

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

D13-水凝胶材料
D13-Hydrogel Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

D13-水凝胶材料

分会主席：冯传良、吴子良、付俊、陈强

邀请报告

D13-I01

光响应智能水凝胶

李闯*

中国科学技术大学

高分子水凝胶是一类由聚合物交联网络通过包含大量水分子而形成的宏观软材料，可在外界刺激下通过吸水或失水过程产生体积溶胀或收缩，这一体积变化过程与自然界中某些植物的生物功能（松果的开合等）极其相似，均是通过水分子扩散实现宏观结构或形态改变，因此水凝胶成为一种重要的“类生命”刺激响应性软物质。设计合成新型动态高分子水凝胶进而实现精确、复杂的仿生功能一直是高分子领域研究的重点与难点之一。光作为一种无接触式、可快速开关和具备高时空分辨率的刺激信号，可用来调控水凝胶微观网络结构变化从而赋予水凝胶宏观动态特性。我们设计合成了一系列基于螺吡喃分子开关的光响应高分子体系，能够在外界光能的持续输入下，分别实现光能耗散驱动的高分子相态转变、溶胶-凝胶转变以及定向可控的水凝胶体积变化。在此基础上，我们进一步揭示螺吡喃分子异构化影响高分子水凝胶体积动态变化的机理和规律，实现了水凝胶的丰富、复杂和可控形变模式，包括自适应形变、周期性振荡、自调节形变和运动反转等，并探索了这些体系在信息瞬时存储和加密、智能软体机器人等方面的应用^[1-5]。

参考文献:

1. K. Guo, X. Yang, C. Zhou, **C. Li***. *Nat. Commun.* **2024**, *15*, 1694.
2. **C. Li**, A. Iscen, L. Palmer, G. Schatz, S. Stupp*. *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 8447.
3. X. Yang, W. Shi, Z. Chen, M. Du, S. Xiao*, S. Qu*, **C. Li***. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, *33*, 2214394.
4. Z. Chu, C. Yu, **C. Li***. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, *34*, 2307332.
5. M. Yang, Y. Dong, **C. Li***. *Chem. Mater.* **2023**, *35*, 9978.

D13-I02

正交光化学与溶剂效应协同增韧自适应低共熔聚合物凝胶

于游*

西北大学化学与材料科学学院

相较于水凝胶和有机凝胶，低共熔凝胶具有良好的导电性、生物相容性和稳定性。凝胶内高分子链与溶剂之间的各种超分子作用能够明显提升材料的机械性能。相较于传统离子液体，低共熔溶剂（DES）的性质可以简便地通过改变组分来进行精确调节，有利于设计具有多种功能的凝胶材料和器件。因此，低共熔凝胶在高性能可穿戴柔性电子、储能、传感领域有重要的潜在应用价值。低共熔聚合物凝胶的制备过程通常需借助加热、光照等过程引发原位聚合反应来完成。然而，此类凝胶的网络结构比较单一、弹性和韧性不理想。溶剂替换过程可以将具有多重网络结构的聚合物水凝胶或有机凝胶一步转变为多网络低共熔凝胶，不过 DES 扩散以及其与聚合物网络间的相互作用无法得到有效控制，对相应材料的机械性能存有潜在负面影响。虽然通过循环冻融等过程可以提高聚合物结晶度和机械性能，但是步骤繁琐且耗时、与典型增材制造技术兼容性不理想，难以实现低共熔凝胶的复杂结构化设计，限制了该类聚合物材料的广泛应用。因此，通过开发简单快速的化学设计策略来获得高性能凝胶材料仍然是功能聚合物合成与应用研究领域的一大挑战。

受此启发，我们提出了一种快速正交光聚合反应与溶剂效应协同作用的材料设计策略，制备出了微相分离增强的多重网络高性能低共熔凝胶^[1, 2]。在此策略中，三联吡啶钌配合物参与的光化学反应可以同时

独立地引发多个聚合反应过程，实现了一步分钟级构筑多网络聚合物凝胶。DES 与聚合物分子之间的相互作用能够促进凝胶内部微相分离结构的形成。这种多级结构使得凝胶能够有效地耗散能量，保持良好的机械稳定性。另外，改变 DES 组成可以对凝胶机械性能进行精准调控作用。更重要的是，快速可控的光化学过程还可与 3D 打印技术相结合，实现具有复杂 2D/3D 结构的高性能低共熔凝胶快速制造。

D13-I03

自粘附凝胶的相分离调控

孙胜童*

东华大学

生命体系凝胶材料具有典型的多尺度相分离结构及动态衍化特征，是实现生物体自适应、自强化、自感知、自驱动等智能响应行为的关键。然而，人工合成凝胶大都基于相对单一的结构单元和较为固定的交联网络形态，这导致其刺激响应行为较为单一，难以满足未来人工智能、软体机器人等领域的发展需求。为此，我们基于二维相关光谱等先进表征分析手段，提出了“高分子动态相分离”的凝聚态结构设计策略，使凝胶在刺激作用下实现相分离结构的可控解离及重组，强化其在粘附场景下的服役性能。例如，我们设计了一种可在极宽频率范围内始终维持在凝胶点状态的粘附性自顺服离子液体凝胶，其自顺服特性源于多尺度氢键缔合相分离，体系物理交联随频率降低逐级解离，并同步增强链缠结，作为拓扑交联维持粘弹动态平衡。此外，我们还开发了一种可剥离硬化的自粘附离子液体凝胶，在低频准静态下，凝胶结构均一，而高频剥离诱发微相分离，促使凝胶迅速切换为强韧玻璃态，实现超强粘附。

参考文献

- [1] Ye, H.; Wu, B.; Sun, S.; Wu, P. Nat. Commun. 2024, 15 : 885.
- [2] Ye, H.; Wu, B.; Sun, S.; Wu, P. Adv. Mater. 2024, 36: 2402501.
- [3] Qiao, H.; Wu, B.; Sun, S.; Wu, P. J. Am. Chem. Soc. 2024, 146: 7533.
- [4] Ye, H.; Wu, B.; Sun, S.; Wu, P. Adv. Mater. 2024, 36: 2402501.
- [5] Xiang, H.; Li, X.; Wu, B.; Sun, S.; Wu, P. Adv. Mater. 2023, 35: 2209581

D13-I04

离子凝胶的强韧化设计及其透明加热器应用

胡建*

西安交通大学

离子凝胶由于其优异的离子导电性、热和电化学稳定性以及不挥发性正成为柔性电子领域引人注目的材料。然而，现有的离子凝胶大多面临着力学性能不足的问题（强度 <1 MPa、韧性 <1 kJ/m²和模量 <1 MPa）。在本工作中，我们通过一步法在离子液体中无规共聚两种溶解性质迥异的聚合物组分，制备了高强韧可拉伸的离子凝胶。两种常见的单体丙烯酰胺和丙烯酸在离子液体中无规共聚，原位形成了宏观上均相但微观上相分离的共价交联网络。在共聚离子凝胶中，富含氢键的硬相和富含溶剂的软相互穿原位形成双连续相分离结构，前者主导了共聚离子凝胶的高强度、高韧性和高模量等力学特性，后者主导了高可拉伸性。共聚离子凝胶最终实现了强度(12.6 MPa)、韧性(24 kJ/m²)、模量(46.5 MPa)和可拉伸性(600%)的同时提升以及自恢复、自愈合、形状记忆、抗溶胀和可 3D 打印等功能集成。原位相分离技术适用于各种常见的单体和离子液体，为进一步聚合过程中原位调控离子凝胶的微观结构和性能提供了一种有前景的简便方法。此外，本工作利用高频交流电作用下离子导电产生焦耳热的加热原理，对离子凝胶在可拉伸透明加热器上的全新应用展开了探索性研究。

D13-I05

止血封闭用的高性能医用粘合胶

吴德成*

南方科技大学

医用粘合剂能够将受损组织或皮肤快速粘合，起到封闭创面、止血、堵漏、防渗液以及促进组织再生等作用，使用起来方便快捷，可显著降低伤口处理时间，减少对病人造成额外的创伤，在生物医学领域具有重要的应用价值。

目前临床上医用粘合剂主要有天然高分子和合成高分子类，具有不同的止血封闭效果和功能。我们根据不同创伤类别，通过物理或化学等处理方法和手段，制备一系列基于合成高分子/天然高分子的新型多功能止血水凝胶，进而开发多种高性能止血封闭医用粘合剂，使之兼备快速凝固止血、保湿、抑菌、促组织修复、高力学强度和强创面粘附等性能，为战创伤和脏器损伤急救止血提供新方案。

D13-I06

以 α -螺旋多肽为单分子填料构筑各向异性溶胀水凝胶

张拥军*

天津工业大学

与生物凝胶不同，普通水凝胶常常是各向同性的。通过加入纳米填料是设计制备各向异性水凝胶的常用方法，但如何合成具有大的各向异性溶胀比的水凝胶仍然是一个很大的挑战。这里我们采用单分子填充剂 α -螺旋多肽合成各向异性水凝胶。首先利用剪切法制备聚 γ -苄基谷氨酸(PBLG)向列相液晶，将其包埋在交联聚合物基体中，再通过脱苄反应将 PBLG 复合凝胶转化为聚 L-谷氨酸(PLGA)复合凝胶。 α -螺旋 PBLG 链的刚性棒状结构使其易于取向。PLGA 的 pH 敏感性使得所得到的复合凝胶具有 pH 敏感性。随着 pH 值的变化，PLGA 复合凝胶呈各向异性溶胀，其径向溶胀度远大于轴向溶胀度。各向异性溶胀比(3.43)远高于大多数各向异性水凝胶，特别是刺激响应型水凝胶。该复合凝胶还表现出各向异性的力学性能，其轴向杨氏模量大于径向杨氏模量。利用其 pH 响应的各向异性溶胀性能，该复合凝胶可用于血管栓塞治疗。

D13-I07

定时自发变形形状记忆水凝胶及医用探索

赵骞*

浙江大学

形状记忆聚合物 (SMPs) 可在外界环境条件变化时由预设的临时形状回复到原始形状，有望用做可变形植入医疗器件，以到达微创与降低手术难度的效果。然而，传统 SMPs 变形与刺激耦合，即刺激施加后立刻发生响应性变形，导致器件展开时卡在非目标位置，使植入失败。针对植入时间窗口短且变形不可控的问题，本研究提出延时形状记忆变形新模式，即材料在受到刺激后不会立刻发生变形，而是存在可保持形状稳定的潜伏期，随后才发生形状回复，从而使植入过程更可控。这种模式使材料的变形不依赖于刺激控制，可按需定时自发进行。本研究利用热致相分离水凝胶相态演变的动力学过程实现该变形模式，研究了其分子机制与潜伏期的调控方法。之后，研究利用光固化三维打印技术，针对三种实际场景包括肛瘘栓塞、泪道栓塞、腹腔积液引流设计制备了相应的医用延时器件。器件可以硬质状态保持临时形状植入或穿刺，在一定的操作时间后精准定位至病灶，展示了进一步临床应用的可行性与独特性。

D13-I08

Intelligent bionic hydrogel sensor

Kunyan Sui*

Qingdao University

The design of self-powered flexible ionic skins (i-skins) that can mimic the human skins to transform multiple external stimuli into biopotential signals with ions is important but challenging. Herein, we demonstrate that the gradient polyelectrolyte membranes can directly work as self-powered i-skins to convert multiple stimuli into recognizable potential signals. The gradient polyelectrolyte hydrogel membranes prepared by a novel hydrogel-assistant reaction-diffusion method are used as a model system. They have been proved theoretically and experimentally to possess a thickness-dependent and temperature-sensitive self-induced potential. Hence, the gradient membranes can function as self-powered i-skins to provide the highly sensitive and reliable detection on external pressure and temperature, and even allow for the high-precise perception of temperature field/distribution in the environment based on the potential signals. Besides, the freeze-dried i-skins can also serve as self-powered humidity sensors. This work opens up a new way for constructing high-performance self-powered i-skins to access more applications.

D13-I09

柔性生物粘附共形贴附脑机界面水凝胶材料

万鹏博*、张立群

北京化工大学

可穿戴水凝胶传感材料与器件，因与人体皮肤界面的无缝共形贴附而被广泛应用于实时个人健康监测、疾病诊断与治疗、人机交互感知等领域。借助导电纳米材料与高分子网络之间的界面超分子作用，可制备了具有优异自粘附性能和紫外防护功能的生物粘附共形贴附水凝胶材料，实现了皮肤界面的共形稳定贴附，有助于面向人机界面交互与脑机接口的高信噪比和低界面阻抗的人体电生理信号（脑电、心电、肌电等）采集。机器学习辅助的高准确性手语手势识别，有助于听力障碍人群的无障碍沟通；在下一代可穿戴电子皮肤、康复训练、机器学习辅助的人机交互领域展现了潜在的应用前景。

D13-I10

仿生多尺度异质界面凝胶

赵紫光*

中国科学院大学

生物软组织的微纳复合界面是生物实现生理功能的重要关键[1]。例如，在神经系统中，神经元通过复杂的突触界面相互连接，精确控制离子和化学信号的传输，从而实现生物信息的处理和传递。在肌肉组织中，肌纤维细胞与细胞外基质之间的协同作用，不仅赋予其灵敏的力学信号传导能力和高机械性能，还使其展现出对复杂力学环境的出色适应性。然而，与生物体软组织相比，传统高分子凝胶因其单一的相组成与化学性质，难以构建体相界面并实现类似生物界面的复杂功能。

近年来，我们受生物体软组织异质结构启发，将多元协同概念引入到凝胶材料中，构筑了一系列具有不同相分离尺度的仿生复合凝胶材料，并依托于异质功能高分子网络界面的协同作用，实现了材料的多尺度功能调控[2]。在宏观层面上，该材料展现了高强度的力学性能和可编程特性[3]；在微观尺度上，基于异质界面的门控特性可实现对物质与能量传递的精确控制[4]。同时，我们还探索了这些材料在软体机器人、离子-电子传感器件、仿生辐射冷却等领域的应用潜力[5]。

D13-I11

水凝胶自修复中聚合物链扩散的可视化

石峰*

北京化工大学

自修复材料基于超分子相互作用或动态共价键的可逆特性能够修复外界损伤,大大延长了材料的使用寿命,提高了材料服役可靠性而受到国内外学者的广泛关注。自修复机理的研究对自修复材料的发展至关重要,而聚合物链的界面扩散是实现材料性能恢复的关键步骤。目前关于自修复材料的研究主要集中于通过材料基体和可逆相互作用的设计以提高材料自修复性能及机械力学性能方面,缺乏对自修复过程中聚合物界面扩散过程机制的研究。因此,需要发展一种直观的可视化监测方法表征聚合物链的扩散,并将其与自修复性能联系起来,增加对自修复机制的深入理解。针对这一问题,我们发展了一种自修复界面上高分子链段迁移的可视化研究方法,直观地证明了网络束缚效应对高分子链段的扩散的限制,解释了随网络交联程度增加,水凝胶自修复性能下降的机制。利用二次聚合方法设计了双交联网络的水凝胶模型体系,其中主客体交联网络作为自修复网络,共价交联网络作为束缚网络,通过控制共价交联网络中交联剂含量可以实现对水凝胶网络密度的连续调节。设计的模型体系保证了表面官能团种类,密度及分布等影响因素一致的前提下,研究网络束缚效应对自修复性能的影响,发现随着交联剂含量的增加,水凝胶自修复性能下降。进一步,我们将荧光分子共价接枝在主客体自修复网络中,原位表征不同交联剂含量的双网络水凝胶中高分子链段在界面上的扩散过程的差异。结果表明,共价接枝的荧光分子的界面扩散速率随交联剂含量增加而降低,随着共价网络中交联剂含量从 0 mol% 增加至 20 mol%,界面上荧光分子的扩散速率从 0.51 $\mu\text{m/s}$ 降低至 0.04 $\mu\text{m/s}$ 。这一结果与自修复性能随交联剂含量变化一致,揭示了网络束缚效应通过限制高分子链段的扩散影响水凝胶自修复性能的机制。该工作加深了对自修复过程机制的理解,为原位可视化监测聚合物链的扩散提供了一个直观的可行性方法,有助于自修复材料的设计及表征。

D13-I12

功能水凝胶生物电子界面

刘吉*

南方科技大学

水凝胶材料和生物组织在结构和组成上有着高度的相似性,被认为是人体组织与生物电子交互界面的最理想材料之一。然而,在潮湿的生理环境下,由于界面游离水的存在,水凝胶与不同基底之间的粘合强度非常低,尤其是在湿润的生物组织器官的表面。开发功能性水凝胶,用于构建稳定高效的电子器件-组织界面,能为新兴生物电子的开发和个性化医疗的发展提供强有力的支持。针对现阶段人工合成的水凝胶粘合剂存在的单体残余、体内湿润条件下不可控的溶胀、极端条件下的界面实效、水凝胶粘合界面的不可控性等挑战,我们团队设计与制造了一系列功能水凝胶材料,以满足不同应用场景下的应用需求,为生物电子和组织工程等领域面临的相关问题提供有效解决策略。

D13-I13

PVB 胶片形变和断裂机理

崔昆朋*

中国科技大学

聚乙烯醇缩丁醛 (PVB)中间膜作为夹胶玻璃的核心部件之一,以其优异的抗冲击以及粘接性能被广泛应用于汽车、建筑、光伏等领域。PVB 中间膜有 PVB 树脂和小分子增塑剂组成。PVB 中间膜作为一类高技术壁垒产品,长期被国外所垄断,国内产品性能(如低温抗冲击性)与国外差距明显。材料的结构决定性能,目前 PVB 的分子结构已经为大家所熟知,但对于其介观的亚微米尺度结构,特别是服役条件下的结构及结构演化仍不明确。本文利用上海光源国内首条超小角 X 射线散射(USAXS)光束线— BL10U,在亚

微米尺度下系统研究了增塑 PVB 中的拉伸诱导相分离现象。

D13-I14

生物粘附水凝胶的多尺度力学设计及其应用

黄建永*、解文月、田卓灵、袁作楹、段晓岑、刘雅倩、万卓、王昊
北京大学

本文聚焦生物组织与水凝胶的界面力学相互作用，综合利用分子动力学、生物分子粘附力学和连续介质力学等多尺度力学设计方法解构水凝胶的界面粘附机理，开发了基于仿生逆锁键的界面粘附水凝胶材料、发展了功能性小分子级联扩散调节的脂肪界面粘接技术，构建了基于微相分离介导的可控粘附生物胶水，基于数字图像相关（DIC）技术揭示了分子扩散诱导的水凝胶粘附界面由内聚力破坏向界面粘附力失效转变的关键调控作用。在此基础上，研发了低温可注射的明胶基水凝胶，设计了速率敏感的生物相容性的组织粘接凝胶新材料，实现对多种水凝胶的可编程、超强和可逆的电粘附，构建了抑制细菌与宿主细胞粘附的 sRNA 缓释体系。上述基于多尺度力学设计原理发展的新材料新技术，已初步应用于病原菌感染治疗、口腔黏膜靶向给药、慢性炎症伤口促愈合、全层伤口脂肪组织闭合等生物医学领域，具有较为广阔的应用前景。

D13-I15

荧光变色高分子凝胶

路伟*
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-I16

原位聚合智能凝胶

武培怡*
东华大学

具有刺激响应功能的智能凝胶材料可模拟生命体系感知、驱动、生长、适应等多种智能行为，是开发面向未来人工智能和软体机器人的关键候选材料之一。在模拟生命体系功能的同时，如何简单高效地人工合成高性能智能凝胶材料是当前研究的热点和难点问题。基于此，我们提出了“原位聚合”的智能凝胶合成策略，在多组分体系中原位聚合某一或多个单体，其中原有组分可作为模板调控聚合过程。这一策略不仅简便高效，还可有效调控凝胶的粘弹网络结构及相分离行为，实现功能集成和解耦。例如，我们通过在聚乙烯醇网络中原位聚合疏水单体，开发了可在干湿两态下均具有超高力学性能的强韧水凝胶材料。近期，我们还通过原位聚合诱导相分离原位构筑了具有固-液双连续结构的离子导电纤维，纤维电阻随拉伸变化极不敏感，在 200% 应变下电阻仅增加 7%。

D13-I17

各向异性环境耐受性导电凝胶与柔性传感

李俊杰*

天津大学

导电水凝胶具有优良的生物相容性和可调的机械性能，已广泛应用于柔性传感器、柔性储能器件、电子皮肤等领域。模拟天然组织的结构和组成是提升其传感行为的关键。生物体大多数组织都具有各向异性结构，其在生命活动中发挥重要作用，目前各向同性水凝胶传感灵敏度和精确性需要进一步提高，同时高温低温极端环境下容易引发水凝胶中水蒸发和介质结冰，导致失去柔性和导电特性，丧失传感功能。因此，我们通过凝胶分子网络结构和介质的设计，制备了系列抗干、抗冻凝胶，赋予其高强高韧特性，并赋予使其在低温及长期使用过程中保持性能的稳定，实现了对人体运动信号和生理信号的实时监测。

D13-I18

智能水凝胶皮肤敷料

郭保林*

西安交通大学

伤口流血停止之后，重度皮肤缺损严重威胁人们的健康和生命。目前大多已开发的可注射水凝胶敷料机械性能较弱，此外大多可注射凝胶敷料仅具有较为单一的生物活性，限制了其对于伤口愈合的多重促进效果。我们报道了同时具有自愈合、高粘合力的可注射导电水凝胶敷料。该水凝胶的原位成胶和组织粘合性能可以快速封闭任意形状的伤口，并与伤口轮廓粘合为其提供物理屏障并模拟皮肤的湿润环境，同时凝胶的抗菌性能和导电性能可以防止伤口感染并促进伤口快速修复。另外，针对感染伤口和伤口敷料难以移除的问题，我们开发了具有光热抗菌和可移除的自愈合水凝胶敷料，他们具有具有杀菌快和不引起细菌耐药性的优势，能够快速的促进创面的修复，而且他们在光热、酸或者外加小分子的刺激下，能够快速降解从而移除，避免了敷料更换对伤口的二次伤害 (Advanced Functional Materials, 2020, 30(17), 1910748; ACS Nano, 2022, 16(2), 3194–3207; Nature Protocols 2023, 18 (11), 3322-3354)。因此，这些多功能水凝胶作为生物活性敷料在伤口愈合应用中具有巨大应用潜力。

目前市售水凝胶伤口敷料缺少对活动部位（如关节）的密封能力，且无法针对细菌感染微环境变化做出有效反馈，导致创面感染控制延迟和创面愈合的持续负面效应，严重限制了其应用范围。因此，迫切需要赋予水凝胶敷料针对细菌感染微环境变化的智能识别和按需抗菌能力。针对这一问题，我们提出了一种响应细菌代谢微环境变化的程序化自激活按需抗菌水凝胶敷料。该材料能够在创面感染后识别细菌代谢过程酸性物质和酶类的产生，通过微环境变化驱动的级联一氧化氮递送和细菌产生代谢物乳酸的转化，增强了化学动力学抗菌治疗效果。这种治疗性气体联合化学动力学抗菌策略，实现有效的伤口感染控制和细菌生物膜根除。该水凝胶还集成了自愈合能力、组织粘附性、创面增殖及重塑阶段的自调节氧化应激缓解和促进血管再生能力，以改善创面再生微环境。这种新型的细菌感染微环境响应的智能水凝胶有望为全球性增长的 MRSA 感染创面患者的治疗提供新的策略和手段，为实现早期感染控制和防范提供新的途径 (ACS Nano 2022, 16(8), 13022–13036; Advanced Functional Materials, 2023, 13 (31), 2214089; National Science Review, 2024, 11, nwae044)。

D13-I19

两性离子聚合物水凝胶研究进展

杨建海、刘文广*

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，可以通过离子溶剂化作用与水分子发生强水合作用，强于传统非离子型亲水材料通过氢键作用产生的水合效应，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可注射水凝胶和弹性体的构建方法,包括,1) 利用氢键型单体丙烯酰甘氨酸胺(NAGA)与两性离子单体羧酸甜菜碱丙烯酰胺(CBAA)共聚制备了氢键物理交联的超分子共聚物可注射水凝胶;2) 通过丙烯酰化聚两性离子聚合物(PCB-OAA)与多巯基化合物之间的迈克尔加成反应制备了原位交联可注射水凝胶;3) 将氨酯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和弹性体,并应用于糖尿病皮肤修复和柔性传感器;4) 首次以硫辛酸为起始原料合成了可生物降解的两性离子聚合物,作为免揭除贴片,能够调控感染型糖尿病伤口局部微环境,促进伤口愈合。

关键词: 两性离子、生物防污、水凝胶、弹性体、可降解

参考文献:

1. Adv. Sci. 2018, 5, 1800711.
2. Bioact. Mater. 2021, 6, 3085-3096.
3. Adv. Funct. Mater. 2023, 33, 2303095.
4. Mater. Horiz. DOI10.1039/d4mh00174e
5. Adv. Mater. DOI10.1002/adma.202404297

D13-I20

凝胶网络中的物质扩散机制与智能应用

余承涛^{1,2}、潘鹏举^{*1,2}

1. 浙江大学衢州研究院
2. 浙江大学

聚合物凝胶一般由聚合物三维网络与溶剂(如水、有机溶剂、离子液体等)构成,具有优异的“透过性”,即外界的水、金属离子甚至聚合物等物质都能以扩散的形式进/出凝胶网络。因此,如何控制物质在凝胶网络中的扩散具有重要的研究意义。首先,我们以水在凝胶网络中的扩散为模型,详细研究了水在粘弹性水凝胶中的宏观扩散动力学与微观相分离机制,提出了“限域扩散”的策略,制备了信息自演变的水凝胶材料。进一步研究了金属离子与中等分子量聚合物在凝胶网络中的限域扩散,制备了多重防伪材料。而后对凝胶网络的晶相结构进行设计,调控凝胶网络中离子的扩散速率,进而制备了高灵敏的相变离子凝胶材料。

D13-I21

导电聚合物水凝胶设计合成、加工技术及其人机融合交互应用

卢宝阳*

江西科技师范大学柔性电子创新研究院,江西省柔性电子重点实验室

近年来,人机融合交互界面已成为当前世界范围内的重大前沿科技挑战之一。长期稳定高效的人机融合交互界面将带来对人体和生命前所未有的理解,并将推动医疗健康、机器人、人工智能、大数据等各个前沿领域的发展。然而,人体器官和现代电器在材料本质上截然不同,为构建人机融合交互界面、开发下一代生物电子产品带来了巨大挑战。导电聚合物水凝胶是构建人机融合交互界面的理想材料,然而现有导电聚合物水凝胶力学、电学、生物学等性能不足以及缺乏先进加工集成技术等问题严重限制了其广泛研究和实际应用。为解决这一科学挑战,报告人围绕高性能导电聚合物水凝胶设计合成、先进加工制造技术、生物电子器件集成及一体化制造、人机感知-交互系统应用等关键科学问题开展了深入研究,取得了系统的理论和技术成果。发展了导电聚合物水凝胶多尺度网络结构设计方法,实现了其性能突破及规模化生产;开发了导电聚合物水凝胶3D打印技术,实现了多种生物电子器件的高精度升维制造;构筑了导电聚合物水凝胶电生理记录/刺激/传感器件,拓展了其人机融合交互应用。相关研究成果发表于 Nature

Materials、Nature Communications、Advanced Materials、Nature Reviews Materials、Chemical Society Reviews 等期刊。

参考文献:

- [1] Z. Shen, Z. Zhang, B. Lu*, G. Gu*, et al., Adv. Mater. 34 (2022) 2203650.
- [2] Z. Zhang, J. Liu*, B. Lu*, et al., Adv. Funct. Mater. 33 (2023) 2305705.
- [3] T. Zhou, H. Yuk, B. Lu*, X. Zhao*, et al., Nat. Mater. 22 (2023) 895-905.
- [4] J. Li, J. Cao, B. Lu*, G. Gu*, Nat. Rev. Mater. 8 (2023) 604.
- [5] F. Wang, B. Lu*, J. Liu*, et al., Adv. Funct. Mater. 34 (2024) 2314471.
- [6] H. Yuk#, B. Lu#, X. Zhao, Chem. Soc. Rev. 48 (2019) 1642.
- [7] B. Lu, H. Yuk, X. Zhao, et al., Nat. Commun. 10 (2019) 1043.
- [8] H. Yuk#, B. Lu#, X. Zhao, et al., Nat. Commun. 11 (2020) 1604.

感谢国家重点研发计划项目 (2022YFB3803900)、国家自然科学基金 (51963011) 等的资助。

D13-I22

凝胶电子材料及器件

周学昌*

深圳大学

凝胶材料, 特别是凝胶电子材料, 由于具有优异的机械性能和电学性能, 近年来引起了广泛发关注。本报告主要介绍课题组近期在凝胶电子材料和器件方面的一些探索尝试。首先, 我们提出了一种通过在传统硬而脆的导电聚合物网络中引入超分子溶剂, 制备了低模量、高拉伸率、强界面粘附力、高导电性的界面凝胶材料。该凝胶材料具有优良的可加工性能, 通过采用打印、旋涂等溶液法加工技术, 可制备自粘附、可转移印刷的柔性电路和高透明的可粘附柔性薄膜电极。利用该透明导电电极动态可逆的界面粘附特点, 我们设计和构筑了“透明电极-粘合剂”一体化的可重构、可拆卸和重组的临时键合封装型器件, 探索了“虎符”型发光器件的构筑及其在可视化加密和柔性显示等方面应用。基于该自粘附柔性电极, 我们通过采集肌电信号, 对各类健身运动的强度和类型进行了系统分析, 并结合柔性发光器件开发出了一套集成了肌肉训练的肌电信号采集和可视化展示的实时监控系统, 为日常健身运动的强度和安全性评估提供了解决方案。

D13-I23

可控降解水凝胶组织黏合剂及其伤口闭合与修复应用研究

贺超良*

中国科学院长春应用化学研究所

水凝胶组织黏合剂因在无缝线伤口闭合、创面止血密封等方面具有许多优势, 近年来受到广泛的关注。在最近的研究中, 我们提出了一种基于邻苯二醛/氨基(伯胺、胍基)缩合反应的快速交联制备水凝胶策略。在进一步研究中, 我们发现该类水凝胶表现出牢固的组织黏附性能, 其组织黏附机制是基于凝胶形成过程中, 尚未参与交联反应的邻苯二醛基团与组织表面蛋白中的伯胺之间形成稳定的苄甲内酰胺偶联基团。相比于普通醛基/氨基交联形成的水凝胶, 基于邻苯二醛交联的水凝胶具有更快的凝胶化速率、更高的组织黏附强度, 并具有优良的生物相容性。而且, 水凝胶的降解速率可以通过在凝胶网络中引入生物响应的二硫键, 实现对材料降解行为的有效调节。通过体外凝血实验研究, 表明该水凝胶能促进凝血。在大鼠、皮肤全层切口、肝脏创伤出血、兔股动(静)脉创伤等动物模型实验中, 该水凝胶能实现皮肤切口快速闭合, 以及肝脏和血管创伤快速止血, 展现出良好的应用潜力。

D13-I24

金属离子诱导酸性水解策略一步法制备高强韧 PAM 水凝胶

谢续明*

清华大学

出色的力学性能是水凝胶材料功能应用的基本保证。二十年来高强韧水凝胶的研究蓬勃开展并已经取得长足进展,能否更简便、高效地制备高强韧水凝胶对扩张其应用十分重要。本研究基于聚丙烯酰胺(PAM)自身的水解化学提出了通过金属离子诱导酸性水解策略(Metal ion induced acid hydrolysis strategy, MIAHS)一步法制备高强韧 PAM 水凝胶方法。

众所周知,在水溶液环境中,酰胺基与金属离子间不会产生强的配位作用。因此,通常只有通过 AM 与带有配体官能团的乙烯基单体共聚,构建含有配体侧基的聚合物链,进而向水凝胶网络引入牢固的金属-配体配位作用,才能构建强韧的配位键增强 PAM 基水凝胶。然而, PAM 的酰胺基能够在碱性或者酸性条件下进行水解反应,生成可与多种金属离子配位的羧基。通常情况下,碱性水解由于具有良好的选择性和高的反应速率,被广泛应用于部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)及其水凝胶衍生物的制备。但由于 HPAM 水凝胶网络中只有微弱的氢键,缺乏强的能量耗散单元,如配位键,力学性能难以令人满意。更重要的是绝大部分用于配位键增强的金属离子在碱性条件下会沉淀,因此碱性水解的 HPAM 难以制备配位键增强的水凝胶。本研究针对在强酸性 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 水溶液中, AM 的聚合和酰胺基的水解可同步进行,酰胺水解产生的羧基可以与 Zr(IV) 配位,同时与酰胺形成氢键,探讨了一步法构建多重键合网络(MBN)水凝胶,实现多层级的能量耗散。获得的 80wt% 含水量的 PAM 部分酸解水凝胶的断裂伸长率可达 890%、拉伸强度为 3150 kPa、韧性为 17 M m^{-3} ,同时兼具 95% 以上的透光度和 5.6 S m^{-1} 的电导率,本工作将着重探讨具有 MBN 机制的 PAM 水凝胶的网络结构和材料功能化的关系,为 PAM 水凝胶材料的设计和和功能应用探索新路径。

国家自然科学基金资助项目(项目号:52273023)

参考文献:

- [1] Y-J Liu, X-M Xie, ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2024, doi.org/10.1021/acsami.4c04452 [2] Yuxi Li, Xu-Ming Xie, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2023, 15, 30859 (2023)
- [3] Yuxi Li, Xu-Ming Xie, Polymer 2023, 283, 126223
- [4] Y. Li, J. Yan, Y. Liu and X-M Xie, ACS Nano, 2022, 16, 1567-1577
- [5] Y. Li, L. Liu, H. Xu, Z. Cheng, J. Yan, and X-M Xie, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2022, 14, 32541

口头报告

D13-O01

动态键构筑多功能组织修复可注射水凝胶及其生物学应用

郭会龙*

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。通过动态键交联的水凝胶,其动态可逆的交联网络可赋予水凝胶可注射及自愈合性能,使其经注射可填充不规则缺损部位,且水凝胶的自愈合性能可在治疗过程中适应组织运动引起的变形而不易受到外力损伤,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 [1]。作者进一步将受贻贝启发的儿茶酚基团引入到上述自愈合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 [2]。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 [3]。

关键词：自愈水凝胶、抗菌抗炎、微环境响应、组织修复

参考文献：

1. Guo, Huilong et al, ACS Appl Mater Inter 2021, 13 (51), 61638-61652.
2. Guo, Huilong et al, Chem Mater 2022, 34 (6), 2655-2671.
3. Guo, Huilong et al, ACS Materials Lett 2023, 5 (12), 3142-3155.

D13-O02

多功能离子水凝胶的合成与应用

张超红*

北京大学深圳研究生院

我们近几年合成了不同类型的离子水凝胶，包括离子基团完全固定于高分子网络的聚两性离子水凝胶、单一离子固定于高分子网络的聚阳/阴离子水凝胶、含完全游离离子的水凝胶；我们通过引入超分子液态胶束、引进多功能共溶剂等方法提升了离子水凝胶多方面的性能，并使其多功能化。随后，根据不同类型的离子水凝胶的特性，将其应用于三类电容/电化学器件中，获得了高灵敏、高稳定性、无离子泄露的电容式传感器，高可拉伸、高稳定性的电容式发光器件，节能、颜色切换快、高稳定性的热致&电致变色器件和电致变色-发光叠层器件。

D13-O03

近红外光响应可注射水凝胶的构建及其对乳腺癌术后复发和重建治疗

吴元昊¹、刘文广²、刘鉴峰^{*1}

1. 中国医学科学院放射医学研究所
2. 天津大学

手术治疗是临床上乳腺癌最常用且最彻底的治疗方式，但是术后肿瘤的高复发率、局部组织缺损、创面修复和感染问题严重影响患者的生命健康。鉴于此，本文针对乳腺癌术后生理微环境特征，开发了一系列近红外光响应可注射水凝胶，其中利用 N-丙烯酰基甘氨酸和丙烯酰胺为单体，并复合多巴胺修饰的金纳米粒子，通过紫外光引发聚合制备了一种具有溶胶-凝胶转变特性的可注射自显影纳米杂化水凝胶。通过注射到小鼠乳腺癌手术切除部位原位成胶，并利用远程操控近红外光来调控凝胶的非共价可逆级交联结构，实现阿霉素的响应释放，结合光热治疗原位杀死乳腺癌术后残留的部分肿瘤细胞，控制乳腺癌的复发并完成乳腺组织的重建。进一步，针对乳腺癌术后高复发和创面易感染问题，开发了一种放射性核素标记的可注射双网络水凝胶，通过原位注射海藻酸钠 (ALG)、聚乙二醇二丙烯酸酯 (PEGDA) 和放射性标记纳米粒子的复合注射液，利用近红外光原位热引发低分子量 PEGDA 聚合形成刚性第一网络，以肿瘤细胞间隙液中的 Ca^{2+} 与海藻酸钠结合形成柔性第二网络，将放射性核素标记金纳米棒紧密固定于肿瘤未清除病灶部位。通过光热治疗和短距离放疗联合，能够有效清除残留肿瘤细胞和潜在感染病菌，实现乳腺癌术后复发和感染治疗。针对乳腺癌放疗增敏和皮肤辐射损伤修复的矛盾，提出一种 ROS 时空精准调控策略，构建了一种可降解丝素蛋白凝胶和抗氧化粘附贴片，通过“内置外敷”策略，内层利用全氟化碳持续充氧增敏放疗，同时外层光热响应没食子酸释放清除过量 ROS，实现乳腺癌术后放疗增敏和辐射损伤修复的协同治疗。综上所述，近红外光响应可注射水凝胶的构建，将为开发新型乳腺癌术后辅助治疗模式提供新策略。

D13-O04

光固化 3D 打印生物力学适配湿滑水凝胶软组织器官模型

刘德胜、王晓龙*、刘维民

与活体器官、动物模型及临床试验相比, 具有仿生三维结构的组织器官模型具有成本低、符合伦理道德和易于操作等优点。水凝胶因其与人体软组织相似的软湿滑等特性, 已经广泛应用于仿生润滑、仿生粘附和生物医疗器械等领域。然而, 水凝胶存在的力学性能难调控、仿生结构难构筑和功能化单一等科学技术问题限制了其实际应用。为此, 以水凝胶材料的机械与润滑性能调控为出发点, 采用微观分子组成和宏观形状结构化构筑的设计理念, 提出了共价与金属配位交联双网络和氢键网络等微观尺度分子调控策略, 发展了系列机械性能可调且与生物软组织力学特性适配的粘弹性湿滑水凝胶。同时, 结合光固化 3D 打印 (Vat Photopolymerization 3D Printing) 实现了宏观结构化水凝胶的高精度成型制造, 并构筑了多种与生物软组织器官结构形态相似且力学性能适配的湿滑水凝胶仿生软组织器官模型, 包括心脏、肝脏、肾脏、肠道、肺、脑组织以及血管网络等复杂结构模型。这些生物力学适配的仿生高精度水凝胶软组织器官模型在外科手术训练、医疗设备测试和器官芯片等领域具有潜在的应用前景。

参考文献:

[1] Desheng Liu, Yufei Cao, Pan Jiang*, Yixian Wang, Yaozhong Lu, Zhongying Ji, Xiaolong Wang*, and Weimin Liu*, Tough, Transparent, and Slippery PVA Hydrogel Led by Syneresis, Small, 2023, 19, 2206819.

[2] Desheng Liu, Pan Jiang*, Yixian Wang, Yaozhong Lu, Jiayu Wu, Xin Xu, Zhongying Ji, Chufeng Sun, Xiaolong Wang*, Weimin Liu*, Engineering Tridimensional Hydrogel Tissue and Organ Phantoms with Tunable Springiness, Advanced Functional Materials, 2023, 33, 2214885.

[3] Desheng Liu, Pan Jiang, Yue Hu, Yaozhong Lu, Yixian Wang, Jiayu Wu, Danli Hu, Tao Wu, Xiaolong Wang*, Slippery Hydrogel with Desiccation-Tolerant "Skin" for High-Precision Additive Manufacturing, International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6, 025501.

D13-O05

载细胞空气水凝胶的生物医药工程应用

耿洪亚*

清华大学深圳国际研究生院

通过仿生生物材料募集宿主功能性细胞和干细胞实现内源性再生是实现个性化原位组织工程的主要策略, 移植的材料通过模拟宿主生化微环境和力学性能、参与巨噬细胞表型与功能的调控、并为组织再生提供物理支撑是启动机体自我修复的关键。但是, 体外构建模拟真实三维细胞生长微环境依然存在力学调控难、细胞浸润性差、生物微环境复杂和材料与细胞作用机理不清等问题。报告人通过裁剪水凝胶界面官能团种类和水凝胶物理拓扑结构, 构建可生物降解的多相空气水凝胶, 通过优化设计仿生纳米酶、界面粘附分子和可控释放生长因子的策略, 体外构建高细胞载量培养环境, 时空调控细胞生理过程。探索材料物理、化学、生物电学性质、协同干细胞、功能细胞和免疫细胞相互作用及影响规律, 揭示仿生水凝胶支架参与免疫调控、干细胞诱导分化的关键因子和分子机制, 阐明功能材料调控机体免疫反应对组织再生的影响, 进一步结合抗冻结构基元为载细胞水凝胶支架的临床转化和长期存储提供技术支撑。

申请人的研究聚焦天然细胞外基质的重构, 探究水凝胶与宿主细胞微环境之间的相互作用, 通过材料自降解、力学性能调控、生物电性能调控和氧化还原性能调控, 探索材料的组成、降解速度、支架的微观孔道结构和特定的官能团对组织再生相关细胞行为及组织再生中系列事件的影响规律。研究发现, 借助多相空气水凝胶可控的力学和孔隙率, 极大地提高了细胞载量; 再生过程中的级联过程, 包括止血、氧递送、氧化还原稳态和免疫调控能够加速伤口愈合、血管再生、胶原沉积和组织肉芽形成, 通过与多巴胺、纳米酶、界面粘附多肽、光热基元等复合, 通过红外光辐照的方式, 能够有效提高伤口抗菌性能, 避免伤口感染; 通过多模态成像手段, 整合光热、光声、拉曼和核磁等方式, 实现支架-细胞无损单像素三维重构, 揭示生命-非生命相互作用机制; 具有多级结构的支架通过导电高分子复合的方式, 利用多级孔道结构对入射光的反射与折射, 将可见光、红外光的利用度提高到 91% 以上, 实现生长因子的可编程响应释放。一系列工作的开展和研究成果的发现将有望在组织工程、再生医学领域发现新机制、发展新方法, 为开发个性化

诊断与治疗平台提供理论和技术支撑。

D13-O06

水凝胶光纤一体化动态聚合纺丝成形及其生物医用研究

陈国印*

东华大学材料学院

光医学治疗因其无毒、副作用小、创伤小而受到广泛关注。然而，由于激光难以穿透机体组织，并且在深层组织下光治疗过程难以监测，因此在深层组织中的应用光治疗仍然是一个巨大的挑战。我们针对纤维成形和凝胶化过程时间和空间上的矛盾问题，建立了一种新型多级结构水凝胶纤维材料的制备技术——一体化动态聚合纺丝技术，可实现水凝胶光纤连续合成及其功能化构筑。所制备的水凝胶光纤具有优异的生物相容性（低细胞毒性、溶胀稳定性及类组织模量）以及光导特性（最佳光衰减低至 0.13 dB/cm）。最后，我们探索了其在深层组织下的光医学治疗及智能控制过程。由于水凝胶光纤优异的生物相容性和光导特性，使得其作为植入材料的炎症反应低，与软组织具有良好的相容性，因此在光医学治疗中具有广阔的应用前景。

D13-O07

线粒体导向的可注射水凝胶微球用于维持软骨的稳态平衡

陈力¹、黄伟¹、胡宁¹、崔文国^{*2}

1. 重庆医科大学附属第一医院
2. 上海交通大学医学院附属瑞金医院

背景和目的:

线粒体的功能失活可产生氧化应激以及炎症反应，从而导致软骨细胞的稳态失衡。通过激活线粒体自噬可选择性清除失活的线粒体从而恢复线粒体功能实现软骨细胞稳态的维持。

方法:

本研究选用了薄膜分散法制备了软骨亲和肽（WYRGRL）修饰的脂质体（WY-Lip/UA）并包载了能激活线粒体自噬的尿石素 A。随后，将 WY-Lip/UA 与 HAMA 复合，通过微流控技术制备了可注射的 HAMA 水凝胶微球（HM@WY-Lip/UA）。以期能实现靶向软骨细胞，并激活线粒体自噬来选择性清除失活的线粒体。

结果:

体外实验表明，该体系能促进软骨细胞对载药脂质体的摄取，从而有效地恢复线粒体的膜电位、清除活性氧（ROS）、抑制软骨细胞的凋亡、提高软骨标志物的基因和蛋白水平。进一步通过建立大鼠膝关节 DMM 模型并局部注射 HM@WY-Lip/UA 的术后 8 周，通过 X-Ray、micro-CT、组织学染色、免疫组化染色观察到，该体系能有效防止骨赘的形成、关节间隙变窄、软骨下骨的重塑以及软骨细胞外基质的降解。

结论:

线粒体导向的可注射水凝胶微球（HM@WY-Lip/UA）能高效靶向软骨细胞并提供软骨保护的作用，该策略有望为治疗软骨退变性疾病提供良好的借鉴。

D13-O08

高韧性两性离子水凝胶

郑司雨*

浙江工业大学

两性离子聚合物的单个重复单元包含等量的阴、阳离子型基团，具有强水化、电中性和高偶极等特性，在抗生物污染表面、药物传递等生物领域具有广泛的应用价值。然而，由于两性离子侧基的离子诱导水合

能力极强、传统的两性离子聚合物水合链间的作用力弱，致使相关水凝胶在加载过程中的能量耗散也十分微弱，力学性能提升颇为困难，极大限制了两性离子水凝胶在承力环境和水环境中的应用。对此，我们设计两性离子单体的结构调控侧基的电荷密度分布、提升水环境下分子间的作用能力，然后通过提高聚合物链间的缠结程度引入大量弹性可滑动的物理交联点，构建了一种高韧性、低滞后、生物相容性良好的两性离子聚合物水凝胶，并探索其在人工肌腱方面的功能应用。

D13-O09

水凝胶柔性传感与人机交互

徐文龙*

鲁东大学

近年来，人机交互对于移动通信、物联网、智能医疗和智能机器人至关重要。开发柔性人机交互设备越来越受到关注。水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。本文聚焦于水凝胶柔性传感器的构建，并将其应用于人机交互。

1) 氧化 PVA 水凝胶用于机械臂的无线操控

本研究使用过硫酸铵氧化低分子量聚乙烯醇 (PVA) 制备了具有优异粘附性、弹性、导电性的氧化 PVA 水凝胶。系统研究了过硫酸铵氧化 PVA 过程中发生的分子链断裂、基团变化，揭示了氧化 PVA 水凝胶的形成机理。详细探究了氧化 PVA 水凝胶的黏附性能、机械性能、传感性能。并根据氧化 PVA 水凝胶的上述性质设计了可无线操控的自走机械臂。由该方法制备的氧化 PVA 水凝胶具有多种功能性，可适用于不同的应用场景，在诸多领域都具有潜在应用价值。

2) 抗溶胀水凝胶用于水下报警装置的构建

本研究基于溶剂交换策略制备了一种亲疏水交联的 P(AAm-co-BA)/Laponite/GA 水凝胶，通过亲疏水链段的协同作用以及疏水聚集效应赋予水凝胶优异的抗溶胀性能(溶胀率为 4.79%)，引入具有纳米层状结构的 Laponite 以改善凝胶的机械性能。系统研究了其抗溶胀机理并考察了其机械性能和水下传感性能。将制备的水凝胶组装制备为触摸传感器，借助我们设计的编码程序，通过有节奏的按压操作触发警报信号的有效传递，实现水下智能报警。

3) PAM/PVA/CaCO₃ 水凝胶实现信息加密

本研究制备了一种 PAM/PVA/CaCO₃ 水凝胶，揭示了 CaCO₃ 微粒引入对水凝胶网络内部相互作用力影响的规律，系统的研究了其机械性能和传感性能。将 PAM/PVA/CaCO₃ 水凝胶组装制备为应力应变柔性传感器，贴附于人体关节处，可有效的将人体运动过程转变为可视的电学波形信号。将 PAM/PVA/CaCO₃ 水凝胶同美国信息交换标准代码结合，其可以应用为信息交换与信息加解密，实现智能锁具的防盗功能，在人机交互领域具有极大的应用潜力。

4) 基于 MXene 的水凝胶用于机器学习辅助的手写识别

本研究合成了 PMAA@MXene 水凝胶，并系统的研究了其机械性能和传感性能。基于水凝胶的柔韧性和导电性，我们设计并搭建了基于 PMAA@MXene 水凝胶的传感矩阵，用于采集和识别手写内容。通过采用随机森林机器学习算法模型，我们对采集到的手写数据进行了训练和优化，建立了高效的手写识别模型。经过实验验证，我们的系统识别准确率达到了 0.9744。该水凝胶作为柔性传感器具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] Xinyu Jiang, Xun Zhou, Kexin Ding, Xusheng Li, Bin Huang, **Wenlong Xu***. Adv. Funct. Mater. 2024, 2400936.
- [2] Yanyan Wang, Xinyu Jiang, Xusheng Li, Kexin Ding, Xianrui Liu, Bin Huang, Junjie Ding, Keyu Qu, Wenzhi Sun, Zhongxin Xue and **Wenlong Xu***. Mater. Horiz. 2023, 10: 4033.
- [3] Xun Zhou, Xiaohan Zhao, Yanyan Wang, Puying Wang, Xinyu Jiang, Zhaohui Song, Junjie Ding, Guijing Liu, Xiao Li, Wenzhi Sun, **Wenlong Xu***. Comp. Part B 2023, 255: 110631.

[4] Xintao Ma, Xun Zhou, Junjie Ding, Bin Huang, Puying Wang, Yi Zhao, Qiyu Mu, Shaohua Zhang,* Chunguang Ren* and Wenlong Xu*. J. Mater. Chem. A 2022, 10: 11823.

D13-O10

动态键交联水凝胶用于三维组织培养及组织修复

魏钊*

西安交通大学

研究目的：生物材料与细胞、器官等生长发育行为的适应和匹配长期是组织工程领域的难点和重点。我们聚焦水凝胶材料的生物学效应，在细胞及组织不同层面和尺度下探索动态键交联水凝胶材料的应力松弛力学特征对其生物学功能的影响及调控规律，研究动态键交联高分子水凝胶材料特性与生物功能的关联性，分析潜在的力学生物学机制，为生物自适应性组织工程水凝胶材料的开发提供指导。

研究方法：我们利用动态共价键与主客体作用等构建了多种具有应力松弛性的体外三维细胞培养平台；利用物理及分子生物学手段揭示了细胞响应三维应力松弛微环境的力学生物学机制；通过对动态键交联水凝胶进行二次设计，针对不同临床需求开发了水凝胶辅料、贴片、填充剂、粉末及神经导管等组织工程产品。

结果和结论：揭示了动态键交联水凝胶材料应力松弛性的化学机理；探明了细胞响应三维应力松弛微环境 Int/Fak/MLC/VE-cad 力学转导通路；研发了一系列基于动态键交联水凝胶的组织工程产品。

D13-O11

聚丙烯酸基水凝胶动态记忆和遗忘行为研究

程瑞栋*、张秋禹

西北工业大学

聚合物水凝胶材料可实现类“大脑”的动态记忆和遗忘行为，因此有望解决现有人工存储设备无法自主选择 and 忘记不必要信息的难题。目前的研究主要集中在少数温度敏感性水凝胶，需要较大的温差刺激，并且缺乏刺激条件下的可逆响应。因此，提出“氢键作用可逆调控受挫结构”实现水凝胶可逆动态记忆和遗忘行为的新策略：室温下，通过改变水溶液 pH，水凝胶内部快速形成大量可逆弱相互作用，局部形成高密度聚合物域。这有助于形成非平衡聚集和动态结构，导致水的缓慢释放，实现水凝胶类大脑动态记忆和遗忘行为。进一步利用氢键在不同刺激条件下的可逆构筑与解离，实现水凝胶动态记忆和遗忘行为的可逆调控。研究单体化学结构、用量、外场交替及组合刺激和刺激强度等对水凝胶的宏观透光率和微观结构变化的影响规律，并揭示其内在关联。本策略可使水凝胶的动态记忆和遗忘行为更加丰富、多变，具有更广泛的应用潜力。

D13-O12

微生物聚酯 (PHA) 有机水凝胶在小口径血管中的应用研究

张旭*

北京大学口腔医学院

水凝胶因其良好的生物相容性及可调控的机械性能在血管组织工程中得到极大关注。然而，大多数天然水凝胶具有膨胀率高、机械稳定性差、耐久性低等特点，这限制了其在血管组织工程中的广泛应用。为了解决这些问题，通过不饱和功能微生物聚羟基脂肪酸酯 (PHA) 和聚乙二醇二丙烯酸酯 (PEGDA) 以及均匀分散二维材料石墨炔 (GDY) 的点击化学反应，制备了两亲性和抗疲劳的有机水凝胶 (organohydrogel)。实验结果表明，这种有机水凝胶在体液中保持稳定，在超过 2000 次的循环拉伸后，它们的拉伸模量保持不变。同时，制备获得的有机水凝胶血管移植物具有良好的体外生物相容性和灌注能力。在体内移植后，血管移植物表现出明显的细胞浸润和组织再生，3 个月后血管的通畅率高于对照组。这种

制备方法为改进和促进有机水凝胶作为小直径血管移植材料的应用提供了一种新策略。

D13-O13

冷冻高分子凝胶的非晶型多级结构构筑及其多重性能转变机制王莉莉^{*1}、徐崇智¹、张宪胜¹、金明亮¹、董侠²、夏延致¹

1. 青岛大学

2. 中国科学院化学研究所

非均相分子链聚集诱导的结晶交联网络严重阻碍冷冻水凝胶柔性、自粘附、高取向等多重性能的激发，限制了该绿色材料在可穿戴器件等新兴领域的应用。为突破上述性能边界，与传统增强分子链聚集思路相反，本工作创新从源头构建抑制前驱液冰晶尺寸的“抑制冷冻外场”，降低冰晶生长对分子链的排挤作用，建立小幅度、均相靠近的新型分子链演变机制，实现凝胶交联网络的非晶化与物理作用位点的部分释放。以聚乙烯醇为模型聚合物，巧妙利用小分子抗冻剂原位抑制凝胶成形过程中的冰晶生长行为，建立“抗冻剂浓度-水分子凝固温度”相图，由此双向调控冷冻温度与前驱液凝固点温度，实现“抑制冷冻外场”的精准控制。据此，揭示了基于抑制冷冻外场的分子链均相、弱聚集成形机制，成功构筑非晶交联网络和氢键键合/自由羟基的共存态。借助新型非晶多级结构优势，冷冻高分子凝胶的多重性能与功能发生同步转变，集超柔、高透明、自愈合、抗冻与卓越的离子导电性等优势于一体，突破单物理凝胶难以在人工神经纤维等高端领域应用的认识。

D13-O14

可拉伸水凝胶电化学器件

谢庄*

中山大学材料科学与工程学院

制备低成本可拉伸的全固态电子器件是当前一个研究热点，以满足日益增长的可穿戴贴身监测需求。离子导电水凝胶电解质是近年来热门的本征可拉伸导电材料，可以通过离子传导调控电学性能，实现传感、晶体管与能源存储等多功能器件。但由于传统水凝胶机械性能差、易失水不可储存、界面不稳定等缺点影响器件在可穿戴器件中的应用。

课题组首先在基于凝胶电解质的高弹性有机电子微器件新材料与技术开发取得系列成果。其中结合明胶基可拉伸电解质与导电高分子三维微结构，首次提出无需衬底、高力学/电学性能的可拉伸全聚合物有机电化学晶体管设计策略，为柔性多模态传感、信号处理及新兴仿神经形态计算电路的开发提供普适简易的材料与技术平台。研究发现通过调节导电高分子掺杂浓度与深度、电极尺寸以及电解质组成，可以对晶体管器件的电学与力学性能进行调控，实现不同类型全聚合物有机晶体管器件，并具备拉伸变化超过 3 倍，晶体管跨导高于 10 mS，使用寿命 4 个月以上的高性能，以及强粘附、保湿抗冻、自修复、可回收等多功能。并且，申请人提出三维微结构导电高分子/电解质界面设计，可实现>100%应变下，上千圈拉伸循环器件性能仍维持稳定。

此外，我们还研究了多种新型离子弹性体材料及柔性器件的设计制备，包括动态双网络有机水凝胶、生物可降解离子弹性体等，并应用于可降解、自修复的传感、储能与有机晶体管微器件。研究提出一种双动态网络的明胶/PAA 离子导电有机水凝胶，具有高韧性，快速自修复与室温可降解特性，可通过丝网印刷活性炭微电极实现制备离子微应变传感器与微型超级电容器。

课题组在基于凝胶网络的柔性电子器件界面工程方面也取得一定进展。研究了多酚类物质(如单宁酸)浸泡后处理对改善电解质/电极界面的作用，发现单宁酸可通过形成多重物理交联及多酚界面修饰，同时提升凝胶网络自恢复性能，以及界面粘附性与氧化还原电子转移，实现凝胶器件反复拉伸数千次仍保持形状与电学性能稳定。且在适量乙二醇参与下，电容容量相比单宁酸修饰前可提高 4 倍，环境稳定性也可保持数月。

参考文献

- [1] Nano-Micro Lett., 2022, 14, 184.
[2] ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2020, 12, 56393.
[3] ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2022, 14, 12583.

D13-O15

基于动态交联策略的含糖水凝胶材料及其医学应用

陈静*

山东大学齐鲁医学院

含糖生物大分子具有能够参与和介导细胞命运的活性糖单元, 将其制备成具有三维交联网络结构的水凝胶材料, 将有望获得与生命体系细胞外基质类似的结构和功能, 从而为三维细胞培养、组织工程、药物递送等提供一个仿生材料平台, 具有重要的医学应用前景。然而, 由于糖类物质的化学结构包括糖环数、官能团区域选择性、糖苷键立体构型等众多信息, 自然界中的糖类物质普遍存在结构复杂且不均一的特点, 这对于控制制备符合临床应用要求的含糖水凝胶材料, 以及深刻理解糖结构与生物学功能之间的关系造成极大困难。第二, 传统基于共价键所构建的水凝胶交联网络一旦形成往往是永久的, 不具备动态性特征, 不论是对于宏观上的外力作用 (例如临床普遍使用的注射操作所施加的剪切力场), 还是微观上的细胞作用 (例如细胞迁移、增殖、分化等行为过程对材料施加的力刺激), 都难以发生及时和必要的响应或者适应, 从而阻碍了其生物功能的实现。本报告总结了近期在含糖共聚物控制合成、糖脂超分子自组装凝胶化、基于非共价作用和动态共价作用等动态交联策略的全糖组分水凝胶材料的研究进展, 并探索了它们在组织再生修复、载细胞注射、生物 3D 打印和柔性生物传感器等方面的应用, 以期建立对含糖水凝胶生物材料的分子结构-组装结构-网络结构进行可控动态性调控的系统方法, 拓展其在生物医学领域的应用。

D13-O16

浒苔多糖衍生的可注射水凝胶用于肿瘤切除术中快速止血和加速术后伤口愈合

姜菲*

中国海洋大学

术中出血和持续炎症引起的术后伤口愈合延迟会增加手术切除后肿瘤复发的风险。为了解决这些问题, 将具有止血和伤口愈合内在潜力的浒苔多糖 (PEP) 化学改性为醛基化 PEP 和胍基化 PEP。由此, 通过在修饰的醛基和胍基之间形成酰基胺键以及在硼酸和 PEP 骨架之间的羟基之间形成氢键的双动态键, 开发了可注射的双网络水凝胶 (OPAB)。OPAB 表现出可控的形状适应性凝胶化 (35.0s)、合适的机械性能、非刺激性自修复 (60s)、良好的湿组织粘附性 (30.9kPa) 和 pH 响应性生物降解性。对于体内模型, 由于这些特性, OPAB 可以在 30 秒内实现肝出血的快速止血, 并易于负载姜黄素纳米颗粒, 通过减轻炎症、上皮再形成、肉芽组织形成和胶原沉积, 显著加速手术伤口闭合。总的来说, 这种多功能注射水凝胶是一种很有前途的材料, 有助于同时进行术中出血和术后伤口修复, 在肿瘤切除的出血和手术伤口的临床管理中具有重要潜力。

D13-O17

氨基酸诱导水凝胶的快速凝胶化与强韧化研究王义*¹、罗星琪¹、谢香艳¹、吕泓奕¹、赵丽娟¹、吴锦荣²

1. 四川师范大学

2. 四川大学

生物医用、石油化工和可穿戴电子设备等领域的迅速发展, 对快速凝胶化和强韧化的水凝胶提出了紧迫的需求。然而, 当前快速凝胶化的水凝胶存在着诸多问题, 如力学性能不佳、前驱体分子结构设计复杂以及前驱体种类受限, 这些问题使其难以满足实际应用需求。针对这一现状, 我们提出了一种简便而通用

的策略，即通过引入廉价易得的氨基酸来实现自由基聚合水凝胶的快速凝胶、强化和增韧。氨基酸不仅能激活过硫酸盐，迅速产生自由基从而诱导快速自由基聚合，还能与网络链形成强大的氢键，从而强化和增韧水凝胶。例如，当存在 L-丝氨酸时，丙烯酰胺（AM）单体可在几十秒内迅速凝胶，所得水凝胶的拉伸强度可达到 0.45 MPa，断裂应变可达 2060%。更为重要的是，由于 L-丝氨酸分子与网络链之间氢键的极动态特性，水凝胶具备低滞后、快速自我恢复能力和出色的疲劳抗性。此外，这一快速、可控和通用的策略适用于广泛的氨基酸和单体，为强韧水凝胶的温和、快速和量化制备提供了一种普适的方法。进一步地，我们考察了该策略在生物医用、防风固沙等方面的应用。

D13-O18

荧光多功能凝胶

黎朝*

北京理工大学

荧光水凝胶兼具荧光和凝胶两者优势，是具有潜力的发光软材料，在柔性信息存储/显示、仿生驱动、传感检测等领域具有光明的应用前景。然而，该领域发展一直较缓慢，荧光行为（强度和颜色）的精准调控，以及材料高性能和多功能的集成，是待解决的关键问题。针对此，引入含分子内运动和刺激响应性位点的聚集诱导发光化合物作为荧光基元，通过刺激改变基元分子结构，调控发光颜色，以凝胶网络通过超分子作用控制基元分子内运动，调控发光强度，并实现荧光基元和凝胶网络的协同；引入多种具有规整网络结构的高力学性能凝胶，提出空间有序分布的多层凝胶策略和单组分多任务策略，实现凝胶高力学性能和多功能集成；引入信息、先进制造、航天生物医学知识和技术，构建智能荧光凝胶，探索它们在可穿戴信息-传感、仿生促动器、空间生物医学检测领域的应用。

D13-O19

水凝胶模仿含羞草的应激响应行为：多模态、多路径的刺激响应变形

雷周玥*

东华大学

生物体的应激响应是一种复杂而多样化的反应机制，例如，含羞草能够迅速关闭叶片以抵御外部刺激，并在一定时间后自主重新展开。受到这一现象的启发，实验设计了一种差异化氢键网络交联的水凝胶，理念是仿效含羞草叶柄中伸肌细胞和屈肌细胞的协同作用机制。在这种仿生水凝胶中，弱氢键交联结构类似于含羞草的屈肌细胞，而由强氢键团簇稳定的交联结构则相当于伸肌细胞。在受到外部施加的应力时，强氢键团簇会被破坏，有利于水分子在水凝胶内部的快速扩散，而弱氢键交联结构则倾向于降低高分子链构象熵，推动水凝胶的弹性变形恢复。因此，当受力的水凝胶被缓慢放入水中，利用水凝胶的上下表面在接触水过程中的时间差，会在熵弹性形变过程中耦合一个膨胀压力梯度，随着水分子的扩散和高分子链的协同变形。虽然水凝胶内部的水分子和高分子网络最终都会达到均匀的平衡状态，但是耦合了水扩散梯度的弹性变形过程使得水凝胶的刺激响应行为会历经多步非平衡态过程，自主产生多模态的形态变化，类似于含羞草的自发应激响应，并具有丰富的可编程性，同时在偏振光下表现出双重锁定信息编码潜力，有望为新型仿生材料的设计提供了见解，并为下一代智能软体机器人的发展提供灵感。

D13-O20

基于 α -甲基调控的凝胶网络设计及其在粘合剂中的应用

王彦杰、陈莉*

天津工业大学

丙烯酸基粘合剂具有高粘合强度和低成本的优势，然而其容易受水分子的进攻而在湿热环境中表现不佳。在本研究中，我们设计了一种基于 α -甲基的氢键保护策略，该策略可以在没有化学交联的情况

下显著提高粘合剂水下和高温环境中的稳定性,且可通过绿色溶剂活化回收。甲基的位置是本策略的关键,主链 α 位的取代为聚合物提供了很高的势能。该策略可使粘合剂在水下 80°C 环境中的粘合强度达到 2.2 MPa。可逆且温和的凝聚过程不仅使粘合剂可以被完全回收,而且可适用于生物友好粘合。该策略有助于提供成本效益高、环境友好的粘合剂解决方案,并有望拓展至其他应用中的聚合物分子设计。

D13-O21

取向结构抗疲劳水凝胶电解质的构筑及柔性锌碘电池应用

谭云、廖睿熹、刘吉*

南方科技大学

水凝胶电解质固有的保水能力、优异的离子导电性和优越的柔韧性,使其在水系锌基电池中得到了广泛的探索。然而,由于锌离子传递效率差、枝晶形成及相应的疲劳损伤,导致水凝胶电解质应用于水系锌基电池中仍面临严峻的挑战。本文利用冷冻铸造工艺和聚合物表面工程技术相结合的策略,构筑了力学性能优异、抗疲劳和离子传输性能稳定的取向孔道的聚乙烯醇/聚丙烯酸/锌离子复合的水凝胶电解质(o-PVA/PAA/Zn),并用于构建长寿命的柔性水系锌碘电池。PAA 网络修饰的定向孔通道可为锌离子提供有效的定向传输途径,同时 PAA 网络的羧基与锌离子之间的相互作用,有助于锌碘电池中锌阳极的稳定沉积/剥离。o-PVA/PAA/Zn 构建的锌对称电池在 0.5 mA cm⁻² 的电流密度下,循环 1000 h 仍然保持稳定。在 5 A g⁻¹ 下,柔性全电池经过 27000 充放电循环,其容量约为 110 mAh g⁻¹ 和容量保持率可达 94.8%。综上,本工作为长寿命锌基水系电池的水凝胶电解质的设计提供了新的思路,也为下一代柔性自供电电子器件的开发和发展铺平了道路。

D13-O22

基于多重作用构筑强韧纯两性离子水凝胶

李晓晖*、高辉

天津工业大学

两性离子水凝胶因其优异的防污性和低免疫原性,已成为生物医用水凝胶的理想材料。然而,由于两性离子聚合物的超亲水性,两性离子水凝胶的力学强度往往较低。尽管传统方法通过增加化学交联剂或引入非两性离子组分来提高力学强度,但这往往会导致凝胶变脆,并且影响其防污性。为此,我们利用多重网络策略构筑了聚(三甲胺氮氧化物)/聚(磺酸甜菜碱)/聚(磺酸甜菜碱)(pTMAO/pSB/pSB)纯两性离子三重网络水凝胶。通过两性离子的静电相互作用和多重网络链的缠结,我们同时提高了水凝胶的强度、韧性和刚度,同时保持了其优异的防污性[1]。进一步,为了简化水凝胶的制备工艺并保持高含水量的特性,我们设计并合成了一种新型含酰氨基脲基团的两性离子单体(甲基丙烯酸酰胺基脲羧基甜菜碱,ACBMA)。通过一步光固化过程,我们制备出纯两性离子 pACBMA 水凝胶。该水凝胶不仅含水量高(超过 95%),还具有优异的机械性能(在水溶液中压缩应力可达 3.9 MPa,压缩应变可达 99%)。通过独特的分子结构设计,pACBMA 水凝胶有效地整合了氢键作用、静电作用、分子链缠结作用和 α -甲基的空间位阻效应,从而替代了传统的化学交联方法,并协同增强了水凝胶的力学性能。此外,动态凝胶网络赋予了凝胶动态可调性,包括可注射性、成型性和可重塑性。本研究为同时实现两性离子水凝胶的高含水量、优异的机械性能和动态可调性提供了一种有效的策略,将拓展两性离子水凝胶在生物医学中的应用。

[1] Li, X.; Tang, C.; Liu, D.; Yuan, Z.; Hung, H.; L. S.; Gu, W.; Wu, K.; Jiang, S. High-Strength and Nonfouling Zwitterionic Triple-Network Hydrogel in Saline Environments. *Adv. Mater.* 2021, 33, 2102479.

D13-O23

水凝胶基室温柔性气体传感器

吴进*、罗艺冰、李健桦、张志铖

中山大学

高拉伸性、自修复性、透气性、保湿抗冻性等类皮肤属性是穿戴式电子的重要属性，能提升穿戴舒适性或获取信号的准确性。但制约传统半导体气敏材料穿戴式应用的瓶颈问题是其需要在高温、有氧条件下工作，且缺乏柔性可拉伸等类皮肤属性，使其在穿戴式应用中受限。本研究发现离子导电水凝胶在室温下对特定气体（NO₂、H₂S 等）的高电学响应，在此基础上设计制备出系列基于离子/共价交联的高拉伸、自修复、透明的类皮肤双网络水凝胶气敏材料，用于构筑出室温高灵敏、宽感知范围、在有氧和无氧条件下都能正常工作的柔性气体传感器，突破传统气体传感材料不能在室温、无氧的条件下工作、且缺乏柔性可拉伸性等类皮肤属性、使其应用场景受限的瓶颈问题，发展了离子导电水凝胶在室温气体传感方向的新应用。

进一步提出利用离子导电、柔性可伸缩的双网络水凝胶作为固态电解质，结合异质电极制备出电化学型自驱动、可拉伸的室温无线生物标志物气体传感器。在室温下表现出优异的硫化氢传感性能，包括高灵敏度（25.6mV/ppm）、低检测限（0.73 ppb）、良好的选择性、重复性和稳定性；在无氧/有氧、机械形变和各种温湿度环境条件下都能正常工作。通过第一性原理理论计算结合实验验证证实了气体吸附在三相界面导致电极电势改变的传感机理。进一步结合无线通信技术开发出无线、小型化的传感器系统，能用于远程实时地监测气体浓度，实现了及时感知 H₂S、NO_x 泄露并报警、口臭诊断和肉质判断。

通过制备基于氢键可逆物理交联的双网络有机水凝胶，进一步实现了传感材料的自修复，以及在服役后期的可降解和可逆回收。针对传统水凝胶的稳定性差的普遍性问题，发展简单、普适的溶剂/电解质盐置换法有效抑制了水分子的蒸发和在低温下的结晶，制备出保湿、抗冻的水凝胶和有机水凝胶，并提升了水凝胶对多种刺激响应的灵敏度。进一步利用密度泛函理论计算揭示了多元醇/LiBr 盐和水分子之间的作用机制（形成氢键或团簇），解析了其增强水凝胶稳定性的内在原因。通过在水凝胶中引入富含氢键的壳聚糖或者儿茶酚基团进一步赋予了超分子水凝胶良好的自粘附性，使传感器能自主牢固地粘附在衣物或者皮肤上实现持续、准确地获取生理或环境信号。

D13-O24

用于解耦准固态热化学电池的力学和离子导电特性的各向异性水凝胶

高巍*

东南大学

可穿戴系统的迅速发展需要可持续、机械适应性强、环保的能量收集设备。准固态离子热化学电池可将低品位热能转化为电能，以供可穿戴电子产品使用，但离子导电性与机械性能之间的权衡是最大挑战之一。通过设计各向异性聚合物网络，克服了这种权衡，产生了用于离子导电的排列通道和用于裂纹钝化的分级组装纳米纤维。这种热化学电池的离子导电性提高了 400% 以上，功率密度可与最先进的准固态热化学电池相媲美。与现有的具有最佳机械性能的准固态热化学电池相比，该材料实现了仿生应变硬化，韧性和强度分别增加了 1100% 和 300% 以上。我们认为这项工作提供了一种通用方法，用于开发高性能、成本效益高且耐用的热电池，并拓展了热化学电池在可穿戴系统中的应用。

D13-O25

基于中药小分子构筑中低内相超分子凝胶乳液及其生物医用

于惠、陈强*

国科温州研究院（温州生物材料与工程研究所）

开发对皮肤刺激性小且安全性高的中低内相凝胶乳液用于慢性感染性伤口敷料，依然是当前亟需解决的科研难题。基于此，本研究利用源于传统中药的两亲性小分子—甘草酸（GA）的自组装和凝胶化特性，提出了一种具有抗菌活性和中低内相凝胶乳液结构的新型超分子凝胶乳液（SGE）。在 SGE 体系内，油滴被 GA 自组装形成的纳米纤维所稳定并紧密包裹，并且在 Pickering 乳液存在下通过 GA 纳米纤维的超分子组装形成 SGE。得益于这一策略，我们成功在中低内相体积比（ ϕ =30-50%）范围内制备 SGE。

抗菌结果显示, SGE 能有效抑制金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*) 和大肠杆菌 (*E. coli*) 的生长。此外, 与高内相凝胶乳液相比, $\phi = 50\%$ 的 SGE 显示出较低的细胞毒副作用, 并对感染性糖尿病伤口的愈合进程起到了积极的促进作用。因此, 本研究不仅为依托中药小分子的超分子组装技术在中低内相凝胶乳液开发领域开辟了新策略, 也对复杂糖尿病伤口治疗难题提供了新思路。

D13-O26

水性聚氨酯/天然高分子杂化水凝胶材料及组织修复应用

罗锋*、李洁华、谭鸿

四川大学

可注射水凝胶由于其独特的结构和性能, 在生物医用材料领域, 尤其是在组织工程修复中具有很高的应用潜力。本工作分别采用端基酰肼和侧基酰肼修饰的水性生物可降解聚氨酯乳液与氧化透明质酸通过动态共价键形成聚氨酯-透明质酸杂化水凝胶。结合水性聚氨酯良好的力学和降解可控性及透明质酸优异的生物相容性, 聚集的聚氨酯乳液颗粒和长链透明质酸动态交联后形成的水凝胶孔隙更利于细胞浸润并保持良好的结构稳定性和自愈性能。水凝胶经过冷冻后形成的冷冻凝胶更具有独特的大孔结构, 可固定形态、快速回复、促进细胞浸润。它可以通过吸收水分或血液迅速膨胀, 有利于微创手术中快速止血。该凝胶可通过激活内源性凝血系统, 快速凝固血液, 降低免疫炎症, 促进血管再生和毛囊再生。因此, 本工作提出了一种通过合成的聚合物乳液和天然聚合物之间的自主交联来构建生物可降解的杂化凝胶的通用方法。这类凝胶材料显示出了作为高性能伤口敷料和声带无疤痕组织修复材料的巨大应用潜力。

D13-O27

植酸复合多功能导电水凝胶的构建及其柔性传感应用

王荣*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

导电水凝胶在检测人体力学、化学、生物学信号等方面具有良好应用前景。然而, 传统导电水凝胶存在力学性能不匹配、单体潜在生物毒性、制备方式复杂等问题, 限制了其进一步应用。设计与制备具有良好力学性能与传感性能的多功能导电水凝胶仍然面临挑战。本研究利用植酸与不同功能聚合物(两性离子聚合物、聚丙烯酰胺、聚丙烯酸等)之间的分子间相互作用, 将其作为交联剂与电解质, 实现聚合物网络的力学性能增强(拉伸强度达到 240 kPa, 组织黏附强度达到 18.6 kPa)并赋予其优异的电学性能(电导率 2.44 S/m), 通过植酸-聚合物分子间作用精准调控水凝胶网络梯度结构, 构筑多功能离子导电水凝胶。系统研究植酸复合水凝胶结构与其力学性能、电学性能与传感性能等的关系, 利用其构筑拉伸应变传感器/压力传感器, 研究其应用于人体各类体征监测的前景。

D13-O28

锂离子筛水凝胶高效液态提锂研究

王美玲*

太原理工大学

我国锂矿产资源主要以盐湖卤水形式存在, 发展“盐湖提锂”技术成为关键。锂离子筛吸附法用于液态锂提取选择性好且性价比高, 但面临粉末不易回收且本征稳定性差的问题。目前研究主要集中在对锂离子筛如 λ -MnO₂结构功能化改善提锂性能。此类设计虽一定程度上避免了溶损, 但有机(如传统聚合物)或无机(如 RGO)刚性包覆结构, 在一定程度上反而降低了吸附量及嵌脱效率, 且它们在循环过程中因易胀裂, 循环稳定性差。团队前期对功能型水凝胶及限域策略进行了研究。利用静电、超分子、氢键限域策略设计并成功构筑了多个三维多孔功能型水凝胶, 并探究了此类材料作为“海绵”吸附剂的应用价值。结合以上研究基础, 团队通过静电作用实现了 λ -MnO₂ 在互穿水凝胶(PVA/PPy)中的均一分散; 通过溶胀性调控了水凝胶

与 HMO 的界面结合, 实现了 HMO 在水凝胶中的均匀限域。这些自支撑水凝胶体系都显示了丰富的孔结构, 利用锂离子筛的高选择性及丰富活性位点暴露, 加快了锂离子的传输, 显示了高的锂离子筛利用率及回收效果。

D13-O29

仿生变形水凝胶及其在信息显示与加密方面的应用

吴宝意*

浙江大学

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

变形水凝胶是一类可在外界环境(光、电、热等)刺激下, 将自身化学能转化为机械能并实现形态转变的智能材料。得益于水凝胶软、湿特性及丰富的分子设计性, 智能变形水凝胶一直以来被认为是理解、模仿生物变形行为的理想平台。然而, 相比于生命体强大的变形能力, 现有变形水凝胶的变形模式单一、固化, 其主要表现在制备后难以依据环境、应用需求的变化而动态改变自身变形模式。本文基于温度响应聚合物的热力学原理, 设计制备了具有疏水偶氮苯官能团的偶氮丙烯酸酰胺水凝胶(P(AAm-co-ABAM))。在此凝胶体系中, 由于偶氮苯基团的疏水作用, 聚合物链被拉近, 促使链间丙烯酸酰胺链段的氢键供体(-NH₂)与氢键受体(C=O)彼此之间形成链式氢键, 诱导体系产生具有最高临界共溶温度(Upper Critical Solution Temperature, UCST)的温敏行为。类比于头足类动物化学门控的变形行为, 本文将环糊精(α -CD)加入到凝胶周围环境中以屏蔽疏水的偶氮苯基团, 从而实现对温敏行为的动态调控以及变形行为的时空调控。基于该化学门控下的变形行为, 本文进一步模仿头足类动物的变形原理, 在显示面板的协助下共同构筑了基于化学门控的“热触发-驱动变形-荧光输出”的信息显示与加密系统。这种生物启发的化学门控策略, 为人工显示系统提供了功能集成的可能, 并为信息安全开辟了一条前所未有的途径。

D13-O30

刺激响应智能水凝胶敷料在软组织修复中的应用

梁永平、郭保林*

西安交通大学

不同于硬组织, 软组织结构复杂, 血液循环不良, 恢复过程容易受到外界干扰, 治疗也相对较为困难。针对以上问题, 结合皮肤电池、多巴胺优异的湿态组织黏附性能和抗氧化性能, 以及碳基导电材料优异的光热性能, 以多巴胺为交联剂, 将导电基元引入水凝胶网络, 分别设计和制备了多种具有刺激(pH、葡萄糖、光)响应和物质(抗生素、抗癌药、抗氧化剂、降糖药物等)递送的智能水凝胶材料; 将所得水凝胶敷料成功用于促进耐药菌感染创面、糖尿病足创面和肿瘤手术创面等的修复。主要包括: (1) 通过聚合物化学接枝改性、纳米涂层增强和金属-配体配位等, 实现了黏附、止血、自愈合、抗菌及抗氧化等多功能协同的抗菌水凝胶的制备, 并发展了其作为抗菌敷料从多个愈合阶段协同促进耐药菌感染创面修复的新策略 [1]; (2) 通过天然/合成聚合物化学接枝改性和纳米复合作用, 开创了基于双动态键的 pH/葡萄糖双响应性二甲双胍控释敷料, 并发展了其作为外周特异性药物智能释放治疗慢性糖尿病足伤口的策略, 通过降低炎症和促进血管再生实现了 II 型糖尿病伤口的快速愈合和修复 [2]; (3) 通过复合冷冻凝胶技术和功能纳米组分复合, 实现了具有连通大孔的功能冷冻凝胶制备, 并发展了其作为肝癌肿瘤切除创面术中止血和术后防肿瘤复发一体化治疗的新策略 [3]; (4) 综述了包括刺激响应和物质递送在内的具有抗菌、抗炎、抗氧化、黏附止血、自愈合、导电以及伤口监测等多种功能的水凝胶敷料在皮肤伤口愈合中的应用[4]。

参考文献:

- [1] Liang Y, et al. Small 2019;15 (12): 1900046.
- [2] Liang Y, et al. ACS Nano 2022; 16 (2):3194-3207.
- [3] Liang Y, et al. Small 2019;17 (38): 2101356.
- [4] Liang Y, et al. ACS Nano 2021; 15 (8):12687-12722.

D13-O31

基于裂纹机理的超灵敏水凝胶传感器

史鑫磊*

国科温州研究院

在人机交互过程中，肌肉收缩过程中产生的机械信号和表面肌电信号的耦合对于长期生命信号检测、医疗诊断和个性化电子产品至关重要。水凝胶因其柔软、良好的皮肤适应性和无毒性而成为皮肤电极的有效材料。然而，由于受到变形传感机制的限制，水凝胶传感器通常表现出较差的机械传感性能（GF 通常低于 10），无法满足皮肤机械信号测量的要求（在小于 10%应变的条件下，GF 应高于 100）。在本研究中，通过在水凝胶传感器中引入裂纹传感机制，获得了一种具有高机械灵敏度（GF>22940）、大机械拉伸性（应变>120%）、低界面阻抗（阻抗<3 k Ω ）和高信噪比（SNR>44.7 dB）的水凝胶基机械/sEMG 信号耦合传感器。该高性能传感器成功识别了手臂指浅屈肌的表面肌电信号和弱机械信号，并通过机械信号和表面肌电信号的耦合确定了手指的形状和手臂的运动。本研究中的高性能水凝胶基机械/sEMG 信号耦合传感器促进了电子医学、可穿戴电子和智能机器人等各个先进领域的发展。

D13-O32

Recombinant human collagen and its potential applications in biomedical engineering

Yang Yang*

Nanjing Tech University

Recombinant human collagen (RHC) is a protein produced by introducing the natural gene sequence of human collagen into selected host cells, followed by processes such as cultivation, fermentation, and purification that can be manufactured on a large scale through optimized production processes. Therefore, it possesses the characteristics and main functions of natural human collagen. Currently, RHC is widely used in the food and cosmetics industries. Due to its high structural and functional similarity to endogenous human collagen, RHC holds significant potential as a novel biomaterial in the field of biomedical tissue engineering.

This report focuses on the application of RHC as a biomaterial in various areas. Firstly, it utilizes different engineering methods and material science processes such as phase transition, 3D printing, and electrospinning to fabricate tissue engineering scaffolds, gels, and nanofibers. These materials are employed in tissue repair applications for treating injuries. Secondly, a pre-gel system with a photoresponsive cross-linking mechanism that allows the loading of living cells is developed. This pre-gel is combined with 3D printing technology to establish a RHC bioink system. Through the utilization of 3D bio-printing technology and processes, cell-loaded constructs are printed to create in vitro tissue models that utilized for drug evaluation and toxicity assessment.

The interactions between this biomaterial and cells, tissues, and other components are explored at the cellular, genetic, and molecular aspect using imaging techniques, molecular biology, and material mechanics. The report examines the reparative effects of RHC on damaged tissues. It also investigates the potential applications of RHC in various areas, including skin wound repair, rapid hemostasis, soft tissue repair, artificial blood vessels, artificial corneas, artificial skin, bio-3D printing, and in vitro models. The research findings demonstrate that RHC exhibits excellent biocompatibility and plasticity, allowing for the preparation of a variety of medical products tailored to specific needs. The results underscore the broad application prospects and significant scientific significance of RHC as a biomaterial in the field of biomedical engineering.

Acknowledgement

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (32201119).

References[1] Y. Yang, A.C. Ritchie, N.M. Everitt, Using Type III recombinant human collagen to

construct a series of highly porous scaffolds for tissue regeneration, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, (2021) 112139.[2] Y. Yang, A. Campbell Ritchie, N.M. Everitt, Recombinant human collagen/chitosan-based soft hydrogels as biomaterials for soft tissue engineering, *Materials Science and Engineering: C*, 121 (2021) 111846.[3] Z. Wang, Y. Yang, Y. Gao, Z. Xu, S. Yang, M. Jin, Establishing a novel 3D printing bioinks system with recombinant human collagen, *International Journal of Biological Macromolecules*, 211 (2022) 400-409.[4] Y. Yang, R. Xu, C. Wang, Y. Guo, W. Sun, L. Ouyang, Recombinant Human Collagen-Based Bioinks for the 3D Bioprinting of Full-thickness Human Skin Equivalent, *International Journal of Bioprinting*, 8(4): 611.[5] Wang, L., et al., Recombinant human collagen digestates exhibit higher protective effect on UVA-damaged skin fibroblasts than animal-derived collagens. *Journal of Functional Foods*, 2024. 113: p. 106035.

D13-O33

磷酸盐玻璃纤维增强聚乙烯醇水凝胶在软骨修复中的应用朱晨凯^{*1}、杨洋²

1. 北京航空航天大学宁波创新研究院

2. 南京工业大学

人体关节软骨中有限的再生修复能力一直是组织工程领域亟待解决的关键问题。聚乙烯醇 (PVA) 水凝胶因其出色的低摩擦、生物相容特性, 已被视为软骨替代材料的理想选择。然而, 其结构强度和生物活性的不足极大限制了其实际应用。针对这一难题, 本研究引入了具有独特体内降解特性的磷酸盐玻璃纤维 (PGF), 其优异的机械性能和生物降解性为提升水凝胶的结构强度, 促进关节软骨细胞募集与诱导分化提供了新思路。本文成功制备了一种新型的 PGF-PVA 复合水凝胶, 其中连续分布的 PGF 显著提升了材料的机械性能。实验结果显示, 该复合水凝胶的最大拉伸强度可达 12.44 MPa, 杨氏模量达到 68.35 MPa; 与此同时, PGF 的引入还可通过交联诱导提高水凝胶分子结构的结晶度, 进而提升基体热稳定性。更值得一提的是, PVA 水凝胶基质展现出优异的离子交换能力, 有效调控了 PGF 降解过程中的离子浓度, 为软骨细胞的增殖和诱导提供了更为理想的代谢环境, 进而增强了细胞的募集效果。综上, 本研究提供了一种新型的纤维增强型水凝胶材料, 其在软骨修复领域展现出优异的性能潜力, 为未来的临床应用提供了新的可能。

D13-O34

天然蛋白质水凝胶的增强与生物医用陈强^{*}

国科温州研究院 (温州生物材料与工程研究所)

凭借其卓越的生物安全性, 天然蛋白质水凝胶已成为生物医学领域中不可或缺的材料。然而, 其固有的机械强度不足严重限制了其应用。受茶叶蛋硬化现象的启发, 本研究将牛血清白蛋白 (BSA) 水凝胶直接浸泡在低浓度的茶多酚 (TP) 水溶液中, 制备了高模量和高强度的 BSA@TP 水凝胶。与 BSA 水凝胶相比, BSA@TP 水凝胶的力学性能显著提高, 其拉伸强度、杨氏模量和断裂伸长率分别提高了 3.29、24.9 和 1.3 倍, 这主要是归因于多酚和 BSA 之间的氢键相互作用。此外, 得益于茶多酚的生物功能, 该凝胶具有突出的抗菌和抗氧化性能, 能有效抑制金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*) 和大肠杆菌 (*E. coli*) 的生长, 并能清除 ROS。此外, BSA@TP 水凝胶显示出较低的细胞毒副作用, 并对糖尿病伤口的愈合过程起到了积极的促进作用。因此, 本研究不仅为提高天然蛋白质水凝胶的力学性能提出了新策略, 也为应对糖尿病创面治疗这一挑战提供了新思路。

D13-O35

核苷酸-碱基增粘凝胶体系构筑及其性能研究

刘鑫*

长春工业大学

粘附性水凝胶基于良好的组织相似性、生物相容性、机械力学匹配性等优异性能,被广泛应用于组织修复、伤口密封、植入器件、柔性电子等领域。近年来,各种粘附性水凝胶材料被相继开发并在应用探索上取得了重要的研究进展。但现有的粘附性水凝胶仍然面临着机械性能弱、界面粘合强度低、界面稳定性差、粘附过程容错率低,以及无法实现其在水下与有机溶剂环境下的稳定且高强度的粘合界面等领域内急需攻克的关键难点问题。课题组在先前的研究工作中提出了碱基增粘水凝胶策略,建立了碱基增粘水凝胶体系。通过水凝胶结构设计,成功赋予水凝胶通用性粘性、强健的粘韧性能、反复性粘性、水下粘合性能、油下粘合性能、宽温度范围下的粘附性等优异的功能特性,并将其应用于汗湿皮肤传感器,实现了对人体运动信号的准确监测。然而目前的多粘附性材料无法实现化学原料的闭环回收,针对这一难题,研究团队提出核苷酸增粘聚硫辛酸凝胶粘合剂新思想,利用硫辛酸的开环聚合—闭环解聚特性实现可闭环回收水下粘合剂的构建。该凝胶粘合剂由腺苷酸、硫辛酸以及正电荷单体协同构建。亲疏水协同网络结构和核苷酸粘性因子赋予凝胶粘合剂良好的水下粘附性能,其可以对金属、塑料、橡胶等各种固体材料均展示出优异的粘附行为。该凝胶粘合剂并展示出了突出的水下反复粘性以及按需剥离特性。利用催化剂的解聚作用以及极性相容原理,实现核苷酸与硫辛酸的闭环回收性,且二次回收的单体原料仍可以继续用来合成水下粘附性凝胶材料。本工作将为可回收性高粘附性材料的设计与开发提供了新思路与理论研究基础。

D13-O36

水凝胶柔性传感

田野*

东北大学

水凝胶材料由于其优异的性能而备受关注。但是水凝胶材料存在导电离子易泄露,易失水/易受环境影响,传感导电不易共存等问题,大大限制了其应用。我们分别采用超异结构策略、离子互锁耦合方法和异质梯度法等克服了上述水凝胶存在的缺点,实现了持久导电性,环境自适应、传感制动共存的水凝胶柔性传感技术。我们开发的水凝胶传感器具有超高导电率、超高灵敏度和超快制动速度,为水凝胶传感的实际应用奠定了坚实的基础。我们通过融合软硬件技术、人工智能技术,无线传输技术等,成功实现了水凝胶柔性传感技术在康复医学、运动监测、人机交互、电子皮肤等领域的应用。

D13-O37

具有冷致形变功能的形状记忆高分子水凝胶

张佳玮*

天津工业大学

形状记忆高分子是一类能够记忆临时形状,当受到特定的外界刺激后,又可变形回复到初始形状的智能材料。传统的形状记忆高分子利用聚合物链的结晶或玻璃化固定临时形状,需要在热刺激下实现形变功能,严重制约了其在不耐热领域中的应用。本文构建了一系列具有冷致形变功能的新型形状记忆高分子水凝胶,并探索了其在人工肌肉、智能医疗器械等方面的应用:我们首先制备了聚丙烯酸-乙酸钙(PAA-Ca(CH₃COO)₂)水凝胶,利用溶解度随温度升高而降低的乙酸钙带动PAA水凝胶网络发生热致疏水聚集,实现了冷致形状回复功能,进而构建了具有高做功效率的形状记忆水凝胶人工肌肉;在PAA-Ca(CH₃COO)₂中引入离子增强氢键赋予材料自修复特性,实现了对形状记忆水凝胶初始形状的编辑和程序化形变功能;进一步通过在PAA主链上引入疏水性甲基,通过调控甲基的含量从而调控水凝胶的疏水聚集程度及形变速度,进而制备了智能药物控释胶囊和血栓清除器械;针对水凝胶软夹具通常抓取力

量较小的局限,我们将形状记忆功能和驱动功能结合起来,构建了包含聚(N-异丙基丙烯酰胺)(PNIPAm)驱动层和 PAA-Ca(CH₃COO)₂ 形状记忆层的双层水凝胶,利用 PNIPAm 层使水凝胶变形,通过 PAA-Ca(CH₃COO)₂ 形状记忆层固定变形后的形状,从而大幅提升了水凝胶夹具的抓取力量。这些工作为形状记忆水凝胶材料的设计制备和应用拓展提供了新的思路。

D13-O38

柔性长寿命室温磷光离子凝胶

吕少瑜*、杨熙鹏、李宁燕、陈攀壹

兰州大学

柔性室温磷光材料由于具有机械响应、可拉伸性等优点在可穿戴光电设备、柔性传感等领域具有广阔的应用前景。然而,传统聚合物基室温磷光材料通常利用聚合物保护发色团,因而在无溶剂环境下可以实现优异的光学性能。然而,在溶剂环境下发色团会发生不可控的分子间碰撞和分子内振动,进而对磷光快速淬灭。因此,如何设计合成在溶剂环境下运动受限的发色团,实现长寿命室温磷光,推动其在溶剂环境中的应用是目前亟待解决的关键问题。本工作通过将发色团掺杂进离子凝胶中实现了溶剂环境下强韧、可拉伸的长寿命室温磷光,研究了聚合物网络和各组分之间的强相互作用对于室温磷光材料力学与光学性能的影响。本工作从离子凝胶内部各组分运动受限角度出发,利用非共价键降低溶剂和发色团的运动,同时调控聚合物链的运动,同时实现了强韧的机械性能和长寿命的室温磷光。本工作克服了目前室温磷光材料的局限性,并有望在可穿戴光电设备和柔性传感领域实现应用。

D13-O39

基于分子设计的水凝胶贴片及在健康照护中的应用

顾相伶*

德州学院

妊娠期糖尿病(GDM)是指孕妇在妊娠期发生的糖耐受性异常。全球范围内,GDM 威胁着大约 14.2% 孕妇的健康。GDM 的早期筛查对于降低其发病率和改善母婴的健康尤为重要。对于 GDM 患者,通过监测血糖、体温、pH、血压、体重等生理指标,可以实现及时的干预与治疗。因此,有必要设计一种多功能器件,实现对孕妇血糖浓度、体温、创口环境 pH 值的灵敏、无创、便捷的一体化协同检测。以聚乙烯醇(PVA)为第一网络,甲基纤维素(MC)、羟丙基纤维素(HPC)和羟丙基甲基纤维素(HPMC)三类改性纤维素为第二网络,分别制备了三类双网络水凝胶。测试发现,水凝胶的韧性(143.9kJcm⁻³、102.3kJcm⁻³、135.9kJcm⁻³)和电导率(0.69Sm⁻¹、0.45Sm⁻¹、0.51Sm⁻¹)有显著差异,其中 PB-MC 双网络水凝胶具有最为突出的力学和电学性能。分子动力学模拟进一步揭示了 PVA 与纤维素醚之间氢键相互作用的本质。向凝胶中加入热致变色胶囊粉(TCPs),获得可通过颜色变化精准指示体温的可视化皮肤贴片。通过电化学窗口跟踪 TCPs@PB-MC 水凝胶对葡萄糖、pH 和温度的响应过程。本工作设计了一种基于水凝胶的柔性皮肤贴片,通过分子设计优化其性能,可同时响应葡萄糖、温度、pH 等多种刺激,集多种功能于一体,为妊娠期妇女糖尿病的一体化健康管理提供了一种新策略。

D13-O40

绿色水凝胶电极及智能传感器在运动健康监测中的应用

陈煜*、彭克林

北京理工大学材料学院

壳聚糖、海藻酸盐、琼脂等天然高分子源于自然界,储量丰富且绿色环保。以天然高分子为基质,通过复合导电介质制备的绿色导电水凝胶,通常显示出优异的柔韧性、应力-应变响应性、离子传导活性、自愈合性、可粘附性和可回收性,是制备绿色柔性电极的理想材料[1]。此外,天然高分子侧链中含有丰富的

官能团, 利用物理/化学交联构建的功能化水凝胶网络, 能够对 pH、温度、离子浓度等表现出特异的刺激响应, 在智能传感领域具有巨大的应用潜力[2]。

本报告从柔性智能传感器在人体运动及健康监测中的应用需求出发,总结了课题组近年来在基于天然高分子水凝胶的绿色柔性电极构建及其智能传感器应用方面取得的进展,并分别从生理电信号检测、关节运动监测和体液生物标志物分析等三个方面对其在运动及健康监测等领域的应用可行性进行分析, 以期对柔性电极材料及智能传感器的开发及深度应用提供有价值的指导, 助力运动健康新材料产业的发展。

D13-O41

双网络水凝胶独特的裂纹扩展动态

郑庸*

浙江大学

一旦能量释放率超过临界阈值, 脆性材料通常会经历快速而连续的动态脆性断裂。与之形成对比的是, 一些韧性软材料则表现出复杂的延性断裂行为。了解在韧性软材料中抑制动态脆性断裂的机制对于加深强韧软材料断裂破坏机理的理解至关重要。作为一种典型的韧性软材料, 双网络水凝胶为研究韧性软材料的延性断裂行为的潜在机制提供了一个很好的材料平台。在这一工作中, 我们在双网络水凝胶中发现了一种独特的粘滑裂纹扩展动力学行为。进一步发现动态裂纹的停滞归因于需要额外的能量输入以在裂纹尖端周围形成新的损伤区, 从而抑制连续的脆性断裂行为。在这一工作中阐明的动态裂纹停滞的概念模型, 为理解裂纹尖端附近的耗散过程如何防止韧性软材料发生脆性断裂补充了新的见解。

D13-O42

机械离子效应、材料与应用

蒲雄*

中科院北京纳米能源与系统研究所

机电能量转换技术是一项平台技术, 在智能传感、能量采集、可穿戴电子、生物医学电子等领域应用广泛。尽管电磁、压电、摩擦电等机电转换机制都取得了极大的成功, 但随着人机接口、植入电子等领域的快速发展, 探索利用生物相容的软体离子材料来实现机电转换成为研究前沿。机械离子效应可利用软体离子材料将机械刺激转换为高电流输出。这种发电机制可类比于生理电过程, 在生物相关领域具有应用前景; 同时, 软体材料也易于通过结构设计实现功能和性能的调控。我们在此报道一系列基于机械离子效应的离子电子材料和器件, 包括摩擦离子效应和压离子效应。我们系统地研究了这些机械离子效应的物理机制, 增强策略, 及应用探索。

D13-O43

手性水凝胶医用敷料构筑及糖尿病创面修复研究

窦晓秋、邢超、郜来奔、冯传良*

上海交通大学

针对现有医用敷料因仿生性能不足导致对糖尿病创面再生修复差的难题, 提出将皮肤经典手性结构在敷料中进行仿生还原的材料构建思路。建立了基于多重弱键协同的手性组装“驱动单元+调控单元”的基元设计准则, 制备了仿生皮肤单螺旋和超螺旋结构的手性水凝胶创制了手性水凝胶医用敷料。发现右旋水凝胶纤维与 I 型胶原蛋白的空间结构存在多级立体选择性识别, 可激活细胞 YAP 细胞通路, 促进角质形成细胞增殖与迁移, 进而促进创面再上皮化; 同时右旋水凝胶纤维通过激活线粒体融合蛋白 OPA1 表达、抑制血管内皮细胞 NF κ B 通路, 促进创面血管新生, 显著提升糖尿病创面修复效率。

D13-O44

高度可拉伸的抗疲劳加捻水凝胶纤维

冯颖慧、单良杰、张培、谭云、刘吉*

南方科技大学

生物体创造了大量力学性能优异的水凝胶纤维材料，如肌肉纤维、神经纤维、动物丝等，是执行防护、捕捉、水收集、感知、致动等多种智能行为的关键结构单元^[1]。随着电子和离子传感器、智能可穿戴系统、软体机器人等前沿领域的快速发展，如何模拟生物纺丝，开发抗撕裂、抗疲劳、超拉伸的水凝胶纤维已成为迫切需求^[2]。由于缺乏有效的能量耗散机制，传统水凝胶纤维较差的力学性能极大限制了其实际应用。近年来，拓扑结构的构建、牺牲键的设计、高阶结构的引入等能量耗散机制的采用可以有效提高水凝胶纤维的拉伸强度和断裂韧性，其中高阶结构的引入是阻碍裂纹扩展的关键^[3]。本研究提出了一种可拉伸抗疲劳水凝胶纤维材料的一般设计原则：采用风干拉伸工艺制备的高取向水凝胶单根纤维，使其通过加捻-退火工艺形成具有紧密相互作用的多根抗疲劳纤维。由于单根纤维之间足够强的界面粘接、纤维内部分子链的高度有序排列、由密集折叠链组成的微晶结构，当对具有预制裂纹的纤维材料施加周期载荷时，大规模的有序结构以及微晶结构大大阻碍循环加载过程中裂纹的推进，有力提高水凝胶纤维的抗疲劳性。上述设计可拉伸抗疲劳材料的原则是通用的，可以用于各种材料、纤维布局和制备方法，为众多应用开辟了广阔的设计空间。

参考文献：

[1] Shi, Y.; Wu, B.; Sun, S.; Wu, P., Aqueous spinning of robust, self-healable, and crack-resistant hydrogel microfibers enabled by hydrogen bond nanoconfinement. *Nat. Commun.* **2023**, 14 (1).

[2] Liu, X.; Rao, S.; Chen, W.; Felix, K.; Ni, J.; Sahasrabudhe, A.; Lin, S.; Wang, Q.; Liu, Y.; He, Z.; Xu, J.; Huang, S.; Hong, E.; Yau, T.; Anikeeva, P.; Zhao, X., Fatigue-resistant hydrogel optical fibers enable peripheral nerve optogenetics during locomotion. *Nat. Methods* **2023**, 20 (11), 1802-1809.

[3] Li, X.; Gong, J. P., Design principles for strong and tough hydrogels. *Nat. Rev. Mater.* **2024**.

D13-O45

聚电解质水凝胶网络在非平衡态的演化过程及功能化

王涛*

华南理工大学

高强度聚电解质水凝胶以其合适的力学强度、形状记忆和自修复行为，受到了广泛的关注。但传统聚两性电解质水凝胶仅具备盐溶液的响应行为，我们将弱阳离子单体或弱阴离子单体引入到聚两性电解质水凝胶体系中，并通过改变单体疏水性，制备了一系列 pH 响应的聚电解质水凝胶。这些水凝胶具有独特的 pH 响应行为，在水凝胶非平衡态协同效应的作用下，具有可自发变形、自增强等特性。我们利用水凝胶网络结构的分子设计，系统考察了聚电解质水凝胶在不同 pH 环境中的网络演化过程，提出了聚电解质水凝胶设计新策略。

感谢国家自然科学基金(52373115、51973066)对本研究的资助。

D13-O46

化学反应介导的超分子水凝胶时空动态自组装

王义明*

华东理工大学

超分子组装广泛存在于生命系统中，组装过程往往由复杂的生化反应所控制，如酶催化反应、化学能

的耗散等,表现出复杂的组装路径依赖性和动态性,赋予生命系统独特的功能,如动态自适应、自修复等。在人工合成条件下实现类似于生命系统中的组装过程将为新一代超分子材料的创制开辟全新思路。近年来,我们向自然学习,建立了基于脲键原位生成的动态超分子水凝胶系统,实现利用催化剂对超分子水凝胶组装过程的时空控制,成功构筑了系列多级结构化超分子水凝胶;发展了化学燃料驱动的非平衡态超分子水凝胶系统,通过化学燃料的控制,实现对超分子水凝胶强度与寿命等材料参数的灵活调控;此外,我们提出了反应扩散控制的动态超分子组装新策略,实现对超分子水凝胶生长过程的时空控制。该系列研究为新一代类生命体超分子水凝胶材料的开发奠定了一定的研究基础。

代表性论文:

[1] Wang, H.; Fu, X.; Gu, G.; Bai, S.; Li, R.; Zhong, W.; Guo, X.; Eelkema, R.; van Esch, J. H.; Cao, Z.*; and Wang, Y. (王义明)* *Angew. Chem. Int. Ed.* 2023, 62, e202310162.

[2] Wang Y. (王义明), Lovrak M., Liu Q., Maity C., le Sage V. AA, Guo X., Eelkema R., van Esch J. H. J. *Am. Chem. Soc.* 2019, 141, 2847.

[3] Wang Y. (王义明), Xu Z., Lovrak M., le Sage V. AA, Zhang K., Guo X., Eelkema R., Mendes E., van Esch J. H.* *Angew. Chem. Int. Ed.* 2020, 59, 4830.

[4] Wang Y. (王义明), de Kruijff R. M, Lovrak M., Guo X., Eelkema R., Mendes E., van Esch J. H.* *Angew. Chem. Int. Ed.* 2019, 58, 3800.

[5] Wang Y. (王义明), Versluis F., Oldenhof S., Lakshminarayanan V., Zhang K., Wang Y., Wang J., Eelkema R.*, Guo* X., van Esch J. H.* *Adv. Mater.* 2018, 30, 1707408.

D13-O47

二硫键调节的牛血清白蛋白双网络水凝胶在多种基质上的强韧粘附与按需脱粘

唐自清*

国科温州研究院

水凝胶和固体表面的可控强韧粘附对于软-硬混合医疗器械的开发至关重要。然而,对于许多实现了强韧粘附的水凝胶来说,兼具粘附的可控性仍具有挑战性。本工作开发了一种通过动态二硫键实现水凝胶与固体基质表面强韧粘附与可控脱粘的方法。具体而言,本工作首先用含有巯基的硅烷偶联剂对固体基质进行修饰,然后将牛血清白蛋白/聚丙烯酰胺双网络水凝胶(BSA/PAAm DN 凝胶)原位聚合于修饰后的表面上。此过程中 BSA 会与表面巯基反应,在凝胶-固体基质界面处形成新的二硫键。在二硫键与 BSA/PAAm DN 凝胶本体高韧性的共同作用下,此凝胶在多种固体基材上的界面韧性超过 1000 J m^{-2} ,与玻璃的界面韧性甚至达到 $\sim 5000 \text{ J m}^{-2}$ 。由于二硫键还可通过紫外辐照或还原剂如谷胱甘肽破坏。因此,经这些方法处理后,BSA/PAAm DN 凝胶与固体基质表面的界面韧性会大幅下降,最终实现按需脱粘。本工作提出的简单而通用的二硫键介导的方法为制备水凝胶的强韧粘附和按需脱粘提供了新的思路。

D13-O48

自融合水凝胶干粉研究与应用开发

杨栩旭*

浙江大学

面向工程医学应用中难以在大尺寸不规则表界面形成水凝胶及其粘接的问题,我们开发一种能够溶胀自修复并融合为粘接性水凝胶的干粉材料。通过该干粉材料能够实现应用于组织之间的界面,适应狭窄的组织-组织界面,迅速形成对组织的牢固粘附,并在不妨碍组织通过界面生长的情况下降解,最终辅助完成组织修复。同时该凝胶干粉可通过静电喷涂技术实现快速形成功能性水凝胶涂层,所形成的水凝胶涂层具有高韧性,并与基底表面形成良好的粘接界面,通过调整水凝胶干粉的复合相,可实现多种响应性水凝胶涂层。通过水凝胶干粉形成涂层,我们开发了一种水凝胶包裹液态金属胶囊,实现了胃肠道内的可控磁性

软体驱动，通过磁控位移与涡流加热形成的热消融效应，形成胃肠道的无线控制诊疗技术。

D13-O49

智能高分子水凝胶用于信息保护

乐晓霞、尚慧、孙雨、陈涛*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

信息的安全保护与人类生活、社会稳定、甚至国家安全息息相关，这促进了相关防伪材料及防伪技术的快速发展。相较传统硬质或干态存储介质以静态形式显示信息，智能高分子水凝胶材料因其可设计的三维网络结构、独特的刺激响应性能，在信息防伪领域崭露头角。以“最简单的方式，实现最高级的防伪”为目标，从单色荧光到多色荧光，从二维平面到三维时间/空间，从单通道显示到多模式、多层级防伪，从离子印染/模块组装到喷墨打印，我们长期致力于高分子凝胶基信息防伪材料的设计、合成，新型加密-解密策略的开发。本文中，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萘酰亚胺类荧光单体（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，并通过协同叠加读取最终信息。

D13-O50

结构色水凝胶生物传感器

秦萌*、李建树

四川大学

将水凝胶材料引入光子晶体结构中，制备基于结构色变化的生物传感器，由于其具有可视化、便携性、易操作等特点，在即时诊断方面有极大的应用前景。本工作设计了一系列响应性水凝胶，结合光子晶体结构，构筑结构色水凝胶生物传感器，实现了对血清中碱性磷酸酶、口腔挥发性硫化物、口腔致病菌、耐药菌、创面理化指标等的高灵敏、抗干扰、快速检测，并开发了手机软件，对传感器的响应性结构色进行分析，自动给出高准确率的检测结果。进一步地，发展了具有生物医用功能的响应性水凝胶，以构筑诊疗一体化器件。本工作有望推广低成本、高可信度的即时诊断技术和智能诊疗器件，促进疾病早期诊断、实时监测和治疗技术的发展。

D13-O51

负溶胀水凝胶的设计制备与应用研究

赵治*、李昱嵘、宋晓艳

北京工业大学

水凝胶由于其优异的理化特性被广泛应用于先进功能材料与智能材料领域。在水环境中吸水溶胀是水凝胶的一大通性。溶胀后的水凝胶固形物相对含量降低，易导致其机械性能大幅下降；¹同时溶胀产生的应力分布不均还可能使得水凝胶产生鼓包、分层、起皱、碎裂等形貌变化，极大影响其正常功能。

2

设计制备出具有负溶胀特性的水凝胶有望从根本上解决上述难题。负溶胀即水凝胶可在水环境中脱水。与负折射率、负热膨胀系数等奇异特性类似，负溶胀的实现可使得凝胶材料的功能特性在更广阔维度上被调控，产生出具有更优异性能表现的全新材料。然而，水凝胶的内禀亲水性使得负溶胀的构建极为困难。目前已有思路大致分为如下几种：在结构设计方面，通过构建含有特殊晶格单元的超材料，将凝

胶溶胀转化为晶格塌陷,产生表观负溶胀;³在环境调控方面,通过改变外部温度、离子强度与溶剂类型引发高分子团聚,产生宏观体积收缩。^{4,5}可以看到,上述方法高度依赖特殊材料结构或处理方法,仅能实现有条件限制的负溶胀,并未从根本上突破自发负溶胀这一材料领域难题。

在以往研究中,本组展示了系列利用高分子序调控水凝胶微观形貌与宏观特性的有效方法。⁶⁻⁸在此基础上,我们构建了一种全新的多级凝胶网络,可将凝胶吸水溶胀的根本驱动力——渗透压转化为牵引高分子向内收缩的反向作用,使水凝胶的吸水特性反而诱导材料脱水,从而真正实现水凝胶的自发负溶胀。这一全新负溶胀机理完全不依赖特殊超材料结构或外部环境变化,是一种分子层面作用机制的突破创新。以如上方式制备的负溶胀凝胶展现出许多奇异性质与应用,如水下机械性能增强、结构响应性增强、诱导抗溶胀、水下修复等。综上,本研究不仅提供了凝胶设计制备原理方法上的全新思路,还可极大提升凝胶材料的综合应用表现与应用范围,具有高度意义。

参考文献

- [1] Adv. Funct. Mater. 2023, 33, 2210188.
- [2] Adv. Funct. Mater. 2019, 29, 1905273.
- [3] Sci. Adv. 2018, 4, eaar8535.
- [4] Angew. Chem. 2016, 128, 14180-14184.
- [5] Adv. Mater. 2019, 31, 1900702.
- [6] Chem. Mater. 2022, 34: 10443-10450.
- [7] Adv. Sci. 2023, 10: 2303315.
- [8] Adv. Mater. 2024, 36: 2307582.

D13-O52

具有机械激活和 ROS 清除协同作用的多酚增强湿粘附水凝胶及其生物医用

游敏*

国科温州研究院 (温州生物材料与工程研究所)

慢性伤口严重威胁着糖尿病患者的健康和生命,给患者带来了巨大的经济负担和精神压力。目前,全世界有超过 5.4 亿人患有糖尿病,其中约 25% 的糖尿病患者存在慢性伤口难以愈合的风险。慢性糖尿病伤口的暴露和高糖环境使其更加脆弱,导致伤口部位易受细菌感染、产生过多的 ROS 和持续炎症。反过来,过量的 ROS 可诱导氧化应激,对胶原和肌成纤维细胞造成不可逆损伤,从而降低糖尿病伤口的收缩性,使其长期感染,严重阻碍伤口的修复。基于此,本研究开发了一种多酚增强的湿粘附水凝胶,其具有机械激活和 ROS 清除协同作用,可显著促进糖尿病感染伤口的愈合。先将具有多酚结构的单宁酸 (TA) 加入到含有丙烯酸 (AAc) 和 1-乙烯基咪唑 (VI) 的二甲亚砜 (DMSO) 溶液中进行共聚,然后与水进行溶剂交换得到湿粘附且抗溶胀的水凝胶 (PAAcVI-TA 水凝胶)。PAAcVI-TA 水凝胶的拉伸断裂应力大于 0.2 MPa,与生物组织的粘附力可达到 700 J m⁻²。TA 的加入不仅增强了 PAAcVI-TA 水凝胶的韧性和湿组织粘接强度,而且还使其具有优异的 ROS 清除、炎症抑制和促进血管生长性能。更重要的是, PAAcVI-TA 水凝胶可以通过强粘附性向湿皮肤传递机械控制力,并机械性收缩糖尿病伤口。在糖尿病大鼠伤口模型中, PAAcVI-TA 水凝胶可长期收缩糖尿病伤口,促进皮肤修复和重塑。因此, PAAcVI-TA 水凝胶通过机械激活和 ROS 清除协同作用显著促进糖尿病感染伤口的愈合,为有效治疗糖尿病伤口和其他形式的慢性伤口提供了新的思路。

D13-O53

基于疏水缔合和氢键增强的多功能水凝胶的制备与研究梁晓旭¹、钟海静^{*2}

1. 广州航海学院
2. 暨南大学

水凝胶是一类具有三维网络结构且保有大量水分的高分子材料，因其优异的生物相容性、柔软性和可调控性，在软机器人、组织工程和柔性电子等领域具有广泛的应用前景。本文通过使用新型单体聚乙二醇硬脂醚甲基丙烯酸酯 (BEM)，采用原位胶束共聚一步法开发了多种疏水缔合和氢键增强的多功能水凝胶。基于强疏水缔合和氢键作用，这些水凝胶表现出优异的机械性能，其拉伸断裂应力、断裂应变和杨氏模量分别为 75-720 kPa、400%-2850% 和 45-210 kPa。这些水凝胶展示了对盐浓度和 pH 值的显著响应性、良好的自愈能力、热重塑性和拉伸后的快速自恢复能力。此外，这些水凝胶还具有良好的离子导电性，能够将机械变形转换为电信号，适用于监测人体运动的柔性应变传感器。结合显著的机械性能和刺激响应特性，这些多功能水凝胶拓宽了凝胶材料在人工器官、软体执行器和传感器等领域中的应用前景。

D13-O54

海藻酸钠/硫酸钙/磷酸钙骨修复凝胶的制备与性能研究汤爽英¹、刘乾江¹、童晓茜²、陈思^{*1}、王旭¹

1. 浙江工业大学
2. 杭州碧泰生物医疗科技有限责任公司

硫酸钙因其良好的可塑性和原位自固化性，可用作骨缺损的骨修复材料。然而，由于抗压强度低和吸收速率过快使其临床应用受到限制。本研究制备了一种新型骨修复海藻酸钠/硫酸钙/磷酸钙复合可注射凝胶材料，固相为海藻酸钠、硫酸钙粉末，液相为磷酸盐溶液。固液比 P/L=0.75g/mL 时，固化 7 天的骨修复凝胶抗压强度可达 10MPa。通过海藻酸钠与钙离子的“蛋-盒”结构络合形式，磷酸根可以在海藻酸钠大分子模板上原位矿化形成有别于直接结晶形成的磷酸钙晶体，从而有效提高硫酸钙骨水泥的抗压强度。离子交联海藻酸钠的链网络结构增强了与矿化的相互作用以减缓体液环境中的快速溶解，并可通过改变和硫酸钙的比例控制整体的降解速率，达到与不同部位骨再生速率相匹配。此外，磷酸钙的形成能提高骨水泥的骨诱导性，可以显著促进骨缺损修复和新骨形成，在骨缺损治疗微创手术中具有广阔的应用前景。

D13-O55

多功能糖基抗菌水凝胶敷料加速皮肤伤口愈合程秋丽^{*}

河南科技大学

抗菌水凝胶敷料因其在预防与伤口愈合相关的感染方面的优势而受到广泛关注。然而，多用途抗菌水凝胶不可避免地会导致其结构复杂，限制了实际应用。在这项工作中，利用天然糖分子中提取的含二醇物质的化学性质稳定、生物相容性好等优点，通过两性离子糖共聚物聚[(2-甲基丙烯酰氧乙基磷酸胆碱)-co-(N,N-二甲基丙烯酰胺)-co-(2-乳酸氨基乙基甲基丙烯酰胺)](PMDL)与硼砂简单混合，在 AgNPs 掺杂下 10 s 内形成了基于可逆二硼酸盐键交联网络的多功能糖基抗菌水凝胶。PMDL-12%/硼砂/Ag NP 水凝胶具有快速自愈能力和良好的注射性，对生物组织和各种材料表面具有良好的粘附性。此外，水凝胶对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌呈现有效的抗菌活性，可预防伤口护理中的细菌感染。该多功能水凝胶具有良好的细胞相容性和血液相容性。重要的是，小鼠全层皮肤缺损模型的体内伤口愈合评估证实了该水凝胶通过调节炎症和促进胶原沉积有效地加速皮肤再生和伤口愈合。这种多功能糖基水凝胶伤口敷料在生物医学领域具有广阔的应用前景。

D13-O56

基于相分离的水凝胶力学性能调控

张国高*

西安交通大学

生物组织通过自组装以自下而上的方式形成异质结构, 这些结构赋予了生物组织极其出色的力学性能。例如, 皮肤外层组织含水量在 40% 以上, 弹性模量高达 200 MPa, 强度 18 MPa, 韧性 3.6 kJ·m⁻², 力学性能远超现存水凝胶。当前, 水凝胶的自组装通常是通过界面能驱动下的相分离实现的。相较于聚合物链结构, 相分离结构特征尺寸提高了多个数量级, 因此材料力学性能有大幅度提高。然而, 国际上对于相分离对水凝胶力学行为影响的研究集中于特定的材料体系, 无法总结出具有普遍性的力学原理。本报告将介绍水凝胶中实现相分离的通用方法, 并初步提出水凝胶相分离稳态模型。通过相分离结构调控, 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。

D13-O57

链段受限引起的水凝胶室温磷光行为

吴子良*

Zhejiang University

具有团簇诱导发射特征的聚合物是一类新型室温磷光材料, 在信息安全、生物成像、化学传感等领域有重要的应用价值。然而, 该类材料的磷光行为对环境非常敏感且易于淬灭。当暴露于良溶剂时, 聚合物网络发生溶胀, 导致团簇解聚以及链段柔顺性的增加, 进而非辐射衰减增强、荧光和磷光发射急剧削弱。因此, 制备具有室温磷光行为的水凝胶成为挑战性难题。近期, 我们通过形成稠密缔合结构急剧降低了网络动力学, 得到力学性能优异的聚(甲基丙烯酸-co-丙烯酰胺)玻璃态水凝胶。进一步研究发现该凝胶具有独特的室温磷光行为, 磷光强度和寿命具有显著的温度依赖性。这是由于氢键缔合强度受温度影响, 网络高度冻结有效抑制了非辐射跃迁, 从而提高了发光效率。在此基础上, 我们通过聚合诱导掺杂的冠醚分子结晶, 从而导致聚合物网络挤压受限, 得到了具有室温磷光行为的聚丙烯酰胺水凝胶。本报告将介绍以上两种水凝胶的力学、光学行为, 并讨论其结构-性能关系。

D13-O58

光子晶体水凝胶的构建及其多重防伪应用

林文静、易国斌*

广东工业大学 轻工化工学院

流通货币、高价值商品和价值文件的伪造严重损害着政府、企业及个人的利益, 每年造成数百亿美元的经济损失。针对单色发光防伪材料普遍存在加密程度低、刺激响应单一、易受损伤等问题, 我们采用牺牲 SiO₂ 光子晶体模板的方法, 分别设计了四个解决方案, 包括构建基于量子点荧光色与反蛋白石结构色的双重防伪复合水凝胶[1]、构建多重刺激响应的反蛋白石水凝胶[2]、构建自修复量子点凝胶与反蛋白石凝胶相结合的复合水凝胶[3]、以及构建量子点凝胶与中空 SiO₂ 光子晶体相结合的复合水凝胶[4]。例如, 研究刺激响应凝胶前驱体的含量、所处环境的温度、pH 值、离子强度、乙醇浓度等对反蛋白石水凝胶结构色的影响, 进而掌握全色调控机制[2]; 利用量子点优异的发光性能、结构色可调性、多重响应性、光热转换和自愈合性能, 我们制备了杂化水凝胶颜色矩阵。通过自定义编码术语和开发手机小程序, 将各种条件下形成的颜色矩阵转化为数字矩阵并编汇成信息存储于手机小程序中, 再利用手机进行逐层解密。该颜色矩阵具有强大的信息储存能力和编码容量 (16135) [3], 可以实现各种信息逐级加密和解密, 表明其在信息安全领域具有良好的价值。

参考文献:

[1] Guoyi Pan, Wenjing Lin*, Guobin Yi*, et al. J. Mater. Chem. C, 2022, 10: 3959-3970.

[2] Jingye Yan, Wenjing Lin*, Guobin Yi*, et al. Chem. Eng. Sci., 2024, 288: 119818.

[3] Jingye Yan, Wenjing Lin*, Guobin Yi*, et al. Chem. Eng. J., 2023, 451(4): 138922.

[4] Guoyi Pan, Wenjing Lin*, Guobin Yi*, et al. Composites Part B-Engineering, 2024
[https://authors.elsevier.com/sd/article/S1359-8368\(24\)00362-7](https://authors.elsevier.com/sd/article/S1359-8368(24)00362-7).

D13-O59

高强韧水凝胶制备及其形状记忆研究

吕红英*、杨磊、杨小牛

中国科学院长春应用化学研究所

水凝胶具有可控的理化性质、类细胞外基质等优点，因此引起了生物医用领域极大兴趣。其中，热响应形状记忆水凝胶因其温控形状记忆行为而在智能医疗领域获得了广泛关注。充足的力学性能是水凝胶应用的基本要求，然而低玻璃化转变温度、高韧性与高模量在结构上的互斥性，使水凝胶难以同时实现高强韧和体温触发的多重形状记忆行为。本工作首先通过设计合成侧基为烷基保护氨基甲酸酯的疏水单体，将其与低聚合活性的亲水单体自由基共聚制备水凝胶。利用疏水侧基间形成的氢键作用，得到了氢键增强型强疏水聚集交联点；利用亲水单体的引入和比例，实现了对疏水聚集尺寸、强度、密度的调控，进而构建了高密度的小而强疏水聚集交联均匀网络，得到了同时具有高模量 (28-200 MPa)、高强度 (> 100 MPa)、高韧性 ($9-26 \text{ MJ m}^{-3}$) 的水凝胶材料。其次，将两性离子单体引入疏水分子链上，一方面通过削弱疏水聚集作用提高分子链柔顺性，另一方面利用新形成的静电作用及被削弱而变密的疏水作用提高交联密度，进而平衡了凝胶高力学性能与低玻璃化转变温度之间的矛盾，构建了一个高模量(22 MPa)、高韧性(4.7 MJ m^{-3})、峰值在 36°C 的宽玻璃化转变温度区间、形状固定比(Rf)和形状恢复比(Rr)均在 95%以上的三重形状记忆水凝胶。

D13-O60

基于链工程增韧水凝胶聚合物网络

秦海利*

合肥工业大学

传统合成聚合物水凝胶网络通过聚合单体、引发剂和交联剂发生原位自由基聚合反应制备。基于上述合成方法获得的水凝胶网络具有典型的结构缺陷，即空间不均匀性、拓扑不均匀性以及连接不均匀性。在外力作用下，由于结构缺陷诱导的应力集中等问题，传统合成聚合物水凝胶常显现出软且脆的力学性能。为解决上述问题，多种非常规高分子网络，如互穿高分子网络、含有滑移交联点的高分子网络、瓶刷状高分子网络等被成功制备并提高凝胶材料的力学性能。尽管基于新型能耗机制发展的高分子网络在力学增韧方面取得了进步，传统合成聚合物水凝胶的网络缺陷问题并未得到直接解决。如何理解小分子聚合反应过程并直接调控水凝胶网络结构的结构缺陷，有望实现基于小分子设计的强韧凝胶网络的普适性合成。为此，我们首先围绕传统合成水凝胶网络的空间不均匀性，即多分散性交联点，提出发展新型纳米复合交联剂，通过调控交联剂的官能度，实现聚合物网络交联点的单分散性。协同纳米结构的多功能性和有机-无机动态界面作用，成功发展了多种兼具强韧和修复功能的响应性水凝胶材料，并应用于多种柔性器件(弹性导体、催化及柔性储能等)的构筑。其次，鉴于拓扑不均匀性，我们通过进一步发展新型纳米复合引发剂，进一步将高分子网络中大量存在且力学无效的悬挂链引入三维高分子网络，实现凝胶网络进一步增强增韧。这项研究为今后研制优异力学性能的传统合成聚合物材料提供新思路和新策略，有望扩展凝胶材料在多个新兴领域的应用前景。

D13-O61

抗溶胀水凝胶的界面与性能研究

王海飞*

深圳大学

近些年，韧性水凝胶的研究取得很多突破性进展，但水凝胶的环境适应研究（包括抗失水、抗结冰、抗溶胀、耐疲劳、防污等性能研究），特别是韧性水凝胶在溶剂中溶胀问题研究仍面临诸多挑战。水凝胶溶胀是聚合物所形成的交联网络在水溶液中由于聚合物链的溶剂化作用而吸收溶剂从而发生体积膨胀的现象，这一过程往往可以膨胀到相当大的程度。水凝胶在溶胀后，内部聚合网络伸展造成表观体积膨胀的同时还往往造成其力学性能的显著衰减。我团队提出亲疏水作用诱导相分离界面实现抗溶胀凝胶制备方法，利用凝胶网络中形成的非溶胀微域的空间限域效应，实现具有水下稳定的凝胶材料的制备。该方法为有效解决了凝胶材料在水下等湿环境的使用中面临的结构溶胀和力学韧性衰减的难题。

D13-O62

海藻酸-g-PNIPAm 基水凝胶的太阳能驱动大气水收集行为研究

郑丹*

安徽理工大学

太阳能驱动、吸附式大气集水(AWH)为干旱地区淡水短缺提供了一种经济有效的解决方案。设计并开发每天能够进行多次吸附-解吸循环的 AWH 设备，对于提高产水速度以满足人类用水需求至关重要。在此，我们报道了一种由海藻酸钠接枝聚 N-异丙基丙烯酰胺 (Alg-PNIPAm)、吸湿性盐氯化钙 (CaCl_2) 和光热材料爆轰纳米金刚石 (DND) 组成的复合水凝胶，这是一种具有较快吸附动力学和优良的光热性能的吸附剂，用于高产量的 AWH。吸湿性盐的高装载量使得复合吸附剂在相对湿度为 80%和温度为 25 °C 条件下显示出 1.85 g/g 的吸水容量。另外，受益于 DND 的光热转化和接枝共聚物 Alg-g-PNIPAm 在其低临界溶解温度下的结构转化，吸附剂表现出较快的解吸动力学。在一个太阳光照下，吸收在凝胶孔隙及结构中的水可实现 89%的解吸效果。此外，水凝胶吸附剂表现出优异的可重复利用性，没有明显的容量衰减，并在实际的室外试验中，其实现了 1.09 g/g 的集水效率。海藻酸基水凝胶吸附剂具有超弹性和低成本，在高效大气水收集方面具有广阔的应用前景。

D13-O63

盐调控智能水凝胶

赵传壮*

宁波大学

引入盐离子是改善水凝胶材料的力、电和热等性能的有效手段。目前，盐调控水凝胶的研究仅限于少数几种聚合物类型以及其极限性能的提升，针对水凝胶的动态响应和智能响应的研究还比较少见。本文报道了我们课题组在盐调控智能水凝胶一系列工作。在第一项工作中，我们报道了聚甲基丙烯酰胺水凝胶的盐调控粘弹性。由于聚合物链的氢键缔合和疏水聚集受盐的影响，该水凝胶在不同盐的刺激下在粘流态、橡胶态和玻璃态之间切换。我们提出了一种“时间-盐类型等效性”来描述这种现象，并基于此开发了水凝胶的耐磨、重塑等功能。在第二项工作中，我们利用聚丙烯酸在溴化钠刺激下的聚集行为构建了室温磷光(RTP)水凝胶，并引入二乙烯三胺 (DETA) 作为动态交联剂，赋予凝胶自愈能力。利用其自愈能力，这种水凝胶可以在冻干后掺杂疏水性染料复水重塑，并通过聚合物和染料之间的能量转移产生多色 RTP。在第三项工作中，我们利用聚丙烯酸在醋酸钙刺激下的热硬化行为构建了形状记忆水凝胶。在 DETA 的动态交联的帮助下，水凝胶被赋予了可编程变形和抗冲击包装等功能。以上这些工作将为智能水凝胶材料的设计带来新的思路。

D13-O64

聚合物 Janus 粒子高效制备、表界面组装及其功能化应用

黄霞芸*、朱杰

复旦大学

聚合物 Janus 粒子的高效制备及其在表界面组装一直是本领域的研究热点。然而，发展的有效且普适的方法仍非常有限。针对这一难题，本团队发展了适用于多类体系且尺寸可在 5-50nm 间可调的不同尺寸的聚合物 Janus 粒子。在此基础上，我们还研究其表界面组装行为并探索独特的功能化应用。在 Janus 粒子高效制备方面，我们提出并实现了高效制备不同尺度 Janus 纳米粒子（尺寸从 5-50 nm）的三种有效途径 [1-3]：1) 通过提升链间排斥，实现了蝌蚪状 Janus 单链粒子的高效制备。2) 通过预组织 A-b-B/C-b-B 混合壳胶束，在核冻结的条件下共价交联其中一种成壳链段，解离并纯化后获得仅含数根链的寡链 Janus 粒子。3) 为预组织 A-b-B/C-b-B 混合壳胶束提供动态核，共价交联其中一种成壳链段，实现混合壳胶束向 Janus 粒子的转变。在 Janus 粒子高效制备的基础上，我们不仅利用蝌蚪状 Janus 单链粒子“头部”间的电荷排斥及“头部”与表面的多位点作用，实现 Janus 单链粒子在惰性表面的接枝。与我们还针对水凝胶表面难以精确改性的难题，我们利用预组织结构与水凝胶的缠结，并利用预组织结构间的电荷排斥，成功获得了由 Janus 纳米补丁表面精确修饰的水凝胶。

D13-O65

用于个性化创面修复的水凝胶力学调控敷料优化设计

刘灏*、徐峰

西安交通大学

创面的有效修复面临全球挑战。研究表明，力学因素可在创面愈合中发挥关键作用，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，考虑创面具体特征的精准创面力学调控仍未实现。为此，本研究提出一种基于人工智能辅助力学调控敷料设计的个性化创面力学修复方案。具体地，力学调控敷料基于刺激响应型水凝胶实现，其可在外部理化刺激（如温度）作用下产生可控收缩，牵拉创面边缘向内收缩、促进闭合；通过图像分割算法提取创面特征（如尺寸、部位），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敷料参数（如模量、尺寸），以实现定制设计；并按照优化的时间序列周期性更换敷料，并针对创面实时特征进行敷料再设计。为方便使用，以上功能集成于“创面管家”APP 中，实现“创面图像采集与特征识别-敷料设计-使用指导”的闭环管理。该个性化创面力学修复技术的出色效果已在慢性创面模型、大动物模型中得到验证，展现出较大的临床转化潜力。

D13-O66

具有免疫调节功能的丝素蛋白杂化水凝胶在慢性伤口中的应用钱宇娜*¹、沈建良^{1,2}

1. 国科温州研究院

2. 温州医科大学附属眼视光医院

炎症失稳等病理学因素导致慢性伤口无法通过正常修复程序实现有效愈合，已成为临床治疗的巨大挑战。免疫调节策略有望成为慢性伤口治疗新希望，但是治疗效果和靶点不稳定、炎症微环境持续影响等瓶颈问题亟待解决。本研究制备了一系列基于氧调控的丝素蛋白杂化水凝胶，探讨这些材料在慢性伤口中改善低氧微环境，代谢重编程巨噬细胞的表型和功能的可能性。我们通过纳米模拟酶、叶绿体等外源性供氧缓解缺氧微环境；二甲双胍、赖氨酸氧化酶等内源性抑制糖酵解促进巨噬细胞的代谢重编程，通过组蛋白乳酸化修饰以及 NF-KB/ERK 轴实现巨噬细胞促炎表型向抗炎表型转化。揭示了巨噬细胞的功能表型的转化可以通过调控上游的代谢过程来“自主”实现。我们对水凝胶的理化特征和生物安全性进行了一系

列的表征，并通过糖尿病小鼠和糖尿病猪创面模型验证基于氧调控的水凝胶能够作为创面敷料安全有效的治疗，加速伤口修复。

D13-O67

基于黑磷/聚丙烯酰胺/琼脂糖复合水凝胶的柔性传感器

马金铭*、王冉

燕山大学

物联网和 5G 技术的兴起推动了柔性可穿戴智能电子设备和柔性传感器件的快速发展。材料选择、组装机理以及结构设计是构建鲁棒性多功能柔性传感器的重要环节。黑磷作为新兴的二维材料，具有出色的生物相容性和光热性能等，被广泛应用于催化和生物医药等领域。拓宽黑磷基柔性传感器的多功能性具有重要意义。本文设计了单宁酸修饰的黑磷纳米片参与的 PAM-agar-Na₂B₄O₇-TABP 复合水凝胶，该凝胶表现出优异的导电性、拉伸性和透明度，作为柔性应变传感器应变灵敏因数为 1.97。该水凝胶作为柔性电极材料构建了多功能摩擦纳米发电机，输出功率密度为 149.8 mW·m⁻²，并在近红外光诱导下验证了其在保密通讯和信息防伪应用的可行性。该工作拓宽了黑磷基复合水凝胶在柔性应变传感器和柔性摩擦纳米发电机领域的应用。

D13-O68

离子凝胶基柔性可穿戴器件

王凌云*

山东大学

离子导电凝胶由于其优异的光学性能、导电性、柔性/可拉伸性等特性，可以赋予离子凝胶基可穿戴器件更多的功能性，在能量采集、软机器人、柔性传感、发光显示、生物电子等领域展现了广阔的应用前景。本报告将介绍如何有效调控聚离子凝胶体系的光学性能、离子导电性、介电性能、界面相互作用及给电子能力，来设计制备离子凝胶基柔性可穿戴器件并展示其在柔性能量采集、柔性触觉传感、柔性可穿戴紫外线监测等方面的应用。

D13-O69

PEDOT:PSS/P(AA-co-LS)导电粘附水凝胶的设计及生物电极应用

刘琦、刘西梅*

江西科技师范大学

柔性电子江西省重点实验室，江西科技师范大学，江西南昌，330013

Email: liuqi1903794147@163.com; liuxm@jxstnu.edu.cn

鉴于导电聚合物 PEDOT:PSS 水凝胶兼具离子和电子导电性、力学性能及生物兼容性，其在神经接口、生物传感、药物递送等领域得到了广泛的应用，并有望成为长期稳定高效的生物电子界面^[1,2]。然而，当前 PEDOT:PSS 水凝胶基导电生物粘附界面仍面临着多基底材料粘附性差、使用寿命短、信号采集不稳定等问题，严重限制了其在导电生物粘附领域的实际应用。基于上述问题，本工作设计了一种新型不对称强粘附、自愈合的 PEDOT:PSS/P(AA-co-LS)水凝胶并围绕其开发了一种高性能 3D 打印墨水，结合 DIW 技术制备了导电水凝胶粘附界面并进一步应用于肌电信号监测中。具体内容及结果简述如下：

(1) 为解决粘附性差、使用寿命短的问题，通过分子掺杂效应和动态共价相互作用，将含有木质素磺酸钠 (LS) 作为粘结剂与丙烯酸掺杂同步提升粘附性和机械强度，加入 PEDOT:PSS 分散液中进行聚合，制备了一种 PEDOT:PSS/P(AA-co-LS)水凝胶。其具有良好电学 (0.95 S/m)、粘附 (115.23 kPa)、自愈合 (96.50%自愈合率)、高可拉伸 (650%) 性能。

(2) 为解决因各向同性粘附导致的肌电信号采集不稳定的问题, 使用 Fe^{3+} 溶液定向局部处理水凝胶表面, 使水凝胶具有不对称粘附性 (处理后部位粘附强度约为 0), 提升了实际应用中的抗干扰能力。

(3) 为解决定制化设计困难的问题, 优化了 PEDOT:PSS/P(AA-co-LS) 前体墨水的流变性, 开发出了性能优异 3D 打印导电粘附水凝胶墨水, 实现了高分辨率 (小于 $200\ \mu\text{m}$)、高长宽比 (超过 10 层) 和高再现性的制造, 并实现了 EMG 信号的高效纪录 (信噪比为 25.48 dB), 为电子设备及组织的器件集成、功能集成及快速制造提供了有效思路。

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.

D13-O70

Polyglycerol-Functionalized β -Cyclodextrins as Crosslinkers in Thermoresponsive Nanogels for the Enhanced Dermal Penetration of Hydrophobic Drugs

Huiyi Wang^{1,2,3}, Neha Tiwari³, Maria Soledad Orellano³, Lucila Navarro⁴, Zahra Beiranvand⁵, Mohsen Adeli⁵, Marcelo Calderón^{3,6}, Lei Zhang^{*1,2}

1. Shanghai University

2. Sino-Swiss Institute of Advanced Technology (SSIAT), Shanghai University, Shanghai, 201899, China

3. POLYMAT, Applied Chemistry Department, Faculty of Chemistry, University of the Basque Country, UPV/EHU, Donostia-San Sebastian, Spain

4. Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina

5. Department of Chemistry, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

6. IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain

Thermoresponsive nanogels (tNGs) are promising candidates for dermal drug delivery. However, poor incorporation of hydrophobic drugs into hydrophilic tNGs limits the therapeutic efficiency. To address this challenge, β -cyclodextrins (β -CD) are functionalized by hyperbranched polyglycerol serving as crosslinkers (hPG- β CD) to fabricate β CD-tNGs. This novel construct exhibits augmented encapsulation of hydrophobic drugs, shows the appropriate thermal response to dermal administration, and enhances the dermal penetration of payloads. The structural influences on the encapsulation capacity of β CD-tNGs for hydrophobic drugs are analyzed, while concurrently retaining their efficacy as skin penetration enhancers. Various synthetic parameters are considered, encompassing the acrylation degree and molecular weight of hPG- β CD, as well as the monomer composition of β CD-tNGs. The outcome reveals that β CD-tNGs substantially enhance the aqueous solubility of Nile Red elevating to $120\ \mu\text{g/mL}$ and augmenting its dermal penetration up to $3.33\ \mu\text{g/cm}^2$. Notably, the acrylation degree of hPG- β CD plays a significant role in dermal drug penetration, primarily attributed to the impact on the rigidity and hydrophilicity of β CD-tNGs. Taken together, the introduction of the functionalized β -CD as the crosslinker in tNGs presents a novel avenue to enhance the efficacy of hydrophobic drugs in dermatological applications, thereby offering promising opportunities for boosted therapeutic outcomes.

D13-O71

高机械性能水凝胶的构建及其食品包装领域应用研究

晓文*、徐晓文

暨南大学

近年来, 干态材料基聚合物薄膜在食品包装领域取得了广泛应用, 例如食品保鲜包装和食品新鲜度指

示等。然而，这种薄膜容易受到湿度影响，导致其灵敏度较低。特别是在肉制品的冷链运输过程中，低温环境使得这类材料薄膜不易释放生物活性物质，从而影响肉制品的保鲜效果。近期，水凝胶由于其含水量高、无毒、生物相容性好等特点，显示出在食品包装领域的潜在应用前景。然而，传统水凝胶的机械性能较差，无法有效应对包装物流过程中的跌落和冲击，导致食品包装易损坏，不利于物流运输。为解决这一问题，我们采用了结构互穿与正位聚合的方法，制备了一系列具有高机械性能（如高拉伸性（断裂伸长率>3300%）、抗撕裂（撕裂能 $>3.25 \times 10^5$ ）、抗疲劳等）的水凝胶材料。同时，在水凝胶中嵌入了生物活性物质或传感化合物，分别实现其在冷藏肉制品（如鸡胸肉、虾肉、猪肉）中的保鲜性能与新鲜度监测功能。这些研究成果有望为食品行业提供安全有效的活性与智能包装解决方案，从而有效应对肉制品保鲜与安全等重要问题。

D13-O72

水凝胶软材料的功能性粘接及医学应用

高扬*

西安交通大学

水凝胶与异质材料的粘接在柔性电子、脑机接口、生物医学等新兴科技领域中具有重要的作用。粘接界面在满足力学强韧化的基础上，还应根据应用场景的需求具备广泛适用、长效稳定等多方面的功能特性。基于高分子粘接结构界面断裂中黏弹性耗散的力学机制，本研究通过对粘接界面相的化学调控及基体相的力学增韧，实现了水凝胶材料与包括生物组织在内的各类基底材料间的高韧性、功能化粘接。首先，本研究提出了一种“拓扑-键合”式通用粘接策略。通过设计一种功能聚合物，使其一方面在触发交联下通过分子链间的物理拓扑与韧性水凝胶结合，一方面通过多样性的成键方式与不同基底键合，实现了水凝胶与各类基底的通用型高韧性粘接。受来自贻贝的儿茶酚化学的启发，该功能聚合物由儿茶酚接枝高分子链和氧化剂组成。当应用于水凝胶和粘接基底之间时，儿茶酚接枝高分子链可扩散进入到水凝胶网络内，在氧化剂的触发下原位交联形成一层新的网络与原有凝胶网络拓扑缠绕。与此同时，该高分子链上悬垂的儿茶酚基团通过多种化学相互作用直接与基底表面键合，从而使水凝胶与基底不依赖任何化学设计或表面改性就可实现高韧性粘接。多种水凝胶，如 PAAm, PNIPAm, PDMA 和 PVP 等可通过此方法直接粘接到如金属，玻璃，弹性体，塑料和生物组织等不同类型的基底上，粘接能最高可达 900 J m^{-2} 。其次，本研究提出了一种“长链+微球”式可注射抗溶胀组织粘接水凝胶设计策略。根据 Lake-Thomas 模型，水凝胶粘接界面可以通过增加基体聚合物网络的链长来实现本征增韧，然而由此会导致凝胶网络在湿环境中剧烈溶胀的矛盾。本研究设计了一种由疏松交联的大分子网络和聚电解质微球组成的天然高分子水凝胶粘合剂。通过聚电解质微球与聚合物长链之间的静电吸引，在实现高界面韧性的同时获得了优异的抗溶胀性能。制备的水凝胶胶粘剂与多种离体猪组织的粘接能高达 100 J m^{-2} ，在 37°C 湿环境下保持 24 h，水凝胶溶胀比仅为 1.13。最后，本研究提出了一种组织粘附型水凝胶复合医用补片。将具有组织粘接性能的水凝胶与医用补片复合，克服了传统医用补片缝合固定带来的操作复杂、易漏液、易感染等问题。新型补片兼具了高面内刚度及强组织粘接性，可应用于羊颈动脉破损的止血、肺部破损的密封、肝部弥散性出血的止血等。

D13-O73

3D/4D 打印水凝胶柔性传感器

付俊*

中山大学

水凝胶柔性传感器在植入式电子学器件等领域得到了广泛的研究。由于水凝胶材料导电率、机械性能等较低，导致其传感灵敏度较低，制约了其发展和应用。

本文将介绍 3D/4D 打印水凝胶微结构传感器方面的研究进展。主要包括：通过微凝胶交联，制备可打印的导电水凝胶墨水，解决了水凝胶可打印性与高强韧性不可兼得的矛盾，制备了含有微结构的高强韧、高灵敏的离子导电水凝胶；利用剪切取向作用，制备了各向异性的碳纤维复合水凝胶，研究了取向结构及

其空间分布对水凝胶响应驱动、应变传感性能的影响。研究表明,水凝胶微结构在应力应变过程中的级联放大效应显著地提升了传感灵敏度,水凝胶网络中各向异性导电网络的变形和滑移赋予水凝胶驱动-传感一体化特性。

本研究为发展高性能水凝胶柔性驱动器、推动其应用提供了重要的科学依据。

D13-O74

脱细胞基质水凝胶及其生物医学应用

白莹*

中山大学材料科学与工程学院

摘要: 通过化学或物理方法将动物组织或器官去除主要细胞成分和免疫原性获得的脱细胞基质 (decellularized extracellular matrix, dECM) 生物材料, 较为完整地保留了原组织或器官细胞外基质的成分、活性因子和天然三维结构, 相比人工合成材料和其他天然材料在促进生物体组织再生修复和作为细胞移植载体方面都更具优势, 目前已成为组织工程与再生医学领域的研究重点与热点之一。本课题组近年来着眼于开发来源更为广泛、成本更加低廉的异种 dECM 材料, 将其制备为 dECM 水凝胶, 进而通过静电纺丝、生物 3D 打印、微流控等先进制造手段, 有效提高了 dECM 材料的可加工性, 更赋予其可控的力学性能、组织适配的拓扑结构以及更加显著的生物活性, 极大程度拓宽了此类生物材料的应用形式和适用范围。课题组以同属神经系统的脊髓及周围神经来源 dECM 水凝胶为例, 证实了 dECM 水凝胶的生物功能与其修复治疗效果间具有显著的“组织特异性”, 即来源于特定组织的 dECM 水凝胶具有区别于其他组织的特殊组成成分, 展现出与组织来源相匹配的生物活性, 以促进干细胞的定向分化和组织再生。随着对 dECM 生物材料组织特异性生物活性认识的不断深化, 以及相关生物制造技术的不断成熟, 我们将 dECM 水凝胶的应用逐渐推广至包括骨科、口腔科、眼科、心血管科、皮肤科等不同医学领域范畴, 开展与医院、医学院之间的学科交叉合作, 特别是在脊髓损伤、椎间盘、牙髓、唾液腺再生, 以及角膜缺损修复等方面进行了系统研究, 取得了一系列突破性成果, 体现出 dECM 水凝胶材料在生物医学领域的广泛应用优势和临床转化潜力。

D13-O75

韧弹性水凝胶制备及其纤维基生物电子传感器应用

汪晓巧*

苏州大学

水凝胶材料柔软、湿润, 且具有刺激响应性和高生物相容性, 因此在与生物体有密切接触的穿戴式、植入式设备领域具有广泛的应用前景。然而, 传统水凝胶通常软而脆, 且微结构调控性受限。为了提高水凝胶器件的持久耐用性、功能稳定性, 必须实现作为柔软基底或活性组分载体的水凝胶与生物组织的力学性能适配和形状、微结构可适配性。在这里, 我们创新提出了分子构象调控、应变诱导取向性结晶等分子机制实现高韧性、高弹性的水凝胶制备; 同时, 相关分子机制能够与纺丝加工技术耦合, 实现可伸缩、多材料集成、多结构的功能软物质纤维电子器件的连续制备。因此, 在水凝胶力学性能调控方面, 我们可实现跨越四个数量级可控的弹性模量 ($240 \pm 30 \text{ kPa}$ 到 $2050 \pm 370 \text{ MPa}$)、可控拉伸性 (拉伸率 $105\% \pm 2\%$ 到 $2630\% \pm 120\%$) 以及可控粘弹性 (高弹性、滞弹性和塑形); 在可拉伸纤维电子器件制备方面, 我们可实现基于单纤维的电阻式超高应变传感、基于三相异质韧弹性纤维的电容式应变、压力传感和生物电传感, 以及 p/n 交替螺旋热电纤维的人体热能收集和应变不敏感的温度传感。

D13-O76

功能性 MXene 复合凝胶的构建及柔性传感应用

秦志辉*

燕山大学

柔性可穿戴传感器在电子皮肤、人体运动检测和健康监测等领域具有广泛的应用前景。纳米复合水凝胶,尤其是二维材料 MXene 复合水凝胶具有优异的力学性能和导电性,是制备柔性传感器的理想候选材料。然而,由于 MXene 纳米片在水环境下易堆积和氧化,同时与聚合物基质间的结合力较差,导致所构建的 MXene 复合凝胶力学性能及稳定性较差,限制了其在柔性传感方面的应用。文本通过界面工程策略,利用不同功能分子对 MXene 进行表面修饰,提高抗氧化稳定性,同时引入的多官能团可与聚合物网络形成非共价相互作用,提供 MXene 与聚合物基质间的结合力。所构建的 MXene 复合凝胶展现出高拉伸性、高机械强度、良好的导电性和黏附特性等。基于 MXene 复合凝胶的柔性可穿戴传感器具有高的应变和温度传感特性,可用于检测不同类型的人体运动及体温变化,同时也可作为柔性电极用于记录心/肌电图。

闪报

D13-O77

用于电子设备被动热管理实时监测的湿敏 AIE 水凝胶

杨雅碧、周晓和、刘霜、刘万鹏、吉晓帆、纪庆红、卢翔*、瞿金平
华中科技大学

随着电子设备的不断微型化和集成化,高效热管理的需求日益增加。尽管新型热管理材料通过颜色转换显示了在热积累前后的对比能力,但它们通常缺乏提供连续参考,存在潜在的长期风险。在这里,受到自然界哺乳动物汗液分泌和细胞生物体内动态水调节的启发,我们提出了一种用于实时监测电子设备中的被动热管理过程的新颖方法。我们的策略是通过设计一种湿度敏感的 AIE 分子, AMPI, 并制备了一系列水凝胶,这些水凝胶会因内部含水量的变化而发生连续的颜色变化。通过建立水凝胶的荧光颜色与其含水量之间的相关性,我们可以及时评估电子设备的运行状态,并根据材料的荧光颜色有效地预防热故障。此外,通过骨架设计,我们获得了具有优异吸湿性能(20°C, 90% RH 下为 2.91 g/g),界面稳定性(对木材基底的粘接强度为 100 KPa)以及较高冷却能力(厚度为 0.3 mm 时温度降低 23.8°C)的可视化热管理材料。我们的研究结果不仅为解决电子设备中的散热挑战提供了新的见解,为热管理技术的未来研究提供了有益的方向,也进一步拓宽了水凝胶类材料的应用领域。

D13-O78

基于细菌纤维素模板诱导效应制备 PEDOT:PSS 高黏附性生物传感水凝胶

罗婷婷*
贵州大学

具有优异机械性能和稳定导电性的柔性导电水凝胶是生物电子器件的理想候选材料。然而,生物电子材料的发展对材料的功能性提出了更高的要求。本文开发了一种由细菌纤维素(BC)、聚乙烯醇(PVA)、聚丙烯酸(PAA)和导电聚合物 PEDOT:PSS 组成的复合水凝胶,单宁酸(TA)的加入使水凝胶具有良好的粘附性。该水凝胶具有出色的柔韧性(610%, 180.2 kJ/m³)和电导率(11.12 S/cm),可以粘附在各种基材上,粘附强度超过 190 kPa。此外,得益于选材的环保性,BC-PVA-PAA-TA-PEDOT:PSS 导电水凝胶具有高度生物相容性。BC-PVA-PAA-TA-PEDOT:PSS 水凝胶传感器可以成功检测人体运动的各种信号,且信噪比较高,这项工作有望为开发用于健康监测的新型智能系统提供途径。

D13-O79

具有干细胞募集和促软骨分化功能的脱细胞基质微凝胶组装体用于关节软骨缺损修复

陈俊霖^{1,2}、董华*^{1,2}
1. 华南理工大学

2. 国家人体组织功能重建工程技术研究中心

众所周知，因缺少血管和神经，关节软骨损伤后较难自我修复。目前临床上常用的微骨折技术虽能提供大量干细胞，但干细胞在缺损处滞留能力差且缺乏有效力学支撑，易导致新生软骨纤维化。自体软骨细胞移植采用组织工程的方法，通过体外扩增患者软骨细胞并与支架材料复合后植入缺损处以促进软骨再生。该技术虽解决了缺损处细胞供给的问题，但存在手术提取困难、细胞易失去软骨表型等问题。为此，我们开发了一种新的软骨修复材料，即负载辛伐他汀（SIM）的软骨脱细胞基质（CACM）微凝胶组装体，与微骨折结合来促进关节软骨修复。我们首先从猪膝关节软骨中提取 CACM，然后通过乳液分散法制备包载 SIM 的 CACM 微凝胶，并通过席夫碱动态交联形成 SIM@CACM 微凝胶组装体。该组装体展示出良好的可注射性，组织粘附性和与天然关节软骨匹配的力学性能，可适用于微创手术。体外细胞学实验显示，该组装体可促进干细胞的募集和成软骨分化，体内动物实验证实了其在兔关节软骨缺损的良好修复效果。这一新型材料与微骨折结合使用，取得了比单独微骨折治疗更好的修复效果和更低的纤维化趋势。

D13-O80

用于柔性压力传感器的高灵敏度、防冻、可修复和导电双网络有机水凝胶

刘新龙*

山东科技大学

基于双网络导电水凝胶的柔性应变传感器因其在人体运动健康和智能检测方面的巨大潜力而备受关注。然而，如何开发出具有高灵敏度和抗冻性能的导电水凝胶以适应各种使用环境仍是一个挑战。本文报告了一种新型的基于 PVA-P-TA-MWCNTs（PPTME）的双网络有机水凝胶，该网络具有高环境稳定性、优异的抗冻性、可修复性和卓越的灵敏度，能够进行压力和应变传感。密度泛函理论（DFT）分析证实了 PPTME 有机水凝胶内部的多重相互作用。利用氢键、结晶微相和 PTA/PVA 的链缠结而成的有机水凝胶具有良好的机械性能（374%）和优异的循环性能。同时，由于添加了 H₂O/EG（乙二醇）二元溶剂，该有机水凝胶具有长期保水（15 天）和抗冻性能（-61.9 °C），大大提高了在低温条件下的应用。此外，组装后的压力传感器在很宽的检测范围（0-266.2 kPa）内显示出超高的灵敏度（1.88 kPa⁻¹）。基于这些优异的性能，制备出了一种柔性有机水凝胶传感器，展示了其在人类运动行为检测和可穿戴领域的巨大潜力。

D13-O81

基于动态化学的凝胶表面微加工及应用探索

陈狄*^{1,2}、王慧杰^{1,3}、赵骞²、谢涛^{1,2}

1. 浙江大学宁波科创中心

2. 浙江大学化学工程与生物工程学院

3. 浙江大学工程师学院

微结构加工技术是现代高端制造业的基础之一，在光学仪器、航空航天、微电子工业以及计算机芯片等领域有着重大需求。目前，光刻是普遍采用的微加工方法，其工艺流程包括旋涂、光照以及显影等的多个步骤。该技术具有高通量、高精度等的优势，但也存在环境污染，难以应用于三维曲面等的不足。特别是，一旦微结构制造完成即无法改变，难以做到微结构的动态调节。基于此，我们利用拥有智能响应特性的水凝胶作为微加工模板，通过动态共价的网络设计，使得在光诱导下可发生化学网络拓扑重排，从而降低区域交联密度并自发溶胀产生微结构。其特征尺寸在 5 μm 左右。更重要的是，水凝胶在不同化学物质刺激下会发生可逆的体积变化，从而可实现环境刺激下的微结构动态调节，并同时材料的断裂伸长率提升到 700%。该凝胶可作为软刻蚀模板，在光学微透镜阵列制造等领域展现优势。

D13-O82

天然生物质粘附性水凝胶的制备及其在伤口愈合中应用

王含章、孙兰芳、周峻毅、赖洁滢、郑雪、陆滨、张黎明*、郭双壮
中山大学

天然生物质材料具有良好的生物相容性、生物活性与可降解性等优点，将其应用在水凝胶敷料领域中可以形成伤口和周围环境之间的保护屏障。然而，关于水凝胶的粘附与不对称粘附特性，特别是在紧急止血和伤口愈合方面的应用，仍然存在一定挑战。本研究将粘附性水凝胶(HGO)和非粘附性水凝胶(CGC)组合，通过融合其不同的功能，成功合成了具有 Janus 不对称粘附的水凝胶 HGO-C。非粘附性水凝胶组分起到物理屏蔽作用，保护创面不受污染，而粘附性水凝胶与创面接触时，能牢固粘附创面，迅速止血，促进创面愈合。通过细胞相容性试验、溶血试验、抗菌试验和凝血试验均证明了 HGO-C 水凝胶优异的生物相容性、抗菌和止血性能。通过肝脏出血实验和伤口愈合等体外实验，明确展现了 HGO-C 的快速止血和增强伤口愈合能力。因此，这种来源于天然聚合物，具有不对称粘附特性的水凝胶伤口敷料在未来临床患者的实际应用中具有很大的潜力。

D13-O83

力学增强和功能可编程的活体纤维平台

彭若铨、巴方、李婕、任婧、刘一凡、李健、凌盛杰*
上海科技大学

活体材料代表了功能材料设计的新前沿，它集成了合成生物学工具，利用生物系统自适应、自生长、自进化等特征，赋予材料可编程、动态和类似生命的特性。然而，创造活体材料的一个主要挑战是结构稳定性、力学性能和功能可编程性之间的平衡。为了应对这一挑战，本研究提出建立一个力学增强和功能可编程的活体纤维平台的概念，将活菌和水凝胶纤维的协同整合，以实现结构合适-力学性能优异-功能多样性的平衡。纤维设计中，使用微流控纺丝法生产水凝胶纤维，将活菌原位集成到海藻酸钙水凝胶纤维芯层中。由于其多孔结构可分层定制，并且其力学性能可以通过后处理方法得到增强，因此在结构和功能可设计性方面都具有优势。通过引入活细菌，该平台具有可编程功能和类似生命的能力。本研究重建了活细菌的基因回路，以表达色素蛋白和荧光蛋白作为两种原型，通过监测荧光蛋白的表达量来实现活纤维的着色和水污染物的传感。总之，本研究建立了结构-性能-功能优化的活体水凝胶纤维平台，为加快新兴活体材料体系的实际应用提供了新的工具。

D13-O84

原位水凝胶长效缓释药物用于结膜下纤维化

崔豪豪^{1,2}、孙雪¹、栗占荣¹、李景果^{*1,2}

1. 河南省人民医院，郑州大学人民医院

2. 郑州大学材料科学与工程学院

结膜下纤维化(SCF)是一种发病率较高的疾病，慢性结膜炎、干眼综合征、眼外伤等均可诱发。SCF 可引起眼睑粘连、翼状胬肉复发和青光眼滤过手术失败等并发症，严重影响视力。现有药物的严重副作用和眼部屏障的存在是 SCF 治疗的主要挑战。因此，迫切需要探索更安全、更有效的抗 SCF 药物管理策略。为此我们以动态共价化学制备了一种眼部药物递送水凝胶体系：以壳聚糖(Chitosan, CS)为基体材料，化学偶联环糊精(Cyclodextrins, CD)和 4-羧基苯硼酸(4-carboxylbenzaldehyde, PBA)制备出糖基聚合物载体，通过主客体络合负载疏水性药物雷帕霉素(RAP)，并与聚乙烯醇交联形成动态凝胶结构。该体系具有适宜的机械性能，自我修复和形状自适应性，可注射性和生物安全性；细胞实验表明，RAP 能够抑制成纤维细胞的增殖与迁移以及胶原的收缩；RNA 测序分析发现，PI3K/AKT 信号通路在差异表达基因中显著富集，表明 RAP 可能通过 PI3K/AKT 信号通路发挥作用；免疫荧光发现 RAP 抑制了 PI3K/AKT/mTOR 通路

相关蛋白、肌成纤维细胞活化相关蛋白 (COL III、 α -SMA、COL I 和 FN) 的表达, 促进了自噬相关蛋白 (LC3A、LC3B 和 WIPI2) 的表达, 表明 RAP 通过调控 PI3K/AKT/mTOR/WIPI2 通路促进自噬, 从而抑制纤维化的进程; Western Blot 实验再次验证了 RAP 对 PI3K/AKT/mTOR/WIPI2 通路的调控作用; 体内结膜下损伤模型表明, 经治疗干预后 2 周, 损伤部位炎症细胞浸润减少、结膜充血水肿减轻同时 LC3A、LC3B 表达增强; 治疗后 8 周, COL III 与 COL I 的沉积减少, 在组织层面验证了促进自噬对纤维化的抑制作用。以上结果表明, 原位药物传输水凝胶体系可以作为一个有效的眼用抗纤维化体系, 通过单次给药实现药物分子的长期细胞内化, 精细调节 PI3K/AKT/mTOR/WIPI2 信号通路促进自噬, 从而高效地抑制了结膜下纤维化, 这将在材料设计以及潜在分子机制层面为其他纤维化疾病的诊疗提供参考。

D13-O85

稳定高效的水凝胶生物电子涂层

薛羽、刘吉*

南方科技大学

柔性电子器件在人体健康监测和生物医疗领域中发挥着越来越重要的作用, 有望从根本上改变生物体与电子产品的交互融合^[1]。当前植入式电子器件与生物组织的固定多是通过手术缝合或者机械植入的方式, 不可避免的引发组织损伤、炎症副反应等问题; 生物体中动态或柔软脆弱的组织 (如血管等), 这类固定方式也并不适用^[2]。因此, 开发高效稳定的生物-电子物理界面对实现人-机交互具有至关重要的作用。水凝胶与生物组织在化学、生物和力学等方面具有高度相似性, 被认为是人-机交互理想的界面材料之一^[2]。PEDOT:PSS 水凝胶因具优异的柔性、导电性和生物相容性等, 广泛应用于生物电极涂层, 构建力学/电学适配交互界面, 可用于各类生理紊乱和疾病的诊断、预警及治疗^[3]。然而, PEDOT:PSS 水凝胶本征脆性, 在长期交互过程, 其涂层极易发生疲劳破坏, 导致电极功能失效、生物组织损伤 (如炎症产生或疤痕形成), 极大地限制了其实际应用中的可靠性。

为解决上述挑战, 我们通过在水凝胶-基底界面引入有序调控的纳米晶域, 实现了导电聚合物水凝胶 (PEDOT:PSS/PVA) 在各种器件基底材料 (包括: 金属、玻璃、高分子等) 表面稳定粘合, 其界面粘合韧性高达 1800 J m^{-2} , 界面疲劳阈值高达到 330 J m^{-2} 。如此优异的抗疲劳粘接特性使得水凝胶涂层在长期电化学循环/脉冲过程中的稳定性, 在超过 1,000,000 次双向电荷注入脉冲刺激后, 仍然保持低阻抗、高电荷存储容量和注入能力。进一步在患病大鼠 (窦性心律过缓) 模型上验证了该水凝胶电极电刺激功效, 其可在远低于商业金属电极 ($> 2 \text{ V}$) 的起搏电压下 (0.7 V) 可以实现对心率的调控 (心率由病态的 $\sim 140 \text{ bpm}$ 恢复到正常的 $\sim 350 \text{ bpm}$), 不会引发任何组织损伤、炎症反应等生物安全性问题。

[1] Someya T, et al., The rise of plastic bioelectronics. Nature 2016, 540, 379.

[2] Yuk H, et al., Hydrogel bioelectronics. Chem. Soc. Rev. 2019, 48, 1642.

[3] Inoue et al., Strong adhesion of wet conducting polymers on diverse substrates. Sci. Adv. 2020; 6, eaay5394.

D13-O86

高保真度光固化 3D 打印水凝胶基仿生水下粘附器件研究

汪祎贤^{1,2}、蒋盼²、刘德胜²、王晓龙^{*1,2}

1. 烟台中科先进材料与绿色化工产业技术研究院

2. 中国科学院兰州化学物理研究所

在自然界长期的进化选择过程中, 许多水生动物 (如章鱼、鲫鱼、喉盘鱼、海星等) 为提高水下移动、捕猎准确性, 均已进化出具有独特吸盘结构的粘附器官。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, 本文设计并制备了具有高保真度结构的水凝胶基仿生吸盘。首先, 通过引入水-二甲基

亚砷 (DMSO) 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)增韧策略, 控制金属离子与配体的配位和交联剂的含量能够有效调节水凝胶粘附器件的机械性能和稳定性。基于此, 利用 DLP 技术制备了具有不同结构特征(包括半径、倾斜度和壁厚)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。通过有限元分析进一步证实, 结构设计对最终粘附性能的影响。优化的水凝胶吸盘可以抓取和转运不同形状和材料的物体。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和空气中的物体, 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, 其在智能粘附系统和软机器人领域具有广阔的前景。

D13-O87

Hybrid cross-linking for the synthesis of highly tough fluorescent alginate fibers

Dongnan Zhang, Hong Zhang*

Dalian Polytechnic University

The limited mechanical performance and functional constraints of alginate fibers significantly impede their development in the context of professional research. To address the aforementioned issues, this study initially utilized polyethyleneimine (PEI) and citric acid to synthesize carbon quantum dots (CD) with surface amino functionalization. Subsequently, in a sodium alginate (SA) solution, CD and vinyl silicon-based nanoparticles (VSNP) were co-introduced. Utilizing the abundant hydroxyl and carboxyl groups in polysaccharides, stable interactions were achieved with CD and VSNP. Incorporating a dynamic hydrogen-bonded crosslinking network among CD, VSNP and SA, the establishment of a calcium alginate (CA) ionically crosslinked network is facilitated via calcium-sodium ion exchange. Additionally, the interwoven and interlocked structure between the afore-mentioned dual networks was established. Employing a wet spinning process, the synergistic multiple dynamic energy dissipation mechanisms significantly enhance the mechanical performance. Fluorescent alginate fibers (CA/VSNP/CD) were prepared. The tensile strength was 3.81 cN/dtex, and the elongation at break was 13.16%. Compared to pure CA fibers, there were respective increases of 95.38% and 82.02%. Simultaneously, the fibers exhibit excitation-dependent emission characteristics. This work lays the foundation for potential applications of fluorescent alginate fibers in environmental monitoring, chemical sensors, dynamic anti-counterfeiting, and biomedical fields.

D13-O88

类关节软骨高承载、低摩擦双物理网络水凝胶

胡丹丽、刘德胜、王晓龙*

兰州化学物理研究所

摘要: 水凝胶因其柔软和湿润等特性, 已被广泛用作人工软骨润滑候选材料。然而目前水凝胶一直面临着机械承载和润滑性能差等亟待解决问题。现有的两种解决方案: 一是制备承载相和表面润滑相的双层结构化水凝胶, 但表层容易磨损, 润滑耐久性有限; 二是直接将润滑成分混入高强度水凝胶体系中, 这会因高水合作用导致其机械性能损伤。为了解决这些问题, 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。具体来说, 首先利用 PVA 和 CS 之间的氢键相互作用将二者混合均匀, 经过冻融循环后得到 PVA/CS 水凝胶; 然后进行盐析处理, 使得阴离子与 CS 形成第二重离子网络; 同时盐析将水凝胶体系中大量的游离水排出, 增加大分子链之间的相互作用来使网络致密化; 随后进行退火处理来进一步强化网络中大量离子键和氢键相互作用; 最后进行水平衡得到强韧且湿滑的 PVA/CS 水凝胶。在此, 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。同时该水凝胶还具有优异的耐蠕变性能, 施加 0.3MPa 应力持续 1h, 应变仅增加了 1.3%。在 30% 压缩应变下进行 100 个循环压缩, 最后一个循环的抗压强度 (4.7 MPa) 是第一个循环抗压强度 (6.7 MPa) 的 70%, 这表明水凝胶网络结构稳定, 在长期反复变形的情况下具有良好的抗疲劳性。此外, 该水凝胶的高承载性能为优异的摩擦学性能奠定了基础。例如在 1~30 N、1 Hz 和水作为润滑介质的摩擦工况下, PVA/CS 水凝胶的摩擦系数基本保持在 0.05, 接近原生软骨的润滑性能。同时, 该水凝胶在 1×10^5 次往复循环中也具有长期稳定的润滑性能, 且没有造成磨损和结构损伤。因此, 这种生物相容性的类软骨润滑水凝胶为创制具有优异承载和润滑性能的仿软骨水润滑材料和软组织承载植入物开辟了新的应用前景。

D13-O89

一种可注射的防污水凝胶通过抑制 CCL2/CCR2 相互作用来防止腹部粘连的发展

温金鹏*

西安交通大学

Abdominal adhesion, a serious complication of abdominal surgery, often resists mitigation by current drug administration and physical barriers. To address this issue, we developed an injectable, antifouling hydrogel through the free-radical polymerization of methacrylate chondroitin sulfate (CS-GMA) and 2-methacryloyloxyethyl phosphorylcholine (MPC) monomers, dubbed the CGM hydrogel. We systematically analyzed its physicochemical properties, including rheological strength, biocompatibility, and antifouling capabilities. A rat abdominal cecum adhesion model was constructed to assess the effectiveness of CGM hydrogel in preventing postoperative adhesion and recurrent adhesion. In addition, multi-omics analyses identified the relationship between adhesion development and CCL2/CCR2 interaction. Notably, CGM hydrogel can thwart the recruitment and aggregation of fibroblasts and macrophages by inhibiting the CCL2/CCR2 interaction. Moreover, CGM hydrogel significantly dampens the activity of fibrosis-linked cytokines (TGF- β R1) and recalibrates extracellular matrix deposition-related cytokines (t-PA and PAI-1, Col I and MMP-9). Cumulatively, the dual action of CGM hydrogel-as a physical barrier and cytokine regulator-highlights its promising potential in clinical application for abdominal adhesion prevention.

D13-O90

抗冻水凝胶电解质用于一体式柔性超级电容器

王定坤、付俊*

中山大学材料科学与工程学院

柔性超级电容器在便携式和可穿戴电子产品中越来越受欢迎。然而, 传统的柔性超级电容器通常表现为多层堆叠结构, 器件在使用过程中会发生不可逆的界面滑移甚至分层。我们在水凝胶电解质表面原位聚合导电单体苯胺, 构建了具有高度集成化结构的一体式超级电容器。聚合物链和纳米颗粒之间大量的分子间相互作用可以耗散能量, 制备的水凝胶电解质具有优异的力学性能。同时, 乙二醇的引入削弱了水分子之间的氢键, 从而使水凝胶电解质具有抗冻性。基于高度集成的一体化结构, 该器件在室温和-20℃条件下, 经过 6000 次充放电循环后, 其初始电容分别保持 100%和 97.5%, 在 5000 次弯曲和拉伸循环后的电容保留率分别达到 99.2%和 97.5%。更重要的是, 该装置在-20℃的弯曲、扭曲和拉伸状态下仍能正常工作。这项作为开发柔性一体化超级电容器提供了新的途径, 拓宽了储能器件的应用范围。

D13-O91

温度耐受、长期稳定的凝胶基机器触觉用于动作监测和形状识别

陈国旗、付俊*

基于凝胶传感阵列的人工触觉可以模仿人类的机械感知以协助智能机器人在非可视环境中工作。然而,水凝胶传感器难以在长期加载和极端温度环境中保持高灵敏度和柔性,从而限制了机器人对外部刺激和自身行为的感知。我们提出了一种基于低迟滞、耐高低温有机凝胶传感阵列的机器触觉用于稳定的机器人动作监测和物体形状识别。借助半互穿网络设计和有机溶剂,有机凝胶被赋予高的韧性 (1.54 MJ m^{-3}) 和低的机械滞回 (1000 次加载中低于 4.91%), 并保持对-100 到 60°C 温度的耐受性。有机凝胶和传感器在宽温度范围和长期监测中保持高柔性, 抗疲劳性, 导电性(0.27 S m^{-1}), 高应变灵敏度(GF 为 3.88)和压力灵敏度(35.8 MPa^{-1})。在机械手的指背和指肚上布置有机凝胶传感阵列, 以同时监测手指的运动和抓取物体所施加的压力。机械手抓取动作被监测, 并由训练后的机器学习模型分析识别, 以实现完整的机器触觉系统。该系统在抓取过程中实现了对物体形状的 100%识别。基于有机凝胶的机器触觉在宽温度区间内展现优异的鲁棒性, 这对机器人在各个领域的应用和创新具有重要价值。

D13-O92

高性能多尺度异质离子凝胶的构筑及应用

申子航、贾铮*

浙江大学

将具有不同机械性能的微观或宏观相结合到异质聚合物网络 (HPNs) 中, 使各种功能性软材料成为可能。然而, 现有的 HPN 存在机械性能差、合成过程复杂、界面薄弱以及一旦形成就无法重塑其结构等缺点。通过使用含有可聚合离子液体 (p-ILs) 的离子凝胶来制造多尺度异质性的 HPN 的通用策略, 可以应对这些长期挑战。聚合物网络的自发相分离产生微观不均匀性, 而使用数字光处理 (DLP) 的可聚合离子液体的选择性聚合产生宏观不均匀性。多尺度的异质性赋予了 HPNs 优异的力学性能和多样的功能。该策略提供了独特的优势, 包括坚韧和耐疲劳的材料性能、简单快速的制造工艺、异质相之间的完美界面, 以及合成后 HPN 的结构和性能的重新设计, 这些在以前的 HPN 中尚未实现。该策略能够设计各种新型 HPN, 如抗疲劳软复合材料、断裂二极管和各向异性离子导体, 并实现新的应用, 包括原位抗裂纹能力增强、可拉伸电子器件的应变隔离、3D 编程几何结构和图案化电致发光。

D13-O93

超分子手性纳米纤维对细胞行为的调控及其机理的研究

邢超、窦晓秋、冯传良*

上海交通大学

超分子手性 (例如 DNA 中的双螺旋、蛋白质中的 α -螺旋和 β -折叠) 源于分子层级的非对称空间堆叠, 其参与了许多关键的生物过程。例如, DNA 的右手螺旋结构在基因表达和复制中起着重要作用。此外, 蛋白质的构象紊乱或错误折叠可能会破坏体内细胞和组织的功能, 并增加某些疾病的患病风险, 比如朊病毒、阿尔兹海默症、克罗茨费尔特-雅各布病和帕金森病。受到这些高度复杂的超分子手性结构及其相应的生物事件的启发, 构建可调控手性的仿生超分子组装体是化学、材料科学和生物学面临的挑战以及潜在研究方向。然而, 关于超分子手性及其潜在的生物功能研究仍有以下几个问题亟待探索: 1. 揭示超分子手性材料调控细胞行为的深层机制、探究超分子手性材料与细胞之间的相互作用仍然是一个空白。2. 在超分子手性材料的制备中, 构建仅有超分子手性单变量的超分子组装体仍然是一个难点。因为超分子手性对映体的制备往往会伴随着分子的改变, 从而为体系引入了多变量。

基于此, 手性记忆的方法构建了两基于非手性香豆素衍生物 (PyC) 的手性纳米纤维, 该纳米纤维排除了分子手性的影响, 仅具有超分子手性的单一变量。这些纳米结构的手性受到(s/r)-(-)-1,1,2-三苯乙醇-1,2-二醇 (s/r-TD) 手性诱导剂的诱导, 并且其结构手性在用乙醇洗涤去除 s/r-TD 后仍然得以保持。值得注意的是, 右旋 PyC-r 纳米纤维通过手性构象匹配展现了与 Girdin 膜蛋白 (一种参与细胞存活的 F-actin

结合蛋白) 的增强立体选择性相互作用。这种增强的立体选择性相互可以使得 Akt 磷酸化并且进一步激活与自噬相关的 Akt/mTOR 通路, 最终激活了细胞的促生存自噬, 从而显著减轻细胞缺氧损伤。此外, 通过自噬相关蛋白 LC3-II 上调和 p62 的降低所示, 这种细胞外策略成功避免了材料对自噬通量的破坏。体外实验证明, 右旋 PyC-r 纳米纤维激活的细胞自噬可以减轻 H9C2 心肌细胞在缺氧环境的损伤。最后, 构建了小鼠心肌缺血模型, 原位注射右手手性 PyC-r 纳米纤维成功减轻了大鼠心肌缺血模型中瘢痕形成和功能恶化。

D13-O94

基于霍夫迈斯特效应的超韧、不溶胀两性离子水凝胶传感器用于海洋动物的运动监测

任家渊、付俊*

中山大学

应用于水生环境的水凝胶电子设备受到了人们的广泛关注。然而, 由于水凝胶在水环境中的溶胀, 开发水下电子设备的挑战尚未被完全克服。在本工作中, 一种由大量的结晶域交联的两性离子双网络水凝胶 (PVA/PSBMA- H_2SO_4) 形成了具有纳米孔道的致密结构, 因而表现出非凡的不溶胀性能。硫酸 (H_2SO_4) 和聚两性离子 (PSBMA) 的协同增强源于霍夫迈斯特效应诱导的结晶域和双网络结构的物理缠结。所得的水凝胶表现出高达 4.61 MJ/3 的韧性 (固含量为 23.5%) 和完全不溶胀性 (平衡溶胀率低于 0%), 且无论在纯水还是海水中浸泡长达一个月后性能都几乎没有损失 (保留率超过 95%)。基于此, 我们进一步开发了水凝胶水下应变传感器用于潜在的海洋动物运动监测。尽管受到水流影响和离子、小分子扩散的干扰, 水下运动的实时信号仍然可以被水凝胶传感器有效采集。本研究提供了一种简便的方法来设计超韧和不溶胀的水凝胶, 并进一步扩大了水凝胶水下电子设备的应用。

D13-O95

环境友好抗低温纤维素水凝胶传感器和电解质

祝家鼎、刘聪、马杰、赵城、崔佩鑫、窦黎阳、陶雪钰*

中国矿业大学材料与物理学院

导电水凝胶因其优异的生物相容性, 可调节的弹性模量等特性在柔性电子器件领域极具潜力。尽管如此, 但其应用仍受环境友好和环境适应性限制。因此, 本文针对如何提高导电水凝胶的环境适应性开展研究, 并探究了其在柔性应变传感器、超级电容器以及人机交互方面的应用。本研究以羧甲基纤维素钠 (CMC) 和聚乙烯醇 (PVA) 为凝胶骨架, 溴化锂 (LiBr) 和六水合氯化钴 ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 为导电介质, 构筑集柔韧性、抗冻保湿性和可回收的 PVA/CMC/ $\text{CoCl}_2/\text{LiBr}$ (PCCL) 多功能导电水凝胶。实验结果表明, 室温下 PCCL-0.6 离子电导率达到 53.2 mS/cm, 韧性为 1.57 MJ m⁻³。冻结温度低至 -33.1 °C, 于开放环境放置 14 天后重量保持率为 61.3%。将水凝胶再回收重塑四次后电导率达 86.8%。PCCL 基传感器灵敏因子可达 1.87, 响应时间为 0.4 s, 可用于监测人体活动。将苯胺原位聚合 PCCL 水凝胶基电解质组装成一体化超级电容器, 在 0.2 mA cm⁻² 电流密度下器件面积比电容达到 136.2 mF/cm², 5000 次充放电循环后电容保持 83.2%。这项工作表明该水凝胶在人机界面、人体活动监测和柔性储能等各种可穿戴电子产品中具有良好的应用潜力。

D13-O96

面向中枢神经光遗传闭环调控的多功能集成化水凝胶光电器件的开发与制备

陈兴梅*

南方科技大学

光遗传学和电生理记录的结合实现了神经接口和神经回路之间高精度的双向交互。集成化光电器件的植入, 实现将光导入脑内, 精准调控神经元活动, 同时通过记录神经元在光调控下的电信号变化作为

反馈。然而，目前大多数集成的神经器件多由硬质材料（石英和金属）制备，长期植入过程中，由于力学性能失配导致的组织损伤、异物反应、神经胶质瘢痕形成等问题，会严重影响器件功能。为了解决这些问题，新型水凝胶基生物电子界面为植入式器件构建了模量匹配的电气、力学、光学交互接口，为疾病诊断和治疗提供了强有力的技术支持。因此，本项目旨在基于水凝胶材料开发组织力学适配的全水凝胶光电器件，其具有高性能的导光、导电特性，能够实现长期植入过程中精确的光遗传学调控和同步的电生理信号记录，从而为神经回路解析和疾病治疗提供一种新型的可靠工具。

为了实现水凝胶的光、电性能集成化，我们提出多功能层集成制备策略。该水凝胶光电器件包括三个功能层：水凝胶导光层、导电水凝胶涂层和绝缘保护层。其中，导光层利用聚甲基丙烯酸羟乙酯（PHEMA）水凝胶光纤芯层和 PFA 壳层的折射率梯度，实现光在 PHEMA 水凝胶中的全反射传播（光损 $< 0.5 \text{ dB/cm}$, 473 nm ）；导电层采用在 PVA 水凝胶中掺杂 PEDOT:PSS 组分实现合适的电生理记录阻抗（ $80 - 100 \text{ k}\Omega$, 1 kHz ）；柔性聚氨酯水凝胶涂层具有电学绝缘和高生物惰性，确保了电生理信号记录位点的精确性。基于上述性能优势，该水凝胶光电集成器件已成功应用于癫痫疾病的电生理信号监测和光遗传干预，并且在长期植入（2 个月）对小鼠焦虑行为学的光遗传学调控研究中表现出稳定的性能。因此，我们设计开发的新型水凝胶光电集成器件具有高效光递送、电生理记录和优异的组织力学适配性，有望替代传统光电极未来需要长实验时间窗口（ > 6 个月）的神经生物学的研究提供机会。

D13-O97

3D 打印仿生软骨应用于骨软骨缺损修复研究

曾华晶、范增杰*

兰州大学

软骨组织工程仍然面临诸多挑战，如何实现结构仿生学，快速的个性化定制和原位再生等方面。为了解决这些挑战，我们制定了具有结构仿生和功能性的软骨支架策略，目的是解决限制科学研究向临床应用转变的三个关键问题，即结构仿生学、体内干细胞捕获和可控定向归巢。

本研究通过构筑双网络水凝胶和电子喷涂装置逐层交联的方式，制备了分层、梯度、功能化仿生软骨支架，使其具有模拟软骨的结构，并获得捕获和诱导骨髓间充质干细胞归巢的功能。通过一系列技术手段对仿生软骨支架的结构、理化性能和机械性能进行表征。通过体外细胞、体内动物实验考察仿生软骨支架的生物相容性和对干细胞原位募集的能力，体内动物实验考察仿生软骨支架的在体修复能力。

结果表明，该 3D 打印的分层、梯度、功能化仿生软骨支架具有多孔的微观结构、良好的力学性能、专一的干细胞募集性能、优异的生物相容性，体内动物实验结果表明，该仿生软骨支架可以促进软骨缺损的原位诱导再生。

D13-O98

基于坚韧的 PTPC 网络磁响应水凝胶促进大面积骨缺损再生

邹梓豪¹、杨龙^{*1,2}、叶川^{1,2}

1. 贵州医科大学

2. 贵州医科大学附属医院

目的：临界骨缺损需要更多创新的解决方案来实现有效的骨再生。水凝胶材料在承载细胞生长方面显示出很大的潜力，水凝胶支架可以模拟细胞外基质，增强骨修复所需的细胞过程。本研究在水凝胶支架中整合磁性纳米颗粒，引入并利用外部磁场刺激进一步促进成骨及成血管的可能性。

方法：在这项研究中，我们利用了光敏水凝胶 PEGNB（邻硝基苄醇化聚乙二醇）生成的氮氧自由基，和 GELMA（甲基丙烯酰化明胶）表面自由基发生反应，建立强共价键界面，生成紧密的 PTPC 网络，并在这种坚韧网络水凝胶中加入磁性纳米颗粒，通过外部磁场的磁响应激活磁颗粒，从而对细胞施加应力刺激以促进人脐带间充质干细胞成骨和成血管方向分化。我们还利用了成年 SD 大鼠的颅骨临界骨缺损模型来评估水凝胶支架的成骨成血管能力。

结果：PTPC 水凝胶结合了两种材料的优势，GELMA 提供了细胞生长爬行的粘附位点，而 PEGNB 提供了与 GELMA 发生光偶联的出色强度与韧性，为骨修复重建提供了稳定的物理支撑。体外细胞实验表明，该水凝胶在外界磁场刺激下所产生的机械应力具有促进干细胞成骨与成血管分化的作用，并且具有良好的生物相容性，体内实验表明，这种磁性水凝胶在颅骨临界骨缺损的模型中也提供了良好的骨愈合作用。

结论：本研究通过 PTPC 水凝胶支架结合磁性纳米颗粒，展示了促进成骨和成血管过程的潜力，总体而言，这种结合了优良机械性能和生物相容性的磁性 PTPC 水凝胶支架为骨再生提供了一种有希望的解决方案，在骨组织工程和再生医学领域具有潜在的应用前景。

D13-O99

多功能一体化导电水凝胶的室温构筑及其宽温应变传感应用研究

杨玉琴、许智超、庞晓雯、厉世能*

浙江农林大学

导电水凝胶具有优异的力学延展性和高导电性，因此在柔性可穿戴电子、仿生设备等领域展现出巨大的应用前景。但是，由于传统导电水凝胶较差的环境耐受性，在实际应用过程中易发生冻结、失水、断裂等影响凝胶可持续使用的损伤进而导致凝胶失去原有的性能，极大地限制了该类水凝胶在相关领域的应用与发展。本作品通过在水-山梨醇混合溶剂体系中引入木质纤维素纳米纤维，结合铁离子与木质素形成“可逆氧化还原反应”，进而诱导自由基聚合反应，室温下较短时间（~min）可制备得到了一种力学可靠、宽温适用、自愈合导电离子水凝胶（PAPS-Fe-Zn）。研究结果表明：PAPS-Fe-Zn 水凝胶不仅拥有出色且均衡的力学性能（拉伸强度：0.67MPa，断裂伸长率：1803%，断裂功：7.14 MJ·m⁻³），同时还具有良好的电学性能（电导率：1.59 S/m）。因此，该水凝胶具有优异的应变传感性能，能准确分辨不同的机械变形及进行相关人体运动监测并且展现出高灵敏度（GF：9.40）、快速响应（141 ms）、宽的检测范围（0~1465%）和信号稳定性高（200 次 200%拉伸循环）的优点。同时，多元醇的引入还能赋予 PAPS-Fe-Zn 水凝胶以宽的工作温度范围（-76.3~50 °C）；结合内部存在多种可逆物理相互作用，该水凝胶还拥有出色的自愈合性能。因此，本作品的设计与开发的力学可靠、宽温适用、自愈合导电离子水凝胶有望应用于极端环境下进行准确、稳定的人体运动检测和医疗健康检测领域，促进凝胶基材料在应变传感领域的进一步发展与应用。

D13-O100

用于力致发光和传感的复合弹性体材料设计及性能调控

杨沙沙、李洁*

中北大学

近年来柔性电子材料在智能设备和可穿戴技术中的应用成为研究热点。特别是在人机交互和健康监测领域，功能集成的复合弹性体材料的应用需求日益增长。本文开发了一种新型复合弹性体材料，不仅因其结构设计和成分优化展现出卓越的压阻传感功能，还通过引入 ZnS:Cu 纳米力致发光材料，实现了显著的可视化功能。这些特性极大地增强了材料的应用潜力，使其不仅能作为压阻应变传感器，还能通过光信号提供直观的力变化的视觉指示，这对于高级人机交互界面和智能穿戴设备尤为重要。通过调整复合弹性体中石墨粉的含量，成功调控了其灵敏度和光强度。结果表明，当石墨粉的添加量为 5% 时，这种复合弹性体材料的灵敏度达到最大（GF=13.65），展示了优异的压阻和发光双重功能。这种独特的材料可直接贴附于人体皮肤进行信号检测，有望应用于柔性可穿戴电子领域。

D13-O101

具有多刺激响应性且颜色可调控的有机水凝胶构筑及其性能研究

刘晶、李洁*、杨沙沙、刘琦

中北大学

近年来荧光水凝胶被广泛应用于信息防伪、显示照明和生物医用等领域。然而，由传统荧光填料组成的荧光水凝胶具有聚集导致猝灭和发光颜色单一等缺点。针对荧光水凝胶在信息防伪应用需求中的隐藏信息难以复刻、容易解密和快速破坏等特点，将具有可逆变色响应快、多刺激响应特性（光、pH、热）的螺吡喃和具有聚集诱导发射（AIE）特性的四苯基乙烯类衍生物通过氢键引入聚乙烯醇水凝胶中，构建了具有多刺激响应性且颜色可调控（红色-粉色）的有机水凝胶。该水凝胶具有光致发光(365 nm)、可逆光致变色 (365 nm-Vis)、pH 变色 (pH=0-4) 和热致变色 ($T=40\text{ }^{\circ}\text{C} - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) 等多刺激响应性能和颜色可调控性能，有望成为信息防伪领域内的潜在候选者。

D13-O102

用于可穿戴应变传感器的高拉伸 PEDOT: PSS 水凝胶

董艺玮、李洁*

中北大学

随着互联网时代与 5G 网络的繁荣，柔性可穿戴传感器在触觉、重量及空间感知方面的卓越性能使其广泛应用于智慧医疗，人形机器人等领域，为人机共生及未来商业化应用提供了无限可能。PEDOT: PSS 由于其优异的导电性及生物相容性已被广泛应用于可穿戴领域，但其可拉伸性能不佳，尤其是在大应变下较低的灵敏度系数限制其在应变传感器领域的应用。在此，我们设计了一种高拉伸的 PEDOT:PSS 导电水凝胶，以 PEDOT:PSS 与钠离子构筑导电通路，丙烯酰胺与 2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸共聚作为高拉伸基体，利用一锅法制得 PEDOT: PSS 水凝胶。混合导电机制赋予了凝胶良好的导电性能，电导率高达 0.5S/m，最高应变可达 4002%，大应变 (3000%-4000%) 下具有优异的灵敏度和线性度 ($GF=1.83$, $R^2=0.99$)。所得 PEDOT: PSS 水凝胶对不同动静态力表现出良好的响应性。该研究为 PEDOT:PSS 水凝胶在柔性可穿戴应变传感器的应用提供了新的思路。

D13-O103

从 3D 到 4D: 光响应凝胶的 3D 打印与变形

曾嘉欣、郑志煜、廖立琼*

南方医科大学生物医学工程学院

研究目的：四维(4D)打印技术是采用 3D 打印的方法创建可以响应外部刺激而变形的动态结构，具有精度高、产物结构可设计的优点。通过引入光热剂构筑光响应软驱动器的方法已经得到广泛应用，但所使用的光热剂存在制备方法复杂、生物相容性差等不足之处。本文采用一种来源于天然生物的光热响应墨水，采用 3D 打印方法构筑了具有可控变形行为的光响应凝胶驱动器。

研究方法：以京尼平交联的甲基丙烯酸化明胶 (GelMA) 为光热响应墨水，考察了京尼平含量、温度对墨水流变性能和打印性能的影响。采用 3D 打印方法构筑了光响应水凝胶，并测试了其在 808 nm 近红外光照射下的光热性能。采用 CCK-8 法和活死染色法评估了墨水和凝胶的生物相容性。利用 3D 打印技术制备了具有不同结构的水凝胶，系统考察了打印参数对水凝胶变形行为的影响规律。

研究结果：光热响应墨水的储能模量 (G') 高于损耗模量(G'')，表现出剪切变稀行为。水凝胶表现出良好的光热性能，在 1.5W/cm² 的 808 nm 近红外激光照射下，可在 180 s 内由 25 $^{\circ}\text{C}$ 升至 70 $^{\circ}\text{C}$ 左右，并且在经过 5 个光“开关”循环后还能保持良好的光热转化能力。CCK-8 法和活死染色法验证了墨水和凝胶具有良好的细胞相容性。采用 3D 打印技术，可以得到“十字形”、“花瓣形”和“蝴蝶形”等不同形貌的水凝胶，实现了物品抓取、花朵闭合和蝴蝶振翅等仿生驱动行为。

研究结论：京尼平交联明胶网络可以作为一种具有良好生物相容性的光热响应墨水，采用 3D 打印技术来构筑具有光响应性能的水凝胶，通过调控打印参数可对不同结构凝胶的仿生驱动行为进行预编程调控。

D13-O104

PEDOT:PSS 水凝胶基导电生物粘附界面的设计及肌电信号监测

万荣泰、卢宝阳*

江西科技师范大学柔性电子创新研究院

PEDOT:PSS 水凝胶基导电生物粘附界面 (EBI) 因其电子离子双导电性、稳定的电化学稳定性、良好的生物相容性已在生物医疗设备、可穿戴设备和表皮电子设备等多个领域受到广泛关注。然而, 开发同时兼具优异电学、电化学、力学、生物相容的高性能 PEDOT:PSS 水凝胶基 EBI 仍然面临巨大挑战 (如粘附力弱、缺乏自愈合性能、可加工性差等)。基于前期对 PEDOT:PSS 水凝胶在生物电子领域的应用研究基础^[1,2], 最近的工作中, 我们以动态共价相互作用/非共价相互作用设计了两种强粘附、自愈合的 EBI^[3,4], 成功制备了两种流变性能可调的导电生物粘附墨水^[5,6]并结合 3D 打印技术进一步集成表皮电极应用于肌电信号监测中。具体内容及结果简述如下:

(1) 针对现有 EBI 电学、电化学、粘附、自愈合不兼容的问题, 将动态共价硼酸酯键引入到 PVA 凝胶体系中, 并共混导电颗粒 PEDOT:PSS, 制备了一种兼具良好电学、粘附 (190 kPa)、自愈合 (98.23% 自愈合率) 的 EBI^[3]。

(2) 现有 EBI 大多是一次性使用产品, 难以兼顾可重复使用和自愈合特性。为解决这一挑战, 动态非共价相互作用增强剂 PDA 和导电聚合物 PEDOT:PSS 引入到粘附水凝胶基质 PAM 中, 开发出一种强粘附 (46 kPa), 可重复使用 (大于 200 次)、可自愈合 (94.11%自愈合率) 以及生物相容性良好的 EBI^[4]。

(3) 当前 EBI 加工技术主要有光刻、丝网印刷、模具注模等, 定制化设计困难。因此, 这个工作系统研究了 PEDOT:PSS-PVA-PSBMA 导电墨水的可 3D 打印性, 并打印了兼顾良好电学、粘附、生物相容的 EBI 应用于 EMG 信号监测中^[5]。

(4) 多组分可 3D 打印墨水配置繁琐, 流变学性能调控难。为了简化墨水的配置和性能的优化, 直接将液体胶水 (PVA) 引入到 PEDOT:PSS 分散液中, 制备了一种流变学可调的导电生物粘附墨水, 并打印了高保真度、高纵横比的电极结构用于往复运动过程的 EMG 信号监测^[6]。

这些工作可能推动生物电子接口的进一步发展, 并为医疗保健监测和表皮生物电子等提供一些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[#], Wan R[#], 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] Yu J[#], Wan R[#], Lu B*, et al., Small, 2024, 20: 2308778.
- [6] Wan R[#], Liu S[#], Xu J*, et al., J. Colloid Interface Sci., 2024 (10.1016/j.jcis.2024.05.171).

D13-O105

太阳能驱动粘土矿物基水凝胶高效界面蒸发及废水重金属离子吸附

李政¹、卢宝阳*²

1. 东华理工大学

2. 江西科技师范大学

水资源与环境工程学院, 东华理工大学, 江西南昌, 330013

柔性电子江西省重点实验室, 江西科技师范大学, 江西南昌, 330013

Email: lzlz110808@163.com, luby@jxstnu.edu.cn

太阳能驱动界面蒸发净水技术在解决水资源短缺问题上具有广阔的应用前景。然而, 在太阳能界面蒸发过程中高效去除重金属离子仍然面临问题。基于前期研究基础^[1-3], 开发了一种具有高效界面蒸发性能和光热增强重金属离子吸附的水凝胶蒸发器, 探索了其在不同环境条件下的蒸发速率和吸附性能。阐述如下:

研究选用聚丙烯酰胺 (PAAM), 碳纳米管 (CNTs) 和高岭土粉末 (Kaolin) 为主要原料, 通过复合工程策略和化学交联法, 制备出具备高效蒸发、离子吸附性能的多孔水凝胶太阳能蒸发器 (PCK), 蒸发速率高达 $3.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 蒸发效率达 88.7%。粘性土矿物因其较大的比表面积和表面的负电荷赋予了水凝胶良好的重金属离子吸附性能, 当 Cr^{6+} 初始浓度为 100 mg L^{-1} 时, 吸附容量高达 265.37 mg g^{-1} 。此外, 蒸发器在光热驱动下可稳定提高蒸发界面温度及局部重金属离子浓度, 有效提升了 Cr^{6+} 、 Pb^{2+} 、 Ni^{2+} 等重金属离子的吸附性能。

界面蒸发技术与多孔吸附策略的合理耦合及其相互作用机理的探索, 对提高废水处理效率、降低挥发性污染物浓度、处理高浓度废水具有重要意义。因此, 对于同样具有废水处理潜力的太阳能驱动界面蒸发法, 多孔吸附策略的耦合可能会带来新的突破和进展。

[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-O106

一体化 3D 打印可拉伸导电聚合物水凝胶表面肌电电极阵列

曹杰、卢宝阳*

江西科技师范大学

表面电极阵列可记录更全面的肌肉活动信息, 在人体健康监测、刺激系统和人机界面等领域具有广阔的应用前景。然而, 目前表面电极阵列主要依赖于刚性或弹性封装材料和金属的刚性薄膜作为电极材料, 并且其加工方式受限于复杂的制造过程以及可定制化差。因此, 高性能电极材料研发及定制化设计与制备表面电极阵列是制约人机交互领域快速发展的关键挑战之一。为解决这一挑战, 我们设计了一种水凝胶基可拉伸表面电极阵列, 以聚 (3,4-乙撑二氧噻吩): 聚苯乙烯磺酸盐 (PEDOT:PSS) 基导电聚合物水凝胶取代了传统的硬质电极材料, 粘附性聚乙烯醇-单宁酸 (PVA-TA) 作为电极封装层以提高电极的贴肤性。此外, 我们还构建了一体化 3D 打印技术, 成功实现了水凝胶基表面电极阵列多材料之间的无缝界面集成及其连续定制化集成制造。与现有的电极阵列相比, PEDOT:PSS-PVA 电极阵列具有优异的拉伸性 ($> 500\%$)、电化学稳定性 (循环 10000 圈后, CIC 数值减少 $< 0.7\%$) 和高信噪比。这些优异的性能使制备的表面肌电电极阵列能够精确记录不同变形下肌电信号的变化。所设计的水凝胶基表面电极不仅解决了目前电极材料与人体组织匹配性差的挑战, 还为定制、连续化制备高性能表面电极阵列的制造提供了一个前景广阔的平台, 有望被广泛的应用于柔性电子、可穿戴设备和生物电子等领域。

D13-O107

多材料一体化 3D 打印柔性电致变色器件

宋蔓婷、罗晓玉、刘西梅*

江西科技师范大学

多材料一体化 3D 打印柔性电致变色器件

宋蔓婷, 罗晓玉, 刘西梅*

江西科技师范大学, 柔性电子江西省重点实验室, 江西南昌, 330013

Email: songmanting2022@163.com; liuxm@jxstnu.edu.cn

电致变色技术由于其能够在外加电压下提供且快速的可逆颜色变化, 在显示器、可穿戴电子设备、生物医学监测、军事伪装、人机交互和电子皮肤、智能窗等各个领域获得了广泛关注。随着柔性电子产品的快速发展和需求的不断增加, 低功耗柔性电致变色器件 (FECD) 在实际应用中具有广阔的前景[1]。然而, 图案化 FECDs 的制造过程仍然复杂、昂贵且难以定制。基于课题组前期对一体化 3D 打印技术和柔性电致变色器件的研究基础[2,3], 本工作开发了一种多材料直接写入 3D 打印技术来打造集成化 FECDs, 设计并

研制新型的紫精/聚乙烯醇 (PVA) 水凝胶墨水, 并系统评估各类墨水的可打印性能, 我们实现了多材料打印的无缝界面集成, 从而极大地简化了图案化 FECDs 的制造流程, 并赋予其连续生产的能力。最后, 经过 3D 打印技术制备的 FECDs 展现出了令人瞩目的电致变色和机械性能, 包括高光学对比度 (360 nm 时最大达到 54%)、卓越的循环稳定 (10000s 后电活性减少小于 5%) 和优异的机械稳定性 (5000s 弯曲循环后光学对比度下降小于 19%)。我们进一步证明了这种基于水凝胶的 3D 打印 FECDs 在可穿戴电子设备、防伪和智能窗户等领域的潜在应用。

参考文献

- [1] Manjakkal L, Pereira L, Barimah E, et al. Multifunctional flexible and stretchable electrochromic energy storage devices[J]. Progress in Materials Science, 2024, 142, 101244.
- [2] Yuk H, Lu B, Lin S, et al. 3D printing of conducting polymers[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 1604.
- [3] Wu Z, Zhao Q, Luo X, et al. Low-cost fabrication of high-performance fluorinated polythiophene-based Vis-NIR electrochromic devices toward deformable display and camouflage[J]. Chemistry of Materials, 2022, 34, 9923.

D13-O108

多功能集成天然灭火水凝胶材料的设计制备及应用

李贵能¹、卢宝阳¹、徐景坤^{*2}

1. 江西科技师范大学
2. 东华理工大学

天然高分子水凝胶具有高含水性、优良的成膜性、高效隔热性及可降解性等特点, 在开发清洁高效灭火材料和产品方面具有巨大的突破潜力。近年来, 水凝胶灭火材料及其产品的设计和开发引起了人们的广泛关注。然而, 目前天然灭火水凝胶材料却存在灭火功能单一、灭火性能不足、实用性差的问题。

基于以上问题, 本工作利用自用基共聚、离子交联策略制备了高分子双网络水凝胶, 结合超声波与表面活性剂发泡技术实现吸水率高达 1000 倍, 密度低至 0.42 g/cm³ 的水凝胶泡沫灭火剂。所制备的高分子双网络水凝胶灭火剂具有高效灭火、可降解、吸水隔热、强力黏附等优势。按照水基灭火剂国家标准进行测试, 28 s 内成功扑灭 1 A 木垛火, 55 B 的液体火灾仅用时 25 s, 且未出现复燃现象。展望未来, 多功能天然灭火水凝胶应用前景广阔, 即将迎来令人兴奋的机遇, 水凝胶隔热灭火装备及多功能集成全自动水凝胶灭火系统将有待开发。

参考文献:

- [1] Yuk, H.; Lu, B.; Zhao, X. Hydrogel Bioelectronics. Chem Soc Rev 2019, 48, 1642–1667.
- [2] You, J.; Xue, Z.; He, Z.; Yan, Y.; Zhang, Z. Hydrogel Use in Burn Therapy, Thermal Management, Wastewater Treatment and Fire Fighting: A Review. Environ Chem Lett 2023, 21, 3273–3328.
- [3] Chen, X.; Fan, A.; Yuan, B.; Sun, Y.; Zhang, Y.; Niu, Y. Renewable Biomass Gel Reinforced Core-Shell Dry Water Material as Novel Fire Extinguishing Agent. J Loss Prev Process Ind 2019, 59, 14–22

D13-O109

钛氧化物光热转换水凝胶设计及其高效太阳能水净化

徐新叶、傅安妮、袁书通、卢宝阳*

江西科技师范大学

太阳能驱动的界面蒸发是解决水资源短缺和污染的环保、低成本技术, 高性能光热转换材料的合理设计一直是阻碍其实际应用的关键挑战。基于在 PEDOT:PSS 共轭聚合物水凝胶太阳能水净化领域的研究基础[1,2], 本工作以钛氧化物为核心材料, 利用其可灵活调整的化学和物理特性和出色的稳定性, 通过分子/相多尺度结构工程、表面改性等策略, 成功设计了系列新型水凝胶光热转换材料, 开展了系统深入的太阳

能驱动水净化研究。具体内容及结果简述如下:

(1) 针对无机半导体蒸发器光响应范围窄、蒸发速率低,导致其实用性能不足的问题,提出了一种分子/相双锁定策略,将 Magnéli 相 (Ti_4O_7 纳米颗粒)与聚乙烯醇 (PVA) 化学-物理双交联,获得了均质的 Ti_4O_7 -PVA 纳米复合水凝胶 (TPNHs),实现高效的太阳能蒸汽产生。所制备的纳米复合水凝胶带隙窄 (0.81 eV),能够高效吸收紫外-可见-近红外全光谱波长的阳光 (高达 99.56%),并在一个太阳辐照下实现 $4.45 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 的超高蒸发速率和出色的能量效率 (90.69%)。在真实海水中 20 天连续测试表明,TPNHs 具有出色的长期性能稳定性,且同时具有良好的抗盐聚集作用,可同时应用于不同盐度、强酸/碱、重金属离子和有机染料的海水和污水样本的高效脱盐/净化。

(2) 针对现有的光热材料长期稳定性不足,以及功能单一导致无法降解本体废水中残余/富集污染物的问题,提出了一种表面功能化-双交联策略,开发了一种新型、经济高效的光热-光催化 $\text{TiO}_2@\text{C}/\text{PAM}/\text{SA}$ 双功能水凝胶太阳能蒸发器协同高效污水处理和清洁水产生。该策略包括通过多巴胺改性-热处理使 TiO_2 纳米颗粒表面功能化,形成核壳结构的双功能 $\text{TiO}_2@\text{C}$ 纳米颗粒,然后与聚丙烯酰胺/海藻酸钠 (PAM/SA) 混合,采用共价离子交联实现稳定的微孔双网水凝胶。该水凝胶表现出出色的太阳光吸收率 (99.87%)、高蒸发速率 ($2.97 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 和优异的光热效率 (92.13%),以及对高浓度亚甲基蓝的高光降解效率 (84.37%)。同时,采用这种水凝胶制备的蒸发器在 40 天连续监测中能够保持稳定出色的蒸发性能和脱盐能力 (99.99%)。

本工作成功开发了系列新型光热转换水凝胶新材料,显著提升了钛氧化物光热转换水凝胶的光热转换及水蒸发性能,同时实现了光热转换-光催化双功能的协同,为高性能光热转化材料设计及太阳能界面水蒸发提供了一定的理论指导与材料基础。

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

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

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

D13-O110

通过 $\text{TA}@\text{Mg}^{2+}$ 增强的功能生物粘附水凝胶

孔瑶函、罗发亮*

宁夏大学

水凝胶是一种具有交联聚合物网络结构,能在网络中储存大量水而不溶解的典型湿软材料[1],因其能与组织产生物理或化学相互作用而被广泛用于生物粘附材料的设计。然而,大多数粘附水凝胶由于材料本身机械强度较低或与生物组织之间的相互作用不足而导致材料的粘附强度较低[2]。此外,此类水凝胶功能单一,生物相容性低、导电性差而限制了其进一步的应用。

海洋贻贝可通过分泌粘附蛋白而牢固地附着在不同材料的表面,其原因是粘附蛋白中的儿茶酚结构可与多种分子、离子之间形成非共价或共价相互作用以建立对材料的粘附[3]。具有儿茶酚结构的多酚类物质可协同贻贝粘附机制赋予水凝胶良好的粘附性能。另外,多酚类物质对人体无毒无害,有进一步应用于生物粘附材料的潜力。然而,儿茶酚结构对自由基的清除作用会导致水凝胶难以聚合甚至无法聚合。在本研究中,通过浸泡法引入单宁酸作为一种小分子交联剂连接丙烯酸胺-丙烯酸共聚物与海藻酸钠组成的双网络水凝胶,进一步引入 Mg^{2+} 与其组成多酚-金属离子配合物来增强水凝胶的力学性能。 $\text{TA}@\text{Mg}^{2+}$ 配合物引入使得其力学强度和韧性均有提升,提升后的最大拉伸强度达到 82.17kPa,较未引入前提升了约 137.4%;提升后断裂伸长率在 370%~573%之间,与人体皮肤的断裂伸长率相当 (360%);最高韧性为 254.76KJ/m³,提升了约 179.6%;另外,其在多种材料上均能粘附,引入 $\text{TA}@\text{Mg}^{2+}$ 后水凝胶的最大粘附强度可达 96.31kPa,高于前人基于 PAM/SA/TA 体系所做的工作 (14kPa)。由于网络中离子配位的交联作用,该水凝胶具有基于 Mg^{2+} 的离子导电性能,经应变传感及手指弯曲测试表明其可以有效的监测人体运动。最后,细胞活性测试表明其具有良好的细胞相容性。该工作制备的水凝胶可用作皮肤穿戴的柔性运动传感器。

参考文献:

[1] Panchami P ,Prachi T .Hydrogels differentiated by length scales: A review of biopolymer-based hydrogel preparation methods, characterization techniques, and targeted applications[J].European Polymer

Journal,2022,163.

[2] Wei J ,Fushan H ,Yong G , et al.Local bone metabolism balance regulation via double-adhesive hydrogel for fixing orthopedic implants[J].Bioactive Materials,2022,12169-184.

[3] Y. Chao, H. Gao, X. Zhu, H. Wang, Z. Yang, W. Zhou, Y. Li, H. Chen, Y. Yang, Y. Hu. Industrial Crops and Products 2022, 187.

D13-O111

基于光固化 3D 打印技术构建柔性抗冻导电水凝胶及其性能研究

严素娟、钟畅、谭素菲、周武艺*

华南农业大学

针对水凝胶在低温下会被冻结和缺乏自愈合性能的问题，本工作采用水/二甲基亚砜作为二元溶剂，通过引入有机溶剂，利用有机溶剂与水分子的相互作用来降低水凝胶的冰点，从而防止水凝胶结冰，拓展了水凝胶柔性传感器在低温环境下的使用。以丙烯酸、丙烯酰吗啉、明胶作为水凝胶的基体材料，氯化铝为交联剂，极少量离子液体作为导电材料，制备了一种物理、化学双重交联的光固化 3D 打印导电水凝胶。光固化打印成型的导电水凝胶具有良好的机械性能、热稳定性能、导电性、自愈合、抗冻保湿和应变感应等性能。此外，该水凝胶用作柔性应变传感器时具有结构可定制性、高拉伸性、高灵敏度、宽广的传感范围、快速的响应时间和出色的抗疲劳性能等诸多优点，有望扩展导电水凝胶在定制可穿戴柔性电子设备领域的应用范围。

D13-O112

光热抗菌协同自供电电刺激的酪蛋白基导电水凝胶智能伤口敷料

徐小雨^{1,2}，徐群娜^{1,2*}，马建中^{1,2*}

1.陕西科技大学轻工科学与工程学院

2. 轻化工程国家级实验教学示范中心

摘要：电活性水凝胶作为智能敷料被认为是一种高效加速和监测慢性伤口愈合的有效途径，且已被初步应用于临床实践。在这项研究中，通过在酪蛋白/多壁碳纳米管@聚多巴胺/聚丙烯酰胺（CA/MWCNT@PDA/PAM）水凝胶上原位生长 2-甲基咪唑锌 MOF（ZIF-8），制备 CA/MWCNT@PDA/PAM/ZIF-8 水凝胶单电极摩擦电纳米发电机（TENG）皮肤贴片。该设计中，CA 在提高体系的生物相容性、粘附性以及作为能量耗散点方面发挥作用，MWCNT@PDA 作为纳米增强填料、导电填料和光热转换剂。此外，近红外（NIR）诱导加热可以控制 ZIF-8 解体释放 Zn²⁺ 的速度，因此该水凝胶能实现长效光热化学治疗协同杀菌作用。同时，TENG 的设计可以收集生物物理能量，在受损组织周围产生电场，并利用 NIR 光热效应来促进伤口愈合。利用该水凝胶 TENG 皮肤贴片在体外加速细胞增殖和伤口愈合并在体内进行了实验，验证了其在慢性伤口治疗中的有效性。截止到目前为止，结合抗菌剂光热控释和自供电治疗慢性伤口的研究鲜见报道。本研究所开发的电活性水凝胶将为在慢性伤口治疗中使用自供电可穿戴电子设备提供新的途径。

关键词：酪蛋白，电活性水凝胶，光热抗菌，自供电，慢性伤口愈合

墙报

D13-P01

高韧性、抗疲劳和低滞后的层次交联水凝胶材料及其在应变传感器中的应用

徐畅¹、关世强²、庄熙晶^{*1}、董旭峰^{1,2}

1. 大连理工大学附属中心医院

2. 大连理工大学

导电水凝胶作为一类具有刺激响应性的智能软材料，具有可供离子传输的独特三维网络结构，可调的力学性能以及良好的生物相容性，是可穿戴传感器的理想候选材料。然而现有的导电水凝胶材料力学性能较差，限制了其在可穿戴传感器的实际应用。尽管双网络水凝胶结构可以显著提高水凝胶的力学性能，却依旧存在高滞后和耐疲劳性能差的问题。基于此，本研究将 Zn^{2+} 和透明质酸 (HA) 引入聚丙烯酰胺 (PAM) 网络，构建具有层交联结构的水凝胶网络。该水凝胶材料具有超大应变 (应变可达 3040%) 和高韧性 (超过 $3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)，以及低滞后和抗疲劳的优异性能。同时，该水凝胶材料具有足够的黏附性能可以黏附在人体皮肤上而不引起过敏反应。在用作应变传感器时，该水凝胶材料可以监测微小的应变 (1%) 和超大应变 (1000%)，在经历 500 次循环应变后依然具有稳定的信号。此外，该水凝胶应变传感器可以稳定监测人体运动，例如喉咙，手臂和腿部的运动变化，具有良好的应用前景。

D13-P02

医用导管水凝胶涂层实现组织温度实时传感

李亦冉¹、李丹²、王嘉诚¹、叶婷婷¹、栗乾明¹、李录河¹、高睿¹、王远贞¹、任俊烨¹、李方琰¹、卢江¹、何儿¹、焦一丁¹、王列¹、张晔*¹

1. 南京大学

2. 南京中医药大学

医用外科导管在医学领域被广泛使用，不仅可直接输送药物至特定组织，也可引流手术部位积液以防炎症物质累积。然而，与局部温度升高相关的感染常发生在导管-组织界面，导致不可逆的病理损伤、认知行为异常，甚至增加死亡风险。植入部位感染初期显著特征是原位温度升高，而临床诊断常使用体温或核心温度，具有滞后性及 $2\sim 4^\circ\text{C}$ 的误差。为解决这些问题，我们设计构建了一种实时温度感应的水凝胶涂层，原位涂覆在医用外科导管表面，可监测颅脑、腹腔和尿道等各植入部位的感染情况。该水凝胶涂层具有 $2.90\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的高电阻温度系数，在可植入温度感应设备中处于领先地位，并且导管在分别经受插拔循环、 90° 扭转、 90° 弯曲和 10% 挤压变形 10000 个循环后，传感性能依然保持稳定。此外，水凝胶涂层与人体组织在力学性能上匹配，对比对照组、普通导管组和水凝胶涂层导管组植入颅脑的界面组织病理结果，经过苏木精和伊红(H&E)的染色分析，以及评估活化的小胶质细胞标志物(IBA-1、CD68)及星形胶质细胞标志物(GFAP)的表达水平，发现水凝胶温度感应涂层的引入降低了普通导管引发的局部炎症，改善了导管与组织的接触界面。当应用于大鼠脑部感染模型中，传感器能够第一时间准确监测到异常的局部温度信号并及时干预治疗，将个体存活率从 60% 提高至 90%，同时还有效改善了大脑发育状况。未来可在水凝胶传感涂层中扩展集成多种生物信号的监测，将对个性化预防、诊断和智能医疗导管的应用具有重要意义。

D13-P03

基于原位形成抗冻剂的有机导电水凝胶用于低温下能快速响应的可穿戴传感器件

黄鑫鑫、张秋红、贾叙东*

南京大学

近年来，用于健康监测的可穿戴设备因其在疾病早期诊断和管理中的巨大优势而备受关注。特别是基于导电水凝胶的可穿戴器件凭借导电水凝胶易于加工、机械性能可调以及导电性和生物相容性好等优势越来越受欢迎。然而，基于水凝胶的可穿戴传感器件在严寒环境中使用时也面临着一些挑战，包括响应信号延迟、佩戴舒适度降低、使用寿命缩短以及信号采集精度受损等。这主要是由于传统的导电水凝胶在零摄氏度以下会发生冻结而失去其柔韧性、导电性、粘附性和透明性等特性。因此，要使基于导电水凝胶的可穿戴设备在低温环境中稳定可靠地运行，开发耐低温的导电水凝胶至关重要。

基于此，本研究开发了一种超抗冻的导电有机水凝胶 (COH) 并将其应用于低温适应的可穿戴传感器件。受耐寒生物和超吸水材料干扰水分子氢键网络方式的启发，作者利用带电极性末端基团和乙二醇 (EG) - 水二元溶剂体之间的协同效应削弱水分子之间的氢键作用，赋予了 COH 显著的抗冻性 (-78°C)。

此外, 该 COH 还具有极好的拉伸性 ($\approx 6185\%$)、压缩性 ($\approx 90\%$)、韧性 (9.2 MJ m^{-3})、导电性 (1.3 S m^{-1})、高透明度 ($\approx 99\%$)、黏附性 ($10.2\text{--}27.8 \text{ kPa}$) 和良好的生物相容性。这种多功能的 COH 被用于应变传感器和手环式心电传感器的界面电极, 其优异的低温耐受性使得这些可穿戴传感器件即使在 -40°C 的环境中也能快速响应, 无明显的信号延迟。

D13-P04

L-丝氨酸和烯丙基功能化壳聚糖诱导含富血小板血浆的可注射、可降解、力学适应性水凝胶用于治疗宫腔粘连

吕泓奕、赵丽娟、王义*

四川师范大学

将屏障材料与药物治疗相结合是治疗宫内粘连 (IUAs) 的一种很有前途的策略。但这些材料大多是以固定的形状通过手术植入的, 与子宫的自然力学特性不一致, 导致患者适应能力差和明显的不适。本文中, 通过引入 L-丝氨酸和烯丙基官能化壳聚糖 (ACS), 设计了一种新型的可注射、可降解和力学适应性的基于甲氧基聚乙二醇丙烯酸酯 (PEGMA) 的负载富含血小板的血浆 (PRP) 的水凝胶, 以实现 IUAs 的高效、舒适和微创治疗。L-丝氨酸诱导水凝胶的快速凝胶化和强韧化, 而 ACS 引入了具有物理缠结的拓扑可重构网络, 赋予水凝胶柔软而坚韧的性质, 这种力学适应性使水凝胶能够通过注射很好地适应子宫腔, 减少患者的不适。此外, 水凝胶表现出优异的生物相容性、合适的降解时间 (30 天) 和生长因子 (GFs) 的持续释放。在大鼠 IUAs 模型中, 水凝胶通过促进胶原纤维沉积和子宫内膜细胞增殖, 从而恢复子宫的生育功能。因此, 这种可注射、可降解和力学适应性的药物-屏障材料为 IUAs 提供了一种临床可行的新治疗方法。

D13-P05

超拉伸、抗干燥、高粘附的胶束聚合物水凝胶

梁倩倩、吴迪、赵丽娟、王义*

四川师范大学

水凝胶材料具有良好的生物相容性和离子导电性, 因此在柔性传感材料领域受到广泛的关注。然而, 使用简单的一步法制备多功能水凝胶仍然面临着巨大的挑战。在这里, 我们以丙烯酰胺(AM)和二甲基硅氧烷(DMS)为原料, 制备了一种新型胶束型聚合物水凝胶。在 Tween80 的作用下, PDMS 被封装成胶束, 随后被嵌入进水凝胶网络中, 并在界面处与 PAM 形成共价结合。这种独特的网络结构和氢键相互作用, 提供了多级能量耗散机制, 使 PAM/PDMS 水凝胶表现出了优异的力学性能, 水凝胶的断裂伸长率高达 5680% , 并具有高模量 (40 kPa), 高韧性 (5.8 MJ/m^3)。值得注意的是, 高粘度 PDMS 的引入赋予了水凝胶出色的组织粘附力 (60 kPa) 和保水能力 ($W_t=60\%$, 4 天), 使其能够黏附在不同的材料上, 并具有更好的抗干燥性能。此外, 通过加入导电离子 Na^+ , PAM/PDMS 水凝胶表现出优异的电传感性能 ($\text{GF}=5.8$), 体现出高灵敏度和稳定的导电性, 能够有效识别来自不同身体关节的运动信号。因此, PAM/PDMS 水凝胶作为一种超拉伸水凝胶, 在软体机器人、电子皮肤和生物医学方面具有巨大的应用潜力。

D13-P06

Highly Sensitive, Anti-Freeze, Repairable, and Conductive Double-Network Organohydrogel for Flexible Pressure Sensors

Xinlong Liu*

Shandong University of Science and Technology

Flexible strain sensors based on double network conductive hydrogels have attracted much attention due to their great potential for human motion health and smart detection. However, the development of conductive hydrogels with high sensitivity and anti-freezing properties for a wide range of use environments is still a

challenge. Herein, a novel organohydrogel-based PVA-P-TA-MWCNTs (PPTME) double network capable of pressure and strain sensing was reported with high ambient stability, excellent anti-freezing capability, smart reparability and superior sensitivity. The multiple interactions within the PPTME organohydrogel have been substantiated through Density Functional Theory (DFT) analysis. The organohydrogel utilizing strong hydrogel bonds, crystalline microphases, and chain entanglement of PTA/PVA exhibited good mechanical properties (374%) and excellent cycling performance. Meanwhile, owing to the addition of H₂O/EG (ethylene glycol) binary solvent, this organohydrogel exhibited long-term water retention (15 days), anti-freezing properties (-61.9 °C), greatly improving the applications at low temperatures. Furthermore, the assembled pressure sensors showed ultrahigh sensitivity (1.88 kPa⁻¹) in wide detection range (0-266.2 kPa). Based on these excellent properties, a flexible organohydrogel sensor was prepared, demonstrating its enormous potential in the field of human motor behavior detection and wearable.

D13-P07

通过协同氢交联和偶极-偶极交联实现超拉伸、自恢复、缺口不敏感、自修复和粘合性水凝胶

袁婉婷、谢香艳、赵丽娟、王义*

四川师范大学

具有高拉伸性、自我恢复能力、对缺口不敏感、高效自我修复和强粘附性等综合特性的水凝胶在可穿戴电子设备、人造皮肤和生物医学工程领域的新兴应用来说是非常亟需的。然而，将这些特性整合到单一水凝胶网络中是面临巨大挑战。在此，我们提出了一种简便的策略，通过丙烯酰胺（AM）与马来酸（MA）和丙烯腈（AN）的共聚，合成一种具有超伸展性、自恢复性、缺口不敏感性、自愈合性和粘合性的水凝胶。这种方法可确保水凝胶中的聚合物链通过动态氢键和偶极-偶极相互作用均匀交联。这些键的独特之处在于其松弛时间可变且迅速，因此能够依次断裂和重整，从而使聚合物链可逆地展开和重新排列。因此，这种水凝胶具有超强的拉伸性（超过 9000%），即使在应变达到 1500% 时也能保持 100% 的恢复能力。它还具有超强的抗断裂性，韧性超过 10 kJ/m²，并具有卓越的自我修复能力。此外，整合 MA 的羧基和 AN 的氰基还能显著提高水凝胶对玻璃、金属、塑料、橡胶和组织等不同基底的粘附性。外加 LiCl 赋予水凝胶的导电性使其能够有效地用作可穿戴的应变传感器，准确地检测人体的运动。这些综合性能使这种水凝胶成为可穿戴电子设备和医疗保健监测设备尖端应用的理想材料。

D13-P08

碳化咖啡渣对水凝胶结构及力学性能的影响研究

钟琳琳*

鲁东大学

海藻酸钠基水凝胶因其无毒环保、成胶速度快、吸水溶胀等特点被广泛用于制备生物材料、柔性材料以及吸附材料等。由于海藻酸钠成型难、孔隙不规则、力学性能差等缺陷限制其发展，因此改善海藻酸钠的孔隙结构、提高海藻酸钠的力学性能、阐明凝胶的主要增强机理，对凝胶的实际应用具有重要意义。本项目以廉价碳化咖啡渣为增强体，琼脂为固形剂，制备海藻酸钠基水凝胶。实验结果揭示，碳化后的咖啡渣能够使海藻酸钠水凝胶孔隙结构致密且规则，从而增强海藻酸钠水凝胶的力学性能。然而，碳渣比例是影响凝胶孔隙结构及力学性能的关键因素。研究表明，当海藻酸钠：琼脂：碳渣为 4:2:1 时，凝胶抗压强度为 0.78 Mpa；以石墨为增强体，添加比例相同的凝胶抗压强度为 0.36 Mpa。由此可见，碳化咖啡渣为增强体的凝胶具有优异的抗压性能。本项目利用咖啡渣为碳原料，不仅变废为宝，而且大大降低碳凝胶的生产成本，未来有望将碳化咖啡渣作为凝胶增强体，生产抗压强度高且不易变型的凝胶材料。

D13-P09

十二烷基硫酸钠 (SDS)和油酸 (OA)凝胶化和润滑性能的协同效应

程新邵*¹、张若冲¹、丁奇²

1. 浙江工业大学

2. 中国科学院兰州化学物理研究所

一种新型的双组分表面活性剂凝胶剂，由十二烷基硫酸钠 (SDS) 和油酸 (OA) 设计而成，在不同极性的多种液体介质中表现出优异的凝胶能力。基于干凝胶的形态和傅里叶变换红外光谱 (FTIR)，分别讨论了 OA-SDS 在水和白油 (WO) 中的不同凝胶机制。摩擦学测试显示，OA-SDS 凝胶剂也极大地增强了 WO 的减摩和抗磨性能。流变学分析和表面表征表明，这种改进的润滑性能是基于 OA 和 SDS 的协同作用。

D13-P10

基于部分水解构筑具有均匀网络的高强韧和抗冲击水凝胶

时予、袁朝阳、徐琼筠、郑静*、吴锦荣

四川大学高分子科学与工程学院

丙烯酰胺水凝胶因其低成本而备受青睐，但其较差的机械性能严重限制了其在一些承受领域的应用。本文提出了一种简便的策略，通过部分水解聚丙烯酰胺来制备具有坚固、高能量耗散能力和高抗冲击性的物理水凝胶 (HP 水凝胶)。HP 水凝胶通过酰胺键在碱性环境下部分水解形成羧基，进一步引入 Fe^{3+} 配位，形成纯物理交联聚丙烯酰胺水凝胶。部分水解策略有效提高了配位网络的均匀性，并通过引入 Fe^{3+} 强化能量耗散机制。与传统的聚(丙烯酰胺-co-丙烯酸)水凝胶 (CP 水凝胶) 相比，HP 水凝胶具有更加优异的机械性能，其拉伸强度是 CP 水凝胶的四倍，并具有出色的抗撕裂性和抗冲击性。HP 水凝胶的拉伸强度可达 7 MPa，断裂应变为 1042%。此外，它还具有出色的抗撕裂性能，缺口状态下的断裂能为 7.5 kJ/m²，抗冲击力提高了 85.7%。这种部分水解策略有效地解决了承重领域中常见的传统聚丙烯酰胺水凝胶机械性能差的问题，具有一定的应用前景。

D13-P11

降温速率调控组装路径构筑多种超分子聚合物

林碧艳、郜来奔、冯传良*

上海交通大学

动力学路径调控的组装行为影响超分子组装材料的结构和手性特征，生命结构都是由动力学路径而非热力学稳态决定的。研究动力学路径调控手段及内在机制对设计特定结构的超分子手性材料乃至探究生命形成都具有重大意义。为了研究动力学路径调控对超分子手性的表达过程，我们选用一种天然手性药物分子喜树碱作为研究对象。通过对组装过程中降温速率的控制，调控最终超分子组装体的手性与表观形貌——随着降温速率增大，组装体形貌从平带转变为螺旋纤维，并伴随着不对称性的显著放大。结合微观形貌表征及光谱测试等实验数据分析，我们认为出现不同形貌超分子组装体是由动力学控制的组装路径决定的。该研究进一步丰富了构筑多样超分子手性聚合物的手段。

D13-P12

自发竞争性双组装路径构筑异手性超分子纳米螺旋纤维

杨凯凯、郜来奔、冯传良*

上海交通大学

生命体中的超分子手性形成于同一生理环境，但却表现出不同的存在形式，然而目前通过人工体系研究超分子组装过程，往往同一条件只能得到一种手性超分子组装体。针对此，我们从分子设计出发，通过控制组装基元分子与溶剂分子的结合作用，可使反溶剂法组装过程两条组装路径共存，最终实现由单手性分子在同一条件下自发形成左旋和右旋两种不同超分子纳米螺旋纤维。此外，实验表明两条组装路径间存

在竞争性关系，可进一步对其进行调控从而实现对超分子组装体的精准控制。该研究可能为利用组装路径控制构建复杂多样超分子组装体提供一定理论和技术支持。

D13-P13

一体化 3D 打印柔性可拉伸发光器件及软体机器人

张培、刘吉*

南方科技大学

柔性可拉伸的发光器件正在推动无数应用的创新发展，比如可穿戴电子、显示器和软体机器人[1-2]。然而，目前通过丝网印刷，纳米转印等传统技术开发柔性电致发光器件仍然存在步骤多，耗时长，且成本高等问题[3]。本文报导了一种基于墨水直写的 3D 打印新型柔性电致发光 (EL) 器件和软机器人，可实现柔性发光器件的全打印便捷制备。该工作开发了一系列可 3D 打印离子导电、多色电致发光和介电绝缘油墨，通过一体化多材料 3D 打印可制得具有高分辨率的柔性可拉伸多彩电致发光器件，且多层电致发光器件之间的强界面粘附使 3D 打印显示器件在拉伸扭曲变形下具有稳定的发光性能[4]。此外，本文将 3D 打印的发光器件与软体四足机器人及光传感单元相结合，提出了一种可以通过感知环境色变化迅速响应并及时自适应环境的人工伪装系统，为下一代智能伪装机器人的设计提供了新思路。

参考文献:

[1] Morin, S. A. et al. Camouflage and display for soft machines. *Science*, 2012, 337, 828–832.

[2] Kim, H. et al. Biomimetic chameleon soft robot with artificial crypsis and disruptive coloration skin. *Nat. Commun.*, 2021, 12, 4658.

[3] Yin, H. et al. Structures and materials in stretchable electroluminescent devices. *Adv. Mater.* 2021, 2106184.

[4] Zhang P. et al. Integrated 3D printing of flexible electroluminescent device and soft robots. *Nat. Commun.* 2022, 13(1): 1-8.

D13-P14

肿瘤靶向蟾毒灵缓释-光热/光动力 Janus 膜用于结肠癌术后治疗

虞玺、殷佩浩*

上海中医药大学附属普陀医院，中心实验室

摘要：结肠癌在全球癌症发病率中为第 3 位，其死亡率居恶性肿瘤死因的第 2 位，属于人类高发恶性肿瘤。目前手术仍是临床治疗中的首选手段，在疾病早期通常能在内镜下切除原发病灶的肿瘤组织，且具有较好的预后效果。而放疗与化疗是目前主要的肿瘤术后辅助治疗手段，针对肿瘤的复发与转移具有较好的抑制作用。但健康组织同样会因此受到影响，从而可能导致患者产生骨髓抑制、免疫力下降等不耐受症状。本文设计制备了具有蟾毒灵靶向缓释与光治疗功能的 Janus 水凝胶膜用于结肠癌术后的辅助治疗领域。Janus 膜一面黏附于残余肿瘤组织表面，另一面抵抗周围组织的附着粘连，改善预后环境；Janus 膜中包裹具有光治疗功能的载药碳点，改善蟾毒灵的生物利用度，起到减毒增效作用；蟾毒灵与光治疗的协同作用能在杀伤肿瘤细胞的同时，激活机体免疫反应，降低免疫逃逸，进一步抑制肿瘤组织的生长。

本工作选用柠檬酸与透明质酸作为原材料制备具有肿瘤靶向性的光治疗纳米碳点，通过动态光散射仪测得其粒径在 150 nm 左右。随后在其表面接枝 β -环糊精，改性后的碳点粒径增加至 200 nm 左右。该碳点可通过浓度调节，在近红外光刺激下控制升温范围 45-80°C；通过顺磁共振波谱仪在暗场和近红外光下的测试结果可知，在近红外光刺激下碳点能够产生单线态氧，起到光动力治疗作用。通过溶剂交换法可将疏水小分子药物蟾毒灵载入环糊精的疏水空腔中，通过紫外分光光度计测得最高载药率可达 50%，包封率可达 98%。蟾毒灵是提取于中药蟾酥的活性单体，不仅具有显著的肿瘤杀伤性，同时还能够调节免疫、促

进光治疗效率。随后以四臂聚乙二醇和聚硫辛酸为原料，包裹载药碳点并通过界面聚合制备一面具有组织粘附性而另一面具有抗粘附性的 Janus 膜。通过 WB 实验和文献报道可知，光热治疗会使肿瘤细胞中的热休克蛋白 (HSPs) 上升，光动力治疗促进肿瘤的乏氧状态从而提高 HIF-1 α 的表达。而 HSPs 和 HIF-1 α 的高表达会造成肿瘤细胞表面 PD-L1 的表达，因此增加免疫逃逸的风险。而蟾毒灵的加入能够有效抑制光治疗过程中 HSPs 和 HIF-1 α 表达，从而抑制 PD-L1，为光治疗后续激活免疫反应提供有利环境。体内外的细胞实验和动物实验显示，蟾毒灵和光治疗碳点的联合协同作用能够有效降低肿瘤细胞的存活率，并且显著逆转肿瘤的发育。细胞流式分析显示，蟾毒灵和光治疗的协同作用能够激活 DC 细胞成熟，提高 CD8 $^{+}$ 和 CD4 $^{+}$ 的 T 细胞与 NK 细胞比例，启动免疫反应。

综上所述，Janus 膜能够紧密贴敷于肿瘤表面并靶向释放蟾毒灵，同时在近红外光刺激下，起到光热/光动力联合治疗作用。在与蟾毒灵协同作用下，通过同时调节 HSPs 与 HIF1 α 来抑制 PD-L1 表达，促进光治疗效率，有效抑制免疫逃逸的发生，提升术后辅助治疗效果。

D13-P15

Preparation of injectable zinc-containing hydrogel with double dynamic bond and its potential application in the treatment of periodontitis

Yuhan Liu*

Qingdao Stomatological Hospital Affiliated to Qingdao University

Periodontal tissue regeneration continues to face significant clinical challenges. Periodontitis leads to alveolar bone resorption and even tooth loss due to persistent microbial infection and persistent inflammatory response. As a promising topical drug delivery system, the application of hydrogels in the controlled release of periodontal bioactive drugs has aroused great interest. Therefore, the design and preparation of an injectable hydrogel with self-repairing properties for periodontitis treatment is still in great demand. In this study, polysaccharide-based self-healing hydrogels with antimicrobial osteogenic properties were developed. Zinc ions are introduced into a dynamic cross-linking network formed by dynamic Schiff bases between carboxymethyl chitosan and oxidized hyaluronic acid via coordination bonds. The OC-Zn hydrogels exhibited good tissue adhesion, good fatigue resistance, excellent self-healing ability, low cytotoxicity, good broad-spectrum antimicrobial activity, and osteogenic activity. Therefore, the designed hydrogels allow the development of drug delivery systems as a potential treatment for periodontitis.

D13-P16

纳米纤维增强的、用于全天候运动监测的抗失水薄膜水凝胶应变传感器

朱灿杰、付俊*

中山大学

柔性水凝胶薄膜传感器作为人机界面的优势显著，能够与不规则生物组织紧密接触并减少运动伪影。然而，超薄水凝胶薄膜传感器通常具有较弱的力学性能，容易发生水分蒸发或冻结，从而不可避免地失去柔韧性和传感性能。因此，我们开发了一种高延展性和抗失水的超薄水凝胶薄膜，用作全天候运动监测的应变传感器。具有隐藏强度的静电纺 TPU (eTPU) 纳米网作为骨架，通过原位自由基聚合 AMPS 和 AAm 形成一种互穿网络的有机水凝胶。eTPU 纳米网与 P(AMPS-co-AAm) 水凝胶网络之间的广泛氢键作用，使得在拉伸超薄有机水凝胶薄膜 (约 200 μ m) 时能够协同变形和能量耗散，从而实现高达 920% 的延展性、20.14 MJ/m³ 的断裂韧性和 10000 J/m² 的断裂能。此外，该坚韧且超延展的薄膜传感器表现出卓越的应变传感性能 (最大灵敏系数 GF = 6.68，最低检测限为 0.5% 应变)，并在 4000 次 50% 应变的裂纹拉伸循环中保持性能和结构的不衰减。值得注意的是，二元甘油和水溶剂使得传感器在室温下具备 10 天的抗脱水性能，并在 -20 $^{\circ}$ C 至 60 $^{\circ}$ C 的温度范围内保持稳定的传感性能。通过透气和自粘的有机水凝胶薄膜传感器，全天候的膝关节弯曲监测得以实现，并且信号响应稳定、佩戴舒适。本研究展示了一种多功能且环境耐受性强的

水凝胶薄膜应变传感器，旨在实现全天候运动监测。

D13-P17

光子晶体乙酰胆碱酯酶凝胶传感器高效检测有机磷化合物

赵芳媛、蔡仲雨*

北京航空航天大学

有机磷类农药和有机磷神经毒剂可通过与生物体内乙酰胆碱酯酶 (AChE) 不可逆结合对人或其它生物造成伤害。因此，现场监测有机磷农药或有机磷神经毒剂，在食品安全、环境质量监测以及化学武器检测等领域均具有重要的意义。传统的有机磷化合物检测方法因不具有现场实时检测功能，且需要专业人员操作而难以满足需求。针对这一难题，我们构建了一种灵敏的二维光子晶体 (2D PC) 蛋白质凝胶生物传感器，用于检测目前农业上普遍使用的农药敌百虫和有机磷模拟物甲基磷酸二乙酯 (DMPP)。采用空气/水界面自组装法聚苯乙烯(PS)胶体微球快速制备得到 2D PC 阵列，之后将 2D PC 阵列聚合固定至乙酰胆碱酯酶/牛血清蛋白 (AChE/BSA) 复合凝胶中。乙酰胆碱酯酶 (AChE) 和牛血清蛋白的氨基均与戊二醛交联形成蛋白质凝胶，实现了 AChE 的固定化，从而构建了以 AChE 为智能识别分子的新型 2D PC 蛋白质凝胶生物传感器。所得水凝胶传感器对敌百虫的检测限 (LoD) 为 2.23 nM，对 DMPP 的检测限 (LoD) 为 0.07 nM。在水凝胶的基础上，利用溶剂交换策略制备了一种有机水凝胶传感器，以扩展凝胶传感器的应用范围。有机水凝胶传感器对敌百虫和 DMPP 的 LoD 分别为 0.70 μ M 和 4.46 μ M。该工作为开发下一代稳定、低成本和便携式场传感设备的生物传感器提供了新的曙光。

D13-P18

高强韧、抗菌的 MXene 复合导电水凝胶及其传感应用

陈龙*

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 (KMPH)。其中以硼酸交联的聚乙烯醇为第一网络，聚 N-羧基丙烯酰胺为第二网络，合成的 K-MXene 作为交联剂和导电填料，C18-SDS/NaCl 混合溶液作为溶剂使各组分更好的分散在溶液里边，同时使水凝胶获得良好的抗菌性能。制备的水凝胶具有优异的力学性能 (拉伸应变为 800 KPa，拉伸应力为 800%)、电导率 (0.78 S/m) 和抗菌性能 (~100%)。KMPH 水凝胶在保鲜膜或者 Ecoflex 的包覆两周后，保水率仍高达 95% 以上。接着，以该水凝胶构建的传感器具有高灵敏度 (GF = 4.94) 和宽传感范围 (0% ~ 320%)。同时，在 40 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-P19

基于双引发体系制备高强度纯两性离子双网络水凝胶

袁朝、周贞洲、章彦婧、黄国波、肖圣威*

台州学院

两性离子水凝胶材料因其特殊的反聚电解质效应而被广泛用于设计和开发抗污表面、可控驱动、组织工程，以及高灵敏传感等功能材料，具有重要的理论和实际应用价值，然而，传统两性离子水凝胶强度较弱，大大限制了其实际应用。构建双网络结构是改善两性离子水凝胶力学性能行之有效的方法之一，但是

往往需要加入非两性离子组分,这显著降低了凝胶中两性离子的含量,从而大大弱化了凝胶的刺激响应性。本文设计了一种双引发体系,将热引发剂(过硫酸铵)和紫外光引发剂(2-羟基-4'-(2-羟乙氧基)-2-甲基苯丙酮)同时引入反应体系中,通过顺序的热聚合和光聚合得到纯两性离子双网络水凝胶(聚3-(1-(4-乙烯基苄基)-1H-咪唑-3-鎓)丙烷-1-磺酸盐, PVBIPS)。论文详细研究了热聚合与光聚合时间对双网络结构的影响,进而影响水凝胶力学性能。研究表明,通过热聚合可形成一个柔性的两性离子网络,切换为光聚合后可再形成一个脆性的两性离子网络,优化两种聚合的时间所得纯两性离子双网络水凝胶具有优异的力学强度(拉伸强度达到 1.07 MPa)。此外,将其用于盐/温度调控的智能驱动和传感可表现出与单网络两性离子水凝胶相似的高灵敏度刺激响应特性。

D13-P20

各向异性细菌纤维素基离子导电水凝胶的设计及可穿戴柔性电子器件应用研究

胡双双、黄印谭、刘晓萱、郭浩雨、雷岚*、李辉

济南大学

离子导电水凝胶由于其良好的导电性能、可调控的机械柔韧性和延展性等特点在可穿戴柔性传感器显示出广阔的前景。然而,机械强度和导电性能是此增彼减的一对矛盾体,构建兼具优异机械强度和电导率的水凝胶仍然面临挑战。且当前水凝胶生物可降解性、环保性和抗冻性能差。因此,迫切需要开发兼具高生物相容性、机械韧性、优异导电性和抗冻等多功能集成的高性能导电水凝胶,以满足可穿戴柔性传感器的需求。本文提出定向冻融辅助盐析效应的协同策略,将细菌纤维素(BC)、聚乙烯醇(PVA)和硼砂(Borax)溶解至水中得到均匀的溶液,经定向/非定向冻融循环三次,随后浸渍于饱和 NaCl 溶液中成功合成了各向异性/各向同性细菌纤维素导电水凝胶 D-/PVA-BC-Borax/NaCl。系统调节 BC、PVA 和 Borax 的含量,各向同性水凝胶 PVA-BC-Borax/NaCl 的拉伸强度(0.6-3.2 MPa)和电导率(66.8-136.2 mS/cm)可在宽范围内调控。其中 PVA_{7.5%}-BC_{0.45%}-Borax_{0.5%}/NaCl 水凝胶兼具优异的力学性能(3.22 MPa, 295.1%)、电导率(72.6 mS/cm),此外,NaCl 的引入赋予水凝胶较好的抗冻性能(冻结温度-41 °C),且该水凝胶于-20 °C 仍呈现优异的电导率(61.7 mS/cm)。经定向冻融循环制备的 D-PVA_{7.5%}-BC_{0.45%}-Borax_{0.5%}/NaCl 断裂伸长率(609.2%)和电导率(81.4 mS/cm)显著提升。基于此水凝胶成功构建了一种用于检测人体各种运动(如手指、手腕、肘部弯曲、口腔咀嚼、行走和跑步等)的应变传感器,其对弯曲、触觉等外界信号均呈现较高的响应性,表明该水凝胶在人机交互、柔性传感和生物电子等领域的潜在应用。

D13-P21

高机械强度的抗结冰有机水凝胶

黄印谭、胡双双、胡逸凡、张若涵、范雯雯、李辉*、雷岚

济南大学

结冰给人类的生产生活造成了诸多危害,如飞机、输电线路和风电叶片上的冰冻不仅会造成经济损失且极易引发灾难性事故。凝胶材料由于其在减少冰粘附、抑制冰成核和限制冰扩展方面的巨大潜力,受到了防冰领域的重点关注。然而,在低于水冰点的温度范围内,水凝胶将由于水的冻结而失去其固有的弹性和功能,严重限制了其在苛刻温度条件下的潜在应用。本文以丙烯酰胺(AM)和甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵(MPEG)为单体,N,N-亚甲基双丙烯酰胺(MBAA)为交联剂,以水和丙酮缩甘油(ACM)为分散介质,与聚乙烯醇(PVA)共混后通过一锅法制备了一种互穿双网络有机水凝胶,MPEG 的含量显著影响凝胶的机械强度、抗冻性和抗结冰性能。综合性能较优的有机水凝胶于-20 °C 的冰剪切强度为 8 kPa,凝胶表面的冰能在重力、微风等自然力作用下自由脱落。同时该凝胶具有优异的机械性能(拉伸强度高达 0.9 MPa,断裂伸长率为 450%)。该凝胶的结冰温度为-37 °C,经过 30 次摩擦实验,凝胶表面的接触角没有发生显著的变化,也进一步表明了该凝胶表面的稳定性。该研究为制备具有实际防冰/除冰应用的凝胶材料提供了新的途径。

D13-P22

定时形状记忆高分子

倪楚君*

浙江大学医学院附属第二医院

传统变形高分子需声、光、电、热、磁等外加刺激下才得以触发工作，其使用大幅受制于外界环境。本工作系统性揭示并探究了一种基于相分离演变的形状记忆变形机理，使水凝胶材料的变形与刺激无关，完全依靠材料内在传质分子机制。在无需外界刺激下，这类水凝胶材料的链段活性随着相态演变缓慢激活，并在特定时间后自动触发变形。通过合理的编程手段，材料的定时时间可在 1-50 分钟按需任意设定。这种定时变形模式极大程度地降低了外在使用环境的影响，免除了施加刺激步骤，可在生物体内等难以施加刺激的环境中展现良好应用潜力，有望制备自动变形先进医用器件例如自展开支架、变形探针等，实现超越常规的特定功能。

D13-P23

Self-powered hydrogel-forming microneedles with integrated hypertrophic scar treatmentShan Wang^{1,2}, yangyang liu^{1,2}, huiyi wang^{1,2}, Charles Lawrie^{1,3,4,5}, lei zhang^{*1,2}, Shan Wang

1. Sino-Swiss Institute of Advanced Technology (SSIAT), Shanghai University

2. Department of Microelectronics, Shanghai University

3. Biogipuzkoa Health Research Institute

4. IKERBASQUE, Basque Foundation for Science

5. Radcliffe Department of Medicine, University of Oxford

Hypertrophic scar is a major obstacle in wound healing, mainly caused by excessive collagen deposition in the dermis and subcutaneous tissues. However, the current strategies, such as surgical excision, intralesional injection, and laser therapy, bring much physiological pain and high costs to the patients. Therefore, by offering good biocompatibility, desirable tissue adhesion, and deep dermal drug administration, hydrogel-forming microneedles are highlighted for minimally invasive treatment. In this study, self-powered hydrogel-forming microneedles were designed for an integrated therapy of drug administration and microcurrent stimulation. Therein, the needles were hydrogels formed by crosslinked silk fibroin and hyaluronic acid, and the substrate was a conductive hydrogel sandwich between the double-layer graphene. With a slow degradation, the needles enabled an efficient drug administration into the hypertrophic scar. In addition, the conductive hydrogels were fabricated with methacryloyl chitosan (CSMA), polyaniline (PANI), and poly(ethylene glycol)diacrylate (PEGDA) via photo-crosslinking, to provide an effective electron transport for the layers of reduced graphene oxide (rGO). Hence, the self-powered substrate can generate microcurrent to enhance transdermal drug penetration and promote tissue regeneration. In-vitro drug release indicated that as-prepared microneedles achieved a complete drug delivery in the dermis within 60 min. Subsequently, in the hypertrophic scar model of rabbits' ears, the self-powered microneedles exhibited deeper drug penetration and faster scar dissipation, compared to the microneedle patch without rGO coating. It was illustrated that the as-prepared self-powered hydrogel-forming microneedle was a promising candidate for synergetic hypertrophic scar treatment chemotherapy and microcurrent stimulation.

D13-P24

A self-healing interpenetrated hydrogel with high tissue adhesion and antibacterial activity for diabetic wound healingYangyang Liu^{1,2}, Shan Wang^{1,2}, Huiyi Wang^{1,2}, Charles Lawrie^{1,3,4,5}, Lei Zhang^{*1,2}

1. Sino-Swiss Institute of Advanced Technology (SSIAT), Shanghai University

2. Shanghai University

3. Biogipuzkoa Health Research Institute, San Sebastian

4. IKERBASQUE, Basque Foundation for Science

5. Radcliffe Department of Medicine, University of Oxford

Diabetic chronic wounds have raised high awareness due to their high potential to cause severe tissue infection and inflammation. However, fabricating long-term wearable dressings with accelerated wound healing and antimicrobial properties still remains a challenge. Due to their good biocompatibility, tissue adhesion, and unique structures, hydrogels are considered promising materials for combining antimicrobial effects and tissue regeneration to address chronic wounds. Herein, interpenetrated hydrogels, composed of a polydopamine-sodium alginate self-healing network, and a polyacrylamide (PAM)-polypeptide antimicrobial network, were constructed. On the one hand, based on the reversible cooperation of Schiff base, borate, and hydrogen bonds, the hydrogel dressing can self-heal resisting the pressure from the external environment, and adapt to the tissue flexibility. The broken hydrogels can recover the shape within 60 s and attach to the skin with strong adhesion but low trauma, verifying the possibility of a prolonged wearable time. On the other hand, the interpenetrated PAM-peptide network enhances the hydrogel system's mechanical properties showing an increased storage modulus but better skin adhesion. It is worth noting that the antimicrobial peptides presented desirable antibacterial ability against *E. coli* and *S. aureus*. Meanwhile, they can improve the dermal release of vascular endothelial growth factor to accelerate tissue regeneration. The discovery demonstrated that the interpenetrated self-healing hydrogels can effectively prevent the diabetic wound from external infection and second irritation, and treat the wound by releasing vascular endothelial growth factors.

D13-P25

Dab-and-heal all-soft bandages (DabHeal) by LM-hydrogel interpenetrating network for antimicrobial and bio-regenerative wound therapy

Liuyan Tang, Yuezhou Zhang*, Xichen Sun, Ningning Li

Northwestern Polytechnical University

In order to deal with complex wounds caused by diabetes, clinical practice is increasingly using transdermal biometric analysis and treatment, including drug delivery and electrical stimulation therapy. However, traditional devices for biosensing and therapeutic applications often have hard shells for liquid electrolyte storage and bulky machines for electrochemical sensing, hindering their use in dynamic and mobile scenarios. This limitation highlights the emerging need for flexible, adhesive, wireless and biocompatible electronic devices for wearable chronic wound care. Here, we have successfully developed a wearable, highly stretchable, biocompatible and electrically stable bioelectrode based on gallium indium alloy/methacrylate filament protein composite material. Through the assembly of metal-polyphenol coordination, we have realized the adhesion and patterning of liquid metal on the surface of flexible hydrogel. In addition, this low-impedance functionalized antibacterial hydrogel has high strain stability, making it suitable as a flexible electrode for biological signal transmission and physiological signal monitoring. In addition, it can also be used to develop high-performance wearable biomedical devices, such as real-time temperature signal detection electrodes, impedance test electrodes, transdermal self-powered treatment devices, etc., for transdermal biological analysis and treatment. We applied this technology to the treatment of chronic wounds, resulting in the development of a flexible, self-powered patch, DabHeal. In mice, we demonstrated that our wound care system can monitor skin impedance and temperature and deliver electrical stimulation based on the wound environment. In the preclinical wound model, the higher electrical output performance accelerated the healing of diabetic wounds by 100% compared to the control group, providing new insights and approaches for the treatment of challenging wounds. In addition, we observed

activation of pro-regeneration genes in monocytes and macrophage populations, which may promote tissue regeneration, neovascularization, and skin recovery. DabHeal has outstanding comprehensive advantages. Finally, the ease of preparation and low-cost quality of self-powered patches are key considerations in the feasibility analysis of innovative materials across industries. We have created a DabHeal that meets these requirements and has important application value.

D13-P26

稳定液态金属导电水凝胶的制备及自供电传感应用研究

杨千年、余茂林、许建雄*

湖南工业大学

导电水凝胶因其良好的柔韧性、粘弹性和自愈性，成为制备柔性电子设备的理想选择。电导率作为衡量水凝胶性能的关键指标，直接影响电子设备的灵敏度和响应速度。但目前报道的大部分水凝胶电导率偏低 ($< 1.0 \text{ S/m}$)，且存在力学性能和电学性能无法同时兼顾的问题。液态金属 (LM) 作为一种柔性导电填料，具有区别于固态导电填料的流动性和可加工性，在与柔性材料结合时存在较大的优势。然而，LM 的高内聚能导致其在水凝胶基体中难以均匀分散，而表面的氧化层又会导致其导电性能降低。为此，我们提出了一种能够同时解决 LM 分散性差和界面阻抗高的策略，旨在实现 LM 与水凝胶的有效结合。首先引入羧甲基纤维素 (CMC) 作为界面稳定剂，利用其分子链上丰富的 -OH 和 -COOH 基团与 LM 液滴表面形成的相互作用，实现对 LM 的锚定和包裹，有效避免了 LM 的沉降和聚集问题。随后将溶液酸化以去除 LM 液滴表面的氧化层，这一过程显著降低了接触界面的阻抗，最大程度地保持了 LM 的高导电性。此外，将烯丙基缩水甘油醚 (AGE) 修饰到 CMC 上，合成了一种大分子交联剂 (CMC-AGE)，以进一步提高水凝胶的力学性能。通过以上策略制备的水凝胶具有良好的可拉伸性 (应力: 390 kPa , 应变: 2866%)，优异的导电性 (电导率: 5.3 S/m) 和出色的自愈能力 (12 h 自恢复效率 100%)。使用该水凝胶作为电极构建的摩擦纳米发电机 (TENG) 也展现出卓越的性能，其压力灵敏度可达 0.206 kPa^{-1} ，且能够对微小压力变化做出快速响应 (35 ms)，在环境变化监测、人体运动检测 and 智能触觉反馈等方面显示出广阔的应用前景。

D13-P27

一种可持续产氧的碳点-类囊体复合水凝胶用于缓解水培白菜的缺氧环境

陈嘉俊*

华南农业大学

近年来，碳点复合水凝胶因其绿色制备和生物相容性而备受关注，但是这种水凝胶存在不稳定和性能单一的缺点。为了解决这些问题，在这里，我们以柠檬酸和尿素为原料，在甲酸溶剂热中制备具有绿光吸收，红光发射的碳点 R-CDs，通过点滴法制备了一种包裹碳点和类囊体的复合海藻酸钙水凝胶来解决白菜无土栽培时水培液中溶解氧含量过低的问题，该水凝胶通过可控地释放溶解氧来缓解水培缺氧环境，维持水培白菜生长的正常状态。在 500W 氙灯照射下，我们通过氧电极观察到碳点-类囊体复合水凝胶可以持续产生溶解氧。进一步的实验表明，该水凝胶可以在一定程度上缓解水培白菜的缺氧状态。与未处理的空白组对比，加入了碳点-类囊体复合水凝胶的白菜各项生理指标都有不同程度的提升。我们认为碳点-类囊体复合水凝胶可以在一定程度上增加水培营养液中的溶解氧来保证水培白菜的正常生长。

D13-P28

A three-dimensional printable conductive composite dressing for accelerating wound healing under electrical stimulation

XinXiang Chai, guohua Jiang*

Zhejiang Sci-Tech university

Three-dimensional (3D) printable conductive dressings emerged as an innovative approach to promote wound healing and modulate immune responses are promising alternatives for electrical stimulation of cells and tissues in biomedical engineering. In this study, a bioink based on poly(vinyl alcohol) (PVA) and k-carrageenan network was prepared using conductive polymer (PEDOT:PSS) as conducting medium, and (+)-Catechin-loaded mesoporous ZnO (CmZnO) as antibacterial and anti-inflammatory active medium. 3D conductive composite dressing was further fabricated by an extrusion 3D printing technology. Our results showed that the as-obtained composite dressing had suitable conductivity, efficient blood clotting capacity, and good adhesiveness. It also showed that the as-fabricated conductive composite had 92.9% and 95.6% antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) and *Escherichia coli* (*E. coli*), respectively. Furthermore, the conductive dressing with an optimal electrical stimulation (ES) parameter showed excellent in vivo blood clotting capacity, and it significantly enhanced in vivo wound healing process in a full-thickness skin defect model than commercial dressings by upregulating the gene expression of growth factors including CD-31 and downregulating inflammatory factor expression of IL-6, and then promoting granulation tissue thickness and collagen deposition.

D13-P29

具有抗菌、止血功能的生物弹性水凝胶传感材料

周海亮、王伟、万鹏博*

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-P30

光响应性水凝胶微球联合可溶性微针用于药物递送

吴思澄、廖立琼*

南方医科大学生物医学工程学院

研究目的：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。其中，光响应性水凝胶微球可以在光刺激作用下实现对药物的时空可控释放。然而，传统微球递送方式有皮下注射、口服等，但在长期给药过程中患者的依从性较差，且首过效应常导致治疗效率降低。微针作为一种创新的透皮给药方式，可以提升药物输送效率，能够实现无痛给药。本研究将制备一种来源于天然生物的光响应性水凝胶微球，并将其负载于可溶性微针中，以实现药物递送。

研究方法：以京尼平为交联剂，采用油包水 (W/O) 乳液法制备了包裹药物的壳聚糖凝胶微球。通过两步离心法制备以透明质酸和微球为基质材料，聚乙烯吡咯烷酮为背衬层，得到负载微球的可溶性微针，并对其形貌、光热性能、药物释放性能、力学性能和生物相容性等进行表征。

研究结果：所制备的水凝胶微球呈圆形且表面光滑，直径约为 20-50 μm 。该水凝胶微球具有良好的光热性能，在 1 W/cm² 的 808 nm 近红外激光照射下温度可升至 50 $^{\circ}\text{C}$ 左右，并且在经过 5 个光“开关”循环后还能保持良好的光热转化能力。微球成功负载到微针尖端，针体排列均匀，针尖为圆锥形且高度为 800 μm 左右。该复合微针贴片可以承受约 35 N 的压力，高于穿透皮肤所需的压力；透皮实验结果表明，微针刺入猪皮后，在猪皮约 550 μm 左右仍可观察到红色荧光信号，证明了微针具有一定的透皮深度，而且能实现对药物的可控释放。CCK-8 与活死染色结果表明该微球-微针复合物具有良好的生物相容性。

研究结论：将光响应微球与可溶性微针相结合能够实现药物的精准无痛递送。

D13-P31

用于在电刺激下加速伤口愈合的 3D 可打印导电复合敷料

柴新想、江国华*

浙江理工大学

三维 (3D) 可打印导电敷料是一种促进伤口愈合和调节免疫反应的创新方法, 是生物医学工程中对细胞和组织进行电刺激的有前途的替代方法。本研究以导电聚合物 (PEDOT:PSS) 为导电介质, 以负载(+)-儿茶素的介孔氧化锌 (CmZnO) 为抗菌消炎活性介质, 制备了一种基于聚乙烯醇 (PVA) 和 k-卡拉胶网络的生物墨水。3D 导电复合敷料是通过挤出 3D 打印技术制成的。结果表明, 制成的复合敷料具有合适的导电性、高效的凝血能力、良好的粘附性和生物相容性。结果还显示, 制成的导电复合材料对金黄色葡萄球菌 (*S. aureus*) 和大肠杆菌 (*E. coli*) 的抗菌活性分别为 92.9% 和 95.6%。此外, 具有最佳电刺激 (ES) 参数的导电敷料在体内显示出卓越的凝血能力, 通过上调 CD-31 等生长因子的基因表达和下调 IL-6 等炎症因子的表达, 进而促进肉芽组织厚度和胶原蛋白沉积, 它比商业敷料显著增强了全厚皮肤缺损模型的体内伤口愈合过程。

D13-P32

基于羟丙基壳聚糖的注射型多功能抗菌导电水凝胶用于糖尿病慢性伤口治疗的研究

彭淑婷、秦晓飞*

遵义医科大学珠海校区

糖尿病是以高血糖为基本生化特征的代谢性疾病。糖尿病患者的皮肤受到创伤之后, 由于其伤口部位的缺氧、高糖、缺血及炎症微环境, 常常会导致持续性的氧化应激及伤口微环境的免疫反应功能障碍, 从而阻碍血管生成并引起周围神经病变。与此同时, M1 型 (促炎) 巨噬细胞吞噬病原体的能力下降, 并且难以向 M2 型 (抗炎) 转变, 这使得炎症 M1 型巨噬细胞聚集, 伤口愈合延迟。此外, 以金黄色葡萄球菌为代表的细菌感染导致伤口部位进一步加重慢性炎症反应, 进而阻碍血管生成与神经生长, 干扰表皮增殖, 从而严重妨碍伤口愈合。

本项目基于羟丙基壳聚糖 (HCS) 和 2, 3, 4-三羟基苯甲醛 (TBA) 之间的席夫碱反应及氢键作用力, 以及三价铁离子和 TBA 之间的可逆配位的双重交联, 同时利用三价铁离子氧化性启动吡咯 (Py) 在水凝胶网络中的原位聚合, 一步法制备出能够快速交联、具有自愈能力的可注射抗菌导电水凝胶 (HCS-TBA@Py)。通过流变仪、电化学工作站等验证了该水凝胶优异的理化特性, 包括溶胀率、注射性与电敏感性等, 证实其在不规则伤口快速填充应变传感器方面的应用潜力。同时, 该多功能导电水凝胶能够有效清除活性氧并抑制细菌生长。随后, 将该水凝胶与电刺激耦合 (HCS-TBA@Py+ES) 后, 通过 RT-qPCR 与 WB 实验证实其能够有效激活缺氧诱导因子-1 α (HIF-1 α) 和 c-JUN-AP-1 信号通路, 避免血管内皮细胞在缺氧微环境中的应激能力受损, 上调下游血管内皮生长因子 (VEGF) 及 p-ERK1/2 的表达, 最终影响级联通路 MARK 并调控细胞的增殖与迁移。同时, HCS-TBA@Py+ES 还能够通过促进 NF、GAP43 等轴突相关基因和蛋白的表达, 并且加强内皮细胞—神经细胞细胞间串扰, 进而促进神经生成。更重要的是, HCS-TBA@Py+ES 能够上调 M1、M2 型巨噬细胞标记基因及相关促、抗炎基因, 表明其能够有效增强 M1 型巨噬细胞的吞噬能力, 并促使巨噬细胞的 M2 型极化。最后, 通过建立糖尿病大鼠慢性伤口模型, 利用 HE 染色、Masson 染色评估伤口部位表皮再生水平, 并利用免疫荧光对伤口部位组织中血管生成、神经修复及巨噬细胞极化情况进行验证, 明确了多功能导电凝胶 (HCS-TBA@Py) 在促进糖尿病伤口周围血管生成的同时清除活性氧, 抑制伤口处细菌的生长, 并且实现巨噬细胞向 M2 表型的极化以及快速血管生成和神经修复方面的实际应用效果, 为全面改善糖尿病慢性创面愈合的研究奠定基础。

D13-P33

一种面向体外活性肌肉驱动的 MFT 复合水凝胶特性研究

林泽宁、杨云、洪阳、谢航、高源、蒋涛*、罗自荣

背景: 创造具有高柔韧性、高能量转换效率和高生物相容性这类生物肌肉特征的驱动器一直是一个长期的研究热点, 由活细胞和生物材料组成的生物混合肌肉驱动器提供了一种新的解决方案。本研究提出了一种由基质凝胶 (Matrigel)、纤维蛋白原(Fibrinogen)、凝血酶(Thrombin)组成的 MFT 复合水凝胶与大鼠原代心肌细胞共同构建体外活性肌肉的方案, 并对水凝胶理化特性进行研究。

材料: 基质胶、纤维蛋白原、凝血酶、C2C12 成肌细胞、大鼠原代心肌细胞

方法: (1) 将生长培养基、凝血酶溶液、纤维蛋白原溶液和 Matrigel 按比例配置, 得到凝血酶最终质量浓度为 2 U/mL, 纤维蛋白原最终质量浓度为 4mg/mL, Matrigel 最终质量浓度为 6mg/mL (简称 MFT 复合水凝胶); (2) 使用 SEM、FTIR 等对复合水凝胶各项理化性能进行测试; (3) 使用大鼠原代心肌细胞与 MFT 水凝胶结合构建可自发收缩-舒张运动的体外活性肌肉组织。

结果与讨论: 基于 FTIR 与 SEM 表征结果确定了 MFT 复合水凝胶是由基质胶和纤维蛋白原-凝血酶通过氢键结合的三维网络结构, 粗糙表面有利于细胞黏附生长。当材料配置完成后, 在 37 °C 静置 1 小时实现溶胶-凝胶状态的不可逆转换。水凝胶的保水能力在 25 °C-85%湿度维持较好, 通过显著性分析得到温度是水凝胶失水的主要影响因素。溶胀性随温度升高而减小, 在 37 °C 的溶胀率仅为 12.45%。

进一步测量 MFT 复合水凝胶的机械-生物特性, 通过 C2C12 细胞证实其具有高生物相容性, 并得到 37 °C 溶胀平衡时的杨氏模量为 1.51 kPa。使用 MFT 复合水凝胶与大鼠原代心肌细胞构建体外活性肌肉组织, 可宏观工作时长至少 6 天, 收缩力约为 1 mN。

结论: 体外生物肌肉组织作为新兴的生物肌肉驱动器技术的基础, 成功本研究将 MFT 复合凝胶与大鼠原代心肌细胞结合并实现肌肉收缩-舒张运动, 为使用该材料和心肌细胞构建肌肉驱动器奠定基础。但是, 本文所构建的活性肌肉组织仍存在机械特性、可控性等方面的不足, 我们正在对这些方面进一步研究。

D13-P34

基于粘弹性行为制备高阻尼、耐裂纹、自修复的锂硫电池粘结剂

唐悦蔓、司梦捷、郑司雨*

浙江工业大学材料科学与工程学院

在锂硫(Li-S)电池中, 粘结剂在保持硫电极的完整性方面起着重要作用。然而, 由于氧化还原反应过程中硫的体积变化和外部环境引起的振动, 电极很容易产生裂纹从而影响电池性能。开发具有裂纹不敏感性和阻尼性能的坚韧粘合剂具有十分重要的意义。在此, 我们开发了一种由聚(4-(4-乙烯基苄基)-4H-1,2,4-三唑)(PVBt)亲电解质软段和聚(3-(1-(4-乙烯酰基苄基)-1H-咪唑-3-基)-丙烷-1-磺酸盐)(PVBIPS)疏电解质硬段所构成的具有特殊粘弹性行为的嵌段共聚物粘合剂(PVBST)。粘合剂的损耗模量可在较宽的频率范围内高度接近其储能模量, 从而产生超高的损耗因子以及粘弹性的平衡。基于这种流变行为, 该粘合剂具有高阻尼性、高断裂韧性及有效愈合能力。此外, 侧链的两性离子基团可以固定多硫化锂(LiPS)并促进离子的传输。由于这些优异的特性, 锂硫电池表现出高比容量和稳定的循环性能。

D13-P35

自愈合的纳米胶体水凝胶

丁田田、孟丽源、李云峰*

吉林大学

纳米胶体水凝胶是一类新兴的软物质, 其中纳米颗粒作为胶体网络的构建块。化学或物理交联可以使纳米颗粒获得三维结构。纳米颗粒的组成、尺寸和形状、纳米颗粒的成键机理、纳米颗粒的结构以及分子交联剂的性质决定了纳米颗粒的协同性能。纳米胶体在软机器人、生物工程、光学活性涂层和传感器、光电器件和吸收剂等领域都有应用。而制备具有力学性能可调, 不溶胀, 自愈合和生物安全性的纳米胶体水凝胶在生物医学工程领域具有重要意义。在这里, 我们报告了使用光反应性明胶纳米粒子作为胶体构建块

的具有自修复性能的新型纳米胶体水凝胶。采用纳米工程化的制备策略获得具有光反应特性的明胶纳米粒子，纳米粒子之间发生共价交联产生稳定的纳米胶体水凝胶。由于纳米颗粒内部的可逆共价键以及纳米颗粒之间的非共价相互作用的存在，使纳米胶体水凝胶具有一定的自修复性能。此外，紫外交联的方式可以显著控制水凝胶三维结构的溶胀和降解行为。值得注意的是，纳米胶体水凝胶在体外和体内均表现出良好的生物安全性。纳米工程化制备水凝胶墨水的方法为制备光敏性的纳米胶体水凝胶提供了新的思路，为探索新型纳米胶体水凝胶提供了线索，并将加速生物医学应用的创新水凝胶的发展。

D13-P36

用于油田临时堵水的强韧且可快速降解的水凝胶

袁朝阳、徐琼筠、时予、郑静、吴锦荣*

四川大学高分子科学与工程学院

在大多数成熟油田中，水凝胶已被广泛用于深度控水和堵水；然而，较差的机械性能和不可降解的特性严重限制了其应用。本文以天然大分子明胶为基础，制备了一种多功能大分子交联剂（GA），用于制备聚丙烯酰胺水凝胶。与 GA 交联可形成一种特殊的网络，其中的物理缠结可耗散能量，拓扑交联可分散应力。因此，水凝胶具有显著的机械强度、韧性和抗撕裂性。同时，GA 在高温下很容易降解，导致水凝胶解体。在多孔介质中的流动模型显示，水凝胶具有显著的堵水能力和快速降解能力，堵水率和降解率分别达到 99% 和 100%。这种力学性能和降解性能使水凝胶成为油田异质油藏的新型临时堵水剂。

D13-P37

基于羟丙基壳聚糖和 ϵ -聚-L-赖氨酸的具有抗菌和止血活性的可注射自愈水凝胶用于伤口修复

彭淑婷、秦晓飞*

遵义医科大学珠海校区

皮肤作为人体免疫系统的第一道防线，在保护机体免受外界侵害、控制体温等方面发挥着重要作用。也正因此，皮肤正常的解剖结构和功能常常会外界因素破坏从而形成皮肤的创面。出血、炎症、增殖和重塑都是皮肤伤口愈合过程的一部分。然而，活性氧（ROS）的产生、血液凝固延迟、持续炎症、微生物感染和细胞增殖延迟是经常阻碍这一过程的一些因素。大量失血通常发生在创伤的第一阶段，其后果包括凝血功能障碍和多器官衰竭，会增加院前死亡的风险。因此，在急性创伤的情况下，最大限度地减少失血应该是首要目标。在随后的炎症阶段，细菌感染可能会加重炎症反应，细菌感染产生的过量 ROS 会对细胞和血管造成严重伤害，从而导致伤口不愈合，也可能导致患者死于多器官衰竭或败血症等严重疾病。因此，制备一款创造一种独特的、易于制造的、低成本的伤口敷料，用以支持伤口愈合的所有阶段，是非常必要的。

本项目利用希夫碱反应以及羟丙基壳聚糖（HCS）、 ϵ -聚-L-赖氨酸（EPL）和 2,3,4-三羟基苯甲醛（TBA）之间的氢键作用力和铁（III）与多酚基团之间的可逆配位形成的多重交联，采用一锅法成功制备了一系列可注射的复合水凝胶（HCS-TBA-EPL）。通过对水凝胶内部结构、流变特性及粘附性等的表征，证实了 EPL 这一抗菌肽的添加能够增强水凝胶的保水能力等理化特性及粘附效果。同时，所有水凝胶均表现出良好的自愈能力及注射性，具备长期填充不规则伤口，为伤口愈合提供适宜的湿润环境的潜力。值得注意的是，我们证实了水凝胶较低的凝血指数，并且通过大鼠断尾模型及家兔肝脏模型验证了 HCS-TBA-EPL 具备优异的止血效果，能够明显减少失血量并缩短止血时间，表明 HCS-TBA-EPL 能够有效避免急性创伤大量失血造成的严重后遗症。此外，HCS-TBA-EPL 所具备的强大的抗菌和抗氧化特性还能防止细菌感染，减少伤口处的炎症，从而促进伤口各个阶段的愈合。这一点也在大鼠全厚皮肤伤口修复实验中得到了验证。使用 HCS-TBA-EPL 能缩短大鼠全厚皮肤伤口的愈合时间，伤口处皮肤中的血管、毛囊和表皮厚度都能更快地接近正常皮肤，而且在伤口愈合的早期阶段，炎症反应也没有那么严重。更有意思的事，HCS-TBA-EPL 还具有体内抗感染特性，它能够在大鼠感染模型中减少超过 99% 的 MRSA 细菌负担。这一研究为生物水凝胶在伤口处理和智能医疗方面的多功能集成研究奠定了基础。

D13-P38

高强度，强粘附共晶凝胶的制备及其在柔性电子器件中的应用

李小虎、张旭航、刘迎丹*

燕山大学

共晶凝胶由于其良好的环境稳定性、透明性、化学稳定性和生物相容性，在柔性电子器件中具有广阔的应用前景。然而，目前报道的共晶凝胶普遍表现出力学性能差、粘附性能低的问题，这在很大程度上影响了柔性电子器件与人体皮肤之间的界面稳定性，极大地限制了共晶凝胶在柔性电子器件中的应用。为了适应复杂的应变环境，在本研究中，以丙烯酰胺 (AAm) 为氢键供体，双三氟甲烷磺酰亚胺锂 (LiTFSI) 为氢键受体，按照一定比例混合，制备了可聚合的低共熔溶剂 (PDES)，然后将充当小分子润滑剂的乙二醇 (EG) 和单体丙烯酸吗啉 (ACMO) 引入 PDES 中，在光引发自由基聚合后得到共晶凝胶。由于共晶凝胶内大量的氢键、静电相互作用以及聚合物链缠结的存在，共晶凝胶表现出优异的力学性能（拉伸强度为 3.5 MPa，韧性为 9.6 MJ m^{-3} ）、强粘附性（粘附强度为 125 KPa）、高透明性以及良好的抗疲劳性。同时，因为锂盐的存在，共晶凝胶表现出良好的应变传感性能（应变 200% 下的 $\text{GF}=1.1$ ），可应用于应变传感器。将其作为电极层组装成的摩擦纳米发电机表现出稳定的输出性能（开路电压为 173 V），响应时间快（17 ms），在自供电柔性可穿戴电子设备中展现出可观的应用前景。

D13-P39

4D 封装干细胞的动态水凝胶，通过调控 BMSC 的行为，促进软骨修复与再生

李璐茜*

中国海洋大学海洋生命学院

动态的细胞外基质 (ECM) 能够调控细胞命运。目前用于组织工程的生物材料大多为 2D 或 3D 培养细胞，缺乏相邻细胞间的信号传导和相互作用，从而导致影响细胞的生长和分化。为了高度模拟 ECM 的特性，本研究设计出一种具有动态性的 4D 封装干细胞的水凝胶，其中使用丙烯酰胺和硫酸化肝素多糖作为氢键供体，精氨酸作为氢键受体，通过低共熔溶剂 (DES) 的形式制备成水凝胶。水凝胶的 4D 动态性体现在优异的粘弹性以及自进化的大孔结构。除此之外，水凝胶还具备可注射性和可调的机械性能。结果表明，水凝胶的动态性有利于骨髓间充质干细胞 (BMSC) 的扩散、增殖、干细胞球体的形成，以及软骨分化。此外，持续性释放硫酸化肝素多糖和精氨酸能够通过巨噬细胞的重编程作用来有效地抑制炎症、调节免疫微环境。综上所述，这项研究提出了一种用于治疗骨关节炎的 4D 封装干细胞水凝胶的有效策略，通过调节细胞和动态 ECM 之间的相互作用，调控干细胞的命运，同时调节骨组织的免疫微环境，促进软骨修复和再生。

D13-P40

多功能复合生物水凝胶用于无缝合细胞移植疗法促进局部缺损后角膜基质快速再生修复

伍思敏、朱盛文、白莹*

中山大学材料科学与工程学院

引言：角膜是眼睛的重要组成部分之一。角膜损伤是目前导致失明的主要原因，为全球范围内第二大致盲性眼病。角膜移植一直是治疗角膜盲的主要临床手段，但手术缝合操作复杂，术后并发症，也给患者的术后恢复带来了极大痛苦。更重要的是，目前我国捐献角膜数量严重匮乏，许多角膜盲患者得不到及时救治。可注射水凝胶具有原位成型和可填充不规则缺损的特点，在治疗局灶性角膜基质缺损方面具有显著优势。但目前研究中的可注射水凝胶在位降解速率远大于角膜基质自身再生修复的速度，导致该修复方案长期效果不佳。因此，利用无缝合水凝胶填充角膜缺损部位，并且高效移植角膜基质细胞促进其细胞外基质分泌与角膜基质再生，有望在减慢填充水凝胶降解速率的同时，提高角膜基质再生效率，达到快速修复角膜缺损的目的。在本研究中，我们设计了一种由甲基丙烯酸明胶和氧化透明质酸复合而成的可见光固化

双交联水凝胶，用于角膜基质缺损后的填充与修复。此外，利用脱细胞角膜基质微凝胶包裹角膜基质细胞，维持其促再生表型的同时，可以有效避免眼表损伤后的复杂微环境对角膜基质细胞的伤害。

结果与讨论：首先，甲基丙烯酰明胶溶液和氧化透明质酸溶液混合，制备水凝胶预聚液。通过微流控技术制备包裹角膜基质细胞的脱细胞角膜基质微凝胶，将其与水凝胶预聚液混合而后，注入角膜基质缺损部位，原位光固化成胶。复合水凝胶与载细胞微凝胶协同注射移植至角膜缺损部位后，可以在保证足够的光学性能和机械性能的同时，刺激外源性角膜基质细胞分泌胶原等细胞外基质，促进角膜基质的再生与宿主融合。实验证明，我们制备的复合生物水凝胶在可见光范围内具有较好的透过率，一定的机械性能和生物相容性。

结论：该方法有望为解决目前单纯依赖角膜移植解决角膜局部缺损的临床问题提供可行的治疗方案，为更多的角膜盲患者带来光明的希望。

参考文献

[1] Ehsan Shirzaei Sani, Ahmad Kheirkhah, Devyesh Rana, et al, Sutureless repair of corneal injuries using naturally derived bioadhesive hydrogels, Sci Adv, 2019, 5: 1281.

[2] Xuan Zhao, Saiqun Li, Xinyue Du, et al, Natural polymer-derived photocurable bioadhesive hydrogels for sutureless keratoplasty, Bioactive Materials, 2022, 8: 196 – 209.

D13-P41

具有可切换形状变形能力和可见光/荧光颜色变化的多响应性双层水凝胶致动器

王高鹏、王帅兵、郑司雨、杨晋涛*

浙江工业大学材料学院

双层水凝胶具有多响应和可切换的变色特性，在仿生人工智能材料中引起了广泛关注。然而，这种水凝胶的设计和制造可以完全模拟生物体的适应性，即同时改变形状，荧光和/或可见颜色，仍然是重大的挑战。本文采用具有 pH 响应荧光的 4-(2-(4-(二甲氨基)苯基)-1-异氰基)苯酚(DP)和可切换变色的 4-(2-(磺乙基)-1-(4-乙烯基苄基)吡啶甜菜碱(VPES)单体制备了多响应(如温度、盐和 pH)和多适应(形状、荧光颜色和可见颜色变化)的水凝胶。双层水凝胶包括一个温度和 pH 响应凝胶层，聚(N-异丙基丙烯酰胺-co-2-(二甲氨基)甲基丙烯酸乙酯)，以及一个 pH、温度和盐响应凝胶层，聚(丙烯酰胺-co-2-(二甲氨基)甲基丙烯酸乙酯-co-VPES)@DP。由于两层之间相反的膨胀/收缩行为，制备的水凝胶在热、盐和 pH 刺激下表现出形状变化，以及 DP 和 polyVPES 分别产生的可切换的荧光颜色和可见颜色变化。除了具有多响应特性外，该水凝胶还具有优异的抗疲劳性能和高灵敏度，具有很大的应用潜力。我们期望这种实现多响应能力的策略也可以启发仿生智能材料的设计。

D13-P42

具有工业海水淡化应用潜力的太阳能界面蒸发装置研究

李团章、李思东、李乐凡*

广东海洋大学

受人口增长、环境污染以及全球变暖等因素的影响，淡水资源短缺问题日益严峻。根据全球水资源经济委员会最新研究报告，到 2030 年全球淡水供应短缺将达到 40%。鉴于 70% 以上的地球表面被海洋覆盖，海水淡化无疑是破解这一困境最有效的策略。近年来，科研人员致力于探索基于光热转换效应的太阳能驱动界面水蒸发技术，其在减轻化石能源消耗与环境污染压力、保障清洁水资源供给方面有着广阔的应用前景。然而，光热转换太阳能海水淡化都需要设计高效的界面蒸发器，而蒸发器的成本是限制工业化生产的一个重要因素。本研究利用聚丙烯酰胺水凝胶作为输水体，以炭黑作为光热转化材料，组装了一种高效的复合水凝胶蒸发器。实验结果表明，在一个太阳光照强度 (1 kW m^{-2}) 下，该蒸发器的蒸发率高达 $2.34 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。通常文献报道的蒸发器光热转换材料是碳纳米管、石墨烯等新型纳米材料，尽管使用这些材料的蒸发器蒸发率可达到 $2.90 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 以上，但碳纳米管的成本高达 80 万元/吨，而石墨烯的成本更是高

达 860 万元/吨, 若直接应用于构建生产设备将产生巨大的建造成本。相比之下, 炭黑的成本仅为 0.99 万元/吨, 在蒸发器设计中, 它们的质量分数是相近的, 所以原材料价格的改变可以极大地降低生产成本。本研究的炭黑/聚丙烯酰胺复合水凝胶界面蒸发器具有低成本高效益的优点, 在可持续绿色环保太阳能界面海水淡化应用中的具有重要的商业潜力, 为应对全球淡水资源短缺挑战提供了一种经济高效的解决方案。

D13-P43

用于 3D 生物打印的多功能甘油水凝胶生物墨水

姜思涵、游正伟*

东华大学材料科学与工程学院

引言: 生物墨水是 3D 生物打印的关键。由于具有仿生细胞外基质特性, 水凝胶是目前最常用的生物墨水材料。然而, 水凝胶生物墨水中的自由水在低温下会形成致命冰晶, 这使冷冻保存打印出的结构变得十分困难。此外, 自由水还存在蒸发、为细菌提供生存环境等问题, 这限制了水凝胶生物墨水的实际应用。本团队近年来开发了多种策略来改善水凝胶的缺陷, 包括引入离子液体 [1] 和甘油 [2-4], 构筑了高性能抗冻凝胶纤维。在此, 受上述研究成果启发, 我们通过引入甘油来调节水的状态, 利用甘油与水分子之间的强氢键作用, 将自由水转变为结合水, 进而开发设计了一种多功能二元甘油水凝胶生物墨水 [5]。

材料与方法: 我们首先利用戊二醛与明胶之间的席夫碱反应制备了具有动态交联网络的甘油水凝胶生物墨水。通过流变仪、低场核磁等设备对流变学、耐低温性能和水状态分布等性质进行了测试, 通过 3D 生物打印机完成对墨水形状的个性化定制, 最后以大肠杆菌、3T3 细胞等作为实验对象对材料的抗菌性能、冻存保护能力等进行了测试。

结果与讨论: 动态交联网络赋予了凝胶剪切稀化和自恢复特性, 确保了凝胶墨水在室温下的可打印性。甘油的引入有效降低了凝胶的自由水含量, 使其能够抗干燥、实现长期形状保真, 同时也赋予了甘油水凝胶优异的耐低温性能(-80°C), 能直接用于细胞冻存, 并且对细胞冻存的保护能力远高于水凝胶墨水。此外, 甘油水凝胶还能够显著抑制细菌生长, 表现出本征抗菌特性。

结论: 我们通过甘油来调节生物墨水中水的状态, 与现有的水凝胶生物墨水相比, 所制备的含有限自由水的甘油水凝胶表现出集抗菌性、形状保真、3D 生物打印和冷冻保存过程中的细胞保护等一系列有利特性于一体, 有望推动生物 3D 打印的医学应用。

参考文献

[1] L. Sun et al. Ionogel-based, highly stretchable, transparent, durable triboelectric nanogenerators for energy harvesting and motion sensing over a wide temperature range. *Nano Energy* 2019, 63, 103847.

[2] S. Chen et al. Mechanically and electronically robust transparent organohydrogel fibers. *Adv. Mater.* 2020, 32, 1906994.

[3] S. Jiang et al. Breathable, antifreezing, mechanically skin-like hydrogel textile wound dressings with dual antibacterial mechanisms. *Bioact. Mater.* 2023, 21, 313.

[4] S. Chen et al. Chinese tofu-inspired biomimetic conductive and transparent fibers for biomedical applications. *Small Methods* 2023, 2201604.

[5] S. Jiang et al. Intrinsically cryopreservable, bacteriostatic, durable glycerohydrogel inks for 3D bioprinting. *Matter* 2023, 6, 983.

D13-P44

基于氢键诱导自组装构筑纳米多孔、强韧、透明类塑料水凝胶

张学辉、程瑞栋、张秋禹*

西北工业大学

大多数天然生物支撑组织均具备高机械强度、高含水量、各向异性结构和纳米级自组装结构的特点, 这些特征对于生物系统具有极其重要的作用, 但对于人工制备仿生材料同时具备以上特点一直存在挑战性。

为了同时改善上述特征，基于氢键诱导自组装制备了一种同时具有纳米级多孔结构、高透过率和高含水率的类塑料水凝胶。其杨氏模量可达 223.7 MPa，断裂强度可达 10.3 MPa，并且同时具备约 70% 的高含水率。除此之外，该水凝胶在加热时展现出玻璃化转变过程；上述特征使其能够满足以折纸为代表的，具有可逆和重塑的形状记忆特点，可任意编辑为 2D 及 3D 形状。同时该水凝胶的高含水率使其展现出在智能温度监测器、多级信息防伪和人工肌肉等方面的应用。

D13-P45

基于羧甲基壳聚糖的高韧性导电水凝胶

丁虹耀*

南京工业大学

水凝胶因其独特的网络结构和柔韧性，在柔性传感领域备受关注。然而，如何构筑兼具优异力学性能和导电性能的水凝胶仍面临巨大挑战。羧甲基壳聚糖（CMC）是一种常见的水溶性壳聚糖衍生物，其分子链含有大量亲水基团。本报告以 CMC 为原料构筑力学性能和导电性能良好的两种复合水凝胶。其一是将 CMC 和氯化钠引入交联的聚丙烯酰胺网络中，借助半互穿网络结构和盐析效应，构筑了具有高韧性（1100%）、低模量（26 kPa）、良好自回复和自修复能力的 PAM/CMC/NaCl 水凝胶，引入的 NaCl 赋予其优异的导电性（6.44 S/m）、保水性和抗冻性。其二是利用 CMC 侧基的可接枝性，通过一步聚合法制备了化学交联的高韧性 PAM/CMC 导电水凝胶，该凝胶具有高韧性（4560%）、低模量（20 kPa）、低滞后、高电导率（0.85 S/m）和良好的生物相容性。以这两种导电水凝胶为基体构筑的电阻式应变传感器都表现出较高的灵敏度，可用于监测人体实时运动。

D13-P46

宏观相分离介导的高强度热稳定润滑水凝胶

杨洋、沈彬*

四川大学华西医院

基于结构与天然软骨相似，水凝胶被认为是一种潜在的软骨替代材料，对修复软骨缺损具有重要意义。然而，现有的水凝胶难于同时实现天然软骨的高承载和低摩擦特性（37°C），并且制备方法通常需要复杂的步骤。本文我们报道了一种简单且新颖的策略，通过利用过饱和 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，具有良好的热稳定润滑性能。有限元分析进一步证明了 PNIPAm/EYL 水凝胶在载荷条件下能够有效地分散外加应力和耗散能量。这项工作不仅为高强度润滑水凝胶的设计提供了新的见解，而且为作为软骨替代材料治疗软骨损伤奠定了基础。

D13-P47

仿生自组装细丝网络的超分子凝胶

张春梅¹，董云龙¹，于宪莉¹，曹海^{1,*}

南京工业大学材料化工国家重点实验室

细胞骨架和细胞外基质中的蛋白质纤维网络在维持细胞形状以及确定结缔组织的各种机械功能方面起着至关重要的作用。它们通过分层方式构建，首先将生物聚合物组装成半柔性长丝，然后交联成复杂的网络。虽然模拟这样复杂的结构梯度是可取的，但是在超分子系统中具有一定的挑战性。本项工作揭示了仿生网络结构在增强超分子凝胶的机械强度方面取得可观的效果。通过氨基酸衍生物小分子的自组装，可

以获得直径为 2-10 nm 的螺旋细长、丝状的交联网络。同时，自组装长丝网络可有效固定液态碳氢化合物，临界凝胶浓度低至 0.18 wt%，拉伸模量可以达到 144 MPa。由于此类超分子凝胶具有出色的机械强度和可逆性，因此可以热成型或冷成型，且具备一定的自支撑能力。然而，同类分子的不同自组装结构会形成弱而迟钝的传统凝胶网络，这意味着跨越尺度的分层结构对增强超分子凝胶的机械性能扮演重要角色。生命系统中的丝状蛋白质可以实现分层组织，由此，具有相似结构和机械特性的超分子凝胶可以在许多领域用作聚合物凝胶的有前途的替代品。

仅发表论文

D13-PO01

用于创面修复的透明质酸-壳聚糖/改性氧化石墨烯水凝胶的研究

刘春媛、谭斯琪、黄岳山*、劳永华

华南理工大学

皮肤作为抵御外界侵扰的屏障，极易受到损伤。创面修复是一个动态且缓慢的过程，单一功能的水凝胶无法满足伤口愈合的复杂过程，导致治疗效果不佳。与单一功能性的水凝胶相比，多功能水凝胶适用范围更广，可以解决伤口愈合阶段可能出现的问题，如持续性炎症、细菌感染、血管生成缓慢等，从而有效促进创面修复。因此，本文基于天然多糖高分子材料透明质酸、壳聚糖以及改性氧化石墨烯，制备了一种具有抗氧化性、黏附性能、自愈合性能、光热效应、抗菌性能以及生物相容性良好的多功能导电水凝胶敷料。

本文首先以天然多糖透明质酸为基础，通过将醛基和苯硼酸基团接枝到透明质酸分子链上，得到透明质酸衍生物，利用该衍生物上的醛基和羧甲基壳聚糖上的氨基进行反应，并引入 3, 3'-二硫代双（丙酰肼）的酰肼基团，生成了席夫碱和酰肼键两种动态共价键，其次，接枝的苯硼酸基团可以和相邻透明质酸的羟基生成苯硼酸酯键，从而构建了一种具有多交联网络结构的水凝胶。将盐酸多巴胺改性后的氧化石墨烯复合到水凝胶网络中，制备了一种具有光热性能、黏附性能、抗氧化性和抗菌性能的多功能导电水凝胶。光热实验和光热抗菌实验证明了该水凝胶在近红外光照下升温迅速，并且能够实现有效杀菌。此外，通过负载天然绿茶中的主要活性物质表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）增强了水凝胶的抗氧化性能和抗菌作用。天然抗氧化剂 EGCG 的使用有效避免了抗生素使用带来的耐药性。

最后，采用大鼠全层皮肤缺损模型证明了该多功能导电水凝胶对创面愈合具有明显的促进作用。此外，我们还使用电刺激（ES）辅助该多功能导电水凝胶，探究了联合作用下，ES 对伤口愈合的作用。细胞和动物实验结果表明，该水凝胶与 ES 及药物具有协同效应，可以进一步抑制伤口感染，促进细胞迁移，增加创面处的血管生成、胶原沉积，从而加快创面愈合。该研究为水凝胶伤口敷料设计和创面修复提供了新策略。

D13-PO02

Functions-integrated hydrogel as a wound dressing for drug release and health monitoring

Haiyu Li, Hui Zhang, Jie Du*

Hainan University

A bio-hydrogel was prepared via a low-cost and time-saving strategy and was studied as wound dressing for precision medicine and health monitoring. Promoted by self-catalytic pair, gelation time was dramatically accelerated and the hydrogel can be freely modeled at -18 °C without losing flexibility. As smart wound dressing, the required properties such as self-healing, self-adhesion, antibacterial and sensing stability, were integrated into one hydrogel. Abundant hydrogen bond and metal-ligand coordination which facilitated the hydrogel with self-healing efficiency. Owing to the catechol, hydrogel could adhere to multiple substrates including skin, and showed good antibacterial activity. A wound dressing was fabricated, which exhibited excellent correlation and

efficiency in monitoring of body activity and drug release. In vivo experiments proved that efficient drug release of hydrogel dressing significantly accelerated wound healing. Additionally, the dressing exhibits excellent biocompatibility and have no negative impacts on organs. Herein, a smart wound dressing that is different from traditional way was proposed. As a smart device, it can be integrated with wireless devices and is expected to participate in promising applications.

D13-PO03

一种力学性能优异的聚乙烯醇凝胶的制备及性能研究

纪欢真、曾樱茹、胡超然、胡若飞、赵静*

德州学院

研究及制备力学性能优异的聚乙烯醇凝胶材料是目前研究面临的挑战^[1,2]。我们以聚乙烯醇为基体，通过设计多重氢键形成物理交联区，大大增加了凝胶体系的交联密度，制备了力学性能优异的聚乙烯醇凝胶，其拉伸强度可达到 31.0 MPa，断裂伸长率达到 1300%，韧性达到了 160 MJ/m³，得到聚乙烯醇凝胶能回收再利用。聚乙烯醇凝胶还具有优异的生物相容性、生物可降解性，有望应用于生物医学（如对材料强度及可再循环能力要求极高的人工跟腱）和可穿戴设备中。本研究为制备高强度、可回收的聚乙烯醇凝胶提供了重要的参考价值。

Reference

1. Hua M, Wu S, Ma Y, Zhao Y, Chen Z, Frenkel I, et al. Strong tough hydrogels via the synergy of freeze-casting and salting out. *Nature* 2021, 590(7847), 594-599.

2. Tang N, Jiang Y, Wei K, Zheng Z, Zhang H, Hu J. Evolutionary Reinforcement of Polymer Networks: A Stepwise-Enhanced Strategy for Ultrarobust Eutectogels.

Advanced materials 2023, 2309576.

D13-PO04

纳米羟基磷灰石/硫辛酸基复合水凝胶及其颅骨缺损修复应用研究

杜佳强、陈婷婷*

湖北汽车工业学院

活性氧 (ROS) 是人体代谢过程中的重要中间产物，对人体正常生理活动的调节发挥着至关重要的作用。在组织损伤早期清除过量的 ROS 可为细胞和组织功能的恢复创造有利的环境，因此，开发可有效清除 ROS 的生物医用材料对促进受损组织修复具有重要意义。骨缺损后持续的氧化应激严重阻碍了骨组织的修复。设计具有适当机械强度的抗氧化成骨水凝胶有助于改变局部微环境，促进骨缺损愈合。本研究利用 LA 双功能化的聚乙二醇 (PEG_x, x=6k 或 10k) 为交联剂，与硫辛酸钠进行开环聚合，设计合成了 LA-PEG_x 水凝胶 (LP_x, x=6k 或 10k) 体系。进一步，将 nHA 掺入 LP6k 水凝胶体系中，制备了 nHA-LA-PEG6k (HLP6k) 水凝胶。系统研究了 PEG 分子量、含量以及 nHA 含量对水凝胶流变学性能、微观形貌、粘接性、可注射性、自愈性、抗氧化性、体外成骨诱导能力和生物相容性的影响规律。在体内构建的 SD 大鼠颅骨缺损模型中，HLP6k-3 水凝胶可有效调节组织损伤处的 ROS 水平，显著促进了大鼠前成骨细胞的增殖和骨矿化，增加缺损部位成骨标记蛋白 (BMP2 和 OCN) 的表达和钙沉积，加速颅骨缺损的修复。此外，Micro-CT 也显示水凝胶可促进新生骨的形成，表明其具有很强的骨再生能力。总之，具有多重功能性的生物活性绿色水凝胶在修复骨缺损方面具有重要的应用前景。

D13-PO05

温敏性水凝胶灭火剂制备及效能研究

王宇昌*

为探索温敏性水凝胶高效灭火剂, 对 2wt%羟丙基甲基纤维素 (HPMC) 与水混合物进行不同温度下, 不同浓度下的凝胶实验, 其凝胶温度为 91℃。逐步探究其凝胶性能改良, 搭建木垛燃烧-灭火剂喷放试验平台, 根据 GB 17835-2008《水系灭火剂》中 A 类火灭火试验相关规定, 模拟 A 类火灾, 对比测试温敏性水凝胶与水在混合比 3%和 2%下的灭火效果, 并计算水凝胶灭火剂的灭火强度。研究表明: 水凝胶灭火剂的灭火时间少于普通水系灭火剂灭火时间, 能快速抑制 A 类火灾的燃烧和传播, 结束喷放后木垛温度始终低于复燃临界温度; 混合比相同时, 水凝胶降温速率高于泡沫灭火剂, 其灭火效果优于泡沫灭火剂; 计算得出高分子水凝胶灭火剂扑灭 1A 及 2A 火灾的灭火强度为 0.072L/(s·m²),水凝胶灭火用量仅为所需水的 76%,且其在室温时具有较好流动性, 温度升高, 其灭火性能会逐步提高, 且具有良好地灭火性能。

D13-PO06

低共熔聚合物凝胶的制备及其性能研究

彭军霞*、支耀龙、李茂华、董妍

陕西师范大学

低共熔溶剂 (Deep Eutectic Solvent, DESs) 是一种由氢键供体和氢键受体组成的低共熔混合物, 因其具有饱和蒸汽压低, 热稳定性和导电性好, 成本低、无毒等优点, 代替水和离子液体形成的低共熔凝胶 (eutectogels) 是一类性能优异的凝胶类软物质, 表现出了优良的力学性能、电学性能和温度稳定性。本课题组围绕低共熔溶剂和聚合物间的相互作用, 通过溶剂和聚合物的筛选、溶剂与聚合物之间相互作用、环境温度和湿度对凝胶性质影响等方面的研究, 制备了一系列在大气吸湿、热电转换等方面性能优异的低共熔聚合物凝胶。所得凝胶材料具有良好力学强度、吸湿性能、导电性能、热稳定和抗疲劳性。本研究所制备的低共熔凝胶有望在大气吸湿, 蒸发冷却, 吸附, 热电转换, 柔性电子等方面有良好的应用前景。

致 谢: 感谢国家自然科学基金项目 (No. 21972085, 22132002)

D13-PO07

Zwitterionic ionogels with water-mediated stiffness transition for shape memory and moisture electric generation

Shuaibing Wang, Si Yu Zheng, Jintao Yang*

Zhejiang University of Technology

Moisture-sensitive gels with recyclable and switchable mechanics hold great promise for electronic generation. However, the volume, mechanical, electrical stability of gels during repeated hydration-dehydration remain a big challenge. In this study, we have developed a high-strength ionogel by incorporating a polyacrylic acid (PAA) network with multiple hydrogen bonds into the polyzwitterion-ionic liquid (PVBIPS-VEIMBF₄) network. The resulting ionogel exhibits an exceptional breaking strength of 67 MPa and significant water-induced softening (2600-fold modulus decrease) with the elongation of approximately 708%. Moreover, it remains stable over 7 rehydration processes without volume deformation, simultaneously exhibits excellent water/heat induced shape memory behavior. Additionally, due to the protonation ability of polyelectrolytes and the exceptional hydration ability of zwitterions, a single gel-based MEG can consistently produce a high voltage of 1.17 V at 85% outdoor humidity. With diverse applications in different states, this excellent ionogel demonstrates enormous potential for sustainable development of green materials.

D13-PO08

功能软物质的高效界面粘合

孙中文, 方永盛, 刘凯强*
陕西师范大学

界面粘合是一种通过化学或物理作用实现界面亲合形成整体材料的过程, 在航空航天、电子、文物及土壤修复等方面具有重要的应用价值。作为典型的功能软物质, 超分子粘合剂是近年来发展起来的一类十分重要的功能软物质材料, 因其结构、组分与键合作用可调等优势, 引起了人们广泛关注。基于固、液两相或多相体系存储稳定性差等问题, 课题组采用超分子平衡控制与分子裁剪策略, 发展了系列环境友好、耐温、耐盐、耐酸碱、耐溶剂等高效粘合剂, 即界面粘合强度从5.0~40.0 MPa范围内预期可调, 且对多种基质(如金属、玻璃、陶瓷、沙石等)均具有良好的界面浸润性与亲合性。课题组所获粘合剂已初具规模, 有望推进极端环境下界面粘合的实际应用。

关键词: 软物质; 界面粘合; 环境耐受性

参考文献

- [1]. Gao, S.; Wang, S. S.; Ma, J.; Wu, Y.; Fu, X. W.; Marella, R. K.; Liu, K. Q.; Fang, Y. *Langmuir* **2016**, *32*: 12805.
- [2]. Liu, K. Q.; Gao, S.; Zheng, Z.; Deng, X. L.; Mukherjee, S.; Wang, S. S.; Xu, H.; Wang, J. Q.; Liu, J. F.; Zhai, T. Y.; Fang, Y. *Adv. Mater.* **2019**, *31*: 1808254.
- [3]. Wang, J. Q.; Shi, J. H.; Deng, X. L.; Xie, L. J.; Jiang, J. X.; Tang, J. Q.; Liu, J. F.; Wen, Z.; Sun, X. H.; Liu, K. Q.; Fang, Y. *Nano Energy* **2020**, *78*: 105348.
- [4]. Yang, Z. L.; Li, Y. G.; Shen, C. W.; Chen, Y.; Li, H. J.; Zhou, A. N.; Liu, K. Q. *Langmuir* **2021**, *37*: 14713.
- [5]. Deng, X. L.; Tang, J. Q.; Guan, W.; Jiang, W. H.; Zhang, M. M.; Liu, Y. K.; Chen, C. L.; Chen, C. L.; Li, Y. G.; Liu, K. Q.; Fang, Y. *ACS Nano* **2022**, *16*: 5303.
- [6]. Guan, W.; Jiang, W. H.; Tao, W. S.; Tang, J. Q.; Li, Y. G.; Peng, J. H.; Chen, C. L.; Liu, K. Q.; Fang, Y. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2023**, *62*: e202303506.
- [7]. Yang, R.; Li, Y. G.; Hua, C. X.; Sun, Y. H.; Li, H. J.; Wei, B. Z.; Dong, H. H.; Liu, K. Q. *Small* **2023**, *19*: 2307948.

致 谢: 感谢国家自然科学基金面上项目 (No. 22272100, 21872091, 21473110)、某重大专项、陕西省自然科学基金项目、中央高校重点与团队领军项目的经费支持。