有优异的抗溶胀性和韧性，被应用于水下探测器的吸音涂层。凭借其强粘弹性和与水近乎完美的声阻抗匹配，有效减少了海洋研究中的声学干扰。与传统的溶剂辅助聚合制备水凝胶的方法不同，本体共聚具有超高单体浓度、纯净产物及简便工艺等优势，为开发简单而坚韧的水凝胶提供了新思路。这类水凝胶不仅在水下应用中具有广阔前景，也为理论研究提供了理想的素材。

关键词：本体共聚；物理水凝胶；相分离；粘弹性；吸声

D13-P17

具有抗菌、止血功能的生物弹性水凝胶传感材料

何雯馨¹, 周海亮¹, 王伟¹, 万鹏博^{1*}

1. 北京化工大学

由导电水凝胶组装而成的可穿戴表皮电子产品，因其卓越的生物相容性和与皮肤组织相仿的柔韧性，在众多材料中脱颖而出，在人机交互界面、个性化健康监测和远程医疗诊断等领域受到广泛的关注。在此，我们设计了一种具有抗菌和止血功能的水凝胶纳米复合材料，具有优异的机械性能和传感性能，能够精准监测和捕捉人体的大幅度运动信号以及微弱的电生理信号，可应用于疾病诊断和运动康复等领域。此外，该水凝胶纳米复合材料还展现出良好的抗菌活性和高效的止血性能。

D13-P18

仿生三维软支架结合电刺激操纵神经干细胞分化用于指导脊髓损伤修复

冯钰斌¹，林权^{1*}

1. 吉林大学超分子结构与材料全国重点实验室

脊髓损伤修复仍然是医学领域的一个具有挑战性的问题，近年来基于神经干细胞的治疗显示出巨大的潜力。然而，由于大多数材料不能为神经干细胞提供适宜的微环境，神经干细胞的存活和分化仍然是一个问题。本研究设计并开发了一种模拟脊髓组织的导电水凝胶作为仿生三维生物材料软支架，以改善神经干细胞的存活微环境，调节其分化方向。值得注意的是，设计的水凝胶在力学性能、电导率和孔结构方面与脊髓组织相匹配。此外，该水凝胶具有注射性、自愈性和止血性。结合水凝胶和电刺激(ES)诱导负载的神经干细胞更倾向于神经元分化，轴突生长和髓鞘再生，同时减少星形胶质细胞的发育。这种治疗策略将最终实现脊髓损伤修复和运动功能恢复，同时避免胶质瘢痕沉积。这种模拟脊髓三维软支架结合电刺激为脊髓损伤修复提供了一种有前途的治疗策略。

D13-P19

海参启发的高缠结应变硬化水凝胶

高璐¹，赵传壮^{1*}

1. 宁波大学

随着水凝胶在柔性装备领域的不断拓展，材料的耐受冲击、穿刺等极端工况的性能成为亟待解决的问题。自然界中，海参皮肤通过应变硬化机制实现自我保护—在外力作用下，其可变胶原组织和蛋白质协同作用，使材料迅速硬化。受此启发，本研究提出一种仿生高缠结网络水凝胶，通过引入高密度偶极作用基团，赋予材料动态力学增强特性。其中，高密度的、可滑动的缠结位点使得材料兼具良好的延展性和强度，通过外场下的链取向促进链间偶极作用缔合赋予材料应变硬化功能，实现静态下的柔性和外界冲击下的迅速硬化。从而该凝胶具有良好的抗裂纹扩展、抗冲击性以及抗穿刺性。该仿生设计策略不仅为一代柔性防护材料的设计提供了新思路，在水下装备、运动监测等领域具有重要应用潜力。

D13-P20

基于 X 射线-光降解级联反应体系构建 X 射线响应降解型水凝胶

张泽桐¹，张海磊^{1*}

1. 河北大学

光控降解型水凝胶在生物医学领域受到了广泛关注。需要注意的是，光降解反应的诱发波长通常位于紫外/可见光区，该区间的波在生物组织中的穿透性较，幅限制了其在深部组织的应用，这是目前光控降解型水凝胶在生物医学领域应用时面临的瓶颈问题。本研究合成了可见光降解型凝胶(Gel-1)，其结构中的 9,10-蒽醌基交联单元可在曙红 Y 存在条件下，在绿光波段可见光照射下发生断键，以此触发凝胶的光降解行为。25,000-27,000 lx 光强条件下，表观速率常数可达 0.0114 min^{-1} 。我们进一步合成了一系列铽基 X 射线长余辉发光纳米材料，利用稀土离子高浓度下的 $^5\text{D}_3$ 至 $^5\text{D}_4$ 能级间的交叉衰减通道，抑制了发光材料紫外光区的发射，合成绿光发射型 X 射线长余辉材料，其 X 射线停止辐射后，仍可维持 4000 s 以上肉眼可视的余辉光发射，并通过对其表面改性，制备了分散性良好的 X 射线长余辉发光纳米材料

(OA@ β -NaLuF₄:10%Tb³⁺)。OA@ β -NaLuF₄:10%Tb³⁺的 X 射线荧光发射波段和余辉光波段恰好与 Gel-1 光降解的触发波段高度吻合。通过将上述二者进行原位复合,制得的复合凝胶 Gel-2 可在 X 射线照射作用下发生降解,以此构建了 X 射线-光降解级联反应体系,并成功将上述降解体系应用于构建 X 射线响应性释放体系。

D13-P21

MXene/PVA/PAM hydrogel flexible sensor with excellent water retention, frost resistance, self-adhesion, and high sensitivity for human motion health monitoring

Runfeng Zhang¹, Xuejing Zheng^{1*}

1. Zhengzhou University

Two-dimensional transition metal carbides (Ti₃C₂TX MXene) are widely used in hydrogel sensors due to their excellent conductivity, hydrophilicity and large specific surface area. However, MXene-based hydrogel sensors still face several challenges, such as nanosheet stacking, water evaporation, and limited conductive mechanism. To address these issues, we developed a multifunctional polyacrylamide/polyvinyl alcohol/CaCl₂/AgNPs/proanthocyanidins/MXene (PPCAPM) composite hydrogel with high sensitivity, water self-regeneration capability, ultra-low temperature antifreeze properties, and self-adhesion. In this system, silver nanoparticles (AgNPs) were in situ reduced on MXene surface through the synergistic effects of MXene and proanthocyanidins. The electrostatic interaction between proanthocyanidins and MXene effectively prevented the MXene stacking, while the incorporated AgNPs increased the inter-sheet conductive pathways. Furthermore, the introduction of CaCl₂ endowed the PPCAP composite hydrogel with water self-regeneration ability, maintaining stable water content in long-term use, thus ensuring the long-term stability of the hydrogel sensor. Additionally, the establishment of ionic conductive pathways in the composite hydrogel effectively compensated for the limitations of single conductive mechanism. When employed as a flexible strain sensor, the PPCAPM hydrogel demonstrated outstanding mechanical properties, achieving 663.29 % strain, 0.19 MPa tensile strength, 0.0518 MJ/m³ toughness, and 1.84 S/m conductivity, with a sensitivity coefficient of 3.73. Remarkably, the hydrogel maintained approximately 80% water content even after 72 h of exposure in air. This study not only presents an effective anti-stacking strategy for MXene but also provides a viable design approach for enhancing the performance of MXene-based hydrogel sensors.

D13-P22

2D-COF 导电水凝胶用于糖尿病创面诊疗一体化

金欣^{1,2}, 冉杭^{1,2}, 张在红^{1,2}, 吴玉祥^{1,2*}

1. 江汉大学

2. 智能体育与主动健康研究院

糖尿病创面患者基数众多,缺乏早期筛查手段,易发展为临床难愈性创面。寻找合适的糖尿病创面的标记物、筛查潜在的难愈性创面,及时对其进行高效、有针对性的干预治疗,对于糖尿病创面的临床诊疗有着重要的意义。 α -二羰基化合物 (DCC) 是一种糖酵解产物,可作为糖尿病创面诊断与预后的指标,但仍缺乏实时、准确的 DCC 监测手段,指导临床糖尿病创面的治疗与预后。在此,构建具有分子印迹的共价有机框架 (COF) 的二维纳米材料 (2D-COF) 与可导电的超支化聚合物水凝胶 (PBAE-PANI/HA-SH Gel) 复合材料作为诊疗一体化平台 (2D-COF@Gel),通过于 DCC 与 2D-COF 之间的识别作用产生电学信号,实时监测 DCC 浓度;同时通过印迹位点持续捕获 DCC,改善病理环境、促进糖尿病创面愈合。

D13-P23

高韧性低滞后聚丙烯酰胺/普鲁兰多糖导电水凝胶的制备及性能研究

丁虹耀^{1*}, 王炳尧¹

1. 南京工业大学

导电水凝胶因其兼具生物相容性、机械柔性与导电性, 在柔性可穿戴传感器领域具有巨大应用潜力。然而, 同时构建具备高韧性、低滞后性的导电水凝胶仍具挑战性。本研究制备了一种具有半互穿网络结构的强韧导电型聚丙烯酰胺/普鲁兰多糖/硫酸铵复合水凝胶。硫酸铵通过促进聚合物链间形成低能量耗散结构基元, 显著增强凝胶基质, 赋予材料卓越的力学性能: 包括 2063% 的高延展性、890 kPa 的高强度及 4268 kJ/m³ 的高韧性。网络内的氢键作用使凝胶在形变过程中呈现低滞后特性, 独特的半互穿网络结构则赋予其类组织低模量特征。此外, 该水凝胶表现出 2.39 S/m 的高导电性与优异的抗冻性能, 适用于柔性应变传感器。基于此开发的传感器在 0.1 – 1500% 的宽应变窗口内具有高灵敏度, 可精准检测人体多尺度运动 (如关节弯曲、微表情) 并识别不同语言的发音特征。本研究凸显了该复合水凝胶作为柔性设备可穿戴应变传感器的应用潜力。

D13-P24**Muscle-Inspired Robust Anisotropic Cellulose Conductive Hydrogel for Multidirectional Strain Sensors and Implantable Bioelectronics**Fengcai Lin^{1*}, Yanlian Xu¹, Jipeng Chen¹, Xiaoxiao Zheng¹

1. Minjiang University

Integrating superior mechanical performance, anisotropic conductivity, and biocompatibility into conductive hydrogels as all-in-one human-machine interaction device remains challenging. Herein, by mimicking the anisotropic structures of human muscles, a robust anisotropic conductive hydrogel is developed by initially aligning polyvinyl alcohol with polypyrrole decorated cellulose nanofibrils to form an anisotropically oriented polymer networks, followed by post-crosslinking with tannic acid (TA). Introducing TA into hydrogel network permanently secures its hierarchically anisotropic structure through multiple hydrogen bonds, thus endowing the hydrogel with exceptional mechanical properties (tensile strength of 11.41 MPa, toughness of 12.44 MJ m⁻³), anisotropic adhesive property, and direction-dependent conductivity. With these attributes, a hydrogel strain sensor with excellent multidirectional sensitivity is developed, enabling stable monitoring of multi-degrees of freedom joint movements in the human body and facilitating the control of a multiaxial virtual robot manipulator. Moreover, the in vitro/vivo tests demonstrate exceptional biocompatibility and anti-biofouling properties of the as-prepared hydrogel sensor, maintaining stable electronic response signals for over 14 days after successful implantation into the Achilles tendon of mice. Overall, this study presents a promising approach for designing conductive hydrogels with superior mechanical properties and anisotropic functionality for emerging applications in both in vitro and in vivo human-machine interface materials.

D13-P25**醛基化主客体修饰海藻酸钠微凝胶的构建及其磁控血管栓塞研究**刘宇恒^{1*}

1. 哈尔滨工业大学 (深圳)

心血管疾病是一种严重威胁人体健康的疾病, 由于发病率高、致残率高和死亡率高的特点居全球各种死因之首。介入栓塞术作为心血管疾病的一种重要治疗手段, 已广泛应用于临床。当前栓塞疗法采用的材料主要为金属丝和液体栓塞剂, 前者存在机械性能与生物组织不匹配、填充率低的缺点, 后者靶向性差, 在血流作用下有脱靶并堵塞下游血管的风险。因此, 开发一种能够在血液循环系统精准靶向病灶并充分堵塞血管的新型栓塞手段, 对心血管畸形疾病精准医疗的发展具有重要的研究意义与应用价值。随着微纳机器人学的发展, 磁控微纳机器人因其具备体积小、靶向性高和远程可控的特点, 能够在蜿蜒闭塞的狭

小环境中到达指定位置并实现许多常规传统手段无法完成的任务，为栓塞治疗提供了全新的策略。基于上述研究现状与挑战，本文提出通过主客体微凝胶的微流控制备实现在血管中的栓塞治疗，为智能、安全、个性化医学诊疗一体化提供新的设计思路和研究方法。针对现有主客体微凝胶修饰效率低、生物相容性不足的问题，本研究开发了一种基于海藻酸钠（ALG）的高效修饰磁性微凝胶体系。创新性地采用钙离子交联固化替代紫外光聚合，结合新型醛基化修饰策略首先制备金刚烷苯甲醛配体（Ad-Ph-CHO），通过 4-羟基苯甲醛与金刚烷羧基氯缩合实现醛基功能化；然后利用醛基与 ALG 的缩醛反应构建 Ad-ALG 客体凝胶；再通过 EDC 介导的羧基-羟基偶联制备 ALG- β CD 主体凝胶，并验证了主客体凝胶的自愈合性能。制备了磁响应性能良好的 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 磁性纳米颗粒，最后通过微流控技术将 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ 磁性纳米颗粒（粒径 $331.7 \pm 28 \text{ nm}$ ）嵌入微凝胶，磁学表征显示饱和磁化强度达 58 emu/g 。在旋转磁场下（ 16 mT , 0.4 Hz ）微凝胶运动速度达 $387 \mu\text{m/s}$ ， 200 mT 静磁场可抵抗 0.328 cm/s 血流冲击。在侧壁动脉瘤模型中，主客体微凝胶通过 β -环糊精/金刚烷特异性识别实现自愈合栓塞，填充效率达 $92.4 \pm 3.1\%$ （较原体系提升 41% ）。细胞实验证实 HUVEC 存活率 $>95\%$ ，溶血率 $<1.8\%$ ，显著优于传统栓塞材料。本课题将主客体自愈合水凝胶与磁控微纳米机器人技术相结合，提高了栓塞材料的靶向性和可控性，改善了栓塞治疗在微小血管区域的应用效果。不仅对新材料、生物医药与健康重点领域的发展具有重要的辅助和推动作用，还有望为精准医疗技术方向带来革命性的技术创新。

D13-P26

抗菌（胺化壳聚糖/透明质酸钠）/聚乙烯醇/ γ -富勒烯双网络水凝胶的制备和性能研究

冷崇燕^{1*}

1. 昆明理工大学

抗菌水凝胶在创口愈合中有较广泛的应用前景。但其力学性能差和抗菌效果低在很大程度上限制其实际应用。本研究通过两步法制备 ACS/SH 聚电解质凝胶粉，采用 γ -环糊精包裹富勒烯（C60），负载莽草酸（SA），制备 (ACS/SH)/PVA/ γ -C60/SA 的双网络抗菌水凝胶。优选 γ -C60 含量为 0.5% 的水凝胶，并使用扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱和 X 射线衍射进行分析，结果表明 ACS 与 SH 之间通过氢键交联，PVA 通过分子间氢键形成网络，水凝胶具有显著的抗压性，可承受 80% 的高应变，并具有出色的恢复能力；C60 经 γ -环糊精包裹后显著增强样品的亲水作用，接触角低至 32.0° ，赋予材料快速水合能力；三维网络结构含丰富离子基团（ $-\text{COO}^-$ / $-\text{NH}_3^+$ ），溶胀率 $>445\%$ ，实现高效载药（ 96.8% ）；动态可逆键合网络（ $-\text{S}-\text{S}-$ / $-\text{OH} \cdots \text{COOH}$ ）实现分子链重组，24 小时愈合效率 $>95\%$ ；长降解周期匹配软骨再生周期。此外， γ -富勒烯（ γ -C60）和莽草酸（SA）协同发挥了很强的抗菌活性，(ACS/SH)/PVA/ γ -C60/SA 水凝胶对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌具有优异的抗菌功效，这主要归因于 γ -C60 三维共轭碳笼和高电子亲和力，SA 其独特的多酚羟基结构。所制备的水凝胶具有出色的机械和抗菌性能，在创面愈合、软骨修复和肿瘤术后填充等应用中具有广阔的应用潜力。

D13-P27

Preparation and performance study of antibacterial (aminated chitosan/Sodium Hyaluronate)/polyvinyl alcohol / γ -fullerene dual-network hydrogel

Chongyan Leng^{1*}

1. Kunming University of Science and Technology

Antibacterial hydrogels exhibit a promising application prospect in wound healing. However, their poor mechanical properties and limited antibacterial efficacy significantly restrict their practical applications. In this study, ACS/SH polyelectrolyte gel powder was synthesized via a two-step method. Fullerene (C60) was encapsulated with γ -cyclodextrin and loaded with shikimic acid (SA) to fabricate a dual-network antibacterial hydrogel, denoted as (ACS/SH)/PVA/ γ -C60/SA. The hydrogel containing 0.5% γ -C60 was selected for characterization using scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and

X-ray diffraction (XRD). The results demonstrated that ACS and SH were cross-linked through hydrogen bonding, while PVA formed an intermolecular hydrogen-bonded network. This hydrogel exhibited significant compressive resistance and could endure a high strain of up to 80%, along with excellent recovery capability. After encapsulation with γ -cyclodextrin, C60 markedly enhanced the hydrophilicity of the sample, reducing the contact angle to as low as 32.0° ; thereby endowing the material with rapid hydration properties. The three-dimensional network structure contained abundant ionic groups ($-\text{COO}^-/-\text{NH}_3^+$), achieving a swelling ratio exceeding 445% and enabling highly efficient drug loading (96.8%). A dynamic reversible bonding network ($-\text{S}-\text{S}-/-\text{OH}\cdots\text{COOH}$) facilitated molecular chain recombination, resulting in a 24-hour self-healing efficiency exceeding 95%. The prolonged degradation cycle aligns well with the cartilage regeneration cycle. Moreover, γ -fullerene (γ -C60) and shikimic acid (SA) synergistically exert potent antibacterial activity. The (ACS/SH)/PVA/ γ -C60/SA hydrogel demonstrated excellent antibacterial efficacy against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*, primarily attributed to the three-dimensional conjugated carbon cage structure and high electron affinity of γ -C60. SA possesses a unique polyphenolic hydroxyl structure. The developed hydrogel exhibits superior mechanical and antibacterial properties, showcasing broad application potential in areas such as wound healing, cartilage repair, and postoperative tumor filling.

D13-P28

环境友好型水凝胶 PVA/CDs/CL 的制备及其性能研究

穆勇昌¹, 李洁^{1*}, 刘云兰¹, 董艺玮¹

1. 中北大学

为满足可穿戴电子设备对环保、低成本及可持续发展的需求,本研究以生物可降解的聚乙烯醇(PVA)为柔性基体,创新性地采用绿色合成的煤基碳量子点(CQDs)与碳化木质素粉末(CL)作为双功能导电填料,成功制备高性能导电水凝胶 PVA/CDs/CL 复合水凝胶。结果表明,CL 的高导电性与 CQDs 丰富官能团协同构建高效导电网络,赋予水凝胶优异的电导率(24.5ms/m),能够满足柔性应变传感器件的应用需求;水凝胶具有优异的拉伸强度(7.5Mpa)和断裂伸长率(487%)。同时,全组分环境友好的特性拓宽了水凝胶的实际应用。基于此水凝胶构建的应变传感器具备高灵敏度(GF=5.34)、快速响应(<200 ms)和稳定的循环性能(1000s),可精准监测人体关节运动(如手指弯曲、膝关节屈伸)和微表情变化(皱眉,张嘴)。该工作为开发低成本、高灵敏、可持续的可穿戴传感器提供了具有产业化潜力的材料解决方案,助力柔性电子器件的绿色化发展。

D13-P29

用可变形的大分子交联剂增强的高缠结水凝胶

王格格^{1*}

1. 宁波大学

高缠结水凝胶近年来吸引了越来越多的关注研究,因其高韧性和低滞后性等优异性能,在生物医学和柔性电子器件等领域展现出重要的应用潜力。然而高缠结水凝胶需要少量的化学交联来提高性能,化学交联带来的局限性仍需进一步改进以适应实际应用的需求。本研究提出一种基于模板效应的便捷的聚合策略,通过聚乙烯吡咯烷酮(PVP)链与聚丙烯酰胺(PAAm)链间的氢键交联域构建高缠结水凝胶,没有化学交联,其中高密度缠结链和氢键交联域之间的协同效应提高了其机械性能的重复性和稳定性。聚合过程中的高单体浓度可以导致较高的缠结密度,也可导致产生不同链长的聚合物。其中较短的分子链在受到拉伸时更易成为应力集中点,率先发生断裂,破坏水凝胶网络结构。因此,该体系中 PVP 链的存在可作为 PAAm 短链的动态补偿链,表现出独特的自适应行为:在拉伸状态下,其可通过动态调整氢键交联域分散应力集中,实现对 PAAm 网络中短链缺陷的弥补,同时实现了高韧性、抗疲劳性及低滞后性。这种新型的高缠结水凝胶的制备方法,不需要任何化学引发剂及共价交联剂。此外,该方法具有通用性,在使用不同聚合物和单

体的水凝胶中皆可被验证，这使得其在柔性可穿戴设备和软体机器人等领域具有巨大的应用前景。

D13-P30**Highly-entangled hydrogel Strengthened with deformable macromolecular cross-linker**Gege Wang^{1*}

1. Ningbo University

Highly entangled hydrogels have attracted increasing attention and research in recent years. However, highly entangled hydrogels require a small amount of chemical crosslinking to improve their performance. The limitations brought by chemical crosslinking still need to be further improved to meet the requirements of practical applications. However, the traditional highly entangled hydrogels through chemical cross-linking have certain limitations on the fatigue threshold and poor reusability. Further improvements are still needed to meet the requirements of practical applications. This study proposes a convenient polymerization strategy based on the template effect to construct a highly entangled hydrogel through the hydrogen bond cross-linking domain between the polyvinylpyrrolidone (PVP) chain and the polyacrylamide (PAAm) chain. There is no chemical cross-linking. The synergistic effect between the high-density entangled chain and the hydrogen bond cross-linking domain improves the repeatability and stability of its mechanical properties. High monomer concentration during the polymerization process can lead to a higher entanglement density and also result in the formation of polymers with different chain lengths. Among them, the shorter molecular chains are more likely to become stress concentration points when stretched and break first, destroying the hydrogel network structure. Therefore, the existence of the PVP chain in this system can serve as a dynamic compensation chain for the short chains of PAAm, showing unique adaptive behaviors: In the stretched state, it can disperse stress concentration by dynamically adjusting the hydrogen bond crosslinking domain to compensate for the defects of the short chains in the PAAm network, while achieving high toughness, fatigue resistance and low lag. The preparation method of this new type of highly entangled hydrogel does not require any chemical initiators or covalent crosslinking agents. In addition, this method is universal and can be verified in hydrogels using different polymers and monomers, which makes it have great application prospects in fields such as flexible wearable devices and soft robots.

D13-P31**Sea cucumber-inspired highly entangled strain-hardening hydrogels**Lu Gao,¹ Chuanzhuang Zhao^{1*}

1. Ningbo University

As the application of water-repellent polymers in the field of soft materials continues to expand, the performance of these materials under extreme conditions, such as resistance to impact and tearing, has become a pressing concern. In nature, the skin of the sea cucumber utilizes a mechanism of strain hardening to protect itself. Under external stress, its collagen and protein networks work together to rapidly harden the material. Inspired by these natural processes, this study proposes a synthetic water-repellent polymer with a high density of non-covalent interactions. By incorporating a high concentration of dynamic mechanical behavior-enhancing groups, this polymer endows the material with enhanced resilience and rigidity. Under external stress, these groups facilitate the formation of non-covalent interactions, thereby enhancing the material's resistance to damage. This results in a combination of enhanced resilience and rapid hardening, making the material suitable for applications such as protection against wear and tear in dynamic environments. The proposed polymer demonstrates significant potential for applications in soft materials, including sports equipment monitoring and water-based protective coatings.

D13-P32**基于电刺激治疗与智能伤口监测一体化的生物活性自适应水凝胶平台**方莺¹, 许可², 王亚楠², 王士斌¹, 傅超萍^{1*}

1. 华侨大学

2. 南方医科大学南方医院

电刺激 (Electrical Stimulation, ES) 疗法作为一种新兴的促进伤口愈合手段, 已展现出良好的应用前景, 但目前仍缺乏将治疗刺激与伤口状态实时监测相结合的平台。为此, 本研究构建了一种集成 ES 治疗与生物电子传感功能的多功能水凝胶体系, 用于智能化、个性化的伤口管理。该水凝胶以动态硼酸酯交联的聚乙烯醇 (PVA) 为基体, 引入羊毛角蛋白以增强止血性能, 并辅以单宁酸赋予其优异的组织粘附性和抗氧化能力, 从而实现材料的高度拉伸性、自适应性和自愈合能力。在电刺激作用下, 该水凝胶显著促进血管新生和上皮重建, 体内实验显示其在术后第 14 天创面闭合率高达 99.96%。同时, 通过构建的电阻传感机制可实现创面愈合状态的实时监测: 术后第 2 天和第 4 天处于活跃修复期的创面, 其电阻变化幅度较术前完整皮肤超过两倍; 而术后出现感染时检测到的皮下脓肿, 其信号强度则不足完整皮肤的一半。相较之下, 术后 3 周评估的完全愈合皮肤, 其电阻值接近术前完整组织水平。上述结果在初步临床验证中充分展现了该水凝胶平台在治疗效果与智能诊断融合方面的优势, 为下一代伤口管理提供了基于数据驱动的个性化策略, 亦凸显其良好的临床转化潜力。

D13-P33**用于链霉素抗生素选择性检测的二维光子晶体水凝胶适配体传感器**张海援¹, 蔡仲雨^{1*}

1. 北京航空航天大学

链霉素是一种来源于灰色链霉菌的氨基糖苷类抗生素, 主要对革兰氏阴性菌具有抗菌活性, 其通过抑制细菌蛋白质合成用于治疗肠炎、痢疾等细菌感染, 广泛应用于医学、畜牧业和农业领域。然而, 链霉素的长期广泛使用导致其在动植物体内的残留积累, 最终可能通过食物链进入人体, 对人类健康构成潜在威胁。因此, 发展高灵敏、选择性强的链霉素痕量检测技术具有重要意义。

本研究基于适配体对链霉素的高特异性识别能力, 构建了一种简单、经济、高灵敏度且选择性良好的生物传感器。该传感器由聚苯乙烯 (PS) 二维光子晶体 (2DPC) 嵌入聚 (丙烯酸-共丙烯酸) 水凝胶中形成的二维光子晶体水凝胶 (2DPCH) 构成, 并通过氨基修饰的 DNA 适配体进行功能化。当传感器浸入含有链霉素的溶液中时, 链霉素与适配体特异性结合, 诱导适配体从无序/半折叠态转变为刚性有序结构, 触发其构象从拉伸状态向环状结构转变, 导致聚合物链之间距离增大, 进而引起水凝胶的膨胀。该体积变化使 2DPC 中 PS 微球的间距增大, 表现为德拜衍射环直径的可测变化。

通过监测传感器在链霉素存在前后德拜衍射环直径的差异, 可实现对链霉素浓度的定量检测。实验结果表明, 该传感器在 0.1 nM 至 100 nM 的链霉素浓度范围内表现出良好的线性响应, 检测限低至 0.3 nM。此外, 该传感器对链霉素具有良好的选择性, 未受到其他常见抗生素的干扰, 显示出其在食品安全和环境监测中的潜在应用价值。

D13-P34**一石二鸟策略协同调节水凝胶电解质的内在滞后和界面粘附性**赵艳艳¹, 顾相伶^{1*}, 赵可伟¹

1. 德州学院

水凝胶电解质在原电池中起着至关重要的作用。然而, 目前的水凝胶电解质普遍存在固有滞后率高、界面粘附力低等严重问题, 导致输出功率效率低、界面电阻大, 严重制约了材料的性能。为了解决这一挑战, 我们提出了一种“一石二鸟”的策略, 以协同调节全聚合物基柔性水凝胶电解质的滞后性和界面粘附。

该水凝胶电解质由聚丙烯酰胺(PAM)为脆性网络, 甲基纤维素(MC)为坚韧网络, 丝素蛋白(SF)为大分子两性离子组分组成。两性离子 SF 的存在允许同时调节水凝胶的滞后性和附着力, 只需调整预聚合溶液的 pH 值。当预聚合溶液的 pH 值从 4 调整到 11 时, 水凝胶的附着力提高了 3.44 倍, 其中 S6PM-11 水凝胶的附着力最高可达 15.48 kPa; 当 pH 值从 6.5 调整到 12 时, 水凝胶的迟滞率降低了 2.22 倍, 其中 S6PM-12 的迟滞率最小, 仅为 1.91 kJ/m³。最终, 用 S6PM-12 水凝胶组装的一次电池显示出显著的输出电压(1.4 V), 并且在严重变形条件下保持小于 3.6% 的电压变化, 表明制造的电池具有环境耐受性和长期可用性。这种通过调节 pH 值来控制水凝胶滞回和粘附的“一石二鸟”策略, 为未来的智能柔性可穿戴传感器提供了一种新的途径。

D13-P35

具有可调孔径 RB-GelMA/PEO 大孔水凝胶

丁蕊蕊, 王昱文, 王喆, 刘玲蓉*

1. 中国医学科学院
2. 北京协和医学院生物医学工程研究所

目的 水凝胶因其高度水合性和生物相容性, 被广泛用于组织工程支架。然而, 传统水凝胶因网络密集、孔径小, 限制了细胞生长和迁移。本研究旨在通过制备甲基丙烯酸酯化明胶 (GelMA) 大孔水凝胶, 解决细胞生长受限问题。**方法** 通过甲基丙烯酸酐 (MA) 与明胶反应, 制备 GelMA。利用傅里叶红外光谱 (FT-IR) 和核磁共振氢谱 (1H-NMR) 对 GelMA 的化学结构进行表征; 将罗丹明 B (RB) 接枝到 GelMA 上, 制备 RB-GelMA, 通过紫外-可见光谱和荧光光谱分析接枝效果; 以不同浓度的 PEO (0%~1.6%) 作为致孔剂, 与 RB-GelMA 混合, 通过光交联法制备大孔水凝胶, 利用激光扫描共聚焦显微镜 (LSCM) 观察水凝胶的微观结构, 分析 PEO 浓度对孔径大小和分布的影响; 使用万能试验机测试水凝胶的压缩模量和力学强度, 评估其机械性能; 通过流变仪测定水凝胶前体溶液的剪切变稀行为及成胶后的流变性能; 将兔子的骨髓间充质干细胞接种于不同孔径的水凝胶上, 通过 CCK-8 实验、活死染色和细胞形态观察, 评估水凝胶对细胞增殖和迁移的影响。**结果** FT-IR 和 1H-NMR 结果显示, 成功制备了 GelMA; 紫外-可见光谱和荧光光谱证实 RB 的成功引入, 为后续可视化研究奠定了基础; LSCM 结果显示, 随着 PEO 浓度的增加, 水凝胶的孔径显著增大, 孔径的增大更有利于细胞的迁移和增殖; 流变学测试表明, 水凝胶前体溶液具有剪切变稀特性, 便于注射和成型, 成胶后在 0.5% 剪切应变范围内表现出稳定的弹性模量; 力学性能结果显示, 尽管孔径增大, 水凝胶仍保持较高的机械强度, 流变学与力学性能结果说明该大孔水凝胶适合作为支架材料; 细胞实验表明, 与传统无孔径的水凝胶相比, 具有适宜孔径的水凝胶更有利于细胞增殖和伸展。**结论** 本研究成功制备了具有可调孔径的 RB-GelMA/PEO 大孔水凝胶, 不仅解决了传统水凝胶因孔径不足导致的细胞生长受限问题, 还为组织工程提供了一种性能优异的新型支架材料。

D13-P36

纳米微球-水凝胶仿生双重稳态系统通过分子整合与微环境协同调控提高无定形磷酸钙稳定性用于促进骨缺损再生

王思霖¹, 李勐¹, 裴丹丹^{1*}

1. 西安交通大学口腔医学院

研究背景:

口腔颌面骨缺损发生率高、危害大, 给患者造成巨大的健康经济负担。骨替代材料的植入是修复骨缺损的最有效手段, 尽管骨替代材料市场快速增长 (2025 年我国市场规模预计达 160 亿元), 现有材料仍局限于被动“占位”功能, 普遍存在成骨启动迟滞、新骨形成不足等临床瓶颈。

近年来, 成骨矿化领域的重要理论革新指出: 研究发现钙磷离子并非直接结晶矿化, 而是通过非晶态无定形磷酸钙 (ACP) 这一关键矿化前体, 在胶原纤维模板引导下有序沉积完成骨形成。这一机制为开发具有主动诱导骨再生能力的 ACP 基材料提供了全新思路。然而, 外源性 ACP 在生理环境中存在显著稳定

性缺陷——其亚稳态特性导致快速自发结晶转化为羟基磷灰石，从而丧失内源性促骨再生功能。因此，如何有效调控 ACP 的动力学稳定性，维持其生物活性，成为实现临床转化的关键科学难题。

研究方法：

受到体内生理性 ACP 多重稳定协同稳定策略的启发，本研究创新性地提出了一种仿生双重稳态策略，该策略通过 DNA 纳米颗粒与智能温敏水凝胶的协同机制实现 ACP 稳定性与成骨效能的两方面突破：

1. 分子尺度稳定：利用具有聚阴离子性质的 DNA 大分子对 ACP 中的钙离子进行螯合，自组装形成 DNA-ACP 纳米微球，有效延缓非晶态 ACP 颗粒成核结晶的转换过程，维持其“类液态”性质；
2. 稳态微环境调控：构建富含钙离子强亲和性磷酸基团的温敏水凝胶，模拟体内富阴离子稳定基团微环境，在隔绝不稳定环境因素干扰的情况下进一步稳定 ACP 的活性构象，双重保障 ACP 稳定性。

通过 TEM、SAED、EDS、XRD 等技术表征外源 ACP 的稳定性；采用 ALP/ARS 染色、qPCR、Western Blot 及胶原矿化实验评估该系统的体外促矿化及促干细胞成骨分化能力；建立标准化的大鼠颅骨及下颌骨缺损模型验证体内促骨再生效果。

研究结果：

1. 稳定性突破：双重稳态水凝胶系统使外源 ACP 在模拟生理条件下的稳定时间延长至 14 天，较现有单重稳态策略提升了约 2.3 倍。

2. 材料特性：该复合材料具有智能温敏特性，能自组装形成可注射双网络支架，在室温下具有良好的可注射、自适应与自愈合性，能有效满足各种不规则骨缺损修复的术中操作便捷性；在 37℃ 体温条件下，该水凝胶的第二重网络可在 5-10 分钟内自发交联，提供可靠的术后长期机械支撑。

3. 成骨效能：

系统化的体外实验表明，该材料能显著促进胶原基质矿化和成骨分化：将大鼠骨髓间充质干细胞与 ACP 双重稳态水凝胶进行共培养，qPCR 及 Western Blot 结果显示，ALP、PUNX2、OCN 等成骨相关基因及蛋白标注物表达水平较对照组显著上升；ALP/ARS 染色结果显示，干细胞分泌大量碱性磷酸酶及钙结节，提示显著的成骨向分化趋势；此外，与双重稳态系统共孵育的二维及三维胶原纤维均较对照组增粗，结晶度显著提高。

在两种标准化临床前骨缺损模型中，相较于传统材料展现出更优越的再生性能：将材料植入骨缺损区域 8 周后，micro-CT 扫描显示 ACP 双重稳态水凝胶组新生骨覆盖量较空白组、结晶态磷酸钙组及不负载 ACP 的空白水凝胶组分别提高了 4.5 倍、1.5 倍和 1.8 倍；对各组骨缺损区域进行切片染色，结果显示本研究构建的水凝胶能显著增加缺损区新生骨量以及组织内成骨相关基因的表达量。

研究结论：

本研究创新性地通过双重稳态协同稳定机制为外源 ACP 稳定性这一长期难题提供了仿生学解决方案，所构建的智能材料系统兼具仿生稳态特性、临床适用性与主动再生能力，为骨再生材料从“被动替代”到“主动诱导”的范式转变提供了理论依据与技术路径。

D13-P37

用于湿润环境的新型高黏附性水凝胶贴片构建策略

仇夏昕¹、冯传良^{1*}

1. 上海交通大学

口腔溃疡（oral ulcers, OU）是一类高发的口腔黏膜疾病，因处于潮湿且动态变化的口腔环境中，其治疗管理面临显著挑战。传统水凝胶贴片在该环境中常表现出黏附力弱、滞留时间短及易受细菌侵袭等问题。为此，本研究构建了一种基于原位光固化的双网络水凝胶系统，旨在实现对复杂湿润口腔环境的高效黏附与控释治疗功能。该水凝胶由物理与化学双重交联网络协同构成：物理交联网络由 C₂ 对称凝胶因子（LPFEG）与大黄素（Emodin, Emo）共组装形成的纳米纤维网络构成，可实现光固化前对口腔不规则表面的瞬时贴附。经紫外光照，化学交联网络通过自由基聚合反应迅速形成，并与组织形成多重相互作用，显著提高水凝胶湿黏度强度。双重交联的水凝胶网络具有高密度氢键，显著抑制溶胀行为，有效避免在潮湿环境中的黏附失效问题，表现出长效湿黏附性能。此外，天然药物分子 Emo 具有优异的抗炎、抗菌特性，可实现药

物的持续释放并促进口腔黏膜修复。该研究开发了新型湿黏附策略，为构建新型口腔溃疡敷料提供了有效路径，展示出良好的应用前景与治疗潜力。

D13-P38

Copper-containing nanoenzyme hydrogel to improve neuropathic pain relief synergistically Abstract

Jingwen Zhu^{1*}

1. Wenzhou Medical University

Objective

Neuropathic Pain ((NP) is a complex chronic pain that is refractory to treatment and seriously affects the physical and mental health of patients. The current management of NP is mostly pharmacological, which is progressively limited in clinical application due to its side effects and poor efficacy. Hence, the search for effective anti-oxidative and anti-inflammatory therapies for the management of NP is not only an urgent need, but also a formidable challenge. Along with the development of Tissue Engineering technology, the application of various new bioactive materials in the medical field is gradually increasing. In this study, we prepared an injectable, adhesive, antioxidant copper nanoenzymes-containing copper hydrogen phosphate composite hydrogel (CuP/PH), to investigate its effects on pain relief and nerve repair in rats by constructing a Chronic constriction injury (CCI) pain model.

Methods

The research consists of three parts, Study I mainly includes the preparation and characteristics of copper hydrogen phosphate nanosheets and CuP/PH composite hydrogels, which were analyzed for injectability, adhesion and antioxidant properties of the hydrogels. Secondly, the CuP/PH composite hydrogels were used in in vitro Cell experiments to explore the biocompatibility, scavenging of ROS, promotion of neuronal cell migration, and inhibition of inflammatory response of immune cells.

In Study II, 24 male adult Sprague-Dawley rats were randomly divided into a sham-operated group (sham group), a CCI modeling group (CCI group), a hydrogel-only group (PH group), and a copper-containing nanoenzymes hydrogel group (CuP/PH group) according to six rats in each group. The CCI model was performed on rats in all groups except the Sham group, and the PH and CuP/PH groups were injected with the corresponding hydrogels in situ after nerve ligation before sewing up the skin. Mechanical withdrawal threshold (MWT), thermal withdrawal latency (TWL), and Sciatic Functional Index (SFI) were measured before surgery and on days 3, 7, 10, 14, and 21 after surgery. On the 21st day after surgery, the modelled sciatic nerve, the dorsal horn of the L4-L6 spinal cord and the gastrocnemius muscle bilaterally were taken for histological analysis and qRT-PCR analysis.

Results

In Study I, XRD results showed that copper hydrogen phosphate nanosheet enzymes were successfully prepared, and SEM results showed that the prepared copper hydrogen phosphate was a lamellar structure with diameter ≤ 500 μm . The characteristics of the CuP/PH composite hydrogel showed that the prepared hydrogel had good gelability, injectability, adherence, and anti-oxidation properties. The results of in vitro cell experiments showed that the hydrogel had good biocompatibility for Schwann cells, could significantly promote cell migration, scavenge ROS generated by Schwann cell injury, and also effectively reduced the secretion of iNOS, TNF- α , and IL-1 β which are inflammatory factors in macrophages.

Study II results:

(1) Results of Pain Behaviour: compared to the CCI group, at 7, 10, 14, and 21 days postoperatively, MWT improved in the CuP/PH group of rats ($P < 0.001$), the results of the TWL were consistent with the MWT results.

(2) Motor function performance: 21 days after surgery, the SFI index of motor function showed an improvement in the CuP/PH group ($P < 0.001$).

(3) Nerve HE Staining: 21 days after surgery, the sciatic nerve fabric gap was enlarged in the CCI group, with the presence of inflammatory cell infiltration, scattered and disordered nerve fibres, and axon breakage; the CuP/PH group showed improvement.

(4) Nerve Immunofluorescence Staining: the fluorescence intensity of myelin protein MBP was significantly reduced in the CCI group; it was improved in the CuP/PH group, showing a more complete and continuous myelin structure.

(5) Neural qRT-PCR analysis: the expression of inflammatory factors of TNF- α , IL-1 β and IL-6 was significantly elevated in the CCI group, and the expression of inflammatory factors was suppressed in the CuP/PH group.

(6) Immunofluorescence staining of the spinal cord dorsal horn: the expression of GFAP and IBA-1, markers of astrocytes and microglia at the dorsal horn of the spinal cord in the CCI group was significantly increased on the modelled side, and the expression of GFAP and IBA-1 was significantly reduced in the CuP/PH group.

(7) Gastrocnemius wet weight and histological morphology: the wet weight ratio of gastrocnemius muscle was significantly reduced in the CCI group, and histological staining showed that the muscle fibres were elongated and disordered, the diameter of the muscle fibres decreased, and a large number of collagen fibres were deposited. the CuP/PH group effectively reduced the gastrocnemius atrophy, and the wet weight ratio of the muscle was elevated, and the muscle fibres were arranged in an orderly manner, the diameter of the muscle fibres increased, and collagen deposition was reduced.

(8) HE staining of important organs: there was no significant difference in HE staining results of heart, liver, spleen, lungs and kidneys in each group, with no histological damage, indicating the good biocompatibility of CuP/PH in vivo.

Conclusion

(1) CuP/PH composite hydrogel has excellent gelation, injectability, adhesion and antioxidant properties.

(2) CuP/PH composite hydrogel showed good biocompatibility, promoted the migration of neuronal cells, scavenged excess ROS generated after cell injury, and effectively inhibited the inflammatory response of immune cells in in vitro cellular experiments.

(3) The intervention of CuP/PH composite hydrogel significantly improved neuropathic pain and neuroinflammation in CCI model rats.

(4) The intervention of CuP/PH composite hydrogel significantly promote the regeneration and functional recovery of injured nerves.

D13-P39

低滞后、高粘附全聚合物基水凝胶传感器的制备及应用研究

赵艳艳¹, 顾相伶^{1*}, 赵可伟¹

1. 德州学院

在当前柔性可穿戴设备快速发展背景下, 蚕丝蛋白(SF)水凝胶因其优异的生物相容性和易功能化特性备受关注。然而, 传统 SF 水凝胶难以同步实现低滞后性、高界面粘附性和长期循环稳定性, 限制了其在传感器领域的应用。本研究创新性地通过前驱体溶液 pH 预调控, 一步法制备了聚丙烯酰胺(PAM)/甲基纤维素(MC)/SF 三元全聚合物网络水凝胶。其中 MC 调控网络孔径增强离子电导率($0.34 \rightarrow 0.57 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$), SF 两性离子特性可提供静电相互作用, pH 调节同步优化了 PAM 交联度、网络间氢键作用及界面性能, 显著降低水凝胶材料的滞后率($21.4\% \rightarrow 7.2\%$), 提升了弹性模量($18.6 \rightarrow 58.9 \text{ kPa}$)和界面粘附力($4.5 \rightarrow 15.48 \text{ kPa}$)。用该水凝胶组装的柔性电子贴片, 实现了人体多部位运动无线监测, 并在心电/肌电检测、信息加密和自供电设备中展现应用潜力。本研究为天然高分子水凝胶的力学-电学-粘附协同增强提供了新策略, 推动了高性能可穿戴传感器的发展。

D13-P40**ROS 响应性手性超分子水凝胶微球用于药物递送**郭雪¹, 窦晓秋¹, 冯传良^{1*}

1. 上海交通大学

手性是自然界最重要的生物化学特征之一, 其中超分子手性与生命现象息息相关。生命体中的超分子手性, 如 DNA 的右手螺旋结构对基因的表达和复制至关重要, 蛋白质的 α 螺旋和 β 折叠结构对生命活动发挥重要作用, 其构象紊乱可能会破坏体内细胞和组织功能, 引起重大疾病。癌症是一种高致死性的疾病, 围绕癌症治疗的许多策略已经被提出。与传统水凝胶相比, 超分子水凝胶在生物可降解性、分子识别能力、刺激响应能力、自组装能力等方面表现出潜力。可持续和可控的药物释放是超分子水凝胶用于癌症治疗的重要特征。受此启发, 构建具有超分子手性的水凝胶微球。水凝胶微球具有柔软、生物相容性好等优点, 为所包裹的活性药物成分提供稳定且良好的保护。此外, ROS 响应性水凝胶微球在肿瘤微环境中过量 GSH 刺激下对药物进行时空可控释放。水凝胶微球的手性在抗肿瘤免疫和局部免疫微环境调节中发挥关键作用, 协同药物进行肿瘤治疗。

D13-P41**基于金属离子配位的水凝胶纤维实现手性光催化剂的高效分离与循环使用**孟令伟¹, 冯传良^{1*}

1. 上海交通大学

光催化不对称合成具备优异的立体选择性和反应效率, 能够突破传统热化学反应的动力学限制, 符合绿色化学的发展需求。然而, 均相体系中催化剂与产物分离困难的问题限制了其实际应用。本研究提出了一种基于分子自组装策略的非均相手性光催化体系: 设计并合成了含邻苯二酚基团的 C_2 对称有机分子。呈 C_2 对称型构型的分子可以在特定条件下自组装形成极为稳定的水凝胶螺旋纤维。邻苯二酚基团在纤维表面呈手性阵列排列, 过渡金属离子可与邻苯二酚基团形成强健的配位相互作用, 构建具有空间选择性的非均相手性光催化位点, 实现高 ee 值的立体选择性反应。反应后, 通过简单的离心操作可以实现催化剂的回收利用。本研究将分子级手性信息转化为宏观材料的空间手性排布, 利用水凝胶纤维载体解决了均相催化剂难以循环利用的关键瓶颈。本研究为发展可持续手性光催化技术提供了新思路, 在药物合成与精细化工领域具有应用潜力。

D13-P42**Preparation and properties of PVA/PAM/PANI hydrogels with high strength and high conductivity**陈启龙^{1*}

1. 西安科技大学

Conductive hydrogels have attracted much attention because of their lightweight, high fit, high sensitivity, low cost and other advantages. It is suitable for the preparation of wearable flexible electronic devices, biological electrode, flexible sensors and smart textiles. Flexible pressure sensors are favored over traditional rigid sensors because of their flexible properties that allow them to detect pressure sensitively on shaped surfaces. In this paper, acrylamide monomer (AM) was polymerized into polyvinyl alcohol (PVA) using the accelerator tetramethylethylenediamine (TEMED), the crosslinking agent N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) and the initiator potassium persulfate (KPS) at room temperature. The procedure was employed to prepare a transparent polyvinyl alcohol/polyacrylamide (PVA/PAM) double-network hydrogel. Thereafter, the polyvinyl alcohol/polyacrylamide/polyaniline (PVA/PAM/PANI) conductive hydrogel was prepared by doping aniline monomer (ANI) into the transparent hydrogel through in-situ polymerization with hydrochloric acid providing an acidic environment. After the above preparation work was completed, we continued to study the structure,

morphology and properties of the conductive hydrogel PVA/PAM/PANI, as well as the relationship between them, in order to determine the optimal preparation process and develop flexible pressure sensors with excellent impact resistance, high sensitivity, fast response and high stability. PVA_xPAM_yPANI ($x=0, y=3; x=1, y=6/8/10/12/14$) conductive hydrogels with different PVA to PAM mass ratios were designed. The best performing sample was found to be a PVA1PAM12PANI hydrogel with a mass ratio of PVA to PAM of 1:12. In the test, the PVA1PAM12PANI hydrogel demonstrated high flexibility and stretchability, specifically exhibiting a Young's modulus of 154 kPa and a fracture toughness of 246.08 kJ/m². Additionally, its sensing performance showed a gauge factor (GF) of 2.1. Good performance is inextricably linked to structure, Hydrogen bonds are formed in the polyaniline (PANI) to PVA_xPAM_y network, giving the hydrogel excellent strength and toughness. As can be seen from the FT-IR spectra, the weak single peaks near 1190 cm⁻¹ and 1260 cm⁻¹ belonging to the -OH in-plane bending vibration of PVA with redshift indicate the presence of mutual hydrogen bonding between PVA and PANI. The characteristic crystalline plane of PANI at the XRD diffraction angle of 26.83 ° and the intensity of the peak confirm that PANI improves the crystallinity of the hydrogel and binds well with PAM. The anti-attack conductive hydrogel composed of PANI and PVA_xPAM_y interpenetrating network prepared in this paper has high sensitivity under low strain, and can be widely used in electronic skin, flexible sensors, flexible capacitors, flexible wearable devices and other fields.

D13-P43

基于羧甲基壳聚糖和氧化透明质酸负载大黄素的光响应抗菌水凝胶敷料的制备与抗菌性能研究

李玉祥¹, 闫雨涵¹, 孙萌^{1*}

1. 信阳师范大学, 生命科学学院

皮肤伤口愈合是一个复杂的生理过程, 细菌感染是导致伤口愈合延迟的主要原因之一。严重的细菌感染和细菌定植会发展成脓毒症或多器官衰竭, 甚至危及生命。伤口敷料当下被视为一种重要的感染控制工具, 传统敷料如绷带、纱布等在临床上应用广泛, 能够从物理上保护伤口免受污染, 但易导致伤口局部缺血和坏死以及对伤口组织的粘附造成的二次伤害等。随着现代医疗理论的进步和技术的发展, 基于传统敷料而发展的现代敷料逐渐展现出在促进伤口愈合领域更大的优势, 其一具有类似于皮肤的良好韧性和弹性, 避免外界损伤, 其二高含水率和多孔结构则为伤口提供了一个有友好的愈合环境, 抵抗微生物入侵, 加速创口愈合。综上开发天然抗菌水凝胶有助于避免细菌耐药性的产生和抗菌剂体内滞留的潜在毒性, 在伤口感染治疗中具有重要意义和应用前景。

近来我们开发了一种基于氧化透明质酸(OHA)与羧甲基壳聚糖(CMCS)负载大黄素(Emo)的新型水凝胶伤口敷料。该敷料利用动态希夫碱键进行交联, 实现了温和条件下的快速原位凝胶化, 同时 Emo 作为光驱动剂, 在 800nm 飞秒脉冲激光的照射下能破坏细菌细胞膜, 抑制细菌代谢, 提高水凝胶抗菌能力。研究中探讨了壳聚糖, 壳聚糖季铵盐, 羧甲基壳聚糖及不同前体溶液浓度对水凝胶性能, 交联度和模量的影响。实验表明 CMCS 的成胶性能最佳, 且 OHA 与 CMCS 体积比为 1:2 成胶时间最短。研究评估了水凝胶的微观形貌及溶胀性能等表征, 并通过光热转化实验, 光循环实验验证光重复性和稳定性。验证了该水凝胶的抗菌活性和生物相容性, 并在小鼠全层皮肤缺损模型中, 证实该水凝胶显著加速了创面闭合率, 有效抑制了炎症反应, 是一种极具潜力的新型伤口敷料。

关键词: 水凝胶, 大黄素, 光驱动剂, 伤口敷料, 动态共价键, 抗菌, 伤口愈合

参考文献

- [1] Hao R, Cui Z, Zhang X, et al. Rational Design and Preparation of Functional Hydrogels for Skin Wound Healing. *Frontiers in chemistry*, 2021, 9:839055.
- [2] Ambrogi V, Pietrella D, Donnadio A, et al. Biocompatible alginate silica supported silver nanoparticles composite films for wound dressing with antibiofilm activity. *Materials Science and Engineering C*, 2020, 112:110863.
- [3] Dhivya S, Padma V V, Santhini E. Wound dressings-a review. *Biomedicine*, 2015, 5(4):22.

D13-P44

壳聚糖衍生物增强漆酶催化效率

任卓威¹, 高婕¹, 蔡俊文¹, 张婉莹¹, 李玉祥¹, 闫雨涵¹, 孙萌^{1*}

信阳师范大学, 生命科学学院

漆酶作为一种多组分含铜氧化酶, 凭借其绿色高效的催化特性, 在环境污染治理、生物传感等领域展现出重要应用价值。然而, 其工业化应用受固有缺陷制约显著, 包括生产成本高昂、循环利用困难及稳定性不足等问题。尽管酶固定化技术与多功能水凝胶领域的研究持续深入, 但现有策略仍面临系列挑战: 酶与水凝胶固定基质的结合方式单一、固定化过程中酶分子泄露或空间构象改变、负载量有限及传质阻力较大等。基于此, 本研究通过漆酶与高分子间的静电吸引作用构建固定化水凝胶体系, 以提升漆酶催化活性。结果表明, 壳聚糖衍生物与漆酶通过物理交联实现体系的凝胶固定化。所制备的 Laccase@PVA/CMCS 和 Laccase@PVA/HAC 水凝胶不仅显著增强了漆酶在有机相中的催化性能, 还大幅改善了酶的储存稳定性与热稳定性, 同时提升了酶的可重复使用性。即使在恶劣环境条件下, 固定化漆酶的催化活性仍显著优于游离漆酶。该水凝胶体系为固定化漆酶提供了适宜的微环境, 为开发高活性、高稳定性的酶固定化载体开辟了新路径, 在工业生物催化领域, 尤其是有机溶剂中的催化应用方面具有广阔前景。

关键词: 壳聚糖衍生物, 酶固定, 生物催化, 漆酶

参考文献

[1] Sun M., Wang Y.Y., Huang A.N., ACS Appl Mater Interfaces, 2024, 48126–48138.

[2] Sun M., Peng S.Q., Nie L., ACS Nano, 2021, 14972–14984.

闪报

D13-F01

具有微裂纹结构的仿生光/电双模态水凝胶柔性应变传感器

王定坤¹, 付俊^{1*}

1. 中山大学材料科学与工程学院

近年来, 具有应变依赖电信号和光信号响应的双模态应变传感器因其高检测精度、刺激可视化能力和强环境适应性, 在柔性可穿戴电子产品领域取得了快速发展 (Nano Research, 2024, 17, 1837-1855; Nano-Micro Lett., 2025, 17, 62)。然而, 这类传感器的光信号易受观察角度影响, 难以实现定量测量, 且环境干扰问题显著, 限制了其实际应用。受墨鱼皮肤荧光特性和蜘蛛腿部关节裂纹结构的启发, 本研究开发了一种光/电双模态柔性应变传感器。通过自由基聚合反应, 将罗丹明衍生单体引入聚(丙烯酸羟乙酯)水凝胶网络中, 构建了荧光响应单元。水凝胶顶部的碳纳米管薄膜作为导电层, 在松弛状态下可屏蔽底层水凝胶的荧光发射; 当受到应变作用时, 薄膜产生微裂纹, 不仅使荧光信号得以穿透, 还会破坏导电路径, 导致电阻增大。这种独特的应变依赖型微裂纹结构设计, 使传感器能够同步输出光/电双信号, 实现对刺激的感知与可视化。将该传感器安装在机械手背上, 可通过关节处光/电信号的变化精准检测手指运动及不同手势。此外, 基于仿生微裂纹结构与 3D 打印技术的结合, 该传感器还可拓展应用于多级信息防伪领域, 进一步丰富了柔性应变传感器的功能与应用场景。

D13-F02

抗冻保湿黄原胶-苯胺四聚体多糖导电水凝胶纤维的制备及表征

张雅淇¹, 付俊^{1*}

1. 中山大学

柔韧性和可编织性导电水凝胶纤维在柔性电子设备领域受到广泛关注。[1]水凝胶纤维制备过程中, 存在三个问题: 气泡难除去; 可纺性与力学性能难平衡; 易失水。[2]黄原胶有高粘度及触变性的特点。苯胺

四聚体有低毒性和导电性的特点。[3]本工作将黄原胶和苯胺四聚体改性多糖 (TMAT38) 与三偏磷酸钠 (STMP) 交联, 通过 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 离子配位制备导电及可纺性水凝胶, 并引入聚丙二醇 (PPG2000) 作为化学消泡剂, 采取溶剂置换法提高水凝胶纤维抗冻和保水性。利用 DSC、交流阻抗、称重法、电化学工作站表征水凝胶的抗冻、导电、保湿性及传感行为。结果表明: PPG 能够消除水凝胶制备过程中产生的气泡。甘油浸泡 2h 后的 XG5-TMAT38-STMP- Fe^{3+} /CA-PPG 水凝胶纤维在 $-80\sim-20^\circ\text{C}$ 区间未出现结晶峰; -40°C 条件下, 纤维连接二极管能发光; 水凝胶纤维放置 7 天后仍然能保持初始直径。水凝胶纤维织物可以感知手指弯曲和说话的压力信号, 具有良好的灵敏性和可重复性。本工作基于天然高分子制备的导电水凝胶纤维, 在新一代柔性电子设备领域具有潜在应用价值。

参考文献

- [1] Ju, M.; Wu, B.H.; Sun, S.T.; Wu, P.Y. Redox-Active Iron-Citrate Complex Regulated Robust Coating-Free Hydrogel Microfiber Net with High Environmental Tolerance and Sensitivity. *Advanced Functional Materials*. 2020, 30(14): 1910387.
- [2] Zhang, Y.Q.; Qi, J.Y.; Fan, H.; Chen, P.; Li, B.R.; Zhao, L.Y.; Bai, Z.K.; Zhang, R.Q.; Tao, Y.Z. Conductive, Injectable, and Spinnable Aniline Tetramer-Modified Polysaccharide Hydrogels for Self-Powered Electrically Responsive Drug Release. *ACS Applied Polymer Materials*. 2022, 4(12): 9206-9220.
- [3] Xu, Q.R.; Zhang, Y.Q.; Zhang, R.Q.; Tao, Y.Z. Electroresponsive and spinnable hydrogels from xanthan gum and gelatin enhanced by Fe^{3+} ions coordination. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021, 138(48).

D13-F03

Time-Efficient Fabrication of Large-Scale, Mechanical Robust, Self-Adhesive, Electrically Conductive Hydrogel as Electronic Skin

Yubin Yang¹, Shi-Neng Li^{1*}

1. Zhejiang A&F University

Conductive hydrogel-based sensing platforms have emerged as pivotal components in next-generation epidermal electronics. Nonetheless, existing systems confront critical limitations regarding highly performance integration, accelerated in-mass manufacturing, and signal consistency during long-term dynamic monitoring. Herein, we address this issue through establishing a novel nano-catalytic system based on graphene oxide-L-ascorbic acid in a conventional hydrogel matrix. Intriguingly, this system i) enables rapid (~several minutes), spontaneous and large-scaled fabrication under ambient environment with no energy supply, ii) achieves mechanical-electrical coupling by constructing well-organized hybrid network, and iii) maintains sensitive and reliable real-time signals across multiple-scale deformation sensing detection. The engineered hydrogel demonstrates a well-balanced mechanical feature, characterized by high tensile strength (232.5 kPa), outstanding toughness (4.21 MJ/m³) along with ultrahigh ductility (2522%). Meanwhile, the corresponding sensors demonstrate exceptional strain-dependent sensitivity (maximum GF = 11.2), highly stable repeatability (200% for 200 cycles), and a broad electromechanical range (~2400%). Benefiting by its excellent self-adhesive performance, when deployed as epidermal interfaces, this hydrogel displays clinical-grade accuracy in continuous pulse wave and muscle contraction monitoring (ECG/EMG). Remarkably, the platform sustains high-level ECG/EMG signals for distinguishing personal status or reflecting systematized human motions via wireless transmission. We anticipate that this innovative strategy for designing highly integrated and reliable hydrogel materials, provides a basis for developing next-generation wearable electronics for personal health management or disease prevention.

D13-F04

低共熔溶剂增强 PEDOT:PSS 共晶凝胶应变传感性能研究

董艺玮¹, 李洁^{1*}, 穆勇昌¹, 刘云兰¹

1. 中北大学

PEDOT:PSS 因其独特的离子-电子混合导电性在柔性电子领域备受关注。然而,传统 PEDOT:PSS 材料可拉伸性能差,制备的 PEDOT:PSS 水凝胶力和电性能有待提升,限制了其在柔性传感器中的应用。本文通过溶剂置换策略引入金属盐基低共熔溶剂 (DES),制备了高应变敏感性的 PEDOT:PSS 共晶凝胶。DES 的引入不仅增强了聚合物链的聚集程度,诱导了氢键的增强,还驱动 PEDOT 分子链从卷曲构象转变为线性构象,显著提升了材料的导电性;同时,DES 中的金属离子的引入进一步提升了材料的电导率。与未经过 DES 置换策略制备的 PEDOT:PSS 水凝胶相比,共晶凝胶的灵敏系数提升了 16 倍 ($GF=21.2$),拉伸强度提升了 12 倍 (0.98 MPa),并在 100%应变下稳定循环 600 次。此外,DES 赋予共晶凝胶优异的抗冻性和环境稳定性,使其在低温环境 (-20°C) 和久置后仍能保持稳定的传感性能。上述结果表明, PEDOT:PSS 共晶凝胶在柔性应变传感及人机交互领域具有广阔应用前景。

仅发表论文

D13-PO01

Synthesis, characterization, and application of biodegradable superabsorbent gels based on carboxymethyl chitosan-modified sodium lignosulfonate

Yanfei Liu¹, Juan Li¹, Chi Zhang^{1*}

1. Guizhou Institute of Materials Industry Technology Research

In this study, a novel three-dimensional bio-based superabsorbent hydrogel, SL-P(AA-AMPS)/CMCS, was synthesized via freeze-drying using sodium lignosulfonate (SL) with rigid phenylpropane structures as the bio-based framework, carboxymethyl chitosan (CMCS) enriched with hydrophilic groups ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, and $-\text{NH}_2$) as the hydrophilic modifier, and acrylic acid (AA) and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid (AMPS) as monomers. Polymerization was initiated by ammonium persulfate (AP) and crosslinked with N,N'-methylenebisacrylamide (MB). The hydrogel's structure, morphology, and absorption properties were systematically characterized using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and scanning electron microscopy (SEM). Results revealed a uniform porous structure with an average pore size of $5.8\text{ }\mu\text{m}$. Absorption capacities in deionized water and 0.9% NaCl solution reached 1132.9 g/g and 127.9 g/g , respectively, surpassing commercial diaper fillers (273.3 g/g and 61.5 g/g) and feminine hygiene products (223.5 g/g and 45.8 g/g). Under pressurized conditions (2068 Pa), absorption values remained high at 125.7 g/g (deionized water) and 24.0 g/g (0.9% NaCl solution). The hydrogel exhibited exceptional water retention, retaining 88.8% and 85.8% of absorbed water after 8 h at 40°C and 60°C , respectively. Swelling kinetics followed a pseudo-first-order model ($R^2 > 0.99$), achieving equilibrium within 600 s (deionized water) and 60 s (0.9% NaCl solution). Biodegradation tests demonstrated a 47.5% degradation rate in soil after 28 days, significantly exceeding that of non-bio-based P(AA-AMPS) (3.7%). Application tests highlighted superior absorption capacities for artificial urine (82.4 g/g) and blood (179.2 g/g), outperforming conventional hydrogels by 3.3- and 7-fold, respectively.

D13-PO02

柔性电子器件用多功能多金属氧簇基离子水凝胶

王志达¹, 梁嵩¹, 刘镇宁¹, 臧宏瑛², 苏忠民^{1*}

1. 吉林大学

2. 东北师范大学

数字时代背景下,多功能无机材料与可加工高分子材料的融合为仿生智能柔性材料发展创造重大机遇。尽管无机多金属氧簇增强离子液体基凝胶可协同组分优势构建高性能柔性电子器件,但多金属氧簇在离子液体/水二元溶剂中的宏观相分离往往导致其在水凝胶基质分散不均,成为制约其在高端应用的关键瓶颈。

在本研究中，我们通过聚两性离子的带电网络精准调控多金属氧簇与离子液体之间的静电相互作用，构建纳米电网限域微环境，实现体系从宏观相分离向亚毫米级蠕虫状微相分离结构的定向转变。制备的多金属氧簇基离子水凝胶兼具高平均透光率(>95%)、高电导率(~4.48 mS/cm)、卓越的机械性能(如超过 400% 的伸长率、约 20 MPa 的抗压强度和回弹性)、以及优异的环境适应性(如保水性、粘附性和自愈性)等特性。基于该材料开发的传感型锌离子混合超级电容器成功实现能量存储与应变检测的双功能集成。并且，该策略对多种聚两性离子-多金属氧簇-离子液体/水体系具有普适性。本工作不仅为微相分离凝胶体系中的微观形貌调控提供了重要指导，同时为开发尖端智能柔性电子器件的多功能多金属氧簇基离子水凝胶开辟了新路径。